

緑化困難地の造成植生基盤における
植物生育と土壌水分特性に関する研究

Characteristics of Plant Growth and Soil Water
on Artificial Bed Soil in Sparse Vegetation Areas

横 塚 享

1996

緑化困難地の造成植生基盤における
植物生育と土壌水分特性に関する研究

目 次

第1章	序 論	1
1.1	緒 論	1
1.2	本論文の構成	3
第2章	連続繊維緑化基盤の基本的特性	5
2.1	概 説	5
2.2	連続繊維緑化基盤工の概要	6
2.2.1	連続繊維緑化基盤工の概要	6
2.2.2	植生基盤の造成計画	11
2.2.3	肥料配合計画	11
2.2.4	種子配合計画（木本と草本の混播比率）	14
2.3	土壌団粒特性	14
2.3.1	団粒分析試験	14
2.3.2	土壌団粒特性	15
2.4	土壌の気相・液相・固相特性	19
2.4.1	試験の方法	19
2.4.2	三相分布特性	19
2.5	土壌の流亡（耐食性）特性	21
2.5.1	耐食性試験	21
2.5.2	土壌の流亡特性	23
2.6	要 約	25
第3章	砂斜面上の造成植生基盤における 植物生育と土壌水分特性	26
3.1	概 説	26

3. 2	試験装置と方法	26
3. 2. 1	試験施設の概要	26
3. 2. 2	調査の概要	29
3. 3	降雨遮断下における緑化植物の生育特性	31
3. 3. 1	大型ガラス室内の気象特性	31
3. 3. 2	降雨遮断下における緑化植物の生育特性	34
3. 3. 3	根系特性	39
3. 4	砂斜面における土壌水分特性	39
3. 4. 1	連続繊維緑化基盤の基本的特性	39
3. 4. 2	砂斜面における土壌水分特性	42
3. 5	要約	51

第4章 急傾斜切土法面の造成植生基盤における

	植物生育と土壌水分特性	53
4. 1	概説	53
4. 2	試験装置と方法	53
4. 2. 1	試験圃場の概要	53
4. 2. 2	調査の概要	57
4. 3	急傾斜切土法面における緑化植物の生育特性	59
4. 3. 1	試験圃場における気象特性	59
4. 3. 2	地山（急傾斜切土法面）特性	61
4. 3. 3	緑化植物の生育特性	61
4. 3. 4	根系特性	68
4. 4	急傾斜切土法面における土壌水分特性	72
4. 4. 1	連続繊維緑化基盤の基本的特性	72
4. 4. 2	急傾斜切土法面における土壌水分特性	77
4. 5	要約	81

第5章	急傾斜切土法面の	
	造成植生基盤における水分動態予測	83
5.1	概説	83
5.2	数値シミュレーションモデル	83
5.2.1	数値解法の基本式	83
5.2.2	計算条件	84
5.3	結果および考察	90
5.3.1	消費水量の評価	90
5.3.2	シミュレーションモデルの評価	92
5.3.3	シミュレーションによる	
	過去の干ばつ期の水分動態予測	98
5.4	要約	100
第6章	総括	103
	謝辞	107
	引用文献	108
	SUMMARY	111
	学術論文および参考論文	115

第 1 章 序 論

1. 1 緒 論

自然の保護・回復が、大きな環境問題として取り上げられている現在、それらを解決する一つの方法として、緑化が注目をあびている。実際、緑化は今日まで、国土の開発や整備により出現する広大な荒廃裸地に対する植生回復や斜面の防災などに、数多くの成果をあげてきている。

同時に、緑化は、従来のように単なる植生の回復だけでなく、景観の維持・周辺植生との調和などの緑化の質的な向上、さらに、ゆとりや潤いのある生活空間の創出など、幅広い課題に対する貢献が期待されている。これらは、山岳地における急傾斜切土法面や砂斜面、あるいは室内緑化や屋上・壁面緑化に代表される都市空間などの緑化困難地に対する緑化技術である。さらには、冠水地・降灰地や乾燥地などの特殊地における緑化技術の必要性も注目されているところである¹⁾。

緑化困難地としての都市空間の緑化は、都市における自然の再生を目標として、環境コントロール技術や維持管理技術の研究・開発が急務であろう。また、山岳地などの急傾斜切土法面および砂斜面などの緑化困難地においては、導入植物種の選定やそれに伴う造成植生基盤の改良など、緑化の質的な向上を主眼とした技術の研究・開発が必要とされている。

こういった観点から、本研究で取り上げた緑化困難地としての急傾斜切土法面や砂斜面の緑化においても、単に緑の量を増やすだけでなく、緑の持つ機能を多角的に生かす時期にきている。その一つの方法が、従来の草本主体の緑化から木本を主体とした緑化への転換であるとされる²⁾。従来行われてきた草本主体の緑化は、緑化困難地といわれるところでは、その永続性や植生の遷移などを期待することは難しい。また、急傾斜切土法面などでは、根系が十分発達

せず、植生基盤の崩落などの危険性が指摘されている。さらに、草本は法表面を不自然に被覆するため、周辺の自然と調和しにくいなどの問題がある。これに対して、木本の播種からの導入を計画する事例が多くなってきている。播種から導入された木本は、草本に比較して、①根系が法面崩落防止などの法面保護に適した形態を有していること、②山岳森林地帯では早期に周辺植生と調和すること、③景観的にも早い時点で違和感が薄れること、などが期待される。また、④肥料木などの導入によりやせ地などにも生育が容易であるとされる³⁾⁴⁾。

わが国においては、急傾斜切土法面などの緑化困難地を対象として、多くの緑化手法が開発・実用化されている。しかしながら、これらの手法の多くは、草本により緑地を造成することを目的としている。このため、植生基盤造成の主材料（基盤材料）として有機質（ピートモスなど）などを使用し、この基盤材料をセメントあるいは接着剤などにより圧縮硬化させて、法面に植生基盤を造成する。したがって、植生基盤の土壌硬度は一般に高くなり、また、アルカリ成分などの、植物の発芽や生育に有害とされる成分を混入させることになる。一般に木本は、草本に比較して土壌硬度などの影響を受けやすいとされ、播種から導入しても発芽・生育の確率が低くなる。一方、木本の発芽・生育を促進するために、セメントや接着剤の混入量を抑えた場合には、植生基盤自体の耐食性の低下が問題となる。

草本による緑化は、早期に法面（植生基盤）を被覆させ、緑の量を確保するとともに、降雨などに対して耐食性を向上させることを主目的としている。このため、初期生育が旺盛でしかも性質が強健な植物、主として、品質や価格が安定している外来草本が多く使用されてきた。しかしながら、これら草本と木本を混播させた場合、発芽・生育の遅い木本は草本に被圧されるため成立が困難となることが多い。一方、木本の単播は、生育が遅いことによる法面の無植生期間が長いこと、また、これによる法面侵食と土壌や種子の流亡

などが懸念される場所である。

したがって、木本を播種から導入するためには、植生基盤は耐食性に優れ、さらに、木本の発芽・生育に適した土壌構造を持つ必要がある。

連続繊維緑化基盤工による植生基盤の造成は、上記の目的に沿って開発された手法である。基盤材料として黒ボク土を主体とした客土材（植壤土）を用い、植生基盤の造成時に団粒させ、植生に適した土壌構造を確保する。また、耐食性の向上には、植生に無害な連続繊維を混入させているなどの際立った特徴を有している⁵⁾。これらのことから本研究では、植生基盤造成の手法として連続繊維緑化基盤工を対象とした。この手法によれば、造成される植生基盤は、団粒構造を有し、また、保水性および耐侵食性に優れているとされる。したがって、現在提起されている緑化困難地への木本の導入など、環境問題を含めた種々の緑化への課題に対処することが期待される。

この手法による緑化は、緩斜面や盛土法面への木本導入を目的とした利用に始まり、これまでに多くの実績を持つにいたっている。現在では、急傾斜切土法面・砂斜面などの緑化困難地への適用が図られており、また、初歩的な段階ではあるが、降灰地、冠水地などの特殊地への適用に向け、研究・開発が実施されているところである。

1. 2 本論文の構成

本研究は、緑化困難地への適用を図ることを目的とし、連続繊維緑化基盤工により造成された植生基盤の基本的特性を把握するとともに、そこに播種から導入された緑化植物の生育特性について検討している。また、これらの造成植生基盤における土壌水分特性が、導入植物に与える影響について実証的に検討したものである。これらの結果を踏まえて、急傾斜切土法面に造成された植生基盤におい

て、水分動態に関するシミュレーションモデルの提案を行い、この計算結果と圃場における実験結果との比較により、本モデルの評価と適用の可能性について検討した。

第2章では、本研究の対象とした連続繊維緑化基盤工の概略について述べる。また、この手法により造成された植生基盤について、その基本的特徴とされる団粒に関する特性および土壌の流亡特性について説明する。さらに、植生基盤を造成する場合の肥料配合および種子配合について適用の指針を示した。

第3章では、緑化困難地として砂斜面を試験対象に選定し、鳥取大学乾燥地研究センターの大型ガラス室内に試験施設を造成した。試験は、降雨遮断条件で灌漑条件下において実施した。ここに造成された連続繊維緑化基盤に、播種から導入された緑化植物について追跡調査を実施し、その生育特性に関する検討を行った。また、砂斜面に造成された植生基盤の基本的特性を明らかにし、さらに、土壌水分特性について検討した。

第4章では、緑化困難地として滋賀県米原町の急傾斜切土法面を試験対象地に選定した。この試験圃場の法面に連続繊維緑化基盤を造成し、導入された緑化植物の生育特性に関する検討を行った。また、急傾斜切土法面における土壌水分特性について検討し、土壌水分特性が緑化植物に与える影響について考察を加えた。

第5章では、植生基盤を造成する緑化の中で最も利用頻度が高い急傾斜切土法面を対象として、シミュレーションモデルの提案を行った。このモデルについて、近接する気象台のデータを利用し、造成された薄層の植生基盤において、水消費に伴う水分動態のシミュレーション解析を試みた。計算結果と試験圃場から得られた試験結果との比較・検討により、提案シミュレーションモデルの評価を行い、本モデルの適用の可能性について検討を行った。

第2章 連続繊維緑化基盤の基本的特性

2.1 概 説

緑化の質的な向上には、草本主体から木本主体の緑化への転換を図ることが必要とされる。これまでの緑化は、生育の早い草本により法面（造成された植生基盤）を被覆させ、早期に緑の量を確保するとともに、降雨などに対する耐食性を向上させることを目的としている。しかしながら、草本は、周辺植生との調和あるいは植生の永続性などの観点からみると、その効果は木本に比較して劣るとされる²⁾。

一方、木本は、草本に比較して発芽・生育が遅く、生育の早い草本の被圧により枯死する場合が多い。このため、播種から導入した木本を確実に成立させるには、初期生育の旺盛な草本の播種量を低減する必要がある。しかしながら、これにより植生基盤の耐食性を草本の被覆効果に頼ることが困難となる。耐食性の向上には、植生基盤自体の硬度を高めることが必要であるが、これは、植生基盤の本来の目的である植生に適した土壌構造などを犠牲にすることになる。

こういったことから、耐食性の向上と木本の発芽・生育に適した土壌構造という相反する性質を備えた植生基盤の研究・開発が求められるところである。

連続繊維緑化基盤工は、上記の目的に沿って開発された手法であり、造成された植生基盤は、①土壌を団粒させることにより植生に適した土壌構造を有していること、②ポリエステル製連続繊維の3次元的な混入により耐食性の向上が図られていること、などの主要な特徴がみられる⁵⁾。これらの特徴は、木本の播種からの導入および連続繊維緑化基盤を緑化困難地などに適用するにあたっての基本的要素であると考えられるため、この植生基盤の団粒特性・三相分布特性および造成植生基盤の耐食性（土壌の流亡特性）などに関し

て、以下にこれまでの基礎的試験結果を踏まえて説明する。

2. 2 連続繊維緑化基盤工の概要

2. 2. 1 連続繊維緑化基盤工の概要

(1) 緑化工法の分類

現在までに、わが国において、開発または実用化されている緑化工法（植生工）を大別すると、機械施工による緑化工法と人力施工による緑化工法に分類される（Fig. 2-1）⁶⁾。機械施工による緑化工法は、植生基材吹付工と呼ばれ、これらは、種子散布工と厚層基材吹付工とに分けられる。種子散布工は、一般に植生基盤の造成を伴わず、種子と肥料・ファイバー類などを水に混合し吹付ける手法である。この手法は、盛土法面や緩傾斜法面などの一般緑地を対象として、草本主体の緑化を図るものである。前述のように緑化困難地を対象として開発・実用化された手法の多くは、厚層基材吹付工に分類され、本研究で取り上げる連続繊維緑化基盤工もこの厚層基材吹付工に分類される⁷⁾。

ここで、一般緑地とは、盛土法面や緩傾斜法面を対象として分類した。緑化困難地とは、急傾斜切土法面に代表される硬岩・軟岩などで構成される切土法面、保水性の極めて低い砂斜面などとし、地山条件や勾配あるいは気象条件などの周辺環境により、緑化が困難とされる場所とした。また、造成植生基盤の物理的・化学的劣化をとまなう、冠水地・降灰地あるいは乾燥地などを緑化の特殊地とした。

(2) 連続繊維緑化基盤工の概要⁸⁾⁹⁾

連続繊維緑化基盤工による緑化は、盛土法面・緩傾斜法面への木本導入を目的とした利用に始まり、現在では、急傾斜切土法面・砂斜面などの緑化困難地への適用が図られ、多くの実績を持つにいたっている。また、初歩的な段階ではあるが、降灰地や冠水地などの

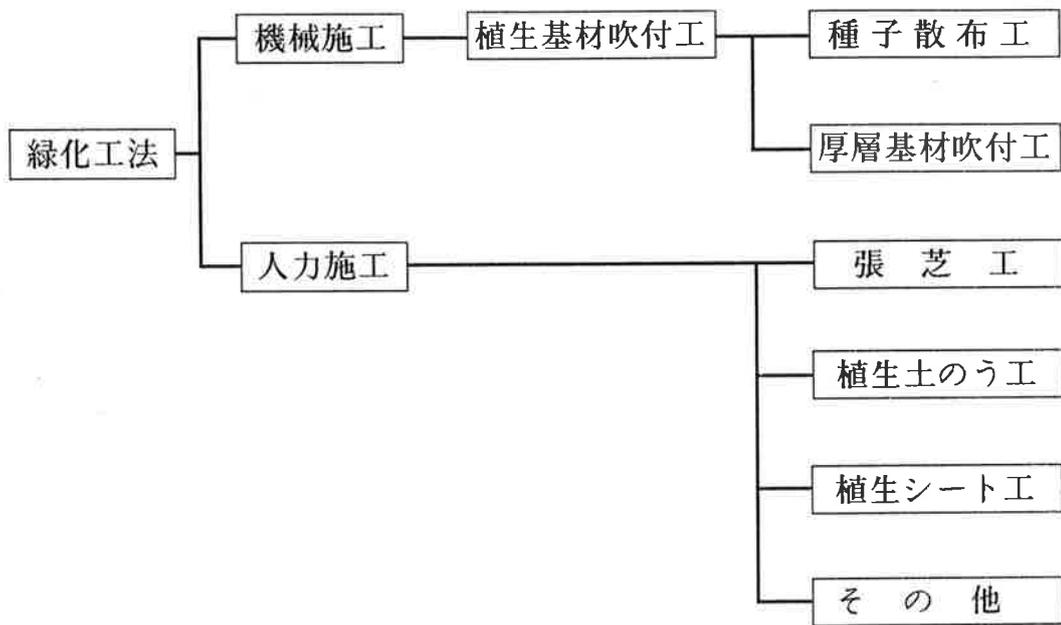


Fig. 2-1 緑化工法の分類

特殊地への適用に向け、研究・開発が実施されているところである。Fig.2-2 に、これまでの連続繊維緑化基盤工に関する実用化のフロー図を示した¹⁰⁾。

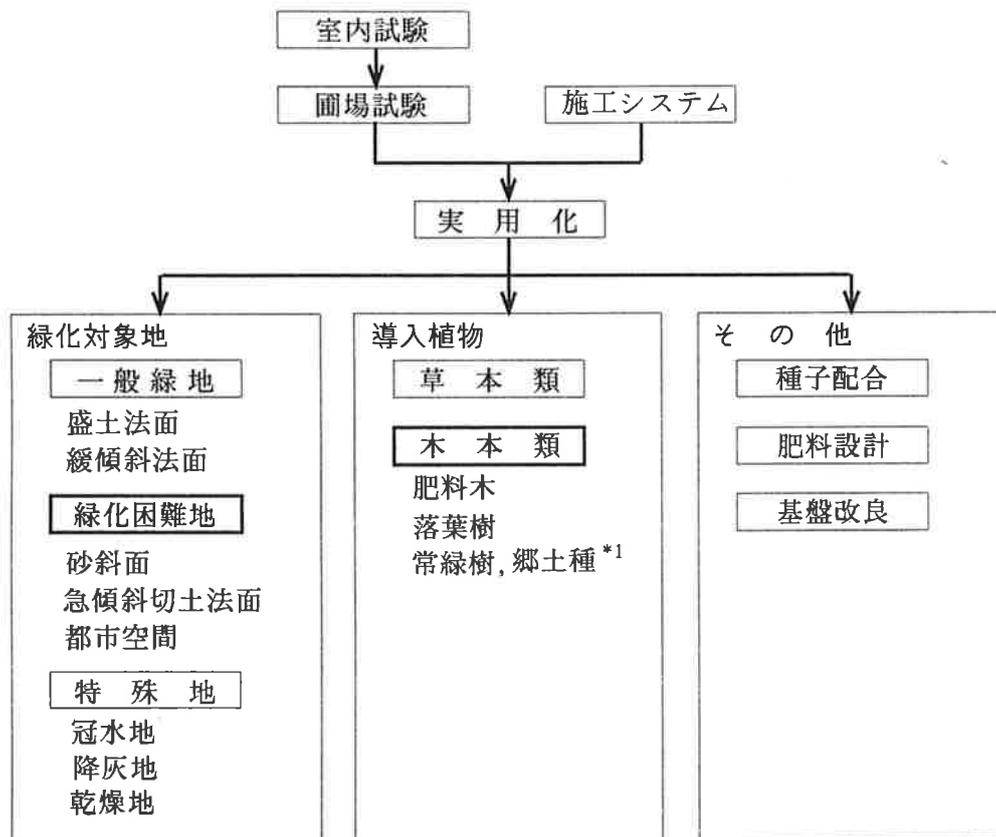
連続繊維緑化基盤工は、黒ボク土を主体とした客土材を用い、これを水と混合し泥状化させたものに、所定の高分子凝集剤（以下、団粒剤と称す。）を添加し、凝集（団粒）させながら吹付ける。さらに、ポリエステル製の連続繊維を吹付け時に混入し、耐食性を向上させて植生基盤を造成する手法である。Table 2-1 に使用材料、Fig.2-3 に連続繊維緑化基盤工の造成システムを示す¹⁰⁾。

使用する客土材に水を加えて泥状化させた場合、その運搬は、スラリーポンプなどにより容易に行うことができ、広範囲な場所への植生基盤の造成が可能となる。この客土材の泥状化による植生基盤の造成方法は、広大な面積への適用や施工の機械化に不可欠と考えられる。しかしながら、この状態で造成された植生基盤は、土壌構造が劣悪であり、また、降雨などに対する耐食性にも劣り、緑化植物の植生基盤としての利用価値は低い。

Table 2-1 使用材料の標準配合（植生基盤 1 m³当たり）

材 料 名	単 位	使 用 量
客 土 材	㎥	625.0
肥 料・養 生 材	〃	240.0
安 定 剤	〃	22.5
水(客土材用)	〃	500.0
団 粒 剤	g	150.0
水(団粒剤用)	㎥	75.0
連 続 繊 維	g	440.0以上

このため、急傾斜切土法面や砂斜面などの厳しい植生条件下で、



*1. 郷土種：その地方の気候や立地条件に適応して、自然状態で広くその地方に分布する植物

Fig. 2-2 連続繊維緑化基盤工に関する実用化研究のフロー

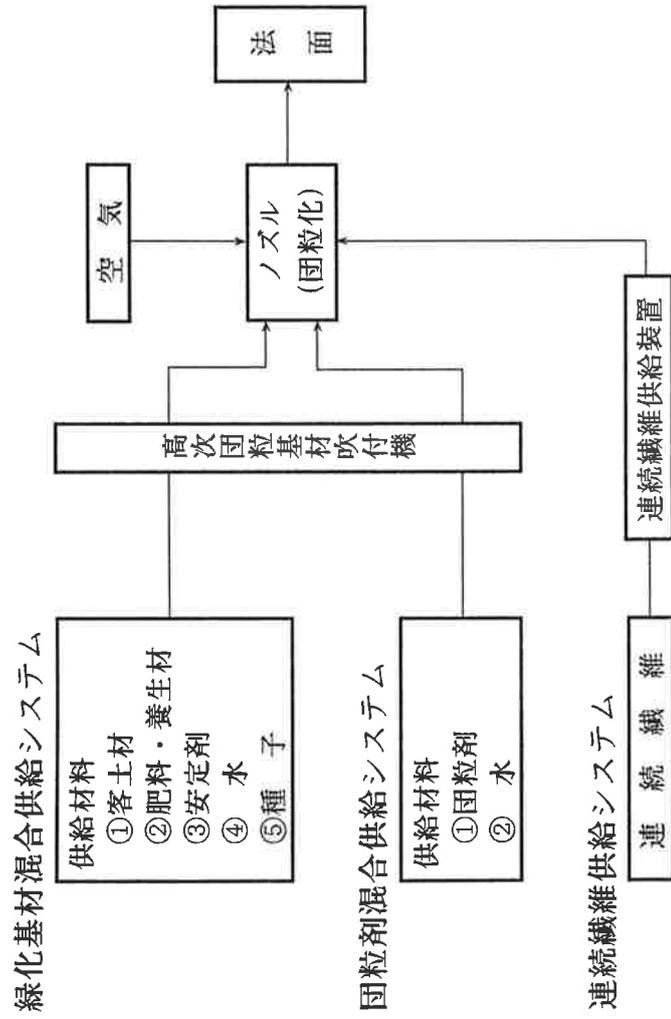


Fig. 2-3 連続繊維緑化基盤工の造成システム

植生基盤として利用するためには、土壌構造の改良が必要である。連続繊維緑化基盤工は、団粒剤の添加混合により、植生に適した植生基盤に改良し造成している。

連続繊維緑化基盤は、連続繊維の混入と団粒構造の効果的な組み合わせにより、植生基盤自体の耐食性を向上させ、導入種子や土壌の流亡を防止する。一方、団粒構造を有する植生基盤土壌は、その保水性や保肥性に優れるとされ、急傾斜切土法面や砂斜面などの緑化困難地における適用に有効と思われる。また、これらの植生基盤の改良により、従来緑化手法では困難とされてきた、播種からの木本の導入に効果を持つことが期待される。

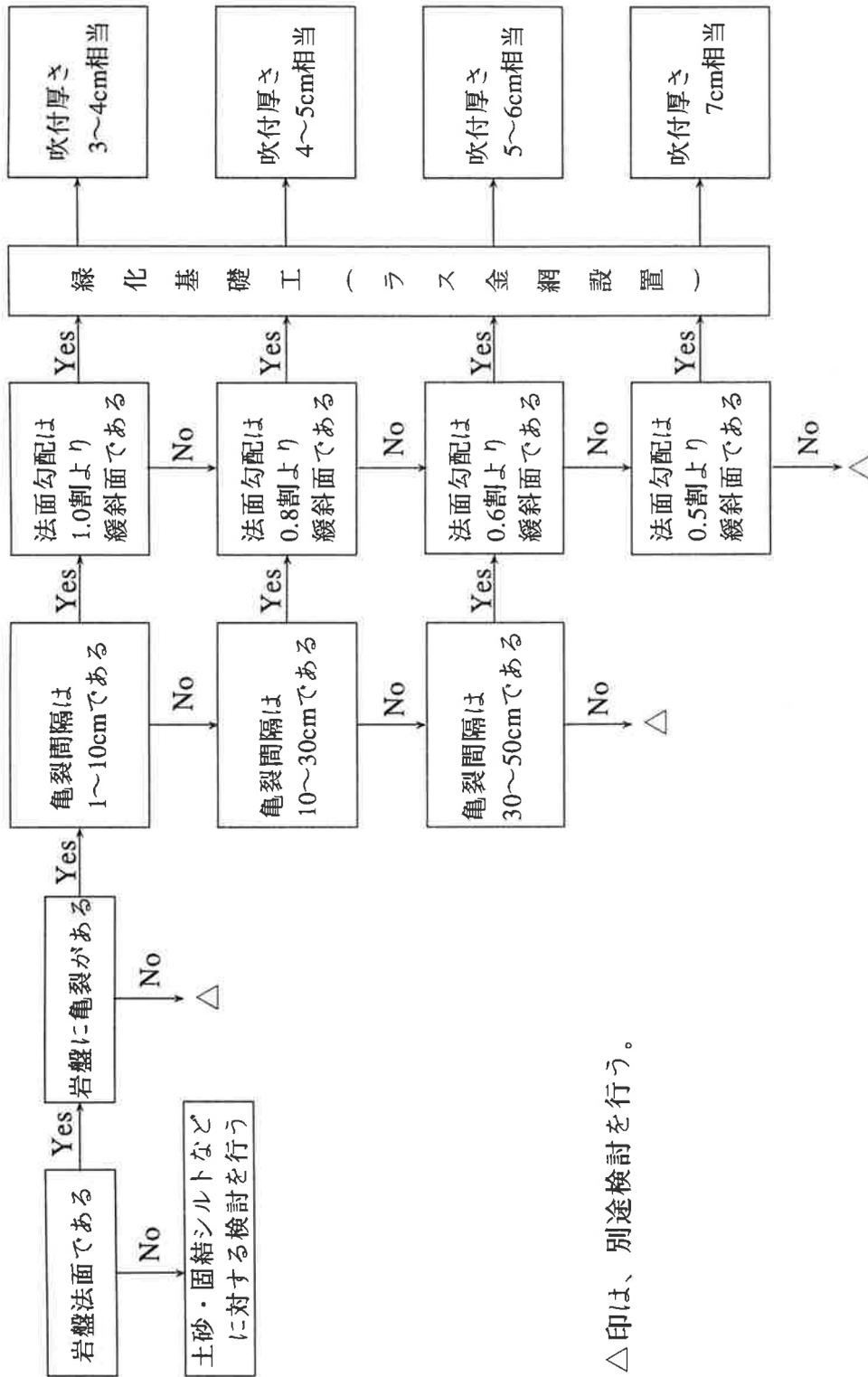
2.2.2 植生基盤の造成計画¹¹⁾

連続繊維緑化基盤工は、植生基盤を造成する手法であることから、厚層基材吹付工に分類される。植生基盤の造成の計画にあたり本手法では、これまでの緑地の造成実績に基づき、Fig.2-4 に示すフローチャートにより吹付け厚さの検討を行っている。

造成の手順は、①法面清掃、②緑化基礎工、③材料調合および管理試験、④植生基盤吹付け、の順序で行う。法面清掃は、緑化基礎および植生基盤の定着を促すために行う。緑化基礎工は、ラス金網を用い、通常、法面勾配1：1.0より急な斜面に植生基盤を造成する場合に、その滑落などを防止する目的で設置する。

2.2.3 肥料配合計画¹¹⁾

外来草本は、特に窒素肥料の消費量が大きい植物である。緑化工によって導入したこれらの草本を、同じような生育状態で永続的に保つには、追肥などの管理が必要となる。一方、木本の中には、少量の肥料分で自ら空気中の窒素を固定し、根系の侵入領域さえあれば、生育が期待できる肥料木などがあり、やせ地などへの導入が図



△印は、別途検討を行う。

Fig. 2-4 岩盤法面の吹付厚さ検討のフローチャート

られている。これらの樹種を導入するには、多量の肥料分は有害となる場合が多く、稚苗が枯損したり、あるいは根粒菌活動が抑制され生育が不良になる場合もある。また、急傾斜切土法面のよう肥料分の少ない斜面への、多量の肥料を含む植生基盤の造成は、植物が生育障害を起こすこともある。これらの解決策として、経年的に養分が分解される有機質を含む植生基盤を造成することが望ましいとされている¹²⁾。なお、根粒菌などに活性を与え、肥料木の生長を促すものとして、アルギン酸ソーダ系の土壌活性剤がある。これらにより、木本と草本の混播が容易になる。

連続繊維緑化基盤工において使用する肥料・養生材の標準配合をTable 2-2 にを示す⁵⁾。

Table 2-2 肥料・養生材の標準配合（植生基盤材 1 m³ 当たり）

材 料 名	単 位	使用量	備 考
化成肥料	kg	10.0	N:P:K=8:8:8
熔成リン肥	〃	10.0	く熔成リン酸 2.0kg含
植物性繊維	〃	20.0	
土壌活性材	〃	5.4	

この肥料・養生材の標準配合は、これまでの実績をもとに計画されたものであり、造成初期における肥料成分としての化成肥料、土壌改良材および長期的な肥料成分としての熔成リン肥（く溶性リン酸：重量比22.0%を含む）、アルギン酸ソーダ系の土壌活性剤を混合している。また、緑化基材の泥状化時における肥料成分の沈澱防止を目的に、植物性繊維を混入する。

2. 2. 4 種子配合計画（木本と草本の混播比率）

木本を導入して緑化を行う場合、草本との混播比率は、木本の発芽・生育に大きく影響する。これは、草本と木本の発芽・生育速度の違いにより、草本が造成初期に繁茂し、発芽・生育の遅い木本を被圧することによる。また、自然斜面などに生存している植物の個体数は、草本が 500本/m²以下（株化するものでは50株/m²以下）、木本のうち低木は、1～3本/m²、高木は1本/10m²以下であるとされる¹²⁾。このような自然斜面に近い緑地を再生するためには、各手法において木本と草本の混播比率による生育状況の違いを調査しておく必要がある。これらのことを踏まえて、連続繊維緑化基盤工における種子配合は、草本の発生期待本数を 500～1,000本/m²に抑え、木本の発生期待本数を1,000～1,500本/m²程度に設定している。

2. 3 土壌団粒特性

2. 3. 1 団粒分析試験¹³⁾¹⁴⁾

水中フルイ分け法により植生基盤土壌の団粒分析を行った。分析試料は、連続繊維緑化基盤工により造成された植生基盤から採取した。また、材料として使用した客土材（大分県産）についても、同様に団粒分析を行った。なお、客土材の泥状化に際しては、機械攪拌を十分に行い 0.1mm以下の団粒を破壊した後、団粒剤を添加して使用した。分析試料の採取時期は、造成直後（3日後）・1週間後・1か月後および6か月後である。また、植生基盤には植物を導入しておらず、いずれの時期においても採取基盤に植物は成立していない。

対象とした森林土壌は、滋賀県山東町および伊吹町において深さ0～10cmおよび30～40cmの土層から採取した。

水中フルイ分け条件は次の通りである。

- ①分析フルイ網目：2.0mm、1.0mm、0.5mm、0.25mm、0.1mm
- ②上下可動振幅：2 cm
- ③振とう速度：18 r/min
- ④水中フルイ分け時間：60分

水中フルイ分け後、各フルイ目ごとに風乾して試料を取り出し、さらに、100℃で炉乾燥後に重量を測定した。これにより0.1mm以下の粒径について団粒化度を算出した。

2.3.2 土壌団粒特性

植生基盤造成のために使用した客土材の粒径加積曲線をFig.2-5に示した。この図から、客土材の0.1mm以下の粒子は、全体の約70%を占めていることがわかる。

Fig.2-6は、泥状化させる前の客土材と、造成された植生基盤の団粒化度の平均値を比較したものである。これらの結果から、いずれの場合も、0.1mm以下の粒径に対する団粒化度は、60%～70%の範囲内にあることが示されている。特に、団粒剤添加後の土壌の団粒化度は、自然に採取できる土性の類似した森林土壌と同程度の値をとると判断でき、その土壌構造の改良効果が推察されるところである。また、団粒化度は、植生基盤造成後の経過時間により減少する傾向がみられるが、これは、植生基盤自体の収縮による団粒構造の破壊、あるいは降雨などによる土壌の流亡などが原因として考えられる。しかしながら、このような条件下においても、団粒化度は60%以上の値を示しており、6か月程度はその改良効果が持続していると思われる。Fig.2-6には、参考として日本において採取される二、三地域の黒ボク土について、その団粒化度を示した。

今回の試験において団粒剤の混入率は、客土材の粒径0.1mm以下の乾土重量に対して0.1%とした。Fig.2-7に示すように団粒剤の混入率を増加させれば、団粒化度は高くなり、また、団粒径は大き

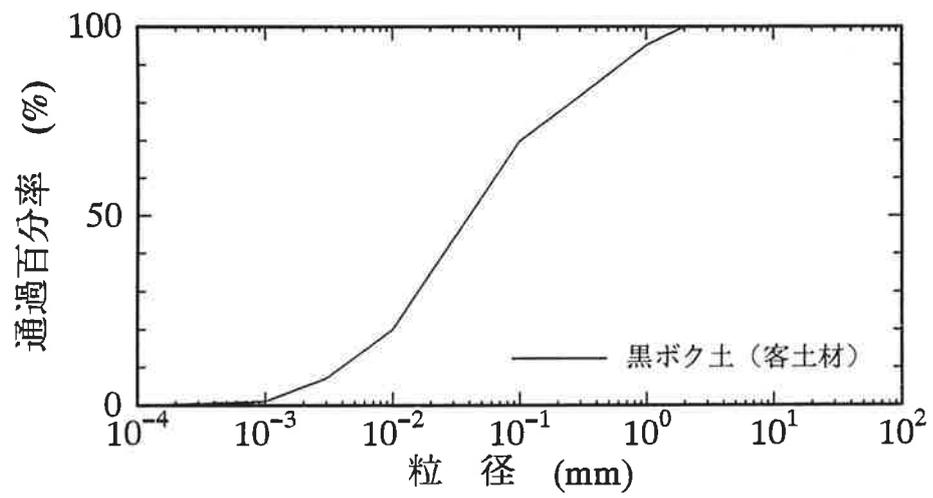


Fig. 2-5 黒ボク土（客土材）の粒径加積曲線

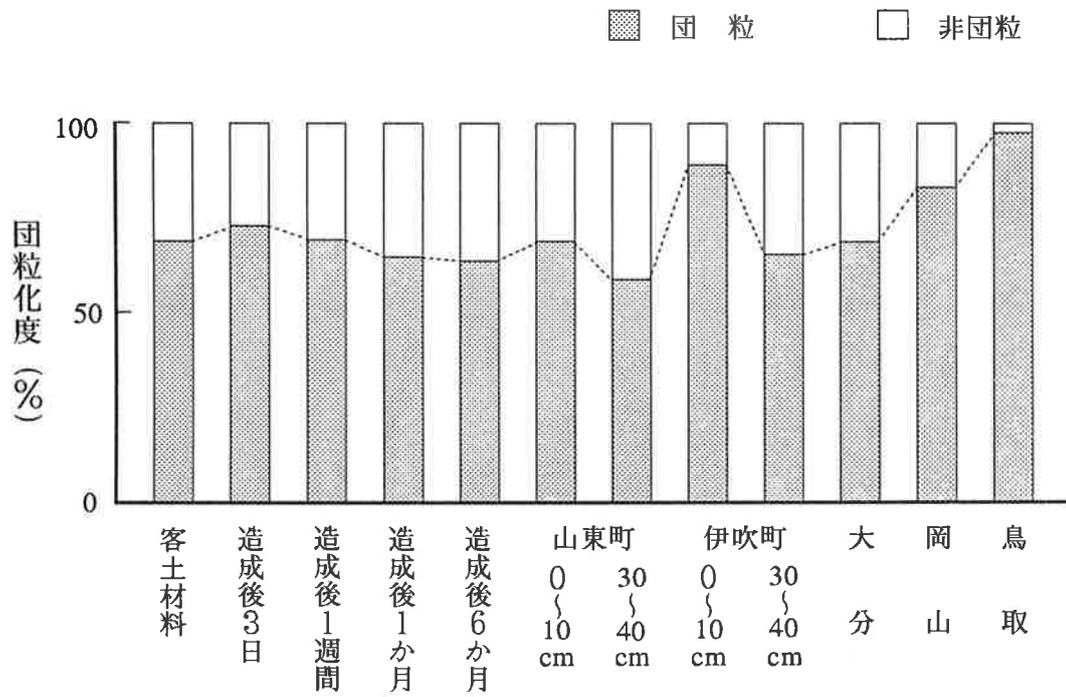


Fig.2-6 団粒化度の比較

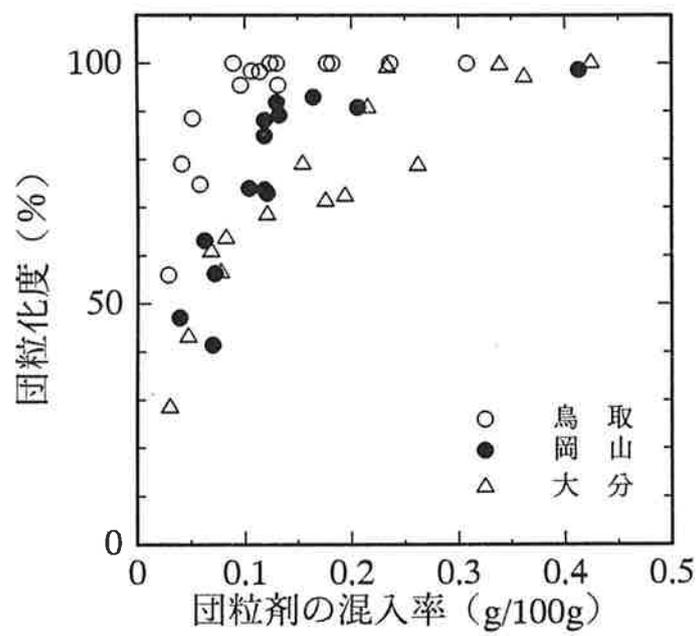


Fig. 2-7 団粒剤の混入率と団粒化度

くなる傾向を示す。しかしながら、過度の混入は経済性の面などから抑えることが必要であり、自然界の森林土壌と同程度まで改良されれば、植生基盤としての利用が容易であると思われる¹⁵⁾。

2. 4 土壌の気相・液相・固相特性

2. 4. 1 試験の方法

対象試料は、団粒分析試験の場合と同様に、連続繊維緑化基盤工により造成された植生基盤から採取した。なお、植生基盤の造成厚さが薄いため（造成厚さ7cm）50ccの採土器を用いて採取した。採取時期も同様に、造成後3日、1週間、1か月および6か月の4種類である。また、対照区の森林土壌については滋賀県山東町および伊吹町を選定し、100ccの採土器を用いて試料を採取した。

2. 4. 2 三相分布特性

Fig.2-8 に三相分布の試験結果を示す。気相率と液相率に関しては、水分の蒸発散・移動などにより、測定時期によって変化しているが、固相率に関しては、概ね20%～30%（平均26.1%）の範囲内にあることがわかる。

また、対照とした滋賀県の2地域の三相分布試験結果は、山東町の試料では、固相率27.7%、液相率37.8%、気相率34.5%であり、伊吹町の試料では、それぞれ17.7%、49.2%、および33.1%であった（Fig.2-8）。

日本における一般的な森林土壌での固相率は、20%～30%を示し40%を越えることは少ないとされる。また、北海道東南部・東北・関東・九州の台地上によくみられる火山灰起源の黒ボク土では、固相率が15%以下になる場合もあることが報告されている¹⁶⁾¹⁷⁾¹⁸⁾。

これらのことから判断すれば、連続繊維緑化基盤工により造成さ

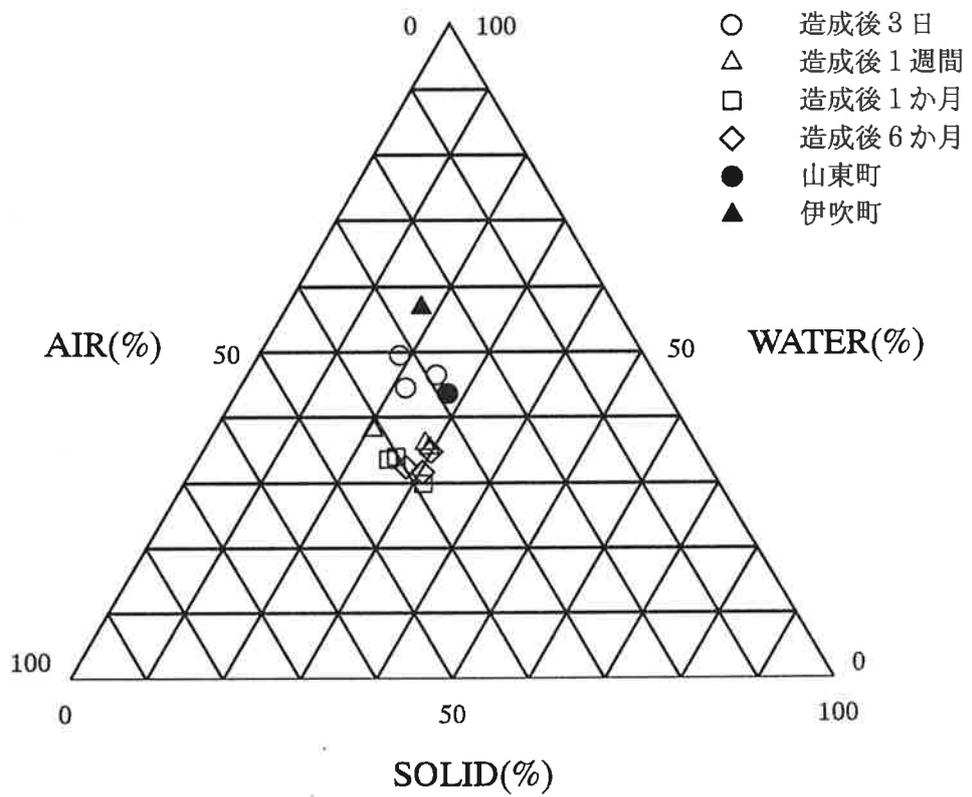


Fig. 2-8 供試体における三相分布の比較

れた植生基盤の三相分布に関して、その固相率は、対照とした自然の森林土壌とほぼ同程度の値を有していることが示され、木本導入に適した範囲内にあることが推測される。また、緑化困難地への適用の可能性を有しているものと考えられる。

2. 5 土壌の流亡（耐食性）特性

2. 5. 1 耐食性試験

試験は、80cm×1,760cm（45度の傾斜角で設置した場合の投影面積が1㎡となる。）の供試体を作成して実施した。植生基盤の造成厚さは、急傾斜切土法面などの緑化困難地において、使用頻度が高いと思われる7cmとした。試験方法の概略を、Fig.2-9に示した。

供試体は、連続繊維緑化基盤工により土壌を団粒させて造成した植生基盤（TG区）、連続繊維を混入せずに団粒させて造成した植生基盤（SF区）および通常の方法による植生基盤（対照区）の3種類とし、試験時期は、作成後3日・1週間・1か月および6か月とした。試験は、降雨装置により行い、その流失土量を測定した。植生基盤自体の耐食性を確認する目的のため、いずれの試験区も植物は導入していない。試験条件を以下に示す。

- ① 植生基盤供試体の設置傾斜角：45度（1：1）
- ② 降雨強度：100mm/hr
- ③ 落下高さ：5m（雨滴径：2mm）
- ④ 降雨継続時間：60分
- ⑤ 流失土量測定時間：10分毎

また、同一の供試体において、おのこの作成後3日・1週間・1か月および6か月の経過時間ごとに土壌硬度を測定した。測定は山中式土壌硬度計を使用し、3回の平均値を求めた。

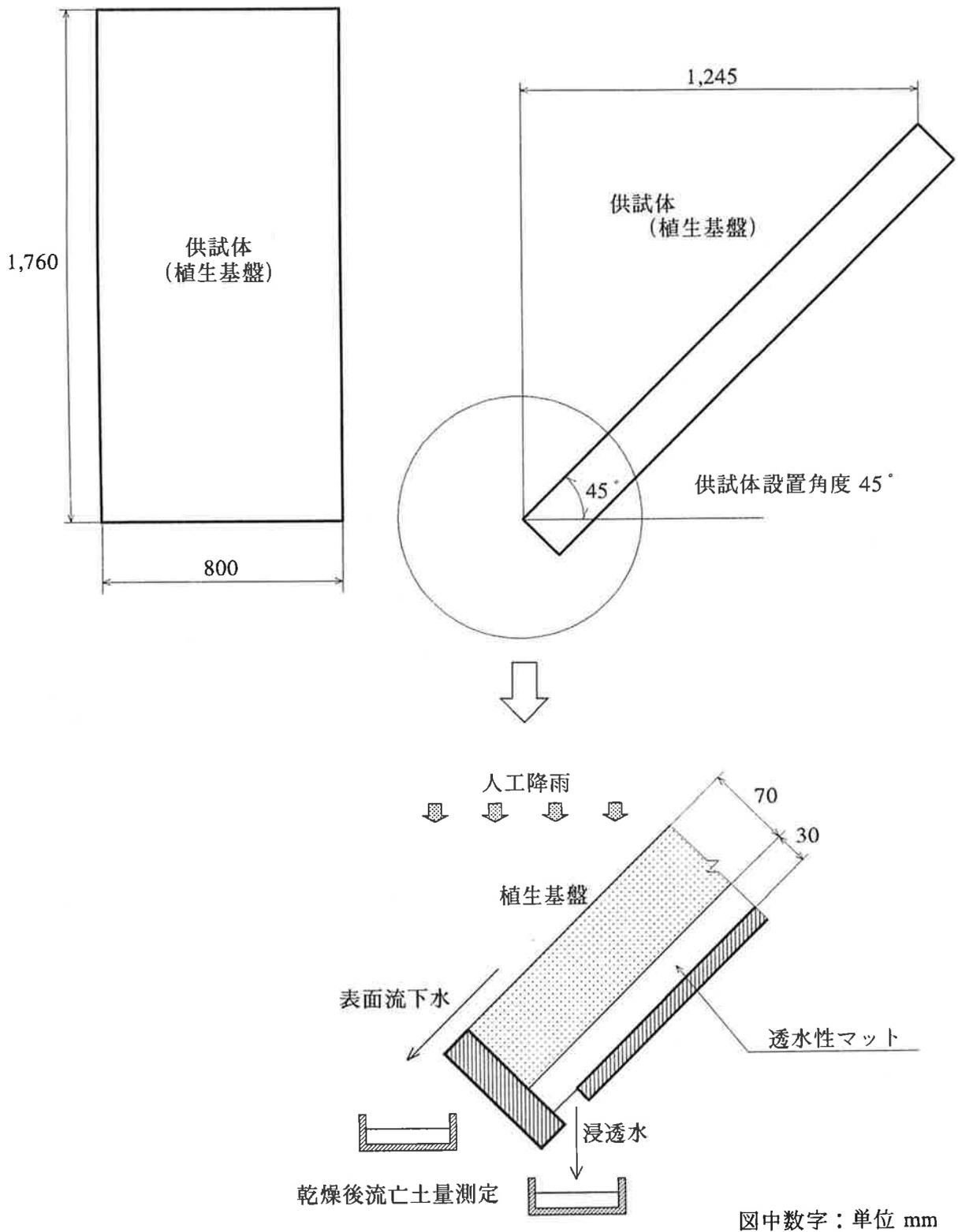


Fig. 2-9 耐食性試験の概要

2. 5. 2 土壌の流亡特性

Fig.2-10は、各供試体の作成後の経過時間と単位面積（1 m²）あたりの流失土量（乾土量）の関係を示したものである。

作成3日後においては、各供試体とも比較的土壌の流亡がみられるが、TG区・SF区は対照区に比較すればその差は顕著であり、土壌流失量は厚さに換算して1 mm以下に相当する土量にとどまり、十分な耐食性を有していると判断できる。

また、TG区・SF区とも土壌流亡は作成後の時間の経過とともにほとんどなくなる。作成後1か月の時点でほぼゼロになり、土壌の流亡は止まる傾向にある。これに反して対照区は、土壌の流亡は止まらず、植生基盤の機能を維持できなくなることが推測される。このことは、連続繊維緑化基盤工により造成された植生基盤は、少なくとも6か月程度は安定であること示す。また、作成後1週間程度では、通常の間降雨量30mm以内では侵食されにくいことを示唆している¹⁹⁾²⁰⁾。

TG区とSF区の違いは、連続繊維の混入の有無であり、この二つの試験結果から、連続繊維混入の効果が明かである。これによれば、連続繊維の混入効果は、特に、植生基盤造成の初期に及ぼす影響が顕著である。したがって、発芽・生育の遅い木本の種子を混播し成立を図る場合には、その植生基盤の耐食性を草本の被覆効果に頼る必要が少ない。このため草本の播種量を低減させ、草本の被圧による木本の枯死を防止することが期待される。

Fig.2-11には、各供試体における土壌硬度の推移を示した。一般に植物の根系の土壌中への侵入が妨げられる土壌硬度の限界値は、粘性土の場合は23mm、砂質土では25mmとされる⁴⁾。対照区は、作成後1週間を経過した時点で、土壌硬度は20mmをを越え、1か月を経過した時点ではすでに24mmに達している。一方、TG区およびSF区においては、6か月を経過しても土壌硬度は、15mm前後の値を示している。これらの結果から、単に粘性土のみを吹付け植生基盤を

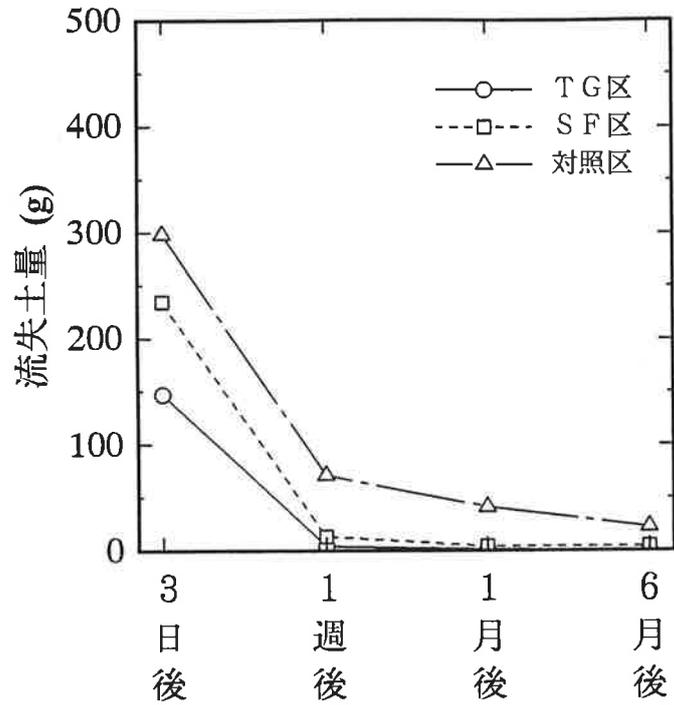


Fig. 2-10 経過時間と単位面積当たりの流失土量

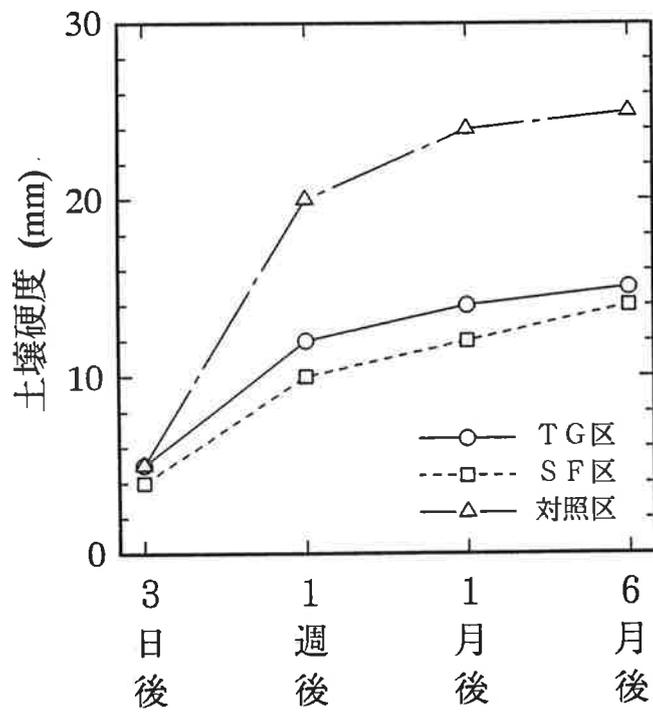


Fig. 2-11 土壌硬度の推移

造成した場合においても、土壌硬度は根系の侵入限界値を越える可能性があることを示している。TG区およびSF区は、対照区との比較により、土壌硬度が適正範囲に、6か月までは安定していることが確認された。

2. 6 要 約

本章では、連続繊維緑化基盤工の概要とこの手法により造成された植生基盤の基本的特性について説明した。

①植生基盤土壌の基本的な物理特性のうち、団粒化度・三相分布および土壌硬度において、連続繊維緑化基盤は、ここで取り上げた自然の森林土壌と同程度の数値を有している。

②また、6か月間の経時変化による試験においても、これらの測定値は、植生に対して好適と思われる範囲内にあり、安定していることが明らかになった。

③降雨などに対する土壌流亡（耐食性）試験に関しては、連続繊維緑化基盤の優位性が明らかであり、特に、連続繊維の混入効果は、植生基盤の造成初期において顕著である。これは、連続繊維を混入して造成された植生基盤は、その造成初期において、草本による早期の被覆効果に頼る必要がなく、木本を被圧する草本を低減できることを示している。また、導入種子の流失防止にも貢献していると思われ、木本の播種からの導入に有効であると判断される。

これまで連続繊維緑化基盤は、盛土法面や緩傾斜法面などの一般緑地においては、草本を始めとして肥料木の導入など多くの実績を持つにいたり、その有効性は明らかになっているものと考えられる。本章で述べたように、連続繊維緑化基盤は、基本的物理特性に優れており、また耐食性が向上していることなどから、木本の発芽・生育に有効であり、今後緑化困難地といわれる急傾斜切土法面や砂斜面などへの展開が期待される場所である。

第3章 砂斜面上の造成植生基盤における 植物生育と土壤水分特性

3.1 概 説

今日まで、盛土法面や緩傾斜法面などの一般緑地における緑化事例や、そこに導入された草本などの植物に関する幅広い研究がなされている。しかしながら、緑化困難地に造成された植生基盤の研究や、そこに播種から導入された木本の生育に関する研究は例が少ない。また、植物生育にかかわる植生基盤などの土壤水分特性に関する研究例も少ない。

本章では、砂斜面を対象として、連続繊維緑化基盤工により植生基盤を造成し、緑化困難地における連続繊維緑化基盤の適用の可能性について検討を試みた。砂斜面は、保水性や耐食性などに劣り、前述の一般緑地と比較すれば、植生環境は劣悪と考えられる。ここでは、砂斜面上に造成された連続繊維緑化基盤に、播種から導入された緑化植物の生育特性について、追跡調査を実施して検討を加えた。また、緑化困難地である砂斜面上に造成された連続繊維緑化基盤の基本的特性について検討するとともに、保水性の高い植生基盤を砂斜面上に造成した場合の、植物の水消費と土壤水分環境などについて考察を加えた。

3.2 試験装置と方法

3.2.1 試験施設の概要

(1) 試験区の設定

試験施設は、鳥取大学乾燥地研究センターの大型ガラス室内に砂丘砂を利用して設置造成した。試験は降雨遮断条件において灌漑条件下で実施した。

試験区は、南斜面試験区（S 1～S 6区）と北斜面試験区（N 1～N 6区）の12試験区から構成され、各試験区の傾斜角はいずれも20度、面積は1.80m×2.90m（投影面積1.80m×2.75m）である。また、各試験区間の境界は、防水パネルを現地盤より深さ90cmまで埋め込み、試験区外への水分移動を抑制した。埋め込みパネルより深い砂層においては、砂の側方浸潤距離は小さいので、灌漑水の側方移動が無視できるものとした。試験区の概要は、Fig.3-1 に示す通りである。

これら12の試験区を、砂丘砂のみによる試験区（砂試験区：S 2・S 3区およびN 2・N 3区）、連続繊維緑化基盤工により植生基盤を砂斜面上に造成した試験区（TG試験区：S 1・S 4・S 5区およびN 1・N 4・N 5区）および造成された植生基盤上をさらに砂マルチした試験区（砂マルチ試験区：S 6区およびN 6区）の3種類に分けた。

これらの試験区の内、イタチハギ (*Amorpha fruticosa*: S 5・S 6区およびN 5・N 6区) およびケンタッキー31フェスク (K 31F) (*Festuca elatior*: S 3・S 4区およびN 3・N 4区) の植物を導入した試験区を植生区とした。また、植物を導入しない試験区を裸地区とした (S 1・S 2区およびN 1・N 2区)。

(2) 植生基盤の造成

植生基盤の造成にあたっては、第2章に示した連続繊維緑化基盤工の手順に従い行った。主材料としては、大分県産の客土材（黒ボク土）を使用した。客土材には水を加え、攪拌機により十分攪拌して泥状化させ、0.1mm以下の団粒を破壊して植生基盤の造成に使用した。この泥状の客土材に、団粒剤を添加混合し、団粒構造を有する基盤に改良し砂丘砂上に造成した。植生基盤の造成厚さは、いずれの試験区とも10cmとした。また、砂マルチ試験区における、初年度および2年目の砂マルチ厚さは3cmとし、3年目は砂マルチの効果を高めるため、厚さを5cmとした。

造成時期は、播種の適期であることおよび7月の試験開始時に植

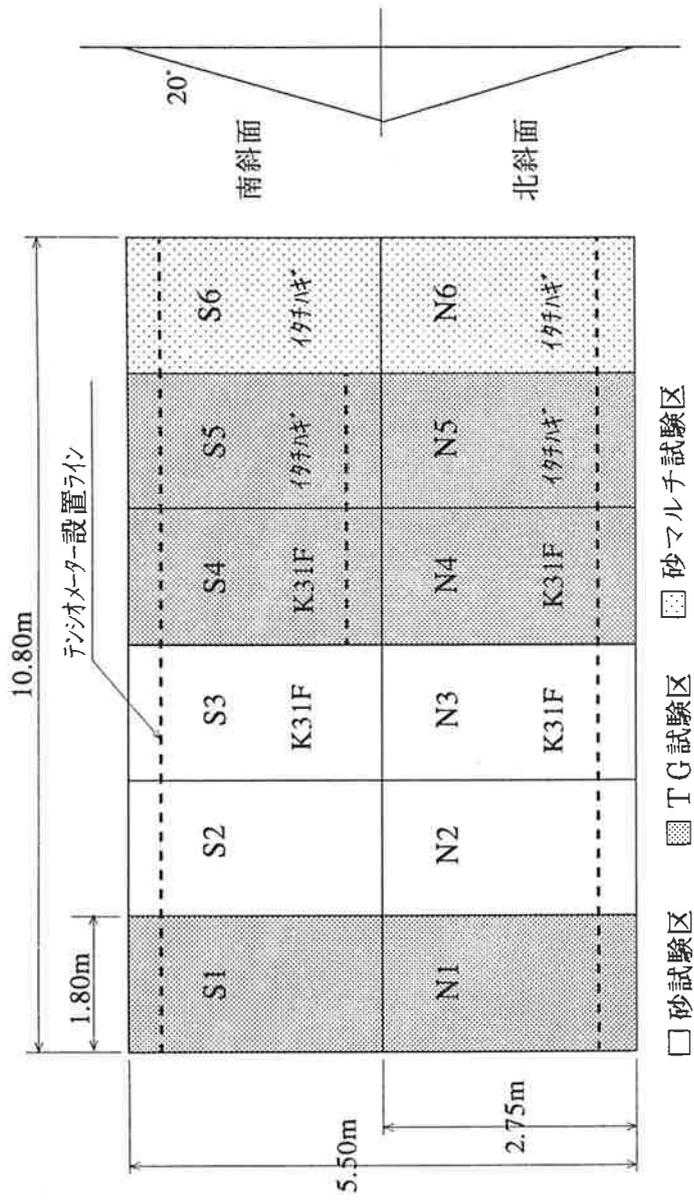


Fig. 3-1 試験施設の概略

物が成立していることを前提として5月とした。導入植物は、前述のようにイタチハギとK31Fを使用した。播種量は、イタチハギが 46.3 g/m^2 、K31Fが 13.0 g/m^2 である。また、植生区であるTG試験区・砂マルチ試験区とも造成される植生基盤内に、標準配合としての化成肥料(N:P:K=8:8:8)および熔成リン肥を 10 kg/m^3 混入した。この結果、10a当たりの窒素施用量は8kgとなる。砂試験区の植生区においても、斜面表面から厚さ10cmの砂層内に同量の肥料を混入した。

(3) 灌漑計画

灌漑はマイクロ灌漑法を適用した。初年度は多孔管チューブ、2年目、3年目はいずれもバイウォールチューブを用いた。バイウォールチューブは、2年目は斜面上に2本、3年目は1本とし、できるだけ斜面全面に水が分布できるように設計した。また、初年度の灌漑水量・間断日数の決定にあたっては、「土地改良事業計画設計基準」および鳥取における畑地灌漑実績を参考にして、3日間断15~20mmを基本とした。灌漑回数を減らすことを目標に、2年目・3年目は、初年度の実験結果を参考にし、それぞれ7日間断35mm、14日間断70mmとした。

3. 2. 2 調査の概要

(1) 気象調査

露地の気象は、気温・湿度・地温・蒸発量などについて、本研究センターの気象露場のデータを利用した。

大型ガラス室内における気温・湿度は、斜面上部からの高さ約1.0mの位置で測定した。

地温は、TG試験区では地表面からの深さ5cmの植生基盤内と深さ10cmの砂丘砂層内で測定した。また砂マルチ試験区では植生基盤内(地表面からの深さ10cm)および砂丘砂層内(深さ15cm)において測定した。測定はいずれも、熱電対式温度計を設置しデータログ

により記録させた。

蒸発量の測定には、直径 200mmの小型蒸発計を使用した。設置位置は、北斜面および南斜面の各々上部・中部・下部の6か所と平坦部に2か所の合計8か所とし、毎日定時に測定した。

また、日射量は、北斜面、南斜面においてそれぞれ適宜に測定した。

(2) 植生基盤の土壌調査

造成された植生基盤の基本的な土壌特性を把握するため、三相分布および団粒化度について測定した。

三相分布については、植生基盤造成時に試料を50ccの採土器を用いて採取測定した。また、経時変化は、基盤造成後1年および2年目に、同様な方法にて試料を採取測定し、あわせて、乾燥密度を算出した。

団粒化度は、水中フルイ分け法により 0.1mm以下の粒径についての団粒化度を求めた。水中フルイ分けの条件は、第2章と同様である。

(3) 土壌水分量の測定

土壌のマトリックポテンシャルは、テンシオメータにより毎日定時に観測した。テンシオメーターは、法尻より斜面上方35cmおよび255cmの位置に、深さ5cm、15cm、25cm、35cmに設置した。また、植生区においては植物による深層部での水消費を想定し、深さ50cm、70cm、100cmにも設置している。また、採土法によって深さ別の土壌水分を測定した。

(4) 植生調査

地上部の生育状況に関する調査は、初年度(1992年、播種年度)の7月・9月、2年目(1993年)および3年目(1994年)の試験開始時(7月)と終了時(9月)に実施した。

調査は、生育高(樹幹長)、葉面積などについて行った。生育高は、調査時点で試験区に生育しているイタチハギの全個体について測定した。葉面積は、平均的な生育状況の個体を上部・中部・下部

において選定し、面積計を用いて直接測定した。

(5) 根系調査

根系の調査は、試験最終年度にあたる1994年9月に実施した。斜面最下部に生育しているイタチハギを対象とし、幹を中心に、一辺50cmの範囲内で、10cmごとの深さ別に掘削し根系を採取した。採取した根系は、炉乾燥させその重量を測定した。

3. 3 降雨遮断下における緑化植物の生育特性²¹⁾

3. 3. 1 大型ガラス室内の気象特性

1992年～1994年の試験期間中（7月～9月）における露地の気温は、鳥取においても1994年が他の試験年度に比較して高い水準で推移しており、3年間では最も厳しい環境条件を示すと推測される。このため、ガラス室内でも、1994年8月の最高気温は49℃まで上昇したが、最低気温は22.1℃であった。また、月平均気温は32.3℃を示した。いずれの場合の測定値も、Table 3-1 に示すように、露地（8月の最高気温37.7℃、最低気温20.5℃、月平均気温28.6℃）に比較して、常に高い値で推移していることが確認される。また、ガラス室内においては、気温の日較差が露地に比べて大きい。さらに、8月の月較差も、ガラス室内では約27℃、露地では17℃を示しており約1.6倍の値を示している。

また、湿度に関して、露地とガラス室内を比較すれば、月最低湿度および平均湿度とも、概ねガラス室内が低くなる傾向がみられ、乾燥状態にあることがわかる（Table 3-1）。また、気温と同様に日較差が、露地に比べて大きくなる傾向を示す。

一方、Fig. 3-2 には、1994年8月における深さ10cmの露地および試験区（N5区、N6区）の日平均地温を示す。地温に関しても、1994年8月は、非常に高いレベルで推移している。露地の地温は、N2区およびS2区と比較すると、全体的に低い値を示す。また、

Table 3-1 1994年8月の気温および湿度の比較

	月最高気温 (°C)	月最低気温 (°C)	月平均気温 (°C)	月最低湿度 (%)	月平均湿度 (%)
大型ガラス室内	49.0	22.1	32.3	16.7	55.3
露地	37.7	20.5	28.6	40.0	77.4

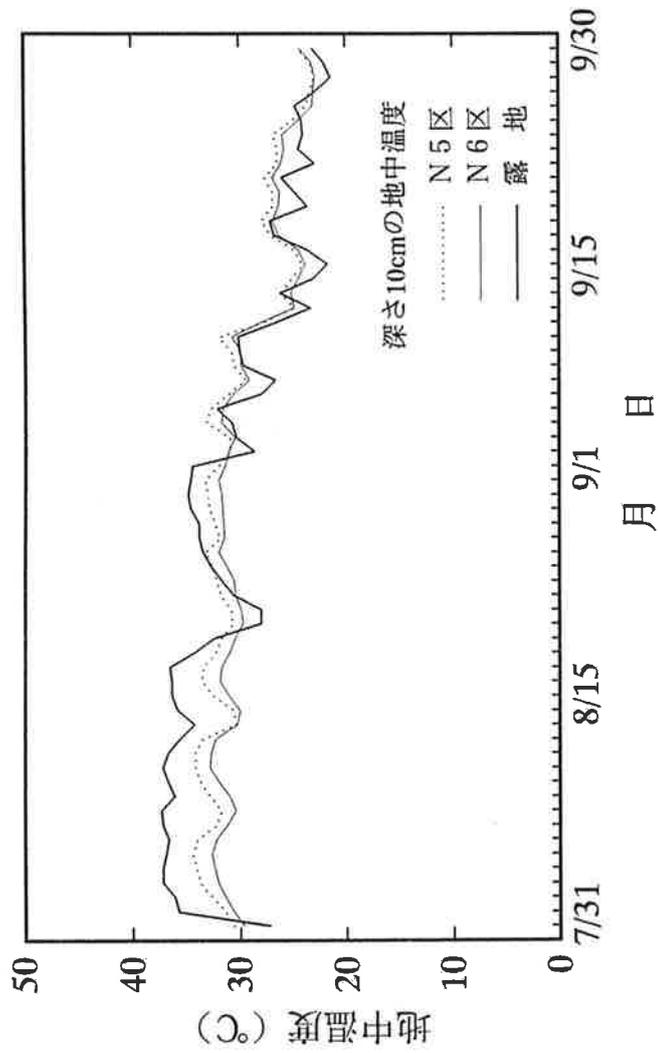


Fig. 3-2 日平均地中温度の比較 (深さ10cm)

露地においては、天候の影響、特に日射量および降雨の影響を直接受けているため、降雨時に地温が大きく低下する。ガラス室内では、この降雨による影響は全くみられないが、灌漑時に地温の低下が観察される。深さ方向での地温の推移は、深いほど安定する傾向を示す。また、砂マルチ試験区（S6区、N6区）はTG試験区（S5区、N5区）と比べて、若干地温が低くなる傾向がみられ、変化も緩やかであり、砂マルチの効果がみられる。

蒸発量に関しては、斜面の上部・中部・下部および平坦部での測定位置による相違は明確ではない。この理由としては、斜面の勾配が比較的緩やかなこと、斜面の規模が小さいこと、またガラス室内での試験であること、などが考えられる。しかしながら、斜面の方位による蒸発量に差が認められ、特に北斜面と南斜面の中・下部に若干の差が観測された。

また、日射量（直達日射量）は、北斜面に比較して南斜面が 1.2 ～ 1.5倍程度高くなる傾向を示した。

3. 3. 2 降雨遮断下における緑化植物の生育特性

木本（イタチハギ）を導入したS5区、S6区、N5区、N6区において、播種後約1か月を経過した6月頃から発芽が観察された。この時期から6月末にかけて、最終的に14条、各条9本まで、ほぼ各個体間の距離が同一（約20cm）となるよう間引きを実施し、1㎡あたり生育本数を25本として、その後は手を加えずに推移させた。以後植生状況の調査を行い、調査時期は、播種後2か月（7月下旬）、4か月（9月下旬）および1年後、2年後の同月とした。Table 3-2に、S5区とS6区のイタチハギに関する植生調査結果をまとめた。また、Photo.3-1 およびPhoto.3-2 に播種後2年の植物の生育状況を示した。

Table 3-2 播種後の経過時間と成立本数・生育高の推移（イタチハギ）

試験区	調査項目	単位	1年		2年			
			2か月	4か月	2か月	4か月		
S5区	成立本数	本/m ²	25	25	21	19	8	8
	生育高	cm	15	36	86	118	158	177
S6区	成立本数	本/m ²	25	25	20	17	8	8
	生育高	cm	19	42	98	122	169	189



Photo. 3-1 砂斜面における植物生育（南斜面と北斜面の比較）



Photo. 3-2 砂斜面における植物生育（TG試験区と砂マルチ試験区）

(1) 斜面での生育特性

生育本数は時間の経過と共に、被圧などにより枯死したと考えられる個体数の減少傾向がみられ、南斜面試験区（S5、S6区）の1年後の平均は18本/m²、2年後の8月の調査においては、8本/m²であった。生育高（樹幹長）は、試験区の個体平均で、初年度は0.39m、1年後は1.20m、2年後においては1.83mであった。初年度の7月の調査では、全斜面において生育高には、ほとんど差はみられない。しかしながら、播種後1年目の後半から2年目にかけての調査では、生育高に斜面上部部と下部部において差異が観察されるようになり、下部部が優勢となる傾向が認められるようになった。これは南斜面ほど顕著ではないが、北斜面であるN5区、N6区においても、同様の傾向が認められる（Photo.3-1 参照）。

また、試験3年目（1994年9月）におけるイタチハギの葉面積測定結果をTable 3-3 に示す。葉面積は同一試験区においては、斜面下部が上部の2倍程度の値を有していることが示されている。この葉面積測定結果からも、斜面の上部より下部部に生育している植物が優勢であることが推測される。

Table 3-3 イタチハギの葉面積比較

試験区	上 部	中 部	下 部
S5区	130%	100%	216%
S6区	101%	195%	215%

葉面積の最小位置を100%とした。

後述するように、対象試験区における斜面上部・下部の植生基盤内では、水分量にかなりの相違がみられる（Fig.3-9 参照）。このことから生育の差は、植生基盤内の水分量が一因となっているものと推測される。また、斜面の下部部において、植物の生育が優勢に

なる傾向は、急傾斜切土法面における調査結果と同様である。

(2) 砂マルチ試験区の生育特性

マルチングは、播種により導入された種子や植栽苗木などを雨や風から保護し、また、表土の侵食防止、土壌面蒸発の抑制、植物の発芽・定着の促進などを目的として、古くから実用化されている。マルチ材としては、わら・化学繊維・礫など、多種多様の材料が使用される⁷⁾。今回の試験では、入手の容易な砂丘砂を、造成植生基盤上にマルチングすることによりその効果を評価・検討した。

S6区(砂マルチ試験区)とS5区(TG試験区)との緑化植物の生育の相違について、葉面積および生育高の比較により検討した。Table 3-2 およびTable 3-3 に示したように、葉面積の合計は、S5区に比較してS6区の方が大きくなる傾向を示し、生育が優勢となっていることが推測される。また、生育高に関しても斜面上部・中部・下部とも1.2～2.5倍の値を示している(Photo.3-2 参照)。これらの結果は、植生基盤の保水量の相違によるものと考えられ、また、砂マルチによる保水性の高い植生基盤からの土壌面蒸発の抑制効果と考えられる。したがって、砂マルチを効果的に実施することにより、降雨量の少ない地域における水分の有効利用に、効果を持つことが期待される。

以上の結果は、南斜面におけるものであるが、北斜面の各試験区(N5区、N6区)においても、全体の葉面積の合計・生育高はいくぶん少なくなるが、同様の傾向を示している。

(3) 斜面の方位による生育特性

植物の生育は、斜面の方位による影響を受けるとされ、特に、受光量の影響による相違が顕著である。南斜面においては北斜面に比較して、気温・地温の平均値が高くなり、水分などの供給が十分であれば植物の生育は良好になるとされる²²⁾。

今回の試験においては、対象試験区の傾斜角が20°程度の比較的緩斜面であること、およびガラス室内での試験のため平均気温・湿度が均一化する傾向がみられることなどから、導入植物の方位によ

る生育状況の相違はさほど顕著ではない。しかしながら、灌漑水量をコントロールすることによって、緑化植物の生育に必要な最小限の水分を灌漑供給していることもあり、前述のようにわずかながら、南斜面における生育が良好となる傾向が観察される。

3. 3. 3 根系特性

水分吸収に係わるとされる太さ2mm以下の根系の分布状況は、砂マルチ試験区(N6区)では、全体の約20%(乾燥重量比)が植生基盤に分布している。また、深さ1mの範囲までに全体の90%が分布している。一方、TG試験区(N5区)では、この植生基盤内への集中傾向はみられず、平均的な分布を示している。このN6区における根系の集中傾向は、砂マルチにより土壌面蒸発が抑制された結果と考えられる。これにより、前述のように植物の生育に差が生じたものと推測される。

3. 4 砂斜面における土壌水分特性

3. 4. 1 連続繊維緑化基盤の基本的特性

砂斜面上に造成された連続繊維緑化基盤の基本的特性について、第2章と同様に団粒化度および三相分布を測定することにより評価した。

TG試験区における基盤造成時からの団粒化度および三相分布の経時変化を示したものがFig.3-3、Fig.3-4である。0.1mm以下の粒径についての団粒化度は、概ね60%付近の値を示し、また、三相分布についても、固相率に関しては、20%~30%(平均22.4%)の範囲内で、ほぼ一定であることがわかる。

これらの結果から、砂斜面上に造成された連続繊維緑化基盤においても、第2章の供試体測定値と同レベルであることがわかり、団

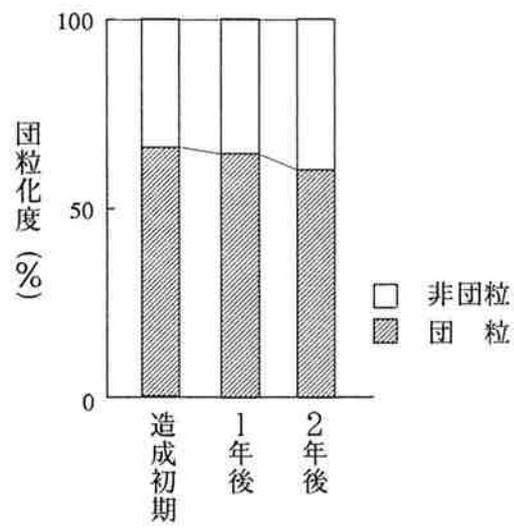


Fig. 3-3 団粒化度の経時変化

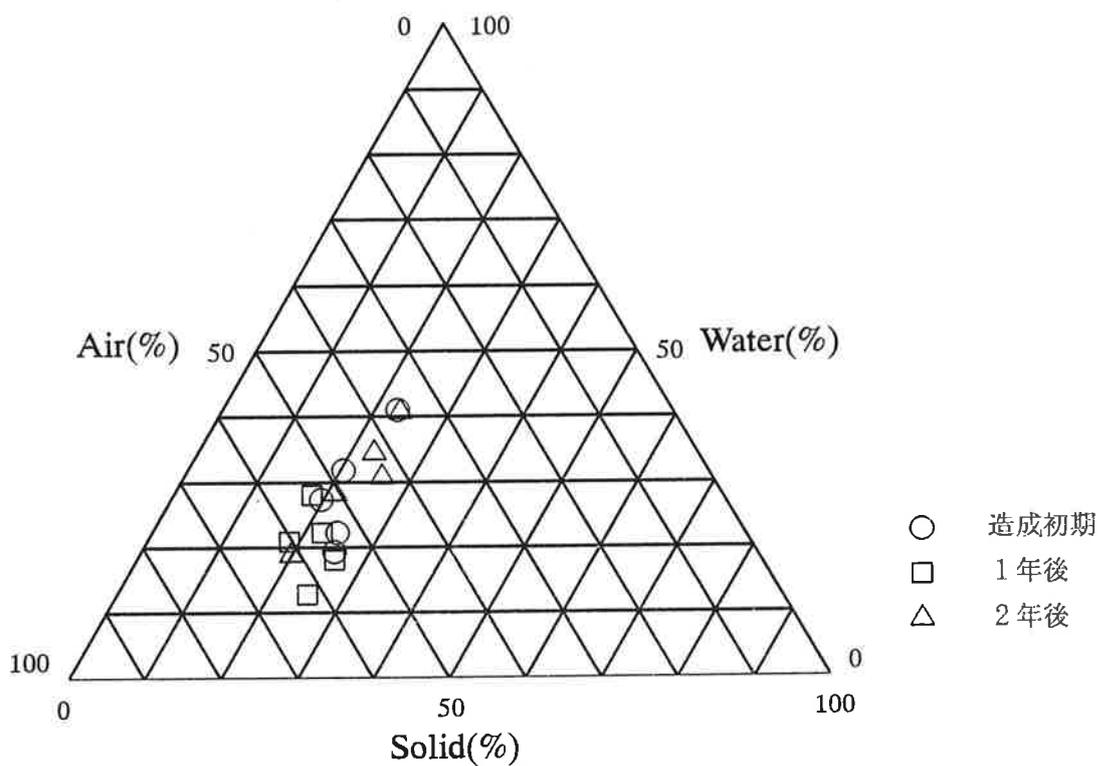


Fig. 3-4 三相分布の経時変化

粒剤の混入による土壌構造の改良効果および経時的な安定が確認できるものと思われる。

3. 4. 2 砂斜面における土壌水分特性

(1) 鳥取砂丘砂と連続繊維緑化基盤における有効水分量の比較

試験施設は、前述のように鳥取砂丘地を利用して試験区の斜面を造成している。砂丘砂の基本的特性を示す粒径加積曲線をFig.3-5に示した。砂丘砂の粒径は、その約95%が、0.2 ~ 0.5mmの範囲内に入り、粒径がほぼ均一であることが示されている。

一方、連続繊維緑化基盤の主材料である黒ボク土、造成された連続繊維緑化基盤および砂丘砂の土壌水分特性曲線を比較したものがFig.3-6である²³⁾。この土壌水分特性曲線から、有効水分量(pF 2.0とpF 3.0の土壌水分領域)を求めると、試験対象地である砂丘砂は8% (体積含水率)程度となり、極めて低いことがわかる。連続繊維緑化基盤は、黒ボク土と同様な傾向を示す土壌水分特性曲線となり、砂丘砂に比較して約7倍の有効水分量を保持できることが確認される。これにより、根群域に保有された灌漑水を有効に活用できる可能性があるものと考えられる。

(2) TG試験区と砂試験区における土壌水分特性

Fig.3-7に、初年度(1992年)におけるTG試験区(S1区)と砂試験区(S2区)の、斜面下部における体積含水率の経日変化を示した。体積含水率は、Fig.3-6の土壌水分特性曲線から求めたものであり、いずれも南斜面の裸地区である。

S1区においては、表層の植生基盤内での体積含水率が、最も高くなる傾向を示しており、植生基盤から下方の砂丘砂層では、体積含水率は低レベルとなる。また、S2区においては、表面における体積含水率が最も低くなる傾向があり、それ以下の深さにおいては、深さ方向での相違あるいは経時的な変化はほとんどみられない。

一方、砂斜面上に植生基盤を造成する効果は、S1区とS2区の

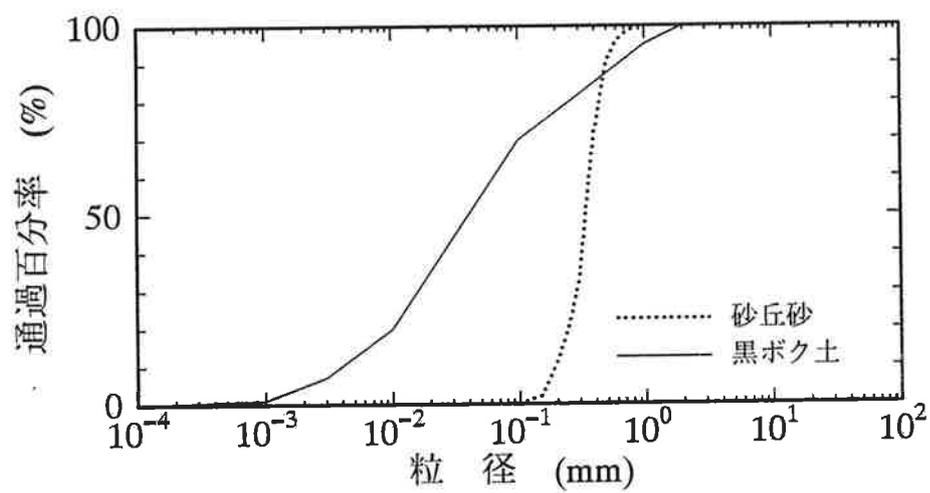


Fig. 3-5 砂丘砂および黒ボク土の粒径加積曲線

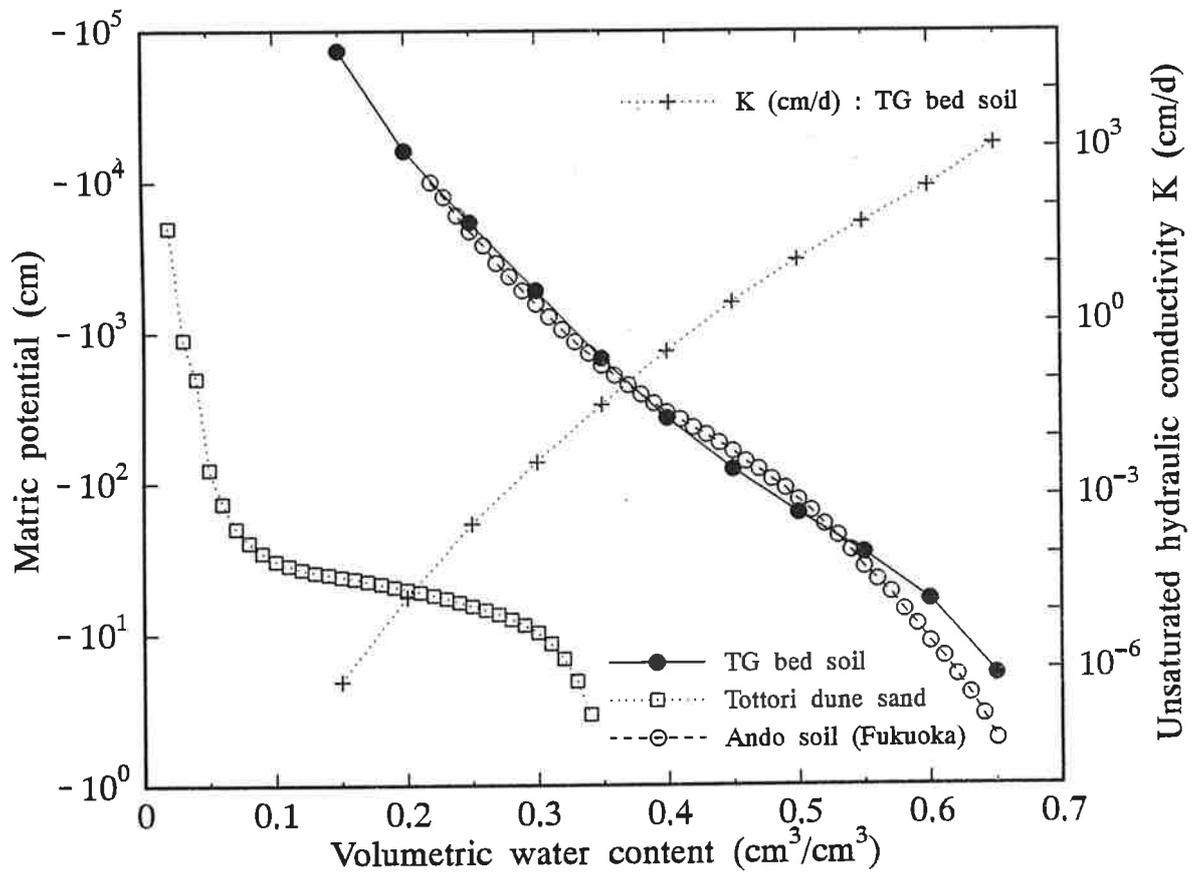


Fig. 3-6 土壤水分特性曲線と不飽和透水係数

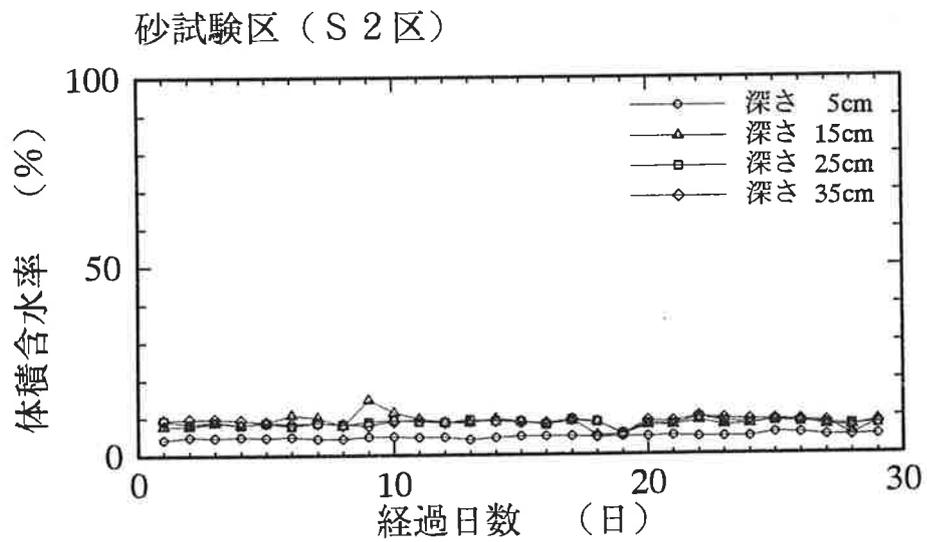
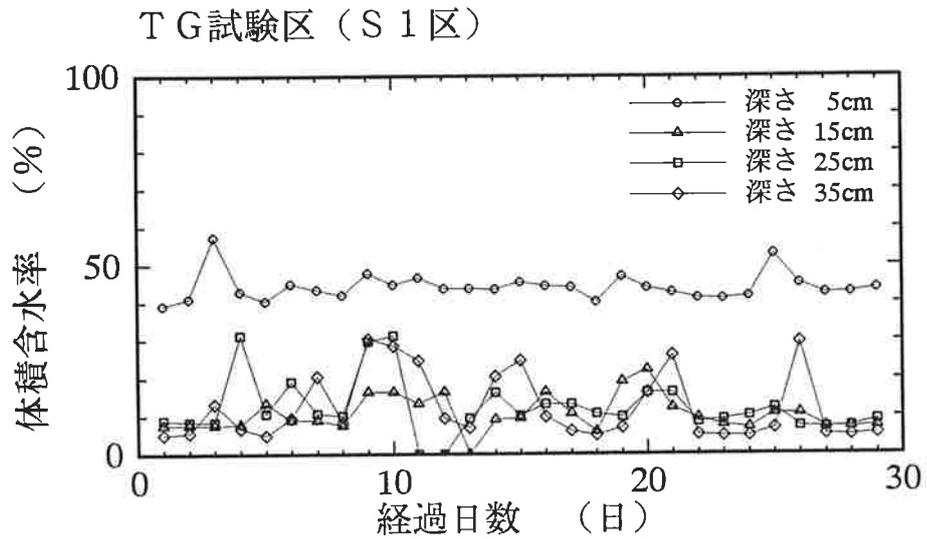


Fig. 3-7 T G 試験区 (S 1 区) と砂試験区 (S 2 区)
体積含水率の推移

比較により検討することができる。この2つの試験区における最も顕著な相違は、単位面積あたりの保水量が、S1区はS2区に比較して数倍の値をとっていることであり、しかもその7割程度が表層の植生基盤内に保持されていることである。この結果、S1区では、土壌面蒸発が促進され、これにともない植生基盤以深の砂層においても、体積含水率の変動が観測される。一方、S2区では、表層における乾砂層の形成により、土壌面蒸発が抑制されると考えられ、土壌深部における体積含水率の変化は少ない。

北斜面であるN1区では、S1区と比較して、植生基盤内の体積含水率は、ほぼ同レベルであったが、深部の砂層における体積含水率の変化は、S1区ほど明瞭には現れていない。また、N2区については、S2区と同様の傾向を示した。

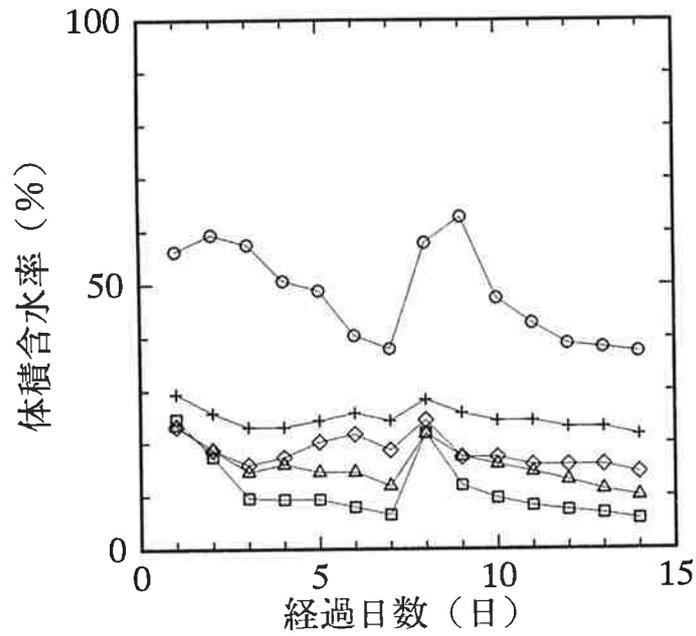
これらの結果から、保水性の高い植生基盤の造成は灌漑水の浸透ロスを低減し、表層に水分を保有する効果をもたらすが、反面、土壌面蒸発量を増加させているものと考えられる。

(3) 砂マルチ試験区の土壌水分特性

Fig.3-8 は、砂マルチ試験区(S6区およびN6区)における灌水後の体積含水率の変化を示したものである。体積含水率は、造成された植生基盤内において最も高く、また、灌漑後の減少割合も最大となる。これは、砂マルチにより植生基盤面からの蒸発が抑制され、植生基盤内に保留された水分が、植物によって消費された結果と考えられる。この傾向は前述のように、植物の根系調査においてイタチハギの根系が、砂マルチ試験区の植生基盤内に多く分布していることから推測される。

また、砂層部における体積含水率は、植生基盤の下部に接する浅い砂層が最も低い値を示し、深部になるに伴って順次体積含水率が高くなる傾向を示している。この結果は、最も蒸発散量が多い植生基盤への水の補給と植物根系の砂層内への発達による水消費の影響と考えられ、灌漑水が有効に利用されていることを示すものと推測される。

砂マルチ試験区（北斜面 N6区）



砂マルチ試験区（南斜面 S6区）

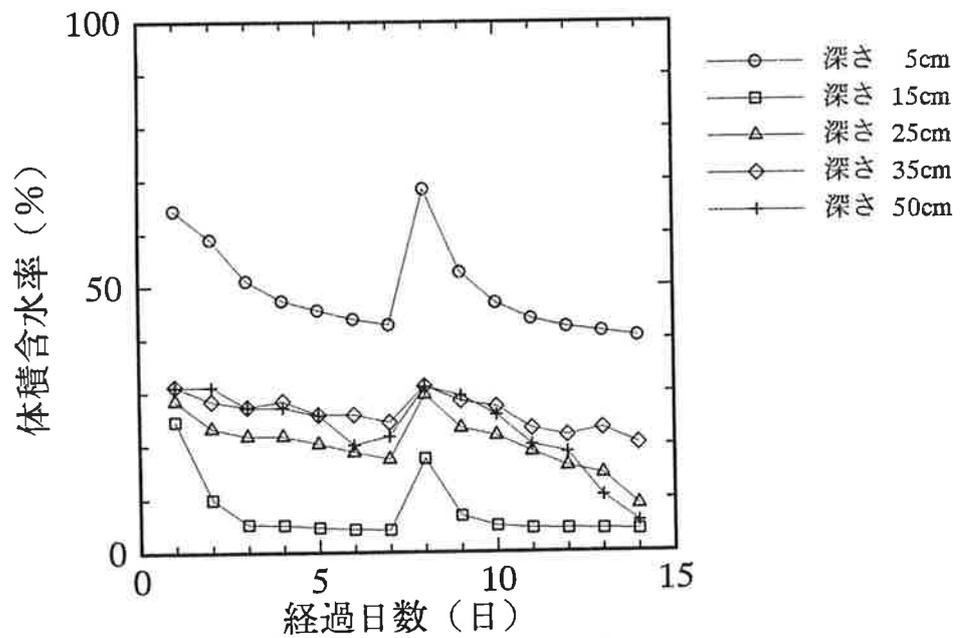


Fig. 3-8 砂マルチ試験区における体積含水率の変化

また、植生基盤内および砂層内ともに、同一時期においては、TG試験区、砂マルチ試験区とも、常に斜面下部が上部に比較して体積含水率が高くなっていることが確認され、水分環境に優れていることがわかる。Fig. 3-9は、砂マルチ試験区の斜面上部・中部・下部における体積含水率の相違を示したものである。この水分量の差が、植物の生育にも影響を与えているものと考えられる。

(4) 砂マルチ試験区の水消費特性

砂マルチの効果を把握するために、TG試験区(N5区)と砂マルチ試験区(N6区)の水消費特性を検討した。まず、Fig. 3-10にマトリックポテンシャルの深さ別の経日変化を示した。N5区は、砂マルチを有しないことにより、マトリックポテンシャルの変化が砂層内深部まで確認された。これは、前述のS1区における体積含水率の変化と同様の傾向と言える。しかしながら、N6区は砂マルチによる土壌面蒸発の抑制により、マトリックポテンシャルの変化は、主に表層部の植生基盤内において認められた。これらの結果は、砂マルチが、保水性の高い植生基盤から、灌漑水の土壌面蒸発ロスを低減できることを示している。また、この傾向は、南斜面のS5区およびS6区においても同様であるが、北斜面のN5区、N6区ほど顕著ではない。これは、初年度における砂マルチが3cmと薄層であったことにより、水消費条件で優れている南斜面試験区では、砂マルチの効果が十分でなかったものと推測される。

これらの試験結果から、総迅速有効水分量(TRAM)と蒸発散量の算定を、全面灌漑による初年度において行った。有効根群深を1.0mとみなし、圃場容水量からpF3.0とpF3.8までの2通りについて、マトリックポテンシャルの測定値から算定した。

Table 3-4に算定結果を示す。これによれば、砂マルチを設置することにより、蒸発散量を約25%程度、低減することができる。

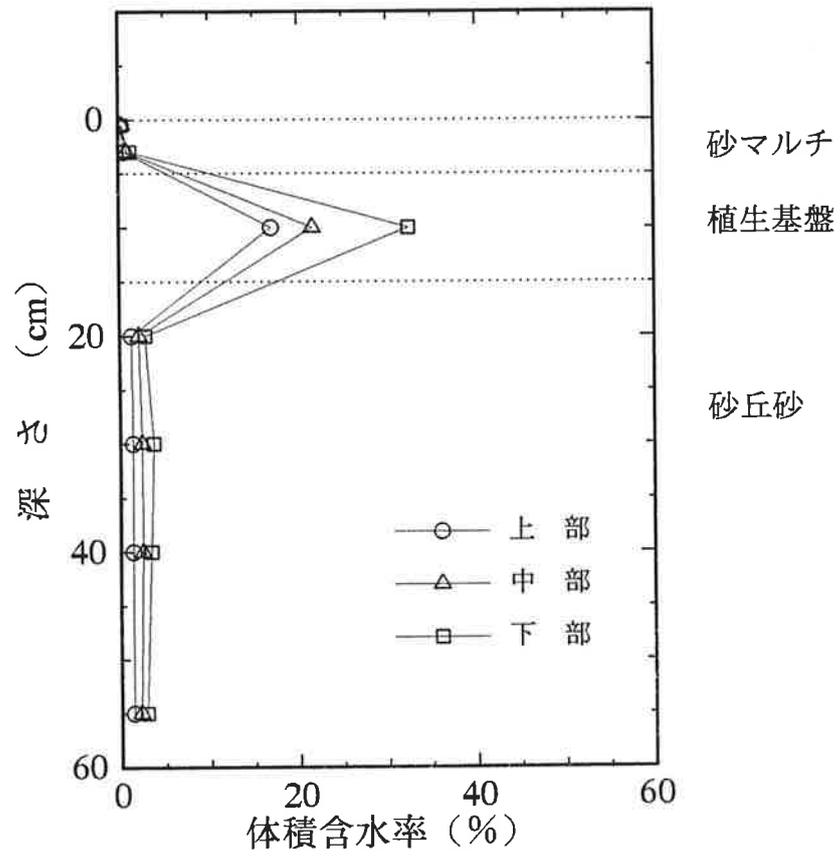


Fig. 3-9 斜面位置による体積含水率の相違 (S 6 区)

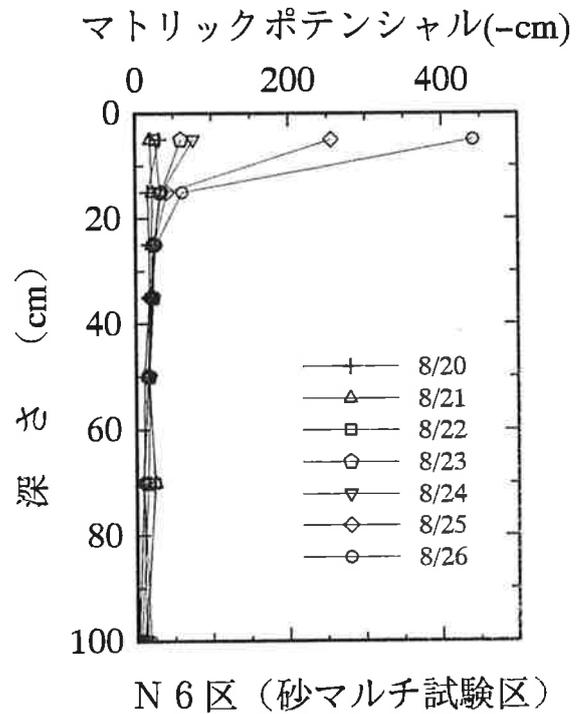
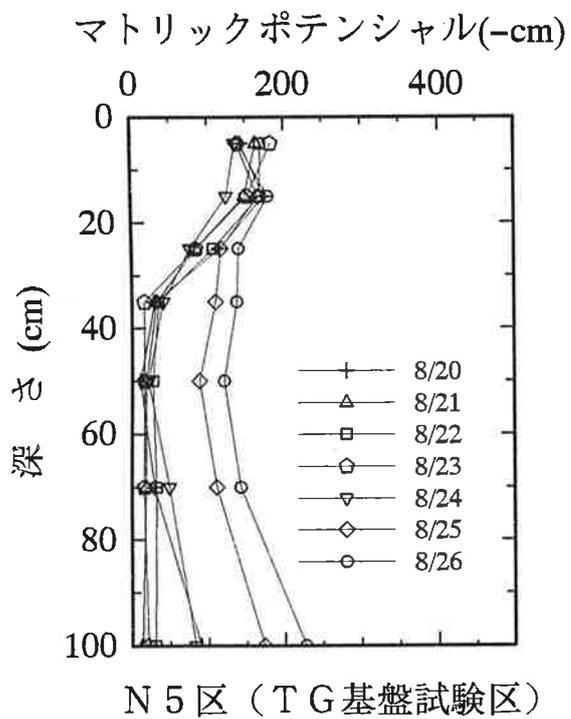


Fig. 3-10 マトリックポテンシャルの深さ別変化

Table 3-4 TRAMと蒸発散量

p F 3.0		
試験区	TRAM (mm)	ET. (mm/日)
N 5 区	32.42	2.49
N 6 区	24.35	1.87

p F 3.8		
試験区	TRAM (mm)	ET. (mm/日)
N 5 区	40.52	3.12
N 6 区	35.00	2.69

3.5 要 約

本章においては、代表的な緑化困難地とされる砂斜面に造成された植生基盤において、播種から導入された木本の生育について検討した。また、これらの導入植物の生育は、造成された植生基盤の基本的特性と、土壤水分特性が影響を与えているものと考えられるため、植物の水消費と水分環境について検討した。

その結果、以下のことが明らかにされた。

- ① 試験対象とした緑化困難地である砂斜面において、植生基盤の造成により、導入された木本（イタチハギ）は、全体的に良好な生育をしている。
- ② 降雨遮断条件で灌漑条件下のガラス室内の試験においては、植生基盤上を砂マルチすることにより、生育状況がより良好になることが示された。したがって、ガラス室内の各試験区の生育状況は、砂マルチ試験区が最も良好であり、次にTG試験区、砂試験区の順に

なる。

③斜面の方位による生育状況は、水分が灌漑などにより補給されることを前提とすれば、北斜面よりも南斜面が優勢となる。

④同一砂斜面において植物の生育状況を比較すれば、斜面上方に比較して下方が良好になる傾向を示した。

⑤露地およびガラス室内の根系調査などの結果から、造成された植生基盤は、植物の発芽・初期生育期において最も重要な役割を果たしていることが確認された。木本を播種から導入しようとする場合は、植生基盤の造成が必要であり、砂のみの試験区においては、発芽はみられるものの、今回想定した14日間断の灌漑では成立が困難と判断される。

⑥ガラス室内の生育は、若干露地に比較して早いと思われるが、播種後の経過日数が3年目の時点での幹径（地表面から20cmの位置）の平均値は、露地に比較して約50%～80%程度の値を示しており、いくぶん幹全体が細くなる傾向を示す。

また、土壌水分特性に関しても、以下のことが明らかにされた。

①連続緑化基盤を実際の砂斜面に施工した場合においても、団粒化度・三相分布など、その植生基盤の基本的特性は、第2章の供試体試験による値とほぼ同レベルである。また、自然界の森林土壌の測定値と比較しても、植生に適した範囲内にあることが示されている。経時変化の調査においても、基本的特性には大きな変化はみられず安定している。

②同一砂斜面における水分環境は、斜面上部に比較して下方部が良好となる傾向を示した。

③植物の生育には、保水性の高い植生基盤の造成が有効である。

④保水性の高い植生基盤土壌を砂斜面上に造成することは、灌漑水の浸透ロスを低減するが、同時に土壌面蒸発量を増加させる。

⑤造成植生基盤を砂マルチすることが土壌面蒸発を抑制し、したがって、導入された緑化植物の発芽・生育状況は、砂マルチ試験区が最も良好となる傾向が認められる。

第4章 急傾斜切土法面における 植物生育と土壌水分特性

4.1 概 説

砂斜面とともに、最も代表的な緑化困難地の一つ数えられる急傾斜切土法面は、一般的に、硬岩や軟岩などを主体とした地山から構成される法面である。法表面には植生の基盤としての土壌がなく、急傾斜であることと相まって、保水性などの植生環境は極端に悪い。このため、緑化工を施工しない場合には、長期間にわたり植生の回復が期待できず、法面の侵食や安定性が懸念される。さらには、環境の保全あるいは景観などの観点から、早急な植生の回復が望まれるところである。

本章では、この急傾斜切土法面を対象として、連続繊維緑化基盤工により植生基盤を造成し、第3章の砂斜面と同様に、緑化困難地における連続繊維緑化基盤の適用の可能性について検討を行った。ここでは、導入緑化植物の生育特性および連続繊維緑化基盤の基本的特性、土壌水分特性について検討する。

4.2 試験装置と方法

4.2.1 試験圃場の概要

試験圃場は、滋賀県米原町の標高約 150m の急傾斜切土法面に、連続繊維緑化基盤工により造成された植生基盤を対象としたものである。試験圃場は、裸地（無植生）フィールドと植生フィールドから構成され、いずれのフィールドとも北斜面である。法面勾配は、概ね 1 : 0.7（55度）である。

Fig.4-1 に試験圃場の概要を示した。

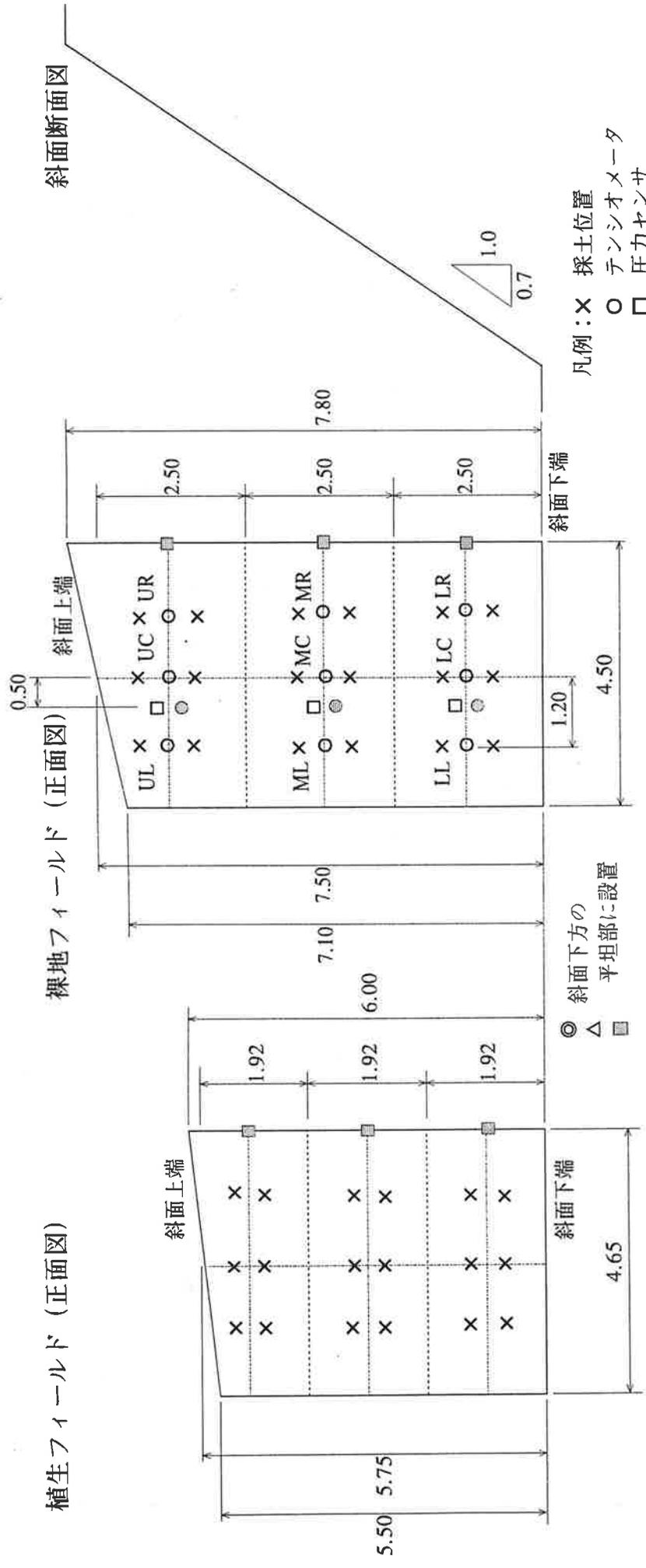


Fig. 4-1 試験圃場の概要 (図中数字単位: m)

(1) 裸地（無植生）フィールド

裸地フィールドは1990年3月に造成され、底辺が4.50m、左斜面長が7.10m、右斜面長が7.80mの大きさである。植生基盤の造成厚さは10cmである。Photo.4-1は、1993年7月の裸地フィールドにおける試験状況を示したものである。

(2) 植生フィールド

植生フィールドは1989年4月に造成され、底辺が4.65m、左斜面長が5.50m、右斜面長が6.00mであり、植生基盤の造成厚さは通常の緑化工に用いられる頻度の高い5cmである。導入植物は、草本がウィーピングラブグラス (*Eragrostis curvula*) (略称: WLG)、木本としては、肥料木低木であるヤマハギ (*Lespedeza bicolor*) およびイタチハギを選定し、植生基盤の造成時に基盤材料内に混合播種した。種子の配合量は、1m²当りヤマハギ 28.89g、イタチハギ 28.89g、ウィーピングラブグラス0.10gである (Table 4-1 参照)。

また、肥料はTable 2-2 に示す肥料の標準配合により、化成肥料および熔成リン肥他を使用した。

Table 4-1 種子の配合計算

	発生期待本数	平均粒数	発芽率	純度	播種量
	本 / m ²	粒 / g	%	%	g / m ²
ヤマハギ	1,000	150	60	50	28.89
イタチハギ	1,000	100	65	70	28.89
WLG	200	3,000	85	98	0.10



Photo. 4-1 急傾斜切土法面（裸地フィールド）試験状況

4. 2. 2 調査の概要

調査は、気象調査および植生基盤の造成時期から導入植物の生育に関する追跡調査を行った。また、1993年には、導入木本の萌芽期である5月（1993年5月1日～5月6日）と消費水量がピークとなる7月（1993年7月24日～7月30日）を集中調査期間として、植生基盤調査、土壌水分調査、植生調査などを実施した。

（1）気象調査

気象調査は、試験圃場より南西約10kmのところに位置する彦根地方気象台の観測値を用いて、1963年から1993年の31年間における長期のデータから、試験圃場における降雨量・連続干天日数についての解析を行った。

また、気象関連の試験圃場における集中調査は、降雨量・気温・湿度および地中温度について測定した。また、小型蒸発計を斜面の上部・中部・下部および平坦部に設置し、蒸発量を測定した。測定位置の概略をFig.4-1に示した。

（2）植生基盤土壌の調査

試験圃場に造成された連続繊維緑化基盤について、基本的な土壌特性を第2章と同様に、団粒化度および三相分布を求めることにより評価した。

団粒分析の試料は、1993年5月の集中調査期間に、裸地フィールドおよび植生フィールドの上部（U）、中部（M）、下部（L）の3ブロックから採取した。これらの試料について水中フルイ分け法により団粒分析を行った。フルイ分け条件は第2章と同様とし、これらの結果から団粒化度を算出した。また、三相分布の試料は、植生基盤の造成時および造成後4年の1993年5月に採取した。造成された植生基盤は、裸地・植生フィールドとも厚さが薄いため、50cc定容積採土器を用い、いずれも降雨があった場合は、24時間以上経過した時点で採取した。採取位置の概略をFig.4-1に示した。

(3) 水分測定

連続繊維緑化基盤の保水性の評価として、有効水分量（圃場容量：pF 2.0 と毛管連絡切断点：pF 3.0 の差）を測定した。試料は、造成後1週間以上経過した植生基盤から採取した。採取位置は、法面を3等分し、上部（測点No.1）、中部（測点No.2）、下部（測点No.3）に分けた。試料採取は、各測点につき各々3試料を採取して有効水分量を測定し、その平均値を測定結果とした。

また、1993年5月および7月においては、マトリックポテンシャルおよび水分量の測定を集中的に実施した。

定期的なマトリックポテンシャルおよび水分量の測定は、テンシオメータとサンプリングの組み合わせにより実施し、連続的な測定はデジタル土壤水分センサを用いデータログに記録させた。

テンシオメータは、斜面を上部（U）、中部（M）、下部（L）の3ブロックに分割し、各ブロックごとに右（R）、中央（C）、左（L）に設置し定時に測定した。設置深さは植生基盤の中心部とした。サンプリングは、同様に上・中・下部に分けて、各位置から試料を採取し含水比を測定した。なお、測定の対象となる植生基盤の造成厚さが薄いため、深さ方向での測定は中央のみとし、50ccの採土器を用いて採取した。また、デジタル土壤水分センサは、上・中・下部の中央（C）に設置し、マトリックポテンシャルの連続的な変化の測定を行った。

なお、測定中に降雨のあることが予想される場合には、試験圃場全体をシートで養生し試験中に外部からの水の侵入を防止した。また、調査を行った5月および7月のいずれの時期においても、対象となる植生フィールド・裸地フィールドに十分な灌水を行い、飽和させた後測定を開始した。定期的な土壤水分の測定は、24時間経過した時点を1日後とし、以後24時間毎に定時に実施した。

(4) 植生調査

追跡調査は、播種後1か月、2か月、3か月、2年、3年、4年（5月、7月）および5年目の9月に行い、生育状況の経時遷移に

ついでに調査を行った。調査は、成立本数・生育高および侵入種の状況について実施した。また、導入木本であるヤマハギの発芽期から初期生育期（1989年5月～8月）における根系の伸長状況について調査を行った。

一方、集中調査期間には、導入木本であるヤマハギの生育状況を把握するため、葉面積を1993年7月に測定した。測定は、実験フィールドにおいて幹まわり（根もとから20cmの位置で測定）の太さ別に10種のサンプルを採取して測定した。この結果から、植生フィールド全体のヤマハギの葉面積を算出した。

（5）根系調査

集中調査期間の1993年5月および7月に、生育が比較的良好な個体および平均的な生育状況の個体を選定し、根系を掘り出してその伸長状況・分布状況および根系重量（70℃24時間の炉乾燥重量）を調査した。植物種は、いずれも導入木本のヤマハギである。掘削は、地上部幹を中心として1㎡の範囲とし、深さ方向は原則として根系の伸長している切土法面の地山の岩盤内まで掘削した。根系は調査後すべて採取し、土砂と根系とを分離させ測定に供した。

4. 3 急傾斜切土法面における緑化植物の生育特性²⁴⁾²⁵⁾

4. 3. 1 試験圃場における気象特性

彦根地方気象台の31年間（1963年～1993年）のデータ²⁶⁾をもとに、岩井法により、月別の超過確率連続干天日数を求めた。植物の水消費量がピークになる7月および8月において、10年確率では13日、20年確率では16日を越える連続干天日となる。

また、Table 4-2 は、1989年4月の植生フィールド造成時から1994年8月のまでの、主な気象要素の平均値を示したものである。植物の生育期間である4月から10月の期間において、8月の降雨量は、102.3mm（最低値37.1mm、1994年）と最も少なくなる。最長連続干

Table 4-2 播種後6年間(1989~1994)の月別平均気象データ

項 目	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月
降 雨 量(mm)	119.3	125.0	183.8	150.8	102.3	228.5	128.5
連続干天日数(日)	5.5	6.7	5.2	9.0	8.5	5.4	9.2
気 温(%)	12.4	16.7	21.3	25.4	26.7	23.0	16.7
湿 度(%)	69.9	72.6	76.2	77.4	73.7	75.3	74.7
日 照 時 間(h)	6.3	5.9	4.9	5.3	6.2	4.7	4.7

9月、10月は1989年~1993年の平均

天日数は 8.5日であり、最大値は1994年の10日であり、同年は14mm /日程度の降雨をはさんで20日以上降雨が記録されない。

また、米原の試験圃場付近におけるこれまでの最長連続干天日数は、彦根地方気象台のデータによれば、1994年7月9日～7月29日の21日間である。また、この時期は、植物の消費水量のピーク時期であり、気温・日射量などの値からみて、最も水分環境の厳しい時期であり、したがって、植生環境も厳しい時期であったことが推測される。

4. 3. 2 地山法面（急傾斜切土法面）特性

植生基盤を造成した地山法面は、砂岩と泥岩の互層であり硬岩を主体に構成されている。一部表面的な風化がみられ、また岩盤表面には多くの小さな亀裂（クラック）が観測されるが、全体としては目立った崩落などはなく構造的にも安定している。反面、植生環境としては劣悪であると考えられ、特に保水性などに劣り、急傾斜であることと相まって緑化困難な荒廃地といえる。したがって、緑化工（植生基盤）が施工されていない法面は、切土後10年以上の歳月を経ているにもかかわらず、いまだに満足な植生はみられないところが多い。

4. 3. 3 緑化植物の生育特性

（1）木本の生育と環境条件

植物の生育は、斜面の方位などの相違によって影響を受ける。傾斜45度の斜面では植物の生育期である4月から10月の受光量は、北斜面において南斜面の半分以下になると推定され、この受光量の差によって最も直接的に気温・地温が影響を受け、植生にも影響を与える。

石塚らによれば²²⁾、①南斜面では北斜面に比較して、気温・地温

の平均値が高くなる傾向を示しており、水分などの補給が十分であれば、植物の生育は良好になるとしている。一方、水分量に関しては、②傾斜面では平地に比較して流失量が多くなるため土壌水分量は少なくなる、③蒸発散量も斜面の方位により影響を受けている、とし植物の生育に与える影響について報告している。

今回の試験圃場での実験・検討においても、斜面における植生の生育状況や推移には、水分環境が大きな影響を与えている可能性が示唆されている。

(2) 生育初期（播種～2年後）のヤマハギの生長

播種以後の植生追跡調査結果をTable 4-3に示す。木本の個体数は播種後2か月でピークとなり、以後は減少傾向となっており、特に、播種後2年までに成立本数は、最大期の1/100以下まで減少している。

(3) 播種後3年のヤマハギの生長

播種後3年までに導入木本の一つであるイタチハギは消滅し、ヤマハギの緑地となっており、その生育本数は5本/m²であった。また、生育高は50cm～200cm程度まで順調に生長しており、斜面下部において上部より生育高が大きくなることが確認された。イタチハギの消滅の原因の一つは、これら優勢なヤマハギの被圧によるものと考えられる。

(4) 播種後4年のヤマハギの生長

播種後4年における調査結果では、ヤマハギの生育本数は、平均4本/m²まで減少し、さらに淘汰が進行していることがうかがわれる。生育本数の変化は、主に劣勢な個体の減少によるものと考えられ、したがってヤマハギによる被覆率は概ね100%を示しており、順調な生育過程を示しているものと思われる。導入草本であるウィーピングラブグラスも、同様に、時間の経過とともに確実に減少傾向をたどっており、播種後3年では10本/m²の生育が確認されたが、4年後では5本/m²まで減少し衰退傾向がみられる。

Photo. 4-2 およびPhoto. 4-3 に1993年5月と7月の集中調査期間

Table 4-3 播種後の経過時間と成立本数・生育高の推移

導入植物	調査項目	単位	1か月	2か月	3か月	2年	3年	4年	5年
ヤマハハギ	成立本数	本/m ²	32	244	218	12	5	4	2
	生育高	cm	0~5	0~10	20~30	30~100	50~200	50~200	150~300
イタチハギ	成立本数	本/m ²	40	386	330	0	0	0	0
	生育高	cm	0~5	0~10	0~10	-	-	-	-
ウィーピソク	成立本数	本/m ²	56	106	120	37	10	5	0
	生育高	cm	5	10	20	30	30	30	-



Photo. 4-2 急傾斜切土法面における植物生育
(1993年5月)



Photo. 4-3 急傾斜切土法面における植物生育
(1993年7月)

における植物の生育状況を示した。7月の写真ににおいては、斜面下方部に侵入種であるヌルデ (*Rhus chinensis*) の生育がみられる。

(5) ヤマハギとヌルデの生育特性

播種後4年を経過した、7月における植生分布および生育状況を Fig.4-2 に示した。木本は、ヤマハギを主体とし侵入種としてのヌルデが生育しているが、ヤマハギとヌルデは明確な住みわけがなされていることが特徴的である。

ヤマハギは、生育高・幹まわりとも斜面下部が上部に比較して良好であるが、反面、斜面上方は生育本数が多いという傾向がみられる (Table 4-4 参照)。

Table 4-4 斜面位置による生育本数と生育高・幹まわりの相違
(播種後4年 1993年7月調査)

斜面位置	生育本数	平均生育高	平均幹まわり
斜面上部	33	174.6	4.7
斜面中部	23	217.7	5.4
斜面下部	10	194.9	6.8
斜面全体	66	192.2	5.3

また、葉面積の合計は、外部環境の影響を受けると考えられる斜面の最上部および最下部を除けば、同様に下部が最も多く、中部、上部の順に減少する傾向がみられる。これらの傾向には、植生基盤の水分動態が大きな影響を与えているものと考えられる。後述するように、斜面下部は斜面上部に比較して水分環境が安定している傾向が示されている。したがって、優勢なヤマハギの生育が進み、劣勢な個体を被圧して、成立本数の減少傾向が進んだものと考えられる。また、斜面上部においては、植生が淘汰の過程であり、まだ安定していないためと考えられる。一方、ヌルデは、比較的ヤマハギ

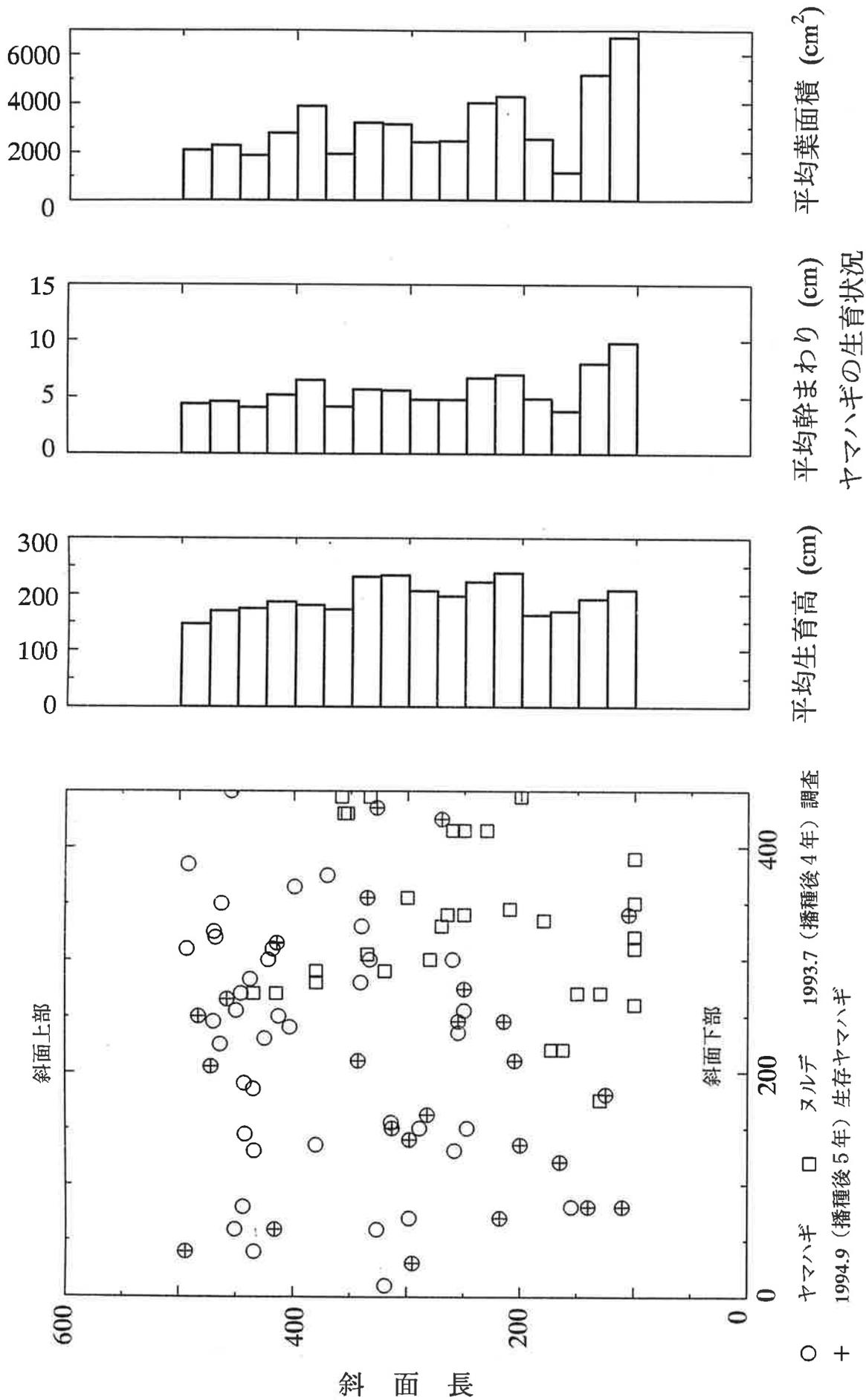


Fig. 4-2 植生分布とヤマハギの生育状況

の生育が順調であり、侵入植物種の生活空間が増加している斜面下部に多く見られる。

(6) 大干ばつ期のヤマハギの生育

1994年7月は、最大連続干天日数が21日を記録した。また、8月においても最大10日を示し、14mm/日程度の降雨を除けば、20日以上ほとんど降雨が観測されていないなど、例年に比較して非常に厳しい植生環境であったといえる。

5年目の植生調査として、この連続した無降雨の状態が斜面の植生に及ぼす影響について調査を行った。Fig. 4-2 に示したように、1993年7月と1994年9月の植生調査を比較すると、植生フィールド全体のヤマハギの生育本数が、66本から25本に減少し、約1/3程度まで減少していることが確認された。特に、斜面上部における減少傾向が顕著であり、生育本数は1/5程度まで減少している。これらの斜面上部において枯死消滅したヤマハギは、前回調査において、比較的生育高の低い劣勢な個体に多く、また、生育高は良好であっても幹まわりの細い個体に多いことがわかる。Table 4-5 は1994年9月の調査で、斜面上部において生存していたヤマハギと枯死したヤマハギの幹まわりの平均値の相違を示したものである。

Table 4-5 斜面上部におけるヤマハギの幹まわりの相違

	生存ヤマハギ	枯死したヤマハギ
幹まわり (cm)	6.3	4.3

斜面下部に生育しているヤマハギの成立本数は、前回の調査時との差はほとんどない。しかしながら、葉の周辺が変色し始めるなど水不足の影響を受けていることが観察された。

一方、導入草本であるウィーピングラブグラスは、植生フィールド全体にわたり枯死し、生育が確認されなかった。

4. 3. 4 根系特性

(1) 生育初期の根系分布

Fig.4-3 は、導入木本について、播種後2か月(6月)と4か月(8月)の初期生育期における生育高と根系の伸長状況を調査したものである。調査対象とした斜面の勾配は1:0.7であり、対象植物はヤマハギである。播種後2か月(6月)の時点で、ヤマハギの生育高は5~10cm程度であり、根系もほぼ同程度の値をとっていることが観察された。植生基盤の造成厚さが5cmであることから、根系は地山に十分伸長しておらず、植生基盤内のみに分布していることが推測される。したがって、播種後発芽してから初期生育期におけるヤマハギは、水分などの供給に関して、造成された植生基盤のみに依存しているものと推測される。また、播種後4か月の時点では生育高は10cm~20cm程度まで生育しており、根系もそれに伴い地山の風化層および岩盤内に伸長し、その範囲を拡大していることが確認された。

(2) 播種後3年の根系分布

播種により導入された木本の根系は、造成された植生基盤内だけでなく、岩盤などの亀裂や風化層にも伸長が可能であり、法面の保護などに貢献するとしている。また、根の伸長方向も斜面の下方だけでなく、斜面の上方や斜面に対して垂直水平方向にも伸長するとされる²⁾。

播種後3年の調査では、ヤマハギ(生育高約2m)の根系は、斜面上約1m²の範囲内に分布しており、主根は斜面下方に伸長し、その長さは1m程度であった。また、側根は斜面に対し上方および垂直方向への伸長も確認された。

(3) 播種後4年の根系分布

播種後4年の7月におけるヤマハギの根系調査においても、全体的に3年目の調査と同様の傾向が観察される。しかしながら、生育高が同程度であっても根系の伸長範囲は拡大している。特に、下方

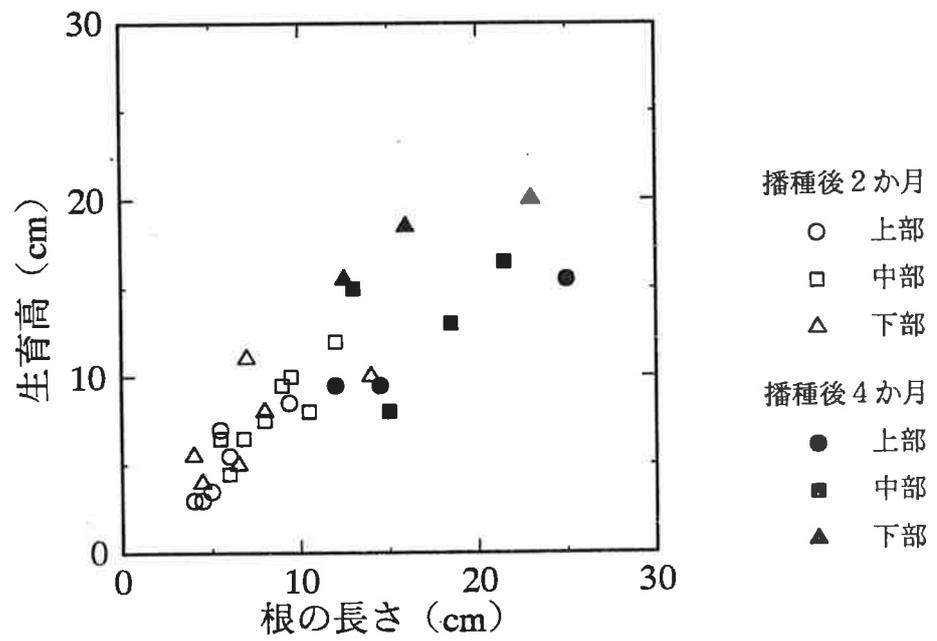


Fig. 4-3 ヤマハギの生育高と根の長さ

への伸長が顕著であり 1.5倍程度となっていることが確認される。

Fig. 4-4 に根系を掘削した結果の模式図を示す。また、根系の分布割合をTable 4-6 に示した。主に植物体の支持にかかわる、太さ 2 mm以上の根のほとんど（約90%）は、風化岩および岩盤の亀裂内に侵入して植物体を支持しており、表面の植生基盤内には全体の1割程度にとどまる。平面的な根系の分布は、大部分は斜面下方に分布しているが、一部は斜面上方あるいは斜面に垂直方向にも分布している。

また、播種後4年目における5月および7月の調査結果を比較すると、特に、2 mm以下の主として水分吸収にかかわる根系の発達に大きな相違がみられる。植物の水消費量がピークとなる7月末には2 mm以下の根系が発達し、全体的な根の量（5月の測定値は136 g、7月では348 g）が数倍にもおよぶことが確認される。また、その伸長範囲も広がり、5月の調査時点では2 mm以下の根系の分布がほとんど見当たらなかった造成植生基盤内にも発達が著しい。7月における2 mm以下の根系の分布割合は、造成植生基盤：風化岩（岩盤）=58：42であった（Table 4-6 参照）。

Table 4-6 根系の分布比率（重量比）

1993年5月（根系の全乾燥重量136 g）（単位：%）		
根系分布範囲	造成植生基盤内	風化岩盤内
根系 2 mm 未満	5.41	94.59
根系 2 mm 以上	12.37	87.63

1993年7月（根系の全乾燥重量348 g）（単位：%）		
根系分布範囲	造成植生基盤内	風化岩盤内
根系 2 mm 未満	58.04	41.96
根系 2 mm 以上	10.09	89.10

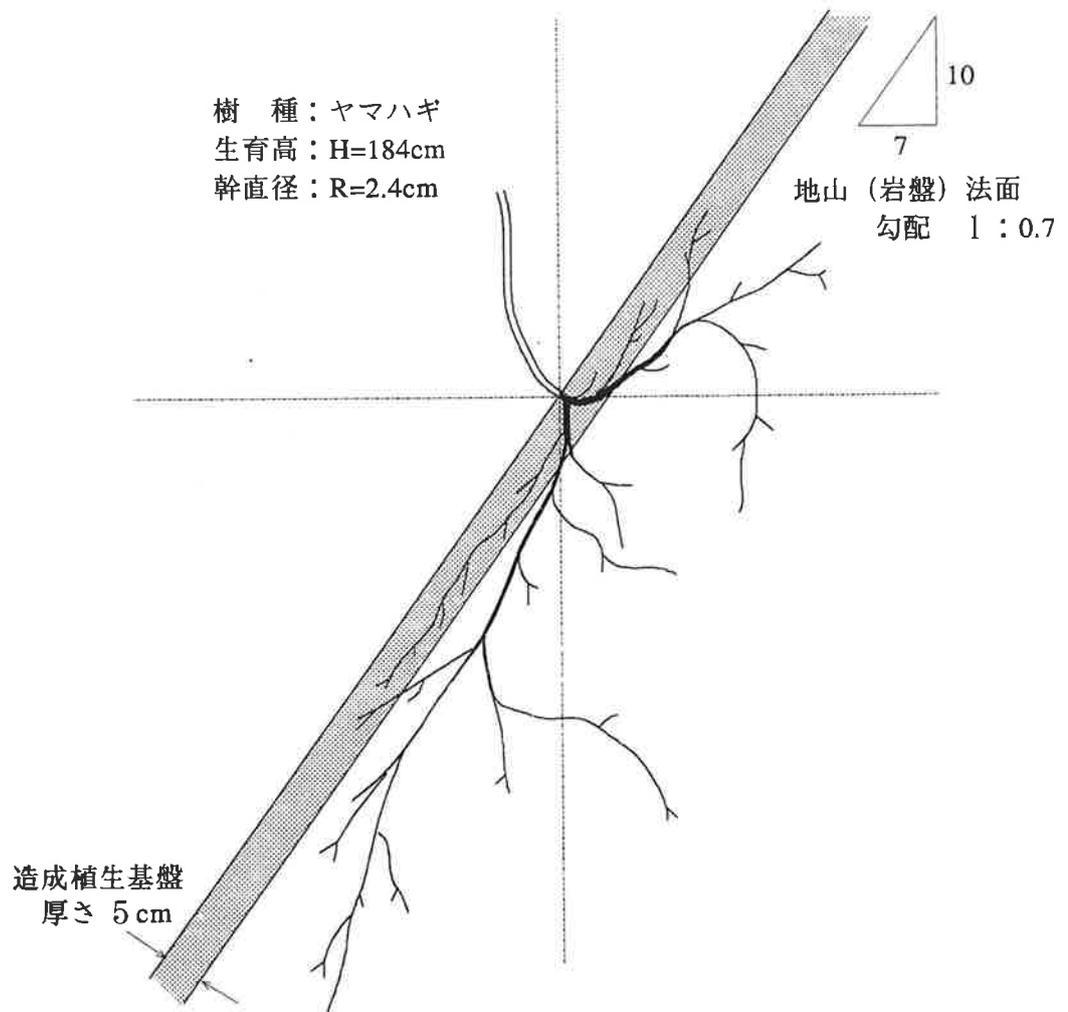


Fig. 4-4 根系の伸長模式図（1993年7月調査）

一方、導入草本のウィーピングラブグラスの根系は、播種後4年を経過した時点でも、造成植生基盤内のみに分布しており、このことが草本衰退の一因となっているものと推測される。さらに、成立したヤマハギによる被圧も考えられる。これらのことにより、耐陰性に劣るイタチハギ・ウィーピングラブグラスなどの植物は衰退の傾向をたどったものと推測される。

4. 4 急傾斜切土法面における土壌水分特性²⁷⁾

4. 4. 1 連続繊維緑化基盤の基本的特性

(1) 連続繊維緑化基盤の団粒特性と三相分布

Fig.4-5 に裸地フィールドの団粒化度、Fig.4-6 に植生フィールドの団粒化度を示した。いずれも試料の採取時期は、1993年5月の集中調査期間である。これら2つの試験フィールドによる団粒化度の相違は明確ではなく、また、斜面の上部と下部との差異もそれほど顕著ではない。しかしながら、いずれの場合も団粒化度は、60%程度を示している。

また、Fig.4-7 には裸地フィールドにおける造成初期と造成後4年の三相分布の比較を示し、Fig.4-8 には同様に植生フィールドにおける三相分布の比較を示した。固相率は、造成初期および造成後4年の調査における経時的な変化が少ない。また、固相率は斜面位置による上部と下部の差も顕著ではなく、概ね15~30%の範囲に入る。しかしながら、いずれの調査においても液相率に関しては、上部に比較して下部が高い比率を示す傾向がある。この傾向は、特に、植生の蒸散の影響が少ないと考えられる裸地フィールドにおいてより顕著になる。これらのことから、同一時期の三相分布調査において植生の水分環境は、下部が上部に比べて良好であることが示唆される。

これらの調査結果から、急傾斜切土法面に造成された連続繊維緑

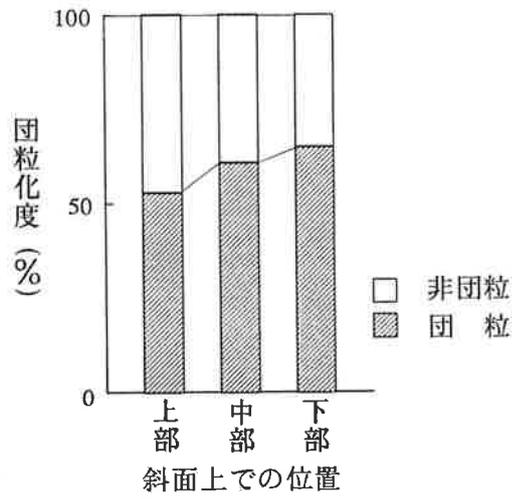


Fig. 4-5 裸地フィールドの団粒化度 (1993.5)

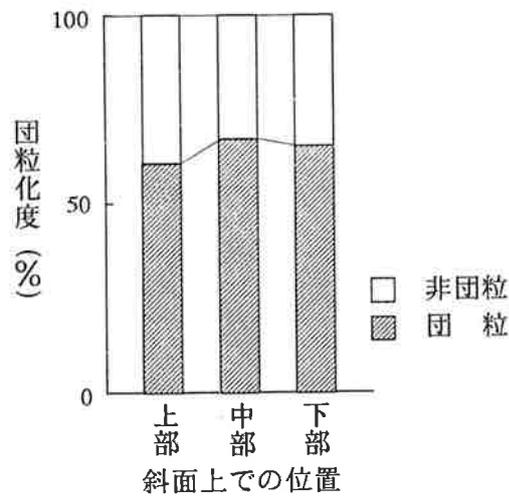
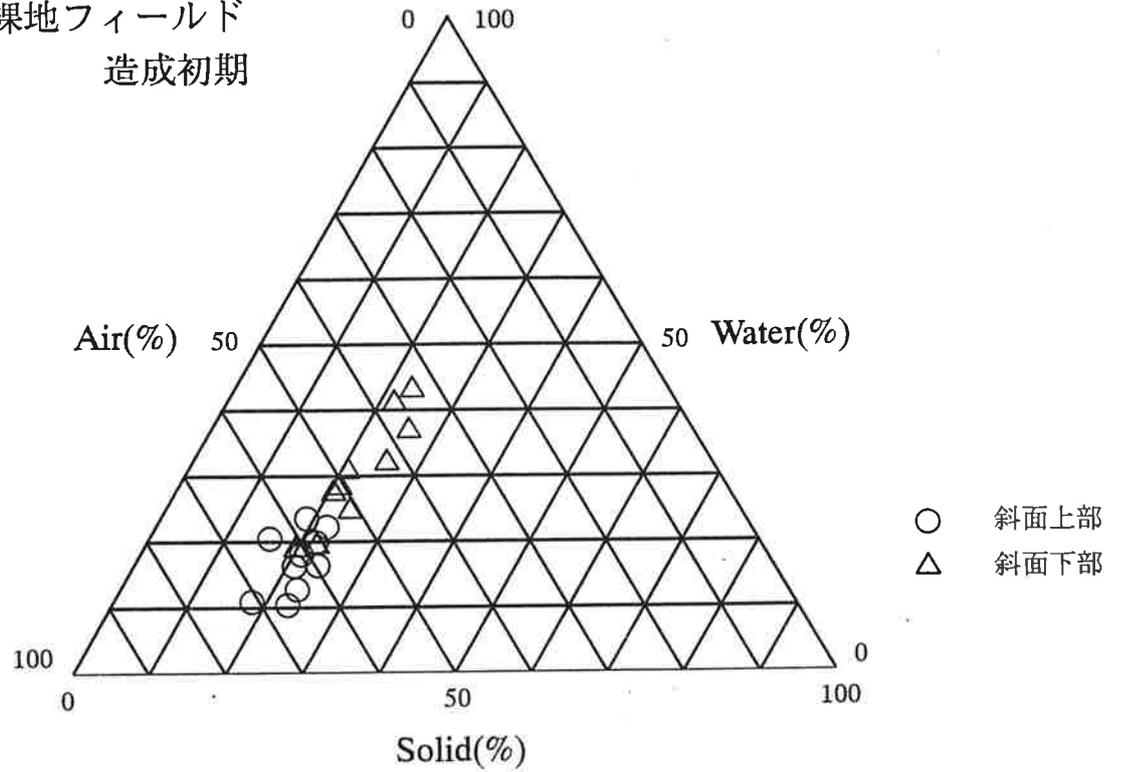


Fig. 4-6 植生フィールドの団粒化度 (1993.5)

裸地フィールド
造成初期



裸地フィールド
造成後4年

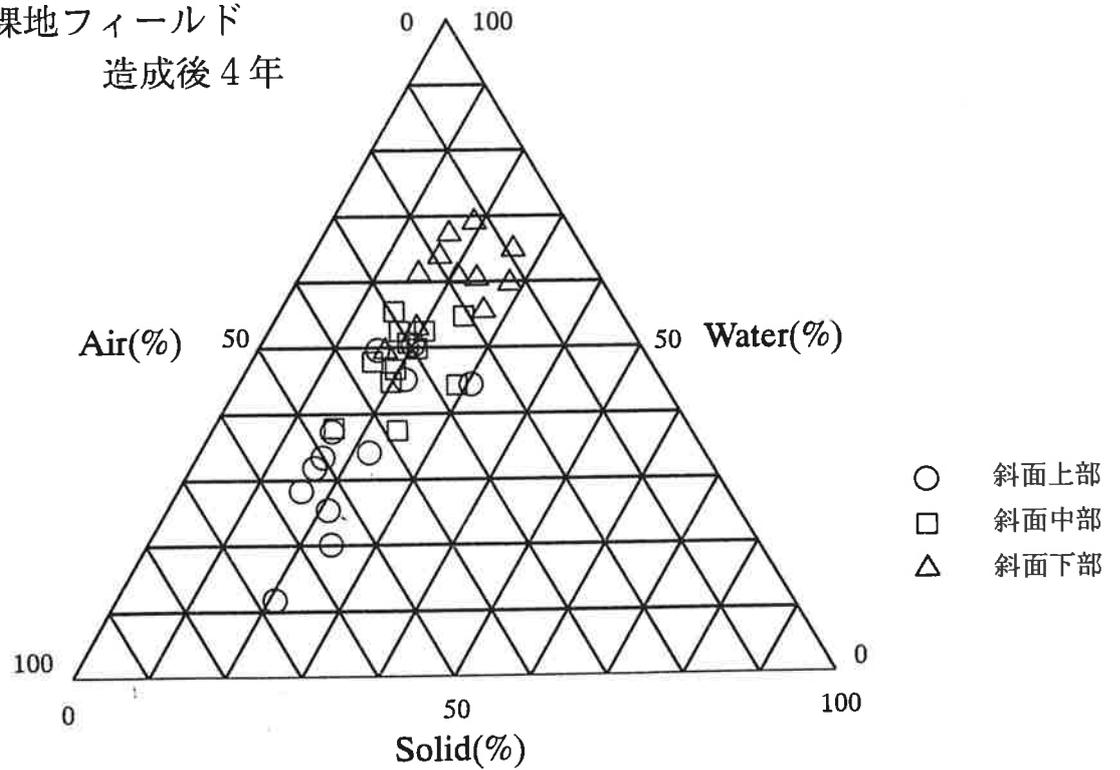
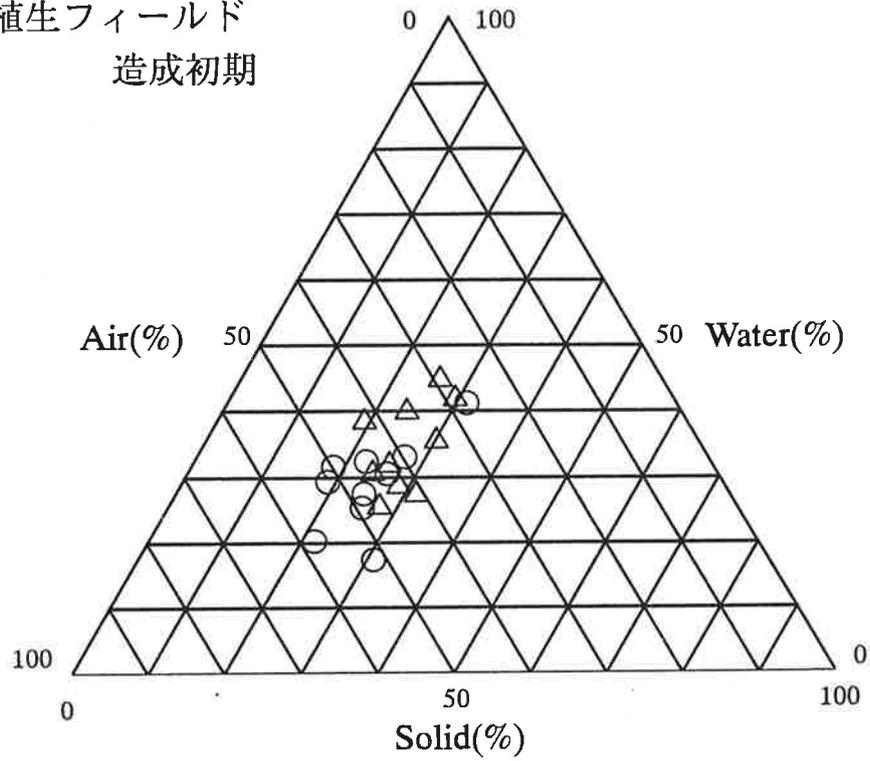


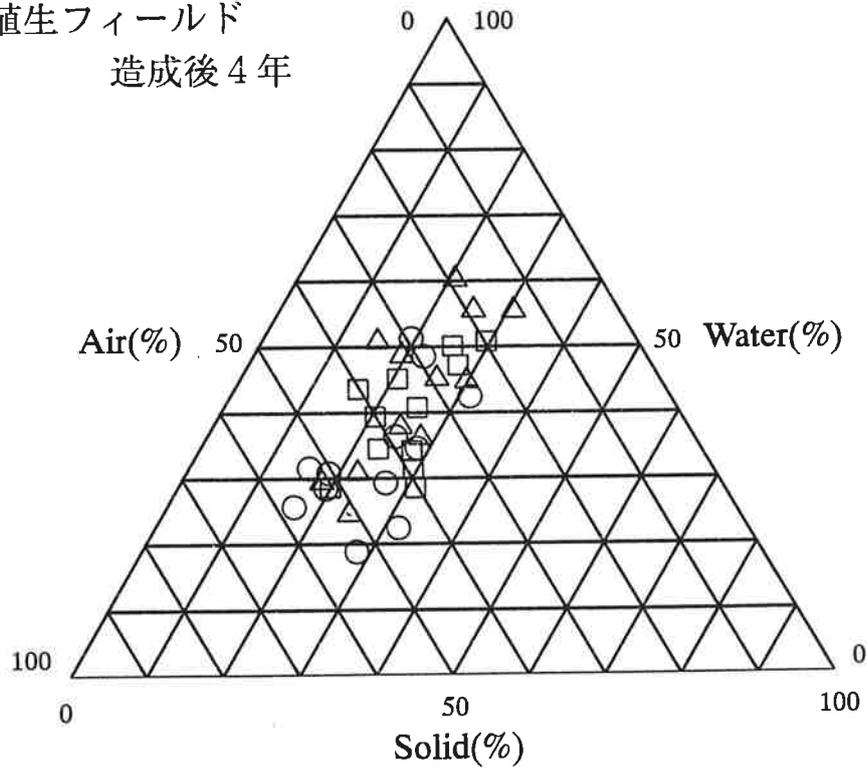
Fig. 4-7 急傾斜切土法面における三相分布の比較

植生フィールド
造成初期



○ 斜面上部
△ 斜面下部

植生フィールド
造成後4年



○ 斜面上部
□ 斜面中部
△ 斜面下部

Fig. 4-8 急傾斜切土法面における三相分布の比較

化基盤においても、団粒化度および三相分布については、第2章にの供試体試験結果と同程度の値をとっており、また、経時変化においても大きな変化はみられず安定しており、植生に適した範囲内にあることが推測される。

(2) 連続繊維緑化基盤の有効水分量

試験圃場に造成された連続繊維緑化基盤における有効水分量の試験結果を Table 4-7 に示す。

Table 4-7 連続繊維緑化基盤における有効水分量

(単位：%)

測点	圃場容水量水分	毛管連絡切断点水分	有効水分量
No.1	69.28	39.85	29.43
No.2	66.68	38.73	27.94
No.3	68.12	44.48	23.64
平均			27.00

有効水分量は全体の平均値で 27.00%を示し、大山（鳥取県）の火山灰土壌（腐植質：19%、鉍質：13%）より大きい値である²⁸⁾。また、山梨県および福島県の褐色森林土壌の有効水分量は、約5～8%と報告されている²⁹⁾。これらの数値と連続繊維緑化基盤の有効水分量を比較すると、約1.5～6倍となることがわかる。したがって、有効水分量に関して言えば、連続繊維緑化基盤の厚さ10cmは、火山灰土壌では約15cm、褐色森林土壌では約30～60cmの厚さに相当することになり、緑化困難地などへの植生基盤の造成効果が期待できる。

4. 4. 2 連続繊維緑化基盤における土壌水分特性

1993年5月および7月の集中調査期間におけるpF値の経日変化をFig.4-9 およびFig.4-10に示した。Fig.4-9 は裸地フィールドの測定結果、Fig.4-10は植生フィールドの測定結果である。体積含水率は、試験圃場における三相分布の測定値の平均から求めた乾燥密度 ($\gamma = 0.45\text{g/cm}^3$) を用いて含水比から算出した。また、pF値の算定には、Fig.3-6 の連続繊維緑化基盤の土壌水分特性曲線を利用した²³⁾。

裸地フィールド、植生フィールドとも時間の経過とともに、水分量が減少し乾燥状態になっていくことがわかる。しかしながら、その減少過程は、上部に比較して下部の減少量が少なく、下方部の水分量が安定している傾向がみられる。一方、植生フィールドは、裸地フィールドと比較しての水分量の減少が大きくなる傾向を示している。この減少量の相違は、導入植物による影響と考えられ、植生フィールドでは、植物の萌芽期である5月に比べて、消費水量がピークになる7月において最も水分量の減少が大きくなる傾向にある。また、裸地フィールドにおいても、7月の測定結果が5月に比較して、減少量が多くなるが、これは、気温・日射量などの気象による影響が主体であると考えられる。

また、連続繊維緑化基盤における日当たりの土壌水分消費量を、定時（午前11:00）の土壌水分測定の結果から算定した。算定において、灌漑後24時間以後は、斜面方向への土壌水分の移動が少なくなると仮定し、水消費土層は、造成された植生基盤の厚さと等しいものとして、植生フィールド0.05m、裸地フィールド0.10mとした。結果をFig.4-11に示す。

これらの水分に関する集中調査結果から、緑化困難地である急傾斜切土法面へ、保水性の高い植生基盤の造成が有効であることが推測される。また、前述の通り夏期は植生に対する水分環境が厳しい時期であり、この時期における連続干天日は、10年確率では13日、

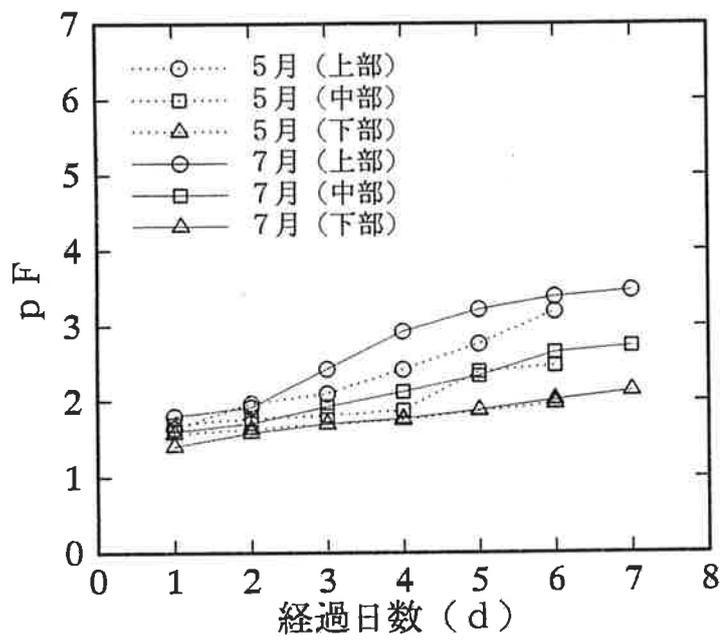


Fig. 4-9 p F 値の経日変化 (裸地フィールド)

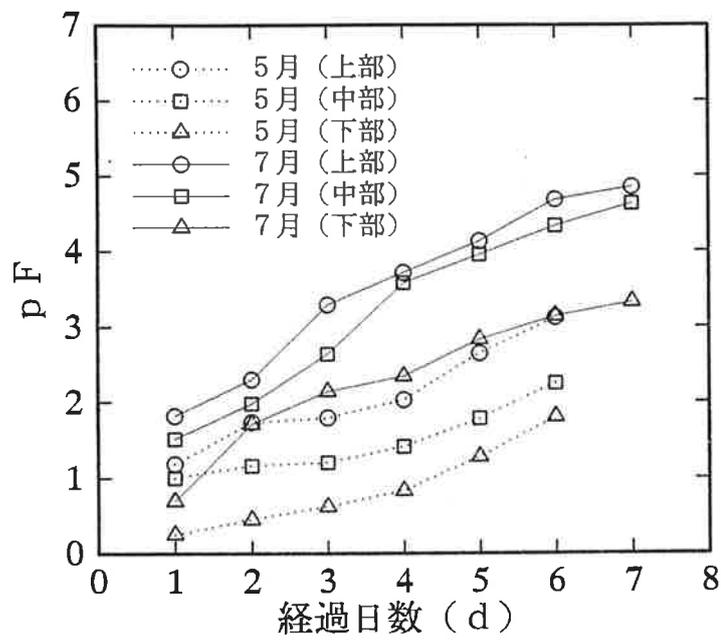


Fig. 4-10 p F 値の経日変化 (植生フィールド)

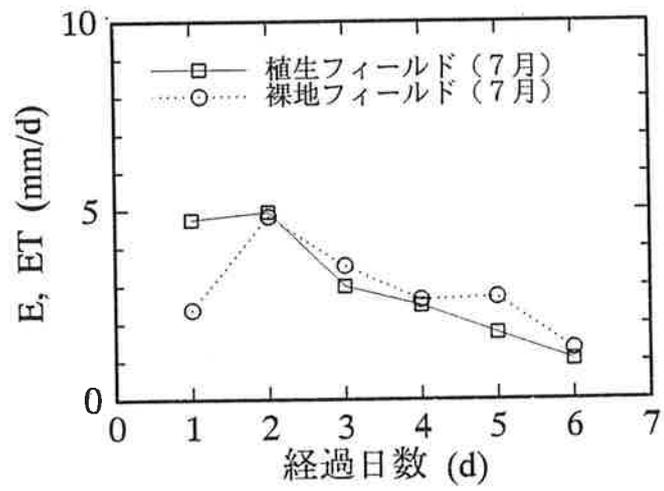


Fig. 4-11 土壤面蒸発量・蒸発散量の経日変化 (1993.7)

20年確率では16日を越える。このため、これらに対応可能な土壌構造や保水性に優れた植生基盤の造成が期待されるところである。

4.5 要 約

本章においては、第3章と同様に、最も代表的な緑化困難地とされる急傾斜切土法面に造成された植生基盤において、播種から導入された木本の生育特性と連続繊維緑化基盤の基本的特性および土壌水分特性について検討した。

その結果、以下のことが明らかにされた。

- ①急傾斜切土法面において、植生基盤の造成により、播種から導入された木本（ヤマハギ）は、順調な生育を示し、播種後4年で優勢な個体は2 m程度の生育高を示した。
- ②導入植物であるヤマハギの生育は、斜面上部に比較して下方が良好になっており、さらに、干ばつ期においても上部のヤマハギや草本は大部分枯死したにもかかわらず、下方のヤマハギが、ほとんど被害を受けていないことが明らかになった。また、侵入種であるヌルデも斜面下方に多く生育していることが観察された。
- ③播種から導入された木本の根系は、生育初期では、主として造成された生基盤内に分布している。したがって、造成された植生基盤は、発芽期および初期生育期間において、最も重要な役割を果たしているものと推測され、緑化困難地などでは、植生基盤の造成が不可欠と判断される。また、根系の伸長状況から、長期的には地山の特性が植生に影響を与えるものと考えられ、今後、岩盤（地山）の特性についても十分な調査・検討が必要となろう。

また、連続繊維緑化基盤の基本的特性および土壌水分特性に関して、以下のことが明らかになった。

- ①急傾斜切土法面に造成された連続繊維緑化基盤は、団粒化度・三相分布などの値が、第2章の供試体における測定値と同レベルであることがわかる。また、経時変化においても大きな変化はみられず

安定しており、植生に適した範囲内にあることが示された。

②急傾斜切土法面には、土壌構造や保水性に優れた植生基盤の造成が有効であり、特に、緑化植物の生育初期においては、植生基盤の造成が必要と考えられる。

③水分環境は、斜面上部に比較して下方部が良好となる場合が多く、したがって、植物の生育状況も下方部が優勢となる傾向が認められる。

これらの結果から、連続繊維緑化基盤などの土壌構造や保水性に優れた植生基盤の造成は、緑化植物の発芽や生育に対して、良好な植生環境を提供できるものと推測され、第3章の結果とあわせて、緑化困難地への適用の可能性を示唆するものである。

第5章 急傾斜切土法面の 造成植生基盤における水分動態予測

5.1 概 説

シミュレーション解析により植生基盤内の水分動態を予測することは、今後の緑化工において重要な位置を占めるものと思われる。水分動態の解析・予測は、①経済的な緑化工の設計（吹付け厚の設定）、②最適施工時期の設定、③施工地に適合した郷土種などの導入植物種の計画、④気象条件を考慮した植生計画、⑤管理計画（用水計画など）などに対して利用が可能であり、適切な設計・施工計画・管理計画の策定ができるものと考えられる。

ここでは、緑化工において最も使用頻度の高い急傾斜切土法面の造成植生基盤における水分動態について、有限要素法によるシミュレーション解析を行った。傾斜地における水分動態の解析には、2次元あるいは3次元の水分動態モデルを使用する必要がある。3次元モデルは、地形が複雑な場合に必要とされ³⁰⁾、今回対象とした急傾斜切土法面は、等高線方向に形状が比較的単純化されていることより、2次元モデルの使用を検討した。また、計算結果と第4章で測定された試験圃場における結果とを比較することにより、水分動態の予測と急傾斜切土法面などの緑化困難地への適用の可能性を検討した。

5.2 数値シミュレーションモデル

5.2.1 数値解法の基本式

本研究では、以下に示す2次元シミュレーションモデルの基本式により、斜面における均一植生基盤内の土壌水分解析を行った³⁰⁾³¹⁾。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial \psi}{\partial y} \right) + \frac{\partial K}{\partial y} + q \quad (1)$$

ここで、 x および y は座標を示し、 y は上向きを正とした。 θ ：土壌水分 (cm^3/cm^3)、 t ：時間 (d)、 K ：不飽和透水係数 (cm/d)、 ψ ：マトリックポテンシャル (cm)、 q ：植物根による吸水量 ($\text{cm}^3/(\text{cm}^3 \cdot \text{d})$)、である。

5. 2. 2 計算条件

(1) 植生基盤のモデル

解析の対象とした急傾斜切土法面は、第4章の滋賀県米原町の試験圃場であり、植生フィールドと裸地フィールドの2つのケースの水分動態を検討する。計算モデルとして、Fig.5-1に示すA B C Dで囲まれた浸透領域を設定する。ここで、A Bは造成された連続繊維緑化基盤の表面である。また、地山(F C D E)を緑化困難地である岩盤と想定するためC Dを不透水性境界とし、B Cは排水境界に設定した。この領域をFig.5-2に示すように三角形要素で分割した。

また、計算条件の設定および計算・評価などについて計算のフロー図をFig.5-3に示した。

(2) 初期条件・境界条件

1993年7月における初期条件は、分割要素節点のマトリックポテンシャル ψ を既知として与えた。灌水後24時間経過時における斜面上部・中部・下部の各々30点の測定値を用いて、斜面下端Cからの高さ h から、最小二乗法により各節点の ψ を設定した (Table 5-1参照)。

斜面最上部境界A Dは、不透水層D Eが対象斜面に対して逆勾配となるため、水の流入はないものとした。

斜面下部の不透水層F C上の土壌水は、植生基盤からの排水の影

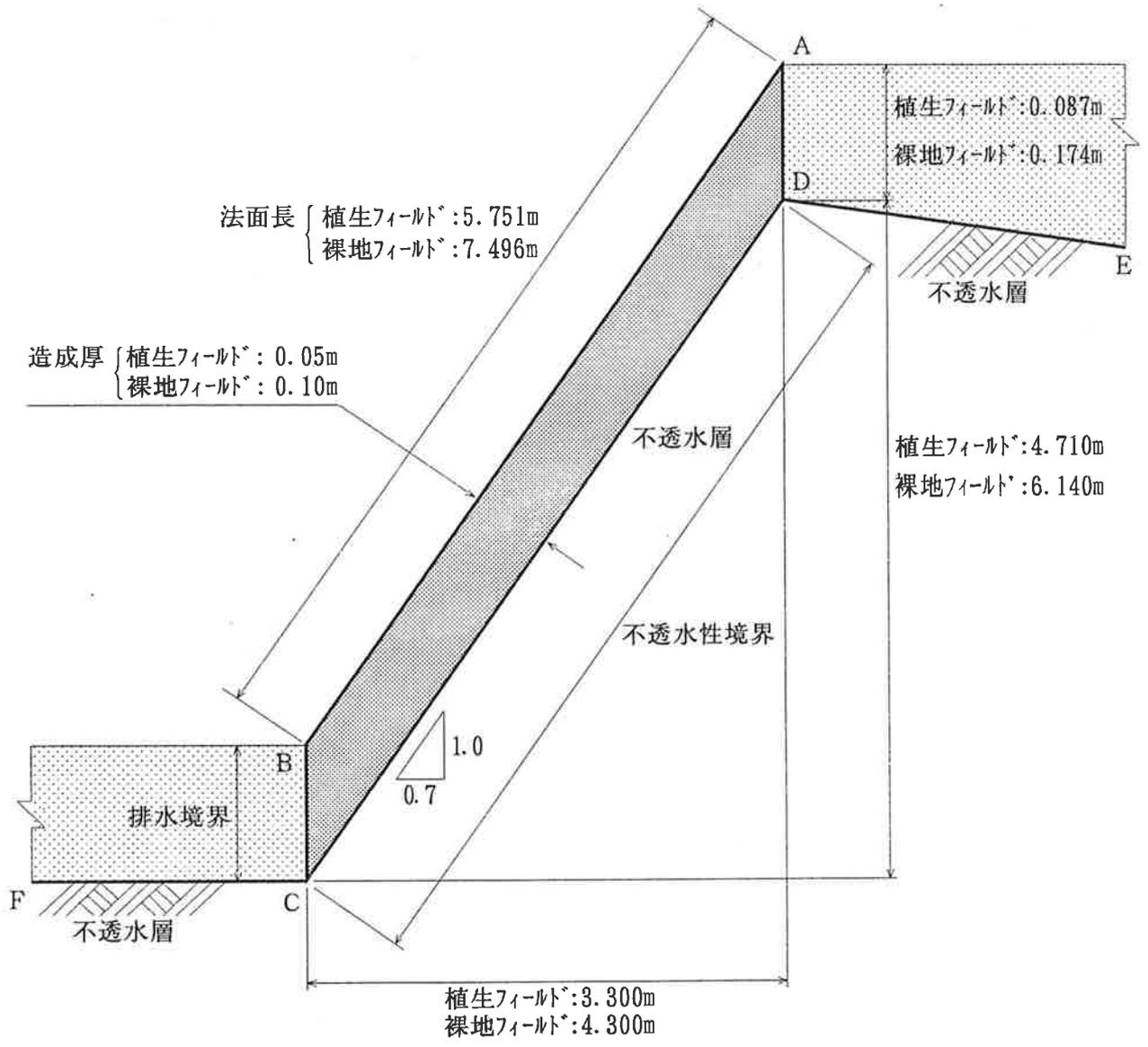


Fig. 5-1 計算モデル図

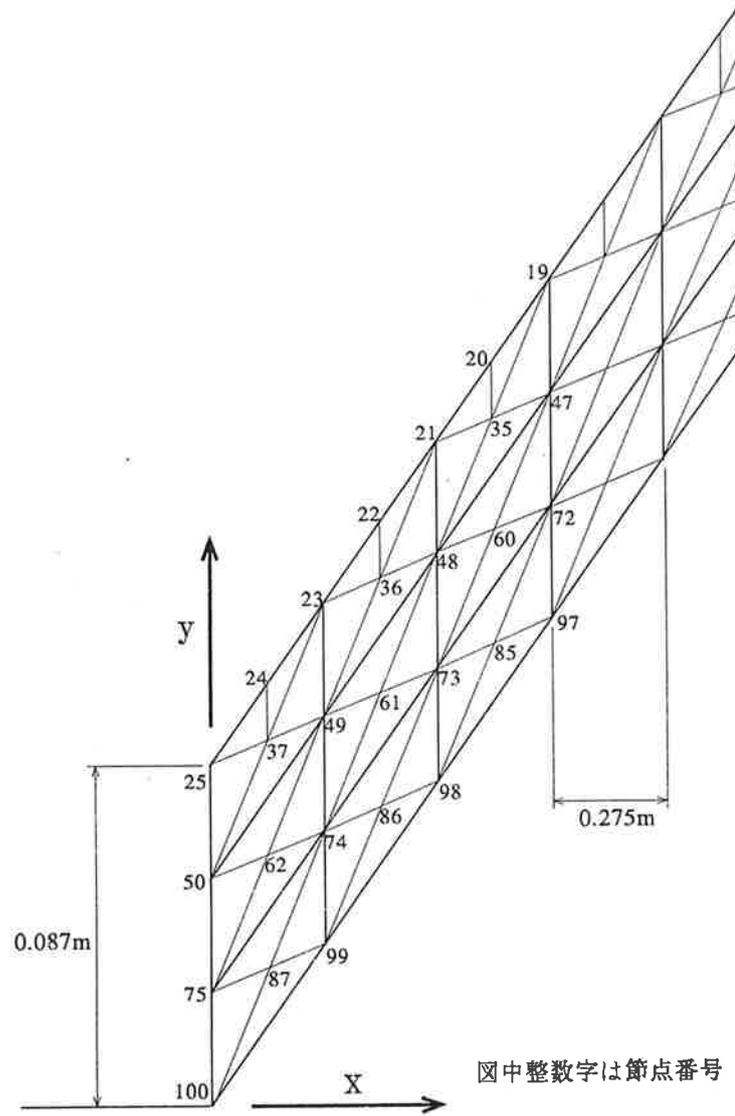


Fig. 5-2 生育基盤の要素分割模式図
(植生フィールド)

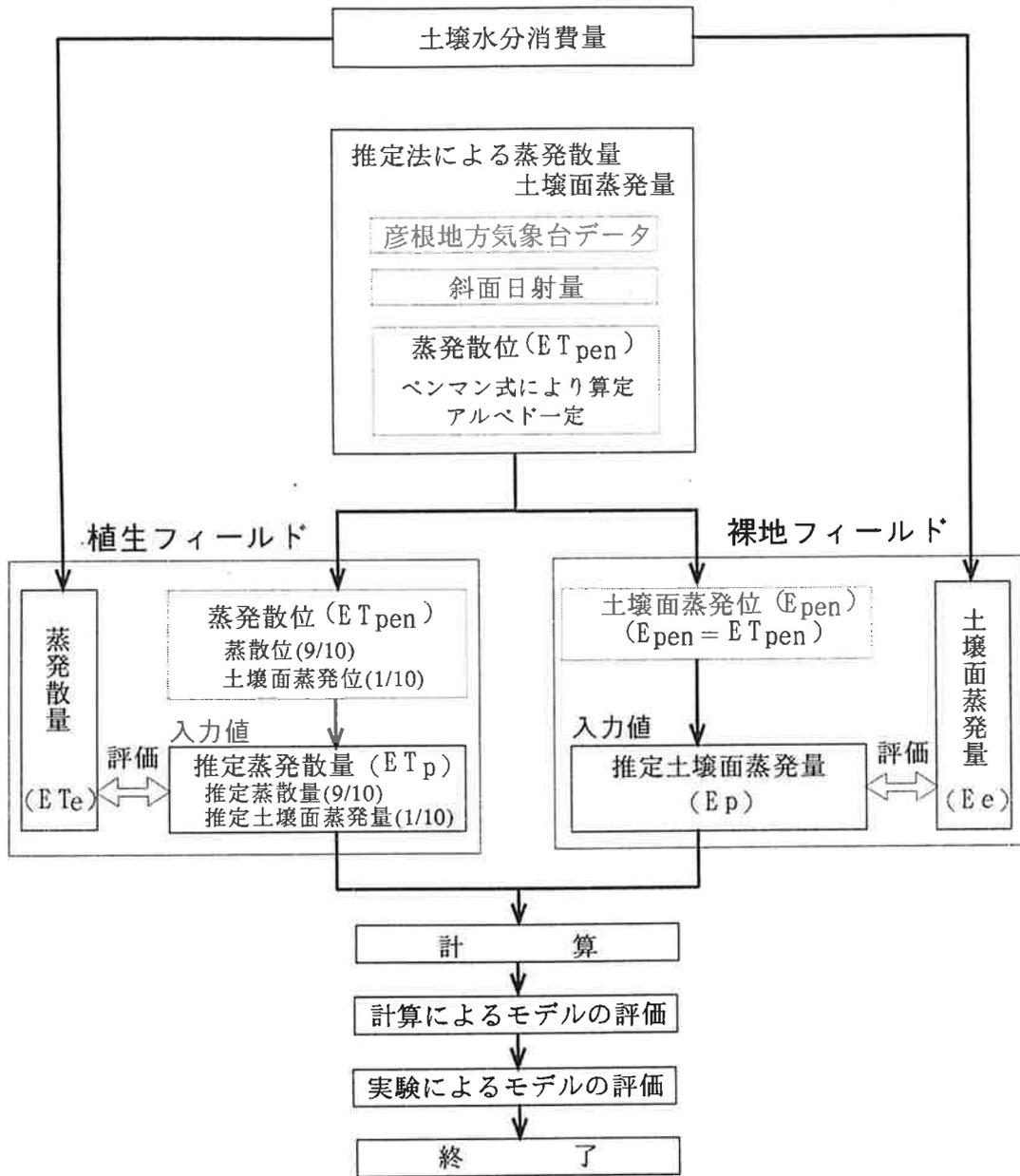


Fig. 5-3 計算のフロー図

響を受け、飽和に近い水分量を示した。また、排水境界BC付近における観測期間中のマトリックポテンシャルの実測値は、 -10.0cm ～ -30.0cm の範囲の値を示した。これらの結果から、ここでは排水境界のマトリックポテンシャルを $\phi = -10.0\text{cm}$ 、 -20.0cm 、 -30.0cm とし、各々の場合について検討した。

計算の開始時間は午前11:00とし、時間分割は 0.01d とした。

Table 5-1 各分割要素節点における

マトリックポテンシャルの初期値

解析時期	植生フィールド	裸地フィールド
1993年7月	$\phi = -0.20 h + 12.01$ (0.998)	$\phi = -0.10 h - 9.88$ (0.997)

hは斜面下端からの高さ、()内は相関係数

(3) ペンマン式による蒸発散位の算定

ペンマン式による蒸発散位の算定にあたっては、三浦・奥野の計算法³²⁾³³⁾によった。この計算法に必要な気象データは日平均気温、湿度、風速、日照時間であり、その他には測定地の緯度および地表面のアルベドとしている。ここでは、気象データは彦根地方気象台のデータを使用し、地表面のアルベド($\alpha = 0.15$)は一定とした³⁴⁾。

また、今回の解析は、山腹切土法面などの急斜面における水分動態を対象としているため、この計算法によるペンマン式の蒸発散位の値を、斜面に適用できるように換算する必要がある。この換算にあたっては、斜面の日射量についての小沢の報告³⁵⁾、三浦らの傾斜地の日射量分布計算法³⁶⁾を利用して算定した。

計算結果から、1993年7月における米原の北斜面(勾配1:0.7)の日射量は、水平面に比較しておよそ0.6倍となる。この値を用いて、ペンマン式により蒸発散位を計算し、解析にはこの数値を用いた。

(4) pF水分特性曲線および不飽和透水係数

連続繊維緑化基盤による植生基盤は、サンプリングの結果、乾燥密度のバラツキ ($\gamma = 0.45 \pm 0.06 \text{g/cm}^3$)があったが、ここでは均一に造成されているものとした。また、水消費過程のみを解析対象としているので、土壌水分特性曲線および不飽和透水係数は、脱水過程の曲線を用いた (Fig. 3-6 参照)。今回対象とした造成植生基盤土壌の不飽和透水係数については、土壌水分特性曲線の類似した黒ボク土において、実測値 (吸引法により測定) と Jackson 法による計算値のあいだに検討が加えられており、ほぼ一致することが示されている³⁷⁾ことから、ここでは Jackson 法による計算値を用いた。

(5) 推定蒸発散量・推定土壌面蒸発量の入力

植生フィールドにおいては、ペンマン式により算定した蒸発散位 (ET_{pen}) を、蒸散位と土壌面蒸発位に 9 : 1 の割合で分離した³⁸⁾。また、裸地フィールドでは、蒸発散位 (E_{pen}) が土壌面蒸発位と等しいと仮定した。

蒸散量および土壌面蒸発量は、植生基盤内の水分量により変化するものとして、pF 2.7 以下では、それぞれ蒸散位および土壌面蒸発位の 100%、pF 4.2 (永久しおれ点) 以上ではゼロとした。その間は、水分量により正比例分布するものとした。

これらの条件により算定された値を入力値とし、植生フィールドでは推定蒸発散量 (ET_p) = 推定蒸散量 + 推定土壌面蒸発量、裸地フィールドでは推定土壌面蒸発量 (E_p)、とした (Fig. 5-3 参照)。なお、蒸発散は 6 時から 18 時の間で生じるものとして、正弦関数により蒸発散量を設定し、この時間以外ではゼロとした。

(6) 根系分布

水分吸収にかかわる根系の分布は、造成植生基盤内が主体であった。この結果、今回の検討においては、岩盤内の水分は少量であるため蒸散は無視できるものとし、植生基盤内の水消費のみを検討の対象とした。

また、緑化植物による根系は、造成された植生基盤内では均一に

分布しているものとし、したがって、根系による吸水量 q も均一とした。

5. 3 結果および考察

5. 3. 1 消費水量の評価

計算条件の入力値としての推定蒸発散量および推定土壌面蒸発量は、近接した彦根地方気象台のデータをもとに、ペンマン式により算定している。その気象データ利用の可能性について、基本的な評価を行った。このため、裸地フィールドにおいては推定土壌面蒸発量 (E_p) と土壌水分消費量 (土壌面蒸発量: E_e) との比較、植生フィールドにおいては推定蒸発散量 (ET_p) と土壌水分消費量 (蒸発散量: ET_e) との比較を行った。それらの日変化をFig.5-4 示し、この結果から平均相対誤差 (σ_{et}) を次式により求めた。ここに、 n は対象サンプル数であり、裸地フィールド・植生フィールドとも $n = 90$ である。

$$\sigma_{et} = 1/n \sum_{n=1}^n |ET_p - ET_e| / ET_e \times 100 \quad (2)$$

σ_{et} は、測定値を近似値と仮定した場合、近接した気象台の推定データの誤差に相当しよう。ここでは、植生フィールドにおいては、31%前後の値を示し、裸地フィールドにおいては、30%以下の範囲内に収まることが確認された。

また、排水境界のマトリックポテンシャルとして、 $\psi = -10.0\text{cm}$ 、 -20.0cm 、 -30.0cm の値を用い、各々の場合についての計算を行った。排水境界条件は斜面下部の計算値に影響を与えられ考えられるが、今回の測定値の範囲内である $\psi = -10.0\text{cm} \sim -30.0\text{cm}$ においては、植生・裸地フィールドとも大きな差異はみられなかったため、ここでは、 $\psi = -10.0\text{cm}$ について検討を行った。

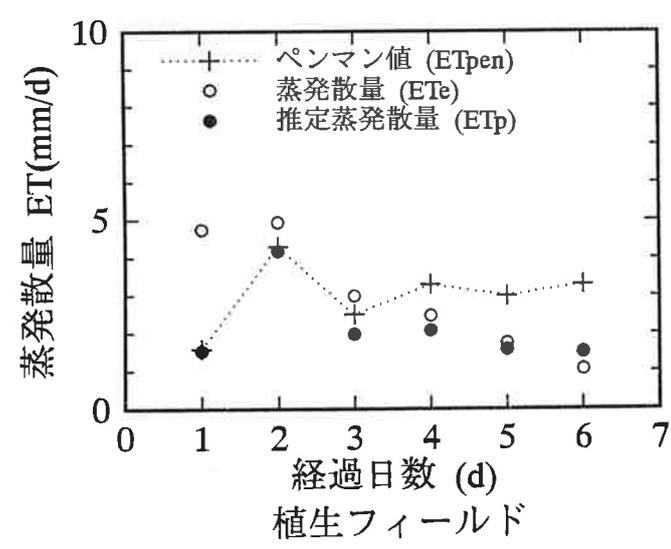
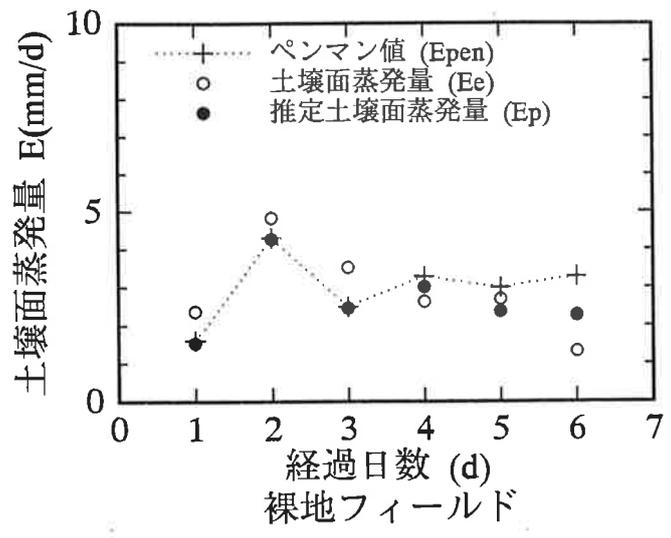


Fig. 5-4 土壌面蒸発量・蒸発散量の経日変化 (1993.7)

5. 3. 2 シミュレーションモデルの評価

(1) 裸地フィールドの計算結果

裸地フィールドでのシミュレーション解析による等マトリックポテンシャル線をFig.5-5に示した。対象とした時期は1993年7月である。また、Fig.5-6には、計算結果と裸地フィールドの水分測定によるpF値の経日変化を示した。

これらの結果から、裸地フィールドにおいては、土壌面蒸発の影響を大きく受けていることが推測される。等マトリックポテンシャル線の形状から、植生基盤の表面に近いほど、早い時点で乾燥状態になることが確認される。また、植生基盤内の水分は、漸次斜面上部から減少していく傾向を示しており、その減少傾向は灌水後ほぼ7日で、上・中部とも概ね植物の永久しおれ点（pF 4.2）付近の一定値に収束する傾向を示している。

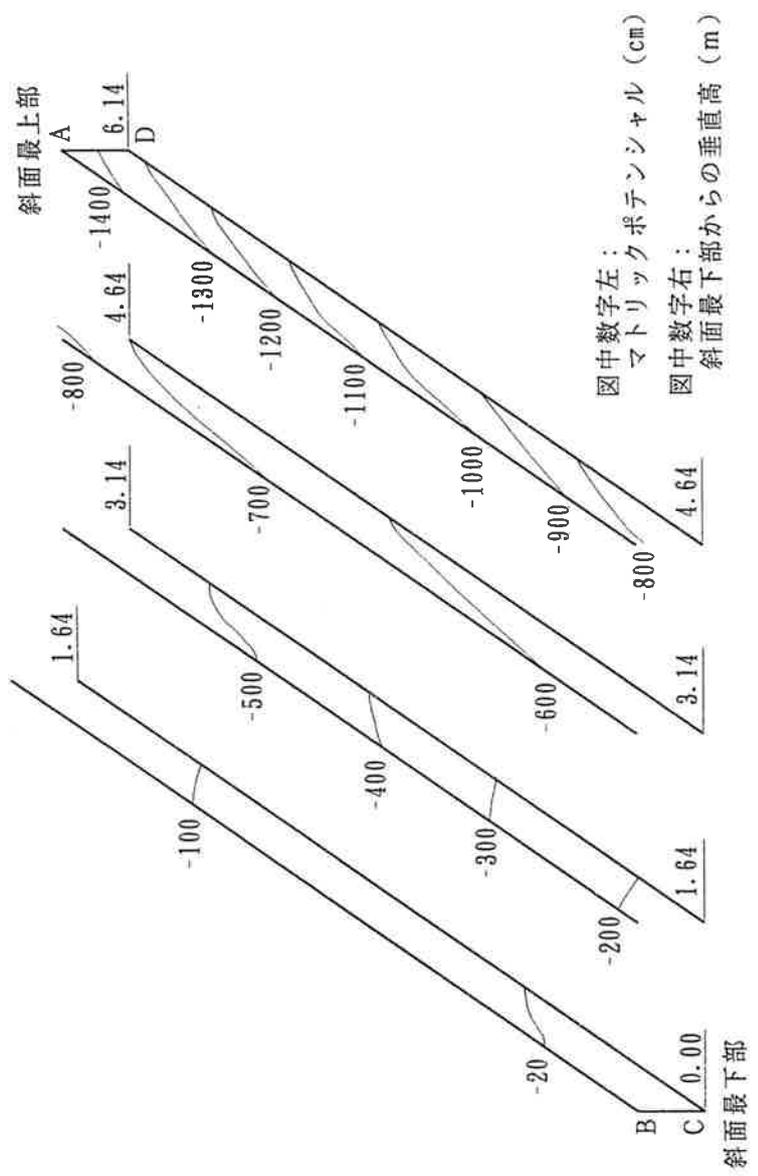
(2) 植生フィールドの計算結果

Fig.5-7に、植生フィールドの等マトリックポテンシャル線を示す。また、Fig.5-8にはpF値の経日変化を示した。この結果から等マトリックポテンシャル線は、斜面勾配にかかわらずほぼ水平に平行的に表れ、植生基盤内の水分は、漸次斜面上方から減少していく傾向を示している。また、裸地フィールドと同様に、経過日数が6日頃の時点で上・中部ともpF 4.2付近の一定値に収束する傾向を示しており、上方において水分の減少が著しい。

また、同一時期（4日後）におけるマトリックポテンシャルは、斜面下端から4m付近で、植生フィールド -4500cm、裸地フィールド -1000cm前後の値を示しており、植生フィールドの水分量の減少が大きいことが確認される。

(3) 計算によるモデルの評価

計算開始直後、3日後および6日後の各時点において植生フィールドにおける計算精度の評価を行った。計算における誤差（ σ_w ）は、水収支式を利用して、次式により求めた。



4日後の等マトリックポテンシャル線

Fig. 5-5 等マトリックポテンシャル線 (裸地フィールド 1993.7)

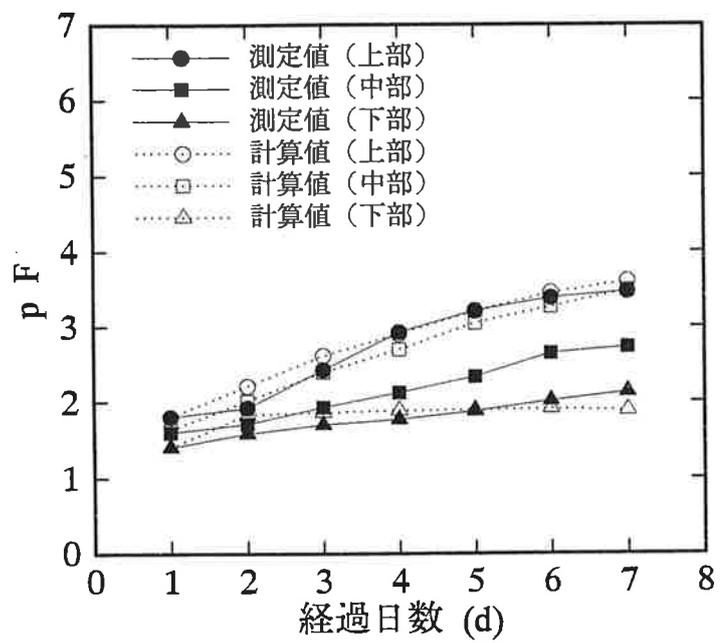
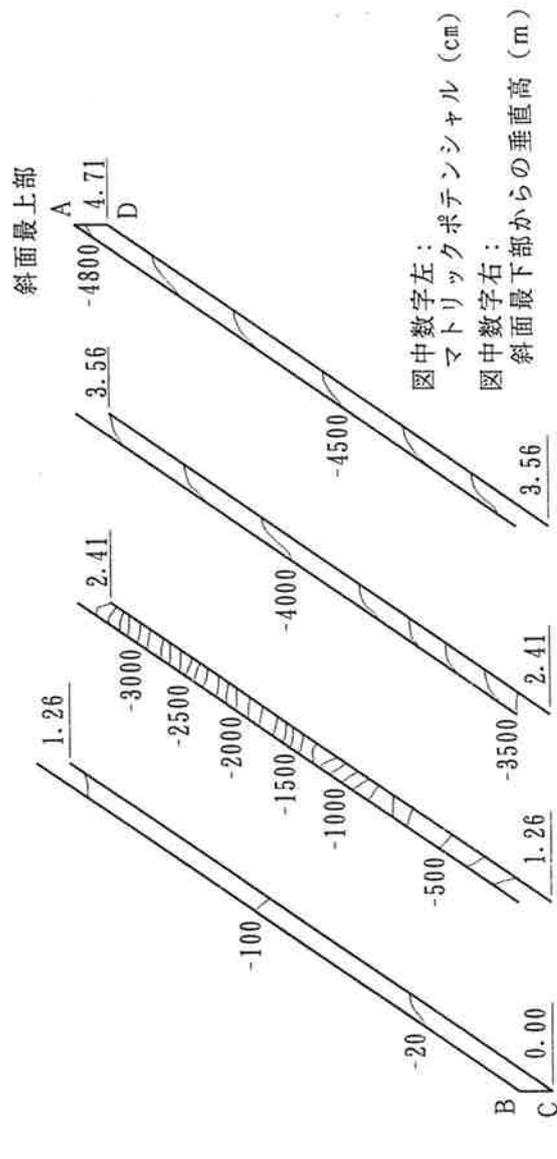


Fig. 5-6 測定値と計算値の比較 (裸地フィールド 1993.7)



4日後の等マトリックポテンシャル線

Fig. 5-7 等マトリックポテンシャル線 (植生フィールド 1993.7)

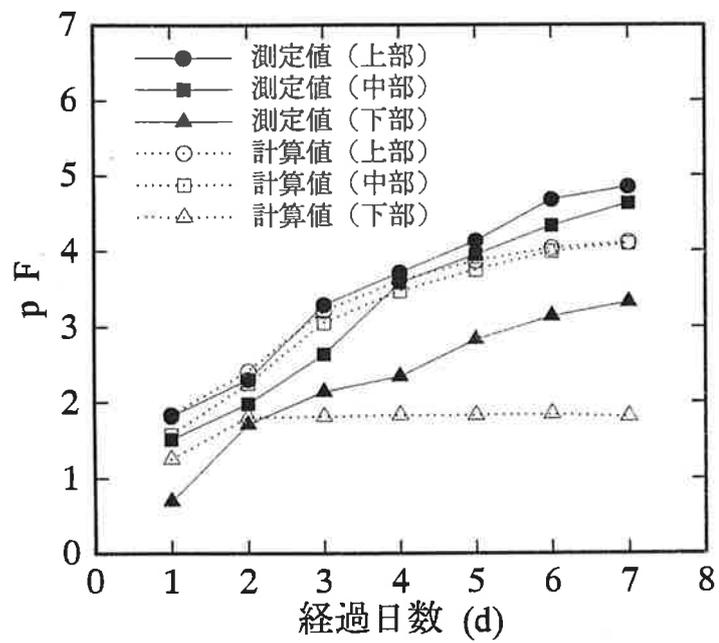


Fig. 5-8 測定値と計算値の比較 (植生フィールド 1993.7)

$$\sigma_w = \left(\sum_{n=1}^n I - \sum_{n=1}^n ET \pm \sum_{n=1}^n \theta \right) - \sum_{n=1}^n D \quad (3)$$

ここで、 ΣI ：供給水量（cm）、 ΣET ：蒸発散量（cm）、 $\Sigma \theta$ ：植生基盤内水分量の増減量（cm）、 ΣD ：植生基盤からの排水量、 n ：対象サンプル数（ $n = 100$ ）である。この結果から、 σ_w の値は計算開始からの時間にはほとんど影響されず、水分量の相対誤差 $\sigma_w / \Sigma I$ は、3%前後の範囲内におさまる。

(4) 実験によるモデルの評価

シミュレーション解析による計算結果についての評価を、第4章における体積含水率の測定値と比較することにより行った。測定値に対する平均相対誤差（ σ_t ）をTable 5-2に示した。7月での裸地フィールドでは $\sigma_t = 9.0\%$ 、植生フィールドでは $\sigma_t = 14.0\%$ であった。

Table 5-2 体積含水率の計算値に対する平均相対誤差（ σ_t ）

(単位：%)

計算位置	裸地フィールド	植生フィールド
斜面上部	3.64	11.27
斜面中部	18.76	9.90
斜面下部	4.61	20.76
平均	9.00	13.98

斜面上・中・下部の各位置における比較をすれば、裸地フィールドにおいては、上部・下部が相対誤差が少なく、中部が大きい傾向を示す。一方、植生フィールドにおいては、下部が大きく、中部および上部が少ない傾向を示し、また、裸地フィールドに比較して、平均相対誤差が大きくなる傾向を示した。この要因としては、計算条件として、根系による吸水量 q を斜面全体にわたり均一と仮定し

たことが影響していると考えられる。植生状況は、前述のように下部が良好であり、したがって、根系の分布も下部において密度が高くなっていると考えられ、これが計算結果に影響を与えているものと推測される。

これらのことから、气象台などの既存のデータを用いた場合においても、試験圃場での測定値とほぼ傾向が一致していることが確認される。特に、裸地フィールドにおいては、相対誤差の値が小さくなることが確認された。したがって、植物の生育が植生基盤に依存している造成初期において、実用化の観点から、シミュレーションモデルの造成植生基盤への適用が有用であると考えられる。

5.3.3 シミュレーションによる

過去の干ばつ期の水分動態予測

米原における植生フィールドの造成後（播種後）、4月から10月の植物活動期において、最も連続して干天日数の長い時期（1992年7月）を選定し、彦根地方气象台のデータから消費水量を推定し、シミュレーション解析を行った。計算条件は前項と同様とした。ただし、初期条件は、降雨後24時間経過した圃場容水量状態にあるものとし、全層にわたってマトリックポテンシャルを -63cm と仮定した。

Fig.5-9 は、計算結果による pF 値の経日変化を示したものである。この結果から、水分の減少傾向は、斜面上方部では降雨後7日～9日程度で、 $pF 4.2$ 付近で収束してくることがわかる。これに対して斜面下方部では、水分の減少傾向の収束には2週間以上を要している。このため、斜面上方部に比較して時間的なずれがあり、水分の保持されている時間が長くなる傾向がみられる。したがって、植生の水分環境は斜面下方部が、長時間優れた状況にあることが推察される。

また、計算結果について、連続干天日数の気象統計との比較・検

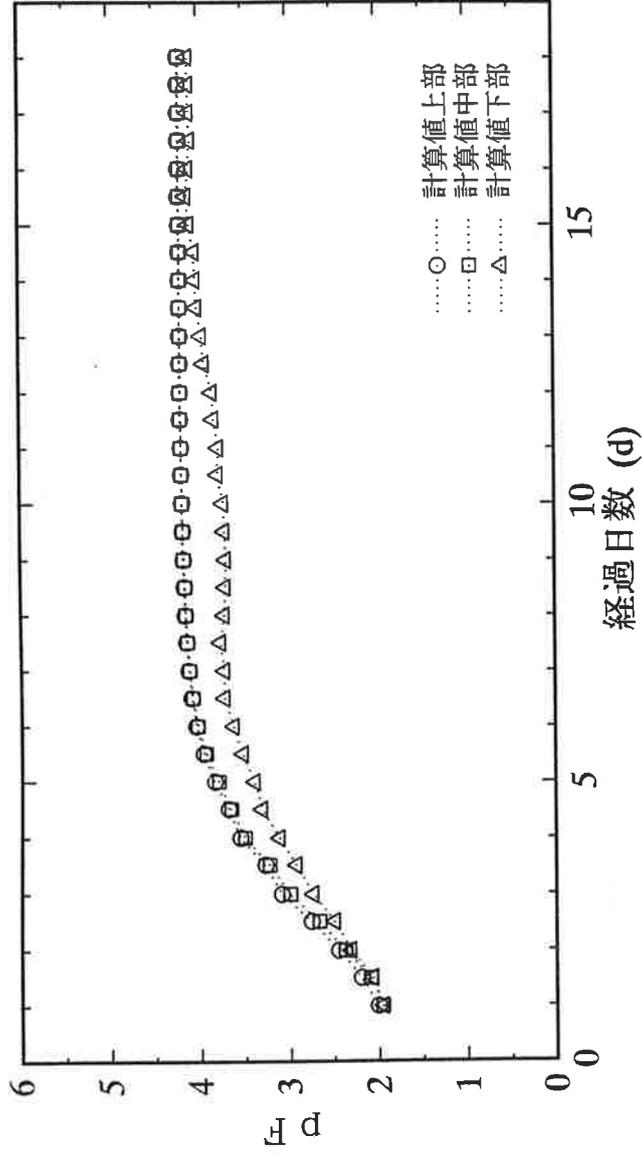


Fig. 5-9 1992年7月における計算値

討を行った。植物の水消費量がピークになる7月および8月において、10年確率では13日、20年確率では16日を越える連続干天日となる。したがって、試験圃場と同様な条件で、彦根地方に厚さ5 cm程度の植生基盤を造成した場合、植生基盤下方部の緑化植物にかかわる水分は、概ね20年確率の連続干天日数に適応できることが予測される。

米原の試験圃場におけるこれまでの最長連続干天日数は、1994年7月9日～7月29日の21日間である。また、同年の夏期は、8月においても14mmの程度の降雨をはさんで20日以上降雨が記録されておらず、植生環境が厳しい時期であったことが推測される。第4章において述べたように、この時期における植生状況は、斜面の上部において生育高の比較的低い個体の枯死が観察され、また、下部においても葉の変色など水不足の影響が見受けられるようになってきている。したがって、およそ20日の連続干天日数が、造成された植生基盤の水分保持量の限界であると考えられ、シミュレーション解析による水分減少傾向の収束時期から、植生基盤の限界の推定が可能であると考えられる。実際の現場においては、これ以上干天日が継続するような場合には、造成する植生基盤の厚さを増加させる計画、あるいは灌水などの植生管理を実施する必要があるだろう。また、経験的に緑化工の真夏期（7月末～8月）の施工は、灌水装置を伴わない場合、失敗例が多いとされた。この時期は数値的にも植生に関する水分環境が厳しい時期であることがいえる。

5. 4 要 約

第3章および第4章において、緑化困難地における植物生育について検討し、砂斜面や急傾斜切土法面に、連続繊維緑化基盤工により導入された植物の生育状況を明らかにした。また、造成された植生基盤の土壤水分特性について検討し、水分環境が植物生育に与える影響と、土壤水分動態などについて明らかにした。

本章では、これまでの検討結果を踏まえて、急傾斜切土法面に造成された植生基盤における水分動態のシミュレーションモデルを提案し、適用の可能性などについて検討した。

① 計算条件として、気象データからペンマン式により算定された推定蒸発散量・推定土壌面蒸発量を入力値として用いている。この値と、測定値から求めた土壌水分消費量との評価を行った結果、平均相対誤差は30%以内であった。これにより、気象台のデータなどの既存データ利用の可能性が確認された。

② 計算モデルの精度の評価として、水収支式(3)の利用により、植生基盤内の水分の増減量と蒸発散量および流入・流失量を比較した。この相対誤差は、3%以内であった。

③ 7月における体積含水率の測定値と計算結果の平均相対誤差は、推定蒸発散量・推定土壌面蒸発量を使用した場合においても、植生フィールド $\sigma_t = 14.0\%$ 、裸地フィールド $\sigma_t = 9.0\%$ であった。pF値の経日変化もほぼ一致することが確認された。

④ 本シミュレーションモデルの使用による計算結果から、斜面における植生の水分環境は、下方部が上方部に比較して優れていることが確認された。また、水分動態の予測に関して、干ばつ期の実験フィールドにおける植生調査の結果と比較することにより、モデル適用の提案を行った。

今回のシミュレーション解析にあたって、初期条件・境界条件、あるいはペンマン値による蒸発散量の推定などいくつかの仮定をした。また、計算モデルにおいても基盤を一様にし、等温条件下において検討した。したがって、シミュレーションモデルの適用については、仮定条件を十分考慮する必要があると考えられる。今後の課題として、シミュレーション解析の精度を高めるためには、これらの仮定条件の評価について、基礎的な検討を行っていくことが必要である。境界条件に関しては、不透水要素として扱った岩盤などの地山の水分動態の解明、あるいは、排水境界の設定などについて検討する必要がある。また、蒸発散量の推定においても、斜面における

日射量の算定法、気象台データの利用に関しては、施工地固有の地形条件などのパラメーターの設定、あるいは施工時期の相違などを加味した消費水量の詳細な検討が必要になってくるものと考えられる。

なお、連続繊維緑化基盤の特徴の一つである混入される連続繊維は、植生基盤の耐食性の向上に効果を有する。しかしながら、混入量が重量比で約 0.1%であることから水分動態に関してはその影響は無視できると考えられるため、今回の検討からは除外した。

第6章 総 括

環境問題が大きくクローズアップされるようになってから久しいが、最近の環境問題に対する関心の高まりにともない、その対象範囲は、地球的規模のものから、人々の生活レベルにいたるまで多種多様な広がりを見せている。一方、環境問題に対する取り組み方も、公害などに対する環境汚染防止技術から、快適環境の創出のための技術開発などへと質的な変化をみせている。これらの環境に対する関心の高まりを背景に、緑化においても、環境問題の解決や快適生活空間の創出などに対する貢献が求められており、今後の研究や技術開発に大きな期待が寄せられているところである。

こういった緑化の分野の中から、本研究は、緑化困難地に造成される植生基盤を対象に取り上げ、その適用の可能性について検討を加えたものである。植生基盤の造成は、緑化の基本手段であり、その基盤の持つ特徴・特性が、現在緑化技術に求められている多くの課題に対して、有効な解決手段になり得るものと考えられる。

連続繊維緑化基盤工は、こういった状況のもとに開発された植生基盤造成の手法である。本研究では、連続繊維緑化基盤工により造成された植生基盤の基本的特性、導入植物の生育特性および土壌水分特性などについて検討し、その有効性を明らかにした。また、これらの結果を利用して、造成植生基盤における水分動態に関するシミュレーションモデルを提案し、その評価および適用性の検討を行っている。

本研究では、第2章において、連続繊維緑化基盤の緑化困難地への適用を目的として、その基盤の団粒化度・三相分布などの基本的特性および土壌の流亡特性を検討することにより、緑化困難地における優位性を明らかにした。

次に、これらの結果を踏まえて、第3章では、試験対象地として緑化困難地とされる砂斜面を選定し、そこに造成された連続繊維緑

化基盤に、播種から導入された緑化植物の生育特性について検討を行った。また、造成された連続繊維緑化基盤の基本的特性を把握し、土壌水分特性について検討を加えた。さらに、これらの水分動態が、緑化植物の生育に与える影響などについて考察を行った。

砂斜面の試験施設は、鳥取砂丘地を対象として、乾燥地研究センターの大型ガラス室内に造成した。ここでは、降雨遮断条件で灌漑条件下における緑化植物の生育特性について検討を加えた。維持管理の低減などを図ることを目的として、灌漑回数は最小限に抑え、間断日数を長くした灌漑を適用した。ガラス室内における気象条件は、露地と比較すれば、気温・地温は高レベル、湿度は低レベルで推移しており、また、試験施設が砂斜面であることを考慮すれば、植生に対してかなり厳しい条件であったと推測される。その結果、保水性の高い植生基盤の造成により、導入された緑化植物の生育は全般的に良好と判断され、さらに、植生基盤上に砂マルチをすることにより、生育状況がより良好となることが示された。また、同一斜面における緑化植物の生育状況は、斜面上部に比較して下部における生育が優勢な状況となる傾向を示した。

連続繊維緑化基盤の基本的特性に関しては、実際に砂斜面に造成された場合においても、第2章の供試体試験と同様、団粒化度・三相分布などは、自然の森林土壌と同程度の値をとることが確認された。また、植物の発芽・生育には、保水性の高い植生基盤の造成が有効であることが明らかになった。しかしながら、保水性の高い植生基盤を砂斜面上に造成することは、灌漑水の浸透ロスを低減するが、高温低湿条件下では、土壌面蒸発量を増加させることが示された。一方、植生基盤表面に砂をマルチすることは、土壌面蒸発の抑制の効果を持ち、したがって、植物の発芽・生育状況も良好となることが示された。

第4章では、緑化困難地として急傾斜切土法面を取り上げ、そこに造成された連続繊維緑化基盤に、播種から導入された緑化植物の生育特性について検討を行った。試験地は、滋賀県米原町における

岩盤法面を対象とした。ここに連続繊維緑化基盤工により植生基盤を造成し試験圃場とした。

緑化植物の生育特性に関しては、4年間の追跡調査を行った。その結果、導入された木本は順調に生育しており、生育高は優勢な個体で2 m程度まで達していること、その生育は水分環境により斜面上方に比較して下方が良好になっていること、などが示された。また、導入木本であるヤマハギは、草本と比較して、干ばつなどの気象状況の変化に対する適応性に優れていることが示された。一方、木本の根系は、生育初期の段階では、主として造成された植生基盤内に分布していることから、植生基盤はその造成初期において、最も重要な役割を果たしていることが明らかになった。

また、連続繊維緑化基盤の基本的な土壌特性および土壌水分特性について検討を加えた。その結果、実際に急傾斜切土法面に造成された連続繊維緑化基盤においても、第2章の供試体試験と同様、団粒化度・三相分布などの基本的特性が、自然の森林土壌と同程度の値をとることが確認された。また、急傾斜面における植生の水分環境は、下方部が上方部に比較して優れていることなどが明らかになった。

第5章では、急傾斜切土法面に造成された植生基盤における水分動態のシミュレーションモデルを提案し、近接する気象台のデータを利用し、シミュレーション解析を試みた。この計算結果と実際の圃場から得られた試験結果と比較して評価を行い、気象台データなどを利用したシミュレーションモデルの適用の可能性を確認した。

この提案モデルは、比較的単純な条件を想定し、初期条件、境界条件、蒸発散量の推定などについて多くの仮定をした。このため、より複雑なモデルを想定した場合は、仮定条件についての検討が必要であり、今後、シミュレーション解析の精度を高めるためには、これらの仮定条件の評価が課題となろう。

以上の研究は、連続繊維緑化基盤工により造成された植生基盤を

主体に実施してきた。団粒構造など土壌構造に優れ、かつ保水性の高い連続繊維緑化基盤の造成は、緑化植物の発芽・生育に有効であり、また、急傾斜地など水分の保持が困難なところや、降雨量の少ない地域での水分の有効利用などに貢献していると推測される。

こういった優れた植生基盤の開発・実用化は、今後の播種から木本を導入する緑化の基本要因になると考えられ、同時に、現在の緑化における課題である植生の多様化や生態系の回復・保全などへの貢献が期待できると考える。また、本報で提案したシミュレーションモデルによる解析とあわせて、将来的に緑化の設計・検討に有用な手段となることが期待される。

今後、緑化は、急傾斜切土法面や砂斜面などの緑化困難地から、降灰地、冠水地、さらに乾燥地などの特殊地へと、植生条件のより厳しい地域への本格的導入が図られていくものと考えられる。連続繊維緑化基盤は、冒頭で述べたように降灰地や冠水地などの特殊地において初歩的な試験を実施しており、降灰地においては、法面侵食防止と特定樹種の導入の可能性をみいだしている。また、乾燥地などへの適用に関しても、これまでの研究結果と施工の実績を踏まえて、実用化の可能性が示唆されている。しかしながら、乾燥地においては植生基盤の塩類集積に関する課題など、多くの課題がさらに提起されるものと考えられる。

これらの将来的緑化技術の研究・開発において、本研究が一助となれば幸いである。

謝 辞

本研究の実施および取りまとめにあたって、鳥取大学乾燥地研究センター緑化保全部門土地保全分野 山本太平教授と井上光弘助教授、佐賀大学海浜台地生物生産研究センター 田中明教授、島根大学農学部 新村義昭助教授に、多大なるご指導ご鞭撻をいただきました。ここに深謝に意を表します。

また、実験データの測定や整理に関して、土地保全分野の研究室の学生杉山靖君、大越謙太郎君には、多大なる協力をいただきました。また、(株)熊谷組の瀬川進君には、面倒な計算処理について、御助力いただきました。ここにあわせて深謝の意を表します。

引用文献

- 1) 環境庁自然保護局監修：自然公園における法面緑化基準の解説，道路緑化保全協会，（1982）
- 2) 山寺喜成：景観土木の手法，全国SF緑化工法協会，p6～p46（1990）
- 3) 山寺喜成：播種工による早期樹林化方式の提案，緑化工技術12(2)，P35（1986）
- 4) 倉田益二郎：緑化工技術，森北出版，（1979）
- 5) （財）土木研究センター：連続繊維緑化基盤「テクソル・グリーン工法」設計施工マニュアル，p1～p44（1994）
- 6) （社）日本道路協会：道路土工のり面工・斜面安定工指針，（1989）
- 7) 日本緑化工学会：緑化技術用語辞典，（1990）
- 8) （財）土木研究センター：土木系材料技術・技術審査証明報告書 連続繊維緑化基盤，（1992）
- 9) 山寺喜成、中山覚博、横塚 享、瀬川 進他：自然の再生を目指した法面緑化の計画と施工 テクソル・グリーン工法、理工図書
- 10) 全国SF緑化工法協会：連続繊維緑化基盤工標準仕様・積算資料，（1992）
- 11) 横塚 享、瀬川 進、増田隆晴、山本太平：山腹切土法面における緑地の造成、農業土木学会誌 61(3)、p19～p24（1993）
- 12) （社）農業土木事業協会：のり面保護工 設計・施工の手引き，p72～p172（1990）
- 13) （社）農業土木学会：土の理工学性実験ガイド，p41～p44（1983）
- 14) 山田宣良，横瀬広司：団粒分布に基づく土壌の団粒の評価法，農業土木学会誌 59(4)，p31～p35（1984）
- 15) 川口桂三郎：土壌改良材の性状(2)，土壌の物理性 No.7，p29～p41（1963）

- 16) 高井康雄他：植物栄養土壤肥料辞典，（株）養賢堂， p361～ p424
p965～ p985（1987）
- 17) 吉永長則他：火山灰土 生成・性質・分類，日本肥料学会 博
友社，（1983）
- 18) 河野 洋，吉田 勲，辻本 学：大山クロボク土の団粒分析，
農業土木学会誌 51(10)， p45～ p53（1983）
- 19) 新城俊也，小宮康明，宮城調勝，赤嶺充司：高分子系被膜剤に
よる国頭マーシ地帯における赤土流失防止，農土論集 166， p97
～ p104（1993）
- 20) 内田勝利：雨滴による土壤面侵食と団粒土の耐水性，農業土木
学会誌 50(2)， p29～ p33（1975）
- 21) S.Segawa, T.Yamamoto, A.Tanaka, M.Inoue, S.Yokotsuka：
MICROIRRIGATION FOR ARTIFICIAL BED SOIL FOCUSED ARID LANDS
Proceedings of the Fifth International Microirrigation
Congress, American Society of Agricultural Engineers
p812～ p817（1996）
- 22) 石塚和雄他：群落の分布と環境，朝倉書店， p196～ p206（1977）
- 23) 田中 明他：灌漑下の連続繊維緑化基盤工における土壤水分動
態解析，平成5年度農業土木学会講演会要旨集， p150～ p151
（1993）
- 24) 横塚 享、瀬川 進、増田隆晴、山本太平：ジオテキスタイル
導入による連続繊維緑化基盤工、農業土木学会誌 60(12)、 p29
～ p32（1992）
- 25) 横塚 享、山本太平、杉山 靖、瀬川 進：造成植生基盤にお
ける木本類の生育特性 山腹切土法面を対象にした連続繊維緑
化基盤工の実用化、農土論集 179、 p133～ p140（1995）
- 26) 日本気象協会：彦根地方気象台気象データ（SDP63761～
SDP93761），（1963～1993）

- 27) 横塚 享、山本太平、田中 明、井上光弘、杉山 靖、瀬川 進
：造成植生基盤における水消費に伴う土壌水分特性 山腹切土
法面を対象にした連続繊維緑化基盤工の実用化、農土論集 179、
p39～p47 (1995)
- 28) 山本太平：点滴灌漑における有効雨量 点滴灌漑の用水計画に
ついて (Ⅱ)，農土誌 57(8)，P16 (1982)
- 29) 多田 敦他：p F の農学的応用 p F と土の構造・土の硬度，
土と基礎， p79 (1987)
- 30) 田中 明他：点滴灌漑下における土壌水分動態，土壌の物理性
66， p39～p45 (1992)
- 31) 宮崎 毅：土中水の不飽和流動 斜面における不飽和流，土と
基礎 30-2， p55～p62 (1982)
- 32) 三浦健志・奥野林太郎：ペンマン式による蒸発散位計算法の詳
細，農土論集 164， p157～p163 (1993)
- 33) 三浦健志・奥野林太郎：ペンマン式の計算を容易にするための
工夫と提案，農土論集 164， p165～p170 (1993)
- 34) 堀口郁夫他：農業気象学，文永堂出版， p5～p61 (1992)
- 35) 小沢行雄：斜面の日射量について，農業気象 18(1)， p39～p41
(1980)
- 36) 三浦健志・三野 徹他：傾斜地の日射量分布計算法，農土論集
88， p1～p7 (1980)
- 37) 成岡道男・山本太平他：点滴灌漑における水消費に伴う毛管補
給の二次元解析，農土論集 176， p23～p31 (1995)
- 38) 中野芳輔：畔間土壌面蒸発量の定量化に関する研究，灌漑利水
工学研究， p76～p96 (1987)

SUMMARY

The use of artificial bed soil with continuous fibers for revegetation of areas of sparse vegetation was discussed. The development of an artificial bed soil is a basic requirement for revegetation. In this investigation, first for the purpose of applying the artificial bed soil with continuous fibers to sparse vegetation areas, its basic properties were examined. Secondly, based on these results, the characteristics of growth of green plants planted by seeding in the artificial bed soil with continuous fibers were studied on a steep slope and dune slope. The characteristics of soil water content were also studied.

It was observed that on steep slope the growth of arboreous plants were well, and their height reached 2m. Their growth was better at lower part than upper part of the slope depending on the condition. And it was realised that Yamahagi which is arboreous plant is better for drought conditions herbaceous plants. Because the root system of arboreous plants was distributed mainly in the artificial bed soil during initial growth stage, it was concluded that the artificial bed soil fulfilled its most important role during its initial stage of development.

Its was observed that the moisture condition for plants on steep slope was better at the lower than upper part of the slope. In the experimental field on a sand slope, an experimental of soil water under nonrainfall condition was carried out and it was concluded that developing the artificial bed soil which saves high amounts of water is useful for growth of plants. Even though the artificial bed soil saves high amount of water on sand slope and reduces the percolation losses of irrigation water, it increases evaporation from the soil surface under high temperature and low humidity conditions. On the other hand, it was observed that sand mulch over the artificial bed soil is useful for controlling evaporation from the soil surface.

And simulation model for water movement in the artificial bed soil on a steep slope was developed of planning and management of vegetation. Numerical simulations with meteorological data were carried out. Comparing numerical results with measured values from experimental field, it was realised that this simulation model could have wider application in the planning and management of revegetation slope.

摘 要

緑化の分野の中から、本研究は、緑化困難地に造成される植生基盤として、連続繊維緑化基盤を対象に取り上げて検討を加えたものである。植生基盤の造成は、緑化の基本手段であり、その基盤の持つ特徴が、現在、緑化技術に求められている多くの課題に対して、有効な解決手段になり得るものと考えられる。

本研究では、まず、連続繊維緑化基盤の緑化困難地への適用を目的として、その基盤の団粒化度・三相分布などの基本的特性および土壌の流亡特性を検討することにより、緑化困難地における適用の有効性を明らかにした。

次に、これらの結果を踏まえて、試験対象地として砂斜面および急傾斜切土法面を選定し、そこに造成された連続繊維緑化基盤に播種から導入された緑化植物の生育特性について検討を行った。あわせて、造成植生基盤における土壌水分特性について検討した。

鳥取砂丘地を対象とした砂斜面上の試験施設では、降雨遮断条件で灌漑条件下における緑化植物の生育特性および土壌水分特性について検討を加えた。その結果、保水性の高い植生基盤の造成が緑化植物の発芽・生育に有効であることが確認され、さらに、植生基盤上に砂マルチをすることにより、生育状況がより良好となることが示された。また、同一斜面における緑化植物の生育状況は、斜面上部に比較して下部における生育が、優勢な状況となる傾向が示された。また、植物の生育には、保水性の高い植生基盤の造成が有効であることが確認された。しかしながら、保水性の高い植生基盤を砂斜面上に造成することは、灌漑水の浸透ロスを低減するが、高温低湿条件下で土壌面蒸発量を増加させることが示された。一方、植生基盤表面に砂をマルチすることは、土壌面蒸発の抑制の効果を持ち、さらに、植物の発芽、生育状況も良好となることが示された。

急傾斜切土法面の試験圃場では、導入された木本は、順調に生育しており、生育高は優勢な個体で2 m程度まで達していること、そ

の生育は水分環境により斜面上方に比較して下方が良好になっていること、などが示された。また、導入木本類であるヤマハギは、草本と比較して、干ばつなどの気象状況の変化に対する適応性に優れていることが示唆された。一方、植物の生育には、保水性の高い植生基盤の造成が有効であり、特に、木本の根系は、生育初期の段階では主として造成された植生基盤内に分布していることから、植生基盤はその造成初期において、最も重要な役割を果たしていることが確認された。また、急傾斜切土法面における植生の水分環境は、下方部が上方部に比較して優れていることなどが示された。

また、緑化の設計・検討の手段として、急傾斜切土法面に造成された植生基盤における水分動態のシミュレーションモデルを提案した。このモデルにより、近接する気象台のデータを利用し、シミュレーション解析を試みた。この計算結果と実際の圃場から得られた試験結果と比較して評価を行い、気象台データなどを利用したシミュレーションモデルの適用の可能性を確認した。

学 術 論 文

1. 横塚 享、山本太平、杉山 靖、瀬川 進：造成植生基盤における木本類の生育特性 山腹切土法面を対象にした連続繊維緑化基盤工の実用化、農土論集 179、p133～p140 (1995)
(第4章および第5章に關係)
2. 横塚 享、山本太平、田中 明、井上光弘、杉山 靖、瀬川 進：造成植生基盤における水消費に伴う土壤水分特性 山腹切土法面を対象にした連続繊維緑化基盤工の実用化、農土論集 180、p39～p47 (1995)
(第4章および第5章に關係)

参 考 論 文

1. 横塚 享、瀬川 進、増田隆晴、山本太平：ジオテキスタイル導入による連続繊維緑化基盤工、農業土木学会誌 60(12)、p29～p32 (1992)
2. 横塚 享、瀬川 進、増田隆晴、山本太平：山腹切土法面における緑地の造成、農業土木学会誌 61(3)、p19～p24 (1993)
3. 山寺喜成、中山覚博、横塚 享、瀬川 進他：自然の再生を目指した法面緑化の計画と施工 テクソル・グリーン工法、理工図書
4. S.Segawa, T.Yamamoto, A.Tanaka, M.Inoue, S.Yokotsuka : MICROIRRIGATION FOR ARTIFICIAL BED SOIL FOCUSED ARID LANDS Proceedings of the Fifth International Microirrigation Congress, American Society of Agricultural Engineers p812～p817 (1996)