

泥炭腐植土と補強短繊維を用いた 荒廃地緑化工法の開発

丹羽 諭¹・田中賢治²・朝日伸彦²・杉本弘道²・瀬瀬裕美²

¹正会員 国土防災技術株式会社 技術本部（〒330-0074 さいたま市浦和区北浦和2丁目12番11号）

²非会員 国土防災技術株式会社 緑化事業部（〒105-0001 東京都港区虎ノ門3丁目18番5号）

これまでの緑化は、斜面勾配や土壌硬度、亀裂間隔等の物理性が主となって工法を選択していた経緯があり、金網張工を併用して植生基盤を厚く吹き付ける工法が主流であった。この工法では育成基盤の侵食を避けるために外来植物に依存した早期緑化が行われてきた。このため、外来植物が生態系に影響を及ぼすと共に、ラス金網が植物の樹幹・根系を圧迫して育成阻害を引き起こすなどの問題が示唆されてきた。

このような現状から、植物に依存することなく基盤侵食を防止して樹幹を圧迫しない緑化工法の開発に取り組んできた。本工法は肥沃な泥炭腐植土を短繊維で補強しながら植生基盤を吹付造成し、土壌侵食防止マットで保護することによって、荒廃地での植物侵入を容易にしながら持続性を可能とした工法である。

キーワード：腐植土、保肥力、保水性、耐侵食性、補強短繊維、土壌の理化学性

1. はじめに

自然災害による山地崩壊斜面や開発造成された切土・盛土法面では、風化・侵食さらには崩壊を防止することを目的とした法面保護工が土木技術として確立されており、植物を用いた法面緑化工が幅広く用いられている。法面緑化工は裸地状態の法面を植生導入によって早期に覆い、侵食を防止する機能のほかに、自然環境の保護、美観・景観の向上、環境負荷の低減効果も期待されている。

しかし一方では、導入植物の持続性がないことから荒廃裸地化し、法面保護としての機能を失った斜面が散見されるのも事実である。

また、早期緑化を目的として導入した外来植物が郷土種を脅かし、周辺環境と調和しないなどの美観・景観への問題も示唆されてきた。さらに、昨今では外来生物規制法の施行に伴って外来植物の使用を危惧する風潮が高まりつつある。

このような背景から、荒廃地を豊かな自然環境へと移行するため、斜面の侵食防止機能を維持しつつ郷土種が好む植生基盤の理化学性を定量的に評価し、外来植物による早期緑化に依存しないで荒廃地での植物の侵入を容易とし、郷土種による植生回復と持続的な緑化が可能となる緑化手法の開発を行ってきた経緯がある。

2. 緑化技術の現状

(1) 緑化工の選定

法面緑化工を選定するにあたり、斜面の勾配・土壌硬度・亀裂間隔・岩質などの物理特性を調査している。特に、土壌硬度は植物の育成に密接な関係があり、工法選定における重要な要素である。

表-1 土の硬度からみた植物の育成¹⁾

土壌硬度	植物の育成状態
10mm未満	・乾燥のため発芽不良となる ・安息角より急な勾配となると崩れやすくなる
粘性土 10～23mm 砂質土 10～27mm	・根系の伸長は良好となる （草本類では肥沃な土である場合） ・樹木の植栽にも適する
粘性土 23～30mm 砂質土 27～30mm	・木本類の一部のものを除いて根系の伸長が妨げられる
30mm以上	・根系の伸長はほとんど不可能
軟岩・硬岩	・岩に亀裂がある場合には、木本類の根系の伸長は可能である

緑化工の選定には、斜面の物理特性をもとに、

[illegible]

(2) 現状の緑化技術

植生基材吹付工や客土吹付工は吹付機械を用いてパーク系の有機質資材に肥料・種子・侵食防止剤を混合して、斜面の物理特性によって厚みを変化させながら吹付造成する技術である。斜面の不陸にも追従でき、植生基材吹付工においてはラス金網や植生基礎工を併用することで急勾配での施工も可能であり広範囲に適用されている。

現状技術において緑化復旧する過程は、初期に外来植物で緑化被覆して植生導入により耐侵食性を持たせる。後に育成の遅い在来草本・木本の植生に遷移していくものである。

(1) 工法選定における問題

緑化対象面に露呈する土には、粘性・砂質・礫質・軟岩など様々な条件があり、火成岩の鉱物組成の一つをとっても玄武岩のようにカルシウムやマグネシウム等の養分を多く含む塩基性岩や、安山岩のように養分の偏りが少ない中性岩など様々である。

A black and white photograph showing a large concrete dam. The dam has a wide, flat spillway surface. At the base of the dam, there is a small, dark, rectangular opening, possibly a tunnel or a culvert. The dam is situated in a valley, with steep, forested hillsides on either side. The foreground shows a rocky, uneven ground surface.

(2) 植物の永続性の問題

A black and white photograph showing a steep, rocky hillside. The rock face is rugged and layered, with some vertical fissures. Sparse vegetation, including small shrubs and grasses, grows on the slope. At the base of the hill, a road or path is visible, bordered by more dense vegetation. The sky is overcast.

-270-

生物多様な森林環境では植物の永続性に森林土壌がその役割を大きく担っている。図-2 に自然界における土壌の成り立ちを示す。

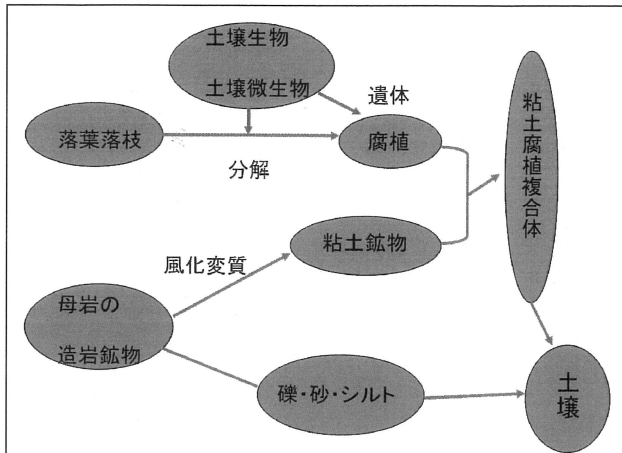


図-2 土壌の成り立ち模式図

パーク系の有機質資材からなる植生基盤は落葉落枝に相当し土壌生物が分解して腐植となる。

腐植は母岩の風化変質した粘土鉱物と結合して複合体となり、緑化対象斜面に露呈している礫・砂・シルトなどの単粒構造の土と結合して団粒構造の土壌となる。

土壌の成り立ちには長時間を費やすこととなるが、有機質資材で早期緑化を行う現状の緑化技術においては、植物の育成と腐植の生成から土壌の成り立ちまでの時間軸が遊離し、植生基盤に導入した肥料が枯れて植物が衰退していくこととなる。



写真-3 斜面上部の植生衰退状況

写真-3 に示す例では斜面下部の植生が繁茂しているのに対し、上部植生が衰退し基盤侵食に伴いラス金網が露呈しているのが観察できる。

これは、土壌形成が進行せず保肥・保水力が低い植生基材では、導入した肥料が降雨により溶出し斜面に止まることなく流下して斜面下部に滞留しているためである。

(3) 耐侵食性の問題

植生基材吹付工は、成長の早い外来植物によって早期に緑化被覆して耐侵食性を確保することが一般的である。奇跡の種と言われたトールフェスクや写真-4 に示す驚異の種と言われたウィーピングラブグラス、また、国土の救世主とも言われたハリエンジュなどを多用して、緑化復旧してきた経緯があった。

これらの植物は育成環境への適応性があり、旺盛な成長と繁殖力によって、荒廃裸地の大地を緑の大地に変えてきた一方で、驚異の繁殖力が郷土種を脅かすことも懸念されている。

昨今では、外来生物規制法の施行により、郷土種を脅かす危惧種として前述した種を含め、多数の外来植物の使用を控える風潮が高まっている。

この風潮により、初期に外来植物で早期緑化を図ってきた工法においては、使用種子の制限に伴い、耐侵食機能の検討が余儀なくされてくる。

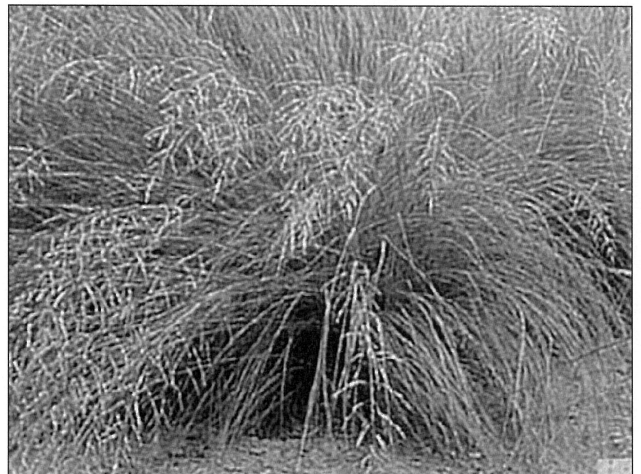


写真-4 ウィーピングラブグラス

植物に依存しない耐侵食機能を確保するために植生基盤の接合剤に酢酸ビニル系の侵食防止材やセメント系固化材の活用などが挙げられる。

酢酸ビニル系の接合剤は多投することにより表面に被膜を作り難透水層の壁構造となってしまう。これにより、雨水が浸透せず植生基盤が乾燥から復帰できない乾燥不回復に陥る。一方、背面からの湧水によってダムアップ現象が発生し、法面強度を低下させて崩壊の誘因となることも示唆されている。

また、セメント系固化材は強アルカリ資材特性を有し、植物の育成障害が懸念されている。

(4) 育成障害の問題

植生基材吹付工は植生基盤を厚く吹き付け造成するために、線型2mmのラス金網を併用するのが一般的である。緑化復旧の過程をたどる一方で、写真-5のように斜面で植生基盤を維持するために使用しているラス金網が、植物の樹幹を圧迫し育成障害や倒木などの末路を迎えるなどの問題も示唆されてきた。



写真-5 ラス金網による樹幹圧迫

4. 緑化技術の解決策

(1) 緑化工選定の検討

従来、緑化工を決定する際に考慮する項目は、斜面勾配や土壌硬度、亀裂間隔等の土壌の物理性が主であった。斜面の物理性が近似していても化学性は場所によって異なっており、物理性だけの緑化工選定に限界があることが原因の一つとして考える。

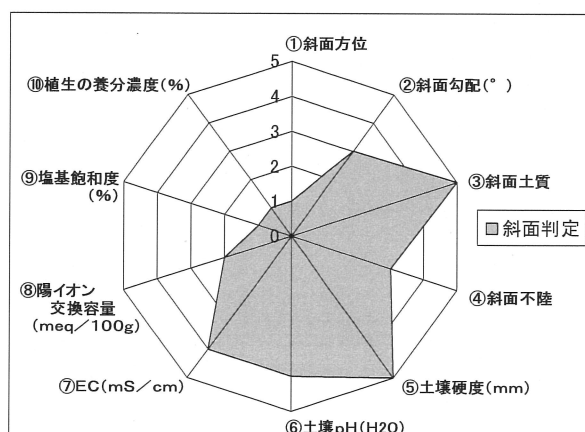


図-3 斜面の物理・化学・生物性評価図

そこで図-3に示すように、緑化対象斜面の物理・化学・生物性を個々に調査した結果を階級化してリーダーチャート化することで従来の物理性に加え緑

化対象斜面の土壌の化学性を把握できる。

これにより、最適な緑化工法の選定ができると共に、導入基盤のバランス調整をすることができ永続的な緑化が可能である。

土壌の化学性は、サンプルより土壌酸度(pH)、電気伝導度(EC)、陽イオン交換容量(CEC)、塩基飽和度の指標を分析することで緑化対象斜面を把握することができる。

a) pH(H₂O)

酸性・中性・アルカリ性といった酸度を示す指標で、土壌の三相構造の一つである液相中の水素イオン濃度を示し、表-2の反応区分を示す。

腐植を多く含む森林土壌では弱酸性から微酸性の反応区分を示し、植生基盤では微アルカリから弱アルカリの反応区分を示している。

表-2 土壌のpH(H₂O)と土壌の反応区分²⁾

pH(H ₂ O)	反応の区分
8.0以上	強アルカリ性
7.6~7.9	弱アルカリ性
7.3~7.5	微アルカリ性
6.6~7.2	中 性
6.0~6.5	微 酸 性
5.5~5.9	弱 酸 性
5.0~5.4	明 酸 性
4.5~4.9	強 酸 性
4.4以下	ごく強酸性

b) EC(電気伝導度)

土壌の三相構造の一つである液相中の塩類濃度を示す指標で、EC(Electro Conductivity: 電気伝導度)のことであり、植物が吸収できる養分の尺度となる。適正EC値の目安を表-3に示す。

森林土壌は0.2~0.6 mS/cmを示し、ECの値が低ければ養分不足となり、ECの値が高すぎると養分過多となって肥料枯れを起こす。

表-3 植付け時の適正ECの目安³⁾

土の種類	植物の種類 (単位: mS/cm)	
	果 菜 類	葉・根菜類 (森林土壌)
腐植黒ボク土	0.3~0.8	0.2~0.6
粘質土・沖積土	0.2~0.7	0.2~0.5
砂 質 土 (砂丘・未熟土)	0.1~0.4	0.1~0.3

c) CEC (陽イオン交換容量)

土壌の三相構造の一つである固相，いわゆる土壌が陽イオンを吸着できる最大量（陰荷電の総量）を示す指標であり，陽イオン交換容量または塩基置換容量と呼んでいる．CEC の代表値を表-4 に土壌の養分保持模式図を図-4 示す．

土は電氣的にマイナスの性質を示し，植物の養分となるカルシウム・マグネシウム・カリウム・ナトリウム・アンモニア・水素などは，プラスの性質を示す．単位は通常乾土 100g 当たりのミリグラム当量 (meq) として示し，値が大きいほど多量の陽イオンを吸着することができ，保肥力のある土といえる．

磁氣的に吸着している養分は，雨などでは容易に解離しないため，勾配のある斜面でも安定して植物に養分を供給することが可能となる．

表-4 土壌の種類と CEC の代表値の目安⁴⁾

土壌の種類	CEC (単位：meq/100g)
砂丘未熟土	3～10
淡色黒ボク土	15～25
腐植質黒ボク土	20～30
多腐植質黒ボク土	30～40
褐色森林土	10～25
黄色土	10～15
赤色土	15～25
灰色台地土	15～30
灰色低地土	15～25
褐色低地土	15～30
黒泥土	20～35
多湿黒ボク土	30～40

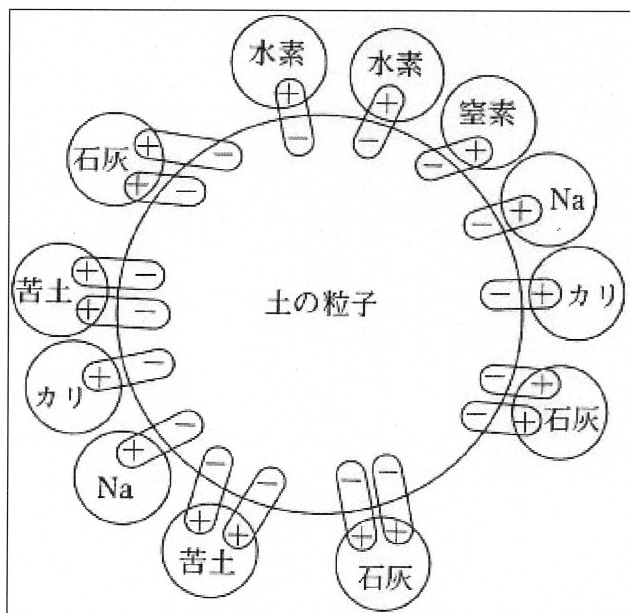


図-4 土壌の養分保持模式図³⁾

d) 塩基飽和度

塩基飽和度とは土が保持できる養分量，いわゆる陽イオン交換容量の総量のうち，どのくらいの養分（交換性陽イオン）で満たされているかの割合を示すものである．塩基飽和度は 70～90%程度が最もバランスが良いとされている．

(2) 植物の永続性の検討

植物の永続性は土壌形成が重要な要素であることより，図-2 に示す土壌の成り立ちに学び，落葉物となる有機質資材に腐植の要素となる泥炭腐植土を混入した．泥炭腐植土を混入することで，土壌進行への時間軸を短縮できることに加え，保肥・保水性が向上し土壌生物の活性が期待できる．

泥炭腐植土の特徴としては，斜面安定に望ましい低木群落を形成するためのリン酸，カリの含有量が多くなっており，透水係数が高いことから雨水の排水機能が高くなっている．さらに，陽イオン交換容量 (CEC) 値が高いことから，含有肥料分の保持機能が強く，森林土壌の表層三相分布である固相：液相：気相＝25%：45%：30%に近い土壌構造を持っている．

泥炭腐植土による保水性の向上を定量的に評価するために負圧式土壌水分計 (HJ-510 型) により，試験装置を 60° に固定し植生基盤の水分保持力を時間変化する水ポテンシャル値を指標として測定し，保水性の測定を行った．

保水時間は満水状態から重力水がはけ植物の有効水となる-6kPa から，植物との毛管連絡が切断する-49kPa までの有効保水時間を基準としている．

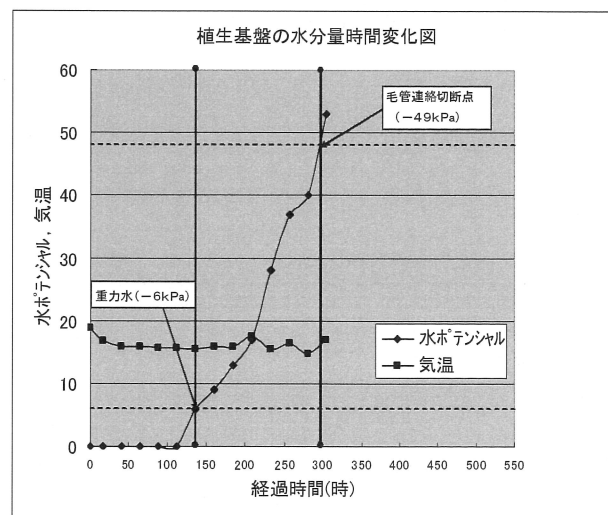


図-5 植生基盤の有効保水時間

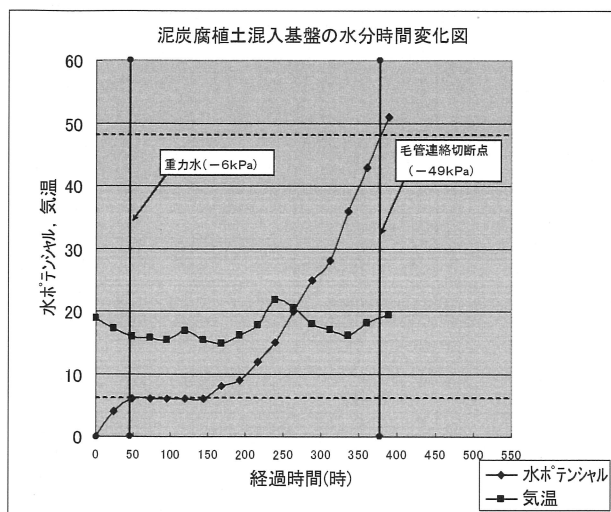


図-6 泥炭腐植土混入基盤の有効保水時間

図-5 に示す植生基盤の有効保水時間は 161 時間となり、重力水がはけ植物の有効水となる -6kPa までに 136 時間を要している。このことから、水はけの悪さと水持ちの悪さを併せ持った特性がある。

一方、図-6 に示す泥炭腐植土を混入した基盤は有効保水時間が 334 時間となり、植生基材吹付工の基盤有効保水時間の 2.07 倍となった。

さらに、48 時間後には重力水がはけ植物の有効水となる -6kPa となっていることから、水はけの良さと水持ちの良さを併せ持った特性があるといえる。

(3) 耐侵食性の検討

森林では、落葉が土壌を覆い雨滴緩和や侵食防止を担っている。植生基盤が乏しい岩盤面においては、生育基盤となる土砂をコケ類が保持、保水して緑化が確保されている。自然状態において落葉・コケ類が担う機能を実現するために、写真-6 のような土壌侵食防止マットで植生基盤を覆うこととした。

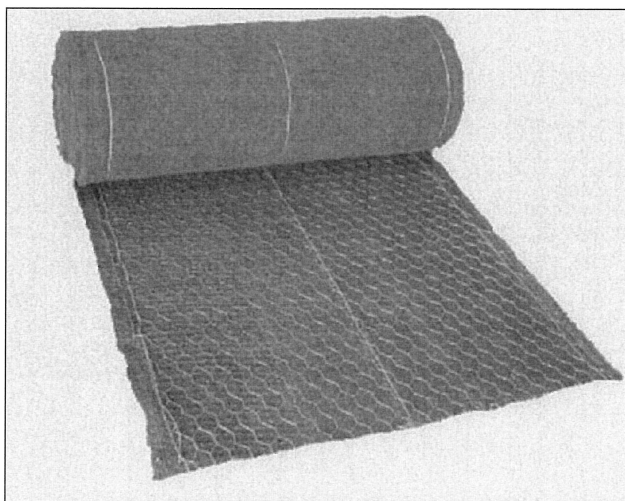


写真-6 土壌侵食防止マット

土壌侵食防止マットは、植物の毛細根に似た極細の撥水性繊維をランダムに配した不織布マットである。97%~98%の空隙率を持った不織布構造体であることから通気・通水性が高く、降雨・風・凍上・早魃などの環境変化から基盤を保護する特徴があり、植物の発芽・育成阻害も軽減している。

さらに、雨滴の衝撃を緩和し表面流速を減速させ表層排水を行う機能により、土壌の侵食を防止する。

(4) 育成障害

ラス金網による育成障害の問題点を改善するために、写真-7に示す特殊な表面処理が施され、優れた分散性を持つ短繊維を植生基盤材の緊結材として採用した。

この短繊維は植生基盤材を立体的に緊結・拘束するため、ラス金網なしで吹付造成が可能である。この効果により植物の樹幹・根系圧迫がなく、吹付の作業性が向上することに加え、短繊維が持つ柔軟性とタフネスさは、乾燥ひび割れによる基盤材の剥離・落下を抑える効果がある。

補強短繊維で立体的に緊結・拘束した基盤は通気・通水性があり壁構造とならないため、乾燥後の不回帰や湧水によるダムアップ現象も起こりづらい。

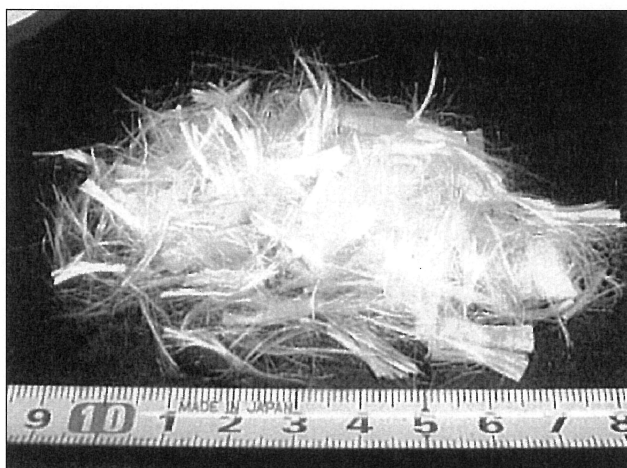


写真-7 補強短繊維

4. 荒地緑化工法の特徴

(1) 工法の概要

荒地緑化工法は、森林土壌に近い上質な泥炭腐植土を混入した植生基盤に補強短繊維を混合してラス金網なしで直接斜面に吹付造成し、表面を土壌侵食防止マットで保護するものである。施工直後より耐侵食機能を有し植生基盤を中・長期的に安定維持

ができるため、外来植物に依存した早期緑化を必要としない特徴がある。

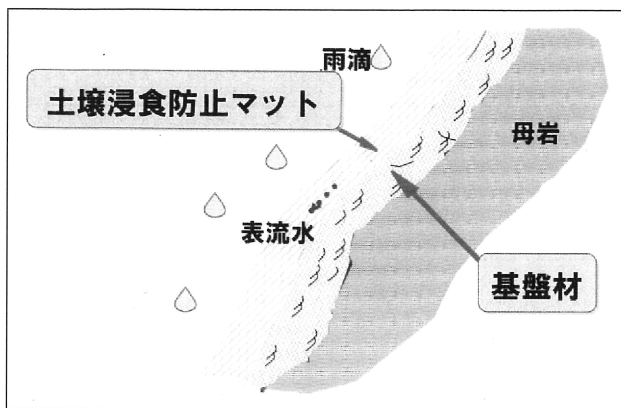


図-7 荒廃地緑化工法の模式図

(2) 植生基盤の化学性

植生基盤は、従来のパーク系有機質資材に長期間低温熟成された泥炭腐植土をバランス良く配合した緑化基盤を構築し、森林土壌がもつ地力の化学的指標に近似するものとした。

荒廃地緑化工法の基盤特性値を表-5 に、特性値を階級化してグラフ化したものを図-8 に示す。

表-5 緑化基盤の特性値

評価項目	基盤特性値	基準値	
①pH(H ₂ O)	6.6~7.2(中性)	6.0~6.5(微酸性)	褐色森林土
②EC(電気伝導度) (mS/cm)	0.6	0.2~0.6	多湿黒ボク土
③CEC(陽イオン交換容量) (meq/100g)	40.0	10~25	褐色森林土
④塩基飽和度(%)	100	70~90	多湿黒ボク土
⑤C/N比	20	15~20	土壌生物環境
⑥仮比重	0.3	0.2~0.4	農業用良質施肥 ~火山灰土
⑦水分量(%)	60	57~65	農業用良質施肥
⑧三相構造(%) (固相:液相:気相)	22:42:36	25:45:30	褐色森林土

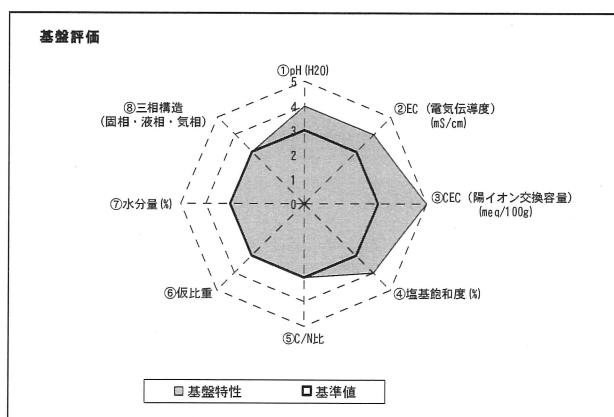


図-8 緑化基盤の評価図

従来の植生基材はアルカリ資材であることから、腐植が進行しにくい傾向がある。さらに、肥料を多用するため肥料要求度の高い外来植物やセイタカアワダチソウなどが好む育成条件となっていた。

荒廃地緑化工法では、泥炭腐植土を混入し腐植・土壌進行を促進しながらバランスを整えた施肥設計で森林土壌に近似した基盤としているため、在来郷土種が好む土壌環境となり植生回復と永続性を可能としている。

さらに、陽イオン交換容量が褐色森林土より高く保肥力に優れているため、急斜面などの物理特性や砂質土・火山灰土などの化学性の低い土壌条件など幅広く対応できる。

(3) 保水性の向上

泥炭腐植土を混入して保水性が向上した植生基盤を土壌侵食防止マットで覆うことによって、さらに蒸散を抑制するため保水性が飛躍的に向上している。

負圧式土壌水分計(HJ-510 型)による保水性の結果を図-9 に示す。測定の結果より、植生基盤の有効保水時間が451時間となり、植生基材吹付工の基盤有効保水時間の2.80倍となった。

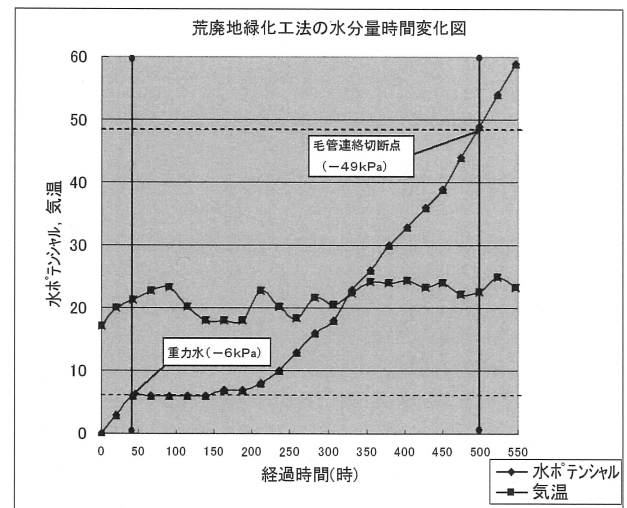


図-9 荒廃地緑化工法の有効保水時間

(4) 施工性の検討

泥炭腐植土による保肥力の向上と、土壌侵食防止マットによる保水性の飛躍的向上によって、植生基盤の厚さを2~3cmと薄くできるため、1:0.3 勾配迄の急斜面においても、植生基礎工を併用せずに施工が可能となった。

施工機器は図-10 に示すように、一般的な植生基材吹付工と同等の機器構成で、特殊機械は使用しない。さらに、施工方法も従来工法である植生基材吹付工と植生マット工の合併工法であることから、特

殊な技術が必要としない特徴がある。

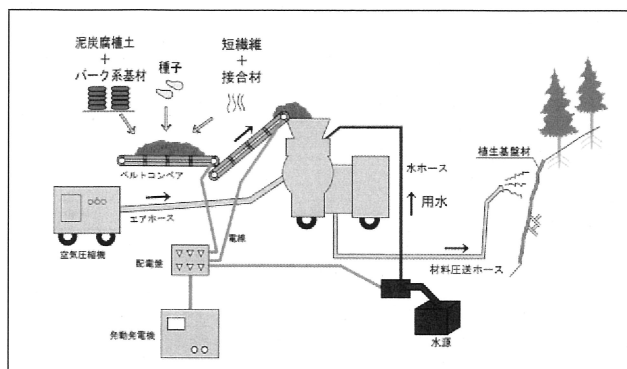


図-10 施工プラント模式図

5. 荒廃地緑化工法の効果

(1) 郷土種による自然回復

導入直後より耐侵食機能を有することで、植生基盤を中・長期的に安定維持できる。外来植物に依存した早期緑化の必要がない荒廃地緑化工法は、成長の遅い在来種による植生回復や、写真-8 のように無播種で郷土種の侵入を期待した緑化が可能である。



写真-8 無播種による施工事例（施工後3年経過）

また、土壌侵食防止マットが気象ストレスを緩和するため、積雪寒冷地から乾燥の著しい地域や沖縄のような高温多雨の地域まで幅広い適用を可能としている。

(2) 特殊な土壌条件への適応

劣悪な土壌条件においても泥炭腐植土のイオン交換による化学的緩衝能力を活用して、強酸性土壌から強アルカリ土壌まで広範囲の土壌条件での適用も可能となっている。

土壌条件に対する適応性として、土の化学的緩衝

作用の実験⁵⁾に基づいた検証を実施している。

砂質土及び泥炭腐植土のサンプルに対して水酸化ナトリウムを加えてアルカリ性に傾かせるストレスを与え、次に希塩酸を加えて酸性に傾かせるストレスを与え、アルカリ、酸の投入量に対しての pH の測定を実施した。

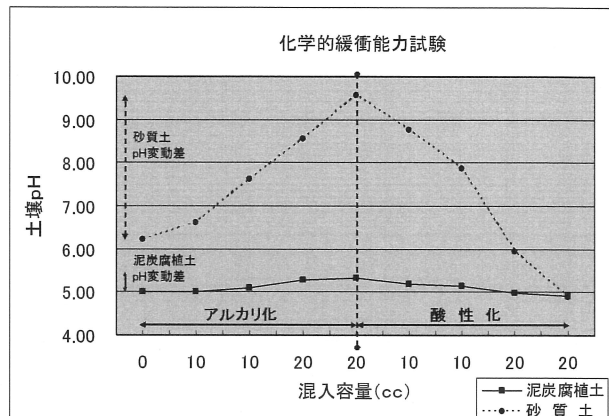


図-11 化学的緩衝能力の試験（砂質土）

試験の結果、砂質土では pH の変動範囲が大きくアルカリ、酸に対して過敏に反応しているが、泥炭腐植土の pH 変動範囲は極めて小さく、土のイオン交換による化学的緩衝能力が高いことが検証され特殊な土壌条件での幅広い対応を可能としている。

6. おわりに

従来の早期植生導入による法面保護から生物多様性に配慮し自然環境の保護や二酸化炭素の削減など、今後は環境に配慮した緑化手法が求められている。

緑化法面の物理・化学特性を定量的に把握し、荒廃地の植生回復を目的とした緑化手法を開発してきた。今後は簡易的な調査方法の確立と化学特性値の蓄積と階級化の精度を上げることが課題である。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路土工のり面工・斜面安定工指針，(社)日本道路協会，改訂版第5刷発行，pp. 221-232，1999
- 2) 藤原俊一郎ほか：新版土壌肥料用語辞典，(社)農産漁村文化協会，第1刷発行，pp. 79，1998
- 3) 藤原俊一郎ほか：土壌診断の方法と活用，(社)農産漁村文化協会，第10刷発行，pp. 93，2003
- 4) 武田 健：新しい土壌診断と施肥設計，(社)農産漁村文化協会，第5刷発行，pp. 51-52，2003
- 5) 岩田進午ほか：だれにでもできるやさしい土のしらべかた，合同出版株式会社，第1刷発行，pp. 32-34，2005