林床保護のために開発した厚層客土吹付け工法（K-Knight 工法）の施工事例

鹿島建設(株)　正会員　○山口　毅志　鹿島建設(株)　正会員　田中　真弓
鹿島建設(株)　正会員　清水　清一郎　鹿島建設(株)　正会員　佐藤　寿幸
鹿島建設(株)　正会員　上木　泰裕

１．はじめに

福島第一原子力発電所事故から 10 年以上が経過した現在も，住居に隣接する森林の中には除染後にもかかわらず空間線量率が高い地域がある．そのような森林では，通常の森林除染では行われていない表土の削り取りを行うことにより，空間線量率の低減が期待できる．しかしながら，削り取り厚さによっては，樹木の根が露出し生育阻害が起きることが懸念される．そのため，森林地盤と同様の材料で構成され，植生保護に加えて土壌流出防止などの効果を発揮する自然林への移行阻害のない生分解性の厚層覆土が求められた．そこでラス網等を必要としない生分解性の厚層客土吹付け工法として，「K-Knight（ケイナイト）®工法」を開発した．本報では，本技術で使用する材料特性と，強度特性・耐侵食性・放射線低減効果に関する検討結果，強残渣の除去および厚層客土吹付工法の施工実績，試験施工後の植生状況について報告する．

２．使用材料の特性

本工法は，下記材料（**写真-1**）と水をハイドロシーダ車（**写真-2**）に投入し，吹き付けることで 5 cm 以上の厚層覆土が実現できる．その際，ラス網等の設置は不要である．

(1) 材料の特徴

使用する材料は，食品添加物や天然素材で構成されている下記５種類の材料と水を原料とする．混合後の pH は 6～8 とほぼ中性である．

①A 材：酢酸ビニル重合体の水性エマルジョン．客土材（ケイナイトソイル）の土粒子同士を固着させる．

②B 材：機能成分は植物由来の天然多糖類であり，材料混合性の向上と表層強度を向上させる．

③C 材：炭酸ナトリウム，硫酸アルミニウム，ポリマーなどにより，客土材の密実化を促進し，厚層化させる．

④S 材：セルロースを主成分とし，施工後の吹付け基材の強度調整や，早期厚層化・早期強度発現に寄与する．

⑤ケイナイトソイル：山砂・バーク堆肥等から構成され，林床および植生回復のための良好な植物生育基盤機能となる．補助的に，放射線遮へい機能，放射性物質の吸着と森林内循環の抑制機能を有している．

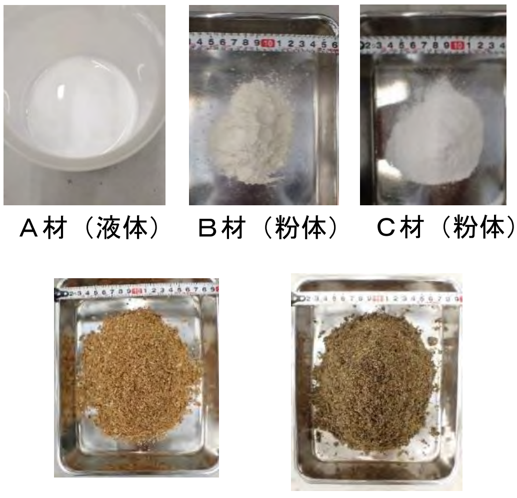

写真-1　本工法で使用する材料

(2) 生分解性試験

人工合成材料を含む A・B・C 材が，吹付け基材に占める割合は約 2wt%である．このうち約 90%を占める A・B 材の好気的究極生分解

写真-2　ハイドロシーダ車

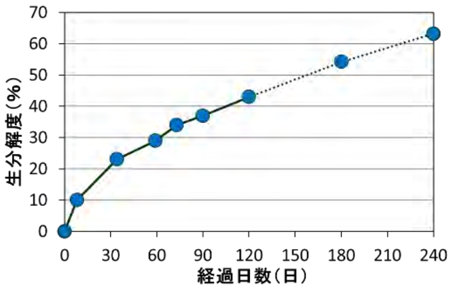

図-1　生分解試験

キーワード　除染，厚層覆土，強度特性，侵食防止，森林地盤，林床
連絡先　〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1 鹿島建設(株)技術研究所　TEL 042-485-1111

度試験（JIS K 6955: 2006 に準拠)を実施し，120 日の実測で 43%，推定 215 日で 60%以上生分解されることを確認した（図-1）.

(3) 環境安全性試験

A・B 材を対象にヒメダカを用いた急性魚毒性試験（OECD，JIS K 0102:2016 に準拠）を実施し，水生生物に対する安全性の濃度基準（LC_{50}）が 100mg/L 以上であることを確認した.

以上の検討の結果，使用材料は安全性が高く，自然環境に配慮した材料であることが確認された.

３．吹付け後の強度と降雨による耐侵食性の確認

(1) 強度目標値と現地における強度特性確認試験

本工事では施工後に線量測定の必要があり，施工数日後に歩行できる強度を発揮させる必要がある．一方で，植栽土壌として植物根の成長を妨げない土壌強度であることも求められる（表-1）．そこで，吹付け後自然乾燥した客土材の強度の目安は，一般的に歩行可能なコーン指数とされる約 200kN/m² 以上とした．また長期的には施工対象地域の森林の地山のコーン指数と同程度の約 500kN/m² を目標値とした．なお土壌強度は山中式土壌硬度計で測定し，測定値から式-1 を用いてコーン指数を求めた.

表-1　土壌硬度・強度の植栽基盤としての評価 [2)]

土壌硬度(mm)	コーン指数(kN/m²)	植栽基盤としての判定
＜20	＜1686	根系発達に阻害なし
20 -24	1686-3656	根系発達阻害樹種あり
24-27	3656-6533	根系発達阻害あり
＞27	＞6533	多くの根が侵入困難

$$\text{コーン指数}\quad Y = 10^{((X+18.4)/11.9)},\quad X：硬度計測定値 [1)] \qquad (式\text{-}1)$$

現地試験は，ハイドロシーダ車を用いて，a）1m² の傾斜板への吹付け試験，b） 森林内での吹付け試験の 2 段階で実施した．試験実施場所はいずれも福島県双葉郡地内である.

a）傾斜板試験（吹付け日：2021 年 6 月 3 日）

私有地広場にて，不織布（1m×1m，APS-20，田中社製）を貼り付け，0，15，30，45°に傾斜させた板に対して吹付け試験を行った．吹付けは，ケイナイトソイル・水・A 材・B 材・C 材の混合材と S 材を別々に行った．吹付け後に，吹付け厚さと発現強度の経時変化を測定した．なお，試験翌日に 34mm/日の強雨があったが変位等は生じなかった.

写真-3 に試験体状況，図-2 に試験結果を示す．全ケースで吹付け厚さは 5cm 以上，最大 7cm となった．傾斜 45°では表面のひび割れが確認されたが，これは二材吹付けによる材料の不均一な混合によるものと考えられた．歩行可能強度 200kN/m² は吹付け 4 日後に，地山と同程度の約 500kN/m² は 6 日後に確認できた．その後，目標強度を大きく上回る値となったが，これは日光を遮るものが無い環境のため材料が乾燥したことや，二材吹付けによる混合状況の不均質性が原因と考えられる．また，130 日後に強度が低下したのは，材料の生分解が進んだためと考えられる．植栽基盤としての判定においては，一時的に根系発達に影響を及ぼす強度になるものの，多くの根が侵入困難である強度に達することはなく，最終的に平均値では根系発達に阻害のない強度になることが確認された．これらのことから，客土材の安定と植栽基盤としての機能の両立が図れることが示された.

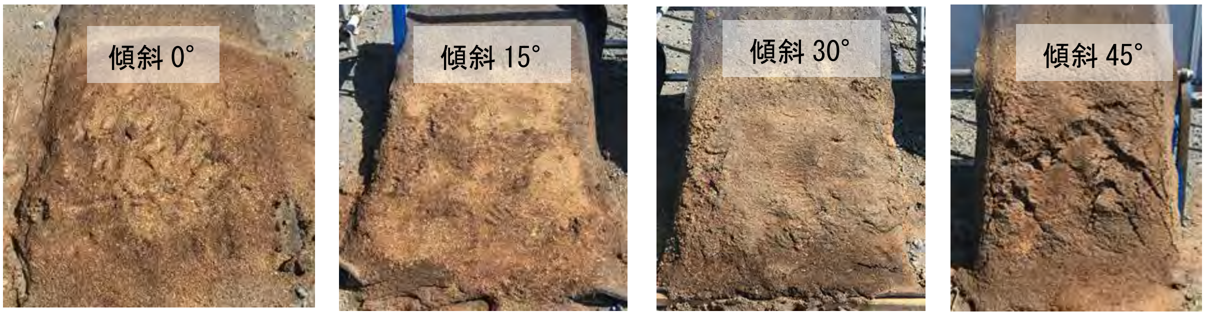

写真-3　傾斜板吹付試験後の試験体（2022 年 6 月 9 日撮影）

b）森林内試験（吹付け日：2021 年 6 月 17 日～19 日）

最大傾斜約 20°の表土削り取り（5~15cm）後の林床を対象とし，傾斜板試験で課題となった二材吹付け時の材料混合の均質性を確保するため，全材料を一度に混合し吹き付けた（**写真-4**）．

図-3 に試験結果を示す．吹付け厚さは 7cm 以上を確保でき，歩行可能強度 200kN/m^2 は吹付け 4 日後に，地山と同程度の約 500kN/m^2 は 93 日後に確認した．森林内は乾燥しにくいため，傾斜板試験と比べて強度発現時期が遅くなったと考えられる．また，植栽基盤としては植物根が侵入しやすく，良好な状況が保たれていることが確認された．

写真-4　森林内試験状況

(2) 降雨による耐侵食性確認のための室内試験

室内にて本工法と従来工法（客土吹付）との侵食土量の比較を行った．炉乾燥した直径 6.5cm の供試体に 100mm/h 相当の散水を 1 分間行い，表流水と侵食土壌を全て回収した．**図-4** に侵食土量（回収土壌の乾燥重量[g]／乾燥密度[g/cm^3]／供試体平面積[m^2]）を示す．試験結果より，本工法を施工した場合の侵食土量は従来工法の約 12%に抑制されることを確認した．

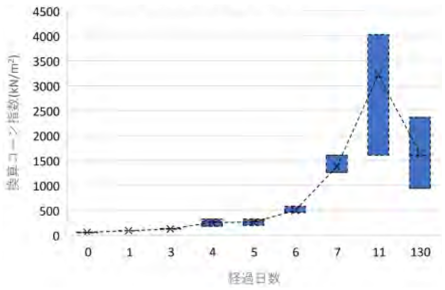

図-2　傾斜板試験における強度特性

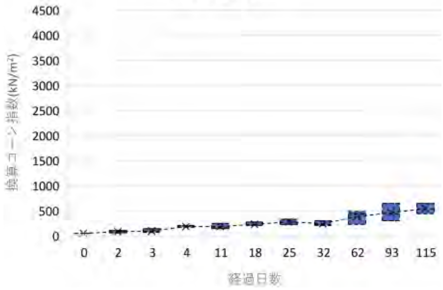

図-3　森林内試験における強度特性

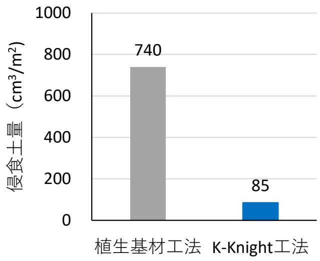

図-4　侵食土量

4．ケイナイトソイルによる放射線量率低減効果

本吹付工法による放射線遮へい効果を評価するために，3 章の森林内試験地において，吹付け施工前後調査として放射線量率を地表面から高さ 1cm で測定した．なお，バックグラウンド値（環境放射線量）の影響を低減するために，測定の際にはコリメータを使用した．

試験施工エリア内の 15 地点における施工前後の放射線量率の関係を**図-5** に示す．本測定では，GNSS 等を用いて施工前後ともに同一箇所での測定を目指したが，森林内では樹冠による遮蔽により測位精度が低下すること，また土壌内での放射性物質の分布は均一でなく，測定箇所のわずかな違いにより測定値が変動することが考えられる．そのため，施工後の放射線低減効果は測定箇所によるばらつきが大きな結果となったが，**図-5** によれば，施工前に比べて施工後の放射線量率は概ね 75%程度の値に低下したと評価している．先行研究によると，室内試験で土壌湿潤密度と低減率に相関があること（低減率＝0.233×湿潤密度）が報告されている[3]．本報でも，客土材の土壌水分状態が湿潤～絶乾状態（pF1.8～7.0）までの吹付け土壌湿潤密度が 0.52～0.75g/cm^3 であったため，上記関係式より 12.1～17.5%の範囲での低減率を想定していたが，実際には約 25%の低減率となった．これには，屋外環境下での複雑な放射性物質の分布状況や吹付け厚さの変動が影響したと考えられる．

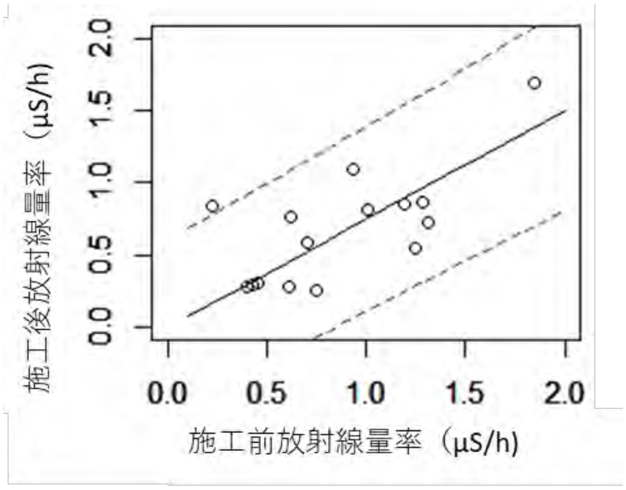

図-5　施工前後の放射線量率の関係
（破線は 95% 予測区間）

５．現場適用事例

(1) 施工フロー

森林内における除染は，下草刈り，枝払い，堆積有機物の除去，および堆積有機物残渣の除去により放射線量低減を行っている．しかしながら，除染により表土が露出することで，災害防止等の森林の多面的な機能が損なわれる可能性があるため，表土の削り取りは実施していなかったが [4]，これらの除染作業では十分に線量が低減できない場所もあった．事故後 10 年以上が経過し，放射性物質は土壌表層に移行・吸着し，ほとんどの放射性物質が鉱質土壌に留まり続けることが予測されている [5]．このため今回は，さらなる空間線量率の低減対策として，新たに最大 30cm の強残渣の除去（表土の削り取り）を行った．そのうえで，強残渣の除去に伴う林床の保護・再生を目的として，厚層客土吹付工法（K-Knight®工法）で覆土を行った（**図-6**）．

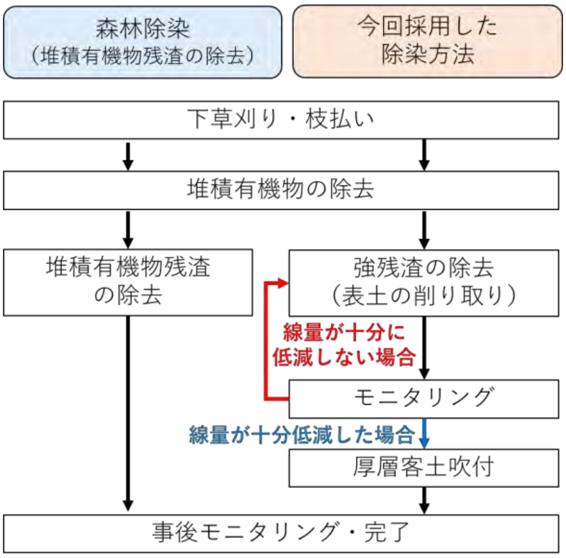

図-6　施工フロー

(2) 施工方法

①施工位置：福島県双葉郡地内（**図-7**）

図-7　施工場所

②施工時期：2021 年 7 月 1 日～2022 年 2 月　28　日

③強残渣の除去：樹木の根を傷めると，枯死や倒木の恐れがあるため，人力での除去とした．特に根圏周辺は根を傷めることを防ぐため，小型のスコップや鍬を使用した．強残渣の除去後，空間線量率を測定し，高線量箇所はさらに除去することとした．

④厚層客土吹付：吹付機は作業箇所が森林内で広範囲に及ぶため，ハイドロシーダ車を使用し機動的に吹付け位置を移動した．吹付配合は**表-2** に示す．1 バッチあたり 50m^3 程度の吹付けとし，厚さを 5cm 以上確保しながら 2~5 バッチ/日で施工した．

表-2　材料配合表

材料名	使用量（1バッチ50m^{3}あたり）
ケイナイトソイル	3t
K-KnightA材	36kg
K-KnightB材	10.5kg
K-KnightC材	6kg
K-KnightS材	250kg
水	1.8m^3

(3) 施工結果

強残渣の除去の施工状況を**写真-5** に示す．施工中，除染作業による森林内の地形変化や，降雨による土砂流出は発生しなかった．厚層客土吹付の施工状況を**写真-6** に示す．なお，圧送距離が 100m を超えると，ホースの圧力損失のためハイドロシーダ車の吐出圧では吐出できない

写真-5　強残渣の除去 施工状況
（左：人力での除去，右：根圏周辺の除去）

写真-6　吹付け状況

写真-7 中継ポンプ

場合があった．この際，中継プラント（**写真-7**）にて増圧し吹付けを行った．施工後の降雨により，谷線沿いに流出水による侵食が一部発生したが，土砂流出には至らなかった．

除染作業前後での空間線量率の変化を**表-3** に示す．森林除染（堆積有機物残渣の除去）では，9%程度の空間線量率の低減であったが，強残渣の除去および K-Knight 工法の施工を行った場合の低減率は 39%となり，良好な結果が得られた．

表-3　空間線量率の変化

	空間線量率の平均値（µSv/h）（1m・コリメータなし）	標準偏差	低減率（%）
除染前	3.05	1.94	-
森林除染後（堆積有機物残渣の除去）	2.78	1.89	9
今回採用の除染工法後	1.69	0.74	39

６．試験施工における植生への影響確認

(1) 調査方法

本調査の対象地は３章の森林内試験を実施したスギ林で，周囲は民家，竹林，畑が隣接しており，通常の除染後は，林内にはまばらにアズマネザサが分布していた（**写真-8**）．施工 4 か月後の 2021 年 10 月 16 日および 11 か月後の 2022 年 5 月 26 日に，山中式土壌硬度計での林床土壌の硬度測定および林床の植被率の調査（1m×1m 方形区）を林縁，林内で実施した．この比較として堆積有機物残渣の除去までを 2020 年 8 月 18 日に実施し，その後 1 年以上経過した森林（比較区）状況調査を実施した．K-Knight®工法の客土材であるケイナイトソイルについては pH，腐植含量，全窒素の測定に加え，現地で土壌コアを採取し（施工 4 か月後），有効水分量ならびに飽和透水係数を測定した．

写真-8　着手前の林内状況

(2) 客土材ケイナイトソイルの性状

ケイナイトソイルは表層を構成するのみであるが，森林土壌として必要な条件を満たすように物理化学性を調整している．**表-4** に物理化学性に関する測定結果を示す．本来森林土壌としての評価基準は存在しないが，参考として植栽基盤整備技術マニュアルの整備基準に基づく判定結果を併記する [6]．測定の結果，pH，腐植含量，全窒素，透水性は良好であった．有効水分量は参考とした基準よりやや低かったが，下層に保水性の良い原地盤の森林土壌があるため，植生に与える影響は小さいと考えられる．また，土壌硬度は良好であり，根系成長の障害を与えない硬度だった．以上より，ケイナイトソイルは森林内植物の生育に適した土壌と評価した．

表-4　ケイナイトソイルの物理化学性

測定項目	測定値	判定※
pH	6.6	良
腐植含量(g/kg)	187	良
全窒素(g/kg)	3.9	良
飽和透水係数 (m/s)	2.6×10^{-4}	可
有効水分量 (L/m^3)	62	不良(<80)
土壌硬度 (mm)	12	良

※参考：植栽基盤整備技術マニュアルの整備基準に基づく判定結果

(3) 施工後の植生状況

試験施工区の様子を**写真-9** および**写真-10** に，植被率と植生高の測定結果を**図-8** および**図-9** に示す．試験

写真-9　施工 4 か月後の植生状況
（左：林内，右：林縁）

写真-10　施工 11 か月後の植生状況
（左：林内，右：林縁）

施工区の林縁では，施工 4 か月後に植生が出現しており，植被率が平均 22%と比較的高く，1 年以上前に堆積有機物残渣の除去を実施した施工区（比較区）の平均 23%と同等だった．林内は林縁と比較して植被率は平均 6 %と低かった．最大植生高は林縁で平均 38cm，林内で平均 30cm であり，植物の生育期間が長いと考えられる比較区の方が平均 70cm と高い結果となった．一連の施工では，堆積有機物残渣の除去および表土の削り取りにより，埋土種子等は減少・消失している可能性が高い．試験施工区は，元来アズマネザサが分布しており，表土削り取り後にも根系のみ残存していることを観察している．このアズマネザサが光環境のより良好な林縁で出芽，生育したことで，比較区と同等の植被率になったと考えられる．このほか林床にはナンテン，アオキ，ツユクサの実生などが確認された．

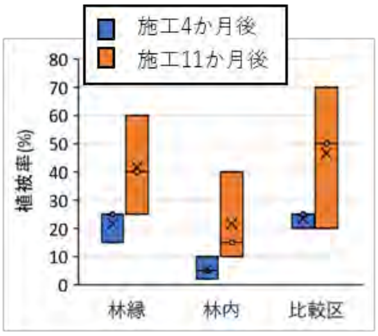

図-8　林床植生の植被率

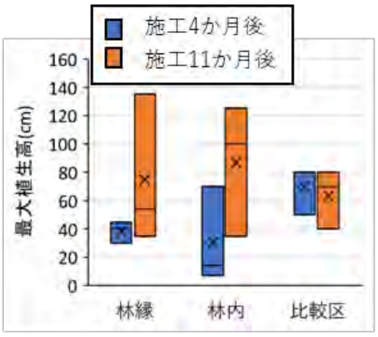

図-9　林床の最大植生高

施工後 11 か月では，林床は落葉・落枝が供給され，薄く覆われていた．ばらつきが大きいが，それぞれ植被率（林縁：平均 42%，林内：平均 22%），最大植生高（林縁：平均 75cm，林内：平均 87cm）が施工 4 か月後に比べ増加している結果となった．11 か月後に確認された植物は，上層木を構成する樹種由来か，残渣除去時から残存していたもの，または飛来した草本類だった．上層木からの種子供給の一例として，本調査地のスギ林では，スギ実生が平均で林縁：14.7 本/m^2，林内 10 本/m^2 確認された．施工試験区以外の施工箇所でも秋期以前に施工した場所では，コナラやスギ，ヒノキ，アカマツを中心に上層木から供給された種子の発芽・生育が確認された．堆積有機物や林床植生による被覆は林床土壌の耐侵食性を向上させることが報告されている[7]．本工法の施工区では林床植生が回復していく傾向があり，今後さらに土壌流出防止機能が高まると予想される．

６．まとめ

本工法は，従来技術では難しかったラス網なしでの厚層客土吹付けを可能にした．また，植物の生育，降雨侵食，放射性物質対策等に配慮した周辺環境に負荷を与えない生分解性の材料を用いている．さらに，車載可能な設備で施工可能なため，植生基材吹付用のプラントが設置できない狭隘部や施工箇所が分散している現場での適用に適している．今後，除染工事に加え，一般の緑化工事でも適用できるように展開を図っていく予定である．

参考文献

1) 土壌環境分析法編集委員会，土壌環境分析法, pp33-38，博友社, 1997.
2）日本造園学会緑化環境工学委員会，特別報告 緑化事業における植栽基盤整備マニュアル，ランドスケープ研究, 63, 224-241, 2000.
3）林野庁，平成 26 年度 森林における放射性物質対策関係事業の結果について, 2014.
4) 環境省，除染等の措置に係るガイドライン, 2018 年 3 月.
5) Hashimoto et al., New predictions of 137Cs dynamics in forests after the Fukushima nuclear accident, Scientific Reports, 10(1), 1–11, 2020.
6)（一財）日本緑化センター，植栽基盤整備技術マニュアル, pp67-68, 2013.
7)Mizuno et al., The risk reduction effect of sediment production rate by understory coverage rate in granite area mountain forest. Scientific Reports, 11(1), 1–7, 2021