

リサイクル緑化における施工方法と植生評価

大谷多香¹・横塚 享²

¹正会員 ㈱熊谷組 土木本部 土木技術部 環境土木グループ（〒162-8557 東京都新宿区津久戸町2-1）

²㈱熊谷組 土木本部 土木技術部 環境土木グループ（〒162-8557 東京都新宿区津久戸町2-1）

リサイクル緑化工法は、現場で発生する建設副産物のうち、根株や枝葉を含む伐採木を針状に粉碎した生チップ材と現地発生土（表土など）を材料として再使用し、ゼロエミッションと自然環境保全を目標とした緑化技術である。

建設副産物という品質の安定しない材料を主体として再利用するため、リサイクル緑化工法では、再利用材を大量に効率よく施工することができる新たな施工システムと専用の施工機械を開発・実用化した。また、法面に造成された生育基盤の特性および植生の追跡調査を実施し、緑化へのリサイクル材の適用性を検討した。

キーワード： リサイクル、緑化、伐採木、針状粉碎、ゼロエミッション、自然環境保全、チップ材

1. はじめに

大規模建設工事から発生する伐採木（枝葉・根株）などの廃木材は、これまで現場での野焼きや埋め立て、あるいは場外搬出などにより処分されてきた。しかしながら、自然環境保全に対する社会的配慮から、現場での焼却処理が抑制され、また、処分地の確保が困難なことや処分地の遠隔化による処理費増大など、多くの問題を抱えている。さらに平成12年3月には、建設副産物として発生する木くずは伐採木を含めてすべて産業廃棄物に指定され、より厳密な処理とともに、建設現場内での積極的なリサイクル利用が求められている。

これまで、廃木材の現場内でのリサイクルは、チップ化して堆肥の原材料とすることや炭化处理し土壌改良材や水質改良材等に利用する試みがされている。¹⁾その他、チップにした材料を敷きならし、マルチング材として使われる例が見られるが、いずれにしても本格的なリサイクルが行われていないのが現状である。（図-1 参照）

一方、造成地の現地発生表土も盛土材には適さず、その再利用が限定され、最深部への埋戻しなど、消極的な利用あるいは処理が行われてきた。

そこで、「現場で発生したものは現場で処分する」というゼロエミッションの考えに基づき、現場で発生した伐採木の内、特に、建材などに再利用することが困難な根株や枝葉部分と現地発生土（表土）を、法面保護と生育基盤の機能を兼ね備えた材料として積極的に活用するリサイクル緑化工法を開発した。²⁾³⁾

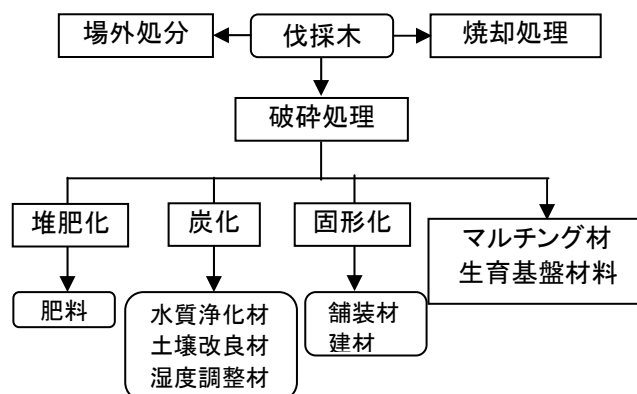


図-1 廃木材の処理・リサイクル

リサイクル緑化工法は、根株や枝葉など再利用が困難な廃木材を、長い針状に（長さ15cm、幅1cm程度）に破碎し、生のまま、現地発生土（表土）と混合し、法面緑化の生育基盤材料として再利用する工法である。長い針状の生チップは、その繊維の絡み合いにより生育基盤の補強材としての効果を持ち、また、団粒構造を持たせた現地発生土（表土）との混合により生育基盤材料としてリサイクルできる。したがって、本工法で使用するチップは、堆肥化などの処理をするために細かく粉碎する必要がない。また、破碎後直ちに使用するため仮置きヤードや設備などを必要としないなど多くの利点を有している。

一方、施工に際しては、生育基盤の安定のための付着性や植物の発芽・生育に必要な土壌構造を維持

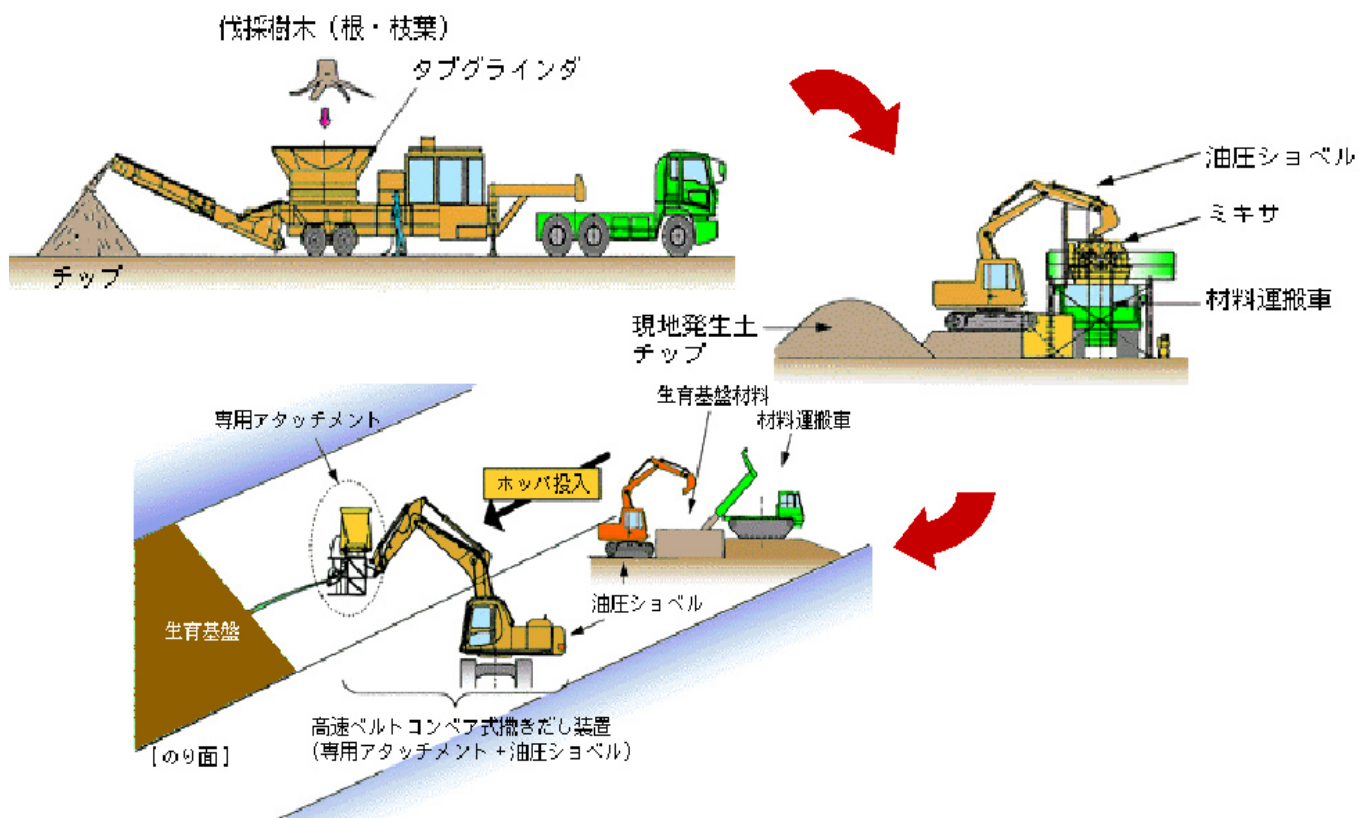


図-2 リサイクル緑化工法施工概要

するための施工方法が不可欠であるが、廃木材から作られる生チップと現場によって性質の異なる発生土の性状や特性により、従来の吹付方式では施工が困難である。

これらのことから、現場で発生する不要物を、植生に適した生育基盤の材料としてリサイクルする技術開発はもとより、新たな施工方法と機械の開発を行うことにより、本リサイクル緑化工法が実現した。

2. リサイクル緑化工法の概要

リサイクル緑化工法は、造成現場などで発生する伐採木のうち、製材用材など有価取引しが可能なものを除いた不要な根株や枝葉などを、発生した現場内で自然に還元することのできる法面緑化技術である。

本工法は、現地で発生した廃木材を針状に粉碎した生チップと団粒土壌に改良した現地発生土（表土）を混合した材料に、種子・肥料・添加剤・水などを加えて、植物が良好に発芽・生育できる生育基盤材料を製造し、新たに開発した高速ベルトコンベア式撒きだし機を使って、現地法面に生育基盤を造成する工法である。（図-2 参照）

本工法は、長い針状の生チップを生育基盤の補強材として利用するという新しい技術を提案し、実現したものである。この提案技術は、堆肥化などの余分な工程を省略し、コストの縮減を図るとともに、リサイクルを促進させる技術である。また、従来まで、植物の生育に影響を与えるとされていた生チップを、土壌との混合比率や肥料配合などを研究することにより、緑化のための有効なリサイクル材として利用する。また、表土をそのままの状態で行うことができることから、埋土種子の発芽・生育が期待でき、現地の周辺植生に調和した自然植生の復元が期待できる。

こうした長い針状の生チップと現地で発生する表土のリサイクルを実現した最大の要因は、生育基盤材料の改良と、生育基盤混合プラントおよび高速ベルトコンベア式撒きだし機の開発である。撒きだし機は、土工事において、土の掘削や積み込みに一般的に使われる油圧ショベルのアタッチメントとして取付けて使用する装置である。流動性が乏しく、レキや異物が混じった材料でも、定量的にしかも高速ベルトコンベアによる回転速度により法面に安定して付着させることができる。この装置の開発によって、エア吹付方式やポンプ圧送方式などの従来の方法では施工できなかった材料のリサイクルができる。また、本リサイクル緑化工法はこういった現場

内での掘削、法面整形、緑化と一連の作業を土工事の機械を用いて一体化施工ができ、不要材を生育基盤の材料としてリサイクル可能にしたことから、経済的かつ、ゼロエミッション（再利用可能な建設副産物の場外搬出ゼロ）を達成した工法である。

3. 施工機械の開発

(1) 生育基盤混合プラント

生育基盤材料を製造する混合プラントは、長さ15cm 程度の針状チップと現地発生土（表土）を効率良く攪拌混合し、生育基盤に適した材料を製造するために下記の機能が必要である。

①材料性状の変化に対応でき、優れた攪拌混合能力が必要（主材料は、発生現場ごとに異なる性状の土壌と長い針状生チップの混入で攪拌しにくい材料であり、また、そこに加える少量の添加剤の早期分散を可能にするミキシング装置）。

②製造された材料を速やかに排出できる排土機能（出口でチップによる絡みからアーチング作用が大きく排土しにくい）。

③組立・解体・運搬が容易なこと（各現場において移動・運搬が容易で、簡単に組立撤去ができる）。

生育基盤混合プラントは、一次破碎処理した針状の生チップと現地発生土を、その形状および性状変化に影響されることなく、植物の生育に適した品質の生育基盤材料を混合できるよう攪拌混合機構・方法に改良・工夫を行った。攪拌混合が困難な材料（針状チップの絡み、微粒分が多く粘性の高い土壌）に対しては攪拌装置の改良および高出力化、また、材料排出に対しては、絡み効果により排出が困難な状態であっても団粒をそこなわないで短時間で排出できるように排出ゲート機構の改造などを加えた専用の2軸強制練りミキサーを開発した。

さらに、少量の添加剤をミキサー内で早期分散させるため（長期時間練りでは団粒が壊れるため）、ミキサー内の材料の分散運動を優先できる練り方法（攪拌パドル寸法と材料の喫水面の調整）と添加剤の添加方法を改善した。練りあがった材料は、排出ゲートから運搬設備に直接排出して、載せ換えの手間・ロスタイムを抑える方式を採用した。

また、ユニット化されているため、現地での組立解体が容易である。⁴⁾（写真-1 参照）

(2) 専用撒きだし機

法面へ材料を撒きだすのに必要な機能は次のようになる。

①生育基盤材料を連続かつ安定した量で吐出部へ供給できる。

②生育基盤材料が斜面に確実に付着するために、材料に十分な運動量（速度）を与えられる。

③操作性が良く、法面整形に使用した汎用機械・オペレータで施工ができる。

専用撒きだし機（写真-2、写真-3 参照）は、生育



写真-1 生育基盤混合プラント



写真-2 専用撒きだし機（全景）



写真-3 専用撒きだし機（近景）

基盤材料を投入するホッパー部、その底部のチェーンフィーダ、出口の補助ローラからなる材料供給部と、下部の高速ベルトコンベアによる吐出部から構成されている。本装置全体の形式は、土工事の土の

掘削や積み込みに一般的に使われる油圧ショベルのバケットの代わりに取付けて使用するアタッチメント方式であり、土工事と並行して、重機に簡単に取り付けて施工ができる。したがって、法面整形直後に施工できるため、法面の保護（降雨による法面侵食の防止）や早期の緑化に効果がある。⁴⁾

a) 材料供給部

ホッパーに投入した生育基盤材料は、生チップによる絡み性が強く（これが法面に付着すると耐久性の高い材料となる）、ホッパー出口で強力なアーチングを形成し排出抵抗が大きくなる。したがって、ホッパー底部にチェーンフィーダーを設け、これで強制的に排出させる。チェーンフィーダーは、連続的に排出するだけでなく、そのスピードで排出量を調整できる。また、補助ローラの回転を調整して定量性の維持とホッパー出口に発生するアーチングを防止し、しかも生育基盤材料の圧密を開放してほぐした状態で排出できるようにしている。（図-3、写真-4 参照）

b) 吐出部

定量で排出された生育基盤材料を従来のエア吹付方式に代わって機械方式で吐出させる装置である。吐出機構としては高速ベルトコンベア（ベルトスピード 10m/sec）を採用した。高速ベルトコンベアから吐出された生育基盤材料は、法面に付着し、さらに生チップの絡み合いで、適度のコンパクションと耐侵食性を有している。

また、この方式の採用により、大きな針状の生チップから表土に含まれる小石まで幅広い性状の材料に適応が可能となり、現地発生材のリサイクルを原則としている本工法は、使用する材料の形状、物性的条件を大幅に広げリサイクルを拡大させた。しかも大容量の吐出（25m³/h）を可能とし、従来のエア吹付方式に比べて施工性を大きく向上させた。

5. 造成生育基盤の評価

造成される生育基盤の基本的機能は、施工対象法面を保護し植物を成立させることである。

リサイクル緑化工法により造成される生育基盤の主要材料は、現地で不要となった廃木材および現地発生土（表土）であり、発生場所により品質および性状が一定ではない。これらの廃木材や現地発生土（表土）をリサイクルし、生育基盤として植生に適した機能を発揮させるためには、土壤構造の改良・耐侵食性の向上などが求められる。⁵⁾

(1) 土壤構造の改良

植物を発芽・成立させるためには、現地発生土（表土）をリサイクルした生育基盤の土壤構造改良が必要である。特に、急傾斜地や無土壤地（岩盤法面）などの緑化困難地においては、保水性および通気性の確保が必須の条件である。この相反した保水性と通気性を確保する土壤構造としては団粒構造が

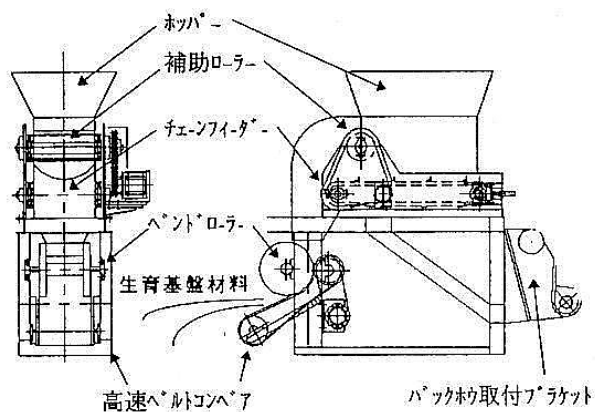


図-3 専用撒きだし機



写真-4 チェーンフィーダー

有効であるとされる。このことから、生育基盤材料として粘土・シルト分を20%程度以上含む現地発生土（表土）を用い、生育基盤製造時に団粒剤（水溶性の高分子凝集剤）を混合し、耐水性の団粒構造を形成させることにより、保水性・通気性および保肥性を確保した。

リサイクル緑化工法に使用した現地発生土（表土）の粒径組成およびこれを団粒させた後の粒径組成を図-4に示す。リサイクル緑化工法に使用した現地発生土（表土）は、団粒剤により、粘土・シルト分がほとんど団粒しており、土壤が改良されていることがわかる。

(2) 三相分布

土壤は土壤粒子と水と空気から構成されており、これらの比率（三相分布）は、土壤の物理的な状態を最もよく反映した値とされている。また、植物の根や水分の供給などの良否にも関係する指標である。植物が健全に生育するためには、三相分布の比率が適度な範囲内にあることが必要である。液相率・気相率に関しては、気象条件や時間の経過とともに変動するものであり、土壤の性状は固相率により把握

される。

土壌の三相分布はそれぞれの持つ性状・組成などにより様々な値をとる。一般に、植生が良好な土壌の固相率は30～50%とされる（「道路緑化技術基準・同解説」（社）日本道路協会）。

したがって、種々の現場発生土を使用するリサイクル緑化工法においては、固相率の規格値を30%～50%の間とし、法面に造成される生育基盤がこの範囲内にあることを確認する。

図-5にリサイクル緑化工法により造成された生育基盤の三相分布試験結果を示す。気相率・液相率については、条件により変化しているが、固相率については、造成時が30%前後の値を示している。その後、時間の経過とともに固相率は増加していくが、施工後7ヶ月以降は、40～45%の範囲で安定していることがわかる。

これらのことより、リサイクル緑化工法により造成された生育基盤の固相率は、規格値30～50%を満足していることが確認された。

(3) 耐侵食性の向上

法面を保護し植物を発芽・成立させるためには、造成される生育基盤自体の耐侵食性を向上させ土壌や種子の流亡を防止することが必要である。

生育基盤の耐侵食性の向上を図るためには、

- ①初期生育の早い草本類（外来草本類主体）の利用による緑化（全面被覆効果）
 - ②セメント・接着剤などの添加剤の混入
- の2つの手法が一般的に行われてきた。しかしながら、草本の利用は、発芽・生育の遅い木本類を被圧し、その成立を困難にする。また、外来草本の導入は、周辺地域植生を被圧し自然植生保全に影響を与えることが指摘されている。一方、添加剤の多用は、生育基盤土壌の硬化や発芽不良の原因となり、植物の発芽・生育に著しい障害を与える。

リサイクル緑化工法では、ジオテキスタイル補強土の考え方にに基づき、長い針状の生チップを生育基盤材料に混入することにより、耐侵食性を向上させた。伐採木を長い針状に粉碎した生チップは、粘土などの微細な土壌成分を凝集（団粒）させた現地発生土（団粒構造を有した生育基盤材）と混合して互いに絡み合わせることで、降雨による土壌侵食や種子の流失を防止させた。これにより生育基盤の土壌構造や植生に影響を与えることなく、耐侵食性を向上させることが可能である。

したがって、本工法でリサイクルする生チップは、従来のように細かく破碎し堆肥化して肥料や土壌改良材として使用するのではなく、生チップのまま生育基盤の補強材として再利用することが、従来の緑化技術と大きく異なる点である。

造成後3ヶ月までの初期段階において、リサイクル緑化工法により法面に造成された生育基盤は、降雨等の侵食に対し、主として生チップ同士の絡み合い、現地発生土（表土）の団粒構造などによって安

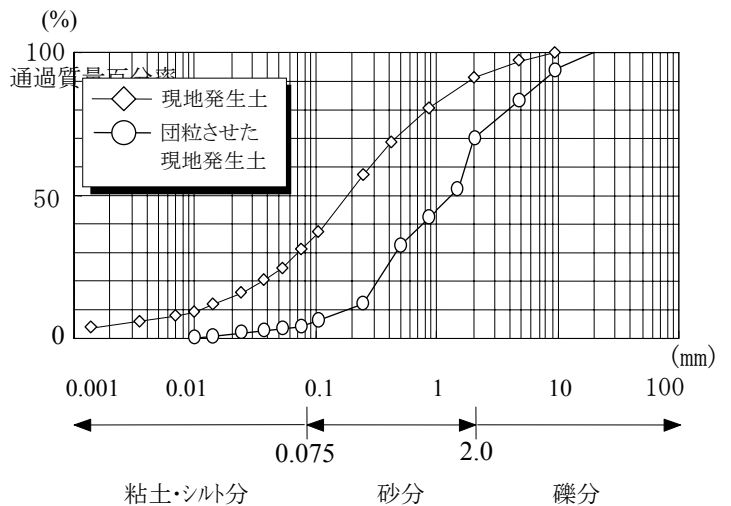


図-4 現地発生土の粒径加績曲線

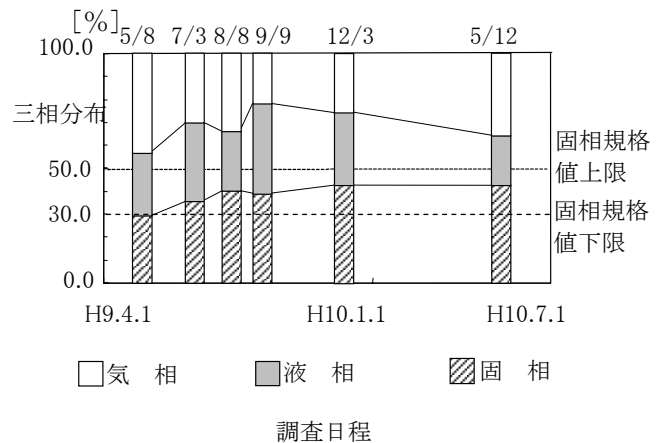


図-5 三相分布の推移

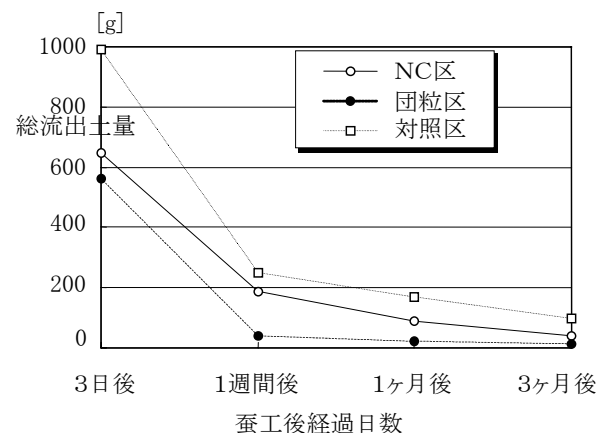


図-6 耐侵食性試験結果

定を維持する。これらの効果を確認するため、降雨試験装置により耐侵食性試験を実施した。

傾斜地を想定して1：1（45度）の勾配で降雨試験を実施した。降雨強度は50mm～100mm/hである。

図-6に生育基盤作成後の経過時間と侵食量を示す。

図中のNC区はリサイクル緑化工法による生育基盤であり、団粒区とは生チップによる補強効果を確認するためNC区から生チップを外した材料で作った生育基盤を示す。図-6より、NC区の侵食量は、試験開始3日後の供試体が最も多く、試験開始1週間後以降の供試体は大きく低下していることがわかる。また、リサイクル緑化工法による生育基盤は、自然表土を模擬した生育基盤（対照区）に比べて耐侵食性に優れていることから、現地発生土（表土）の団粒化による排水性の向上効果、生チップの絡みによる生育基盤補強効果などが十分発揮されていることが確認できる。リサイクル緑化工法による生育基盤の侵食量は、造成厚の10%以下にとどまり、十分な耐侵食性を有していることが確認できる。

(4) 土壌硬度の推移

生育基盤としての機能の維持には、その構造が長期的にも安定していることが必要である。特に、木本類を導入しようとする場合、草本類に比較して発芽・生育が遅いため、土壌硬度の長期的安定は不可欠の条件である。土壌硬度の値は、一般に粘性土で23mm（山中式土壌硬度計）以下であることが必要とされる。

図-7に調査結果を示す。土壌硬度の値は、造成後1週間から1ヶ月の間にわずかに増加の傾向が見られる。しかしながら、その後は、14ヶ月後の調査期間中、ほとんど変化がなく、11mm～14mm前後の値であることが確認できる。これらのことから、リサイクル緑化工法により造成された生育基盤の土壌硬度は、少なくとも1年にわたり規格値（23mm以下）を満足していることが確認された。

(5) 生育基盤中の窒素状態に関する研究

これまで、リサイクル緑化工法のような堆肥化しない生のチップを含む土壌内では、生チップを分解する微生物と植物による窒素の奪い合いがおき、土壌内の窒素が不足して植物が生育障害を起こすと考えられており、緑化工として採用するにあたり詳細検討が必要となっていた。

この課題を解決するため、生育障害が起きるとされている生チップの腐朽過程を解明し、植物の生育に適した生育基盤土壌造成の方策を研究した。試験試料は、リサイクル緑化工法施工後1年を経過した切土法面を対象として⁶⁾、目視による植被率で、50%以下（生育不良）、80～90%（生育並）、100%（生育良）の3段階に区分し採取した。これらの現地採取試料から無機態窒素濃度を測定し、あわせて生チップのみを分別し、これを粉砕してCNコーダーによる炭素・窒素濃度測定に供した。さらに、土壌中での可給態窒素の動態を推定するため、2種類の培養実験を行った⁷⁾⁸⁾。

培養1では、土壌の可給態窒素量を測定し、培養2では微生物による有機化の量を調査した。⁹⁾

表-1に施工1年後に採取した生育基盤の性質を、図-8に土壌成分の炭素率（C/N比）を示す。

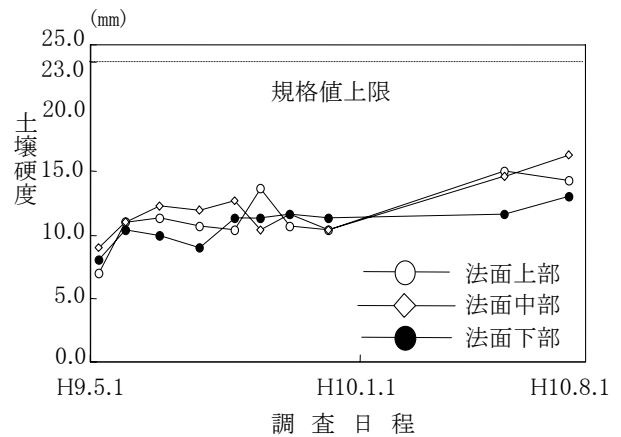


図-7 土壌硬度の推移

表-1 生チップ混合基盤の性質（施工1年後）

目視植被率 %	生育良 100	生育並 80～90	生育不良 50 以下
土壌厚さ cm	7.8	5.4	4.1
含水比 %	203	156	127
土壌硬度	13.3	13.6	9.7
土壌酸度 pH(生土:H ₂ O=1:2.5)	5.6	5.7	5.9
電気伝導率 μ S/cm	42.9	34.3	25.7

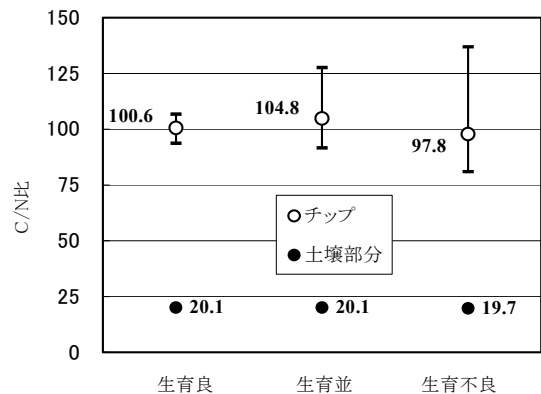


図-8 生チップ混合基盤のC/N比

表-2 生チップ混合基盤の無機態窒素

試料名	培養前 0	培養1 0	培養2 436mg/kg
N(NH ₄ Cl)aq 添加量			
土壌酸度 pH(H ₂ O)	5.7	5.6	5.1
電気伝導率 μ S/cm	34.3	48.9	410
アンモニア態窒素 mg/kg	0.83	1.64	3.21
硝酸態窒素 mg/kg	21.5	51.7	193
無機態窒素 mg/kg	22.3	53.4	196
硝化率 %	96.2	96.8	97.9

表-1 より、法面全体の大部分を占める「生育良」に比べ「生育並」および「生育不良」は、撒き出しムラあるいは侵食を受け厚みが若干薄かった。特に「生育不良」は含水比の低下および電気伝導率の低下傾向が明瞭であった。

培養試験の結果を表-2 に示す。培養 2 の無機態窒素濃度は、事前添加したアンモニア態窒素 436mg/kg の半分以下(196mg/kg)に減少した。減少した無機態窒素は、土壤微生物により有機化されたものであり、これと前述した 100 前後の C/N 比の結果から、生チップの腐朽と窒素の有機化は、施工 1 年後も進行中であると考えられる。

しかし、表中の培養前と培養 1 を比較すると、窒素無添加の場合、培養後の無機態窒素濃度は増加しており、生チップ混合基盤ではチップの腐朽が進行中ではあるものの、30mg/kg 程度の無機態窒素が含まれていた。

以上の結果から、

- ①生チップの分解は無機態窒素の多い施工初期に最も進行し、それ以降は緩やかに進行する。
- ②生チップの分解は施工 1 年後においても進行している。
- ③生チップを混合した生育基盤は、分解が進行中にも関わらず、無機態窒素を植物体に供給できる状態にある。

ことが確認され、生チップ材の腐朽過程においてもリサイクル緑化工法による生育基盤は、十分に植物生育のための機能を有していると判断される。

6. 植生調査

リサイクル緑化工法により造成された生育基盤の目的は、法面などの荒廃・裸地に多種多様の植物を成立させ、自然環境を復元させることにある。このため、これまでにリサイクル緑化工法により施工された現場の植生状況を調査し、その生育過程において生育不良や異常がみられないか観察する。

現在まで、試験施工を含めて 60 件、最長で 4 年程度の施工実績があるが、植生に関する追跡調査では、生育不良等の異常は観察されていない。(写真-5、写真-6 参照)この結果から、リサイクル緑化工法により造成される生チップを混合した生育基盤は、緑化復元に適したリサイクル材料といえる。

7. おわりに

本稿は、伐採木を粉碎したチップを堆肥化せずに緑化資材として、法面緑化に再利用したリサイクル緑化工法について、その施工法の開発および造成された生育基盤の性状と植生状況を報告したものである。

これまで、品質の安定しない現場発生材のリサイクルは、その施工や管理の困難性などから、積極的



写真-5 施工後 2 ヶ月植生状況



写真-6 施工後 3 年植生状況

な再利用が阻まれてきた。また、生チップの緑化への利用は、窒素飢餓などの植生への影響が懸念されてきたところである。しかしながら、今回の限られた調査結果ではあるが、生チップと土壌の配合や施工法などを工夫することにより、緑化のための生育基盤として再利用することの可能性が示された。今後、生チップを有効なリサイクル方法として利用するためには、長期的な混入チップの腐朽過程や土壌状態、さらに植生の推移を観察していくことが必要である。同時に、導入植物の多様化や在来種の導入法などに関しての調査・研究を図っていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 林原茂ほか：堆肥化した伐採木チップを緑化基盤材とした場合の施工性について，土木学会第55回年次学術講演会，VII-235, 2000.
- 2) 石口真実：ゼロエミッションに挑戦した法面緑化工法の開発－伐採木と現地表土の徹底利用－，環境技術，29(6)，pp.21-26，2000.
- 3) 岡田喬：リサイクル緑化「ネッコチップ工法」，月刊建設，44(10)，pp.32-34，2000
- 4) 岡田喬，麻生憲二郎ほか：ネッコチップ工法の施工機開発，建設機械，5月号，1999.
- 5) (株)熊谷組：先端技術・技術審査証明報告書「ネッコチップ工法」，(財)先端建設技術センター，1999.
- 6) 庄村辰幸，横塚享ほか：立命館アジア太平洋大学建設に伴う緑地の造成，基礎工，27(10)，pp.68-70，1999.
- 7) 横塚享，小林正宏ほか：未分解チップ施用土壌による法面緑化事例，日本緑化工学会誌，25(4)，pp.471-474
- 8) 横塚享，大谷多香，高橋正通，赤間亮夫ほか：未分解チップ施用法面の土壌化学特性および植生状況，日本緑化工学会誌，27(1)別冊，pp.181-184，2001.
- 9) 日本肥料土壌学会：土壌環境分析表，博友社，pp.243-259，1997.