

投稿論文(和文)

PAPERS

生態学的混播法による自然林再生法の開発

岡村俊邦¹・吉井厚志²・福間博史³

¹正会員 農博 北海道工業大学助教授 工学部土木工学科 (〒006 札幌市手稲区前田七条十五丁目四番一号)

²正会員 農博 北海道開発局建設部河川計画課 課長補佐 (〒060 札幌市北区北八条西二丁目)

³日本データサービス 農修 緑地計画室 (〒065 札幌市東区北十六条十九丁目)

生態系の再生にとって不可欠な自然林の再生法として、河畔や火山山麓などの変動地帯の自然林の成立過程から、多種類の在来種のタネの播種とヤナギ類の埋枝工を組み合わせた生態学的混播法を考案し、堤防や高水敷などの土木事業で自然林が失われたところを対象に実証試験を行った。この結果、第一段階（五年程度）の成績として、タネの重量によって導入成績に大きな差があり、重量級のタネと、中量級のタネの一部の播種およびヤナギ埋枝工は良好な成績を示した。また、導入成績の悪かった軽量級のタネや中量級のタネの一部の導入方法として、複数の1年生ないし2年生の苗からなるポット苗で導入する実生群植栽法と、播種や小苗の導入に有効な砕石マルチング法を提案した。

Key Words : mixed seeding, native species, wicker works, macadam mulch

1. はじめに

地球環境問題が深刻化する中、土木建設分野でも緑の必要性が叫ばれ¹⁾、大規模な環境林造成事業が開始されている。この場合、目標とする緑は、従来のような木材資源や景観資源を主体としたものではなく、地域毎の生態系の保全・再生を中心と考えた「生態系保全・再生林」と呼ぶべき自然林に近いものである。これによって、地域毎に多様性を持つ生態系を保全・再生し、地域の循環系（生態系）の機能を回復することにより、地域の集合としての地球全体の循環系（生態系）の機能回復が可能となる²⁾。

しかし、自然林の再生を目標した環境林造成の歴史は浅く、また、積雪寒冷地では厳しい気象条件も作用するため、その技術は、上記の目的に十分答えられるものになっていない。すなわち、元来その地域に分布しない外来種や園芸種が多用されたり、樹林の構造も画一的な人工林に近いものが多く、さらに、大苗や完成木の植栽に起因する枯死が目立つ。

本研究は、土木建設事業に伴う大規模な地形改変によって出現した工事跡地の広大なオープンスペースを対象に、自然林に近い樹林の再生をねらった「生態学的混播法」の考え方とその試験結果および実用化の可能性について明らかにしたものである。

表-1 自然林再生上の4条件

①地域性：対象地固有の材料を用いる
・種のレベル-----在来種
・遺伝子のレベル---対象地周辺の材料
②多様性：樹種および植生を多様にする
・樹種の選択-----多様な樹種の導入
・再生の目標-----多様な植生の許容
③自然性：自然の発展を尊重する
・基盤整備-----元々の地形・土壌の尊重
・自然選択-----タネ・小苗による導入
④確実性：厳しい環境条件の克服
・気象条件-----強風・乾燥・寒冷対策
・地表条件-----草本・侵食・乾燥対策

2. 生態学的混播法の考え方

(1) 自然林再生の条件と植生材料

表-1は、生態系の再生に不可欠な自然林の再生に当たって、必要と考えられている^{3),4)}樹林の条件をまとめたものである。

①地域性とは、対象地特有の植生を造る必要があることを指す。生態系の基礎となる食物連鎖の出発点は植物であり、地域の生態系の再生には、対象地

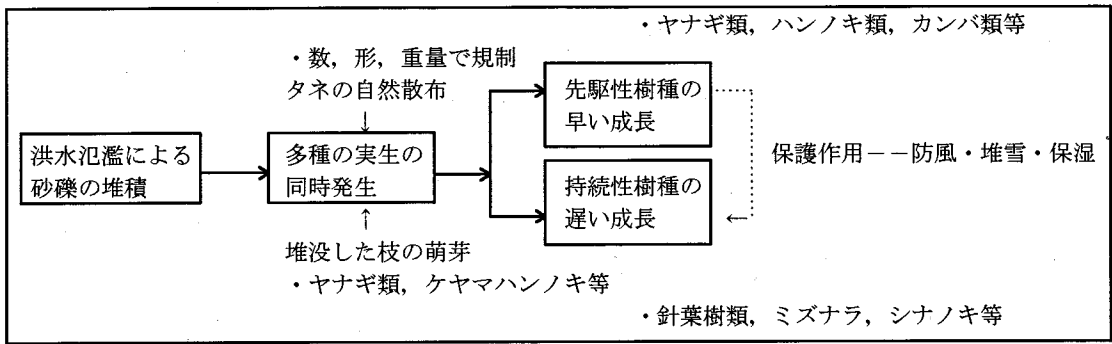


図-1 自然状態での河畔林の成立過程

に元来在った種類の植物（在来種）を再生する必要がある。そのためには、植物地理学および植物社会学的観点⁶⁾から構成樹種を選択すると同時に、実際に使用する植物材料を対象地周辺のものに限定することによって、遺伝子の攪乱をも防ぐ必要がある。

②多様性とは、地域性から考えられる樹種の中で、できるだけ多くの樹種を導入することを指す。自然の状態では、同じ緑でも、草原、灌木原、樹林地などさまざまである²⁾。また、その中に、さまざまな種類の植物が含まれており、このような多様性の再生が重要である^{6), 7)}。このためには、環境の多様性に対応するため、樹種を選択の範囲を多様しておく必要がある。

③自然性とは、人為的な介入の程度をできるだけ下げ、自然の発展ための条件を整備することを指している。つまり、有機質に富んだ土壌を客土したり、直接完成木を植栽するような方法ではなく、元々の地形や地質（土壌）を尊重し、周辺に生育する在来種のタネを直接播いたり、小さな苗木にしてから植えるものである。このことによって、競争と自然選択が働き、自然に近い多様な緑が再生され、多様な緑の再生に合わせて、その地域の特性をもつ生態系も復元されてくる。

④確実性とは、対象地が工事跡の広いオープンスペースの場合が多く、強風や乾燥という樹木の生育にとって厳しい環境下でも樹林再生が確実にできることを指す。かつて自然林が存在したところであっても、工事により樹林を一度破壊すると、その再生は極めて困難である。特にこの傾向は、海岸や河畔などの強風地帯や北海道などの寒冷地で顕著であり、厳しい気象条件下でも確実に再生させる技術が求められる⁴⁾。

しかし、土木建設分野で現在実施されている環境林造成事業の多くは、大苗や完成木による造成法であり、上記の条件が満たされていないものが多い。

なぜなら、大苗や完成木の養成には、数年ないし十数年の期間が必要であり、この期間を見越して地域性と多様性のあるものを大量に養成することは、現状では多くの障害がある。また、自然林に見られるような環境の多様性に対応した樹種の配置を、大苗や完成木を使って人為的に行うことはきわめて難しい。さらに、土木建設分野での自然林の再生は、河畔や海岸、道路、廃棄物の埋め立て地など強風にさらされるオープンスペースを対象とする場合が多く、大苗や完成木では、植栽当初、根と葉のバランスが崩れているため、水分を奪われて枯死することが多い。

したがって、上記の4条件を満たしながら樹林を再生するには、タネや小さな苗木を使って造成を行う必要がある。つまり、対象地周辺の自然林から在来種のタネをとり、直接タネを播いたり、小さな苗木にしてから植える方法は、地域性と多様性を満たす材料を容易に確保できる可能性を持つ。また、タネや小さな苗木による方法では、大苗や完成木の植栽と同じ経費で、また、同じ空間に、種類、個数とも多くのものが導入できる。大苗や完成木の植栽と異なり、それらがすべて生き残る必要はなく、環境に適応したものだけが生き残ることによって自然性や多様性が確保される。さらに、多種多量の材料を根の損傷がない状態で導入できるため、厳しい気象条件でも成林する可能性が高い。

(2) 自然林の成立過程とタネの自然散布

本研究の目標としている自然林は、周辺から自然散布されたタネが発芽、成長して成立したものであり、したがって、タネを使って自然林を再生する過程は、自然の樹林（自然林）の成立過程と極めて似たものと考えられる。そこで、自然林の破壊と成立が比較的短時間の中で繰り返されている河畔林の成立過程から、人為的な自然林の再生のための条件整

表-2 土木建設工事跡地の樹木の侵入条件

樹木の侵入条件	土壌の有機物	競合する植物	樹木のタネの有無	
			埋土種子	種子散布
工事跡地	少	少	少	少
変動地	少	少	少	多

備の方法を検討した。

一般に自然河川の周辺では、豪雨や急激な融雪に伴って大規模な洪水氾濫が発生し、河畔の一部が削られたり（洗掘）、土砂が堆積したりする。このため、そこにあった樹林は、流されたり土砂に埋もれて、洪水の直後には、植物が生えていない裸状の土地（河原）が出現する。しかし、そこでは、洪水の直後、あるいは、その翌年から樹木が生えはじめ、20～30年後には、20～30年の樹齢をもつ樹林が自然に再生されている^{8)・9)}。

図-1は、上記のような河畔林の成立過程を示したものである¹⁰⁾。洪水氾濫で、植物が生えていない裸状の土地が出現すると、破壊されなかった河畔林や周りの山からさまざまなタネが飛んで来て（タネの自然散布）、その年または翌春に一斉に発芽する。また、ヤナギ類やケヤマハンノキなど萌芽力の強いものは、土砂に埋もれた地表付近から新しい芽をふく。

樹木の中には、最初の20～30年まで、養分の少ない砂礫地でも成長が早く、その後、50～60年で寿命の尽きる先駆性樹種（ヤナギ類、ハンノキ類、カンバ類）と呼ばれるものと、最初の成長は遅いが、寿命が長く、最終的には巨木となる持続性樹種と呼ばれるもの¹¹⁾がある。洪水氾濫後、先駆性樹種がいち早く成長し、この保護下で持続性樹種がゆっくりと成長し、先駆性樹種の寿命が尽き始めると、持続性樹種が目立ち始める。

洪水氾濫による土砂の洗掘や堆積は、河畔の一部で発生し、場所も洪水の度にずれることが多く、河畔林全体としては、樹齢の異なる部分がモザイク状に分布している¹²⁾。したがって、新しい河畔林から順に旧いものを並べることにより、河畔林の成立と変遷の過程を知ることができる。

一方、地表部の変動のない、したがって、地表が裸地化されず既存の植物が生育しているところでの植生の変化は、緩やかであり、いわゆる、植生遷移と呼ばれる長期の過程を経て樹林化していくものと考えられる。つまり、伐採等で草地（ササ地）化した場合、草地（ササ地）のまま長時間推移している場合が多い。このことは、草地（ササ地）から樹

林化するには、裸地からの樹林化に比べて多くの時間を必要とし、早期の樹林化には既存の植物が障害となっていると考えられる。

以上のように、自然の河畔林が洪水氾濫で破壊された後、早期に再生する場合の条件は、洪水氾濫で裸状の土地が出現すること、そして、そこに周辺の樹木（母樹）からタネが飛んでくること（自然散布）である。一般に、草地や樹林地など既存の植物が生育しているところに自然散布されたタネは、発芽成長に必要な光や水分を得られずに発芽できないか、発芽しても枯死してしまう。また、発芽しなかったタネは、ヤナギ類等、1週間程度でタネの寿命が尽きるものもあるが、数十年も発芽力を保持するものもある。これらは、埋土種子と呼ばれ、土壌中において伐採などで発芽条件が改善されると発芽成長する可能性を有している。

一方、洪水氾濫で裸地化したところでは、既存の植物との競争が無く、土壌（砂礫）の隙間等に入ったタネが水分を得て発芽し、また、十分な光を得て成長し、樹林化して行く。したがって、タネの運ばれやすさ（散布力）と運ばれたタネが発芽・成長する能力（定着力）が、河畔林の樹種を決める重要な因子となる¹⁰⁾。

タネの散布力は、1本の木で生産されるタネの数と風などで運ばれる距離が関係しており、重たいタネ（重量級種子）ほど生産される数も少なく、移動距離も短く、散布力が弱い。逆に、軽いタネ（軽量級種子）ほど生産される数も多く、移動距離も長く、散布力が強い。

ところで、本研究の対象地となる土木建設に伴う裸地（工事跡地）は、河畔林の成立の出発点となる氾濫原とよく似た条件を持つ（表-2）。すなわち、両者とも、有機質の少ない表土であり、土壌に含まれている埋土種子も少ない¹³⁾。また、新たな木本の侵入を阻害する既存の草本や木本等が少ない。

唯一異なるのは、タネの自然散布の供給源となる周辺の母樹（森林）の存在である。つまり、土木建設に伴う裸地（工事跡地）の周辺は、自然林が既に失われているところが多く、自然河川の周辺と異なり、タネの供給（自然散布）、特に重いタネの自然散布は期待できない。このことが工事跡の裸地を放置しても、なかなか樹林化しなかつたり、ヤナギ類やハンノキ類など軽量級のタネをもつ樹種しか侵入しない原因と考えられる。

(3) 生態学的混播法

生態学的混播法とは、上記の自然の河畔林の成立

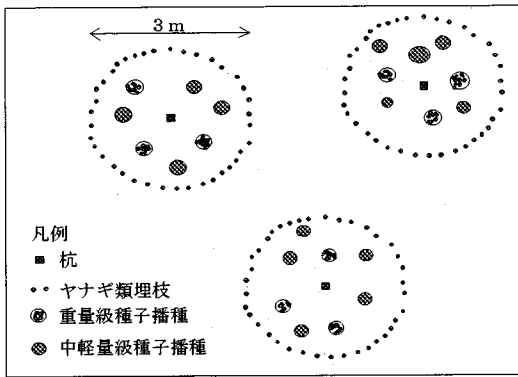


図-2 生態学的混播法の概念図

過程から導かれた自然林の再生法である。つまり、土木建設に伴う裸地（工事跡地）は、自然河川の河原の一種と見なすことができ、河原に見られるような自然林の成立の条件を整えることによって、自然林の再生を図ろうとするものである。そのためには、土木建設に伴う裸地（工事跡地）において自然林の成立の障害となっているタネの散布やその発芽成長条件を人為的に整える必要である。つまり、生態学的混播法は、人為的なタネの散布法を中心とした自然林の再生法である。

a) 施工方法

図-2は、生態学的混播法の施工方法を示したものである。

①周辺の自然林（できるだけ近くにある）から、成熟期に合わせて、極相性および先駆性のものを含めた可能な限り多種類の高木のタネを採取する。

②周辺の自然林を参考に、将来（30年後）の樹木の位置と本数を想定して、想定した本数の杭（長さ40cm程度）を想定した場所（ランダム）に打つ。

③杭を中心に直径3mの円を描き、円周上に約20cm間隔で、長さ25cm程度のヤナギ類の枝を、先端が1～2cm地表に出る程度に、地中に斜めに埋め込む（埋枝工）。

④ヤナギ類で囲まれた円内（1セット）に、周辺の自然林から採取した在来種のタネを10種類程度選択して播く。この場合、ミズナラやオニグルミなどの重量級（表-3）のタネから2～3種類を選び、各5個程度を地中に浅く埋め込む。また、イタヤカエデやキハダなどの中量級およびシラカンバやケヤマハンノキなどの軽量級（表-3）のタネを8種類程度を選び、各一握りの量（一単位）を表土と軽く混ぜる。

b) 施工の意味

これらの施工の持つ意味は、次のようである。自

然林の成立過程では、何らかの要因で裸地が出現すると、周辺の母樹から多種大量のタネが裸地の全面に自然散布される。そして、場所ごとの環境の差異に応じて競争と自然選択が働き、現在、見られるような樹種や密度、配置を持つ樹林が出現する。しかし、これらの条件をそのまま再現するには、大量のタネが必要であり、実用上不可能である。

そこで、30年生程度の自然林の樹木の密度を参考に、対象地での30年後の樹木の本数を想定し、その本数分の杭をランダムに打つ。そして、杭を中心とする直径3mの範囲に、10種類程度のタネを播種する。これによって、直径3mの範囲で、自然林の成立過程に近い競争と自然選択を働かせ、30年後には、1本の樹木が生き残ることをねらっている。つまり、対象地全面で競争と自然選択を働かせるには、大量のタネが必要であるが、30年後に樹木が生育する本数および位置を自然林に近い形で決め、その部分に多種のタネを播種（混播）する事により、少量のタネで自然に近い競争と自然選択を働かせることができる。

また、ここでは、タネからの侵入を阻害する既存の植物がなく、さらに、外来草本が侵入しやすい有機質に富んだ土壌の客土がなされていないことから、周辺からのタネの自然散布と発芽成長が期待できる。つまり、タネの播種（人工散布）に加えて、自然散布が行われれば、より自然に近い樹林の再生が可能と考えられる。

さらに、この方法では、直径3mの円周上にヤナギ類の埋枝を行っている。ヤナギ類の埋枝工は、有機質に乏しく、気象条件の厳しいところでも確実に、かつ、いち早い生育が期待できることから、タネや発芽直後の実生への直射日光や強風の遮断など、先駆樹種的な保護効果を持たせることを意図している。なお、円の直径を3mとしたのは、これ以上大きいと保護効果が発揮されるまでに、時間がかかり、肝心の初期の段階で保護効果が発揮されないこと、また、これ以上小さいと、早い段階でヤナギ類がタネで導入した樹木の生育を阻害すると考えられるためである。

c) 特徴

近年、生態学的な条件を考慮した樹林の造成法として、「エコロジー緑化」が開発され施工されている³⁾。これは、潜在自然植生と呼ばれる極相に近い樹林を早期に造ることを目標に開発された方法である。この方法では、植物社会学的な観点から、土壌と植生の関係が重視され、極相に近い樹種を導入するための基盤整備として有機質に富んだ土壌が客土

され、潜在自然植生の構成種が高木類を中心に数種、ポット苗（2～4年生）で密植される。そして、密植により、風や直射日光による乾燥を防ぎ、また、有機質に富んだ客土にともなう草本の侵入を防止している。

この方法では、2～3年生の苗を対象地全域に密植する必要があり、地域性と多様性のある苗を大量に確保することは、現状では、問題が多い。また、導入される樹種が少なく、主要樹種が極相性のものに限定されるため、樹林の環境の多様性に問題がある。さらに、10年程度で極相性樹種の密生した樹林となり、自然林とはかなり異なった環境となることも問題と考えられる。

一方、山腹の崩壊地など荒廃裸地を対象とすることの多い治山の分野でも、播種工を主体とする生態系を考慮した木本群落の復元手法が開発されている。この手法の場合、対象地が急斜面で客土が行えない場合が多いため、その地域の先駆性樹種や空中窒素の固定能力のある肥料木と呼ばれる樹種を使用し、草本等との混播がなされている。そして、早期に先駆性樹種の群落を造成して、徐々にその地域特有の構成樹種に変化させようとしている。

この方法では、全面的に木本のタネを散布するため、大量のタネが必要であり、地域性のある大量のタネの供給に問題がある。また、自然の状態では、崩壊地等の有機質の少ない裸地であっても、タネが自然散布されれば、極相性の樹種でも当初から侵入する場合があります。環境の微小な差によって、先駆性の樹種だけの部分と、先駆性、極相性の両者が混じり合っている部分がモザイク状に出現し、環境の多様性を作り出している。しかし、この方法では、タネの供給がネックとなり、先駆性のタネしか使用できず、先駆性樹種の単純な樹林が広い範囲に出現することになり、多様性のある樹林に推移するには長い期間が必要となる。

ところで、生態系の活性化にとって、極相に近いものだけでなく、先駆的なものも含めた多様な樹林の造成が必要と考えられる。先に述べた自然林の成立過程では、裸地が出現後、タネの自然散布とその場所の環境条件の差異により、当初から極相的な樹種が侵入することも、先駆的な樹種が侵入する場合も認められる。

そこで、生態学的混播法では、30年後の樹木の配置を予想し、周辺に見られる樹種から1箇所について極相性、先駆性の樹種も含めて10種程度（全箇所で30種程度）の播種を行い、限定された範囲で競争と自然選択を働かせている。つまり、苗木よ

りは地域性と多様性の確保しやすいタネを使い、かつ、限定された範囲で混播することにより、より少量のタネで地域性と多様性のある自然に近い樹林を、より確実に造成できるの可能性があるものと考えられる。

3. 試験方法

(1) 試験の目標

生態学的混播法では、30年後に自然林に近い多様な樹林を造成する事を目標としている。この目標の達成の可否を判断する段階として、下記の3段階を想定している。

a) 第一段階（施工～5年）

播種から5年程度を第一段階とした。この段階は、播種されたタネが発芽し、発芽直後の不安定な時期を経て、2～3年生の実生になるまでの期間を指す。この段階では、埋土工で導入したヤナギ類の前成林としての保護効果が期待できる。

b) 第二段階（5年～10年）

実生の段階から成長し、直径3mの範囲で混播した樹種同士が競争状態に入るまでの段階である。この段階では、混播で導入したものは、まだ、小さく競争状態にはないが、ヤナギ類との競争が行われる時期と考えられる。

c) 第三段階（10年～30年）

直径3mの範囲で混播した樹種同士が競争状態に入る段階である。この段階では、競争と自然選択が働くと考えられる。

ところで、本方法で目標とする自然林が再生するには、30年と長期にわたる野外試験が必要であり、また、対象とする樹種も30種以上と多いため、試験当初では予測できない事態も予想される。したがって、最終的な目標を達成するために、上記の各段階において、試験結果を検討し、フィードバックをしてより良い方法に改良する必要がある。

ここに述べる試験および結果は、a) 第一段階のものであり、以下の2点について検討した。

①人為的な混播で、自然侵入で見られるような、多種の同時的な発芽および初期成長（3年程度）がみられるか。

②埋土工導入したヤナギ類が保護効果を発揮するか。

(2) 試験地の概要

生態学的混播法の試験は、平成3年度から開始した。実施した場所は河川敷（3箇所）、丘陵堤（2箇所）、ダム湖岸（1箇所）、採石跡地（1箇所）

表-3 試験地の面積とセット数

地区名	面積 ^m	セット数	樹種数
①御成地区	2,220	60	10
②豊国地区	2,420	45	30
③港地区	600	10	17
④石狩生振地区	6,000	60	30
⑤釧路湿原地区	30,000	48	4
⑥定山溪ダム地区	300	10	10
⑦藤野採石所地区	600	45	17

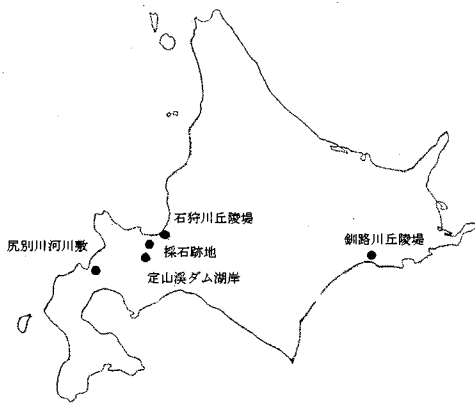


図-3 生態学的混播法による自然林の再生試験地

の計7箇所であり、北海道の南部、中央部、東部にまたがっている(図-3)。それぞれの試験地の概要は以下の通りである。

a) 河川敷

北海道の南部の尻別川の中流部から河口にかけて3箇所試験地を設定した。尻別川は、北海道南部の大河であり、イトウの生息する自然環境の豊かな川として知られ、アユやサクラマスなどの内水面漁業の盛んな川である。河川敷や河岸には、落葉広葉樹の自然林が発達している部分が多く、これらの河畔林と魚との生態学的な結びつきが強く見られる。このため、河道掘削に伴う河畔林の伐採には地元住民の反対が強く、河畔林の再生が強く求められている。そこで、河道掘削に伴う裸地で治水上支障の無いと考えられる部分について河畔林再生の試験を実施した。

試験地は、中流部の高水敷2箇所と河口部の高水敷1箇所を設定した。中流部の1箇所(①御成地区)は、平成3年10月22日に生態学的混播法として初めての試験を行ったところである。もう1箇所(②豊国地区)は、一部住民参加のもとに試験を行ったところである。河口部の試験地(③港地区)は、潮風の影響が大きいと考えられるため、土塁を築いて試験を行った。

b) 丘陵堤

丘陵堤での試験は、石狩川下流部の生振築堤(④石狩生振地区)と釧路川遊水地周囲堤(④釧路湿原地区)で行った。

生振築堤は、浚渫土の処理を目的に、堤外側10割、堤内側5割と従来より緩い勾配に盛られた丘陵堤である。試験は堤内側で実施した。試験地付近の堤外地にはハンノキの自然林が発達し、林床には、ミズバショウが群生する札幌近郊の自然観察の場と

なっている。このため、堤外地の自然植生と違和感の無い環境林の造成が必要となっている。

釧路川遊水地周囲堤¹⁴⁾は、大正9年の水害を契機に、釧路市と釧路町の水害防止を目的に釧路湿原内に築かれたものである。1992年から軟弱地盤対策および堤防漏水・基盤漏水対策として、5割ないし10割の丘陵堤への拡築工事が開始されている。釧路湿原は、1935年に「釧路のタンチョウ及びその生息地」として天然記念物に指定され、1980年には、ラムサール条約登録湿地となり、さらに、1987年には国立公園に指定されている日本でも貴重な自然環境を有する湿原である。このため、湿原の動植物に影響を与える影響を極力抑えるため、在来植生により堤防を覆う必要がある。

c) ダム湖岸

ダム湖岸での試験は、札幌市の水瓶である定山溪ダムの上流部(⑥定山溪ダム地区)で実施した。ここは、ダムの湛水試験のため河畔林が伐採されたところである。ここでは、水と生態系の保全のため、親子50組の札幌市民の参加を得て、生態学的混播法による河畔林の再生を試みた。

d) 採石跡地

採石跡地の試験は、札幌市南区の藤野採石所(⑦藤野採石所地区)で実施した。ここは、札幌市の南部に広がる森林地帯と住宅地の境界付近に位置し、周辺は広葉樹の自然林に囲まれている。このため、従来の在来・外来を問わない肥料木(ヤマハギやケヤマハンノキ、ニセアカシア等)中心の緑化ではなく、採石以前に存在した広葉樹の自然林の再生を目標として、生態学的混播法を実施した。

なお、各試験地の面積および施工した生態学的混播法のセット数および播種した樹種数は、表-3の通りである。

(2) 材料の採取と施工

本方法で目標とする森林は、対象地一帯の在来種

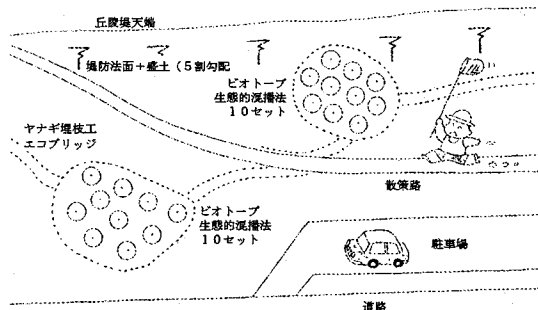


図-4 丘陵堤(石狩生振地区)での自然林再生試験地

からなる多様な構造の自然林に近いものであり、かつ、遺伝子のレベルでも対象地域周辺のものに限定する必要がある。そこで、導入する樹種は、在来種とされるものの中から高木を中心に選択し、それぞれの対象地周辺からタネや挿し穂の採取を原則とした。

表-4は、試験で使用したタネの一覧表である。これらのタネは、試験地周辺に自生している在来種から成熟期に合わせて採取し、果肉の除去等の精選を行った¹⁵⁾後、一握りの量(生態学的混播法での播種の1単位)ごとに小分けした。成績の調査では、後述するように、この1単位のタネを植栽工での苗木1本に相当するものとみなした。また、タネの重量は、樹種によって大きな差があり、定着の良否と関係が深いことが予想される。このため、各タネの1,000粒重量を測定し、これによって重量級(10³g以上)・中量級(1~10³g)・軽量級(1g以下)の3区分を行った。さらに、1単位のタネの平均的な重量を測定し、1単位に含まれるそれぞれのタネ粒数を数えた。

実際の試験では、先に述べた生態学的混播法を対象地の条件に合わせて実施した。河川敷では、河口部と中流部では同一河川でも目標とする森林を違うものとした。湿原の丘陵堤では、湿原への外来種の侵入を防止するため、堤体の張り芝(外来種)や外来草本の種子吹き付けを行わず、後述する理由から碎石で全面的に被覆(碎石マルチング)して生態学的混播法による在来植生の導入を試みた。採石跡地では、ステップに残っている石を利用して防風垣を造り、石の下にヤナギ類の埋枝工を行った。また、どの施工地も、草本との競合を防ぐため、生態学的混播法を施工する部分には、張り芝や外来草本の種子吹き付けを行わず、さらに、黒土等の客土もせず、工事後の堤防盛り土や河川敷の砂礫に直接施工した。なお、ハルニレについては、結実期が初夏のため、秋までの期間に小さい苗木に養成し、後述する実生

群植栽法による導入を試みた。

図-4は、④石狩生振地区での施工例を示した。ここは、市街地に近く堤外側にミズバショウ群落があり、多くの人間が入り込む場所となっている。そこで、全面的な樹林の造成は避け、図に示したように生態学的混播法10セットを1単位としてヤナギ埋枝工で周囲を囲み、ピオトープ(野生生物の生息空間)と位置付けた。そして、堤防延長1kmに6箇所造成したピオトープを2列のヤナギ埋枝工で繋ぎ、エコブリッジ(生態学的橋)として、ピオトープをネットワーク化した。なお、ピオトープおよびエコブリッジ以外の部分は芝の吹き付けが行われている。

4. 試験結果

(1) 成績判定の基準

生態学的混播法では、複数のタネを1単位として一箇所に固めて播種するため、播種後2年目以降は、タネと実生の関係が不明瞭となる。すなわち、播種後1年目に見られる実生は、1粒のタネから発生したものと判断できるが、2年目以降になると、萌芽によって1粒のタネから発生した実生の地上部が複数になったり、休眠していたタネが新たに発芽したり、また、1年目に発生した実生が枯死したりする。そして、これらが一箇所に混在するため、それぞれを区分するのは困難である。

一方、木本のタネは、重量に大きな差があり、導入成績を検討するのに、重量級のものも軽量級のものも、同一の基準で算出するのは問題が多い。つまり、重量級のタネは、1本の木で生産される箇数が少ないが、発芽率は極めて高く、一方、軽量級のタネは、発芽率は低い、1本の木で大量に生産される。また、タネの採取では、軽量級のタネを多数採取するのは容易であるが、重量級のタネを多数採取するのは困難である。これらのことから、生態学的混播法では、1握りを1単位として播種しているが、1握りに含まれるタネ数は、重量級と軽量級に大きな差がある。

以上の点から、生態学的混播法では、1単位(一握り)のタネが植栽における苗木1本に相当すると見なすこととし、導入成績を以下の判定基準で行うこととした。つまり、1単位として播種した地点における実生の有無(1本でも有れば良い)の割合を定着率と定義し、定着状態の良否の基準とする。また、1単位として播種した地点における最大実生の大きさを成長の良否の基準とする。

なお、前生林の役割を期待して直径3mの円周上

表-4 生態学的混播法の試験に用いた在来木本のタネ

樹種	学名	1000粒重量 (g)	1単位の粒数	特性
トチノキ	<i>Aesculus turbinata</i>	29,300	3	持続性
オニグルミ	<i>Juglans ailanthifolia</i>	7,700	3	持続性
クリ	<i>Castanea crenata</i>	5,400	5	持続性
ミズナラ	<i>Quercus mongolica</i>	4,280	5	持続性
カシワ	<i>Quercus dentata</i>	2,900	5	持続性
ツノハシバミ	<i>Corylus sieboldiana</i>	1,060	5	低木
ハイイヌガヤ	<i>Cephalotaxus harringtonia var. nana</i>	580	3	低木
キタコブシ	<i>Magnolia kobus var. borealis</i>	198	8	
エゾヤマザクラ	<i>Prunus sargentii</i>	181	21	持続性
ハウノキ	<i>Magnolia obovata</i>	156	17	
イチイ	<i>Taxus cuspidata</i>	46.1	23	持続性
マユミ	<i>Euonymus sieboldianus</i>	44.8	25	低木
ヤチダモ	<i>Fraxinus mandshurica</i>	32.4	55	持続性
コマユミ	<i>Euonymus alatus f. striatus</i>	31.1	38	低木
シナノキ	<i>Tilia japonica</i>	29.0	10	持続性
イタヤカエデ	<i>Acer mono</i>	28.6	14	持続性
イボタノキ	<i>Ligustrum obtusifolium</i>	22.1	43	低木
アキグミ	<i>Elaeagnus umbellata</i>	20.0	18	低木
ハシドイ	<i>Syringa raticulata</i>	17.4	62	
コリンゴ	<i>Malus sieboldii</i>	10.3	39	低木
キハダ	<i>Phellodendron amurense</i>	9.24	119	
サワシバ	<i>Carpinus cordata</i>	8.95	57	
ハルニレ	<i>Ulmus davidiana</i>	6.60	実生群	持続性
ナナカマド	<i>Sorbus commixta</i>	4.04	109	
アカエゾマツ	<i>Picea glehnii</i>	3.81	336	持続性
エゾマツ	<i>Picea jezoensis</i>	1.49	202	持続性
ケヤマハンノキ	<i>Alnus hirsuta</i>	0.88	733	先駆性
タラノキ	<i>Aralia elata</i>	0.60	200	先駆性
カツラ	<i>Cercidiphyllum japonicum</i>	0.46	720	持続性
ウダイカンバ	<i>Betula maximowicziana</i>	0.42	710	持続性
シラカンバ	<i>Betula platyphylla</i>	0.22	452	先駆性
ヤナギ類	<i>Salix spp.</i>	0.10	埋枝工	先駆性

に埋枝工で導入したヤナギ類の成績は、定着率についてはすべての挿し穂の発芽の有無を確認して百分率で表した。成長量については、各セットの上位5本の平均値で算出した。また、実生群植栽法で導入したハルニレについては、播種によるものと同様の基準で表した。

(2) 定着率の推移

a) 1年目

図-5に、丘陵堤(④石狩生振地区)での定着率

の推移を示した。播種と埋枝は、主に秋に実施しており、ここでは、1992年10月29日に施工した。なお、他の試験地についても、本試験地とほぼ同様の推移を示しているため、試験結果およびその考察は、本試験地を中心に進める。

本研究では、1000粒重量によってタネの重さを重量級、中量級、軽量級の3つに区分したが、1年目の定着率は、この3区分と明瞭な関係が認められた。まず、1000粒重が10³g以上あるオニグルミやミズナラなどの重量級のタネでは、定着率

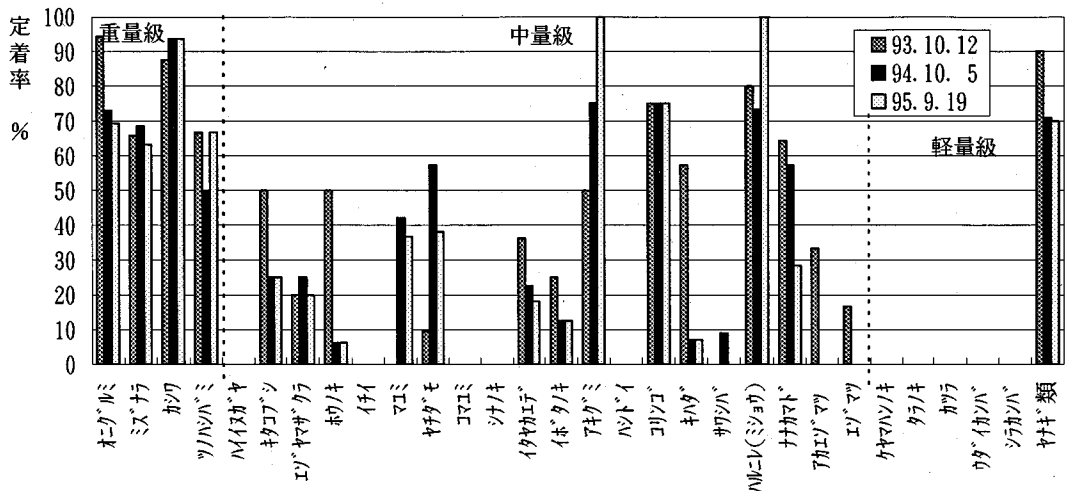


図-5 生態学的混播法による定着率の推移 (石狩生振地区)

がどの試験地でも60%を越えた。中でも、北海道の在来種で最も重いタネを持つトチノキや2番目のオニグルミでは、90%以上に達した。ミズナラ、カシワなども60%以上の発芽率を示した。

一方、1000粒重が1g以下のカツラやウダイカンバなどの軽量級のタネでは、ほとんどのタネが定着率0%であった。これらの多くは、発芽しなかった訳ではなく、融雪後の一時期には実生がみられたが、融雪後の乾燥期に枯死したため、調査を行った秋の段階では定着率が0%となった。

両者の中間のタネの重さを持つ中量級のもの、定着率に大きなばらつきがみられた。すなわち、ナナカマド、コリンゴ、キハダなどは、試験地によっては重量級のタネと変わらない定着率を示したが、イチイ、シナノキ、サシバなどは、どの試験地も定着率が0%となった。また、キタコブシ、イタヤカエデなど、20%~50%の定着率を示すものも多く見られた。

なお、埋枝工で導入したヤナギ類は、ドロノキも含めて70%以上の高い発芽率を示した。また、試験的に実生群植栽法で導入した中量級のタネを持つハルニレは、重量級のものと同様の高い定着率を示した。

b) 2年目および3年目

2年目および3年目の推移でも、重量級のものと同様のものでは、全体としてそれぞれ同じような推移がみられた。すなわち、重量級タネでは、2年目、3年目についても定着率に大きな変動はなく、いずれも高い定着率を示した。また、1年目の定着率が0%となった軽量級のタネは、2年目、3年目

も0%となった。

一方、中量級のものでは、さまざまな傾向を示した。すなわち、重量級のものと同様に1年目に高い定着率を示したものは、コリンゴやナナカマドのように2年目、3年目も重量級のものと同様高い定着率を維持したものと、キハダやホウノキのように2年目に急減したものがある。また、1年目に中程度の定着率を示したものでは、イタヤカエデやイボタノキのように減少の割合が少ないものからアケボノミやエゾマツのように0%になったものもある。さらに、マユミやヤチダモのように2年目から出現ないし増加したものもみられた。

1年目に高い発芽率を示したヤナギ類は2年目に少し減少したが、3年目は安定した状態である。また、実生群植栽法で導入したハルニレも重量級のものと同様、高い定着率を維持した。

(3) 樹高成長の推移

a) 実生の大きさ

図-6は、図-5に示した石狩生振地区での試験地における樹高の推移を表したものである。発芽1年目の実生の大きさについても、定着率と同様、1000粒重量で示したタネの重さの3区分と密接な関係が認められた。すなわち、重量級のタネでは、タネの重さと比例して、重たいタネほど大きい傾向がみられた。北海道に自生する樹木の中で最も重いタネを持つトチノキでは、30cmを越え(尻別川高水敷)、オニグルミでも20cmを越えている。また、他のものも1年生のものとしては大きな実生となっている。

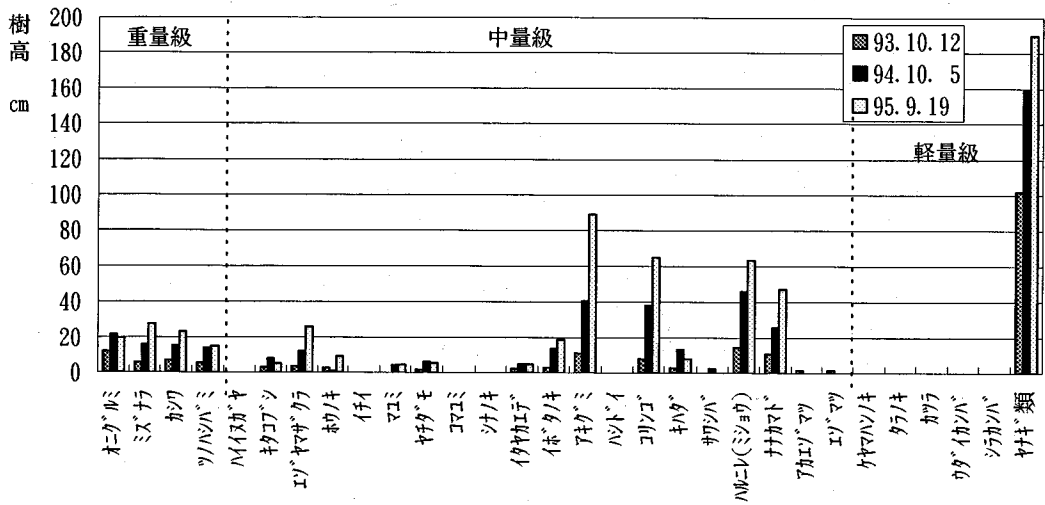


図-6 生態学的混播法による樹高成長の推移 (石狩生振地区)

一方、中量級のタネでも、タネの重さと発芽1年目の実生の大きさの比例関係は、発芽当初の段階では認められたが、アキグミ、コリンゴ、ナナカマドなどは、成長が早く、図-6に示した秋の段階では、重量級の上回るものもみられた。一方、軽量級では、ほとんど定着していないので、この点は不明である。

また、前生林の効果を期待して円状に施工した埋枝工の成長量は、1年目で平均でドロノキが10~20cm、ヤナギ類が40~100cmとなり、前生林としての役割を果たしつつある。また実生群植裁法で導入したハルニレは、1年目で最も大きく成長した。

b) 2年目および3年目の推移

2年目の段階では、重量級のものでは、ミズナラとカシワが順調な樹高成長がみられたが、オニグルミやツノハシバミは、3年目にはほとんど成長が認められなかった。

一方、中量級のものでは、アキグミやコリンゴ、ナナカマドなどの成長が著しく、重量級の上回るものに上回っており、エゾヤマザクラも順調な成長がみられる。しかし、カタコブシやイタヤカエデなどはあまり成長しておらず、また、2年目に発芽したヤチダモやマユミもまだ小さく今後の推移を見守る必要がある。

また、ヤナギ類は、順調に成長しており、実生群として導入したハルニレは、アキグミやコリンゴ、ナナカマドなどと同様に順調な成長を示している。

5. 試験結果の評価と実用化の方向性

(1) 第一段階での評価

本研究では、長期(30年)にわたる生態学的混播法による自然林再生試験の中で、第一段階(5年程度)での結果について検討した。この段階での検討課題は、先に述べたように以下の2点である。

①人為的な混播で、自然侵入で見られるような、多種の同時的な発芽および初期成長(3年程度)がみられるか。

②埋枝工導入したヤナギ類が保護効果を発揮するか。

現場での結果、丘陵堤(石狩生振地区)の例をとると、29種中16が播種後3回の成長期を経過した段階で定着しており、その中には、樹高90cmに達しているものもみられた。また、ヤナギ類については、埋枝後3回の成長期を経過した段階で80%が定着しており、1年目で約1m、そして、3年目には約2mに達した。この結果は、播種した約半数の樹種が定着して、①多種の同時的な発芽および初期成長がみられ、また、ヤナギ類については、②1年目から播種で導入したものに対する保護効果が発揮されたと考えらる。他の試験地でも、ほぼ同様の結果が得られたことから、第一段階は、一応成功と判断できる。

しかし、これまで述べた試験結果を荒廃地から自然林が成立する過程と比較すると、大きく異なる部分がある。それは、どの試験地でも、軽量級のタネを持つ樹種の定着が見られなかった点である。一般

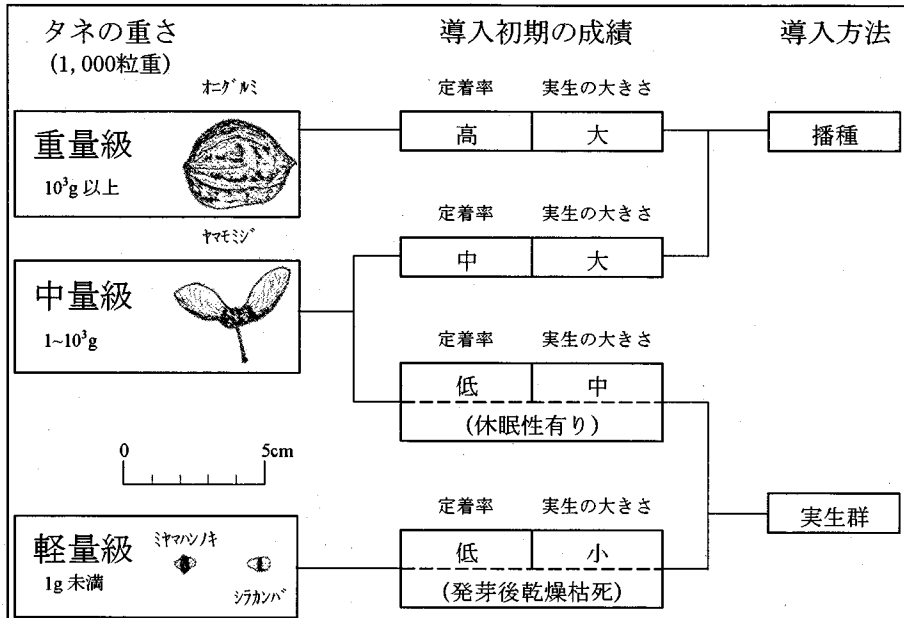


図-7 生態学的混播法の播種成績と在来木本の適応性

に、これらの樹種は、カンバ類やハンノキ類のように先駆性樹種と呼ばれ、荒廃地から自然林が成立する過程で、最も多く定着する樹種である。

生態学的混播法では、播種した全ての樹種が定着することは期待しておらず、対象地の環境によって自然選択が働き、樹種の偏りが生じることを逆に期待している。しかし、先駆性樹種が定着できなかったことは、試験地が一般の自然林の成立する環境よりかなり厳しい条件にであると判断できる。

自然林の再生法として生態学的混播法を考えた場合、初期段階で、自然侵入より厳しい淘汰が働くことは、多様性や自然性を確保する上で問題である。つまり、自然侵入では多く見られる軽量級のタネを持つ樹種や、ある程度はみられる中量級のタネを持つ樹種の一部は、この方法では、初期段階で定着の可能性を排除されることになる。したがって、より自然林に近い樹林を造成するためには、軽量級や中量級のタネを持つ樹種が定着できるような改良を考える必要がある。

(2) 実用化への方向性

これまでの試験結果から、生態学的混播法によって、地域性のある自然林再生の可能性が確認できた。しかし、今後、改良を進める必要がある点も明らかとなった。そこで、今後の改良点について以下に述べる。

これまで述べたように、どの試験地でも初期の成績は、タネの重量との関係が強くみられた。今後作業の標準化を進める上で、このことは、大きな意味を持つものと考えられる。

図-7は、これまでの試験結果から、タネの重量と播種による導入成績および導入方法をまとめたものである。すなわち、表-4に示した重量級のものでは、すべてのもので高い定着率と順調な成長が見られた。したがって、重量級のタネを持つものについては、播種による導入が可能であり、かつ、望ましいと判断できる。

一方、播種による導入に失敗した軽量級のタネをもつものについては、多様性を確保するため何らかの方法で初期の定着率を高める必要がある。このため、後述するように、1年生ないし2年生の複数(3本~5本)の実生苗を1単位として養成(ポット苗)して植栽する実生群植栽法を開発した。試験的にハルニレで試した結果では、前述のようにきわめて良い成績を示している。

また、中量級のものには、ナナカマド、コリンゴ、アキグミのように重量級のものと同等の成績を示すものがあり、これらについては、播種による導入が可能であり、かつ、望ましいと判断できる。しかし、定着率がきわめて悪いものがある。この原因には2つ考えられ、キハダやアカエゾマツ、エゾマツのように、1年目に発芽しても、軽量級のものと同様実

生が小さく、環境圧によって消失しやすいものがある。

一方、中量級のものには、マユミやサワシバ、ヤチダモのように、播種後1年目では発芽しない休眠性を持つ種類がある。このような休眠性のある樹種を播種によって導入すると、これらが発芽する以前に草本等が発生し、初期段階での競争に破れる可能性が高まる。以上のような原因で播種による初期の導入成績の悪いものについては、軽量級のものと同様、実生群植栽法で導入する必要がある。

a) 実生群植栽法

中量級の一部と軽量級のタネをもつものについては、直接の播種は困難であり、複数(3本~5本)の実生(1年生ないし2年生の苗)を1つのポットで発芽させて植栽する「実生群植栽法」の開発を開始している。この方法は、播種と苗木植栽の中間的方法であり、両者の長所を取り入れ、かつ、欠点を取り除くものである。

つまり、発芽直後の不安定な時期を人為的に保護し、また、一般の苗木のように長時間をかけず(1年生ないし2年生)に複数(3本~5本)を1箇所に群として植栽することによって、環境圧に対抗させるものである。このことにより、1年ないし2年で苗木の生産が可能であり、かつ、播種より確実に軽量級タネのものを導入できる可能性が高まる。

b) 碎石マルチング

生態学的混播法による自然林の再生に当たって、これまでの試験から最も問題と考えられる点は、発芽当初の草本との競合と乾燥枯死である。

生態学的混播法では、当初裸地状態のところ播種や実生群による導入を行うが、草本との競合とは、導入した樹木がまだ十分に成長していない2年後、3年後の時期に、草本が繁茂して樹木が被圧枯死する事である。したがって、草本の繁茂をもたらす肥沃な土の客土を避け、有機物や外来種のタネを含まない現場の心土や残土など利用することが必要である。このような条件では、草本の侵入と成長が緩やかであり、導入した木本と競合せず、逆に、地表をゆっくりと這うように草本が被覆することにより、地表の乾燥を防いで木本の成長を助けるような共生状態となる。

一方、草本の侵入も困難な条件は、木本の成長にも厳しい条件である。つまり、有機物を含まない裸地状態の表土は、直射日光が照りつけ、また、強風が吹き付けるオープンスペースであり、極めて乾燥し易い条件である。また同時に、傾斜地(堤防や道路法面)では、降雨に伴う表面侵食も発生しやすく、

堤防や道路法面の構造に問題とならない程度でも、発芽した小さな実生が洗掘されたり、逆に、埋没したりする。

以上のような問題に対処する方法として、碎石による表面の被覆(厚さ10cm程度)が有効な対策と考えられる。碎石被覆の効果を列記すると、以下のよう4つに大別できる。

①表面侵食の防止

- ・水による表面侵食を防止して、土木構造物を保全し、また、実生の洗掘や埋没を防止できる。
- ・凍結融解による根上がりを防止し、融雪後の倒伏や乾燥枯死を防止できる。

②乾燥防止

- ・直射日光が遮断され、タネや若い根が存在する土壌表層部の地温上昇と乾燥を防止できる。
- ・土壌表層部への風の吹き付けが遮断され、土壌表層部の乾燥が防止できる。
- ・夜間は外気によって碎石がいち早く冷却され、地中からの水蒸気が凝結してタネや根に水分を供給する。

③外来草本の排除

- ・被覆した碎石によって、土壌中の埋土種子(外来雑草)の発芽・定着を阻害し、導入木本の被圧枯死を防げる。

④在来種の侵入促進

- ・表面に碎石の凸凹ができ、周辺の在来種のタネの自然散布により、自然侵入の可能性が高まる。

これまでの試験では、釧路川を除き、播種地点に局部的(直径15cm程度の範囲)に碎石を被覆した。しかし、上記のような効果が期待できることから、今後は、対象地を全面的に被覆する事が必要と考えられる。

一般に、堤防や道路法面では、これまで外来種である牧草を使って、急速全面緑化を計ってきた。このことが在来種の自然侵入を阻んでいる最大の原因であるが、碎石被覆は、表面侵食の防止という牧草と同様の効果を期待できると同時に、在来種の導入と自然侵入を計れると考えられる。碎石を全面的に被覆した釧路湿原では、生態学的混播法によって軽量級の樹種であるケヤマハンノキおよびハンノキの定着が確認され、また、表面侵食の防止を図れることも実証された。

なお、傾斜地での施工では、ヤナギ埋枝工の代わりにヤナギ編柵工を施工する事で、1割までの斜面で碎石による被覆が可能であった。

6. 結論

本研究では、生態系の再生にとって不可欠な自然林の再生法として、多種類の在来種のタネの播種とヤナギ類の埋枝工を組み合わせた生態学的混播法を考案し、堤防や高水敷などの土木事業で自然林が失われたところを対象に実証試験を行った。最終的な結論を出すには、30年程度の期間が必要であるが、第一段階（五年程度）の結論として、以下の知見が得られ、また、改良の方向性を示した。

①人為的な播種では、タネの重量によって導入成績に大きな差があり、重量級のタネおよび中量級のタネの一部の播種では、定着率および成長量とも良好な成績を示した。

②軽量級のタネは、先駆樹種として大量に自然侵入するが、人為的な播種では、定着しなかった。

③成績の悪かった中量級のタネは、軽量級に近い軽いものと播種後休眠性を示すものが多かった。

④ヤナギ埋枝工は、定着率および成長量とも良好な成績を示し、実生に対する保護効果を1回目の成長期から発揮した。

⑤現在生育している実生は、種に関しても、個体に関しても自然林に近い自然選択を受けた結果と言える。すなわち、30年後に1本の樹木になることを想定している1セットの中で、導入された10種の在来種の内、4種程度生き残ったことになる。また、導入された10種は、30種程度の在来種からランダムに選択され、それぞれの種は、1セットについて、3~300粒程度のタネを含み、これらが対象地の自然選択を受けて数本の実生となっている。

⑥以上の結果から、生態学的混播法よる自然林の再生は可能であると判断したが、より自然林に近づけるため、軽量級および中量級のタネの一部の導入方法として、複数の1年生ないし2年生の苗からなるポット苗で導入する実生群植栽法と、タネや小苗の導入に有効な碎石マルチング法を提案した。

謝辞：本研究に対して2年間に亘って研究助成を賜った(財)河川環境管理財団ならびに試験に協力をいただいた関係各位に深謝の意を表する。

参考文献

- 1) ゲルディ, G., 福留脩文: 近自然河川工法, 99p., 近自然工法研究会, 1990.
- 2) Nievergelt, B.: Tiere und Pflanzen in unserer Landschaft-ein Gefüge verschiedener Raum- und Zeitdimensionen. 1991国際水辺環境フォーラム黒松内ステージ, 近自然河川工法ワークショップ資料集, pp.20-21, 1991.
- 3) 宮脇 昭, 新井洋一, 飯村優子, 大場達之, 鈴木邦夫: 自然環境論(II), 土木工学大系 3, 338p., 彰国社, 1982.
- 4) 東 三郎: 環境林をつくる. 北方林業叢書, 第55集, 205p., (社)北方林業会, 1975.
- 5) 宮脇 昭編著: 日本植生誌, 北海道. 563p., 至文堂, 1988.
- 6) 桜井善雄: 人と生きものが共存する川. 1991国際水辺環境フォーラム札幌ステージ一般公開シンポジウム資料集, pp.11-14, 1991.
- 7) リバーフロント整備センター: まちと水辺に豊かな自然を. 118p., 榊山海堂, 1990.
- 8) 東 三郎: 地表変動論. 280p., 北海道大学図書刊行会, 1979.
- 9) 岡村俊邦: 第4章 火山地域の砂防, 東 三郎編, 土木教程選書, 砂防学概論, pp.92-124, 鹿島出版会, 1991.
- 10) 岡村俊邦, 柳井清治: 噴火荒廃地における森林の成立過程に関する砂防学的研究. 新砂防, Vol. 40, No. 1, pp. 5-13, 1987.
- 11) 水辺環境林造成に関する研究会編: 水と生命をはぐくむ緑の創造. 44p., (財)北海道開発協会, 1995.
- 12) 岡村俊邦, 中村太士: 自然河川の流路変動と河川環境に関する砂防学的研究, 水利科学, 185, pp.32-53, 1989.
- 13) Egler, F. E.: Vegetation science concepts I, Initial floristic composition, a factor in old field vegetation development. *Vegetatio*, 4, pp.412-417, 1954.
- 14) 吉井厚志, 岡村俊邦, 佐藤徳人: 釧路遊水地周囲堤の在来植生導入. 開発土木研究所月報, No. 149, pp.13-22, 1994.
- 15) 森 徳典: 北方落葉広葉樹のタネ. 一取扱いと造林特性一, 139 p., 北方林業会, 1991.

(1995. 7. 10受付)

DEVELOPMENT OF ECO-MIXED SEEDING FOR RESTORATION OF NATURAL FORESTS

Toshikuni OKAMURA, Atsushi YOSHII and Hiroshi FUKUMA

We experiment on eco-mixed seeding, combined with seeding of native species and cutting of *salix spp.*, which was devised from the research of restoration processes of natural forest stands on riparian zones and volcanoes for restoration of natural forests. Judging from the first stage of the experiments on levees and major beds, this method is suitable for restoration of natural forests, and we propose that the cultured seedling groups by one pot and the macadam mulch should be combined with this method to introduce more native species.