播種工における発生期待本数の推定方法に関する研究

吉田 寛^{1,3)}・今西純一¹⁾・柴田昌三²⁾・森本幸裕¹⁾

1) 京都大学大学院地球環境学舎・学舎 Grad. Sch. of Glob. Env. Studies, Kyoto Univ.

2) 京都大学フィールド科学教育研究センター Field Sci. Educ. and Res. Center, Kyoto Univ.

3) 現：東興建設株式会社 Toko Corporation

摘要：本研究は、斜面緑化における播種工の設計において、過去に行なわれた試験施工や施工事例などの結果を参考とした経験的判断で定められている発生期待本数 (G : 本/ m^2) を、導入種の密度変化の特徴を利用して科学的に推定する手法について検討を行った。施工後初期の調査頻度が高く、比較的長期間にわたる追跡調査が行われている暖温帯地域における 16 事例の調査データをもとに導入種の密度変化を回帰分析した結果、ベキ関数によく近似した。また、ピーク時密度 (本/ m^2) を 100 とする密度相対値の変化は、実測値と同等以上の相関を示すことが確かめられ、発生期待本数を推定するための基本的な特性として有効と考えられた。各導入種のベキ関数から求められた最終調査時点 (6~14 年後) の密度相対値には 1.1~35.3% と大きな開きが認められ、この理論式から求められる施工 5 年後, 10 年後, および 20 年後の密度相対値 (D_{rn} : %) をもとにクラスター分析を行った結果、常緑広葉樹種をはじめとする植生遷移中後期種~極相種のうち重力散布種が該当すると考えられる区分(I), 重力散布種以外の遷移中後期種~極相種が該当すると考えられる区分(II), および先駆樹種の多くが該当する区分(III), の 3 区分に分類された。そこで、各区分に分類された植物を総合した 3 つの密度減少曲線をもとに、設計段階で計画する初期緑化目標の達成時点である施工 n 年後に期待される導入種の密度 (D_n : 本/ m^2) からピーク時密度の推定値 (Dep : 本/ m^2) を求め、施工事例から得られた各植物のピーク時密度 (Dop : 本/ m^2) と設計時の発生期待本数 (Gd : 本/ m^2) との比で表わされる実務的補正係数 (Kp) を考慮して発生期待本数 (G : 本/ m^2) を導く方法を提案した。

キーワード：斜面緑化, 播種工, 発生期待本数, 設計, 木本植物, 自然回復

YOSHIDA, Hiroshi, IMANISHI, Junichi, SHIBATA, Shozo and MORIMOTO, Yukihiro: **A method for predicting the required seedling density in seeding work**

Abstract: This study describes a method for predicting the required seedling density (G : plants/ m^2) based on the survival rates of woody species on engineered slopes, which had previously been predicted arbitrarily based on limited data from previous trials in warm-temperate zone. Analysis of survival rates from 16 sites where surveys were conducted at high frequency during the early phases after the seeding work, followed by continuous surveys at relatively long intervals, indicated that the survival of introduced plant species could be approximated using a power function, that the function provided a better fit for relative density than for absolute density, and that relative density could be used to predict required seedling density (G). The estimated relative density after n years (D_{rn} : %), which starts at 100% immediately after germination, varied widely (from 1.1% to 35.3% after approximately 6 to 14 years). However, cluster analysis using predicted D_{rn} values for 5, 10, and 20 years after seeding showed that changes in survival rates could be classified into three main groups: category I, barochorous species in the mid-to-late and climax successional stages, such as evergreen trees; category II, other species in mid-to-late and climax successional stages; and category III, mostly pioneer species. Based on these findings, a method to estimate expected seedling density was proposed. This method estimates the peak density of seedlings (Dep : plants/ m^2) from an objective density after n years (D_n : plants/ m^2) using one of the power functions derived from theoretical values for all species in a given category, then estimates required seedling density (G) by applying an empirically derived correction coefficient (Kp), which is the ratio of the observed peak density (Dop : plants/ m^2) to the designed required seedling density (Gd : plants/ m^2) based on the results of the case studies.

Key words: slope revegetation, seeding work, required seedling density, planning, woody plant, nature restoration

1. はじめに

厚層基材吹付工²³⁾に代表される播種工の設計において、発

生期待本数 (G : 本/ m^2) の設定は初期緑化目標^{23,24)}に定めた植物群落を形成させる上で重要な設計項目である。発生期待本数とは、目標群落を成立させるのに必要とされる $1 m^2$ 当

たりの発生本数で、播種後1年程度の間に地表上に芽を出す個体の総数を指し、被圧等により途中で枯損する数は含まれるが¹⁹⁾、施工時期による発芽率の低下や施工方法などによる損失量は含まない値である²²⁾。発生期待本数は、希望発芽本数^{16,17)}、希望発生本数¹⁸⁾、成立期待本数²³⁾などとも称されるが、すべて同義である。

播種工の設計では、導入種ごとに発生期待本数 (G) を設定し、これをもとに種子の基礎数値(ここでは発芽率、純度、および1g当たりの単位粒数を指す)と、施工対象となる斜面の諸条件を考慮した補正を行い、単位面積 (1m²)、あるいは単位容積 (植生基材1m³) 当たりの播種量を算出する手法が用いられている。播種量の算出方法は、急速緑化方式²⁶⁾の時代から早期樹林化方式³³⁾の時代にかけて改良が加えられながら今日に至っているが、播種工において発生期待本数が緑化目標に設定した初期植物群落を形成させる上で最も重要な設計項目であることは今も変わりはない。

播種量の算出方法は、外来草本類を用いた急速緑化の普及期^{38,40)}には、種子の基礎数値のみを考慮して播種量を算出する式(1)が用いられていた^{10,16,17)}。

$$W = \frac{G}{S \cdot (P/100) \cdot (B/100)} \quad (1)$$

ここに、 W : 播種量 (g/m²)、 G : 発生期待本数 (本/m²)、 S : 単位粒数 (粒/g)、 P : 純度 (%)、 B : 発芽率 (%)。

その後、早期樹林化方式によるマメ科低木林形成の普及期^{38,40)}には、木本類を導入する場合に大きく影響する施工時期や立地条件を考慮した補正を行って播種量を算出する式(2)に修正された¹⁸⁾。

$$W = \frac{G}{S \cdot (P/100) \cdot (B/100)} \cdot K \quad (2)$$

ここに、 K : 施工時期などによる補正值 (1.0~1.1を目安とする)。

式(1)および式(2)は、いずれも使用植物の種類に関係なく出芽可能覆土厚 (種子が出芽可能な深さで、発芽深ともいう) を2cmと仮定し、造成する生育基盤2cm厚当たりの播種量を算出する手法である。

斜面緑化において木本植物の導入が一般的となり、緑化用外来牧草類²⁵⁾やマメ科低木類以外の植物が用いられつつある、自生種を用いた自然回復緑化の発展途上期^{38,40)}に位置づけられる現在では、さらに植物ごとの出芽可能覆土厚を考慮した吹付厚に対する各工法の補正を行い、設計吹付厚当たりの播種量を算出する式(3)が広く用いられている^{15,19,27,34,42)}。

$$W = \frac{G}{S \cdot (P/100) \cdot (B/100) \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3} \quad (3)$$

ここに、 K_1 : 吹付厚 t (cm) に対する各工法の補正值 (工法ごとに種子の出芽可能覆土厚 d (cm) を確認して定める。 $K_1 = d/t$ で表される)、 K_2 : 立地条件に対する各工法の補正值 (0.7~1.0を目安とする)、 K_3 : 施工時期の補正值 (草本植物は0.7~0.9、木本植物は0.5~0.7を目安とする)。なお、夾雑物が混在した状態の種子を使用する場合には、純度 (P) を除いて算出する^{15,27,34)}。

播種工の設計では、一般的に発生期待本数 (G) は過去に実施した試験施工や施工事例の結果などを踏まえた設計者の経験によって設定される。このほか、技術書等に記載されている発生期待本数の目安^{19,27,34,42)}なども参考にされることが多い。しかし、こうした目安の多くも経験的に定められたもので明確な根拠は示されていない。このように、播種工の設計で定められる発生期待本数の基本的な設計根拠は極めて不明確なのが実状となっている。

斜面緑化施工後の植生遷移を速やかに進行させるためには、種子配合の設計時に施工後の植生遷移までを考慮した適正な発生期待本数 (G) を設定する必要がある^{36,37)}。最近では、2005年6月に「特定外来生物による生態系等に係る被害の防止に関する法律 (外来生物法)」が施行されて以降、緑化植物の取扱い²¹⁾や法面の自然回復緑化²⁴⁾に関する関心が高まってきている。生態系への影響が懸念されている緑化用外来牧草類に依存しない斜面緑化を普及させていく上でも、発生期待本数を経験に頼ることなく設定することができる手法の確立が急務となっている。

こうした実状に鑑み、本研究は播種工の設計で設定する発生期待本数 (G) を、これまでの経験則によるのではなく、科学的根拠に基づいて推定する方法を確立することを目的とする。

2. 研究方法

発生期待本数 (G) の設定方法に関しては、これまでの研究により導入種の密度変化の特徴をもとに推定する手法の可能性が示唆されている³⁶⁾。この場合、発生期待本数が導入種どうしの被圧等により途中で枯損する個体を含む概念であることから、施工後初期の追跡調査頻度が高く、ピーク時密度 (施工後の追跡調査時における成立本数の最大値のことをいう)³⁶⁾に近いと考えられるデータが明らかで、さらに自然間引きによる密度の減少がほぼ一定となるまでの中長期間にわたる定期的な追跡調査データが蓄積されていないと、信頼性の高い発生期待本数を推定することは難しい。

本研究では、このような条件を満足する有機質系厚層基材吹付工²³⁾の施工事例の中から、暖温帯地域における16事例 (常緑広葉樹林の形成: 10事例、落葉広葉樹林の形成: 3事例、および常緑・落葉広葉樹混交林の形成: 3事例)^{36,39,41)}の最新調査データを用いた。これらの事例はすべて切土斜面で施工を行なったもので、いずれも施工時期は4~5月である。施工事例の概要を表-1に、施工後の植生推移の概要を表-2に示す。

これらの施工事例で導入した植物の密度変化を回帰分析することにより、施工後一定期間が経過した時点の理論値を求め、得られた推定値をクラスター分析することにより密度変化の特徴を分類し、この分類された各区分ごとの植物の理論値を総合して得られる密度減少曲線をもとに発生期待本数を推定する手法の提案を試みる。

表-1 本研究で用いた施工事例

Table 1 List of revegetation studies discussed in the present paper.

事例	施工場所	施工年月	地質	標高	勾配	方位	吹付厚	使用植物
常緑-1	三重県南牟婁郡御浜町	1989.4.	砂岩・頁岩	150 m	1 : 1.0	W	6 cm	トウネズミモチ (<i>Ligustrum lucidum</i> Ait.) ・ シャリンバイ (<i>Rhaphiolepis umbellata</i> Makino) ・ センダン (<i>Melia azedarach</i> var. <i>japonica</i> Makino) ・ ヤマハゼ (<i>Rhus sylvestris</i> Sieb. et. Zucc.) ・ スルデ (<i>Rhus javanica</i> L.) ・ コマツナギ (日本産) (<i>Indigofera pseudo-tinctoria</i> Matsum.)
常緑-2	三重県南牟婁郡御浜町	1989.4.	砂岩・頁岩	150 m	1 : 1.0	W	6 cm	トウネズミモチ・シャリンバイ・センダン・ヤマハゼ・スルデ・コマツナギ (日本産)
常緑-3	三重県南牟婁郡御浜町	1989.4.	砂岩・頁岩	150 m	1 : 1.0	W	2 cm	トウネズミモチ・ヤマハゼ・スルデ・ヤマハンノキ (<i>Alnus hirsuta</i> var. <i>sibirica</i> (Fischer) C.K.Sohn.) ・ ヤシヤブシ (<i>Alnus firma</i> Sieb. et. Zucc.) ・ コマツナギ (日本産)
常緑-4	三重県南牟婁郡御浜町	1989.4.	砂岩・頁岩	150 m	1 : 1.0	W	2 cm	トウネズミモチ・ヤマハゼ・スルデ・ヤマハンノキ・ヤシヤブシ・コマツナギ (日本産)
常緑-5	三重県南牟婁郡御浜町	1993.5.	砂岩・頁岩	150 m	1 : 1.0	W	5 cm	シラカシ (<i>Quercus myrsinaefolia</i> Blume) ・ ヤマハゼ・スルデ・ヤマハンノキ・ヤシヤブシ・コマツナギ (日本産) ・ ススキ (<i>Miscanthus sinensis</i> Anders.)
常緑-6	三重県南牟婁郡御浜町	1993.5.	砂岩・頁岩	150 m	1 : 1.0	W	5 cm	ヤブツバキ (<i>Camellia japonica</i> L.) ・ サザンカ (<i>Camellia sasanqua</i> Thunb.) ・ シラカシ・チャノキ (<i>Thea sinensis</i> L.) ・ コマツナギ (日本産) ・ ノシバ (<i>Zoysia japonica</i> Steud.)
常緑-7	佐賀県唐津市	1992.5.	花崗岩	260 m	1 : 0.8	NE	5 cm	イボタノキ (<i>Ligustrum obtusifolium</i> Sieb. et Zucc.) ・ シャリンバイ・コマツナギ (中国産) (<i>Indigofera</i> spp.) ・ ススキ
常緑-8	佐賀県唐津市	1992.5.	花崗岩	260 m	1 : 0.8	NE	5 cm	イボタノキ・コマツナギ (中国産) ・ ススキ
常緑-9	佐賀県唐津市	1992.5.	花崗岩	260 m	1 : 0.8	NE	5 cm	シャリンバイ・コマツナギ (中国産) ・ ススキ
常緑-10	佐賀県唐津市	1992.5.	花崗岩	260 m	1 : 0.8	NE	5 cm	ヤブツバキ・サザンカ・コマツナギ (中国産) ・ ススキ
落葉-1	三重県南牟婁郡御浜町	1993.5.	砂岩・頁岩	150 m	1 : 1.0	W	5 cm	ヤマハゼ・ヤマモミジ (<i>Acer palmatum</i> var. <i>matsumurae</i> Makino) ・ ガマズミ (<i>Viburnum dilatatum</i> Thunb.) ・ ムクゲ (<i>Hibiscus syriacus</i> L.) ・ アキグミ (<i>Elaeagnus umbellata</i> Thunb.) ・ ヤマハギ (<i>Lespedeza bicolor</i> var. <i>japonica</i> Nakai) ・ コマツナギ (日本産)
落葉-2	三重県南牟婁郡御浜町	1996.5.	砂岩・頁岩	150 m	1 : 1.2	W	5 cm	アラカシ (<i>Quercus glauca</i> Thunb.) ・ ヤマモミ (<i>Myrica rubra</i> Sieb. et Zucc.) ・ ヤマザクラ (<i>Prunus jamasakura</i> Sieb. et Koidz.) ・ ヤマモミジ・ノイバラ (<i>Rosa multiflora</i> Thunb.) ・ コマツナギ (日本産)
落葉-3	佐賀県唐津市	1992.5.	花崗岩	260 m	1 : 0.8	NE	5 cm	ヤマハギ・イタチハギ (<i>Amorpha fruticosa</i> L.) ・ コマツナギ (中国産) ・ ススキ・トールファースク (<i>Festuca arundinacea</i> Scherb.) ・ クリーピングレツドフエスク (<i>Festuca rubra</i> L.)
混交-1	三重県南牟婁郡御浜町	1996.5.	砂岩・頁岩	150 m	1 : 1.2	W	5 cm	アラカシ・ヤマザクラ・ヤマモミジ・ヤマブキ (<i>Kerria japonica</i> DC.) ・ サルスベリ (<i>Lagerstroemia indica</i> L.) ・ ユリノキ (<i>Liriodendron tulipifera</i> L.) ・ フヨウ (<i>Hibiscus mutabilis</i> L.) ・ コマツナギ (日本産)
混交-2	三重県南牟婁郡御浜町	1996.5.	砂岩・頁岩	150 m	1 : 1.2	W	5 cm	アラカシ・アベマキ (<i>Quercus variabilis</i> Blume) ・ ヤマザクラ・イロハモミジ・オオモミジ (<i>Acer palmatum</i> var. <i>amoenum</i> Ohwi) ・ ハウチワカエデ (<i>Acer japonicum</i> Thunb.) ・ トウカエデ (<i>Acer buergerianum</i> Miq.) ・ ネグンドカエデ (<i>Acer negundo</i> Linn.) ・ コマツナギ (日本産)
混交-3	長崎県大村市	1996.2.	安山岩	200 m	1 : 1.2	W	5 cm	シャリンバイ・ネズミモチ・ヤマハゼ・イロハモミジ・アキグミ・ナツメ (<i>Zizyphus jujuba</i> var. <i>incarnis</i> Rehd.) ・ ムクゲ・フヨウ・ヤマハギ・コマツナギ (中国産) ・ ノシバ

表-2 各施工事例の植生推移の概要

Table 2 Outlines of summarized vegetation changes of each revegetation studies.

事例	経過年月	主な生育種
常緑-1	1年	センダン (C2, H0.6, D64.0)
	2年	上層: センダン (C2, H1.3, D48.0), 下層: トウネズミモチ (C4, H0.5, D22.0)
	4年1ヵ月	上層: センダン (C5, H2.0, D35.0), 中層: トウネズミモチ (C5, H1.3, D14.0), 下層: シャリンバイ (C3, H0.9, D15.0)
	6年6ヵ月	上層: トウネズミモチ (C5, H1.8, D14.0), 下層: シャリンバイ (C3, H1.2, D15.0)
	9年7ヵ月	シャリンバイ (C4, H2.1, D13.0), トウネズミモチ (C3, H2.2, D5.0)
常緑-2	13年7ヵ月	シャリンバイ (C5, H3.0, D33.5), トウネズミモチ (C3, H3.6, D0.3)
	5ヵ月	コマツナギ (C3, H0.3, D35.0)
	2年5ヵ月	コマツナギ (C5, H1.3, D5.0)
	3年5ヵ月	上層: センダン (C5, H3.1, D1.5), 下層: トウネズミモチ (C5, H1.7, D9.0)
	9年7ヵ月	上層: センダン (C3, H3.4, D1.3), 下層: シャリンバイ (C4, H1.3, D11.8), トウネズミモチ (C4, H2.3, D4.5)
常緑-3	13年7ヵ月	上層: センダン (C3, H4.0, D1.0), ヤマハゼ (C2, H3.5, D0.3), 下層: シャリンバイ (C4, H3.0, D28.3), トウネズミモチ (C3, H3.6, D7.5)
	5ヵ月	コマツナギ (C5, H0.4, D84.0)
	1年6ヵ月	トウネズミモチ (C3, H0.4, D71.0), コマツナギ (C3, H0.9, D25.0), ヤマハンノキ, ヤシヤブシ (C2, H1.3, D1.0), ヤマハゼ (C2, H1.0, D1.0)
	5年7ヵ月	上層: ヤマハンノキ (C3, H4.6, D0.1), ヤシヤブシ (C3, H5.6, D0.8), ヤマハゼ (C3, H3.3, D1.0), 下層: トウネズミモチ (C5, H2.5, D45.3)
	13年7ヵ月	上層: ヤマハゼ (C4, H7.2, D1.3), ヤシヤブシ (C3, H6.8, D0.1), 下層: トウネズミモチ (C5, H3.4, D49.0)
常緑-4	1年	オーチャードグラス (C5, H0.2, D未測定), コマツナギ (C4, H0.4, D71.0)
	2年	コマツナギ (C5, H0.9, D41.0)
	4年1ヵ月	コマツナギ (C5, H1.4, D11.0)
	6年6ヵ月	トウネズミモチ (C5, H2.3, D18.0)
	9年7ヵ月	上層: トウネズミモチ (C5, H3.1, D17.0), 下層: ヤマハゼ (C2, H2.6, D0.5), コマツナギ (C2, H1.9, D0.8)
常緑-5	13年7ヵ月	トウネズミモチ (C5, H3.9, D15.3), ヤマハゼ (C2, H5.3, D0.8)
	4ヵ月	コマツナギ (C5, H0.4, D80.0)
	5年6ヵ月	コマツナギ (C5, H1.3, D4.3)
	6年6ヵ月	シラカシ (C4, H1.9, D11.3), コマツナギ (C3, H1.7, D2.8)
	9年6ヵ月	シラカシ (C5, H3.6, D13.0)
常緑-6	3ヵ月	ノシバ (C4, H0.1, D136.0)
	1年1ヵ月	コマツナギ (C5, H0.7, D23.0)
	4年5ヵ月	シラカシ (C3, H0.7, D11.0)
	9年6ヵ月	上層: シラカシ (C5, H3.2, D9.8), 下層: ヤブツバキ (C4, H1.4, D5.3), サザンカ (C3, H0.7, D1.8), チャノキ (C2, H0.6, D4.5)
常緑-7	6ヵ月	ススキ (C3-4, H0.5, D107.3), 中国産コマツナギ (C4, H0.8, D29.7)
	1年4ヵ月	中国産コマツナギ (C5, H1.9, D21.7)
	3年	上層: 中国産コマツナギ (C5, H2.2, D9.3), 下層: イボタノキ (C5, H0.4, D62.7), シャリンバイ (C2, H0.2, D10.3)
	8年11ヵ月	上層: 中国産コマツナギ (C3-5, H3.2, D2.0), 下層: イボタノキ (C5, H1.0, D14.8), シャリンバイ (C2, H0.6, D2.8)
常緑-8	6ヵ月	ススキ (C3, H0.3, D59.7), 中国産コマツナギ (C4-5, H0.8, D36.7)
	1年4ヵ月	中国産コマツナギ (C5, H1.8, D29.3)
	3年	上層: 中国産コマツナギ (C5, H2.2, D9.7), 下層: イボタノキ (C5, H0.6, D76.7)
	8年11ヵ月	上層: 中国産コマツナギ (C5, H3.2, D1.6), 下層: イボタノキ (C5, H1.0, D12.9)
常緑-9	6ヵ月	ススキ (C2-3, H0.3, D52.0), 中国産コマツナギ (C1-5, H0.7, D21.0)
	1年4ヵ月	中国産コマツナギ (C2-5, H1.7, D16.7)
	3年	上層: 中国産コマツナギ (C5, H2.0, D7.3), 下層: シャリンバイ (C3-5, H0.3, D117.3)
	8年11ヵ月	上層: 中国産コマツナギ (C4-5, H3.1, D2.7), 下層: シャリンバイ (C2-3, H0.9, D12.9)
常緑-10	6ヵ月	ススキ (C2-4, H0.4, D74.3), 中国産コマツナギ (C3-4, H0.7, D31.0)
	1年4ヵ月	中国産コマツナギ (C5, H1.7, D23.7)
	3年	上層: 中国産コマツナギ (C5, H1.5, D15.7), 下層: ヤブツバキ (C3, H0.2, D15.0), サザンカ (C+2, H0.2, D1.7)
	8年11ヵ月	上層: 中国産コマツナギ (C5, H3.0, D4.2), 下層: ヤブツバキ (C2-5, H0.7, D12.8)
落葉-1	4ヵ月	ヤマハゼ (C4, H0.2, D59.0), コマツナギ (C3, H0.3, D9.0)
	1年5ヵ月	ヤマハゼ (C5, H1.1, D32.0), コマツナギ (C5, H1.0, D12.0), ムクゲ (C4, H0.4, D13.0)
	2年5ヵ月	上層: ヤマハゼ (C5, H1.9, D11.8), 下層: ムクゲ (C2, H0.5, D8.0), ヤマモミジ (C2, H0.9, D2.5), ガマズミ (C2, H0.1, D1.8), ヤマハギ (C2, H0.4, D24.8), コマツナギ (C2, H1.2, D3.0)
	9年6ヵ月	上層: ヤマハゼ (C5, H5.7, D12.3), 下層: ヤマモミジ (C4, H1.7, D5.5)
落葉-2	1年1ヵ月	ヤマザクラ (C3, H0.2, D38.3), ヤマモミジ (C3, H0.1, D62.0), ノイバラ (C2, H0.2, D17.3), ヤマモモ (C2, H0.1, D1.8)
	4年5ヵ月	上層: ヤマザクラ (C3, H2.2, D6.3), 下層: ヤマモミジ (C3, H1.1, D14.3), ノイバラ (C3, H1.2, D5.8), アラカシ (C2, H1.5, D1.1), ヤマモモ (C2, H1.6, D5.3), コマツナギ (C2, H1.5, D0.3)
	6年6ヵ月	上層: ヤマザクラ (C2, H3.0, D7.3), 下層: ヤマモミジ (C4, H1.6, D13.5), ヤマモモ (C3, H2.1, D3.8), ノイバラ (C3, H2.1, D3.8)
落葉-3	2ヵ月	トールフェスク (C3, H0.2, D31.0), クリーピングレッドフェスク (C3, H0.1, D46.7)
	1年4ヵ月	中国産コマツナギ (C5, H1.6, D21.0), ヤマハギ (C1-2, H1.3, D4.3)
	3年	中国産コマツナギ (C5, H2.1, D14.0)
	8年11ヵ月	中国産コマツナギ (C5, H2.6, D4.8)
混交-1	1年1ヵ月	フヨウ (C5, H0.6, D41.5), ヤマブキ (C3, H0.1, D28.5), ヤマザクラ (C2, H0.1, D4.5), ヤマモミジ (C2, H0.1, D20.0), ユリノキ (C2, H0.1, D11.3)
	6年6ヵ月	上層: フヨウ (C4, H1.8, D2.5), 下層: ヤマブキ (C3, H1.5, D6.8), ヤマモミジ (C2, H1.1, D1.8)
混交-2	1年1ヵ月	ヤマザクラ (C3, H0.1, D17.3), ネグンドカエデ (C3, H0.8, D30.3), イロハモミジ (C2, H0.1, D53.0)
	3年5ヵ月	上層: ヤマザクラ (C3, H1.6, D2.3), アベマキ (C3, H2.2, D1.0), 下層: イロハモミジ (C3, H0.6, D16.3), トウカエデ (C2, H1.1, D2.3), ネグンドカエデ (C2, H1.6, D6.8)
	6年6ヵ月	上層をアベマキ (C3, H4.6, D0.8), 下層をイロハモミジ (C3, H1.2, D2.5), ヤマザクラ (C2, H2.5, D5.3), トウカエデ (C2, H1.8, D3.8), ネグンドカエデ (C2, H1.9, D0.2)
混交-3	1年4ヵ月	ノシバ (C5, H0.1, D未測定), ヤマハギ (C4, H1.0, D9.0), コマツナギ (C3, H1.5, D1.1)
	3年1ヵ月	上層: アキギリ (C3-4, H2.1, D8.0), ヤマハギ (C3-4, H1.6, D1.9), コマツナギ (C3-4, H2.3, D1.1), イロハモミジ (C3-4, H0.7, D2.0), 下層: シャリンバイ (C3-4, H0.5, D18.4)
	6年2ヵ月	上層: ヤマハゼ (C2-4, H5.0, D0.6), 中層: イロハモミジ (C2-4, H2.0, D1.1), コマツナギ (C2-3, H2.9, D0.6), アキギリ (C+3, H3.2, D0.1), 下層: シャリンバイ (C4-5, H1.5, D11.7), ネズミモチ (C1-2, H1.5, D0.6)

C: 被度 (Braun-Blanquet), H: 平均樹高 (m), D: 密度 (本/m²)C: coverage (Braun-Blanquet), H: height growth (m), D: density (plants/m²)

3. 結果と考察

3.1 導入種の密度変化の特徴

一般に、高密度の群落では、密度効果により小さい個体から自然に間引かれて立木密度が減少していく³²⁾。自然間引き型の森林では、平均個体重と密度の関係は両対数グラフで直線関係になり、その傾きは $-3/2$ であることが知られており（自然間引きの $3/2$ 乗則）^{8,30,32)}、林業では最多密度曲線として広く応用されている³¹⁾。

この特性は、播種工で導入した木本植物にも該当すると考えられることから、 x 軸に密度、 y 軸に経過年数において、導入した 33 種の木本植物（常緑広葉樹 9 種、落葉広葉樹 24

種）についてピーク時密度以降の密度変化の実測値をベキ関数にあてはめたところ、回帰変動と誤差変動の分散分析で $p < 0.01$ の植物は 69.7% (23 種)、 $p < 0.05$ の植物は 81.8% (27 種) で、よく近似することが確認された。

しかし、導入する植物の組み合わせや発生期待本数は各施工事例ごとに異なるため、密度の実測値は各植物特有の密度変化の特徴を表すデータとはなり得ない。そこで、実測値をピーク時密度を 100 とした密度相対値に変換した上でベキ関数に当てはめたところ、 $p < 0.01$ の植物は 75.8% (25 種)、 $p < 0.05$ の植物は 87.9% (29 種) で、実測値よりも相対値の方がより近似し（表-3）、密度相対値は各植物の密度変化の特徴を表す手段として有効と考えられた。

表-3 密度変化のベキ関数へのあてはめ結果

Table 3 Results of fitting a power function to the changes in density of each woody species.

種名	事例数	ピーク時密度 (本/m ²)	実測値			相対値		
			回帰式	R^2	p 値	回帰式	R^2	p 値
ヤマモモ	1	12	$y = 10.4x^{-0.62}$	0.63	0.0191 *	$y = 84.9x^{-0.62}$	0.63	0.0191 *
ヤシヤブシ	1	8	$y = 4.2x^{-1.26}$	0.81	0.0000 **	$y = 52.4x^{-1.26}$	0.81	0.0000 **
ヤマハンノキ	1	5	$y = 1.1x^{-0.81}$	0.74	0.0000 **	$y = 22.7x^{-0.81}$	0.74	0.0000 **
アベマキ	1	3	$y = 1.4x^{-0.11}$	0.10	0.3740	$y = 52.0x^{-0.24}$	0.52	0.0437 *
アラカシ	3	3~4	$y = 1.3x^{-0.43}$	0.54	0.0002 **	$y = 41.3x^{-0.42}$	0.52	0.0003 **
シラカシ	2	11~33	$y = 19.7x^{-0.55}$	0.34	0.0109 *	$y = 90.3x^{-0.48}$	0.57	0.0008 **
※ユリノキ	1	11	$y = 1.4x^{-0.51}$	0.62	0.0071 **	$y = 159.2x^{-3.68}$	0.80	0.1032
ヤマブキ	1	29	$y = 20.8x^{-0.55}$	0.30	0.1638	$y = 93.0x^{-0.61}$	0.80	0.0067 **
ノイバラ	1	17	$y = 17.3x^{-0.88}$	0.83	0.0017 **	$y = 100.0x^{-0.88}$	0.83	0.0017 **
ヤマザクラ	3	5~39	$y = 25.1x^{-1.64}$	0.47	0.0016 **	$y = 82.2x^{-1.36}$	0.45	0.0023 **
シャリンバイ	5	31~170	$y = 36.4x^{-0.56}$	0.36	0.0000 **	$y = 62.2x^{-0.56}$	0.42	0.0000 **
ヤマハギ	3	9~26	$y = 7.8x^{-0.73}$	0.20	0.0473 *	$y = 46.0x^{-0.87}$	0.30	0.0150 *
コマツナギ (日本産)	10	2~112	$y = 12.1x^{-1.16}$	0.65	0.0000 **	$y = 27.7x^{-1.07}$	0.73	0.0000 **
コマツナギ (中国産)	6	40~105	$y = 15.7x^{-0.83}$	0.55	0.0000 **	$y = 48.9x^{-0.69}$	0.68	0.0000 **
センダン	2	59~64	$y = 36.6x^{-1.54}$	0.56	0.0000 **	$y = 59.8x^{-1.54}$	0.57	0.0000 **
ヌルデ	4	6~16	$y = 2.5x^{-0.74}$	0.65	0.0000 **	$y = 24.9x^{-0.79}$	0.75	0.0000 **
ヤマハゼ	6	9~65	$y = 4.7x^{-0.89}$	0.41	0.0000 **	$y = 28.1x^{-0.90}$	0.63	0.0000 **
※トウカエデ	1	12	$y = 5.7x^{-0.31}$	0.09	0.5091	$y = 48.1x^{-0.31}$	0.09	0.5091
※ハウチワカエデ	1	2	$y = 6.1x^{-1.87}$	0.98	0.0836	$y = 339.5x^{-1.87}$	0.98	0.0836
イロハモミジ	2	3~53	$y = 46.1x^{-1.98}$	0.52	0.0051 **	$y = 118.7x^{-1.30}$	0.52	0.0053 **
ヤマモミジ	3	17~62	$y = 23.9x^{-0.94}$	0.44	0.0002 **	$y = 72.5x^{-0.76}$	0.45	0.0002 **
※オオモミジ	1	4	$y = 42.3x^{-2.65}$	0.61	0.2179	$y = 1114.0x^{-2.65}$	0.61	0.2179
ネグンドカエデ	1	30	$y = 33.5x^{-1.08}$	0.94	0.0001 **	$y = 110.6x^{-1.08}$	0.94	0.0001 **
ムクゲ	2	3~103	$y = 8.2x^{-0.64}$	0.53	0.0002 **	$y = 20.7x^{-0.56}$	0.32	0.0080 **
フヨウ	2	29~63	$y = 19.7x^{-1.05}$	0.42	0.0037 **	$y = 40.7x^{-0.98}$	0.48	0.0015 **
チャノキ	1	19	$y = 11.8x^{-0.57}$	0.85	0.0000 **	$y = 62.1x^{-0.57}$	0.85	0.0000 **
ヤブツバキ	2	9~36	$y = 13.4x^{-0.42}$	0.20	0.0524	$y = 74.0x^{-0.33}$	0.43	0.0023 **
サザンカ	2	8~17	$y = 5.3x^{-0.95}$	0.71	0.0000 **	$y = 37.6x^{-0.88}$	0.56	0.0002 **
※アキグミ	1	8	$y = 4480.9x^{-5.76}$	0.99	0.0068 **	$y = 55516.0x^{-5.75}$	0.99	0.0067 **
サルスベリ	1	3	$y = 1.4x^{-0.51}$	0.62	0.0071 **	$y = 42.7x^{-0.52}$	0.75	0.0024 **
トウネズミモチ	4	23~108	$y = 27.4x^{-0.25}$	0.11	0.0089 **	$y = 65.7x^{-0.26}$	0.29	0.0000 **
イボタノキ	2	61~81	$y = 72.7x^{-0.73}$	0.65	0.0001 **	$y = 108.0x^{-0.75}$	0.66	0.0001 **
ガマズミ	1	28	$y = 6.7x^{-0.83}$	0.45	0.0330 *	$y = 24.1x^{-0.83}$	0.45	0.0330 *

x : 緑化施工後の経過年数 (年), y : 密度 (本/m²) または密度相対値 (%)

※研究対象から除外した種, **($p < 0.01$), *($p < 0.05$)

x : passed years after work, y : absolute density (plants/m²) or relative density (%)

※ excluded species from the present paper

なお、施工事例で使用した植物のうち、約半分の45.5%にあたる15種は1事例のみ、24.2%にあたる8種は2事例でしか使用されていない。本来であれば、さらに多くの施工事例の調査データを集めた上で解析する必要があるということはいまでもない。しかし、施工後初期の調査頻度が高くピーク時密度に近いと考えられる値が明らかで、その後も長期間にわたる定期的な追跡調査が続けられている事例は、既往報告をながめてもまだ限られているのが実状である³⁸⁾。したがって、本研究では回帰変動と誤差変動の分散分析で有意差が認められなかったオオモミジ、トウカエデ、ハウチワカエデ、およびユリノキと、発芽が3年後に確認されるなど明らかな異常値と判断されたアキグミを除外した計28種のデータをもとに考察する。

3.2 密度変化の特徴の分類

各植物の密度相対値の変化を比較すると、ベキ関数から求められる各施工事例の最終調査時点における理論値は、導入種によって1.1% (センダン) から35.3% (ヤブツバキ) の開きが認められた (図-1)。そこで、法面の自然回復緑化のための環境区分^{23, 24)}において、環境区分1, 環境区分2, および環境区分3に該当する施工場所における初期緑化目標群落の形成までの最大必要時間とされる20年後, 10年後, および5年後の密度相対値を各植物のベキ関数 (理論式) から算出し, この3つの理論値を用いてクラスター分析を行った。その結果, 図-2に示したデンドログラムが得られ, 密度変化の特徴は3区分に分類された。

各区分を比較すると, 常緑広葉樹種をはじめとする植生遷

図-1 28種の導入種 (表-3) の密度相対値の推移

Fig. 1 Changes in relative density (values predicted using the power functions in Table 3) of 28 woody species on engineered slopes as a function of time.

移中後期種の多くは, 密度相対値が5年後に35.2~43.6%, 10年後に約29.7~36.0%, 20年後に21.5~30.0%のように, 密度変化が比較的緩慢な区分 (I), あるいは, 5年後に18.4~34.7%, 10年後に12.5~22.7%, 20年後に7.2~14.8%のように, 密度変化がやや速い区分 (II) に分類されるのに対し, 法面等の無土地に成立しやすい乾性一次遷移系列上の先駆樹種の多くは, 5年後に5.0~19.6%, 10年後に1.7~9.9%, 20年後に0.6~6.1%のように, 施工後初期から密度が急激に減少する区分 (III) に分類される明らかな違いが認められた (図-3)。

今回の分析結果では, 植生遷移中後期種~極相種であるサザンカが先駆樹種と同じ区分 (III) に分類されているなど, 多種の植物が混生していることに起因する種間競争の影響や, データ不足に起因すると考えられる矛盾点も見受けられた。しかし, 各区分に分類された樹種の構成から考えて, 重力散布型の大型少産の種子を産する樹種が区分 (I) に, それ以外の樹種が (II) に分類されるのではないかと推測される。これらの点については, 今後も追跡調査を積み重ねることにより検証していく必要がある。

3.3 発生期待本数の推定法の提案

使用植物 (導入種) の発生期待本数 (G : 本/ m^2) は, 本来ならば樹種ごとの密度変化をもとに推定するのが望ましいといえるが, 追跡調査データの蓄積が少ない現時点においては信頼性の高い理論式が得られないことから現実的ではない。そのため, 各導入種の密度相対値の変化の特徴がベキ関数によく近似し, クラスター分析によって3区分に分類されたことから, 各区分に分類された植物を総合して得られる3つの密度減少曲線 (図-4) をもとに, 適正な発生期待本数

図-2 密度相対値 (5, 10, 20年後の理論値) のクラスター分析結果 (ウォード法) (I, II, およびIIIのグループニングの内容については図-3を参照)

Fig. 2 Dendrogram resulting from cluster analysis using the theoretical relative densities 5, 10, and 20 years after seeding (Ward's method).

(see Fig. 3 about the details of category I, II, and III)

図-3 クラスター分析 (図-2) による密度相対値の分類結果 (*印は先駆樹種)

Fig. 3 Classification of woody species based on the cluster analysis presented in Fig. 2. (asterisks show pioneer woody plants)

図-4 クラスター分析で分類された各区分 (図-3) の密度減少曲線

Fig. 4 Density reduction curve for the three classes of species revealed by the cluster analysis presented in Fig. 3.

の範囲を推定する手法を提案する。

発生期待本数の推定方法は次の3つのステップから構成される。発生期待本数の推定方法の概念を図-5に示す。

3.3.1 ステップ1

まず最初に、使用植物が該当する区分の密度減少曲線 (図-4) を用い、計画した初期緑化目標の達成時 (n 年後) までの経過年数 n を説明変数 x に代入して密度相対値 ($y = D_{rn} : \%$) を求める。クラスター分析で分類された密度減少曲線は式(4)～式(6)で表される。

$$\text{区分 (I)} : y = 64.79 x^{-0.27}, R^2 = 0.81, p < 0.01 \quad (4)$$

$$\text{区分 (II)} : y = 60.23 x^{-0.53}, R^2 = 0.80, p < 0.01 \quad (5)$$

$$\text{区分 (III)} : y = 33.83 x^{-0.89}, R^2 = 0.84, p < 0.01 \quad (6)$$

ここに、 x : 緑化施工後の経過年数 (年), y : 密度 (本/㎡)

G : 発生期待本数 (本/㎡)
required seedling density (plants/㎡)

D_{rn} : 施工 n 年後の密度相対値 (%)
estimated relative density after n years (%)

D_n : 施工 n 年後に期待する密度 (本/㎡)
objective density after n years (plants/㎡)

Dep : ピーク時密度の推定値 (本/㎡)
estimated peak density of seedling (plants/㎡)

(Gd) : 施工事例の設計時の発生期待本数 (本/㎡)
designed required seedling density (plants/㎡)

(Dop) : 施工事例の追跡調査から得られたピーク時密度 (本/㎡)
observed peak density (plants/㎡)

Kp : 実務的補正係数
empirically derived correction coefficient (plants/㎡)

図-5 発生期待本数の推定方法の概念

Fig. 5 A visual explanation of the method for predicting the required seedling density.

または密度相対値 (%)。

経過年数 n の値は、環境区分や緑化目標に応じて定められるが、使用植物の区分 (主構成種・補全種・草本種)^{23, 24)} の違いごとに分けて設定することもできる。なお、図-3 に使用植物と同じ種がない場合には、現状では同属や近縁の種など、使用植物の生育特性に近いと考えられる植物が該当する区分を便宜的に用いる。

3.3.2 ステップ 2

次に、該当する密度減少曲線から算出された密度相対値 (Drn) をもとに、初期緑化目標の達成時 (n 年後) に期待する各使用植物の 1 m^2 当たりの密度 (Dn : 本/ m^2) を満足することができるピーク時密度の推定値 (Dep : 本/ m^2) を求める (式(7))。

$$Dep = \frac{Dn}{Drn/100} \quad (7)$$

ここに、 Dep : ピーク時密度の推定値 (本/ m^2)、 Dn : 初期緑化目標の達成時 (n 年後) に期待する各使用植物の 1 m^2 当たりの密度 (本/ m^2)、 Drn : 緑化工で計画する初期緑化目標の達成時 (n 年後) の密度相対値 (%)

ピーク時密度の推定値 (Dep) は、播種量の算出式 (式(3)) に代入する種子の基礎数値 (S , P , および B) と各種補正値 (K_1 , K_2 , および K_3) が適正であり、施工後の調査頻度が多く、発生期待本数と真のピーク時密度がほぼ一致すると考えられるのであれば、理論的には発生期待本数 (G) に極めて近い値が得られる。

3.3.3 ステップ 3

しかしながら、緑化工の実際には、設計時に用いた種子の基礎数値と実際に使用した種子の品質は必ずしも一致しないほか、設定した各補正値が実際の現場の条件と合致しないケースも考えられる。また、植物の発芽自体が施工後の気象条件に大きく左右されやすいという不可避の問題がある。さらに、実際に真のピーク時密度を把握するために適切な頻度と時期に追跡調査を実施することは難しく、発芽してもすぐに枯れて消えてしまう個体や、種子休眠の影響により発芽が施工翌年以降になる個体などが存在する。したがって、各施工事例の設計時の発生期待本数 (Gd : 本/ m^2) と、追跡調査データから得られたピーク時密度 (Dop : 本/ m^2) が一致しない可能性はかなり高いと考えられる。

そのため、発生期待本数 (G) を導くためには、各施工事例の追跡調査データから得られたピーク時密度 (Dop) と設計時の発生期待本数 (Gd) の比で表される実務的補正係数 (Kp) を考慮して、ピーク時密度の推定値 (Dep) を補正する必要がある (式(8))。

$$G = \frac{Dep}{Kp} = \frac{Dn/(Drn/100)}{Kp} \quad (8)$$

$$Kp = \frac{Dop}{Gd} \quad (9)$$

ここに、 G : 発生期待本数 (本/ m^2)、 Kp : 実務的補正係数、 Gd : 施工事例の設計時の発生期待本数 (本/ m^2)、 Dop : 施工事例の追跡調査から得られたピーク時密度 (本/ m^2)。

表-4 各導入種の実務的補正係数 (Kp)

Table 4 An empirically derived correction coefficients (Kp) for each woody species.

区 分	種 名	事例数	実務的補正係数 (Kp)	単位粒数 (粒/g)
(I)	トウネズミモチ	4	0.26 ± 0.19	11.0 ~ 37.6 ^a
	ヤブツバキ	2	0.47 ± 0.49	0.8 ~ 1.7 ^a
	アベマキ	1	0.25	0.2 ~ 0.3 ^b
	シラカシ	2	0.44 ± 0.79	0.6 ~ 1.7 ^a
(II)	ヤマブキ	1	0.19	75.0 ^b
	ヤマモモ	1	0.25	3.4 ~ 11.5 ^a
	イボタノキ	2	0.70 ± 0.22	5.0 ~ 20.0 ^a
	シャリンバイ	5	0.84 ± 0.49	2.1 ~ 5.0 ^a
	チャノキ	1	0.48	0.9 ~ 1.7 ^a
	アラカシ	3	0.15 ± 0.05	0.5 ~ 3.3 ^a
	サルスベリ	1	0.01	420.0 ~ 620.0 ^a
	ヤマモミジ	3	0.33 ± 0.29	12.1 ~ 93.0 ^a
	ノイバラ	1	0.14	180.0 ^d
	* コマツナギ (中国産)	6	0.15 ± 0.08	190.0 ^c
(III)	ネグンドカエデ	1	0.43	29.5 ~ 34.5 ^a
	イロハモミジ	2	0.16 ± 0.03	65.0 ~ 100.0 ^a
	* ヤマハギ	3	0.09 ± 0.00	89.0 ~ 142.0 ^b
	ムクゲ	2	0.37 ± 0.61	60.0 ^d
	サザンカ	2	0.25 ± 0.17	1.0 ~ 3.3 ^a
	フヨウ	2	0.50 ± 0.16	300.0 ^d
	ヤマザクラ	3	0.43 ± 0.38	8.1 ~ 23.0 ^a
	* スルデ	4	0.07 ± 0.06	150.0 ^a
	ガマズミ	1	0.02	25.0 ~ 50.0 ^a
	* ヤマハンノキ	1	0.01	910.0 ~ 1,600.0 ^a
	* ヤマハゼ	6	0.16 ± 0.09	8.4 ~ 13.6 ^a
	* ヤシヤブシ	1	0.02	900.0 ^c
	* コマツナギ (日本産)	10	0.26 ± 0.10	240.0 ^c
	* センダン	2	0.62 ± 0.05	0.8 ~ 3.6 ^a

*印は法面等の無土壌地に成立しやすい乾性一次遷移系列上の先駆樹種

a: 勝田ら (1998)¹¹⁾

b: 福永 (2006)⁵⁾

c: カネコ種苗 (発行年記載なし)⁹⁾

d: 斜面樹林化技術協会 (2005, 未発表資料)²⁸⁾

asterisks show pioneer woody plants.

実務的補正係数 (Kp) の値は、追跡調査データから得られたピーク時密度 (Dop) と設計時の発生期待本数 (Gd) の差が小さいほど 1.0 に近い値となるが、今回の施工事例から得られた実務的補正係数 (Kp) は、数値が高いものでもシャリンバイ (0.84 ± 0.49) やイボタノキ (0.70 ± 0.22) のようにバラツキが大きく、多くの植物は 0.5 以下であった (表-4)。

しかし、実務的補正係数 (Kp) と種子の一般的な単位粒数を比較してみると、一般的に種子散布が長距離に及ぶ種子重が軽い特徴⁴⁾がある先駆植物、つまり単位粒数が多い導入種の方が実務的補正係数 (Kp) が低い傾向が見受けられる (表-4)。先駆樹種は、植生遷移中後期種~極相種と比較して発芽後の密度低下がかなり早いという密度変化の特徴を考えれば、サンプル数が限られる現段階において、信用に足る実務的補正係数 (Kp) が得られている樹種が少ないことはやむを得ないといえる。

3.3.4 提案方法の検証

本提案手法を用いて、区分 (II) の密度減少曲線に該当するシャリンバイを例に、施工 10 年後、および 20 年後に 1

本/m²の密度となるようにした場合に必要な発生期待本数 (G) を推定してみると、それぞれ 6.7 本/m² (実務的補正係数 (K_p) の標準偏差を考慮すると 4.2~16.0 本/m² の範囲)、および 9.6 本/m² (6.1~23.0 本/m² の範囲) と推定される。この推定値は、斜面緑化において常緑広葉樹の導入が試みられた 1989 年当時、シャリンバイの発生期待本数は 100 本/m² とかなり多く設定³⁵⁾されていたのに対し、その後の施工事例の追跡調査データ^{38, 39)}などを参考に徐々に減らされていった結果、近年では緑化目標に応じて 10~40 本/m² 程度の範囲で設計³⁾されるようになっていることから妥当といえる。

3.4 播種量の設計に関する今後の課題

今回提案した推定方法で導かれる発生期待本数 (G) の精度をさらに高めていくためには、以下の点について引き続き検討を行なっていく必要がある。

3.4.1 密度減少曲線と実務的補正係数 (K_p) の信頼性の向上

本研究で得られた 3 つの密度減少曲線と実務的補正係数 (K_p) は、16 事例という限られたデータに基づいているため、今後も継続してより多くの現場の追跡調査データを集めて統計学的な信頼性を高めていく必要がある。

また、本研究に用いた施工事例は、現在と比較して播種量が多い年代のものであることから、施工後 1~2 年程度の比較的早い時期に密度効果が現れるような高密度で発芽している。近年では、播種量をかなり抑えた施工が行なわれるようになってきているので、密度効果が現れるまでにさらに長期の年月を必要とするような初期密度が低い群落の場合には、密度変化の特徴が異なることも考えられる。こうした点についても継続して検証していくことが求められる。

3.4.2 播種量算出に用いる発芽率 (B) の検定精度の向上

実務的補正係数 (K_p) が低くなった原因のひとつとして、設計時に用いた種子の基礎数値 (S , P , B) や各種補正值 (K_1 , K_2 , K_3) が必ずしも適切ではなかったことが考えられる。これには、緑化工の設計が施工にかなり前もって行われたり、播種量の算出時に使用する基礎数値として、実際に使用する種子の測定値ではなく、指針等に記載されている目安 (平均値)^{15, 19, 27, 42)}がそのまま使用されることが多いことなどが影響していると思われる。

山採りによる採種が基本となる自生種の木本植物種子の発芽率は、従来多用されてきた緑化用外来牧草類やマメ科低木類のような栽培品と比較して採種年による発芽率の変動が大きいことに加え、採種後の調整方法や貯蔵状態によっても種子の品質は大きく変化する^{10, 29)}。しかし、多くの木本植物種子は休眠性を有していることから通常の発芽試験では正確な発芽率を検定することは難しい⁷⁾。こうした実状から考えて、施工事例の多くで、播種量の設計に用いた種子の品質 (基礎数値) と実際に工事で使用した種子の品質が異なっていた可能性は高く、中でも発芽率 (B) の違いはかなり大きかったのではないと思われる。近年では、木本植物種子の発芽率を 1 週間程度で推定できる早期発芽力検定法^{1, 2)}が実用化されており、今後はこうした新技術を緑化工の設計に積極的に

活かしていく必要がある。

3.4.3 適正な吹付厚に対する各工法の補正值 (K_i) の採用

発生期待本数 (G) から播種量を算出する場合、吹付厚に対する各工法の補正值 (K_i) には、技術書等に記載されている発芽深などの目安^{20, 42)}が参考にされることが多い。しかし、実際には適用する個々の工法により植物の出芽可能覆土厚は大きく異なり、同じ厚層基材吹付工に分類される工法でも導入種の発芽生育特性は異なることが知られている³⁶⁾。そのため、吹付厚に対する各工法の補正值 (K_i) の精度を高めるためには、各工法ごとに実際の施工機械を用いた吹付試験を実施して得られる出芽可能覆土厚をもとに補正值を設定する手法を普及させていく必要がある。

3.4.4 立地条件と施工時期の補正值 (K_2 , K_3) の推定法の確立

発生期待本数 (G) や吹付厚に対する各工法の補正值 (K_i) と同様に、経験的な判断や指針などに記載されている目安によるところが大きい立地条件に対する各工法の補正值 (K_2) と施工時期の補正值 (K_3) についても、施工事例から得られた調査データをもとに科学的に設定する手法を確立する必要がある。特に、施工時期は植生工の成績に大きな影響を与える要因であることから、適切な補正值 (K_3) を推定する手法の早急な確立が求められる。また、自然回復緑化の確実性を高めるためには、発芽後の植物の成長に大きく影響する施工地の気候条件の違い (亜熱帯、暖温帯、冷温帯、亜寒帯の違いや、日本海側の冬雨地域と太平洋側の夏雨地域の違いなど) を考慮した補正の必要性についても検討が求められる。

3.4.5 自然回復のための柔軟な積算・発注方式への転換

自生種子による自然回復緑化は、緑化用外来牧草やマメ科低木類を用いた従来の斜面緑化 (急速緑化) と比較して、種子の品質や現場の条件によって結果が左右されやすい。初期緑化目標²⁴⁾とする植物群落を確実に形成させるためには、施工前に実際に使用する種子の発芽率 (B) を検定し、さらに現場の実際の諸条件に適合する各補正值 (K_1 , K_2 , K_3) を用いて播種量を算出・照査することにより、最終的な播種量を決定するプロセスを新たに設ける必要がある。そのためには、工事受注後に播種量の設計変更等が必要になった場合でも柔軟に対処できる発注システムの構築が求められる。

また、生物多様性と外来生物法に配慮した国内産自生種を用いた自然回復緑化を普及・発展させていく上で、1993 年に導入され¹³⁾、1994 年より法面工のモルタル吹付工やコンクリート吹付工と同様に厚層基材吹付工、客土吹付工、種子吹付工も指定工種となった市場単価方式¹⁴⁾による土木工事の積算基準を見直す必要がある。

種子の採種・調整・貯蔵に手間と経費がかかる国内産自生種種子を用いた自然回復緑化を、国内に広く流通している安価な輸入種子 (外来種) を用いた従来型の斜面緑化 (急速緑化) と同様の単価¹⁵⁾で行なうことを強いられることにつながる積算方式では、施工業者の過剰な負担なくして国内産自生種を用いた緑化が実施困難なことは自明である。法面工において国内産自生種種子を用いた緑化を行う場合には市場単価方式から除外するなど、使用植物の種類や現場の諸条件が反

映される積算方式への転換が急務といえよう。

4. まとめ

斜面緑化における播種工の設計において、これまで試験施工や施工事例などの結果を参考とした経験的判断で定められてきた発生期待本数 (G : 本/ m^2) を、最多密度曲線の考え方をもとに、導入種の密度変化の特徴を利用して科学的に推定する手法の検討を行った。

施工後の調査頻度が高く、比較的長期間にわたる追跡調査が行われている施工事例 (16 事例) をもとに密度変化を回帰分析した結果、ベキ関数によく近似した。密度相対値の変化は、実測値と同等以上の相関を示したことから発生期待本数 (G) を推定するための基本的な特性として有効と考えられた。ベキ関数 (理論式) から得られる施工 5 年後, 10 年後, および 20 年後の密度相対値をもとにクラスター分析を行った結果, 常緑広葉樹種をはじめとする植生遷移中後期種～極相種の中で重力散布種が該当すると考えられる区分 (I), 重力散布種以外の遷移中後期種～極相種が該当すると考えられる区分 (II), および先駆樹種の多くが該当する区分 (III), の 3 区分に分類された。

そこで, 各区分の植物を総合した 3 つの密度減少曲線をもとに, 設計時に計画する初期緑化目標の達成時点と仮定した施工 n 年後に期待する導入種の密度 (Dn : 本/ m^2) からピーク時密度の推定値 (Dep : 本/ m^2) を求め, 施工事例から得られた各植物のピーク時密度 (Dop : 本/ m^2) と設計時の発生期待本数 (Gd : 本/ m^2) との比で表わされる実務的補正係数 (Kp) を考慮して発生期待本数 (G : 本/ m^2) を導く方法を提案した。その結果, これまでの経験則による方法と同等の値を導くことができることが確かめられた。

この方法は, 設計者に経験がなくても, 施工 n 年後に期待する密度 (Dn) をもとに密度減少曲線と実務的補正係数 (Kp) から容易に発生期待本数 (G) を導くことができる。また, 密度減少曲線は, 施工後ある程度経過した時点の密度が適正であるかどうかを判定するための指標としても利用可能なことから, 播種工の成績 (植生状況) の評価をはじめ, 施工後の植生管理にわたり幅広く活用できると思われる。

発生期待本数 (G) の推定精度をさらに高めていくためには, さらに多くの施工事例の調査データを反映させることにより統計学的な信頼性を高めていく必要がある。また, 自然回復緑化を普及していく上で大きな障害となっている問題として, 従来型の急速緑化を前提とした緑化工事と同様な積算方式 (市場単価方式) が, 自生種を用いる自然回復緑化にも適用されていることがあげられる。技術的な課題とともに, こうした積算・発注システムのあり方についても再構築が図られることにより, 自然回復緑化は, 生物多様性と外来生物法を考慮した新たな斜面緑化手法として普及・発展できると考える。

引用文献

- 1) 秋元利之・小野幸菜・吉田 寛・江刺洋司 (2005) 木本植物種子の早期発芽力検定法—後熟型休眠種子の可能性—, 道路緑化保全協会, 第 25 回道路緑化技術発表会要旨論文集, 8-9.
- 2) 長 信也・江刺洋司・吉田 寛 (2004) 木本植物種子の早期発芽力検定法, 日本緑化工学会誌 30 (1): 261-264.
- 3) 道路緑化保全協会 (2002) 環境省委託調査業務平成 13 年度管理方針検討調査, 自然公園における法面緑化基準の増補・改訂調査報告書—増補・改訂 (案)—, 205 pp.
- 4) Finegan, B. (1984) Forest succession, Nature, 312, 109-114.
- 5) 福永健司 (2006) 播種工による導入が期待できる木本植物, 斜面樹林化工法技術資料第 4 版, 斜面樹林化工法技術協会, pp. 61-71.
- 6) 古田智昭・吉田 寛 (2004) 寒冷地におけるコナラ—ミズナラ群落の形成を目標とする播種工による自然回復緑化事例, 日本緑化工学会誌 30 (2): 377-382.
- 7) ISTA (2005) International rules for seed testing edition 2005, The international seed testing association, Chapter 1 -17.
- 8) 岩坪五郎編 (1996) 森林生態学, 文永堂出版, 306 pp.
- 9) カネコ種苗 (発行年記載なし) 緑化種苗ガイド (カタログ), 69 pp.
- 10) 環境庁自然保護局監修・道路緑化保全協会技術委員会編 (1982) 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, 195 pp.
- 11) 勝田 柁・森 徳典・横山敏孝 (1998) 日本の樹木種子 (広葉樹編), 林木育種協会, 410 pp.
- 12) 経済調査会 (2006) 季刊土木施工単価'06 春号, 積算資料臨時増刊, pp. 110-119.
- 13) 建設大臣官房技術調査室監修・土木工事積算研究会編 (1993) 市場単価による積算, 建設省土木工事積算基準平成 5 年度版, pp. 45-46, 建設物価調査会.
- 14) 建設大臣官房技術調査室監修・土木工事積算研究会編 (1994) 市場単価による積算, 建設省土木工事積算基準平成 6 年度版, pp. 43-44, 建設物価調査会.
- 15) 建設省河川局砂防部監修・急傾斜地崩壊防止工事技術指針作成委員会編 (1996) 新・斜面崩壊防止工事の設計と実例—急傾斜地崩壊防止工事技術指針—, 全国砂防治水協会, 302 pp.
- 16) 日本道路協会編 (1972) のり面工と斜面安定工指針, 227 pp.
- 17) 日本道路協会編 (1979) 道路土工—のり面工・斜面安定工指針—, 309 pp.
- 18) 日本道路協会編 (1986) 道路土工—のり面工・斜面安定工指針—, 434 pp.
- 19) 日本道路協会編 (1999) 道路土工—のり面工・斜面安定工指針—, 470 pp.
- 20) 日本法面緑化技術協会 (2003) 有機質系厚層基材吹付工技術資料, 59 pp.
- 21) 日本緑化工学会 (2002) 生物多様性保全のための緑化植物の取り扱いに関する提言, 日本緑化工学会誌 27 (3): 481-491.
- 22) 日本緑化工学会編 (1990) 緑化技術用語事典, 山海堂, 268 pp.
- 23) 日本緑化工学会編 (2005) 環境緑化の事典, 朝倉書店, 484

- pp.
- 24) 日本緑化工学会斜面緑化研究部会 (2004) のり面における自然回復緑化の基本的な考え方のとりまとめ, 日本緑化工学会誌 29(4): 509-520.
- 25) 日本生態学会編 (2002) 外来種ハンドブック, 地人書館, 390 pp.
- 26) 新田伸三・小橋澄治 (1961) 法面急速緑化工法の基礎的研究 I, 造園雑誌 24(3): 47-51.
- 27) 農業土木事業協会編 (1990) のり面保護工—設計施工の手引—, 農山漁村文化協会, 306 pp.
- 28) 斜面樹林化技術協会 (2005 未発表資料) 平成 17 年度 RS 用種子データ表.
- 29) 斜面樹林化技術協会編 (2006) 斜面樹林化工法技術資料第 4 版, 71 pp.
- 30) 只木良也 (1996) 森林環境科学, 朝倉書店, 164 pp.
- 31) 東京農工大学農学部林学科編 (1978) 新版林業実務必携, 朝倉書店, 560 pp.
- 32) 堤 利夫編 (1989) 森林生態学, 朝倉書店, 166 pp.
- 33) 山寺喜成 (1986) 播種工による早期樹林化方式の提案, 緑化工技術 12(2): 25-35.
- 34) 山寺喜成・安保 昭・吉田 寛 (1993) 自然環境を再生する緑の設計—斜面緑化の基礎とモデル設計—, 農業土木事業協会, 169 pp.
- 35) 吉田 寛 (1991) 播種工による軟岩法面への常緑広葉樹の導入—トウネズミモチ・シャリンバイの導入例—, 日本緑化工学会誌 16(4): 46-53.
- 36) 吉田 寛 (2002) 厚層基材吹付工による木本植物の混播技術に関する研究, 日本緑化工学会誌 27(4): 594-604.
- 37) 吉田 寛 (2003) 植生基材吹付工の植生遷移特性に関する研究, 日本緑化工学会誌 29(2): 331-342.
- 38) 吉田 寛 (2005) 播種工による法面緑化とモニタリング手法, 日本緑化工学会誌 30(3): 532-540.
- 39) 吉田 寛・古田智昭 (2004) 切土法面における厚層基材吹付工 (斜面樹林化工法) による木本植物群落の造成事例, 日本緑化工学会誌 29(4): 482-494.
- 40) Yoshida, H. and Morimoto, Y. (2004) Historical changes of seeding works as nature restoration technologies of man-made slopes in Japan, Proceedings of the first EAFES international congress, 220-221.
- 41) 吉田 寛・森本幸裕 (2005) 法面緑化における中国産コマツナギと常緑広葉樹の混播効果に関する研究, 日本緑化工学会誌 31(2): 269-277.
- 42) 全国特定法面保護協会編 (1998) のり面保護工施工管理技術テキスト, 266 pp.

(2007. 8. 11 受理)