特集「緑化工施工後一定期間経過後の事例とモニタリング手法」(IV)

緑化法面における環境指標としての土壌微生物相

橘 隆一¹⁾・福永健司²⁾・仁王以智夫³⁾・太田猛彦²⁾

1) 株式会社井上政商店 INOUE MASA SHOUTEN CO., LTD.

taching@s5.dion.ne.jp

2) 東京農業大学地域環境科学部 Fac. of Regi. Envi. Sci., Tokyo Univ. of Agri.

3) 東京農業大学総合研究所 NODAI Res. Inst., Tokyo Univ. of Agri.

摘要：緑化法面における土壌環境の変化を生態学的観点から捉える指標として、土壌微生物相の有用性を検討した。その結果、緑化後の年数経過にともない細菌数では減少傾向、糸状菌数では増加傾向を示した。放線菌数では明確な変化は見られなかった。一方、細菌数/糸状菌数 (B/F)、放線菌数/糸状菌数 (A/F)、細菌数/放線菌数 (B/A) の各菌数比率では、いずれも年数経過にともなって指数関数的な低下傾向を明瞭に示した。また、B/F では緑化後の年数経過にともなう土壌の pH(H₂O)、全炭素含有率、全窒素含有率、A/F では pH(H₂O)、C/N 比、B/A では土壌採取時の含水率、全炭素含有率、全窒素含有率の変化を反映していた。各微生物数と土壌理化学性との間にはそれほど強い相関は認められなかったが、各菌数比率では土壌特性を反映していた。さらに、それぞれの菌数比率によって、反映している土壌特性が異なる可能性も認められた。つまり、緑化法面における土壌発達の指標としては、各微生物数単独ではなく、各菌数を比率として用いる方が有効であると考えられた。また、希釈平板法は、他の微生物実験法に比べて実験操作が簡易で特別な機械も必要とせず費用も安いなど実用性が高く、緑化分野等、現場サイドでの利用には有効であると示唆された。

キーワード：緑化法面、環境指標、土壌微生物相、希釈平板法

TACHIBANA, Ryuichi, FUKUNAGA, Kenji, NIOH, Ichio and OHTA, Takehiko: **Soil microbiota as an environmental index in the revegetation slope**

Abstract: Changes of microbiological characteristics during the revegetation of two naked hill slopes were examined as an index for the recovery of natural environment. The number of bacteria increased and the number of fungi decreased with the lapse of years during the revegetation of the slopes, while there was no clear tendency in the number of actinomycetes. Each ratio among them, i.e., bacteria/fungi (B/F), actinomycetes/fungi (A/F), and bacteria/actinomycetes (B/A), showed a clear tendency of exponential decreases with time. The correlation between the ratios with the physical and chemical properties of the soils was also observed. Among these ratios, B/F reflected the changes of the chemical properties of the soils during the revegetation of the slopes most clearly. Although some kinds of restriction are known to exist, dilution-plate method for the evaluation of soil microorganisms was shown to be effective in this experiment, as it was useful for obtaining the index of soil development on the slopes.

Key words: revegetated slope, environmental indicator, soil microbiota, dilution plate method

1. はじめに

開発跡地や道路法面などの緑化地におけるモニタリングでは、従来の植生や土壌理化学性の調査に加えて生態学的観点からのアプローチも試みられるようになってきた。特に、生態系の土台となる土壌環境のモニタリングでは、微生物の動態に関わる変化に注目した報告が多い。これまでの報告では、硝化活性^{7,28)}、土壌呼吸³⁵⁾、微生物バイオマス^{9,10,24,27)}、FDA (fluorescein diacetate) 活性¹⁵⁾ など間接的な測定方法による生理活性や量的な変化の把握が中心である。一方、微生物相の変化については、緑化基盤や樹種の相違^{31,32)} あるいは植生導入方法の相違³⁰⁾ による影響や土壌動物のトビムシ

との関係³³⁾ など、橘らの一連の報告以外あまり見られない。しかしながら、土壌微生物相は土壌環境の変化に速やかに反応する²⁵⁾ ことが知られている。

土壌微生物数を測定する一般的な方法であるアルブミン培地とローズベンガル培地を用いた希釈平板法では、土壌微生物を生活状態や有機物に対する分解性能が大きく異なる細菌類、放線菌類、糸状菌類の3群に大別し、各菌数を測定する。この方法では、細菌や放線菌はアルブミン培地で生育し得るもののみ、糸状菌においてはローズベンガル培地で生育する胞子状態の微生物を主としてカウントすることになるため、実際の微生物の個体数と比べてかなり限られた値となる。

しかし、これらの培地に生育する微生物は、リグニンなど

の難分解性有機物を利用する微生物と比較して、様々な環境において普遍的に存在する多糖類やセルロース、ヘミセルロースなどの易分解性有機物に速やかに反応するため、その土壤環境の一定の性質を反映する特徴がある。石沢らの一連の研究^{13,14,26)}では、細菌数と糸状菌数、あるいは細菌数と放線菌数の比較を通じて田畑などの土壌や根圏土壌の特性を明らかにすることを試みている¹⁷⁾。その結果、細菌数と糸状菌数の比によって田畑、林地、さらに有機物施用土壌の特性が明らかになることを示した。

そこで、緑化法面における緑化後の年数経過にともなう各菌数と各菌数比率の変化を把握することを目的として、2001年夏季に予備的な調査を試みたが、測定値のばらつきが大きく、統計的に有意な傾向は得られなかった²⁹⁾。このため、本研究では翌2002年に再びほぼ同一の緑化法面において同様の調査を行った。さらに、土壌微生物相と土壌理化学性との関係について考察を加え、微生物数と菌数比率が緑化法面における新しい環境予測手法や評価手法となり得るか、その有用性を巨視的な観点から検討した。

2. 調査方法

2.1 調査地と緑化工法の概要

本来、同一法面で定点調査を継続することが望まれるが、この場合、長大な時間が必要となってしまう。そこで、できるだけ条件が同一で、緑化後の経過年数の異なる切土法面を国内から選出した。しかし、実際の緑化法面で造成される緑化基盤は多種多様で、導入植物は現場により異なることが普通である。このため、緑化工法や導入樹種が同一である法面は極めて少ない。本調査法面では、全て同一の厚層基材吹付工法により緑化され、導入樹種についても各法面で多少異なるが、出来る限り先駆樹種で統一されている。

本調査法面で用いられた緑化基盤は、埴壤土を主基盤材とし、植物性繊維や化成肥料の混合された養生材、浸食防止剤、団粒形成材により構成されている。いずれの緑化法面においても各材料の配合量はほぼ同一である。この緑化基盤の施工時の諸性質を知るために、吹付に用いた緑化基盤材を1/5,000 a ワグネルポットにそれぞれ詰めた後、約1週間後に

サンプリングし、理化学性および微生物相について分析した。繰り返しは5ポットとした。

調査は、静岡県沼津市（旧戸田村）井田の標高約100～150 mに位置し、県道17号沼津-土肥線に面する道路法面（34°59′N, 138°46′E）（以下、戸田法面）と、滋賀県米原市（旧米原町）梅ヶ原の標高150～200 mに位置する採石跡地の山腹切土法面（35°18′N, 136°17′E）（以下、米原法面）で行った。各調査法面の概況を表-1に示す。いずれの調査法面も切土法面で、吹付した緑化基盤より下層では、A層、B層はほとんど見られず、大部分がC層である。各調査法面における緑化施工時の導入樹種は、ヤシヤブシ (*Alnus firma* Sieb. et Zucc.), ヤマハンノキ (*Alnus hirsuta* var. *sibirica* (Fischer) C.K. Schn.), ヤマハギ (*Lespedeza bicolor* var. *japonica* Nakai), イタチハギ (*Amorpha fruticosa* Linn.) などの先駆樹種が中心で、調査時の植生状況においても導入樹種が主な構成樹種である。導入樹種の詳細は既報^{29,33)}に記載されている。これらの樹種はすべて播種工により導入されている。戸田法面の群落高は、HD-A, B区で3～4 m, HD-C区で約5 m, HD-D区で約6 mだった。HD-D区では、HD-A, B, C区に比べて中高木性樹種の割合が高く、階層構造が発達していた。米原法面の群落高は、MB-A, B区で約2 m, MB-C, D, E区では2.2～3.5 m, MB-F区では6.5 mだった。戸田法面、米原法面のいずれにおいても、緑化後の年数経過にともなって群落高が上昇していた。

また、比較対照区として、周辺にある褐色森林土の二次林を戸田法面で2カ所、米原法面で1カ所それぞれ設定した。戸田法面の周辺林では、コナラ (*Quercus serrata* Thunb. ex Murray), ヤマハゼ (*Rhus sylvestris* Sieb. et Zucc.), カラスザンショウ (*Zanthoxylum ailanthoides* Sieb. et Zucc.), ヤブニッケイ (*Cinnamomum japonicum* Sieb. ex Nakai) などが優占し、群落高は9～10 mだった。米原法面の周辺林では、アベマキ (*Quercus variabilis* Blume), スダジイ (*Castanopsis cuspidata* var. *sieboldii* Nakai), イヌシデ (*Carpinus tschonoskii* Maxim.) などが優占し、群落高は14.3 mだった。それぞれの周辺林で確認される樹種の詳細については既報^{29,33)}に記載されている。

表-1 調査法面の概況

Table 1 General characteristics at study sites

Study site*	Age of slope** (years)	Aspect	Slope angle (°)	Thickness of foundation (cm)	Slope length (m)	Slope width (m)	Scar areas (m ²)
HD-A	4	NW	45	5	50	70	2,800
HD-B	5	SW	45	5	50	60	2,100
HD-C	6	W	45	5	40	130	2,400
HD-D	8	NW	45	5	30	120	2,100
MB-A	7	NNE	40	10	12.7	6.5	82.6
MB-B	7	NNE	40	10	12.7	4.5	57.2
MB-C	8	WNW	45	5	10.6	12.8	135.7
MB-D	11	WNW	45	5	10.6	13.2	139.9
MB-E	13	WNW	45	5	10.6	60.0	636.0
MB-F	17	NNE	40	5	7.6	13.0	98.8

* "HD" is Heda sites, "MB" is Maibara sites. ** At the time of July, 2002.

気象庁によれば、戸田法面周辺である松崎の年平均気温（1978～2000年）は15.9℃、土肥の年平均降水量（1990～2000年）は1,608.5mmとなっている。地質は安山岩である。一方、彦根地方気象台による米原の年平均気温（1978～2000年）は14.8℃、年平均降水量は1,588.8mmとなっている。地質は、米原層群、中生代ジュラ系のチャートおよび珪質泥岩である³⁶⁾。

2.2 土壌試料の採取および分析方法

各調査法面の土壌試料は、落葉落枝などの有機物を取り除き、吹付で造成した緑化基盤を深さ0～5cmより採取した。同時に、地温をサーモレコーダ（タバイ エスベック、RT-11）により測定した。比較対照区の周辺林でも同様に、A₀層を取り除き、A層の深さ0～5cmの土壌を採取した。土壌採取はそれぞれ任意の3～5地点で行った。また、土壌微生物は土壌中の水分状態により比較的容易に変動することも考えられたため、晴天か曇天が2～3日間続いた後に試料採取を行った。試料採取は、米原法面、戸田法面とも2002年8月に行った。

土壌試料は翌日に実験室へ持ち帰り、希釈平板法により、細菌数、放線菌数をアルブミン培地で7日間、糸状菌数をローズベンガル培地で3日間暗所培養した後、コロニー形成数（CFU=Colony Forming Unit）を計数した³⁾。また、それらの微生物数を用いて、細菌数/糸状菌数（以下、B/F）、放線菌数/糸状菌数（以下、A/F）、細菌数/放線菌数（以下、B/A）の各菌数比率を算出した。

一部の試料は風乾させ、pH(H₂O)をガラス電極法⁴⁾、電気伝導度（EC）を1:5水浸出法⁴⁾、全炭素含有率、全窒素含有率をNCコーダー（SUMIGRAPH NC-90A）により測定した。さらに、一部の試料を絶乾させて含水率を測定し、これを採取時含水率とした。なお、本文中の土壌理化学性の各測定値ならびに土壌微生物数や菌数比率は、それぞれの調査法面および周辺林の平均値で示す。また、土壌微生物数および菌数比率と土壌理化学性との関係については、統計解析として相関係数を算出した。

3. 結果と考察

3.1 土壌理化学性の経年的変化

吹付前の緑化基盤の諸性質を表-2に示す。また、各調査法面における土壌理化学性と緑化後の経過年数との関係を図-1に示す。

土壌採取時の地温は、緑化基盤材で25.0℃、各調査法面および周辺林においては24.0～27.0℃だった。

土壌の採取時含水率は、緑化基盤材で66.9%だった。調査法面における土壌の採取時含水率は、戸田法面では23.6～33.0%の範囲でばらついたが、米原法面では緑化後7年の23.9%から緑化後17年の17.4%にかけて低下傾向を示した。また、両法面のデータを合わせて全体として見ると、緑化後4～8年の20.0～33.0%から緑化後17年の17.4%にかけて、一定の低下傾向を示した。この傾向の原因としては、乾燥の継続および植生による水分消費などの影響が考えられる²²⁾。

pH(H₂O)は、緑化基盤材で6.9だった。調査法面における

pH(H₂O)は、戸田法面では緑化後4年の7.2から緑化後8年の4.6、米原法面では緑化後7～8年の6.7～6.8から緑化後13～17年の5.2にかけて、それぞれ低下傾向が見られた。全体としても緑化後4年の7.2から緑化後17年の5.2にかけて、一定の低下傾向が認められた。緑化法面においても、森林土壌の発達過程と同様、植物から供給された有機物が腐植物質となって蓄積していく²¹⁾ことでpHが中性から弱酸性に変化していくと考えられる。

ECは、緑化基盤材で310 mS/mだった。調査法面におけるECは、両法面とも10.8～23.6 mS/mの範囲でばらつき、全体としても緑化後の年数経過に伴う傾向は見られなかったが、吹付時の養分のお大半は、緑化後4年までの間に植物に吸収されたか流亡したことを示した。

全炭素含有率は緑化基盤材で18.4%だった。調査法面における全炭素含有率は、戸田法面では緑化後4年の16.3%から緑化後8年の9.6%にかけてばらつきながら低下傾向を示し、米原法面では21.8～27.2%の範囲でばらついた。全体としては、両法面それぞれの傾向と異なり、緑化後4年の16.3%から緑化後11～17年の22.5～27.2%にかけて、ばらつきの大きい増加傾向を示した。

全窒素含有率は緑化基盤材で1.0%だった。調査法面における全窒素含有率は、戸田法面では緑化後4年の1.0%から緑化後8年の0.7%にかけてばらつきながら低下傾向を示し、米原法面では1.2～1.8%の範囲でばらついた。全体としては、両法面それぞれの傾向と異なり、緑化後4～6年の1.0%から緑化後11～17年の1.4～1.8%にかけて、ばらつきの大きい増加傾向を示した。両法面の結果を包括的に見ると、全炭素含有率と全窒素含有率は、植物の生長にともなって年々増加する落葉量を不安定ながらも反映していると考えられる。

C/N比は緑化基盤材で17.7だった。調査法面におけるC/N比は、戸田法面では緑化後4年の17.0から緑化後6～8年の13.7～14.0、米原法面では緑化後7～8年の17.4～18.4から緑化後13～17年の13.8～15.8にかけて、それぞれに低下傾向が見られた。全体として見るとばらつきが大きく、明瞭な低下傾向とは認められなかった。

周辺林における土壌理化学性の各測定値は、いずれも調査法面の示した値の範囲に概ね収まった。

以上のように、本調査法面における土壌理化学性は、緑化後の年数とともにある程度の経年的傾向を示すものの、地域や気候帯などの差と見られるばらつきが大きかった。これまでの過去の報告例においても、緑化法面における土壌理化学性は、数年から数十年の短期間ではばらつきが大きく緩慢な変化しか認められないため、環境回復指標としての有用性は低い、という指摘が多い⁹⁾。

3.2 土壌微生物相の経年的変化および土壌理化学性との関係

吹付前の緑化基盤の微生物数および菌数比率を表-3、各調査法面における微生物数および菌数比率と緑化後の経過年数との関係を図-2、土壌微生物数および菌数比率と土壌理化学性との相関関係を表-4にそれぞれ示す。なお、各調査法面における微生物数および菌数比率と緑化後の経過年数との関係

図-1 土壤理化学性と緑化後の経過年数

Fig. 1 Change in soil chemical properties with age of slope. ○ Heda slope site; ● Maibara slope site; ◇ Heda forest site; ◆ Maibara forest site. * $p<0.05$, ** $p<0.01$, $n=34$.

表-2 緑化基盤材の諸性質

Table 2 Soil characteristics of the vegetation base

Soil temperature (°C)	Water content (wt. %)	pH (H ₂ O)	EC (mS/m)	Total-C (%)	Total-N (%)	C/N
25.0 (0.17)	66.9 (1.2)	6.9 (0.11)	310 (48.4)	18.4 (1.3)	1.04 (0.05)	17.7 (0.7)

Values are means (S.D.), $n=5$.

では、土壤理化学性と緑化後の経過年数との関係に比べ、地域間や気候帯の影響と見られる差はほとんど認められなかったと判断し、図-2では回帰曲線を表示した。さらに、両法面のデータを合わせて土壤理化学性の経年的変化として捉えることとし、土壤理化学性と土壤微生物相との相関を算出した。前述したように、米原法面と戸田法面における土壤理化学性の経年的変化の傾向は、若干異なることがうかがえるものの、立地や施工条件が同一で緑化後の経過年数の異なる法

面を多数選出するのは現実的に容易ではない。このため、本処置は緑化法面における土壤微生物相の性質を巨視的に捉えるには適切と判断した。

細菌数は、吹付前の緑化基盤で乾土1g当たり 1.723×10^6 CFU (以下/gと省略) だった。調査法面では、緑化後4~6年の $14.2 \sim 24.5 \times 10^6/g$ から緑化後17年の $3.8 \times 10^6/g$ にかけて、緑化後の年数経過に伴う減少傾向 ($r=-0.71$, $p<0.01$) を示した。周辺林では $5.1 \sim 10.4 \times 10^6/g$ だった。細菌数と土壤

図-2 土壌微生物数および菌数比率と緑化後の経過年数
凡例は図-1 に同じ。

Fig. 2 Change in soil microbiota with age of slope. Legend is same as in Fig. 1. $^{**}p < 0.01$, $n = 30$.

表-3 緑化基盤材の微生物数および菌数比率

Table 3 Numbers of microorganisms and ratios among them in the vegetation base

Bacteria ($\times 10^6$ CFU/g)	Actinomycetes ($\times 10^5$ CFU/g)	Fungi ($\times 10^4$ CFU/g)	B/F	A/F	B/A
1,723 (820)	884 (191)	147.7 (29.8)	1,157 (485)	60.8 (14.6)	19.2 (8.1)

Values are means (S.D.), $n = 5$.

理化学性との相関では、採取時含水率との間に正の相関 ($r = 0.60$, $p < 0.01$), 全炭素含有率との間に弱い負の相関 ($r = -0.37$, $p < 0.05$), 全窒素含有率との間に弱い負の相関 ($r = -0.41$, $p < 0.05$) がそれぞれ認められた。また、有意ではなかったが pH(H_2O) の低下に伴う細菌数の減少傾向が僅かに認められた。

放線菌数は、吹付前の緑化基盤で $884 \times 10^5/g$ だった。調査法面では、米原法面で $44.8 \sim 134.2 \times 10^5/g$, 戸田法面で $32.4 \sim 67.9 \times 10^5/g$ の範囲でばらつき、明瞭な傾向は認められなかった。周辺林では $24.3 \sim 36.2 \times 10^5/g$ だった。しかし、放線菌数

と土壌理化学性との相関では、EC との間に弱い正の相関 ($r = 0.43$, $p < 0.05$), C/N 比との間に弱い正の相関 ($r = 0.39$, $p < 0.05$) がそれぞれ認められた。また、有意ではなかったが、pH(H_2O) の低下に伴う放線菌数の減少傾向が僅かに認められた。

糸状菌数は、吹付前の緑化基盤で $148 \times 10^4/g$ だった。調査法面では、緑化後4年の $21.0 \times 10^4/g$ から緑化後17年の $95.2 \times 10^4/g$ にかけて、緑化後の年数経過に伴う増加傾向 ($r = -0.59$, $p < 0.01$) を示した。周辺林では $27.1 \sim 64.8 \times 10^4/g$ だった。糸状菌数と土壌理化学性との相関では、全炭素含有

表-4 土壌微生物数および菌数比率と土壌理化学性との相関係数

Table 4 Correlation coefficients between soil microbiota and chemical properties

	Bacteria	Actinomycetes	Fungi	B/F	A/F	B/A
Water content	0.60**	-0.07	-0.28	0.61**	0.24	0.68**
pH(H ₂ O)	0.36	0.34	-0.32	0.46*	0.68**	0.10
EC	0.33	0.42*	0.30	0.06	0.09	0.01
Total C	-0.37*	0.29	0.51**	-0.58**	-0.27	-0.62**
Total N	-0.41*	0.14	0.51**	-0.61**	-0.42*	-0.54**
C/N	0.06	0.39*	-0.04	0.06	0.42*	-0.25

* $p<0.05$, ** $p<0.01$, $n=30$.

率との間に正の相関 ($r=0.51$, $p<0.01$), 全窒素含有率との間に正の相関 ($r=0.51$, $p<0.01$) がそれぞれ認められた。また, 有意ではなかったが, pH(H₂O) の低下に伴う糸状菌数の増加傾向が僅かに認められた。

多くの細菌, 放線菌, 糸状菌は, とともにエネルギー源として有機物を必要とする従属栄養微生物に属するため, 全炭素含有率と高い正の相関を示す⁵⁾。本調査においても糸状菌数と全炭素含有率との間では正の相関を示した。しかし, 細菌数と全炭素含有率との間では, 負の相関を示し, 放線菌数との間では明瞭な関係は見られなかった。一般に, 細菌にとっては水分の多い方が有利であり^{11,12)}, 生息環境としては中性～微塩基性を好む⁶⁾。このことから, 細菌は, 基質である有機物の蓄積よりも土壌採取時の含水率や pH など生息環境の変化に強く影響を受けると考えられる。

放線菌は, 細菌ほど植物根の影響を大きく受けず^{12,16)}, 様々な外的環境に対応するため, 放線菌相は年間を通じて維持される¹⁾。本調査における放線菌数でも経年的な変化は認められず, $10^6\sim10^7/\text{g}$ の範囲で安定していると考えられた。

一方, 糸状菌は一般に好気性で弱酸性の条件下を好む⁶⁾。本調査法面の基盤では, 緑化後の年数経過とともに土壌の採取時含水率の減少や酸性化が認められており, 糸状菌の好む生息環境に移行している。このため, 糸状菌数は細菌数や放線菌数と異なり, 基質となる全炭素含有率, 全窒素含有率の増加傾向を顕著に反映したと考えられる。

吹付に用いた緑化基盤材における各微生物数は, いずれも調査法面より大きい値を示したことから, 菌数は初期値から次第に減少していくと考えられた。これまで, 緑化基盤材自体の微生物相が, 緑化法面における土壌理化学性や土壌微生物相の長期的な変化に及ぼす影響について議論されることはあまりなかった。しかし, 例えば菌害が種子の発芽の成否を左右する可能性 (菌害回避更新説)¹⁸⁾ もある。このため, 緑化法面において, 緑化初期の土壌微生物相がその後の土壌理化学性や土壌微生物相に与える影響を知ることは, 緑化法面のモニタリングや緑化施工技術の向上を目指す上でも非常に重要と思われ, 今後さらなる検討が必要である。

B/F は, 吹付前の緑化基盤で 1,157 だった。調査法面では, 緑化後 4 年の 75.1 から緑化後 17 年の 4.3 にかけて, 緑化後の年数経過に伴う指数関数的な低下傾向 ($r=-0.88$, $p<0.01$) を示した。周辺林では 7.8~48.0 だった。B/F と土壌理化学性との相関では, 土壌含水率との間に正の相関

($r=0.61$, $p<0.01$), pH(H₂O) との間に弱い正の相関 ($r=0.46$, $p<0.05$), 全炭素含有率との間に負の相関 ($r=-0.58$, $p<0.01$), 全窒素含有率との間に負の相関 ($r=-0.61$, $p<0.01$) がそれぞれ認められた。

森林土壌における B/F では, 水分や養分の減少あるいは酸性化により低下すると報告されている¹⁷⁾。緑化法面においても同様に, 緑化後の年数経過とともに土壌の採取時含水率や pH は緩やかながら低下するため, 好気性で弱酸性を好む糸状菌⁶⁾ が細菌に比べ相対的に増加したと考えられる。

A/F は, 吹付前の緑化基盤で 60.8 だった。調査法面では, 緑化後 4 年の 23.6 から緑化後 17 年の 4.6 にかけて, 緑化後の年数経過に伴う指数関数的な低下傾向 ($r=-0.74$, $p<0.01$) を示した。周辺林では 4.9~16.0 だった。A/F と土壌理化学性との相関では, pH(H₂O) との間に正の相関 ($r=0.68$, $p<0.01$), 全窒素含有率との間に弱い負の相関 ($r=-0.42$, $p<0.05$), C/N との間に弱い正の相関 ($r=0.42$, $p<0.05$) が認められた。

土壌中の放線菌の大部分を占める *Streptomyces* 属の多くは pH 5.0~9.0 の中性域を中心に好み, 酸性土壌に少ない^{19,20)}。一方, 糸状菌は, 弱酸性を好む⁶⁾ ため, A/F は, pH が酸性に傾くとともに低い値を示したと考えられた。

B/A は, 吹付前の緑化基盤で 19.2 だった。調査法面では, 緑化後 4~5 年の 3.2~3.7 から緑化後 17 年の 0.9 にかけて, 緑化後の年数経過に伴う指数関数的な低下傾向 ($r=-0.66$, $p<0.01$) を示した。周辺林では 1.6~3.9 だった。B/A と土壌理化学性との相関では, 採取時含水率との間に正の相関 ($r=0.68$, $p<0.01$), 全炭素含有率との間に負の相関 ($r=-0.62$, $p<0.01$), 全窒素含有率との間に負の相関 ($r=-0.54$, $p<0.01$) がそれぞれ認められた。細菌は水分の多い方を好む^{11,12)} のに対し, 放線菌は好気性で²⁰⁾ 細菌より乾燥した条件に耐える¹⁹⁾。このため, 本調査法面においても B/A は, 乾燥に傾くにつれ小さくなったと考えられた。森林土壌に生息する細菌は, 断面の形態に基づく土壌型よりもむしろ地上植生と対応しているとみられる²³⁾。このため, 緑化法面においても, 特に B/F や B/A は, 植生の供給する有機物の影響を受けると考えられた。

また, 森林土壌微生物の優位性は, 土壌に供給される有機物の質により決まると報告²⁾ や落葉分解の過程で見られる遷移の仕方から, 出現する糸状菌類は 3 群に分けられるという報告³⁴⁾ など, 微生物相の差異を生ずる原因として栄養と

なる有機物の質的差異を指摘する研究者は多い⁸⁾。このことから、緑化法面における土壤微生物相については、例えば植物遺体を構成するセルロース、ヘミセルロース、リグニン、タンパク質、糖類など、存在形態の異なる有機物との関係も検討していく必要がある。

緑化法面の大部分が導入樹種で優占される 10^{0-1} 年単位の比較的短いタイムスケールにおける菌数比率は、緑化後の年数経過とともに、ある一定範囲の値に収束する可能性が認められる。しかし、森林の植生によって糸状菌の優勢する土壤型と細菌の優勢する土壤型がある²⁾ように、導入樹種が他の侵入植物に置き換わり始めるに連れて、各菌数比率の値は異なっていくと考えられる。つまり、 10^{1-2} 年単位の長期的なタイムスケールにおける各菌数比率は、遷移する植生によって大きく異なってくるといえる。このため、対象とする緑化法面が目標とする植生に近づいているか、土壤微生物相から判断するには、植生、土壤型、地形地質などの異なる森林土壤の微生物相について、季節変化も含めてさらに調査を重ねる必要がある。

4. まとめ

本研究では、緑化法面における新しい環境予測手法や評価手法として、微生物数と菌数比率の有用性を巨視的な観点から検討した。

その結果、緑化法面における土壤微生物数は、緑化後の年数経過にともなって細菌数では減少傾向、糸状菌数では増加傾向を示した。放線菌数では明確な変化は見られなかった。一方、各菌数比率では、B/F、A/F、B/A のいずれも年数経過にともなって指数関数的な低下傾向を明瞭に示した。各微生物数と土壤理化学性との間では、それほど強い相関は認められなかったが、各菌数比率は土壤理化学性との相関が強く、土壤特性を反映していた。さらに、それぞれの菌数比率によって、反映している土壤特性が異なる可能性も認められた。つまり、緑化法面における土壤発達の指標としては、各微生物数単独だけではなく、各菌数を比率として積極的に用いることが有効と考えられた。

また、微生物数を測定するために一般に用いられる希釈平板法は、他の微生物実験法に比べて実験操作が簡易で特別な機械も必要とせず費用も安いなど実用性が高く、緑化分野等、現場サイドでの利用は有効といえる。

以上のことから、希釈平板法から得られる土壤微生物相の把握は、緑化法面におけるこれまでの植生調査や土壤調査に加えられる新たな土壤調査方法になり得る可能性が認められた。しかし、この土壤微生物相が示す特性については、明確な説明を得られる段階ではない。このため、今後のデータ収集を継続すると同時に、細菌、放線菌、糸状菌などの大分類に加え、種のレベルでの種数や菌数の把握を試み、緑化法面における土壤微生物の役割を解明していく必要がある。

本研究にあたり、数々の便宜を与えて下さった東京農業大学 治山・緑化工学研究室の大貫恵子氏、今井基裕氏、藤田祐

規氏、小路奈々絵氏、小池奈津氏、関係諸氏にこの場を借りて深く感謝申し上げます。なお、本研究の一部は (社)道路緑化保全協会の研究助成によって行われた。

引用文献

- 1) 蘭 道生 (1990) 微生物に国境はあるか—放線菌—, 微生物, 6(2): 143-145.
- 2) Chase, F. E. and Baker, G. (1954) A comparison of microbial activity in an Ontario forest soil under pine, hemlock, and maple cover. *Can. J. Microbio.*, 1: 45-54.
- 3) 土壤微生物研究会編 (1992) 新編土壤微生物実験法, 養賢堂, 432 pp.
- 4) 土壤環境分析法編集委員会編 (1997) 土壤環境分析法, 博友社, 427 pp.
- 5) 藤原俊六郎 (1998) 有機物と微生物, 農業および園芸, 73(1): 122-126.
- 6) 藤原俊六郎・安西徹郎・小川吉男・加藤哲郎編 (1998) 新版 土壤肥料用語事典, 農文協, 338 pp.
- 7) 藤田祐規・橘 隆一・福永健司 (2002) 緑化法面の硝化活性に及ぼす要因の検討. *日本緑化工学会誌*, 28(1): 279-282.
- 8) 古坂澄石 (1990) 微生物のすみわけ—土壌—, 微生物, 6(2): 146-149.
- 9) 古澤仁美 (2001) 緑化工試験地における初期3年間の土壤の発達と土壤微生物バイオマスの変化, *日本緑化工学会誌*, 26(4): 289-299.
- 10) 古澤仁美 (2005) 緑化工試験地における施工後8年間の土壤の化学性と微生物バイオマスの変化, *日本緑化工学会誌*, 30(3): 524-531.
- 11) 石沢修一 (1980) 土壤微生物をめぐる諸問題, 土と微生物, 22: 13-20.
- 12) 石沢修一・鈴木達彦 (1973) 生態学講座 24 土壤微生物の生態, 共立出版, 142 pp.
- 13) 石沢修一・鈴木達彦・甲田知則・佐藤 修 (1958) 土壤の微生物とその作用に関する研究, 農業技術研究報告, B8: 1-211.
- 14) 石沢修一・豊田広三 (1964) 本邦土壌の微生物フロアに関する研究, 農業技術研究報告, B14: 203-284.
- 15) 門田浩子・山寺喜成・宮崎敏孝 (2002) 土壤微生物活性による植生回復度評価に関する研究, *日本緑化工学会誌*, 28(1): 216-219.
- 16) 加藤邦彦 (1993) 放線菌, 久馬一剛ほか編, 土壌の事典, 朝倉書店, pp. 448-449.
- 17) 加藤邦彦・鈴木達彦 (1977) 各種土壌の B/F 値 (細菌数/糸状菌数) について, 土と微生物, 19: 1-4.
- 18) 倉田益二郎 (1949) 菌害回避更新論, *日本林学会誌*, 31(1-2): 32-34.
- 19) 久津那浩三 (1990) 放線菌, 日本緑化工学会編, 緑化技術用語事典, 山海堂, pp. 202-203.
- 20) 宮下清貴 (2003) 新・土の微生物 (9)—放線菌の機能と働き—, 日本土壤微生物学会編, 博友社, 100 pp.
- 21) 中島 武・伏見知道 (1969a) 瀬戸内はげ山復旧工事の土壌 (I) 化学的性質の変化, *日本林学会誌*, 51(7): 175-182.
- 22) 中島 武・伏見知道 (1969b) 瀬戸内はげ山復旧工事の土壌 (II) 理学的性質の変化, *日本林学会誌*, 51(10): 274-279.
- 23) 仁王以智夫 (1976) 森林土壌の細菌群—土壌および植生との関連について—, 土と微生物, 18: 55-65.
- 24) 大貫恵子・橘 隆一・福永健司 (2002) 緑化法面における

- 土壌微生物バイオマスの変化, 日本緑化工学会誌, 28(1): 275-278.
- 25) Powlson, D. S. and Brookes, P. C. (1987) Measurement of soil microbial biomass provides an early indication of changes in total soil organic matter due to straw incorporation. *Soil Biol. Biochem.*, 19: 159-164.
 - 26) 鈴木達彦・石沢修一 (1965) 畑土壌の微生物およびその活性と肥沃度, 農業技術研究報告, B15: 91-186.
 - 27) 橘 隆一・福永健司 (2000) 法面緑化施工地の根圏環境評価手法としての土壌理化学性および生物学的性質の検討, 日本緑化工学会誌, 25(4): 623-626.
 - 28) 橘 隆一・福永健司 (2001) 播種工による法面緑化施工地における窒素の無機化, 日本緑化工学会誌, 27(1): 142-147.
 - 29) 橘 隆一・今井基裕・福永健司 (2002) 緑化法面における土壌微生物相の変化, 日本緑化工学会誌, 28(1): 224-227.
 - 30) 橘 隆一・小池奈津・藤名紀子・福永健司 (2003) 播種木と植栽木の生育基盤における土壌微生物相の相違, 第 114 回日本林学会大会学術講演集, 789.
 - 31) 橘 隆一・森本真奈美・福永健司・太田猛彦 (2005) 緑化基盤および樹種の相違が土壌微生物相に及ぼす影響—ポット試験による 2 年目の結果—, 日本緑化工学会誌, 31(1): 139-142.
 - 32) 橘 隆一・中島康子・福永健司 (2004) 植物生育基盤および樹種の相違が土壌微生物相に及ぼす影響, 日本土壌微生物学会 50 周年記念大会講演要旨集, 51.
 - 33) 橘 隆一・西村香奈子・宮本沙織・福永健司 (2003) アリ類とトビムシ類の群構成による緑化法面の環境指標, 日本緑化工学会誌, 29(1): 56-61.
 - 34) 椿 啓介 (1977) 落葉の分解と菌類の変遷, 化学と生物, 15(4): 268-274.
 - 35) 塚原高志・山寺喜成・宮崎敏孝 (2002) 土壌呼吸量測定による土壌環境評価に関する研究, 日本緑化工学会誌, 28(1): 220-223.
 - 36) 山縣 毅 (1992) 滋賀県彦根東部地域的美濃帯ジュラ系チャート中の深海成石灰岩の礫岩, 地質学雑誌, 98(7): 665-668.

(2005.10.16 受理)