都市公園の植栽地の維持管理条件が樹木の生長に与える影響に関する数値モデルの検討

A Study on a Numerical Model of Maintenance Factors having Influences on Tree Growth in Planting Sites of City Parks

渡辺 淳*

Jun WATANABE

Abstract: This study aims to assess the influence of maintenance regime on tree growth in the planting sites of city parks. By using a numerical model, we compared the soil properties and tree growth rate spanning a period of 100 years. Site preparation and maintenance factors (pruning, litter removal and trampling) were identified as factors that influence tree growth, and decided 3 levels on 4 factors, simulated $3^4 = 81$ cases of planting sites. The results were as follows: (1) By using a long time simulation, it was determined that tree growth rate is influenced by a combination of site preparation and maintenance factors. (2) Site preparation had the most dominant influence on tree growth during the first 30 years after the parks opened; however, gradually the influence of maintenance factors on tree growth increased from 30 years after the parks opened, 60~100 years after the parks opened, the maintenance factors had about as much influence as site preparation on tree growth. (3) Of the 4 factors, site preparation had the highest degrees of influence on tree growth, which was followed by pruning and trampling during the first 10 years and litter removal 30 years after the parks opened.

Keywords: city park, planting site, pruning, litter removal, trampling, numerical model

キーワード: 都市公園, 植栽地, 剪定, 落葉落枝の除去, 踏圧, 数値計算モデル

1. はじめに

都市公園の植栽地における樹木の効用は多様であり, その生育期間が長いことが特徴である。そのため, その植栽地のおかれた環境によっては, 樹木の生長を制御することが必要となる。ところが, 樹木の生長に対する維持管理の影響については, 明らかでないのが現状である。

都市公園の植栽地の維持管理については, その管理手法として, 樹木に直接的に働きかける支柱かけ, 水やり, 施肥, 剪定, 薬剤散布などの樹木管理と, 土壌を介して間接的に働きかける落葉落枝の集積, チップ敷均, 柵の設置などの土壌管理がある。一般に樹木管理については, 計画的な管理手法として行われることが多いのに対して, 土壌管理については, その影響が現れるまで長い期間がかかることや, その影響程度には様々な条件の違いが関与することなどのため, 植栽地管理の中に導入するためには未だ不明な点が多い。しかし, 樹木の生長を長期的に制御するためには, 土壌の性質の変化やその影響を知ることが必要であると考えられる。

都市公園の植栽地という環境においては, 樹木の生長を扱う関連分野である林学や果樹園芸学における場合とは, その樹種, 土壌, 維持管理手法において大きく異なり, 独自の調査研究が求められる。ところが, 多様な植栽形態が存在する都市公園の植栽地において, 樹種, 土壌, 環境条件を統一して, 維持管理手法による生長の違いを観察することは困難である。また, 圃場における実験についても高木を対象とした複合的な要因に関する比較を行うことは, 時間と経費の面で難しい。そこで, 本研究においては数値計算モデルを使った比較検討の可能性を探ることとする。

植栽地の維持管理が樹木の生長に与える影響に関連する既往研究の中で, 緑化樹を対象としたものには, 次のようなものがある。主に剪定に関連するものとして, ケヤキとコナラの3年生ポット苗³⁴⁾, シラカシの4年生ポット苗⁴⁾に対する研究では, 1

回の剪定による樹木の生長への影響は, ほとんどの葉を処理しないかぎり小さいものと考えられている。ただし, 樹種, 樹齢による違いや現実の都市公園の植栽地で行われているような低強度, 長期間の処理の影響については不明な点が多い。主に落葉落枝の除去に関連するものとして, 関東ロームで, 樹高50cmのシラカシ苗に対して, 常緑広葉樹の枝葉部チップ材を10cmの厚さに散布した実験²⁵⁾, 関東ロームで開園後約20年を経過した都市公園内のスダジイ林についての調査例²⁹⁾から, 落葉落枝の集積は幼齢木に対しては生長を阻害する可能性がある反面, 成木に対してはむしろ生長を促進するものと考えられている。ただし, 樹種, 樹齢, 土性による違いや現実の都市公園の植栽地で行われているような少量, 長期間の処理の影響については不明な点が多い。主に踏圧に関連するものとして, マサ土でクスノキの2年生ポット苗⁸⁾, 関東ロームでケヤキの3年生ポット苗²⁸⁾に対する実験や砂壤土でケヤキ, ムクノキ, エノキの大径木に対する調査¹⁷⁾から, 樹種, 樹齢, 土性, 踏圧頻度, 継続期間の影響が大きいものと考えられているが, 現実の都市公園の植栽地で行われているような低頻度, 長期間の処理の影響については不明な点が多い。また, 現実の都市公園の植栽地においては様々な要因が複合的に作用して樹木の生長に影響を与えているものと考えられるが, これら個々の要因を総合的に扱った例³⁰⁾は少ないものと考えられる。

そこで, 本研究においては, 維持管理手法の中から, 樹木の生長に長期にわたって大きな影響を与えられと考えられる, 樹木管理としての剪定(剪定条件), 土壌管理としての落葉落枝の集積による土壌への有機物の還元(落葉落枝の除去条件)と柵の設置による踏圧の抑制(踏圧条件)を取り上げる。そして, これらの条件が造成条件の違いごとに樹木の生長に与える影響程度を解析するための数値モデルを検討することによって, 植栽地の維持管理手法に関する基礎的資料を得ることを本研究の目的とする。

*東京平線(株)

土壌有機炭素 profile

土壌硬度 profile

都市公園の植栽地における土壌断面調査結果(未発表)より、土壌粒径の対数平均値 $dgi(mm)$ (ただし、 dgi は壤土:0.0589、埴壤土:0.0250)、有機炭素量 $Ci(kgC/m^3)$ および山中式硬度 $Hi(mm)$ を説明変数、固相率 $\phi si(m^3/m^3)$ 、乾燥密度 $\rho bi(Mg/m^3)$ 、最大容水量 $\theta si(m^3/m^3)$ および飽和透水係数 $Ksi(kgs/m^3)$ を目的変数として、 $n=48$ で重回帰分析を行っている。その結果は、すべて1%未満の危険率で有意である。各式の重相関係数は低いものの、開園後20~120年経過した現実の都市公園の植栽地の土壌断面調査結果から導かれたものであり、現時点の経験モデルとしては妥当性があるものとしてこれらの式を用いている。なお、飽和透水係数には文献1)で使用されている単位を用いている。 $1kgs/m^3 = 0.98cm/sec$ である。

$$\begin{aligned}\phi si &= 1.1496dgi - 0.0007Ci + 0.0069Hi + 0.1588 & R^2 &= 0.273 \\ \rho bi &= 3.3382dgi - 0.0032Ci + 0.0165Hi + 0.4445 & R^2 &= 0.310 \\ \theta si &= -1.3404dgi + 0.0003Ci - 0.0065Hi + 0.7802 & R^2 &= 0.306 \\ \ln(Ksi) &= -1.3084dgi + 0.0255Ci - 0.1181Hi - 5.7217 & R^2 &= 0.181\end{aligned}$$

以上より、 dgi 、 Ci および Hi の垂直分布に対応する ϕsi 、 ρbi 、 θsi および Ksi を求めている。

図-1 造成条件の設定

表-1 維持管理条件の設定

維持管理条件	弱	中	強
剪定	2年に1回、葉の30%を除去	2年に1回、葉の50%を除去	2年に1回、葉の70%を除去
落葉落枝の除去	落葉落枝の70%を土壌に還元	落葉落枝の10%を土壌に還元	落葉落枝の0%を土壌に還元
踏圧	植栽地全面に毎年0.5回の踏圧	植栽地全面に毎年5回の踏圧	植栽地全面に毎年50回の踏圧

・剪定条件については、実際の都市公園における維持管理の中で隔年で行われることが多いことから、2年に1回の葉の除去率を3段階に設定している。
・落葉落枝の除去条件については、なし、年1~2回程度および月1回以上の3段階³⁰⁾を想定して、風による飛散を考慮して設定している。
・踏圧条件については、植栽地まわりに柵があり利用者の立ち入りがほとんどない、柵がなく立ち入りが少ないおよび柵がなく立ち入りが多いの3段階³⁰⁾を想定して、植栽地全面に対する平均値として設定している。

2. 方法

(1) 植栽地条件の設定

植栽地条件については、維持管理手法の影響をみることを目的としているため、樹種、植栽密度、土性については同一と設定した。樹種は東京付近の自然林を構成する代表的樹種としてスダジイ (*Castanopsis cuspidata* var. *sieboldii*)、植栽密度は都市公園の植栽地調査³⁰⁾から、平均的と考えられる3本/100m²、土性は東京の低地部を想定して壤土としている。造成条件、剪定条件、落葉落枝の除去条件、踏圧条件については、樹林地土壌の要因強度分級基準(案)¹³⁾および都市公園の植栽地調査³⁰⁾から図-1および表-1に示すように設定している。簡単のため、これらの条件は計算期間をとおして不変としている。なお、計算期間は2001年を起点として100年である。

(2) 数値計算モデルの概要

プログラムソフト Microsoft Visual Basic 2005 を用いて、図-2に示すような気象モデル、樹木モデル、土壌モデル、水分移動モデル、熱移動モデルを組合わせた植栽地モデルを設定している。それぞれのモデル式およびパラメータについては図中の文献を使用しているが、紙数の関係で省略している。

(3) 新たに設定したモデル

1) 生長モデル

純生産量 ($g\ tree^{-1}yr^{-1}$) の菌根菌への配分については、未だ信頼性の高い定式化は難しいと考えられるが、10~20%の範囲と推定されている¹⁴⁾ことから、ここでは第一近似として15%を用いて、純生産量に85%を乗じて、スダジイの葉齢構成に関する研究⁶⁾から計算により年間の落葉率を68%として、純生産量の幹への配分比の研究²⁴⁾から幹への配分比を40%として、アカガシの幹乾重725kgm⁻³を¹⁵⁾スダジイに適用すると、

$$\text{幹材積生長量}(m^3\ tree^{-1}yr^{-1}) = \{0.85 \cdot \text{純生産量} - \text{剪定量} \cdot (1 - 0.68)\} \cdot 0.4 / 725000$$

幹材積生長量から樹高 $HI(m)$ と胸高直径 $DBH(cm)$ の生長

量への換算は、幹材積の推定式²³⁾より、幹材積 $Vs(m^3)$ とすると、

$$Vs = 5.672 \cdot 10^{-5} (DBH^2 HI)^{0.9506}$$

植栽後 m 年の Vs 、 HI および DBH をそれぞれ、 $Vs_{(m)}$ 、 $HI_{(m)}$ および $DBH_{(m)}$ とすると、

$$DBH_{(m)}^2 HI_{(m)} = \{ (DBH_{(m-1)}^2 HI_{(m-1)})^{0.9506} + (Vs_{(m)} - Vs_{(m-1)}) / (5.672 \cdot 10^{-5}) \}^{1/0.9506}$$

また、都市公園の植栽地におけるスダジイの植栽密度 DEN (本/100m²)、 HI および DBH のデータ³⁰⁾より、関係式を求め、相関は低いものの以下の式を使用している。今回の計算では植栽密度を同一と設定しているが、植栽密度の変化を検討する場合には、より信頼性の高い関係式を求める必要がある。

$$HI/DBH = 0.02DEN + 0.22, R^2 = 0.126 (n=6)$$

以上より、植栽後 m 年の HI および DBH を求めている。

葉面積指数 (LAI) の光による制限を表現するため、樹木の大きさから推定される LAI に葉量を示す変数 (0.1~1.0) を乗じている。葉量を示す変数は初期値を1として、下層5%の葉の1年間の純光合成量が正または負となった場合に、次の年に1.05または0.95を乗じて変動させている。

剪定による葉量の変化は、年頭に葉をそれぞれの割合削除、年末に元の葉量に戻るものとして、月毎の葉量を線形補間によって求めて使用している。 LAI 等の変化は CO_2 同化量の変化をつうじて、 HI と DBH の生長量に影響を与えるものとしている。

土壌深さ毎の細根量は、樹木の大きさから推定される細根量に深さごとの細根分布割合を乗じて求めている。深さごとの細根分布割合については、常緑カシ林についての細根 ($\phi < 1cm$) の垂直分布³²⁾より、深さ z_i の細根密度 $R_i(mm^{-3})$ 、 z_0 の細根密度 $R_0(mm^{-3})$ とすると、

$$R_i = R_0 \exp(-5.6z_i)$$

このときの深さごとの細根分布割合は、 $i=0, 0.05, 0.10, \dots, 0.95$ のときそれぞれ、0.245, 0.185, 0.140, $\dots$, 0.001となる。深さごとの細根分布割合は、樹齢、樹木の生育状態および土壌条件によって変

図-2 数値計算モデルの概要

化するものと考えられるが、ここではA₀層厚と土壌硬度による変化のみを考慮している。すなわち、A₀層の細根割合をA₀層厚が5cmのとき全体の20%と仮定し、A₀層厚に比例するものとしている。土壌硬度による細根分布の変化は、都市公園の植栽地における土壌断面調査結果(未発表)より、土壌の亀裂や枯死根跡への細根の進入があることを考慮して、山中式22mmで100%、25mmで60%、28mmで30%、31mmで10%と仮定して、曲線近似によって土壌硬度に対応する0~1の値を求め、細根分布割合に乗じている。

菌根菌糸の呼吸量については、未だ十分なデータがないため、菌根菌糸量は純生産量の15%のうち、菌根菌糸の形成に1/4、菌根菌糸の呼吸に3/4が使用されると仮定して求め、深さごとの菌根菌糸の分布割合は、細根分布割合に比例するものとしている。

2) 土壌発達および劣化のモデル

①土壌発達のモデル

土壌発達の要因として、落葉落枝および枯死根の還元による有機物の付加を考え、森林生態系における土壌炭素循環シミュレーションモデル¹⁹⁾を使用している。すなわち、同シミュレーションでは、日ごとのA₀層中の有機炭素量M₀(kgC m⁻²)と深さ0~0.5mの鉅質土層中の有機炭素量M(kgC m⁻²)が求められる。ただし、ここでは鉅質土層中の有機炭素量を0.05, 0.10, ..., 0.95mの各土層毎に求め、落葉落枝および枯死根の還元の他に、菌根菌糸が次年に1日あたり1/365づつ各土層中に還元されるものとする。これを使用して、日毎に深さごとの有機炭素量を求める。ただし、有機炭素以外の土壌特性の垂直分布は、年毎に更新するものとしている。

②土壌劣化のモデル

・落葉落枝の除去条件：落葉落枝の除去強度について、除去弱、除去中および除去強それぞれ、除去なし、年1~2回程度および月1回以上の3段階³⁰⁾を想定して、風による飛散を考慮して、落葉落枝の土壌還元率を0.7、0.1および0とする。これらの土壌

還元率を樹木の植栽密度、樹木の大きさ、枝葉密度(剪定の影響を含む)から推定された落葉落枝量に乗じて、落葉落枝の土壌還元量を求める。ただし、落葉落枝の土壌還元率0.1の場合については、A₀層の形成はわずかであるため、A₀層の温度と水分含有率は0~0.05m深の鉅質土層と同様として、地表面蒸発量への影響はないものと仮定する。

・踏圧条件：踏圧による土壌の硬化については、以下のように踏圧回数を地表面の土壌硬度に変換する。すなわち、踏圧回数N(回)、地表面の土壌硬度H₀、地表面の造成時の土壌硬度H'₀、地表面の土壌硬度の最大値H_{max0}、土壌硬度のNに対する変化率k_Tとすると、

$$H_0 = H'_0 + (H_{\max 0} - H'_0) \cdot \{1 - \exp(-k_T \cdot N)\}$$

敷わらの厚さとA₀層の厚さの踏圧緩和効果を同じと仮定すると、A₀層の厚さをZ_{A0}(m)として、敷わらの厚さ別踏つけ回数と土壌硬度との関係²⁷⁾より、計算によって、

$$H_{\max 0} = 45.49 Z_{A0}^2 - 333.8 Z_{A0} + 27.04$$

$$R^2 = 0.955 (n=5) **$$

$$k_T = 25.92 \exp(-0.2958 H_0) \quad R^2 = 0.643 (n=50) **$$

** : 1%未満の危険率で有意

以上の式に、H'₀と時間ステップ前のH₀と現在のZ_{A0}およびNを代入して、繰り返し計算によってH₀を決定する。なお、踏圧回数Nは踏圧強度に応じて、踏圧弱、踏圧中および踏圧強それぞれ、毎年0.5、5および50回をNに加えることによって、各年毎のH₀を求める。

また、土壌硬度の垂直分布については、研究例¹²⁾より、ここでは深さ0.25m以下の硬度は不変と仮定して、深さz_iにおける土壌硬度H_i、土壌硬度の深さz_iに対する変化率k_Hとすると、

$$H_i = H_0 \exp(k_H z_i)$$

$$k_H = \ln(H_{0.20}/H_0) / 0.20$$

これらの式より、H_i(i=0.05, 0.10, 0.15, 0.20)を求め、年毎に土壌特性の垂直分布を変更する。

モデル計算の条件
気象条件:現在の平年値、大気中CO₂濃度:過去の推定値、樹種:スダジイ、植栽密度3本/100m²、土性:壤土、造成条件良、剪定条件強(ただし、植栽後40年以降は剪定なし)、落葉落枝の除去条件弱、踏圧条件弱とした。
境界水ポテンシャル(気孔抵抗が最低値の2倍になるときの水ポテンシャル)は、初期値を-1500J/kgとして、葉の水ポテンシャルによって-1500~-2500J/kgの間で変化させた。すなわち毎時の葉の水ポテンシャルが境界水ポテンシャルより小さくなった時、境界水ポテンシャルを10J/kg低下させ、逆の場合は10J/kg上昇させた。
水ポテンシャルが気孔抵抗に与える影響を示す定数nは10とした。
 $r_{ws} = r_{w0} [1 + (\psi_s / \psi_0)^n]$
 r_{w0} : 気孔抵抗、 r_{w0}^0 : 水ストレスがないときの気孔抵抗、 ψ_s : 葉の水ポテンシャル、 ψ_0 : 葉の境界水ポテンシャル
純生産量の幹への分配率は40%とした。吸収窒素の葉への分配率は35%とした。

図-3 モデルのキャリブレーション

(4) モデルのキャリブレーション

モデルのキャリブレーションには、関東地方のスダジイの生長に関する実測値として、自然教育園の倒木の年輪解析結果²⁾を用いている。図-3に示すように、キャリブレーションはトライアルによって行い、胸高直径の計算値を地上1.6mの年輪解析の実測値に近づけるようにしている。

(5) データ処理方法

造成条件、剪定条件、落葉落枝の除去条件、踏圧条件の4条件をそれぞれ3水準として、3⁴=81通りの植栽地条件について、土壌条件や樹木の生長を比較する。ついで、4条件を説明変数、樹木の生長を目的変数とする数量化第I類によるデータ解析を行い、維持管理手法それぞれの影響程度を求める。

3. 結果および考察

(1) 土壌条件および樹木の生長に関する計算結果

ここでは造成条件と維持管理条件の対比を鮮明にするために、計算を行った81通りの植栽地条件のうち、5通りを選定して比較を行う。その内訳は①郊外地大公園、②郊外地小公園、③中間地中公園、④市街地大公園、⑤市街地小公園を想定したモデルとして、それぞれ(造成条件、剪定条件、落葉落枝の除去条件、踏圧条件)=①(良好,弱,弱,弱)、②(良好,強,強,強)、③(中,中,中,中)、④(不良,弱,弱,弱)、⑤(不良,強,強,強)である。また、土壌profileの計算結果については、維持管理条件の影響が十分に現れていると考えられる開園60年目のみについて示している。

1) 土壌条件と細根分布

図-4に示すように、開園60年目の土壌有機炭素profileは、図-1と比較して、全体的に減少しており、造成条件に対して1/3~1/2程度となっている。ただし、郊外地小公園、市街地大公園の深さ0~10cmでは、それぞれ減少と増加が大きく、市街地小公園の全層であまり変化がないことが特徴的である。これは、当初の土壌有機炭素量の違いによって分解量が大きく異なることと、落葉落枝の除去の影響によるものと考えられる。

図-5に示すように、開園60年目の土壌硬度profileは、図-1と比較して、深さ25cm以深において変化なく、深さ0~25cmでは、郊外地小公園、中間地中公園、市街地小公園、郊外地大公園の順で硬化の度合いが大きく、市街地大公園のみわずかに軟化している。これは、土壌モデルの設定によるものであるが、造成時の硬度と踏圧回数とA₀層の厚さによって表層土の土壌硬度が決定されているものと考えられる。

図-6に示すように、開園60年目の細根分布profileは、郊外地大公園で多く、市街地小公園で少なく、その他で中間的である。

特徴的なのは、郊外地大公園、市街地大公園のA₀層と表層土で細根分布割合が高いことである。これは、細根分布がモデルの設定から、樹木の大きさと土壌硬度とA₀層の厚さによって決定されているためと考えられる。

2) 水および窒素の吸収量

図-7に示すように、開園60年目の水吸収profileは、下層では造成条件の影響が大きく、表層では維持管理条件の影響が大きく、A₀層における水吸収も無視できない。また、図-10に示すように、開園後100年間の水吸収量は、郊外地大公園で明らかに大きく、市街地小公園で明らかに小さい。その他で中間的な値であり、市街地大公園で開園後20年程度は比較的小さいが徐々に増加している。これは、図-4~7の比較から、市街地大公園の表層土の条件の改善、A₀層による地表面蒸発の抑制およびA₀層からの水吸収量の増加のためと考えられる。

図-8に示すように、開園60年目の窒素吸収profileは、水吸収profileと同様の傾向を示している。吸収量に大きな差がでるのは、土壌溶液中の無機態窒素濃度が異なるためと考えられる。郊外地の植栽地の深さ10~25cmで吸収量が低下するのは無機態窒素が下層に溶脱されているためと考えられる。また、図-11に示すように、開園後100年間の窒素吸収量は、郊外地大公園、郊外地小公園、中間地中公園で開園後20~50年程度増加し、その後減少する。市街地大公園で初期に小さく増加傾向があり、市街地小公園で低い値で一定である。図-1と図-4の比較から、60年間で土壌有機炭素量が前3モデルでは約1/3にまで減少し、市街地大公園では落葉落枝の還元によって表層土で大きな増加があり、市街地小公園ではほとんど変化がないことがわかる。これらのことから、図-11に示す窒素吸収量の変化は、開園60年間の土壌有機炭素の分解による土壌溶液中への無機態窒素の放出が、前3モデルでは大きいものに対して、市街地大公園では初期に小さく徐々に増加し、市街地小公園では小さいためと考えられる。

3) 樹木の生長

図-9に示すように、開園後100年間のLAI(毎年7月1日の値で1年間の平均値)は、造成条件の影響を強く受けているものの、郊外地大公園と市街地大公園で5付近で頭打ちとなっているのに対して、郊外地小公園と中間地中公園では剪定の無い年に5.5~6.5程度に増加している。これはモデルの設定から、前者では純光合成が負となる葉をあまりつけていないのに対して、後者ではそれを多くつけているためと考えられる。

図-12に示すように、開園後100年間の純光合成量は、初期には造成条件を反映するものの、維持管理条件の影響は徐々に大きくなり、開園後60年以降では造成条件よりも維持管理条件の影響のほうが大きくなっている。

図-13に示すように、開園後100年間のDBHは、純光合成量と同様の傾向を示す。開園60年目以降のDBH生長をみると、郊外地大公園と市街地大公園を除いて、極端に小さく、健全な生長を望めないものと考えられる。

以上より、郊外地大公園の生長が良く、市街地小公園の生長が悪く、その他の植栽地条件で中間的な生長をしている。このことから、造成条件と維持管理条件の組み合わせによって、樹木の生長が影響を受けていると考えられる。

(2) 樹木の生長に影響を与える要因の解析

表-2に数量化第I類による樹木の生長に影響を与える要因についての解析結果を示す。今回の数値計算の結果からは、開園後3~30年目では造成条件の影響が特に大きく、開園後60~100年目では維持管理条件の影響も大きくなっている。また、樹木の生長に影響を与える要因のうち、造成条件を除くと、剪定条件の影響が大きく、次に開園後10年目までは踏圧条件が大きく、開園後30年目以降では落葉落枝の除去条件が大きくなっている。

図-4 開園 60 年目の土壌有機炭素 profile

図-5 開園 60 年目の土壌硬度 profile

図-6 開園 60 年目の細根長 profile

図-7 開園 60 年目の水吸収 profile

図-8 開園 60 年目の窒素吸収 profile

図-9 開園後 100 年間の LAI 生長

図-10 開園後 100 年間の水吸収量

図-11 開園後 100 年間の窒素吸収量

図-12 開園後 100 年間の純光合成量

図-13 開園後 100 年間の DBH 生長

渡辺 (1995) ³⁰⁾ においては、開園後 20 年以上経過した都市公園の現実の植栽地 15 地点のデータの解析から、造成条件よりも落葉落枝の除去条件や踏圧条件のほうが樹木の活力指標に大き

な影響を与えていると結論している。今回の数値計算の開園 30～100 年目がこの期間にあたるが、逆の結果となっている。これは、①現実の植栽地では造成条件、落葉落枝の除去条件、踏圧条件は互いに独立ではないこと、②現実の植栽地では剪定条件が不統一であること、のためであると考えられる。①について、現実の植栽地では落葉落枝の除去条件と踏圧条件には相関があることや、造成条件の良好な植栽地では、剪定条件、落葉落枝の除去条件や踏圧条件の強度が強く、造成条件の不良な植栽地では、それらの強度が弱いという傾向があり、樹木の生長を平均化するように人為的な操作がはたらいっていると考えられる。これらのことから、造成条件の影響が過小評価されたものと考えられる。②について、強剪定を行っていないことを条件として対象植栽地が選定されているが、剪定条件は要因に含まれず、落葉落枝の除去条件や踏圧条件と剪定条件との間にも相関があると考えられることか

表-2 数値化第 I 類による樹木の DBH (cm) に影響を与える要因の解析 (n=3⁴=81)

要因	外的基準 開園3年目のDBH				開園10年目のDBH				開園30年目のDBH				開園60年目のDBH				開園100年目のDBH			
	カテゴリ	数量	レンジ	R	カテゴリ	数量	レンジ	R	カテゴリ	数量	レンジ	R	カテゴリ	数量	レンジ	R	カテゴリ	数量	レンジ	R
造成条件	良好	0.6			2.4				3.9				5.9				6.5			
	中	0.3	1.4	0.998	1.3	6.1	0.992		2.3	10.2	0.988		1.3	13.1	0.965		0.4	13.3	0.927	
	不良	-0.8			-3.7				-6.3				-7.2				-6.8			
剪定条件	弱	0.1			0.8				1.0				2.4				3.5			
	中	0.0	0.2	0.886	0.1	1.7	0.896		0.2	2.2	0.780		-0.3	4.5	0.778		-0.6	6.4	0.768	
	強	-0.1			-0.9				-1.2				-2.1				-2.9			
落葉落枝の除去条件	弱	-0.0			-0.3				0.7				1.6				3.0			
	中	0.0	0.0	0.082	0.1	0.4	0.475		-0.4	1.1	0.593		-0.7	2.6	0.618		-1.2	4.8	0.695	
	強	0.0			0.1				-0.4				-1.0				-1.8			
踏圧条件	弱	0.0			0.4				0.4				0.6				0.7			
	中	0.0	0.1	0.726	0.2	0.9	0.740		-0.0	0.8	0.418		-0.2	1.0	0.282		-0.2	1.2	0.230	
	強	-0.1			-0.5				-0.4				-0.4				-0.5			
定数項		9.0			17.4				28.9				33.3				35.0			
重相関係数		0.998			0.993				0.988				0.970				0.946			

樹種: スダジイ、植栽密度: 3本/100m²、土性: 壤土
開園3年目の落葉落枝の除去条件、開園60年目と100年目の踏圧条件を除いて、1%未満の危険率で有意

ら、落葉落枝の除去条件や踏圧条件の影響が大きくでたものと考えられる。

剪定条件の樹木の生長への影響については、2年に1回、葉面積の30、50、70%処理という比較的低い強度にもかかわらず3～100年目にかけて、偏相関係数が0.90～0.77と高く、その影響が持続している。これは、①葉の減少による総光合成量の減少、②剪定で失われる葉の回復のための純生産量の消費、③光に対するLAIの調節が働きにくいこと、純光合成量が負となる葉をつけること、のためであると考えられる。また、1回の剪定の影響に相当する3年目でも30、50、70%処理それぞれ、胸高直径で1mmの差が認められる。これは、苗木よりも成木の剪定処理量や幹径生長量が大きいとめと考えられる。

落葉落枝の除去の影響については、毎年落葉落枝の還元率で70、10、0%という比較的小量の有機物の還元によって、3年目には影響が認められず、10年目では70%還元で生長がやや小さい傾向にあるが、30年目では70%還元の生長がよく、60年目以降では10%還元についても0%還元より生長がややよく、偏相関係数でみると0.08から0.70へと増加し、徐々にその影響が大きくなる傾向にある。これは、A₀層の堆積が徐々に進行し、10年目くらいまでの70%還元で、水および窒素吸収量が小さい傾向があるものの、A₀層中に細根が増加し、表層土の土壌有機炭素が増加することで、10年目以降では、逆に、水および窒素吸収量が増加する（データ省略）ためと考えられる。幼齢木の生長阻害²⁵⁾のみならず成木についても開園後10年目くらいまでわずかに生長を阻害するものの、調査例²⁹⁾のように20年経過すれば生長促進効果が期待できるものと考えられる。

踏圧条件の影響については、植栽地全面を毎年0.5、5、50回という低い頻度の踏圧によって、10年目までは影響があるが、30年目以降ではその相対的な重要性はむしろ低下傾向にあり、偏相関係数でみると0.73から0.23へと減少している。これは、水および窒素吸収量への影響は100年目においても持続しているものの、その影響程度は30年目以降横ばいとなっている（データ省略）ためであると考えられる。また、高頻度、短期間の踏圧実験^{8)、28)}では、2～3ヶ月（総踏圧回数で10、90、800回、200回程度）で表層土壌の堅密化が起こり一定の状態に落ち着くとされている。今回の低頻度、長期間処理の計算結果では、10年目（総踏圧回数で5、50、500回に相当）でも、毎年50回を除いて、一定の状態には落ち着かず、造成条件、落葉落枝の除去条件の違いごとに、総踏圧回数に比例して、徐々に表層土が硬化している（データ省略）。水および窒素吸収量に対する踏圧の影響がほぼ同じ大きさで100年目まで持続していることや、造成条件の良好な植栽地でも窒素吸収量は50年目くらいまでには低下をはじめていることから、調査例¹⁷⁾のような長期間処理については、踏圧影響が再び大きくなる可能性があるものと考えられる。

4. おわりに

都市公園の植栽地における維持管理条件が樹木の生長に与える影響に関する数値モデルの検討を行い、モデルの信頼性に対してはなお改善の必要な部分を残すものの、整合性のある数値計算結果が得られ、維持管理条件の違いによる影響を比較可能であると考えられる。特に、長期間と大きな労力を必要とするような実証実験が困難な問題については、数値計算を援用することが現実的であり、そこから新たな知見を得ることが可能となると考えられる。

表-2に示すように、今回の計算結果からそれぞれの要因の影響程度をみると、維持管理条件の中の土壌管理条件については、造成条件や剪定条件に比べて樹木の生長への影響は小さいものの、踏圧条件は開園10年目くらいまで、落葉落枝の除去条件は開園

30年目以降で影響が大きくなっている。開園前の計画・設計段階から将来の植栽地イメージを想定して、造成条件や維持管理条件を決定する際には参考となると考えられる。

今回の計算条件は、維持管理条件が開園後変化しないものとしているが、樹木管理において想定されているような保護、育成、抑制管理といった段階的管理に相当する土壌管理の検討が必要であると考えられる。そのためには、今後、開園後の植栽地における維持管理条件の変更のタイミングが樹木の生長に与える影響をとらえて、その植栽地のおかれた環境の制約のもとで、樹木がより健全に生育できる維持管理条件の検討を行う必要があると考えられる。

引用文献

- 1) Campbell,G.S. (1985) : Soil physics with basic. Transport models for Soil - Plant Systems : Elsevier Science Publishers ; 中野政詩ら監訳 (1987) パソコンで学ぶ土の物理学 : 鹿島出版会, 192pp
- 2) 萩原信介 (1985) : スダジイ巨樹の肥大生長様式の解析 : 自然教育園報 16,47-66
- 3) IPCC 「気候変動に関する政府間パネル」 (2001) : IPCC 地球温暖化第三次レポート : 中央法規出版
- 4) 石井匡志ら (2003) : 剪定強度の違いがシラカンサの地上部生長に及ぼす影響に関する実験的研究 : ランドスケープ研究 66(5) ,477-480
- 5) 刈住昇 (1979) : 樹木根系図説 : 誠文堂新光社, 1121pp
- 6) 片岡真知子・沼田真 (1975) : 都市環境下における樹木の健康度 : 自然教育園報 No6, 21-32
- 7) 河原輝彦 (1985) : 森林生態系における炭素の循環—リターフール量とその分解速度を中心として— : 林試研報 No334, 21-52
- 8) 木山徹・岡本是明 (1980) : 踏圧による土壌物理性の悪化がクスノキ幼木の生育に及ぼす影響 : 昭和55年度日本造園学会秋季大会研究発表要旨, 25-26
- 9) 近藤純正 (1981) : 数値シミュレーションによる水温・蒸発・蒸散量の推定 : 水温の研究 25 (2) , 15-43
- 10) 近藤純正ら (1991) : 地域代表風速の推定法 : 自然災害科学 10 (3) , 171-185
- 11) 近藤純正 (2000) : 地表面に近い大気科学 : 東京大学出版会, 324pp
- 12) 近藤三雄 (1980) : 芝生地の収容力に関する基礎的研究 (V) —土壌の物理性の状態からみた収容力について— : 昭和55年度造園学会秋季大会研究発表要旨, 35-36
- 13) 奥水肇 (1981) : 緑化事業における土壌保全の手法と課題 : 造園雑誌 45 (1) ,17-25
- 14) Kroon and Visser (2003) : Root Ecology : Springer - Verlag Berlin Heidelberg ; 森田茂紀・田島亮介監訳 (2008) 根の生態学 : シュプリンガー・ジャパン, 364pp
- 15) 木材工業ハンドブック編集委員会 (1982) : 改訂3版木材工業ハンドブック : 丸善
- 16) 文部省国立天文台 (2000) : 理科年表 平成13年 : 丸善, 1064pp
- 17) 森本幸裕・増田拓朗 (1975) : 踏圧による土壌の圧密と樹木の生育状態について : 造園雑誌 39 (2) ,34-42
- 18) Nakane,K.(1980) : A simulation model of the seasonal variation of cycling of soil organic carbon in forest ecosystems : Jap.J.Ecol.30(1),19-29
- 19) Nakane,K. and Yamamoto,M.(1983) : Simulation model of the cycling of soil organic carbon in forest ecosystems disturbed by human activities I. Cutting undergrowths or raking litters : Jap.J.Ecol.33(2),169-181
- 20) Nakane,K.et al. (1984) : Cycling of soil carbon in japanese red pine forest I. Before a clear-felling : Bot.Mag.Tokyo 97,39-60
- 21) 中根周歩 (1986) : 森林生態系における炭素循環 : 日生態誌 36 (1) , 29～39
- 22) Niinemets and Tenhunen(1997) : A model separating leaf structural and physiological effect on carbon gain along light gradients for the Shade-tolerant species *Acer saccharum* : Plant, Cell and Environment,20,845-866
- 23) 大島誠一 (1991) : 森林の現存量推定法の検討—伐倒による推定法— : 京大演報 63,23-36
- 24) 只木良也ら (1968) : 森林生態系とその物質生産、わかりやすい 林業解説シリーズ 29 : 林業科学技術振興所, 64pp
- 25) 高橋輝昌ら (2001) : 植物性発生材の敷きならしが苗木の生育に及ぼす影響 : 日緑工誌 27 (1) ,320-323
- 26) 玉井幸治 (1994) : 落葉広葉樹林における林床面蒸発のモデル化と流域への適用 : 日林誌 76 (3) , 233-241
- 27) 谷本丈夫・鈴木和次郎 (1985) : 都市近郊樹林地における林床植生の種組成の変化に及ぼす踏圧の影響 : 林試研報 No333,93-122
- 28) 寺島悦子ら (2002) : ケヤキ幼齢木の生長に及ぼす踏圧の影響に関する実験的研究 : ランドスケープ研究 65 (5) ,479-482
- 29) 渡辺淳 (1991) : 都市公園における樹木の活力度とA₀層堆積量について : 都市公園 114,68-72
- 30) 渡辺淳 (1995) : 都市公園の植栽地における樹木の生育に影響を与える要因の解析 : ランドスケープ研究 58 (5) ,145-148
- 31) 山本隆儀ら (1990) : 落葉果樹の樹冠内放射の減衰係数とその推定パラメータ : 山形大学紀要 (農学) 11 (1) ,155-176
- 32) 依田恭二 (1971) : 森林の生態学 : 築地書館
- 33) Yoneda,T.(1982) : Turnover of live and dead woody organs in forest ecosystems-an assessment based on the changes in the frequency distribution of their diameter (Studies on the rate of decay of wood litter on the forest floor.IV) : Jap.J.Ecol.32(3),333-346
- 34) 吉川賢ら (2003) : 摘葉処理がケヤキ (*Zelkova serrata* (Thunb.)Makino) とコナラ (*Quercus serrata* Thunb.) の葉の展開と光合成能に及ぼす影響 : 日緑工誌 29 (1) ,101-106