水分消費からみた有底植栽土層の層厚決定に関する数値的評価

Numerical Determination of Planting Layer Thickness in Rooftop Garden from the Aspect of Soil Water Consumption

崔 炯碩* 雨宮 悠**
Hyeongseok CHOI Yu AMEMIYA

摘要：人工植栽土層は通常、粗粒の排水層と植栽層の2層構造になっている。本論では、無灌水栽培を前提に、土壌物理特性と気象条件を考慮した層厚の検討を行った。東京での過去30年間の記録より降雨間日数の対数積算分布は正規分布によって良く回帰され、95%、99%出現確率に対する降雨間日数は、29日間と64日間であった。ついで、下層が100mmの場合の2層系の数値演算を行い、初期水分から植栽層が平均して萎凋に到るまでの層厚と経過時間の関係を調べ、99%の確率の場合、所要の植栽層厚は236mmであり、単層系の424mmに対してほぼ半分の値であることを示した。

1. はじめに

近年の環境問題の解決には環境悪化に対して具体的に取る立場が重要である。とくに造園学は、都市環境問題解決に関与しうる立場にある。例えば、都市の高温化・乾燥化に対して植栽や水文空間の確保によってこれらに対処することが可能となろう。現在なお一層の緑化促進が必要とされている所以である。しかしながら、都市内部に植栽可能地を確保することは極度に困難になってきている。そのため、屋上・壁面空間が注目されるようになったのは当然の帰結であろう。屋上空間、いわゆるスカイフロントスペースは都市に残された貴重なオープンスペースである。しかもそれは現在ほとんどが未利用のまま残されている。東京都23区内だけで約2,000haの未利用のフラットな屋上空間があるとされ¹⁾、そこは、まさに新しい緑化空間である。屋上緑化は修景の用を果たすだけでなく、階下への熱の焼き込みを防ぎ、室温の上昇を抑え、室温を低下させるための冷房費の節減を図る。すなわち省エネ効果をももたらすなどの機能的役割を果たすことが近藤ら²⁾の研究で明らかとなっている。屋上緑化を計画するにあたっては、植物が生育できる環境を整えることが大前提である。屋上で、植物を育成させるためには、気温、降雨、土壌中の水分管理、風対策、建物の許容荷重などさまざまな問題を解決しなければならない。とくに土層厚さは建物の荷重と植物に及ぼす影響が大きい。植栽植物の種類・形状に対応させた土層厚さについても現在試行錯誤によって決定されているようであるが、奥水³⁾の先駆的な研究成果などを拠所としている場合が多い。通常、高木の植栽では900mm、中木では600mm、低木では450mm、芝生では300mm内外程度の数値が一応の目安となっている。しかし、この土層厚さが植栽に対して十分であるかどうかは、土壌・植物の種類また植栽土層がおかれるその地の気象条件に依存する。さらに、屋上空間での植栽は地下部からの水分補給がないため、自然緑地に比べ、土壌層がより乾燥しやすい傾向にあると思われる。さらに、地下への水分移動がなく、大量の雨水に対しての排水も工夫しなければならない。土壌の排水問題も乾燥問題も土層厚さに大きく関連してくると思われる。

そこで本研究では、一般的な人工植栽土層構成として、植栽層・排水層・基底を考え、これら成層中に生じる水分移動を数値演算を用いて把握し、水分消費上適切な層構成を考察しようとするものである。しかしながら、これら現象もいくつかの局面に分割し

うるため、ここでは植栽層からの蒸発に伴う2層系土層の水分移動に限って議論するものとする。2層系土層とは、前記層構成の中、基底は不透水層と考え、この上に下層として粗大間隙を有する排水層、さらに上層として細粒質植栽層を想定したものである。

2. 試料ならびに方法

(1) 試料の特性

本研究に用いた試料は、植栽層用土として、関東周辺では一般的な火山灰表土（千葉大学付属柏農場内より採取）、排水層として、粗大間隙を有する赤玉土集合体を用いた。赤玉土の物理諸特性については既に公表のデータ¹²⁾があるのでこれを用いた。柏火山灰表土については、土粒子密度 2.60Mg/m^3 、乾燥密度 0.60Mg/m^3 、飽和透水係数 $2.62 \times 10^{-4}\text{kg}\cdot\text{s/m}^2$ であり、標準的な火山灰表土の特徴を有する。図-1にこれら試料の保水特性、図-2に透水特性を示す。細粒質上層ならびに粗粒質下層の組み合わせとしてはこれで十分な特徴を有していると考えた。保水特性については、土柱法・吸引法・加圧法・蒸気圧法を用い、透水特性については、瞬間プロファイル(IP)法を用いた。これら諸方法については成書に詳しい⁶⁾。

図-1 試料の保水特性：赤玉土は文献¹³⁾による。
VFL: volume fraction of liquid

*千葉大学大学院自然科学研究科 **千葉大学園芸学部

図-2 試料の透水特性：赤玉土は文献¹⁴⁾による。

(2) 数値解析

2層系土層の数値演算評価を支配する基礎方程式は、気・液水分ポテンシャルが常に平衡していると仮定した Darcy 則である¹⁴⁾。

$$\rho_L \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[(k_L + k_V) \frac{\partial \Psi_L}{\partial z} + k_L g \right] \quad (1)$$

ここに、 θ ：液相率、 Ψ_L ：土壌液体水分ポテンシャル、 ρ_L ：液体の密度、 g ：重力の加速度、 k_L ：土壌溶液透水係数、 k_V ：土壌水蒸気伝導度であり、以下の式で表される。

$$k_V = 0.66 \phi_G D p_s \left(\frac{M_L}{RT} \right)^2 \exp \left(\frac{M_L}{RT} \Psi_V \right) \quad (2)$$

また、 Ψ_V ：土壌気体水分ポテンシャル、 ϕ_G ：気相率、 D ：温度 T における水蒸気拡散係数、 p_s ：飽和水蒸気分圧、 M_L ：溶液分子質量、 R ：気体定数である。また、植栽層上部境界条件は Campbell⁵⁾ により、

$$(f_L + f_V) \big|_{z=L} = E_p \frac{h_s - h_a}{1 - h_a} \quad (3)$$

とする。ここで、 f_L ：土壌液体水分フラックス、 f_V ：土壌水蒸気フラックスであり、 E_p ：可能蒸発量、 h_s 、 h_a はそれぞれ層表面、層上大気湿度を示す。植栽・排水両層界での条件は、

$$(f_L + f) \big|_{z=-\lambda} = (f_L + f_V) \big|_{z=+\lambda} \quad (4)$$

となり、下部境界では水分の出入りが無いという条件を与える。したがって、

$$(f_L + f_V) \big|_{z=0} = 0 \quad (5)$$

となる。以上を、差分化し、プログラム化した。言語は Microsoft Visual Basic を用いた。

3. 結果ならびに考察

(1) 有底植栽層における「有効水分」

人工植栽層に過剰な灌水を与え、層表面に湛水を生じるような場合、やがて排水層を通じて余剰水分は全層から排除されると想定される。このような場合、「圃場容水量」の決定を慎重にする

必要がある。半無限土層である自然地の場合と異なり、有限土層では、植栽層の排水層水分は実質的に排水層下部に土壌水分ポテンシャル 0 の点を考えることが妥当である。この場合排水層厚さが上部植栽層水分分布に影響を与えるが、余剰排水を生じるような状況下と比較的・相対的に薄い排水層厚さを前提にすれば、植栽層はほぼ飽和状態近くになっていると考えてよい。このとき、いわゆる、圃場容水量は意味をもたなくなる。したがって、有効水分の上限を圃場容水量の代わりに、基底直上のポテンシャルが 0 である平衡水分分布に定め初期水分とする。一方、有効水分範囲を決定するもう一つの容水量は、永久萎凋点である。土層内の水分減少過程において、その分布は様ではない。したがって実用的には何らかの限界を設ける必要がある。そこで、Liu, et. al.¹⁴⁾ に倣い、植栽層全層が平均的に萎凋点に達した時をもって「萎凋点」とした。これら初期水分と萎凋点間に挟まれる水分をここでは有効水分とした。

(2) 降雨間日数

日本における降雨は年間数百回に及ぶ事象である。これら降雨間の日数を干天日数といい、連続干天日数は 1 mm 未満の降雨を計数せずに干天日数を評価するものである。すなわち、1 mm 降雨が閾値となっている¹²⁾。しかし、灌水や土層厚さを評価する際、この閾値は必ずしも妥当なものとは言えない。なぜなら、閾値以上の降雨であっても土壌水分増加に対する寄与が実質的に殆ど認められないからである。しかるに、長期の地気象評価を行う場合、使用可能なデータは気象庁公表データ¹⁾ に依らざるをえないが、これらは日変量データとして表示される。そこで次のような解析を行い、連続する降雨間日数を定める。日変量データ中連続する降雨記録は 1 降雨と認識し、その降雨期間を 0.5 日の分解能で計数する。その上で、雨天・干天の区別を行うが、この際、土壌水分増加に寄与しうる降雨の閾値を定める必要がある。雨宮ら³⁾ によれば、テンシオメータ応答記録から 300 mm 深土層が降雨による水分増を検知しうる降雨量の限界は 16 mm としている。そこで本論ではこの深さが植物根群中心であることも考慮し、16 mm 閾値を採用することとした。まず、16 mm 未満の降水を無視し、この雨天を干天に繰り入れることができるものとすれば、降雨・降雨間日数を定めることが可能となる。ついで過去 30 年間について、時期毎に 5 年間平均をとり、上述のように定めた降雨間日数の頻度分布をとると、東京地方については図-3 のようになり、全体としてはほぼ同様な分布傾向を示す。このデータを累積し、対数正規分布回帰を行うと、悪い結果でも、 $r=0.994$ とよく正規分布に乗ることが分かる。この回帰正規分布の平均値と偏差を用いれば、

図-3 降雨間日数頻度分布（東京）
雨天・干天閾値雨量は 16mm

図-4 指定確率における降雨間日数(東京)

任意の確率に対応する降雨間日数を定めることができる。さて、造園設計においては、植栽土層の特徴をまえて把握しておく必要がある。一般に農業上使用される土層は半無限深さを対象とする。もとよりその評価も必要となるが、造園では有限深さのものが多数見られるので今回は有限深度土層を対象に考察を進めたい。造園設計における植栽土層選定の要件は低コスト無管理育成であろう。土壌水分論的に見た場合、植栽地の気象条件下で必要とされる土層厚さを土壌水分の供給量に対応させることができる。このことを決定する第1の因子は降雨間日数であると考えられる。無灌 waters 育成の場合100%の出現確率に対応する土層厚さを設定することは無意味である。そこで基準例として95%ないし99%の確率を採用すれば、それらに対応した日数を定めることができる。これを年代別に図-4に示す。過去30年において95%確率降雨間日数は時期の進行とともに増加しており、99%確率ではより顕著に増加していることが認められる。すなわち、この結果は、一方で都市の乾燥化の進行を示している。このことを踏まえれば、土層厚さ評価に対して将来の乾燥化の程度を予測して対応することが求められるが、そのことは社会状況、都市化の状況予測が必須とされる現在の段階では困難である。さて、図から得られる結果は、95%確率で29日、99%確率で64日程度(1986~1990)となるが、層厚の決定にはこの日数に耐えられる厚さを考慮すれば良いということになる。

(3) 2層系有限土層の水分消費

(i) 実験試料における Darcy 則成立の検討: 当該土層における

図-6 2層系土層の水分分布変化

図-5 柏火山灰表土の蒸発にともなう水分分布変化の理論・測定比較(22.5%, 25°C, 風強)

水分消費に関する数値評価を実施するに先立ち、まずもって用いる試料に関する Darcy 則成立を確認する必要がある。そこで、まず、一定の乾燥密度で充填した100mmコラム試料を用い、一定の蒸発環境下(湿度22.5%, 温度25°C)における試料の蒸発減量曲線から積算蒸発量曲線を求める。ここでは、植栽層とすべき柏火山灰表土について示す。一方、図-1, 2に示した土壌水分の保水・透水両特性を用い、単層系水分移動方程式から数値実験を行う。理論・測定が一致すれば、Darcy 則の本試料における成立が確認される。図-5は、水分分布における比較を示す。両者はほぼ一致し、Darcy 則の成立を認めることができるものとした。排水層とすべき、粗粒質土層としての赤玉集合体に関する検討は、Liu, *et. al.*¹⁴⁾の検討によった。理論は測定とやや外れるが、総体として現象を説明し得ていると考え、ここでは Darcy 則成立が認められるものとした。

(ii) 蒸発環境の程度と可能蒸発量: 可能蒸発量は、蒸発環境によって大きく異なる。また、この量は本論における数値演算の基本付与量となるので、ここでその問題を考察しておく。微風下で25°Cでは、22.5, 43.2, 68.9%の湿度に対し、可能蒸発量は、それぞれ13.0, 9.3, 5.4mm/dayであった。このように湿度増加に伴い蒸発速度は減少することがわかる。一般の蒸発環境下では可能蒸発量は時間変動を示すものである。そのことは、標準的な温湿度変化パターンを考慮したり、期別変動を捉えることも必要になるが、ここではもっとも湿度が低い、したがって乾燥能力の高い蒸発環境を選択すれば、層厚決定評価にとって安全側となるので、十分と判断した。このことにより、以下の数値演算に対して相対湿度22.5%, 温度25°Cにおける可能蒸発速度を採用した。

(iii) 2層系における水分消費の数値解析: 2層系土層での層厚さの組み合わせは無数に考えられるので、ここでは、下層すなわち排水層を100mmに固定し、上部の植栽層の厚さを適宜変化させ、数値実験を行った。

a) 水分分布変化: 排水層は一般に、植物根吸水に対し、無効と考えられる。しかしながら、図-6に示すように、植栽層表面(地表)からの蒸発に伴い、下層排水層中の水分も移動することが認められる。下層排水層中水分は前述のように蒸発初期段階で、基底部分で大気圧になっていると考えるのが、多くの場合妥当なので、赤玉土の粗大粒子間隙中に保持される水分も実は、植物根吸水に寄与していることが分かる。図では示しにくい、数値解析の初期段階で水分はまず、排水層中の粗大間隙保持水分から減少が始まり、その時点での植栽層中の水分減少は認められなかった。b) 平均萎凋点に到る日数: 植栽層が水分飽和している段階から平均的に萎凋点に達するまでの日数は土層水分が植栽植物に対して水分供給を行える期間に該当すると考えてよい。轟¹⁰⁾は芝草を

図-7 芝地の蒸発散(轟¹⁰)。図中C,Dはそれぞれ播種密度30,60 g/m²を示し、数値は刈込高を示す。

用いた蒸散実験を行い、裸地・水面からの蒸発と比較した。その結果を図-7に示す。この実験の場合、裸地面からの蒸発量が蒸散量と同じか、あるいは上回る結果となった。このような事例では、裸地面からの蒸発を評価すれば、植物を含めた水分消費を評価するのに十分ということになる。さて、図-8に数値解析の結果得られた層厚さと平均萎凋点に到る日数の関係を示す。日数は土層厚さの増加とともに放物線的に増加して行くことが分かる。また、単一層の結果に比べ、2層系土層からの蒸発では、萎凋点に達する日数はかなり増加し、800mm植栽層の例では、ほぼ2倍の時間となっている。このことは、すなわち、層厚さの増加とともに、下層排水層の相対的割合が小さくなるにも拘わらず、下層の存在によって永久萎凋点に到る日数を飛躍的に増加させることができるということを示す。また、この図から前述の気象条件に対応した層厚さを決めてみると、95%出現確率の乾燥期間では、

図-8 植栽層厚さと永久萎凋点に到る日数

単層系、2層系でそれぞれ237mm, 130mm, また、99%では、それぞれ424mm, 236mmと決定することができる。

4. 結論

過去30年間の気象記録から、本文内に定義した降雨間日数(乾燥期間)は時期の進行につれて増加の傾向にある。これは大都市部における乾燥化の傾向を示す。そこで、植栽植物の無管理育成を前提に指定確率における降雨間日数に対応できる植栽土層厚さの検討を、人工植栽土層としては一般的な2層系土層について行った。厚さを固定した排水層の効果は上部植栽層の層厚増加につれて、その相対的重みは減少するに拘わらず、永久萎凋点に到る日数は、同じ層厚の単層系植栽層に比して大きくなる。したがって、排水層を付した設計の方が植栽層の水分消費の面から有利である。2層系の場合、例えば、99%出現確率の降雨間日数(乾燥期間)に対応する植栽層厚さは236mmと評価された。この値は同じ層厚を持つ単層系土層に関する値、424mmのほぼ半分であることが分かった。実証実験が事実上不可能なこの種の課題に対しては、ここに示した様なアプローチが有効と考える。

引用文献

- 1) 気象庁 (1956-1990): 気象庁月報
- 2) 奥水 肇 (1979): 人工地盤における緑地植物の植栽に関する研究について: 造園雑誌 42(3), 22-25
- 3) 雨宮 悠他 (1981): 台地不飽和土壌水分帯域の保水と移動-シラス地帯における土の特性と水の動態(Ⅲ)-: 農業土木学会論文集 92, 13-21
- 4) 長谷川周一 (1983): 植物の水分のメカニズム(1): 農業および園芸 58(9), 10-14
- 5) Campbell, G. S. (1985): Soil Physics with BASIC: Elseviers
- 6) Klute, A. (1986): Methods of soil analysis: American Soc. of Agronomy
- 7) 近藤三雄他 (1987): 建築物の屋上・壁面を緑化することによる夏季の室温の上昇抑制効果について: 芝草研究 16(2), 13-18
- 8) 近藤三雄他 (1988): 薄層化、超軽量化した人工地盤条件下における緑化用植物の成育可能性について: 造園雑誌 51(5), 186-191
- 9) 屋上開発研究会 (1995): 屋上利用ガイドブック: 創樹社
- 10) 轟 正和 (1995): 芝草の刈り込みと播種密度による水分消費の動態に関する研究: 千葉大学大学院修士論文
- 11) 劉 軍他 (1997): 植栽用土としての混合団粒性用土の水分消費: ランドスケープ研究 60(5), 477-480
- 12) 日本農業気象学会 (1998): 新編農業気象学用語解説集-生物生産と環境の科学-
- 13) Liu, J. (1998): Studies on the behavior of soil water in the sand-Akadama and Kuroboku-Akadama soil mixtures: Doctorate thesis of Chiba university
- 14) Liu, J. et. al. (1998): Numerical evaluation of planting depth of the aggregate mixed and non-mixed layer for landscape planting: Proceedings of 35th IFLA world congress, Bali

Summary : Artificial planting layer has stratified bilayer, of which lower layer is made of coarse porous materials for drainage. Optimum layer thickness is investigated under the given soil physical properties and weather conditions in this study. Drying interval between adjacent rains is determined under a criterion depending on soil water potential response for a specified quantity of precipitation (16mm in this case). Logarithmic cumulative distribution of drying interval is well supported by Gaussian distribution and the interval at 95 or 99% probability might be enough in landscape planting because application of irrigated water is hardly required. The weather report in past 30 years gives the slight increase of this interval in metropolitan area of Tokyo, that means desertification of urban area. Interval at 95% becomes 29 days and 64 days at 99% during 1986 to 1990. Then the planting layer thickness was studied by numerical approach of modified Darcy's law to get the drying interval between profiles at saturation and permanent wilting point in average. The results suggest that bilayer required 236mm in thickness at 99% probability for bilayer system, while 424mm for monolayer system which was roughly doubled of bilayer.