樹種と階層構造が異なる樹林地の環境緩和機能に関するシミュレーション

Simulation on the Environment Mitigation Effects of Plant Canopies with Different Plant Species and the Stratification

橋田 祥子* 大森 宏** 奥水 肇*** 松尾 陽****

Shoko HASHIDA Hiroshi OMORI Hajime KOSHIMIZU Yoh MATSUO

Abstract : A high-tree plantation that intercepts noxious ultraviolet rays and forms a cool spot on hot days in summer has high utility value as a field for environment learning, sports and leisure activities, so it is an important constituent of sustainable urban areas. This study proposes an idea of Cool Island Potential (CIP) as a green quantity index to predict both the urban environment relaxation effects and microclimate relaxation function of trees, and demonstrates the appropriateness of using the plant growth model AMAP (Atelier of Modeling of Architecture Plants) in the calculation of CIP, through the actual measurement of Leaf Area Index (LAI). The obtained results are as follows:

1. For the leaf surface area used for the calculation of CIP, the calculation using the polygon data of the plant growth model AMAP is more accurate than the technique of conventional research that substitutes a geometrical body for a tree.
2. CIP that was calculated in an area of 20 m × 20 m has high correlation with MRT and CSE, and it is a green quantity index that can evaluate both the heat island relaxation function and amenity improvement function of a green space.

Keywords: Cool Island Potential, Measurement, Simulation, Plantation, Cool Spot Effect, Mean Radiant Temperature

キーワード: クールアイランドポテンシャル, 実測, シミュレーション, 樹林, クールスポット効果, 平均放射温度

1. はじめに

都市環境のアメニティ (amenity) が著しく重要になった現代においては、日射、風、温度などの気候の因子を取り入れた都市計画や、大気汚染、騒音、煤塵、悪臭、水質汚染・汚濁など、環境に対するマイナス要素を取り除くポテンシャルが高い緑地を形成し、効果的に配置することが求められている。特に高木樹林地は、有害紫外線量が増加する夏季にはそれを効果的に遮蔽¹⁾しながらクールスポットを形成し²⁾、秋季には寒さを緩和する効果も期待できるため³⁾、休憩、学習、レクリエーション等の活動空間として活用度が高い。高齢化社会に向けて環境緩和機能が低い高木樹林地を都市に増やし、林内での戸外活動を活性化させることが望まれる。

2. 研究の目的

本研究の最終的な目的は、現存する都市緑地については整備されている樹木台帳データ (樹種、類別、樹高、枝張り) と植栽平面図 (樹木配置) から、緑地の環境緩和機能の評価が可能であり、これから新規に計画する緑地についてはゾーニング計画および樹種の選択と配置の段階で、林内の景観と環境緩和効果をシミュレーションしうる緑地のデザイン検討ツールを開発することである。

緑地の都市に対する影響に関して山田は、気温と緑被率間の層別因子を含む単回帰分析を行い、緑被率が10%増加した場合の気温の低減割合を時刻毎に算出し、中小都市における都市気温分布には緑被分布が良い説明因子となることを示した⁴⁾。

一方TUTUMIは、今まで緑量指標として一般的であった面的広がりを表す緑被率に対して、地上1.2m地点で水平上向きに撮影した天空魚眼画像の中に占める樹冠の割合すなわち樹冠率 (Green Leaf Factor: 以後GLFとする) を新たに提案し、気温に対する負の相関が高いのは3次元的な緑量指標であるGLF

であると述べている⁵⁾。橋田らは樹林環境を森山²⁾が定義した市街地に対する樹林地の気温低減度 (Cool Spot Effect 以後CSEとする。) と樹林内の平均放射温度 (MRT: Mean Radiant Temperature) で評価し、樹林の緑量を7つの緑量指標 (緑被率、平均樹高、樹木密度、GLF、樹冠投影面積率、高木樹密度、緑視率) で定量化して、樹林環境と緑量間の単回帰分析を行い、緑被率が環境との相関が低いことと、MRTは樹冠投影面積率 (SD)、CSEはGLFから予測可能であると述べている⁶⁾。

本研究では緑地がヒートアイランドなど都市全体の環境改善に寄与する程度を定量的に示す緑量指標CIP (Cool Island Potential) を提案する。CIPはHIP (Heat Island Potential) の符号を変えたものであり、HIPが空間に存在する全ての事物が大气に与える顕熱量の指標であるのに対して、CIPは緑が大气から奪う顕熱量の指標である。本稿では植物の生長に伴う経年変化分も含めて緑地のCIPを予測可能にしうる植物成長モデルを用いたCIPの算定手法について述べる。

3. 研究の方法

(1) 植物成長モデルAMAPについて

植物成長モデルには様々なものがあるが、本研究では生物学的な定量的データ測定と統計処理に基づいている植物モデルであり、樹木形状をモデリングして可視化すると、樹形や葉形などの樹種特性まで描画可能なソフトウェアであるAMAP⁸⁾ (Atelier of Modeling of Architecture of Plants) を用いた。AMAPを用いた既往研究には、森本のAMAP・LANDMAKER (ワークステーションIRIS VGXで稼動) を用いた桂離宮庭園の植生景観のシミュレーション⁹⁾、斎藤らの樹木調査のGISデータとAMAPの樹木による景観予測の実施事例¹⁰⁾、本條らのAMAP画像とVRMLによる実存する緑地の景観画像の作成に関する研

* 明治大学大学院農学研究科 ** 東京大学農学部 *** 明治大学農学部 **** 明治大学理工学部

究¹¹⁾等、景観シミュレーションに関する研究が多く、いずれもAMAPが樹木生成過程における分枝などについて忠実であることによる画像のリアルさに着目しているものである。しかし本研究でAMAPを用いた理由は、景観シミュレーション的なリアルさよりむしろ、1本の樹木画像の生成時に同時に作成されるポリゴンデータを用いて幾何学的手法により、葉面積と幹面積の算出が可能な点に着目したためである。

(2) AMAPを用いた葉面積・幹面積・樹高・葉張りの予測

AMAPを用いて表現可能な樹種は現在のところ360樹種(AMAP Orchestra version3.2)である。本研究ではその中から日本で多用される7樹種を選択してシミュレーションに用いた。

表1に7樹種のAMAP樹種名、和名、学名、表2に類別、樹高、樹形、置換される幾何形態を示す。

表－1 7樹種の名称¹²⁾

AMAP 樹種名	和名	学名
Plane_tree	アメリカスズカケノキ	<i>Platanus occidentalis</i> L.
Camphor_tree	クスノキ	<i>Cinnamomum camphora</i> Sieb.
Maiden_hair_tree	イチョウ	<i>Ginkgo biloba</i> L.
Tulip_tree	ユリノキ	<i>Liriodendron tulipifera</i> L.
Elm-tree	ケヤキ	<i>Zelkova serrata</i> Makino
Dogwood	ハナミズキ	<i>Cornus florida</i> L.
Cedar_blue	スギ	<i>Cryptomeria japonica</i> D. Don

表－2 7樹種の樹木特性¹²⁾

AMAP 樹種名	類別	樹高	樹形	幾何形態
Plane_tree	落葉広葉	15-20	プラタナス型	円柱
Camphor_tree	常緑広葉	20-	クスノキ型	球形
Maiden_hair_tree	落葉広葉	30-45	イチョウ型	円錐
Tulip_tree	落葉広葉	20-30	プラタナス型	円柱
Elm-tree	落葉広葉	20-25	ニレ型	倒円錐
Dogwood	落葉広葉	5-7	ミズギ型	円柱
Cedar_blue	常緑針葉	30-40	モミ型	狭円錐

樹高と葉張りのシミュレーションはAMAPで経年を変えて樹木を生成して求め、葉面積と幹面積については、AMAPで樹木生成時に作成されるポリゴンデータの中から植物部位(葉、幹、枝など)を構成する面データすなわち、数列で格納されている葉などの頂点座標を、数値解析ソフトのPV-WAVEで読み込み、幾何学的手法により算出した。

(3) AMAPによる緑量の予測と実測による検証

国営昭和記念公園内に実存する樹種と階層構造が異なる5つの樹林地を対象として、樹木台帳¹³⁾と植栽平面図のデータを元に、植物成長シミュレーションモデルAMAPとPV-WAVEを用いてSDと、平均樹高(以後AHとする)、葉面積指数(Leaf Area Index, 以後LAIとする)の算出を行った。LAIとは単位面積当たりに存在する葉の表面積である¹⁴⁾。

次に各樹林における温熱環境測定を実施し、CSEとMRTを求めると共に、プラントキャノピーアナライザー(Plant Canopy Analyzer, LAI-2000, LI-COR社)を用いたLAI測定を行い、AHとCSEとの関係、SDとMRTとの関係および、AMAPから算出したLAI値の実測による検証を行った。プラントキャノピーアナライザーとは、森林内と無林地で光強度を測定して得られる光の森林内透過率を採用してLAIを測定する機器である¹⁴⁾。

(4) AMAPを用いたCIPの算出

次にAMAPを用いて算出した葉面積、幹面積を用いてCIPの算出を行った。CIPとは、HIPの概念⁷⁾に由来するものであり、HIPが単位面積あたりの顕熱量の指標であり、空間に存在する全ての空間構成要素が大気を暖めるポテンシャルを意味しているのに対して、CIPは大気を冷却するポテンシャルを表す緑量

指標である。HIPとCIPの算定式を式1、式2に示す。

$$\text{HIP}(\text{°C}) = (\int (\text{Ts} - \text{Ta}) dS) / A \quad \text{式1}$$

$$\text{CIP}(\text{°C}) = (\int (\text{Ta} - \text{Ts}) dS) / A \quad \text{式2}$$

Ts(°C):空間構成要素の微小面の表面温度

Ta(°C):気温

A(m²):樹林の水平面投影面積

S(m²):空間構成要素の微小面の面積

すなわち、CIPが高い緑地ほど、都市を冷却してヒートアイランドを緩和する働きが大きいことを示している。

(5) CIPの算出範囲の決定と樹林のCIPによる評価

CIPが都市気候に対する緑の環境緩和機能だけではなく、人体の快適性に対する緑の環境緩和機能も評価しうる緑量指標になるように、CIPの算出範囲を検討し、異なる樹林地のCIPを算出して評価した。CIP算出範囲については10m、20m、30m、40mを検討し、CIPとMRT、CIPとCSEの相関がそれぞれ最も高くなる算出範囲を求めた。

4. 結果と考察

(1) 植物成長モデルAMAPについて

本研究では既往研究¹⁵⁾で樹冠の形状が似通った幾何形態の表面積として算出してきた葉面積や幹面積を、図1に示すようにAMAPのポリゴンデータを用いて幹と葉に分割し、幹については多面体、葉については多角形として、数列で格納されている全ての辺の長さから幾何学的手法で算出した。幹と葉は熱的物性値が異なり、幹の方が葉面よりも冬季は高温であり夏季は低温であるというように、表面温度の差が大きいため、この分割する方法を温熱環境シミュレーションに採用した。

図－1 AMAPのポリゴンデータを用いた葉と幹の表面積算出

(2) AMAPを用いた樹高・葉張り・葉面積・幹面積の予測

イチョウとアメリカスズカケノキについて求めた樹高と葉張りおよび実木における樹高と葉張りの関係を図2に示し、AMAPで生成した樹木の単木当りの葉面積と幹面積の経年変化を図3、図4にそれぞれ示す。

図－2 AMAPと実木の関係

図-3 葉面積の経年変化

図-4 幹面積の経年変化

(3) AMAP による緑量の予測と実測による検証

MRT 算出に用いた各樹林地における赤外線熱画像を図5に示し、平均樹高 (AH) と MRT との関係を図6、樹冠投影面積率 (SD) と CSE との関係を図7に示す。また、AMAP から算出した LAI 値と実測による LAI との関係を図8、幾何形態の表面積として算出した LAI と実測による LAI の関係を図9にそれぞれ示す。

図-5 MRT 算出に用いた樹林の赤外線熱画像と樹林の優占種
()内は立木密度, 単位: 本/ha

図-6 MRT と AH の関係

図-7 CSE と SD の関係

図-8 AMAP と実測の相関

図-9 幾何形態と実測の相関

図6から二次関数で MRT が最も低くなる AH の最適値があることが示唆された。これは樹高が高過ぎると枝下からの日射透過が地表面を暖め地温が上昇することによると思われる。図7から SD にも二次関数で CSE が最も大きくなる最適値があることが示唆された。これは樹冠が鬱閉し過ぎていると樹林が断熱的に働き

天空放射が阻害されるために樹林内気温の低下が抑制されるという原田らの記述¹⁶⁾に一致する。図8、図9の結果では、AMAP で算出した LAI と実測値とは相関係数が 0.72 だが、幾何形態の表面積と実測値とは相関係数が 0.01 と極めて低かった。以上から樹林環境に大きく影響を及ぼす樹林の LAI は、既往研究のように幾何形態に樹木を置換する方法よりも AMAP を用いたシミュレーションの方が実際に近いという知見が得られた。

(4) AMAP を用いた CIP の算出

5つの樹林地について CIP を算出し、ヒートアイランド緩和機能を比較した。図10に PV-WAVE で作成した樹林画像と PAI 算出結果を示す。但しここでいう PAI とは単位面積あたりの葉面積と幹面積の総和、植物面積指数を示す。

図-10 PV-WAVE による樹林画像と PAI 算出結果

図10で立木密度が 172 本/ha の樹林 C の方が立木密度が 116 本/ha の樹林 E よりも PAI が小さくなり、立木密度よりも樹種特性が樹林の PAI とその経年変化に影響するという知見を得た。

(5) CIP の算出範囲の決定と異なる樹林の CIP 評価

5つの樹林地の CIP を範囲を変えて算出し、その中心地点における温熱環境 (CSE, MRT) との相関を求めた。図11に AMAP を用いて作成した樹林内透視図と CIP 算定範囲を示す。

図11の平面図の中心地点が温熱環境の測定地点である。この点を中心として 10m, 20m, 30m, 40m の範囲について CIP を算出した。図12に算定範囲ごとの CIP と CSE, MRT の相関係数を示す。

図-11 平面図と CIP 算定範囲 (左) と樹林の透視図 (右)

図-12 算定メッシュごとの CIP と環境との相関係数 (n=6)

結果から CIP 算出範囲が 20m×20m の場合の CIP が、CSE、MRT いずれとの相関も高くなる傾向が見られた。以上の結果、算定範囲を 20m×20m とした場合の CIP が、緑地のヒートアイランド緩和機能と快適性向上機能の両方を評価しうる緑量指標として適当であることがわかった。次に、シミュレーションの対象樹木の現在と 10 年後の CIP を算出した。結果を図 13 に示す。

図-13 樹木ごとの CIP 経年変化

図 13 の結果では、クスノキやマテバシイ、キンモクセイなどが優占する常緑広葉樹林 A の方がイチョウやケヤキやアメリカスズカケノキなどが優占する落葉広葉樹林 B や常落混交林 E よりも CIP が 6℃以上も高く、経年による CIP の高まり方も顕著に大きいという傾向が見られた。これは、図 3 のクスノキのように葉面積が大きい常緑広葉樹が多い樹林が、都市のヒートアイランド緩和に効果的であることを示している。しかし、樹林 B や樹林 E もハナミズキのように葉面積の少ない樹種が優占する樹林 C に比較すると、立木密度が小さいにもかかわらず CIP は高いという結果になった。これは大気と等温あるいは低温な葉の総表面積が小さいハナミズキは、その他の樹種よりも近傍空気を冷却する能力が小さいことにも起因するが、それ以上に葉面積が小さいと日射遮蔽効果も小さく、図 5 の熱画像で明らかのように、土地被覆面（芝生）の高温化が著しいためと思われる。また、樹林 B は図 4 で幹面積が大きいアメリカスズカケノキが優占種であること、保水性が高いコケが土地被覆しているなどの理由により夏季の林内の快適性は高かった。

5. まとめ

プラントキャノピーアナライザを用いた LAI 測定による検証を行った結果、緑量やそれにより規定される樹林地の環境をシミュレーションする場合には、既往研究で行われてきた樹木を幾何形態に置換し葉面積を幾何形態の表面積に置換する方法よりも、植物成長モデル AMAP のポリゴンデータから葉の総表面積と幹の総表面積を計算して求めるほうが実際に近いという知見を得た。

また、緑地の都市に及ぼすヒートアイランド緩和機能と、人が緑

地内で感じる熱的快適性を同時に評価することが可能な緑量指標は、20m×20m の範囲について算出した CIP であることが示唆された。

CSE や MRT で樹林環境の快適性を評価すると、CSE が最も大きくなる最適樹高や、MRT が最も低くなる樹冠投影面積率が存在することが明らかになった。これは、人の活動範囲に効果的に緑陰を作る平均樹高（AH）の最適値や、天空放射や大気の流れの妨げにならない樹冠形態の最適値が存在すること、すなわち直達日射を効果的に遮蔽するが表面温度が地表面上の事物に比較して極端に低い天空との間の放射授受の妨げにはならない適切な樹冠開閉度が存在することを意味している。

筆者らは都市緑地の設計では、樹種や階層構造や配植などに十分配慮し、都市生活者の快適性を向上させると同時にヒートアイランドなど都市環境の改善にも寄与する緑地となるように配慮すべきだと考える。環境学習や余暇活動の場として樹林を活用することを念頭に入ると、枝下高さが高く日射を高い位置で遮蔽するような高木樹林が都市緑化には最適であり、常緑広葉樹林と落葉広葉樹林の効果的な配置が都市緑化のポイントであると思う。

今後は、緑地のデザインを検討すると同時に、緑地の環境を CIP、CSE、MRT で評価する設計ツールの開発に取り組む。

謝辞：本条毅千葉大学教授には AMAP および温熱環境測定に関するご指導を賜りました。斎藤馨東京大学助教授には AMAP に関するご指導を賜りました。倉本宣明治大学教授にはプラントキャノピーアナライザを拝借致しました。額田雄三明治大学教授には赤外線熱画像測定装置を拝借いたしました。国土交通省昭和記念公園管理事務所の関係各位には実測調査に御協力戴きました。なお本研究は都市緑化技術開発機構研究助成および、鹿島学術振興財団研究助成を受けて行ないました。以上の皆様に謹んで御礼申し上げます。

引用文献

- 1) 橋田祥子・岡野通明・奥水肇 (2005) : 樹種と階層構造が異なる樹林地と単木の有害紫外線防御機能について : 日本造園学会研究論文集ランドスケープ研究 68(5), 529-532
- 2) 森山正和・河野仁・吉田篤正・宮崎ひろ志・竹林英樹 (2001) : 都市における樹林のクールスポット効果に関する実測データ解析 : 日本建築学会計画系論文集第 541 号, 49-56
- 3) 長谷川梨沙・竹林英樹・森山正和・赤川幸 (2005) : 大規模商業施設屋上庭園における温熱環境評価 : 日本建築学会大会学術講演梗概集, 677-680
- 4) 山田宏之 (1994) : 埼玉県幸手市における夏季の都市気温分布と緑地分布の関連についての解析 : 造園雑誌 57(5), 157-162
- 5) TUTUMI (2003) : Proceedings of 5th International Conference on Urban Climate (ICUC5) vol.2, 301-304
- 6) 橋田祥子・大森宏・松尾陽・奥水肇 (2005) : 樹種と階層構造が異なる樹林地の環境緩和機能に関する実測研究 : 日本建築学会環境系論文集 No.596, 117-122
- 7) 梅干野見 (2002) : 3D-CAD 対応型全表面熱収支シミュレーションによる屋外熱環境の設計支援ツール : 平成 13 年度ヒートアイランド現象対策手法調査検討業務報告書
- 8) 本条毅 (1991) : 植物の成長シミュレーションとコンピュータグラフィックス : PIXEL, No.109, 133-140
- 9) 森本 (1993) : 植物モデリング・可視化システムを用いた桂離宮庭園の植生景観のシミュレーション : 造園雑誌 57(2), 113-120
- 10) 斎藤馨・熊谷洋一・本条毅・趙東範・吉岡太郎・筒井一貴 (1995) : GIS, CAD, 植物成長モデルを応用した景観シミュレーション手法に関する研究 : 日本造園学会ランドスケープ研究 58(5), 197-200
- 11) 本条毅・林恩美・丸田頼一 (1999) : VRML による景観可視化 : 日本造園学会ランドスケープ研究 62(5), 665-668
- 12) 林弥栄・古里和夫・中村恒雄 : 原色樹木大図鑑
- 13) 国土交通省国営昭和記念公園樹木台帳 (1992), 国土交通省国営昭和記念公園管理事務所
- 14) 橋本哲 (1997) : 森林の幾何学的構造を用いた林内放射量と林内融雪量の推定手法に関する研究 : 岩手大学博士論文, 5-19
- 15) YUN・梅干野見 (1999) : 熱収支数値シミュレーションによる都市緑化の評価 : 日本建築学会計画系論文集 第 520 号, 69-75
- 16) 原蘭芳信・村上智美・林陽生 (1990) : 密度が異なるアカマツ林の緑陰の熱環境特性 : 日本造園学会ランドスケープ研究 53(5) 233-238