

樹木モデルを用いた植物個体光合成量の計算手法

A Method for Photosynthesis Rate Calculation of Plants using Functional-Structural Plant Models

小島 倫直* 本條 毅** 梅木 清**

Michinao KOJIMA Tsuyoshi HONJO Kiyoshi UMEKI

Abstract: A method for computing photosynthesis rate of a tree using realistic plant models, AMAP, is discussed in this paper. Photosynthetic rate calculation is an important factor to estimate the growth rate of plants and landscape dynamics in green spaces. However, photosynthesis of plants is difficult to compute because of plants' complex three-dimensional structures composed of leaves, branches and trunks. Complicated structure makes it hard to quantify irradiation intensity caught by each leaf, which is a major factor to define photosynthetic rate. On another front, simulation models which recreate a plant structure inside computer make progress. This enables simulating light acquisition of leaves by ray-tracing methods. Accordingly we compute photosynthesis rate in a sunny summer day using AMAP plant models. The results show that photon weight for ray-tracing greatly influence the amount of photosynthesis rate, and should be set carefully according to target scale. And these calculations suggest that an impact of light shading by branches is slightly large. This method can be applied to a simulation of plants dynamics, for example. And such a simulation will be expected to offer new insights of the landscape managements.

Keywords: photosynthesis, functional-structural plant models, landscape dynamics, green space management

キーワード: 光合成量, 樹木モデル, 景観変遷, 緑地管理

1. はじめに

都市緑地は、都市における生物種保全、物質循環、住民のレクリエーションの場提供など機能観点から重要性が認識されるようになった。それとともに機能を発揮させるための植生の質、および質を維持・向上するための経時的な管理の在り方が計画において重要になっている。このために植生の質が機能に与える影響を定量化するとともに、植生の空間構造および空間動態を把握することによって、時間軸の空間構造変化プロセスを予測して計画を立案する必要がある。

都市緑地の植生動態に関しては、中〜大規模緑地を中心に知見の集積¹⁾が進められてきている。また、植生構造については、近年のレーザー観測の進歩から詳細な立体構造観測が可能になり²⁾実践的な活用³⁾が進められている。さらにはCG分野においてはリアリティのある植物成長シミュレーションも行われており、現実・仮定の両面から植生構造把握手法が進歩している。こうした動態と構造の知見を活用することで、植生変化のプロセスを考察することが可能になる。

プロセスを説明するには、植物の生理反応や生長戦略など多岐にわたる反応の理解が必要になる。その反応の中でも最も基本的な定量指標の一つが、植物個体の光合成量である。この光合成量定量評価を植生変化プロセス解明において大切な構成要素と捉え、立体的な植生空間構造における光合成計算手法について考える。具体的には、植物CGモデルを用いた植物個体光合成量算出手法について考える。用いる手法の特徴は次の二点になる。

1. CG樹木モデル(AMAP)を計算モデルとして利用

2. モンテカルロ法によるレイトレーシングで受光量を評価

立体的な植生構造における光合成量の推定方法は、1950年代⁴⁾から現在まで数多くの重要な知見が蓄積されている。主体となる考え方は、空間を格子もしくは層で分割し、格子内の平均葉面積および葉面角度分布関数を設定して植生内放射環境を解析⁵⁾することによって、植生の光合成量を算出するというものである。

本報では、こうした葉の空間平均化は行わず、単葉スケールの樹木モデルに対して、モンテカルロ法に基づく計算光子群でレイトレーシングを行い光合成量を算出する。これにより単葉スケールで計算を行う場合の留意点や長所・活用方法について考える。

2. 計算モデル

(1) 樹木モデル

樹木モデルにはAMAPシステム⁶⁾で生成されたクスノキ(*Cinnamomum camphora*)状モデルを用いた。AMAPは、既往の研究でも景観シミュレーション⁷⁾や熱・光環境評価^{8,9)}など様々な用途に利用されている。今回用いたモデルの外観とパラメータを図-1に示した。モデルは一般的なクスノキと同様に、密に葉を付けてまとまった樹冠を再現している。一方、平均葉面積は232.0 cm²/枚となっており、実際の葉面積よりかなり大きくなっている。これは一部のAMAP樹木モデルは景観再現に重点を置かれており、葉面積などのパラメータが簡略化されているためである。ただし、既往文献¹⁰⁾で報告されているクスノキ高木のLAI(4.3~13.4)や総葉面積(120.0~510.0m²)など、基本的な樹木特徴は十分に捉えられており、植物個体光合成計算手法の検証には利用可能と判断して本モデルを採用する。



クスノキ状モデル

樹高	: 11.88m
葉張	: 12.12m, 10.46m
葉面積	: 447.1m ²
葉枚数	: 20,560枚
樹冠投影面積(葉張楕円)	: 99.6m ²
LAI	: 4.79

図-1 樹木モデル概要

*竹中工務店技術研究所 **千葉大学園芸学研究科

葉は、1枚ごとに面積・法線ベクトル・中心点を算出して受光計算を行う。光合成反応速度は、5年生クスノキ苗木の樹冠外縁部陽葉について葉温 $25 \pm 1^\circ\text{C}$ 、飽差 $1.1 \pm 0.1\text{kPa}$ の理想環境下で実測した。光合成反応速度は、非直角双曲線式(1)で近似される。

$$A = \frac{A_{\max} + \varphi I + \sqrt{(A_{\max} + \varphi I)^2 - 4A_{\max}\varphi I\theta}}{2\theta} - R \quad (1)$$

(A: 光合成反応速度 [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2\text{s})$] A_{\max} : 最大光合成反応速度 [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2\text{s})$])

(I: 光量子量 [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2\text{s})$] φ : 初期分配 θ : 凸度 R : 呼吸量 [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2\text{s})$])

実測結果の1サンプルより、 A_{\max} : 15.52, φ : 0.0328, θ : 0.8098を用いる。光-光合成曲線を図-2に示した。

(2) 計算系

計算は、幅 $12.5\text{m} \times$ 奥行 $11.0\text{m} \times$ 高さ 12.5m 領域の系を設定して行う。領域下部平面を地面、上部平面を天空、その他4平面を周辺境界と呼ぶ。地面領域の中央に前述の樹木モデルを設置する。これにより系の要素は、1)天空、2)地面、3)周辺境界、4)葉、5)幹枝の大きく5種類に分類される。

この計算系に天空領域から光子を射出してレイトレーシングを行う。計算対象は、6月29日 晴天日、緯度 35.66° 経度 139.75° 地点を設定した。

(3) 計算光子モデル

モンテカルロ法によるレイトレーシングでは、日射条件に基づき、予め定めた射出光子密度で光子群をランダム生成して、一つ一つの光子軌跡を追跡する。その過程で葉などの要素に衝突して光子が吸収され、受光量として加算される。最終的に光子群の光子全てについて観察を完了することで、各要素の光量子吸収量が評価できる。つまり、光子射出、光子の要素への衝突観察、光子追跡の終了判定を繰り返すのが本手法の計算フローとなる。

本報では、この1)射出光子の設定、2)光子の要素衝突時における振舞い、3)光子の追跡終了判定について、以下のように設定を行った。なお、 ρ_i ($i=1,2,3,\dots$)は、それぞれ独立した0から1までの乱数を示すものとする。

1) 計算光子の射出

レイトレーシング計算のために天空から射出される光子は、対象計算時間の日射量(光量子量)に応じた重みと、日射方位に応じた射出ベクトルを持つ。射出点は乱数によって設定される。

光子は直達光・散乱光成分を区別して射出する。計算を簡略化するため、直達日射の光子方向は太陽高度・方位から一意に定まるとする。散乱日射は均等拡散しているものとして、光子方向は3次元空間の Lambert 余弦則に従うとする。射出計算光子に関する式を、表-1に示した。

2) 計算光子の要素衝突時における振舞い

射出された光子は、葉など要素と衝突した際に吸収・反射・透過する。地面、幹・枝および葉の反射・透過は、均等拡散として方向を決定する。葉面の反射・透過判定は、乱数を用いた手法¹¹⁾を用いた。地面と幹・枝の反射率は15%、吸収率は85%に設定した。単葉の反射率・透過率は、分光光度計による400nm~700nm領域の実測結果から、それぞれ6.40%、4.25%とし、吸収率は残差の89.35%に設定した。

一方、周辺境界に衝突した光子は対面する境界から方向ベクトルを保ちつつ射出される(周期境界条件)。これにより光子は系外に逃げず、天空、地面、幹・枝要素のいずれかに必ず吸収され、周辺に遮蔽物のない孤立木と見なす計算が可能になる。衝突要素ごとの振舞いを表-2に示した。

3) 計算光子の追跡終了判定

各光子の計算終了は、天空への衝突もしくはロシアンルーレット法¹²⁾による終了判定で行われる。表-3にロシアンルーレット法を示した。この手法は、ある下限閾値で強制的に計算を打ち切

る方法とは異なり、系全体の光子重み総量を保存しつつ、効率的に追跡終了判定ができるという優れた性質を持っている。ロシアンルーレット法を適用する判定閾値 w は、初期光子重みの1.0%として判定を行った。判定の結果、光子重みが0となった時に対象光子の計算を終了して、次の光子計算に移る。

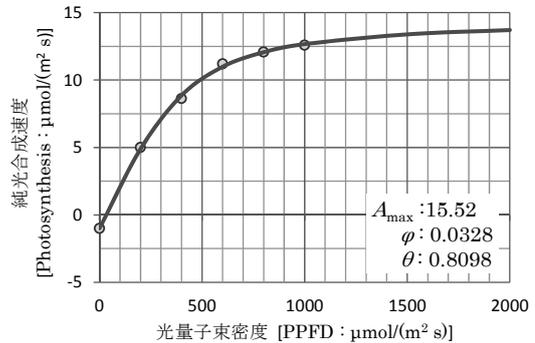


図-2 単葉の光-光合成曲線

表-1 計算光子の射出に関する式

[直達日射の射出光子]	
・ 射出光子数	$N_{\text{photon}} = D_{\text{photon}} x_{\text{max}} y_{\text{max}} \quad (2)$
・ 射出点	$(x, y, z) = (\rho_1 x_{\text{max}}, \rho_2 y_{\text{max}}, z_{\text{max}}) \quad (3)$
・ 射出方向	$(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z}) = (\cos \theta \cos \varphi, \cos \theta \sin \varphi, -\sin \theta) \quad (4)$
・ 光子重み	$W_{\text{photon}} = Q_{\text{dir}} / D_{\text{photon}} \quad (5)$
[散乱日射の射出光子]	
・ 射出光子数, 射出点	直達日射と同様
・ 射出方向	$\theta = \arccos \sqrt{\rho_3} \quad \varphi = 2\pi\rho_4 \quad (6)$
	$(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z}) = (\cos \theta \cos \varphi, \cos \theta \sin \varphi, -\sin \theta) \quad (7)$
・ 光子重み	$W_{\text{photon}} = Q_{\text{dif}} / D_{\text{photon}} \quad (8)$
N_{photon} : 光子数[個] D_{photon} : 光子密度 [$\mu\text{mol}/\text{m}^2$] $x_{\text{max}}, y_{\text{max}}, z_{\text{max}}$: 各軸領域範囲[m] θ : 太陽高度[rad] φ : 太陽方位[rad] W_{photon} : 光子重み [$\mu\text{mol}/(\text{s}\cdot\text{個})$] Q_{dir} : 直達日射由来の光量子量 [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2\text{s})$] Q_{dif} : 散乱日射由来の光量子量 [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2\text{s})$]	

表-2 計算光子の要素衝突時における振舞いに関する式

[天空要素への衝突]	
・ 光子吸収	$R_{\text{photon}} = W_{\text{photon}}$ (すべて吸収) (9)
・ 光子方向	計算終了
[地面、幹・枝要素への衝突]	
・ 光子吸収量	$R_{\text{photon}} = W_{\text{photon}} Ab_i \quad (10)$
・ 光子方向	$\gamma = \arccos \sqrt{\rho_5} \quad \omega = 2\pi\rho_6 \quad (11)$
[葉要素への衝突]	
・ 光子吸収量	$R_{\text{photon}} = W_{\text{photon}} Ab_i \quad (12)$
・ 光子方向	$\gamma = \delta + \arccos \sqrt{\rho_7} \quad \omega = 2\pi\rho_8 \quad (13)$
	$\delta = 0 \begin{cases} (\Omega' \cdot \Omega_L) < 0 \ \& \ \frac{Rf_L}{Rf_L + Tr_L} > \rho_9, \text{ [反射判定]} \\ \text{or} \\ (\Omega' \cdot \Omega_L) > 0 \ \& \ \frac{Rf_L}{Rf_L + Tr_L} < \rho_9, \text{ [透過判定]} \end{cases}$
	$\delta = \pi \quad \text{otherwise} \quad (14)$
R_{photon} : 吸収光子重み [$\mu\text{mol}/(\text{s}\cdot\text{個})$] Ab_i : 要素iの吸収率[-] γ : 法線ベクトルになす角度[rad] ω : 法線ベクトルを軸とする回転角度[rad] Ω' : 入射光線ベクトル Ω_L : 葉面法線ベクトル Ω : 反射・透過光線ベクトル Rf_L : 葉面反射率[-] Tr_L : 葉面透過率[-]	

表-3 計算光子の追跡終了判定に関する式

$W_{\text{photon}} < w/2$ の時	
	$W'_{\text{photon}} = 0 \begin{cases} \rho_{10} \geq W_{\text{photon}} / w \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \end{cases} \quad (15)$
	$W'_{\text{photon}} = w \begin{cases} \rho_{10} < W_{\text{photon}} / w \end{cases}$
w : ロシアンルーレット判定にかける光子重み閾値 [$\mu\text{mol}/(\text{s}\cdot\text{個})$] W'_{photon} : ロシアンルーレット判定の結果得られる光子重み [$\mu\text{mol}/(\text{s}\cdot\text{個})$]	

3. 計算に必要な光子数の検討

(1) 計算光子数が結果に与える影響

乱数を用いて計算光子群を生成するモンテカルロ法では、計算光子数が結果の精度に影響を与える。光子数が少なく、計算負荷が小さいほど早く結果は得られるが、精度が低くなる可能性がある。そこで天空から射出する1m²当たりの計算光子数(計算光子密度と呼ぶ)を、7段階[10, 25, 50, 100, 200, 400, 800]設定して計算結果の比較を行った。

図-3に各葉受光量結果を積算した葉群受光量を樹冠投影面積で割った値(樹冠光子束密度)を、計算光子密度ごとに示した。計算結果は、計算光子密度が変化してもほとんど変化はなく、すべての時間にわたって時間平均値±2.5%の間に収まっていた。樹冠スケールで見ると、計算光子密度が10個/m²程度でも十分な精度で結果が得られると考えられた。

次に、各葉の受光量結果から、葉毎に式(1)より純光合成速度を算出した後に積算を行い、樹冠投影面積で割った純光合成速度(樹冠純光合成速度)を算出した。樹冠光子束密度に対する樹冠純光合成速度をプロットした結果を、図-4に示した。樹冠光子束密度とは異なり、樹冠純光合成速度は、計算光子密度の違いが大きく結果に影響していることがわかる。光子密度が密になるにつれ、樹冠純光合成量は上昇を示した。光子密度が800個/m²の時と10個/m²の時では、得られた結果に5倍以上の差があり、非常に大きな差が観察された。

そこで単葉レベルの反応を確認するため、図-5に計算光子密度ごとの単葉受光量のヒストグラムを示した。縦軸・横軸ともに常用対数で結果を示している。計算光子密度10個/m²の時、光子束密度が10,000 μmol/(m²s)以上という光合成反応飽和光を大きく上回る極めて高い受光量結果を示している葉がある。密度が密になるにつれて、飽和光に達する受光子束密度3,162 μmol/(m²s)以上(log₁₀(PPFD)>3.5)の葉が減っていき、飽和光以下の受光をする葉の頻度が増えることがわかる。これは光子密度が疎の時、単葉スケール(平均葉面積232.0cm²)に対して光子初期重みが大きく、少ない光子の衝突回数で飽和光に達した葉が多いことが原因として考えられた。飽和光に達すると、その後は受光量が増えても光合成速度はほとんど上がらない。これにより光子密度が疎の時、樹冠光子束密度は同じでも飽和光を受けた葉が多いため、純光合成速度が低くなったと説明できる。

(2) 計算光子密度の設定方法

樹冠スケールで受光量の計算結果を見た場合は、計算光子密度が疎でも十分な精度が得られることがわかった。一方、単葉スケールで受光量の計算結果を見た場合は、計算光子密度が結果に大きく影響を及ぼしていた。さらに、得られた単葉受光量から光合成速度算出を行い積算した樹冠純光合成速度結果は、無視できない大きな差が計算光子密度の違いで生じた。

以上より、計算光子密度を設定する際には、“計算対象スケール”および“現象の光に対する反応性”について考慮した上で、計算光子密度設定を行う必要がある。また、光子密度が結果に影響する場合は、計算時間コストと精度向上ベネフィット両面から考えて妥当な計算光子密度を設定する必要がある。

密度設定の検討では、計算光子密度に対して得たいパラメータをプロットして考えることが有効と考えられる。図-6に、計算光子密度に対する樹冠受光子束密度1,300±15 μmol/(m²s)時の樹冠純光合成速度結果を示した。グラフは光子密度が密になる初期に大きな立ち上がりを示し、その後収束していった。計算光子密度を時間コスト、純光合成速度を計算精度と考えると、グラフの傾きが時間に対する精度向上の効率と考えることができる。この“効率”と数値実験上“必要と考える精度”との兼ね合いで、計算光子密度設定を行う。

本検討では、光子密度が200個/m²以上になると、グラフの傾きが緩やかになり精度向上効率が低くなることが示された。また、プロットを非直角双曲線の式(1)で近似すると、光合成速度は17.93 μmol/(m²s)に収束する結果となった。計算光子密度400個/m²の時、純光合成速度は16.93 μmol/(m²s) [94.5%]を示しており、この光子密度で十分な精度が得られると判断した。

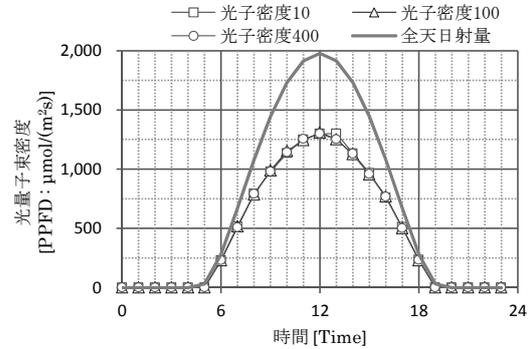


図-3 計算光子密度が樹冠光子束密度に与える影響

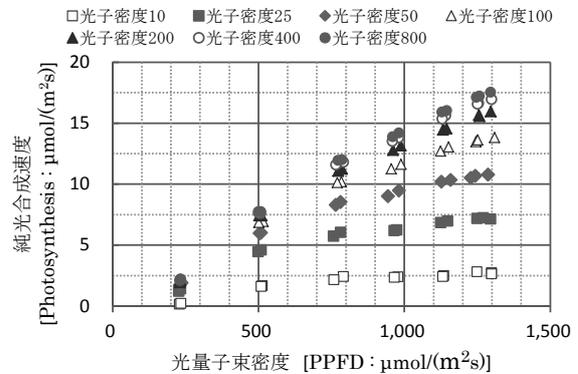


図-4 計算光子密度が樹冠純光合成速度に与える影響

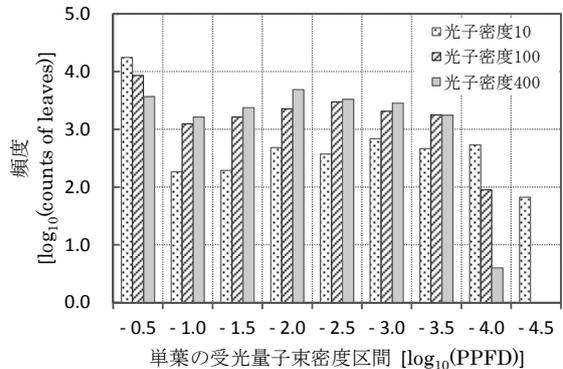


図-5 単葉の受光子束密度ヒストグラム

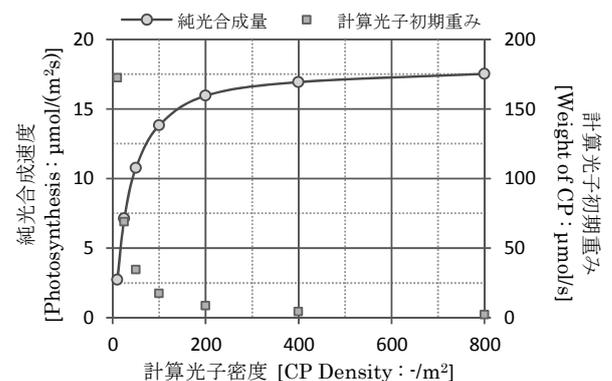


図-6 計算光子密度に対する光合成速度変化

なお、この時の光子初期重みの単葉に対するインパクトは214.8 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\text{s})$ であった。以降は、光子密度400個/ m^2 の結果を示す。

4. 単葉スケールの解析で得られる結果

(1) 植物個体内の光合成反応分布

図-7に葉毎の直達・散乱受光量および光合成速度について、9時と15時における空間分布結果を示した。時間とともに特に直達日射受光部位が変わり、光合成速度が高い部位が変化することが示された。単葉スケールで解析することで、受光部位を詳細に把握・評価することができた。

(2) 非同化部による遮蔽が光合成に与える影響

図-8に要素ごとの受光割合経時変化を示した。今回のモデルでは、葉と地面要素が多く受光していた。また、非同化部の幹・枝受光量は葉群受光量の13.3%~28.4%であった。

こうした非同化部による遮蔽が樹冠純光合成量に与える影響を知るため、幹・枝要素がない場合の光合成量を算出して比較を行った。結果を図-9に示した。幹・枝考慮の有無に関わらず、樹冠純光合成曲線は単葉よりも光飽和に達しにくい様子が観察された。これは群落光合成で一般に言えることであり、単木でも葉の集合として解析することで同様の傾向が得られた。

幹・枝の遮蔽がない場合は、葉群の受光量が増えた。また同じ葉群受光量でも幹・枝付近の低い受光量だった葉により光が差すことで高い光合成量を示した。同じ太陽日射を受けた場合、幹・枝による遮蔽を考慮しない時は、考慮した時に比べて19.7%~40.3%高い値を示した。非同化部の遮蔽による光合成への影響は、葉と幹・枝の相対的な空間分布に依存するため一般化は難しいが、必要とする解析精度によっては留意を要する可能性が示唆された。

(3) 単木の期間CO₂固定量算出

得られた単木光合成速度をもとに期間CO₂固定量を算出することができると、植生変化の予測などに活用が可能になる。そこで、CO₂吸収量と呼吸量からCO₂固定量算出を試行する。

図-8で得られた結果に呼吸量を足して総光合成速度を得たのち、天空日射量に対してプロットし直し、式(1)で近似式を得た ($A_{\text{max}}:36.18$, $\phi:0.040$, $\theta:0.0075$)。この近似式を拡張アメダス標準気象データの日射量に対して適用し、期間総光合成量を算出した。計算は好適環境となる4/15~7/15の三か月に対して行った。この結果、期間CO₂吸収量は235.6kgと算出された。

一方、根を含む植物全体呼吸量は、下記式が提案¹³⁾されている。

$$Y = 1 / (1 / (201.87 \cdot M^{1.408}) + 1 / (0.410 \cdot M^{0.805})) \quad (16)$$

(Y: 植物全体呼吸量[$\mu\text{mol}/\text{s}$] M: 植物生重量[kg])

クスノキの木質部生重量は、既往研究¹⁴⁾から下記式で算出できる。

$$M = 0.0377 \cdot X^{2.64} / W \quad (17)$$

(X: 胸高直径[cm] W: 生乾重比(0.332とする))

今回のクスノキ樹木モデルは胸高直径34.8cmで、植物全体の生重量は1333.4kg、呼吸速度は134.4 $\mu\text{mol}/\text{s}$ 、三か月間のCO₂呼吸量は46.0kgと算出された。この結果、CO₂吸収量と呼吸量の差から期間CO₂固定量は189.6kgと算出された。

以上、好適温度となる三か月間の期間CO₂固定量算出を行った。今後年間を通したCO₂固定量算出および算出精度向上には、特に次の検討が必要となると考えられる。1)着葉位置の光環境差異に伴う葉の光合成反応速度の差異評価、2)光合成量・呼吸量の温度など環境ストレス依存性評価、3)着葉・落葉に伴うCO₂収支評価、これらのモデル改良および検証を行うことで、実用的な植物個体の光合成量・生長量評価モデル構築を目指していく。

5. まとめ

樹木モデルを用いた単葉スケール解析は、計算光子密度に留意することで葉面受光空間分布把握や非同化部遮蔽影響などの検討

を可能にする。今後通年の光合成速度や呼吸量データと付合せることで、光環境解析による景観動態把握等への応用が期待できる。

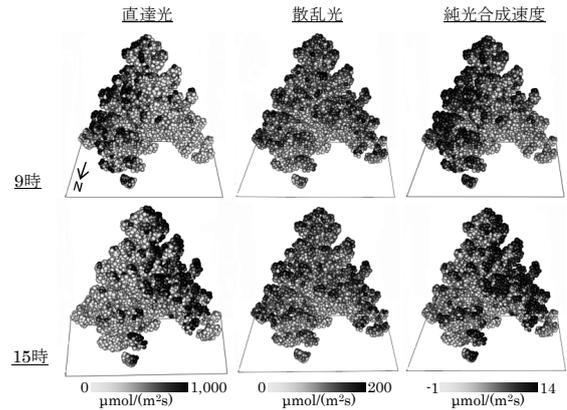


図-7 単葉受光量・純光合成速度の空間分布経時変化

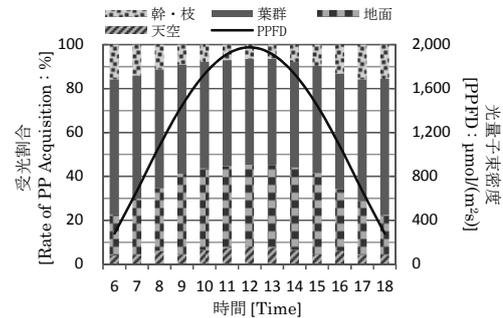


図-8 要素ごとの受光割合経時変化

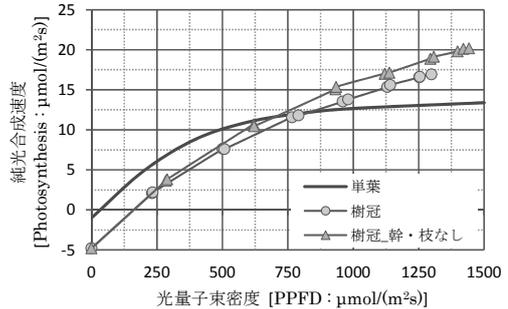


図-9 幹・枝要素が光一樹冠純光合成曲線に与える影響

引用文献

- 田端敬三・橋本啓史・森本幸裕・前中久行 (2004): 緑の森におけるクスノキおよびニレ科3樹種の生長と動態: ランドスケープ研究 67, 499-502
- 加藤顕・石井弘明・榎木勉・大澤晃・小林達明・梅本清・佐々木剛・松英恵吾 (2014): レーザリモートセンシングの森林生態学への応用: 日本森林学会誌 96, 168-181
- 押尾晴樹・浅輪貴史・梅干野晃・宮坂聡(2015): マルチリターン航空機LiDARデータと植生放射伝達モデルによる都市緑化樹木の日射遮蔽効果の計量化: 日本リモートセンシング学会誌 35, 10-23
- Monsi M., Saeki T. (2005): On the factor light in plant communities and its importance for matter production. *Annals of Botany* 95: 549-567
- Ross J. (1975): Radiation exchange in plant canopies. *Heat and Mass Transfer in the Biosphere Scripta Book co.*: 327-336
- 本條毅(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(199), 133-140
- 森本幸裕(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シミュレーション: ランドスケープ研究 57, 113-120
- 橋田祥子・大森宏・木村謙・加治屋亮一・酒井孝司(2007): 植物成長シミュレーションによる緑地設計・環境評価ツールの開発: ランドスケープ研究 70, 539-542
- 熊倉水子・中大達千晶・梅干野晃(2012): CGの樹木モデルを用いた単木落葉樹の木漏れ日の分布に関する数値解析: ランドスケープ研究 74, 637-640
- 独立行政法人環境再生保全機構(2006): 大気浄化植樹マニュアル: 64pp
- Antyufeyev V.S., Marshak A.L.(1990): Monte Carlo method and transport equation in plant canopies. *Remote Sensing of Environment* 81: 183-191
- Kobayashi H., Iwabuchi H.(2008): A coupled 1-D atmosphere and 3-D canopy radiative transfer model for canopy reflectance, light environment, and photosynthesis simulation in a heterogeneous landscape. *Remote Sensing of Environment* 112: 173-185
- Mori S., et al.(2010): Mixed-power scaling of whole-plant respiration from seedlings to giant trees. *Proceedings of the Natural Academy of Sciences* 107: 1447-1451
- 松江正彦・長濱清介・飯塚康雄・村田みゆき・藤原直夫(2009): 日本における都市樹木のCO₂固定量算定式: 日本緑化工学会誌 35, 318-324