

## 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

## Numerical Analysis of Solar Shading Ratio Distribution of a Deciduous Tree Using CG Tree Model

熊倉 永子\* 中大窪 千晶\*\* 梅干野 晁\*

Eiko KUMAKURA Kazuaki NAKAOHKUBO Akira HOYANO

**Abstract:** In order to develop a numerical tree model for calculating the effects of solar shading by a tree, it is important to focus on sunlight distribution, which is the light falling onto ground through the tree. Sunlight on the ground has not only a psychological impact but also a physical impact, such as increasing the surface temperature distribution. Thus, this paper discusses sunlight distribution on the ground through a numerical analysis of the differences between tree species, using CG tree models. Three deciduous tree species, with different crown shapes, were chosen. There are popular shade trees in Japanese streets. The sunlight ratio distribution of each tree was computed by the ray-tracing method on the summer solstice in Tokyo at 12:00 and 17:00. It is clear from this analysis that the tree's geometrical shape, which depended on the species, created different tendencies of sunlight distribution on the ground at each solar altitude. The oval-shaped tree showed little change with the different solar altitudes. On the other hand, the cone-shaped and vase-shaped changed depending on solar altitude.

**Keywords:** deciduous tree, solar shading ratio, numerical analysis, tree model, CG tree model

キーワード：落葉樹，木漏れ日率，数値解析，樹木モデル，CGモデル

## 1. はじめに

都市建築空間に植栽される樹木は、景観の向上に加え夏季の暑い日差しを遮ることや、通路を分ける区画としての利用等、それぞれの立地における空間形態や用途に合わせ、様々な意図の植栽計画に用いられている<sup>1)</sup>。木陰空間を生活の場として利用する観点からは、緑陰の心地よさをアンケート調査から明らかにする研究<sup>2)</sup>や、植栽下の光環境に着目し植栽の空間構成を分析する研究<sup>3)</sup>等、木漏れ日に着目した研究が行われている<sup>4)</sup>。実際の設計実務でも、屋外生活空間における樹木の配置等のデザインを提示する際は、CGによって木漏れ日のイメージが表現されている。このように、都市建築空間において、木陰のある屋外生活空間をイメージするためには、木漏れ日は重要なパラメータの一つとして挙げられる。

その一方で、木陰空間を太陽放射との関係から捉えようと、葉1枚<sup>5)</sup>、単木<sup>6)</sup>から街路樹のような列植<sup>7)</sup>、樹林<sup>8)</sup>、森林<sup>9)</sup>まで、造園学や建築学、気象学等、多岐にわたる分野において、それぞれ異なるスケールごとに、これまで数多くの実測が行われており、その現象が明らかにされてきた。更に、樹影となった地表面における表面温度分布などの木陰空間における快適性に関わる効果を、数値解析によって予測・評価するために、モデル化に取り組む研究も多数行われている<sup>10)</sup>。しかしこれらの多くは、樹種や季節変化に伴う着葉状況、成長等による変化はほとんど考慮されていないため、様々な意図で植栽される空間の違いを予測・評価することは難しい。

また、樹影となった地表面における直達日射の日積算値や年変化等は、光合成や植物生産の観点で農学や植物学の分野<sup>11)</sup>で明らかにされているものの、太陽位置によって時々刻々と変化する樹影内の直達日射の割合やその分布に言及しているものはあまり見られない。

本研究で対象とする都市建築空間における樹木の日射遮蔽は、樹種や樹冠形状、着葉状況等の樹木の形態に加え、植栽地周辺の

建物の空間形態や、樹影となる地表面の構成材料との関係も影響する。筆者らは、樹影内に直接到達する太陽位置別の直達日射の割合を木漏れ日率と定義している。木漏れ日率は樹種、着葉状況等の樹木の3次元構造の違いを再現できることが、CGで作成した樹木の3次元モデルを用いた数値解析から示されている<sup>12)13)</sup>。樹木による日射遮蔽効果は、樹影内における木漏れ日率とその分布状況が樹種により異なり、既報<sup>12)</sup>では木漏れ日率に影響を与える樹木の3次元構造を表す指標を明らかにしている。そこで本報では更に、木漏れ日の分布状況と樹木の3次元構造との関係を対象とする。

本報では、樹木の分岐構造と木漏れ日率が異なる3樹種について、樹影内に占める木漏れ日の分布の違いを、それらの形態と太陽位置との関係から解析することを目的とする。解析方法は、既往研究<sup>12)</sup>と同様にして、樹種ごとの幾何的形態が再現可能なCGで作成した、葉が繁茂した夏季を想定した樹木の3次元モデルを用いる。

## 2. 解析方法

## (1) 本研究における木漏れ日率の定義

木陰空間の放射環境の実態把握や数値モデル化に関する研究は、熱環境<sup>7)</sup>をはじめ、光環境<sup>11)</sup>や紫外線環境<sup>14)</sup>など、様々な波長域で行われている。樹影となった地表面や建物壁面における放射環境を図-1に示す。直達放射成分が到達する部分に加え、枝葉による多重反射や、葉の透過等の影響が挙げられるが、樹影となった地表面や建物壁面の表面温度分布を算出する上では、これらの影響は小さいことが既往研究<sup>12)</sup>により確認されている。そこで本研究ではまず直達放射成分のみ扱い、図-1に示すように、樹冠内の枝葉の隙間から入射する太陽位置別の直達放射成分が、樹影内に占める割合を木漏れ日率と定義し解析に用いる。

## (2) 解析に用いる樹木のCGモデル

樹木のCGモデルの作成には、樹木の成長点における成長、消

\*東京工業大学総合理工学研究科

\*\*佐賀大学大学院工学系研究科

減、休眠の確率分布の結果が樹形に反映される De Reffye らの Architectural model を基にモデル化<sup>15)</sup>され、様々な樹種の CG が作成可能なソフト (natFX) を、汎用 3DCG ソフト (3dxMAX) 上で使用した。このモデルは、L-SYSTEM 等の数学的手法に加え、定量的な樹種ごとの実測データが考慮されており、成長の過程において樹種別に異なる成長サイクルが与えられている<sup>16), 17)</sup>。本報では、分岐構造が異なる高木落葉樹 3 種を解析対象とし、樹種別にランダムに生成される様々な樹形の中から、無剪定で健康に生育し、葉が繁茂した夏季の単木落葉樹を想定し、樹種別の個体差を考慮して各 10 本ずつ<sup>18)</sup>同程度の樹冠体積と類似した樹冠形状を持つ CG モデルを解析に用いた。

### (3) レイトレーシング法を用いた木漏れ日率の算出

木漏れ日率の算出は、既往研究<sup>12)</sup>と同様にして、任意の樹木の CG モデルや太陽位置に対応するよう、レイトレーシング法を用い、太陽位置別に樹木の投影面を作成し、それを用いて木漏れ日率を算出した。太陽位置は、東京夏至の最も太陽高度が高い 12 時と、太陽高度が低い 17 時の値を用いた。図-2 に示すように葉が最も小さいケヤキを対象に、100 mm から 1 mm まで変化させて検討を行った結果、葉や枝が再現でき十分収束域に達している 5 mm とした。

### (4) 解析対象の樹木の特徴

全国の街路樹に使用されている頻度が高く<sup>19)</sup>、夏季に大きな緑陰空間が創出可能な高木落葉樹の中で、樹冠形状が異なり、更に既往研究<sup>13)</sup>より夏季の木漏れ日率が大きく異なる、イチョウ (円錐型)、プラタナス (卵型)、ケヤキ (盃型) の 3 樹種を解析対象とした。各樹種の幾何的形態の特徴を比較するため、汎用 3DCG ソフト上で、葉・幹・枝に分け STL 形式で出力したポリゴンデータから、樹高、葉張り、枝下高、葉面積指数を算出した。更に、

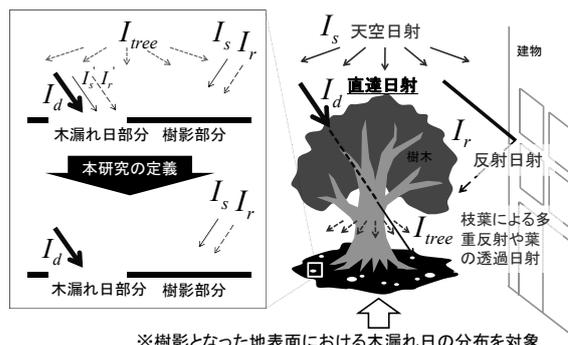
(3) の方法を用いて東京夏至の 12 時と 17 時の太陽高度において木漏れ日率も算出し、各樹種 10 本の平均値を表-1 に示した。また、図-4 に各樹種の 12 時及び 17 時における木漏れ日の投影画像の一例を示した。

ケヤキの木漏れ日率は 6-8 % と最も小さく、次にプラタナス、イチョウの順で木漏れ日率が高くなり、イチョウの木漏れ日率はケヤキの 2.5 倍程度であった。同一樹種では、太陽位置によって木漏れ日率の値は大きな変化が見られないが、いずれも太陽位置が低くなると木漏れ日率の増加が確認された。

図-4 の例をみると、樹種によって木漏れ日の割合が大きく異なることは明らかであるが、同一樹種においても、太陽位置と樹木の幾何的形態との関係によって、投影される樹影の面積や形状と木漏れ日の分布状況の違いがみられた。更に、同じ太陽位置でも、樹種によって樹冠形状や樹高、葉張り等の樹木の幾何的形態に違いがあることから、投影画像内の木漏れ日の分布状態の特徴に、それらが影響していることが予想されるため、次にその解析方法について述べる。

### (5) 木漏れ日の分布の解析方法

樹影となった地表面における木漏れ日の分布について、太陽位置による変化と樹種ごとの違いを比較するために、樹影中心部からの距離と、木漏れ日が出現する割合との関係を解析した。太陽位置や対象樹種の樹冠形状によって、樹影の面積や形状が変化することから、樹影中心部は樹冠部だけの樹影に着目し、その重心座標を樹影中心座標として用いた (図-3(a))。樹影内の木漏れ日の分布状況を解析するために、樹影中心部から解析円を作成し、その範囲内における木漏れ日率を算出した。解析円の幅は、5 cm から 100 cm まで変化させ、その範囲内における木漏れ日率をそれぞれ算出した結果を比較したところ、5 cm の結果に対し 20 cm まででは木漏れ日率の最大値と最小値がほぼ一致していたことから 20 cm を採用した。



※樹影となった地表面における木漏れ日の分布を対象

図-1 木漏れ日率の定義

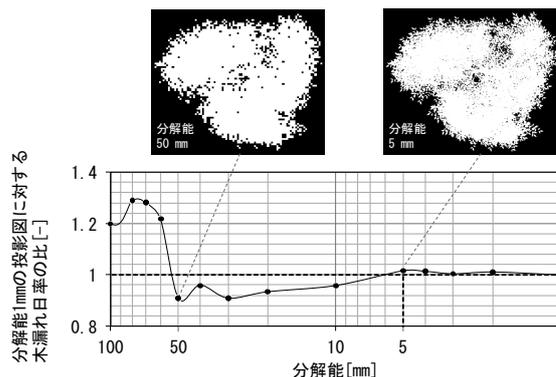
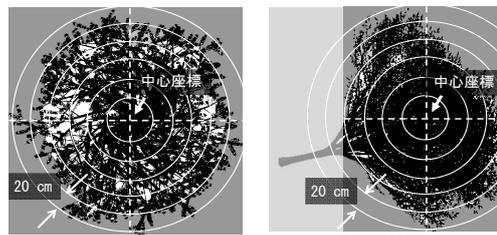


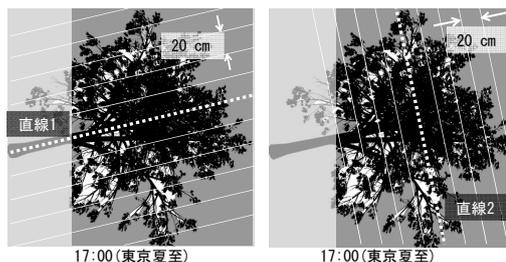
図-2 レイトレーシング法による投影画像の分解能の検討

表-1 解析対象樹木の幾何的形態の特徴

	イチョウ	プラタナス	ケヤキ			
樹冠形状	円錐型	卵型	盃型			
樹高 [m]	10.9	17.4	9.2			
枝張り [m]	7.5	15.8	10.7			
枝下高 [m]	9.7	13.7	5.8			
葉面積指数 [m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> ]	3.4	4.1	4.7			
東京夏至の太陽高度	12時 77.2 17時 21.8	12時 77.2 17時 21.8	12時 77.2 17時 21.8			
夏至の木漏れ日率 [-]	0.17	0.18	0.12	0.14	0.06	0.08



(a) 樹影中心座標からの距離と木漏れ日の割合



(b) 樹幹からの距離と木漏れ日の割合

図-3 樹木の投影画像を用いた木漏れ日率分布の解析方法

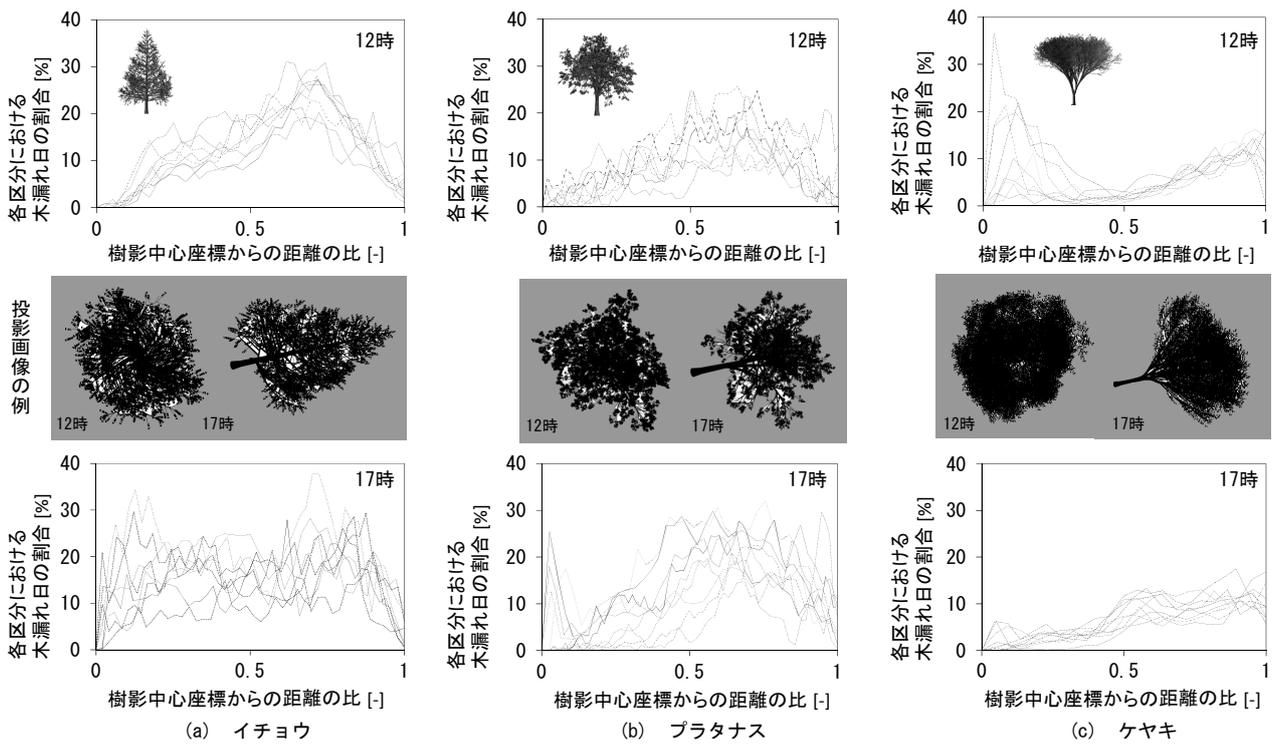


図-4 各樹種の樹冠中心座標からの距離の比と各区分における木漏れ日率との関係

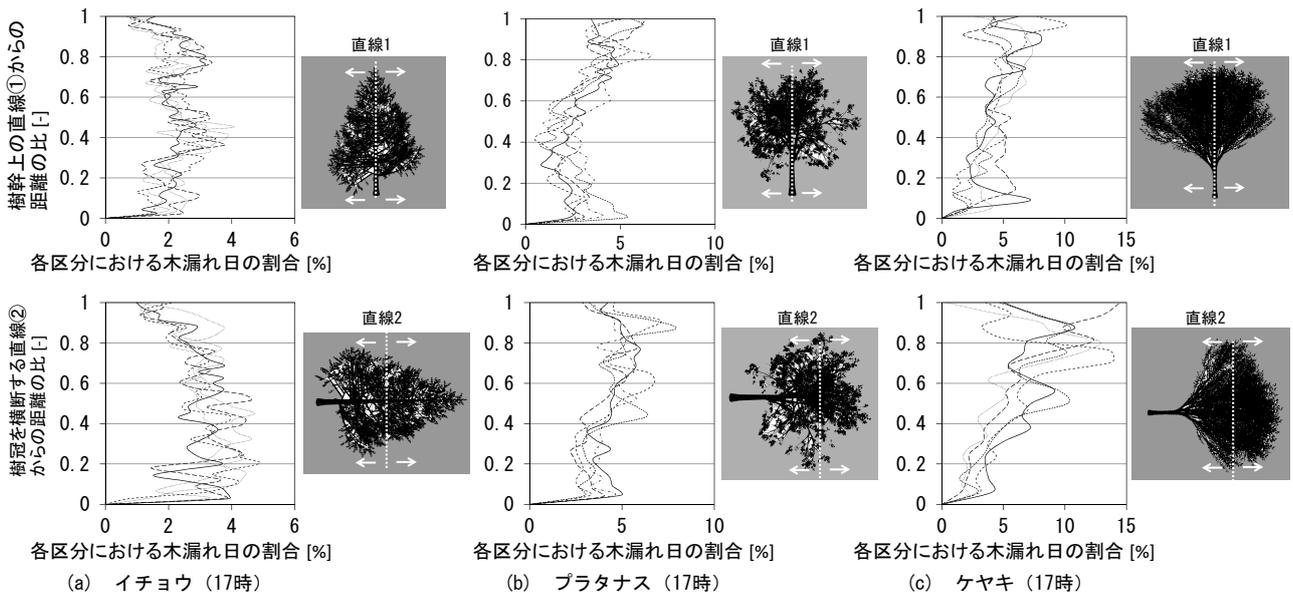


図-5 各樹種の直線1及び2からの距離の比と各区分における木漏れ日率との関係

以下の手順でそれぞれ各樹種 10 本の CG で作成した樹木モデルを用いて木漏れ日の分布を算出した。

- 1) 投影された樹木の各ピクセルの座標値から重心座標を求め、樹影中心座標とする。
- 2) 5 mm の分解能で葉や幹・枝が投影された各ピクセルの座標において、樹影中心座標からの距離を算出する。
- 3) 樹影中心座標からの距離を 20 cm ごとに区切り、それぞれの範囲内における木漏れ日率を算出する。

17 時の樹影は 12 時の樹影とは異なり、樹種ごとにそれぞれ特徴を持つ分岐構造が直接樹影に影響する。樹幹を中心とする水平方向と樹木の鉛直方向の葉、枝の分布に着目すると、樹影内の木漏れ日の分布にも相違が予想されるため、各樹種の分岐構造が明確な 5 本の CG の樹木モデルを用いて<sup>20)</sup>、更に以下の方法で樹影

を区切り木漏れ日の分布を算出した (図-3(b))。

- 1) 樹幹を貫く直線を仮定し、それを投影した直線 1 を作成する。
- 2) 樹冠部を鉛直に貫き投影された直線 1 から、葉や幹・枝が投影された各ピクセルの座標との距離を算出する。
- 3) 樹幹から樹影の外側へ向かう水平方向の分布をみるため、直線 1 からの距離を 20 cm ごとに区切り、それぞれの範囲内における木漏れ日率を算出する。
- 4) 次に樹木の鉛直方向における分布をみるため、直線 1 に直交し、樹影中心座標を通り、樹冠部を水平に貫く直線 2 を作成する。
- 5) 投影された直線 2 から、同様にして各ピクセルの座標との距離を算出する。

6) 樹冠部の中心から鉛直方向の分布をみるため、直線 2 からの距離を 20 cm ごとに区切り、それぞれの範囲内における木漏れ日率を算出する。

算出した 20 cm ごとの木漏れ日率は、大きさや樹影の面積が異なる各 CG の樹木モデル同士を比較するため、中心座標及び基準となる直線からの距離は、それぞれの投影距離の最大値で除した比として表した。また、各区分内の木漏れ日率も全体の木漏れ日率に対する比として算出した。

### 3. 太陽位置別にみた各樹種の単木樹影内の木漏れ日の分布

#### (1) 12 時における樹影内の木漏れ日の分布

各樹種 10 本の 12 時における樹影中心座標からの距離の比と、木漏れ日率との関係について図-5 に示す。

イチョウ (図-4(a)), プラタナス (図-4(b)) はほぼ同じ傾向がみられ、樹影中心座標からの距離の比が増加すると共に木漏れ日率が線形的に増加し、距離の比が 0.7-0.8 付近で 25-30 % の最も高い木漏れ日率を示しているものが多い。この理由として、円錐型のイチョウの場合は、主枝から水平方向へ伸びる枝の長さが、上方ほど短く下方ほど長いので、樹冠部の外側へいくほど重なる枝が少なくなり、木漏れ日率が増加していることが示唆される。卵型のプラタナスの場合は、垂直方向へ伸びる枝群と、その枝から水平方向へ斜め上方へ伸びる枝が存在し、枝の中心に比べて枝の先端ほど着葉していることから、上方へ伸びる枝と水平方向へ伸びる枝の境となる部分は葉の分布がまばらとなり、木漏れ日率が増加したと考えられる。

一方、ケヤキ (図-4(c)) は中心座標の周辺で 10% 程度、中心座標から最も遠い樹冠の外側で 15 % 程度と、2 箇所木漏れ日率が高くなる。これは、盃型であるケヤキの分岐構造から主枝がなく、全ての枝が放射状に伸びているため、樹影中心座標付近を構成する、上方へ伸びる枝と樹冠部の外周側を形成する長い枝が、他に比べて少ないことから、それらの 2 か所が疎になり木漏れ日率が増加したと考えられる。

#### (2) 17 時における樹影内の木漏れ日率の分布

17 時における樹冠中心座標からの距離の比と木漏れ日率との関係を図-4、樹幹を貫く直線 1 と樹冠を横断する直線 2 からの距離の比と木漏れ日との関係を図-5 に示す。

12 時ではほぼ同じ傾向であったイチョウ (図-4(a)) とプラタナス (図-4(b)) は、17 時になると分岐構造の違いが直接木漏れ日率の分布に寄与していることが見て取れる。イチョウは、水平方向の枝が 1 本の主枝から等間隔に分岐する構造を持つため、太陽高度が低い 17 時の場合、木漏れ日が樹冠部の影全体に出現し、木漏れ日の分布にばらつきが生じている。実際に、図-5(a) に示すように、樹幹を貫く直線 1 と樹冠を横断する直線 2 からの距離と木漏れ日率との関係からは、特徴的なピークが見られず、全体に木漏れ日が分布している。一方プラタナスは、17 時の場合でも 12 時の場合とほぼ同じ傾向が確認される。更に図-5(b) のように、同一樹木に対し、どちらの方向に区切っても、木漏れ日率の分布に大きな違いがみられないことから、卵型の樹形をもつプラタナスの樹影は、樹冠中央部から、上下左右に同じような密度勾配で、葉や枝が分布していることが予想され、太陽高度の影響をほとんど受けないことが示唆される。

ケヤキ (図-4(c)) は樹冠部中心から離れるほど木漏れ日率が増加し、その変化量は 15 % 程度である。図-5(c) を見ると、特に樹冠下部の葉が少ない枝部分と樹冠上部の先端、及び側部で葉が粗になり、木漏れ日率が増加していることが読み取れる。

### 4. まとめ

木漏れ日の分布を考慮した樹木の日射遮蔽に関する数値モデル

の構築に向けて、樹影となった地表面における木漏れ日率の分布について、樹種及び太陽高度による違いを、CG の樹木モデルを用いて解析した。その結果、それぞれ 3 樹種の幾何的形態の違いが、木漏れ日率の分布に直接影響することを確認した。円錐型で木漏れ日率が大きいイチョウは、幹を中心として水平方向かつ等間隔に分岐する構造の影響により、太陽高度が低くなると木漏れ日が樹影全体に分布した。卵形のプラタナスは、幹を中心に様々な方向へ分岐する構造が起因し、太陽高度にほぼ依存せず、樹冠中央から外周にかけて木漏れ日の分布が増加する傾向がみられた。盃型のケヤキは、上方へ伸びる分岐構造により、樹冠の上層と枝の密集部分で木漏れ日が多くなることが確認された。

今後は、冬季における木漏れ日の分布についても同様に解析を行う。その上で、樹木の 3 次元構造と木漏れ日の割合、及び分布との関係について分析した結果が、剪定された樹木や生長を想定した場合への適用可能性についても検討する。最終的に、これらの結果を踏まえ、木漏れ日を考慮した樹木の日射遮蔽モデルを構築し、実測値との比較等の精度検証を行う。

謝辞: 本研究の一部は、平成 21 年度-23 年度文部科学省科学研究費補助金 (若手研究 (B)), 代表研究者: 中大窪千晶, 課題番号: 21760446) の助成を受けた。

### 補注及び引用文献

- 1) 五十嵐敬喜, 川野辺義昌, 石原優 (2010): 千代田区における公開空地—その意義と実態及び機能—: 平成 21 年度千代田学報告書
- 2) 池田恵理子, 平手小太郎他 3 名 (2007): 木漏れ日に対する認識と印象評価に関する研究: 学術論文検索集 D-1, 65-68
- 3) 児玉治彦, 三谷徹 (2007): 樹冠下の光環境からみる廻遊式庭園の空間構成: ランドスケープ研究 70(5), 501-505
- 4) 高野歩: 木漏れ日の計量化 (1994): 造園雑誌 57(5), 259-264
- 5) 吉村晴佳 (1991): 樹葉の分光反射特性変化およびその色彩の数値的解析についての研究: 日本リモートセンシング学会誌 11(2), 5-17
- 6) 山田宏之, 丸田頼一 (1987): 樹木の日射軽減作用に関する研究: 造園雑誌 51(2), 81-94
- 7) 吉田伸治, 中井敦, 大岡龍三 (2006): 樹木の成長, 樹種の違いが樹冠の葉面積密度・光学的深さに及ぼす影響—実測に基づく街路樹の日射遮蔽効果の評価手法に関する研究—: 日本建築学会環境系論文集 (605), 103-110
- 8) 森山正和, 河野仁, 吉田篤正他 2 名 (2001): 都市における樹木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 (541), 49-56
- 9) 神田学, 森脇亮, 高柳百合子他 2 名 (1997): 明治神宮の森の気候緩和機能・大気浄化機能の評価: (D)1996 年夏期集中観測: 天気 (44), 713-722
- 10) 平岡久司 (2001): 樹木の熱・水分・二酸化炭素収支のモデル化に関する考察: 日本建築学会計画系論文集 (546), 53-60
- 11) 橋本良二, 須崎民雄 (1982): スギ人工林の光合成生産機構に関する研究(II): 林分における光減衰の解析: 日本林学会誌 64(1), 18-26
- 12) 熊倉永子, 中大窪千晶, 梅干野晃 (2010): 木漏れ日に着目した単木落葉樹の日射遮蔽に関する数値解析: ランドスケープ研究 73(5), 573-576
- 13) 熊倉永子, 中大窪千晶, 梅干野晃 (2011): 夏季と冬季における単木落葉樹の木漏れ日率に関する数値解析, ランドスケープ研究 74(5), 637-640
- 14) 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放射強度について: ランドスケープ研究 68(5), 529-532
- 15) 例えば De Reffye, P.ら他 3 名 (1988): Plant Models Faithful to Botanical Structure and Development: Computer Graphics 22(4), 151-158
- 16) 本條毅, 斎藤馨, 熊谷洋一 (1992): 植物形状モデリングとその可視化による景観予測に関する考察: 造園雑誌 55(5), 301-306
- 17) 例えば M Jaeger ら他 1 名 (1992): Basic concepts of computer simulation of plant growth: J.Biosci.17(3), 275-291
- 18) 解析対象本数を 5 本から 50 本まで増加させて本数別に木漏れ日率の標準偏差を算出した結果、いずれの樹種も 10 本付近で収束域に達したことから、本研究では 10 本とした。
- 19) 木部直美, 藤原宣夫, 田中隆 (2001): 全国の道路緑化に用いられる樹木の変遷: 日緑工誌 27(1), 373-376
- 20) 解析対象樹木を 10 本の中から、樹種別に異なる分岐構造の特徴が明らかでないものとして、葉が全体に密集して投影されず、枝の分岐先に均等に葉が分布しているものを目視の判断で 5 本選定した。