

# グローバルイルミネーションによる CG を用いた暑熱環境推定

○安室 喜弘\*<sup>1</sup> 上月 雄貴\*<sup>2</sup> 西浦 佑紀\*<sup>2</sup>  
檀 寛成\*<sup>3</sup> 尾崎 平\*<sup>4</sup>

キーワード：暑さ指数 推定 緑陰 グローバルイルミネーション

## 1. はじめに

### 1.1 研究背景

昨今、地球温暖化による気温の上昇や、都市の発展に伴うヒートアイランド現象によって、熱中症患者数ならびに死亡者数が増加しており、特に2009年以降に、それ以前よりも大きく増加している傾向がみられる<sup>1)</sup>。今後もさらに患者数が増加することが予想され、日常生活において暑熱環境に注意を払う必要がある。また、熱中症死亡者数は高齢者に多い。これは人間の温熱感覚が関連しており、皮膚の温度感受性の鈍化、熱放散能力の低下、代謝、体液量の減少といった身体的特徴が熱中症発症の起因となっている<sup>2)3)</sup>。少子高齢化が進むわが国において、熱中症患者の増加が懸念されるため、様々な場所で暑熱対策を講じる必要がある。都市開発におけるヒートアイランド対策として、緑化は1つの有効な手段とされている<sup>4)</sup>。その効果や有用性を容易に把握できることが、企画、施工、住民合意に役立つものと考えられる。

### 1.2 研究目的

本研究では緑陰効果に着目し、3次元モデルに基づいたコンピュータグラフィックス(3DCG)上で植栽のシミュレートを行い、地面に投影された影の色情報を用いて暑さ指数を推定する手法を提案する。さらに、結果を3DCGを用いて可視化することにより計画段階で緑陰効果を分かりやすく表示することを目的とする。可視化する対象は局所環境とし、実在空間の3Dモデルと樹木の3DCGモデルを合成し、仮想空間で再現する。これにより、樹種や日時の変化、樹木の生長による効果の比較や、空間的な暑熱対策効果を直感的に把握できることが期待できる。

## 2 提案手法

### 2.1 概要

本研究では、3DCGの描画にグローバルイルミネーション(以下GI: global illumination)を利用した光学的計算により、緑陰環境下でのWBGTを推定する手法を提案する。GIは、光エネルギーの大域的な輸送を光学的・物理学的に扱うためのCGの描画技法である。光源から直接物体表面に当たる光(直接光)だけでなく、面から他の面へ、照り返す光(間接光)の挙動もモデルにしておき、オブジェクトが互いの外観に影響を与え、写実性の高いCG表現

を可能とする。本研究では、GIが可視光によるエネルギーの授受を空間的に計算することに着目し、GIでCGを描画する際のカメラモデルから、描画されたCGの画素単位で絶対輝度を求めることにより、物理的なエネルギーの指標とする。一方で、緑陰の実写写真における絶対輝度と日射量との関係を予め求めておくことにより、3次元モデルでデザインした緑陰シーンをCG描画するだけで、暑さ指数を推定する。3DCGに対して、ヒートマップで暑さ指数を可視化すれば、暑熱対策の有効性を視覚的に把握できる。

提案手法の構成を図1に示す。まず、写真で記録される可視光と日射量との相関を求める。樹木の生成する緑陰内で標準反射板を一眼レフカメラで撮影する。撮影した画像に含まれるピクセル値、EXIF情報を用いて絶対輝度値(絶対輝度)への変換を行う<sup>5)</sup>。EXIF情報には撮影時のカメラの露出等の設定情報が含まれており、光学的な物理量の計算に利用できる。輝度値をパラメータとし、あらかじめ日射量と絶対輝度値を相関付けた線形式から全天日射量を推定する<sup>6)</sup>。黒球温度は、全天日射量、風速、乾球温度を用いて推定し、黒球温度、湿球温度、乾球温度を与えることによりWBGTを推定できる。3DCG上で床面を標準反射板と同じ性質とした空間に樹木の3DCGモデルを合成し、3DCG描画ソフトを用いてGIによる光学的計算が施されたCG画像を生成する。ソフトで仮想的にカメラを用意し、設定したEXIF情報(カメラパラメータ)にしたがって写真撮影したようなレンダリング画像を作成する。作成されたレンダリング画像は実世界で撮影された画像(写真)と同様にピクセル値、EXIF情報を持っているため、上記と同じ手順を踏襲することで、絶対輝度値変換を行うことが可能であり、日射量推定を経て、黒球温度、WBGTが推定できる。また、CG画像に対し、プログラムによる画像処理を施すことによって、暑さ指数の推定結果が反映された可視化画像が作成できる。

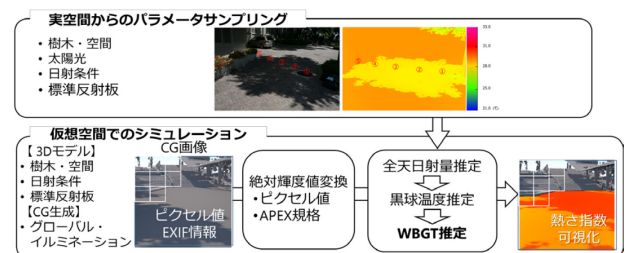


図-1 提案手法の概要

## 2.2 WBGT

暑さ指数 (WBGT (湿球黒球温度) ;Wet Bulb Globe Temperature) は、熱中症を予防することを目的として 1954 年にアメリカで提案された指標である。人体と外気との熱のやりとり (熱収支) に着目した指標で、湿度、日射・輻射など周辺の熱環境、気温を採り入れ、(1)、(2)式で算出される。また、この指標は ISO7243 や JIS Z 8504 等で規格化され、労働環境や運動環境、日常生活における指針として認められており、WBGT が 28 °C を超える生活環境では熱中症が発生する恐れがあるとされる。

屋外：

$$WBGT = 0.7 \times \text{湿球温度} + 0.2 \times \text{黒球温度} + 0.1 \times \text{乾球温度} \quad (1)$$

屋内：

$$WBGT = 0.7 \times \text{湿球温度} + 0.3 \times \text{黒球温度} \quad (2)$$

## 2.3 絶対輝度値

はじめに、日本工業規格のデジタルカメラ用画像フォーマット規格として用いられている APEX 規格<sup>7)</sup>に基づいた計算方法で絶対輝度値  $B$  を(3)式で算出する。次に、求めた絶対輝度値  $B$  を用いて(4)式より 1 画素あたりの絶対輝度 [ $\text{cd}/\text{m}^2$ ] を算出する。

$$\log_2 \frac{B}{3.42} = 2 \log_2 F - \log_2 T - \log_2 \frac{S}{3.125} \quad (3)$$

$B$  : 絶対輝度 [ $\text{cd}/\text{m}^2$ ]

$F$  : 絞り値 ( $F$  値)

$T$  : シャッタースピード [sec]

$S$  : ISO 感度

$$L(x,y,t) = \frac{100 B(t) Y(x,y,t)}{18 Y_{MAX}(t)} \quad (4)$$

$L(x, y, t)$  : 絶対輝度 [ $\text{cd}/\text{m}^2$ ]

$B(t)$  : 画像  $t$  内で算出した絶対輝度 [ $\text{cd}/\text{m}^2$ ]

$Y(x, y, t)$  : CIEXYZ 表色系での  $Y$  値

$Y_{MAX}(t)$  : CIEXYZ 表色系での最大  $Y$  値

## 2.4 黒球温度推定

黒球温度は、直達日射、散乱日射、大気からの赤外放射、地表面からの赤外放射、反射日射等の要素からなる。黒球温度の推定には、次の(5)式を使用する<sup>8)</sup>。

$$Tg = \frac{S - 38.5}{0.0217S + 4.35U + 23.5} + T \quad (5)$$

## 3 実験

### 3.1 実測値の収集

本研究で提案する手法の検証するため、検証用データとして WBGT の計測を行った(図 2)。計測箇所は、関西大学簡文館付近のイチョウの木が生成する緑陰を対象とした。結果を次の表で示す。(表 1)



図-2 WBGT の計測 (HD 32.2, 鶴賀電気製)

表-2 WBGT 計測結果

計測日	計測箇所	日射量 ( $W/m^2$ )	湿球温度 (°C)	黒球温度 (°C)	乾球温度 (°C)	WBGT(out) (°C)
2016.8.9(15:20)	直達日射	910	25.6	38.6	35.0	28.7
	緑陰内	110	25.1	36.2	35.0	28.4
2016.8.12(12:10)	直達日射	1180	23.6	44.7	36.5	29.0
	緑陰内	84	23.4	36.0	34.8	27.1
	緑陰内	116	23.1	35.3	34.2	26.8
	緑陰内	134	23.6	36.7	34.9	27.4
	緑陰内	147	23.6	37.0	35.4	27.8
	緑陰内	127	23.7	37.1	35.6	27.5
2016.8.19(12:00)	直達日射	1107	26.2	43.2	36.5	30.7
	緑陰内	117	26.6	35.6	35.0	29.2
	緑陰内	255	26.8	37.2	35.4	29.8

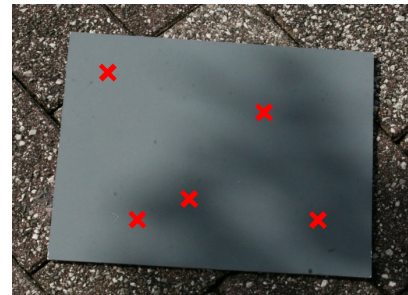


図-3 標準反射板による緑陰の計測

### 3.2 緑陰の撮影

実写画像から絶対輝度値を得るために、一眼レフカメラ: EOS5D (Canon 製) を使用し、標準拡散反射板 (GC-1, JJC 製) を地面に置いて撮影した (図-3)。標準拡散反射板上の各点での出射光は全ての方向に均一に反射され輝度はどの方向から見ても一定である。カメラの撮影条件を統一するために、マニュアルで固定値 (露出時間:1/1000, ISO 感度:ISO-1250, 絞り値:f/16) で設定した。実写画像中の標準反射板上で任意の画素を抽出し、(3)、(4)式で絶対輝度値変換を行った。(3)式を使用するにあたって、CIEXYZ 表色系を使用する。標準反射板上における影の画素値と実測日射量を対応付けるため、緑陰の撮影と併せて日射量を測定した。使用機材は、日射量測定器 (TM-207, ケニス製) である。測定は、日射計の受光部を標準反射板上に設置し、表示される値を記録した。

### 3.3 日射量の推定式

前節で得られた絶対輝度値と日射量との相関 (図-4) を線形回帰計算により定式化し、(6)式を得る。これを  $S(x, y, t)$  について解くことで、日射量を導出することができる。

$$L(x, y, t) = 0.0261 S(x, y, t) + 4.6653 \quad (6)$$

$S(x, y, t)$ : 画像  $t$  の画素座標  $(x, y)$  での日射量  $[W/m^2]$   
 $L(x, y, t)$ : 画像  $t$  の画素座標  $(x, y)$  の絶対輝度値  $[cd/m^2]$

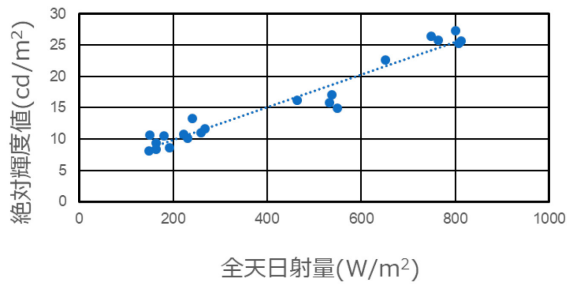


図-4 絶対輝度値と日射量の相関

#### 4 3次元CGモデルの作成

##### 4.1 レーザースキャンによる3次元点群

植栽による緑陰効果のシミュレーションを想定し、関西大学千里山キャンパスに2016年に出来た西門付近(図-5)を対象として、3次元モデル化を行った。新しく整備された場所でもあり、植栽も新しく疎らなため、今後どのように樹木が繁茂すると緑陰効果が得られるかを可視化することとした。3次元レーザースキャナ Focus3D X330 (FARO製)を使用し、実寸の3次元情報を点群データとして取得し、ソフトウェア SCENE6.2.3.9 (FARO製)および MeshLab (フリー) を使用してノイズ除去等の編集と3次元メッシュデータの生成を行った。(図-6、図-7)



図-5 対象とした空間

##### 4.2 WBGT 推定の検証

GIによるCG生成にはソフトウェアはMaxwellRender 2.4.0 (Next Limit製)を用いた。日射量を推定するためには日射量測定および緑陰撮影時と同様の環境を再現する必要があるため、実測に用いた標準反射板と同じ反射特定を地面に設定する。このようにして、WBGTを計測した環境(図-8)を3DCGで作成し、WBGTを推定した結果を表-2に示す。いずれも1℃に満たない精度でWBGTが推定され、暑さ環境が再現されていることがわかる。

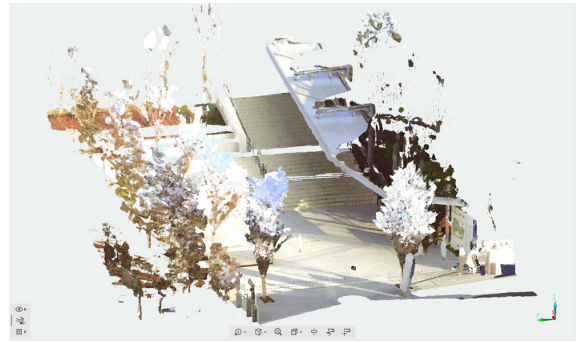


図-6 対象空間のレーザースキャンデータ

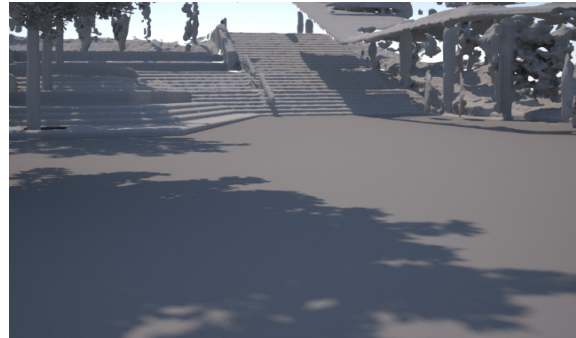


図-7 対象空間の3Dモデル



図-8 絶対輝度値と日射量の相関

表-2 WBGT 推定結果

	日射量(W/m <sup>2</sup> )	WBGT(実測値℃)	WBGT(推定値℃)	誤差℃
直達日射部	440.06	29.0	29.5	0.5
①	98.12	27.1	27.2	0.1
②	130.26	26.8	27.0	0.2
③	147.08	27.4	27.7	0.3
④	161.35	27.8	28.2	0.4
⑤	175.11	27.5	28.1	0.6

##### 4.3 シミュレーションへの適用

点群から作成した大学構内の3D空間に樹木を仮想的に配置し、日射条件(日時)、気温(乾球温度)、湿球温度、風速を設定し、暑さ指数の推定を行った。気温(乾球温度)、湿球温度は気象庁が公開している2016年度の気温データから、大阪での2016年8月21日の9:00と12:00、2016年9月2日の9:00と12:00のデータを使用した。実装結果は日時の変化、配置位置の変化、視点の変化、樹種の変化などを行った。それぞれの結果は以下の図-9のとおりである。

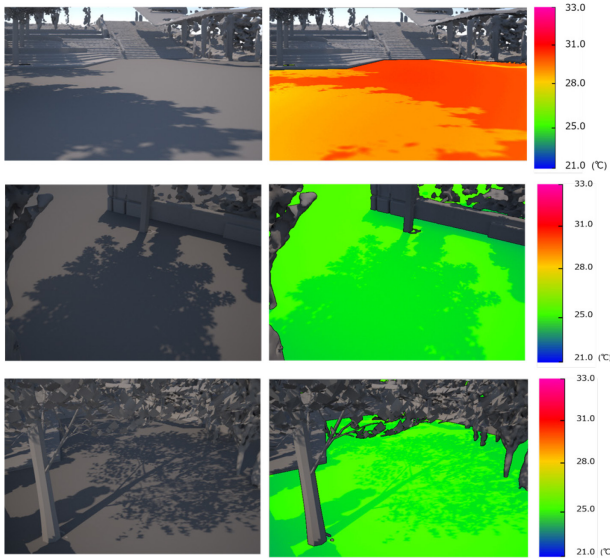


図-9 シミュレーション結果の例：

上段：乾球温度：31.6℃，湿球温度：25.2℃，風速 1.3m

中段：乾球温度：28.8℃，湿球温度：19.6℃，風速 1.3m

下段：乾球温度：28.8℃，湿球温度：19.6℃，風速 1.3m

## 5 考察

現実世界の空間にて撮影した画像（写真）からカメラの露光設定に基づいて絶対輝度値変換を行い、測定した日射量と相関付けることによって日射量推定式を作成した。3DCG で作成した空間および樹木の 3D モデルのレンダリング画像から、絶対輝度値変換、日射量の推定を経て、黒球温度推定および WBGT の推定と可視化を実現した。その結果、緑陰による暑熱対策効果を容易に把握することが可能となった。WBGT の推定検証では、WBGT 計測データでは直達日射（日向）では 29.0 °C、緑陰内では 27.1 °C ~ 27.8 °C であり、WBGT 変換画像を参照してみると、直達日射（日向）で 29.5 °C あたりのオレンジ色、緑陰内では多くはおおよそ 27.1 °C から 28.1 °C の黄色、樹木の根元付近で 27.0 °C が容易に視認できるような可視化ツールが提供できた。WBGT の推定誤差は最大 0.6 °C 程度の精度で推定可能であった。

シミュレーションでは、公開されている過去の気温等のデータを使用し、日時によって暑さ指数の違いが確認できた。同様に気象予測のような既存の枠組みとの組合せで同手法が利用できる可能性が考えられる。植栽の計画を進める際、緑陰を生成したい場所を先に決め、それを実現するための樹木の配置を提案することも可能になる。今後の課題としては、日射量推定式の信頼度の向上を図る上で、周辺の建造物や物体による放射や光の反射、樹木自体が持つ要素（葉の透過率、蒸散作用）等を考慮する方法の検討が挙げられる。また、樹木の位置やサイズ、種類を変えることで、緑陰の生成される位置も変化させることが可能である。本稿でも、図-9 の中段はイチョウ、下段はケヤキであ

るが、それらの違いによる WBGT 推定における影響を検証する必要がある。

## 6 結論

本研究では、画像における絶対輝度値と日射量を相関付けた日射量推定式より、3DCG で作成した空間内での植栽シミュレーションのレンダリング画像から WBGT を推定することを提案した。この提案により、未だ緑化されていない空間においても、3次元モデルとCGを用いて植栽シミュレーションを行うことで、期待される緑陰の暑熱対策効果を把握することが可能となった。今後は実測データを増やし、効果の検証方法の改良、考慮すべき要素の追加によって、様々な環境で WBGT 推定を可能にする必要がある。また、本研究で提案する手法は手動部分が多く、誰でも容易に推定できるとは言い難いため、容易に扱えるものにすることや拡張現実感表示（AR）可能なアプリによる携帯端末へのサービスの検討も今後の課題である。

## 謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金（課題番号：15H02983）および中部大学問題複合体を対象とするデジタルアース共同利用・共同研究 IDEAS201715 の助成による。

## 【参考文献】

- 1) 厚生労働省，熱中症による死亡者数（人口動態統計）  
<http://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/0000121413.html> (2017. 10 閲覧)
- 2) 環境省，熱中症健康保険マニュアル 2014，
- 3) 環境省，熱中症予サイト  
<http://www.wbgt.env.go.jp/pdf/envman/full.pdf> (2017. 10 閲覧)
- 4) 環境省，平成 24 年度ヒートアイランド現象に対する適応策及び震災後におけるヒートアイランド対策検討調査業務  
<https://www.env.go.jp/air/report/h25-02/> (2017. 10 閲覧)
- 5) 伊東他，熱画像データを用いた地表面温度と暑熱環境に関する分析，日本ヒートアイランド学会論文集 Vol. 9，pp. 23-31，2014.
- 6) 平井他，視覚モデルに基づいた高ダイナミックレンジ動画像の見え再現，電子情報通信学会論文誌 A Vol. J89-A No. 11 pp. 922-931，2006.
- 7) Douglas A. Kerr, APEX—The Additive System of Photographic Exposure
- 8) 岡田他，岡田・日下の黒球温度推定式の広域適用とパラメータ調整，日本ヒートアイランド学会論文集 Vol. 8, p. 13-21, 2013.

\*1 関西大学環境都市工学部 教授 博士(工学)，\*2 同 学生

\*3 同 准教授 博士 (情報学)，

\*4 同 准教授 博士 (工学)