

# 市民の健康・環境コミュニケーションに資する熱環境に着目した 公共空間のIoT化

安室喜弘\*、尾崎平\*、檀寛成\*、窪田諭\*、安達直世\*

\*関西大学環境都市工学部

## 1. はじめに

### (1) 背景

地球温暖化に伴う気候変動への対応として、2015年に我が国で策定された気候変動の影響への適応計画では、分野別施策の基本的方向として、健康に関する適応の施策が挙げられており、熱中症事故の防止が示されている<sup>1)</sup>。その中で特に気候変動が熱中症に及ぼす影響に対する対応施策の必要性が指摘されている。都市部においては、気候変動やヒートアイランド現象による気温上昇に伴う影響として、夏季に人々が感じる熱ストレスの増大が指摘され、その影響は熱中症患者の増加や熱帯夜による睡眠障害などで問題となっている<sup>2)</sup>。また、熱中症の発生場所としては高齢者では自宅、子どもでは運動中が多くなっており、高齢者については、自宅における熱中症対策が最優先であるが、運動中の発症も数%程度、存在している。一方、健康維持、増進のためにウォーキングをはじめとする運動が推奨されており、厚生労働省では、健康日本21において個人が取り組む目安としての歩数の目標値を設定し、日常生活における歩数の増加を掲げている<sup>3)</sup>。そのため、都市空間における歩行環境を整備し、ウォーキングに取り組みやすい歩道や緑道などの基盤整備と、人が熱ストレスを受けない、あるいは受けにくい暑熱環境を有する物理的な屋外空間の提供や、ウェブやアプリを介した屋外空間の時間帯別の暑熱環境の情報提供などの適応策が必要である。これらの暑熱対策を通じて、屋外空間を人々が積極的に利用し得ると考えられる。

### (2) 関連研究

筆者らは、運動を実践する場としての環境基盤と、継続的な運動が確保されるための支援システムの両面の必要性を指摘してきた<sup>4)</sup>。また、情報提供の重要性について、学生や市民を対象にした健康ウォークを支える倶楽部運営に関する研究を報告し、情報提供が運動のモチベーションや、継続性に好影響を与えていることを示した<sup>5)</sup>。暑熱環境と人の屋外空間に関して、三坂ら<sup>7)</sup>は暑熱対策を施した空間の人の利用に関して調査を行い、温熱快適性指標と利用者数の関係を示している。また、山田ら<sup>8)</sup>は、緑地内外の夏季における暑熱強度分布の調査を行い、暑熱指標が緑地中心部に向かって、同心円状に分布することを示している。暑熱環境の計測、評価手法に関して、河野ら<sup>9)</sup>は歩道の暑熱環境を計測するために、日射系、風速計、黒球温度計などの複数の計測装置を台車に設置し、計測する移動観測手法を提案している。大橋ら<sup>10)</sup>は数値気象モデルを利用した屋外熱中症リスクの評価手法を開発している。大西ら<sup>11)</sup>や伊東ら<sup>12)</sup>は、都市部の地表面での熱環境を解析するために、それぞれ衛星画像や航空写真を用い、土地利用の被覆と地表面温度との相関や、代表的な熱環境指標の1つであるWBGTと熱画像との相関を線形回帰分析で推計している。

### (3) 研究目的

以上のように、暑熱対策がもたらす影響や効果について分析や評価が進められており、緑化ルーバーや保水性舗装などの設置に伴って、その費用対効果を把握する上でも定量的な指標の重要性がさらに増している。一方で、暑熱環境の計測については、複数種類の計測機器を併用した方法が採用されている。暑熱対策効果の分布を厳密に評価する場合には、多地点で同時に暑熱環境指標を計測することが有効であり、前節の各手法による暑熱環境の推定技術も提案されているが、市民生活に還元する手段に欠けている。ウォーキングなどの運動を市民に促すことを前提とした場合、公園やウォーキングコースでの時間帯別あるいは季節別の暑熱環境を簡便に取得し、延いてはウェブやアプリを介して情報共有できるような技術的枠組みが望ましい。

そこで、本研究では、大域照明モデルに基づいた3次元コンピュータグラフィクス(3DCG)によって屋外空間の暑熱環境を可視化する筆者らの独自技術を応用し、遠隔からの不特定多数のユーザに対して、屋外の所定の地域の暑熱状況を可視化する。実在空間と植栽計画で想定される樹木の3Dモデルを合成し、仮想的に再現する。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. 方法

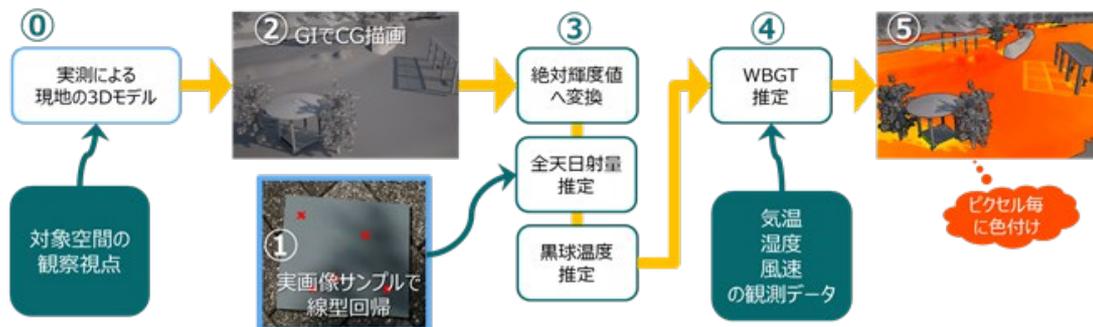


図 1 WBGT 推定手法の概要

### (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）を利用した大域的な光学的計算により、緑陰環境下での WBGT を推定する手法を開発してきた<sup>13)</sup>。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）や透過光などの挙動もモデル化しており、物体表面の反射特性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。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から、熱環境との相関が高いことに着目し、GI で描画された CG の物体表面において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、緑陰を実写した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。これにより、3次元空間で再現した緑陰シーンの CG 画像から、対象表面での日射量に換算し、WBGT を推定する。さらに、3DCG 中の対象領域について、WBGT 値で彩色したヒートマップで示すことで、緑陰による暑熱対策の効果を視覚化できる。

この方法の処理構成を図 1 に示す。まず、対象とする場所について、3次元の形状モデルを作成する。これはレーザスキャンや写真測量ソフトなどにより、現場の地物や樹木などを含む空間のデジタルツインとして作成しておく。一方、写真で記録される可視光と日射量との相関を求めておく。樹木の生成する緑陰下で、地表に置いた標準反射板を一眼レフカメラで撮影する。撮影した画像の標準反射板部分のピクセル値に対して、EXIF 情報に含まれるカメラの露出等の情報を用いて絶対輝度値（絶対輝度）へ変換する<sup>14)</sup>。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>15)</sup>。黒球温度は、全天日射量、風速、乾球温度を用いて推定し、得られた黒球温度に加えて、湿球温度、乾球温度を与えることにより WBGT が算出できる。次に、樹木等の地物を配置した 3D モデルの中で、対象とする地面を標準反射板と同じ反射特性に設定し、GI による CG 画像を生成する。このとき、CG 画面を生成するための仮想的なカメラにおいて、実環境でのカメラ撮影画像と同様にピクセル値、EXIF 情報を設定すれば、上記と同じ手順により、絶対輝度値に変換することができ、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、WBGT の値で色付けすることによって、ヒートマップで WBGT の推定結果が反映された 3D シーンの画像が作成できる。

ところが、この方法のボトルネックとなるのは、GI による CG 生成に要する処理時間である。GI は非常に多くの光線追跡処理を並行して実施するため、リアルタイムでの描画が難しく、任意に視点や方向を変えながら CG 表示するような可視化には不向きと言える。したがって、本研究では、図 2 に示すように、対象となる場所に対し

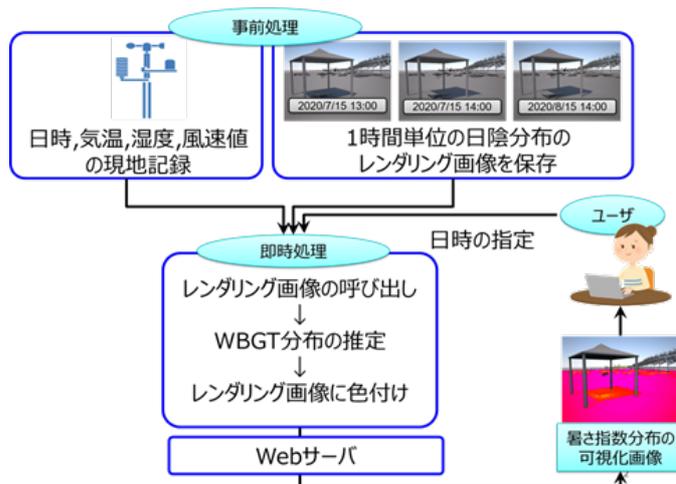


図 2 システム全体の概要

て、予め俯瞰するような代表的な視点をいくつか設けておき、固定カメラのような見せ方を考えた。また、当該の場所の緯度と経度を設定し、日付を指定すると、太陽の軌道から日照環境を計算できるため、各時刻における日照条件を予めレンダリングして CG 画像として準備しておくことが可能である。こうして、オンデマンドで生じる処理計算負荷の軽減を考えた。ただし、現地での気温、湿度、風速等の基本となる気象情報は必要となるため、これらを常にモニターできるセンサを現地に配置して、逐次的にインターネットを介して値を取得することで、実時間での気象条件を考慮した WBGT の推定が可能になる。

## (2) 絶対輝度値および黒球温度の推定および WBGT の算出

WBGT は(1) 式で定義され、輻射熱の影響を含む黒球温度の取得が計測器としても特殊であるため、簡便な推定手法による代替が望まれている。ここではまず、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>15)16)</sup>に基づいた計算方法で絶対輝度値  $B$  を (2) 式で算出する。次に、求めた絶対輝度値  $B$  を用いて (3) 式より 1 画素あたりの絶対輝度 ( $[cd/m^2]$ ) を算出する。

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

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

$B$  : 絶対輝度  $[cd/m^2]$

$F$  : 絞り値 ( $F$  値)

$T$  : シャッタースピード  $[sec]$

$S$  : ISO 感度

$$L(x, y) = \frac{100B(t)Y(x, y)}{18Y_{MAX}} \quad (3)$$

$L(x, y)$  : 絶対輝度  $[cd/m^2]$

$B$  : 画像内で算出した絶対輝度  $[cd/m^2]$

$Y(x, y)$  : CIE XYZ 表色系での  $Y$  値

$Y_{MAX}$  : CIE XYZ 表色系での最大  $Y$  値

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 (4) 式を使用する<sup>17)</sup>。

$$T_g = \frac{S_0 - 38.5}{0.0217S + 4.35U + 23.5} + T_a \quad (4)$$

$T_g$  : 黒球温度  $[^\circ C]$

$S_0$  : 全天日射量  $[W/m^2]$

$U$  : 風速  $[m/sec]$

$T_a$  : 気温  $[^\circ C]$

## (3) 全天日射量の推定

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, 反射率 90%, , 25.3cm×20.2cm) 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。カメラの撮影条件は、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）を設定して統一した。実写画像中の標準反射板上の任意の画素を抽出し(2),(3)式で絶対輝度値変換を行った。(2),(3)式を適用する際には、RGBのピクセル値をCIE XYZ表色系に変換して得られるX, Y, Zの3刺激値のうち、輝度に相当するY値を用いる。標準反射板上における画素値と併せて、その位置の日射量を日射量測定器(TM-207, ケニス製)で緑陰内の様々な濃さの位置で測定し、いずれの実測においても、5回の測定値の平均を記録した。こうして得られた絶対輝度値と日射量との相関(図3)を線形回帰計算により定式化し、(5)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。

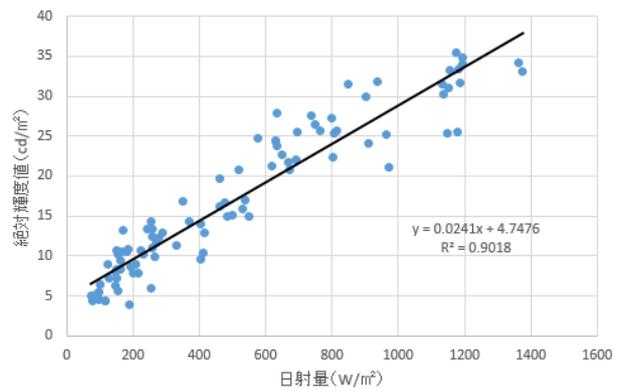


図3 絶対輝度値と日射量の相関

$$L(x, y) = 0.0241 S(x, y) + 4.7476 \quad (5)$$

L(x, y) : 画素座標 (x, y) の絶対輝度値 [cd/m<sup>2</sup>]

S(x, y) : 画素座標 (x, y) での日射量 [W/m<sup>2</sup>]

### 3. 結果

本研究で対象としたのは、図4に示すように吹田市と摂津市の両市にまたがる北大阪健康医療都市（愛称：健都）公園（明和池公園）である。レーザスキャナ（FARO社製 Focus3D X330）により、3次元計測を実施して得られた

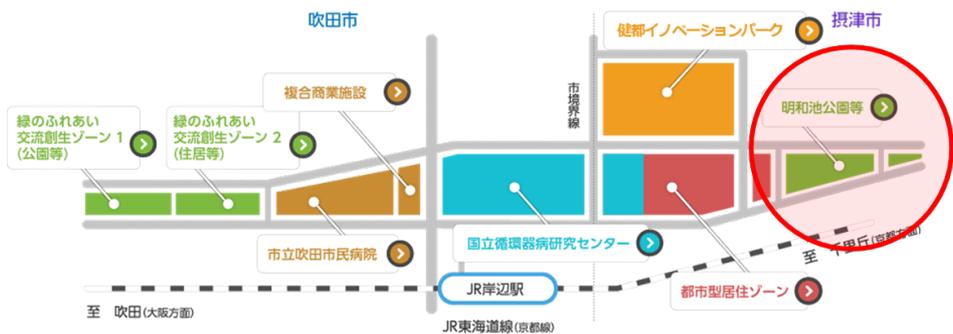


図4 対象場所

た実寸の3次元点群データから、地表の形状や樹木分布、庇陰設備の位置関係をモデル化し、改めて樹木や庇陰の形状モデルを用意して配置することで、公園のデジタルツインを作成した(図5参照)。

XAMPP<sup>18)</sup>により立ち上げたWebサーバを開発環境として、GIによる庇陰設備や植生による陰影のCG画像(図6左側)を蓄積し、先述の基本となる気象情報を入力すると、CG画像から全日射量推定、黒球温度推定を経て、ヒートマップ状のWBGT分布画像(図6右側)を生成する機能をPHPから呼び出して、動的にHTMLとして出力するシステムを開発した。これにより、図6に示すように、Webブラウザでいつでも閲覧できるフレームワークを実現した。ただし、本稿執筆時点では、基本気象情報を得るためのセンサユニットを接続する実装が未完成であるため、日時や基本気象情報は、テキストデータとして、ユーザの端末から当該Webページにて入力して指定している。対象となる現地では、気温、湿度、風速といった比較的簡便に計測可能なセンサを既に入手しており、間欠的に通信するモジュールとして配置する予定である。また、同様にして、図7に示すように、このWebサイトはスマートフォンからも閲覧可能であり、気象情報として府県単位で発せられ



図5 計測の様子と形状モデル

る暑熱情報とは全く粒度の異なる WBGT の時空間情報がオンデマンドで得られる可能が示せたものとする。

#### 4. まとめ

研究では、実公園を対象とした暑熱環境下における利用状況を想定して、Web ベースで、局所的な暑熱環境の時空間情報を可視化して配信するシステムの枠組みを構築した。暑熱分布は本来目には見えない情報であるが、最低限の基本気象情報をモニターするセンサさえ現地に配置しておけば、Web 越しにアクセスすることでヒートマップとして教えてくれるような実環境の IT 化が図れることが分かった。

今後は、現地にセンサを実際に配置し、個人のニーズに応じてリアルタイムで暑熱指数の可視化し、暑熱リスクのアラート発信を実施し、その持続性や効果と、センシング範囲のスケラビリティの検討を行う予定である。

#### 5. 謝辞

本研究は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 IDEAS202013 の助成を受けたものである。

#### 参考文献・データ

1. 国立研究開発法人国立環境研究所，気候変動の影響への適応計画及びフォローアップ報告書 <https://adaptation-platform.nies.go.jp/plan/government/index.html> (2020.10 閲覧)
2. 環境省，熱中症健康保険マニュアル 2018
3. 厚生労働省：健康日本 21（身体活動・運動） [http://mhlw.go.jp/www1/topics/kenko21\\_11/b2f.html](http://mhlw.go.jp/www1/topics/kenko21_11/b2f.html) (2020.10 閲覧)
4. 木下 朋大,盛岡 通,尾崎平：健康ウォークの継続性を支える環境基盤と支援システムのデザイン要件の検討，環境システム研究論文発表会講演集, Vol. 43, pp.187-198, 2015.
5. 木下朋大, 尾崎平, 盛岡通：健康ウォーク継続のための支援システムに関する検討，環境情報科学論文集, Vol.30, pp.61-66, 2016.
6. 尾崎平, 木下朋大, 盛岡通：活動量の計測と ICT 支援に基づく事業所従業員の身体運動への行動変容，土木学会論文集 G（環境）, Vol.73, pp.II\_139-II\_146, 2017.
7. 三坂育正, 石丸泰, 堀口恭代, 成田健一：暑熱環境対策下における人の空間利用に関する研究，環境情報科学学術研究論文集, Vol.31, pp.131-136, 2017.
8. 山田宏之, 養父志乃夫, 中島敦司, 中尾史郎：WBGT 値を用いた緑地内外の夏季における暑熱強度分布の解析，環境システム研究論文発表会講演集, Vol.29, pp.249-254, 2001.
9. 河野恭佑, 上田弥月, 稲垣厚至, 小田僚子：移動観測手法に基づく東京都市街地の暑熱環境評価，環境情報科学学術研究論文集, Vol.31, pp.143-148, 2017.
10. 大橋唯太, 亀卦川幸浩, 井原智彦：数値気象モデルを利用した屋外熱中症リスクの評価手法に関する研究，環境情報科学論文集, Vol.25, pp.335-340, 2011.
11. 大西 暁生, 前崎 隆一：オブジェクト分類手法による詳細都市被覆情報の取得と地表面温度の再現性に関する研究，土木学会論文集 G（環境）, Vol.70, No.5, pp.I\_59-I-69, 2014.
12. 伊東大悟, 森田真一, 田中勝哉：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.
13. 安室, 市原, 西浦, 池川, 林, 尾崎 (2018)：3DCG を用いた暑熱環境の推定とその適用，土木学会論文集 G（環境）, Vol.73, No.2, pp.II\_1-II\_8.

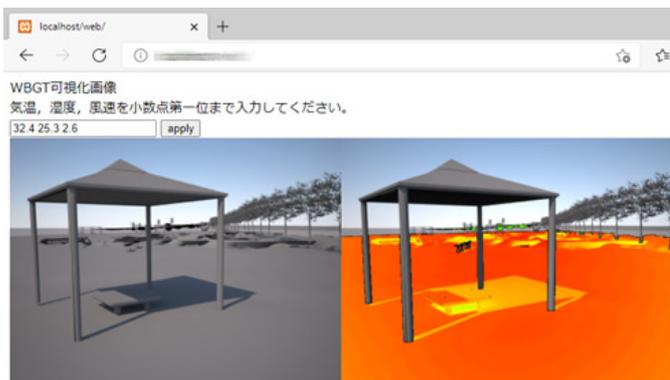


図 6 ブラウザ上で閲覧している様子

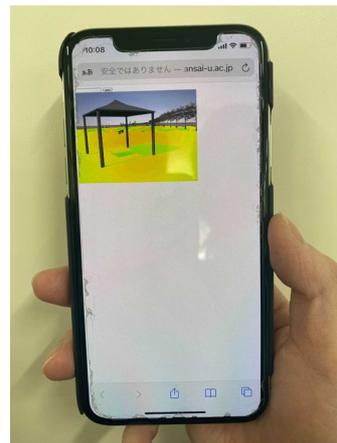


図 7 スマートホンの表示

14. 平井経太, 中口俊哉, 津村徳道, 三宅洋一: 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.
15. Douglas A. Kerr, APEX—The Additive System of Photo-graphic Exposure.
16. <http://blackmilk.fr/download/APEX.pdf> (2018.3 閲覧)
17. 岡田牧, 岡田益己, 日下博幸: 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.
18. <https://www.apachefriends.org/index.html>