

(77) リアルタイム GI による 屋外環境の暑熱リスクの可視化

角田 直嵩¹・尾崎 平²・窪田 諭³・安室 喜弘⁴

¹ 非会員 関西大学 大学院 理工学研究科環境都市工学専攻 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35)

E-mail: hksn0706@gmail.com

² 正会員 関西大学 教授 環境都市工学部 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35)

E-mail: ozaki_t@kansai-u.ac.jp

³ 正会員 関西大学 教授 環境都市工学部 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35)

E-mail: skubota@kansai-u.ac.jp

⁴ 正会員 関西大学 教授 環境都市工学部 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35)

E-mail: yasumuro@kansai-u.ac.jp

近年、地球温暖化による気温上昇や、ヒートアイランド現象によって熱中症患者数並びに死亡者数が増加している。環境条件による熱中症の起こりやすさを事前に判断するために開発された暑さ指数は、熱中症リスクを数値化するという点で市民への意識付けに有効であり、環境省は都市圏単位で暑さ指数を Web 上で公開している。しかし、身の回りの屋外の生活環境や作業環境において、市民が局所的な暑さ指数を知る機会はない。同じ暑熱環境下でも、日向と日陰でのリスクの違いや分布および、時刻による変化がわかれば、行動や作業の計画も立てやすい。本研究では、3D データ化した現場の空間に対して日照条件を計算し、さらにグローバルイルミネーションによる陰影をレンダリングした CG をもとに暑さ指数をピクセル単位で推定する。ゲームエンジンを採用した実装により、時々刻々と変化する暑熱環境に対してリアルタイムに暑さ指数分布を可視化するシステムを開発した。

Key Words: *realtime global illumination, heat stroke, global warming, WBGT(wet bulb globe temperature), game engine, 3D model*

1. はじめに

近年、地球温暖化やヒートアイランド現象などの影響により、全国的に猛暑日が増加し、熱中症患者数並びに死亡者数が増加している¹⁾。更に、外出による熱中症患者数は全体の約 60%にも上っており²⁾、時間帯を問わず熱中症になる可能性も高まっている³⁾。また、平成 30 年度における熱中症のリスクの指標となる WBGT (Wet Bulb Globe Temperature) の値は、過去 10 年間の平均値より上回る状態が継続していた⁴⁾。日常生活では、庭や敷地での掃除等や、近隣への買い物等の外出の必要性があるほか、散歩や健康増進のために、習慣的に公園を訪れるニーズは、非常に広い年齢層に渡っている⁵⁾。環境省は都市ごとの WBGT の値を Web 上で公開し、注意喚起を行っている⁶⁾。しかし、このような指標は都市域単位でのみ公開されており、街区や公園等の身の回りの屋外の生活圏や、建設現場に代表されるような屋外作業環境内の具体的なリスクを知る機会が無い。特に、施設や

現場の管理者は、来訪者や作業者が置かれる環境のリスクを正確に把握することが重要である。しかし、独自に WBGT 計測器を多数配置し情報を集約するというような手立てにも限界があり、現場では各個人の経験にもとづいて判断し、対応しているのが現状である。本研究では、グローバルイルミネーション (global illumination 以下 GI) によるコンピュータグラフィクス (3DCG) を活用した地表の日射量推定により、時々刻々と変化する日照環境での暑さ指数分布を可視化し、一般ユーザに配信する方法を提案する。ゲームエンジンをを用いた実装により、庇陰や木陰などによる暑熱の軽減効果をリアルタイムでヒートマップ化でき、任意の時刻・場所の暑さ指数分布を Web で公開できる枠組みを実現する。

2. 既往研究

WBGTは気温、湿度、輻射熱の関係から算出され、輻

射熱の測定には黒球温度計を必要とする。岡田らは、全天日射量、風速、乾球温度を説明変数として黒球温度を推定した⁷⁾。安室らは、標準反射板上で陰影を撮影した写真の画素値と全天日射量との相関を求め、地表の陰影のCGから全天日射量を求め、岡田らの方法でWBGTを推定した⁸⁾。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CG技法であり、直接光だけでなく、間接光の効果も扱うため、植栽や建造物などの地物を考慮した日射状況のシミュレーションとして利用できる。一方で、黒球温度を推定する為の風速データと、WBGT値を算出するための乾球温度(気温)、湿球温度(湿度)のデータの取得をシステム化することが課題である。また、GIは非常に多くの経路の光を探索し、膨大な計算を要するため、視点や時刻等の条件を変えるたびにレンダリングの処理に時間がかかることから、一般ユーザへのサービスにむけた実装においても課題があった。

3. 提案手法

本研究では、上記の課題を解決すべくリアルタイムGIとクラウドサーバを用いたシステム化を提案する。リアルタイムGIでは、ライトプローブと呼ばれるライトマップを対象空間に多数配置し、建物などの静的物体による相互反射などの多数の光線経路のノード情報を、テクスチャとして事前計算しておく。ライトプローブの情報を辿ることでレンダリング時の計算コストを大幅に減少させつつ、間接光などの効果を含んだ質の高いCGをリアルタイムに描画する⁹⁾¹⁰⁾。本研究の対象シーンには、樹木や建造物等の複雑な形状を含むものの、動的な物体は必要ないため、リアルタイムGIの導入に適している。WBGTの推定は安室らの手法に基づいて行うものとする。

本研究で提案するシステムの処理手順を図-1に示す。リアルタイムGIには、日時と緯度経度から対象場所の日照条件を設定できるゲームエンジンを用いる。ユーザが暑熱リスクを知りたい場所と時間についてWebサーバ上で実行中のアプリ内でCGを生成し、クラウドサーバを介して、基本的な気象情報を取得したうえで、WBGTのヒートマップを生成してユーザの端末にリアルタイムに配信することにより、デバイスによらずに使用可能なシステムを開発する。クラウドサーバには気象庁が提供している予測データと、現地に設置している機材が取得した現地データが保存されている。まず、ユーザが見たい場所と日時をWebサーバ内で実行中のアプリにて指定する。システムでは、指定された設定にて日陰分布のCGをレンダリングし、クラウドサーバから取得した気温・湿度・風速のパラメータ使用し、CGの画素

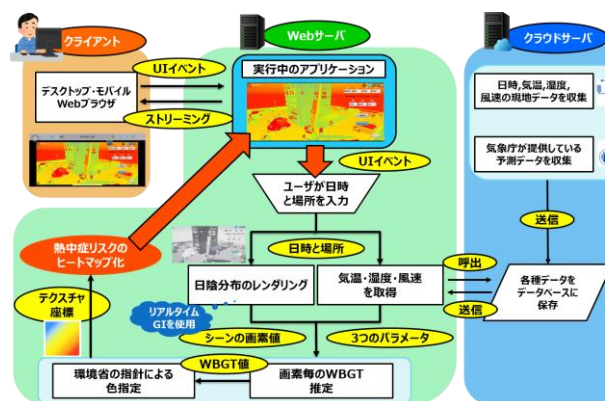


図-1 提案システムの処理手順

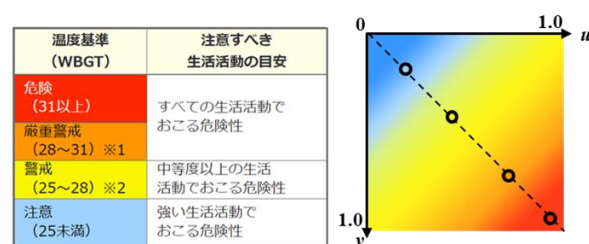


図-2 環境省の指針(左)と作成したテクスチャ(右)

毎にWBGTを推定する。推定値に応じて、図-2に示すテクスチャのUV座標を用いた色分け処理を行うことで、CGによる熱中症リスクのヒートマップ化を行い、Webブラウザを介してユーザの端末に暑さ指数分布を提供する。本研究で使用しているヒートマップテクスチャは、環境省が示している危険度合の色を基に作成した⁹⁾。

4. 実装と検証

本研究では、一眼レフカメラと同等の露出設定で、リアルタイムGIによるレンダリングが可能なゲームエンジンとしてUnreal Engine4(以下UE)を用いた。実環境に即したGIレンダリングのために、一眼レフカメラで露光を細かく設定しながら標準拡散反射板の実写撮影データを収集し(図-3)、画素値を基に、樹木・建造物におけるソフトシャドウ、3DCG空間内における直達日射(Lux)のパラメータについて設定を行った。UE内で天空の照明環境を設定するモジュールにおいて、ユーザが日時を指定できる入力画面を作成した(図-4)。ユーザがボタンを押すと、標準反射板と同じ拡散反射面を設定した地表に陰影を描いたCG(図-5)から画素値を抽出し、日時と場所に対応した気温・湿度・風速のパラメータと抽出した画素値を基にWBGTを画素ごとに推定する。尚、推定にはHLSLシェーダープログラムを使用して実装している。推定したWBGTの値と図-2に示すテクスチャのUV座標とを対応させて色変換を行うことでヒートマップを作成し(図-6)、実行結果をWebブラウザを介してユ



図-3 標準反射板(左)と実測した地表日陰の例(右)



図-4 パラメータの入力画面



図-5 地表の陰影CG

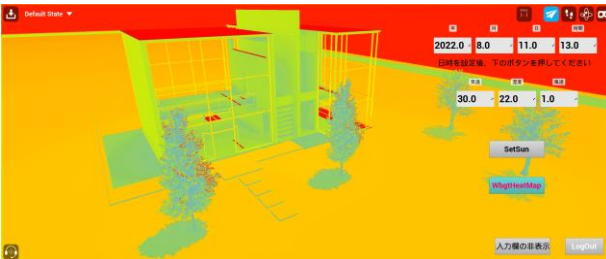


図-6 WBGT ヒートマップ

ーザの端末にリアルタイムに配信する(図-7, 図-8)。尚、気温・湿度・風速情報を収集するクラウドシステムが開発途上のため、現状は手動で入力している(図-4)。尚、アプリでボタンを押すと即時結果が表示されるが、CG生成にかかる時間は0.02秒(50fps)であった。

5. システムの適用例

(1) 摂津市平和公園における適用例

摂津市平和公園にて、庇蔭設備に対してレーザスキャナで3次元形状計測を行ってモデル化し、本手法を適用した(図-9)。本システムでは、図-9(左)の写真と同じ日時の当該地点の緯度経度を指定することで日陰分布を再現



図-7 携帯端末での表示

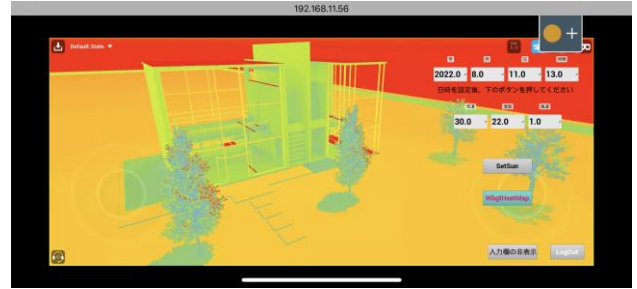


図-8 携帯端末での表示(ヒートマップ)

しており、3次元空間内の任意の場所に移動することで、暑熱状況を任意視点で分かり易く可視化できることが分かる。これは、公園等のユーザの身近な屋外の生活環境での詳細なWBGT情報をリアルタイムに提供し、市民に活用してもらえる可能性を示していると考えられる。尚、WBGT推定の精度について、この現場にて17個のサンプルデータを基に検証した結果、庇蔭下における実測値と推定値との平均誤差は約 -0.6°C (標準偏差; 約 0.3°C)、日向における実測値と推定値との平均誤差は約 $+0.1^{\circ}\text{C}$ (標準偏差約 1.2°C)であり、ゲームエンジンに実装されているリアルタイムGIによる陰影レンダリングが実環境のWBGT推定に有効であることが示された。

(2) 東京都渋谷区における適用例

3Dモデル活用サービス「PLATEAU」よりダウンロードした渋谷区(一部分)の3次元モデルに本システムを適用した例を図-10, 図-11に示す。本システムでは、「PLATEAU」が提供しているような都市の3次元モデルを活用することで簡単に暑熱環境を把握できるシステムとなっている。これは、公開が進められている都市の3次元モデルを取り込むだけで簡単に暑熱環境の暑さ指数分布と時間的な変化を調べることが可能であることを示している。

(3) 建設現場における適用例

仮想的な建設現場の3次元モデルに本システムを適用した例を図-12に示す。本システムでは時間変化による暑さ指数分布の推移も可視化できる(図-13, 図-14)。気象庁が提供している予測データを使用することで、管理者は事前に作業現場の暑熱リスクを把握することが可能

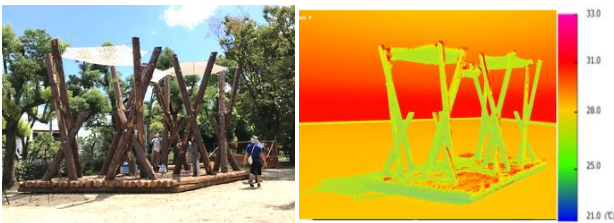


図-9 実際の公園での適用例

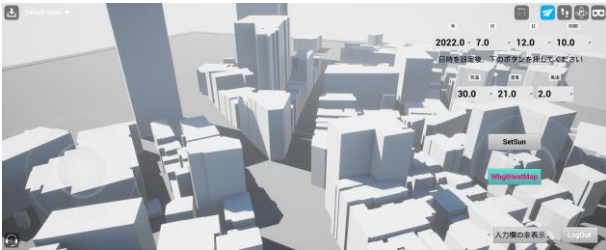


図-10 PLATEAUによる渋谷区での適用例

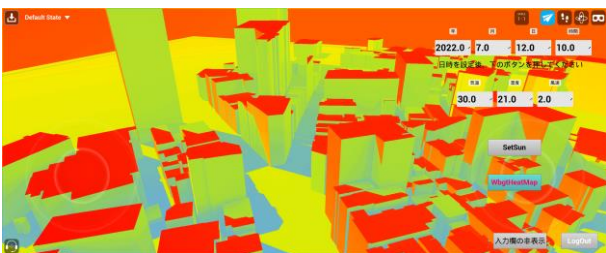


図-11 PLATEAUによる渋谷区のヒートマップ

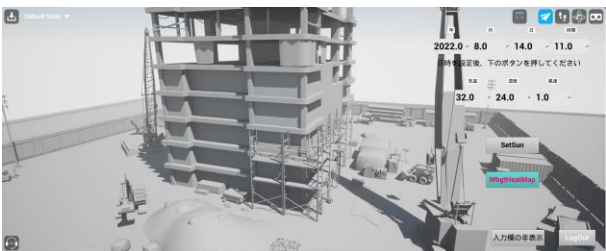


図-12 仮想的な建設現場での適用例

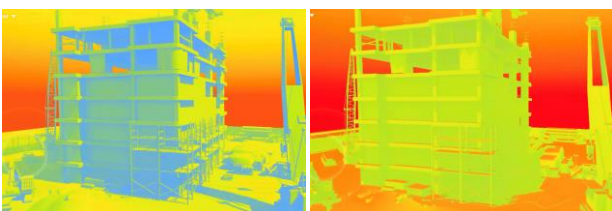


図-13 時間変化による暑熱状況の推移
6月11日10時(左) 6月11日14時(右)

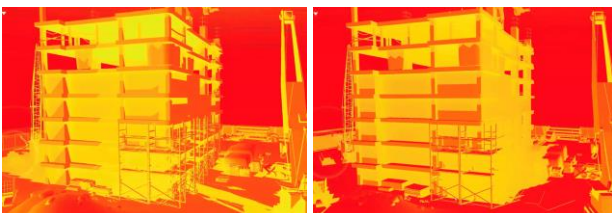


図-14 時間変化による暑熱状況の推移
8月13日10時(左) 8月13日14時(右)

である。これは、建設現場等の作業環境の安全管理において、季節の変わり目など作業者が熱中症になる可能性

の高い日時における暑熱リスクを事前にシミュレーションすることが可能な点や、管理者が作業現場の暑熱リスクを把握する可能性を示している。

6. おわりに

本研究では WBGT 推定におけるリアルタイム GI の有用性を示し、公園などの身近な場所や、屋外作業環境のヒートマップをリアルタイムで作成してユーザに提供するシステムを開発した。今後は、WBGT 推定に必要な基本パラメータ(乾球温度・湿球温度・風速)情報の集約の自動化を検討している。また、地物の3次元モデルの特性について、例えば、木の葉の透過率は考慮していないため、実計測によるパラメータ化についても検討する予定である。

謝辞：本研究の一部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 IDEAS2021I5, IDEAS2022I4 の助成による。

参考文献

- 1) 厚生労働省：熱中症による死亡数 人口動態統計（確定数）より，
<<https://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/jinkou/to-kusyu/necchusho19/index.html>>，（入手 2022.6.9）。
- 2) 総務省：令和2年（6月から9月）の熱中症による救急搬送状況 p4.
- 3) 厚生労働省：熱中症による死傷者数の時間帯別の状況（2016～2020年）p6.
- 4) 令和3年9月27日～10月3日までの全国の暑さ指数(WBGT)の観測状況及び熱中症による救急搬送人員数と暑さ指数(WBGT)の関係について（令和3年度第22報），
<https://www.wbgt.env.go.jp/pdf/R03_heatillness_report_22.pdf>，（入手 2022.6.9）。
- 5) 尾崎 平・安部 寛喜：「健康増進型公園の利用特性と暑熱環境の関係性分析」,土木学会論文集 G(環境), Vol.75, No.6 (環境システム研究論文集 第47巻), 2019.
- 6) 環境省：熱中症予防サイト，
<<https://www.wbgt.env.go.jp/>>，（入手 2022.6.9）。
- 7) 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」, ヒートアイランド論, Vol.8, p.13-21, 2013.
- 8) 安室他：「3DCGを用いた WBGT の推定とその適用」, 土木学会誌 G, Vol. 74, No. 6, pp. II-1-III-8, 2018.
- 9) 宮崎大輔, 床井浩平, 結城 修, 吉田典正：コンピュータグラフィックスの基礎, オーム社, 2020.
- 10) 倉地紀子：CG Magic: レンダリング, オーム社, 2007.