⑷ リアルタイムGIと公開情報インフラを用いた屋外環境における熱中症リスクの可視化

角田　直嵩[1]・尾﨑　平[2]・窪田　諭[3]・檀　寛成[4]・安室　喜弘[5]

[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]非会員　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: dan@kansai-u.ac.jp

[5]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

熱中症の起こりやすさを数値化し，熱中症リスクの高さを判断基準として開発された暑さ指数は，現代社会が抱える地球温暖化やヒートアイランド現象による熱中症リスクの増加という問題に対処する重要な情報となっている．環境省は暑さ指数を都市圏単位でWebで公開しているが，市民にとっては，身の回りの生活空間や作業環境における熱中症リスクを把握するには限定的な情報である．同一の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，個々の行動や作業の計画も立てやすい．本研究では，公開情報インフラである 3D データと気象情報データを利用して，具体的な現場・地域環境に対して日照条件を計算し，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 を基盤として，暑さ指数をピクセル単位で推定する．ゲームエンジンを援用した実装により，逐次的に変動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し，Web 上で配信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*

1. はじめに

地球温暖化やヒートアイランド現象が引き起こす深刻な気候変動の影響により，熱中症患者数並びに死亡者数は，現代社会において依然として増加傾向にある[1]．特に，外出時における熱中症患者の割合が全体の約60%に達しており[2]，熱中症が特定の時間帯に限定されずに発生する可能性も上昇している[3]．また，環境省が提示している熱中症リスクの指標 WBGT（Wet Bulb Globe Temperature）に注目すると，令和4年度の値は，過去10年の平均値を越え，その上昇傾向が継続しているという結果が示されていた[4]．日々の生活活動には，屋外での維持清掃作業，近隣商店への訪問などの必要性があり，健康促進の観点から，公園訪問などが広範な年齢層にとって習慣的な行為となっている[5]．環境省は都市ごとのWBGT値をWeb上で公開し，注意喚起を行っている[6]．しかし，都市域単位の指標は粒度が粗く，街区や公園のような屋外生活空間や，建設現場等の特定の屋外作業環境に対しては，個々のリスクにどれだけ当てはまるかが分かり難い．特に，施設や現場の管理者にとって，訪問者や作業員が直面する環境のリスクの精確な理解は重要である．また，学校等の教育機関では，体育等の授業前や体育祭，遠足等の校外活動の前や活動中に，定期的にWBGTを計測し危険度を把握することで，より安全に授業や活動を行うことが義務付けられている[7]．しかし，WBGT計測器を多数配置し情報を収集するというアプローチには制限があり，現状では，各個人が自身の経験に基づいて判断し対応している．本研究では，地域別の気象データとグローバルイルミネーション（以下 GI）を利用した3DCGによる地表日射量推定により，逐次的に変動する日照環境下の暑さ指数分布を可視化し，一般ユーザへ提供する新たな方法を提案する．

2. 既往研究

WBGTは気温，湿度，輻射熱に基づき算出され，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，黒球温度を推定した [8]．安室らは，全天日射量と標準反射板上の陰影写真の画素値の相関を基に，CG で表現された地表の陰影から全天日射量を求め，岡田らの手法を用いて WBGT を推定した [9]．GI は，光エネルギーの大域的輸送を光学的・物理学的に取り扱う CG 技術で，植生や建築物等の地物を含めた日射状況のシミュレーションが可能である．しかし，GI は多数の光路を追跡し，大量の計算を要するため，視点や時間等の条件を変える度にレンダリング処理に時間がかかることが，一般ユーザ向けサービスの実装における課題となっていた．筆者らは，リアルタイム GI を活用したゲームエンジンを用いて GI による日射 CG の生成を高速化し，リアルタイムに基本気象情報を取得するシステムを開発することで，時々刻々と変化する日照条件に対して場所を問わずに暑さ指数分布を可視化し，一般ユーザに Web 上でストリーミング配信する手法を提案し，その機能の有効性を示した [10]．ただし，この手法では，GI を適用した CG 生成において，当該地域をカバーする地物の 3D データが不可欠であり，3 次元データが公開されてない地域も多いことから，本手法を適用可能な対象地域は限定的であった．また，WBGT 算出に必要である気温や湿度といった各地域の基本的な気象情報データを自動収集しておき，地域や時間別に参照可能とする仕組みについても未解決であった．これらを解決するシステム化が，ユーザのリクエストに応じて任意の地域・時刻における暑熱リスクを提示するという情報サービスの実現への課題となっていた [10]．

3. 提案手法

本研究では，上記の課題を解決すべく，筆者らが既に構築している WBGT 推定機能をもつアプリケーションサーバに対して，インターネット上で公開されている気象データサービスや 3D 情報提供サービスを活用して，必要なデータを収集して活用するシステムを提案する．本研究で提案するシステムの処理手順を図-1 に示す．

アプリケーションサーバで利用するリアルタイム GI は，相互反射など多数の光線経路を考慮するため，ライトプローブと呼ばれる全方位のライトマップをテクスチャとして先に計算して，対象空間に数多く配置する．本研究の対象は，樹木や建物等を含む静的なシーンであるため，計算ずみのライトプローブを辿ってレンダリングするリアルタイム GI に適している．リアルタイム GI には，日時と地理座標から日照条件を設定可能なゲームエンジンを活用する．

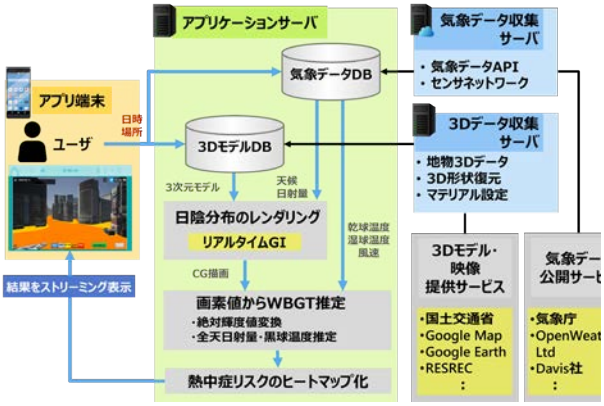


図-1 提案システムの構成と処理手順

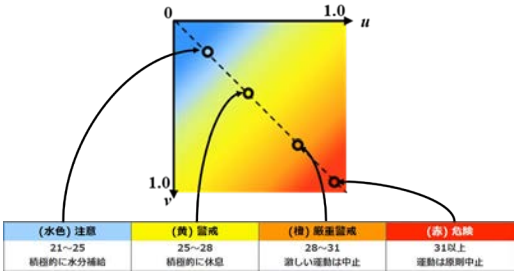


図-2 環境省の指針を基に作成したテクスチャ

ユーザは手元の端末の Web ブラウザから日時と場所を指定し，ネットワークを介してアプリケーションサーバにアクセスしてこのアプリケーションを利用する．アプリケーションサーバでは，ユーザが指定する日時と場所の情報をクエリとして，該当する気象データと 3D データをデータベースから抽出して日照状況の CG 生成を経て WBGT 推定を行う．気象データ収集サーバは，公開 API を通じて提供される気象データサービスや，地域に設置された観測器によるセンサネットワークを利用して，気象情報を自動的に取得し，該当情報を気象情報データベースに保存する．アプリケーションサーバの WBGT 算出に必要となるデータ項目を属性としてデータベースを設計しておくことで，異なる情報源から収集したデータも有効に活用できるようになる．3D データ収集サーバは，公開されている地物の 3D データ及びマテリアル情報を自動的に収集し，これらの情報を 3D モデルデータベースに保存する．3D データが公開されていない地域については，ネット上で 3D 表示可能な地図サービスから 3 次元再構成しておくことで，データベース化する．このようなシステム構成により，情報インフラとして既に広く利用されている他のサービスが提供している情報との親和性を高め，本手法の適用範囲を拡張できることが期待される．

WBGT の推定値に応じて，図-2 に示す環境省が示している危険度合の色を基にしたテクスチャの UV 座標を

により色分け処理を行うことで，CG による熱中症リスクをヒートマップとして可視化する．可視化結果は，Web ブラウザを介してユーザの端末に提供する．

4. 実装と検証

本研究では本来ゲーム開発のプラットフォームである Unreal Engine4（以下 UE）を利用した．UE はリアルタイム GI と地理座標に基づく太陽配置機能をもち，また一眼レフカメラの露光設定に相当する機能があり，それを利用することで写実的な CG 生成が可能である．

ユーザーが特定の地点を選択できるように，UE 内に**図-3** に示すような入力インターフェースを実装した．地名を入力後，該当する地名の選択ボタンが表示され，ユーザがボタンをクリックすると，該当地域の 3D データが展示されているマップに自動的に遷移する．尚，地名を都道府県で検索した際には，対応する市町村区のボタンがすべてリストアップされ，スクロール形式で選択可能となっている．日時の設定方法や，設定後の WBGT 分布のヒートマップ出力処理は，筆者らの既存手法に基づいて実行される．

気象データ収集サーバは OpenWeather 社が提供する OpenWeatherMapAPI を用いて気象予報データを取得している．この API は地域レベルでの気象情報を提供し，WBGT 推定に必要な基本的な気象情報や，リアルタイム GI による CG 生成に要求される特定の地点と時間の情報も利用可能であるため，本研究に適している．取得した気象予報データは，Amazon 社が提供するクラウドサービスである AWS のリレーショナルデータベースサービス（RDS）内に作成したデータベースに格納している．

本提案システムでは，国土交通省が提供している PLATEAU のような，公開されている広範で詳細な 3D 都市データを用いている．また，オープンソースのデータが利用できない場合でも，Google Map から公開されている 3D データを活用し，それに基づいた空撮画像を Google Earth Studio を用いて生成し，生成した画像から Structure from Motion（SfM）ソフトウェアの Aisoft 社製 Metashape を用いて 3 次元再構成を行うことで，**図-4** に示すような 3D データを得ることが可能である．尚，3D データ収集サーバは現在開発途上である為，3D データの収集については手動で行っている．

5. システムの適用例

(1) 東京都 渋谷区・新宿区における適用例

国土交通省が提供している 3D データ活用サービス，

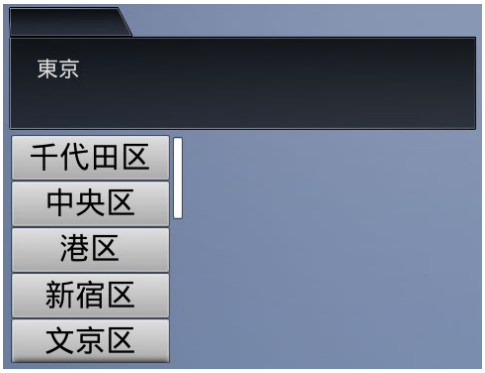


図-3 地点の入力画面

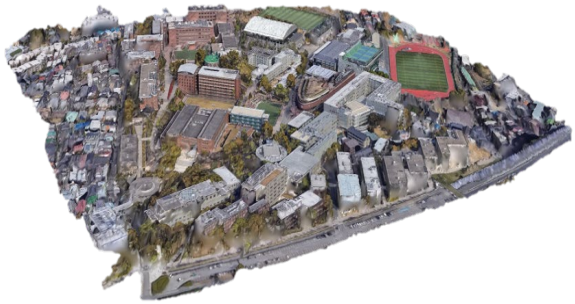


図-4 SfM に基づく 3 次元再構成（吹田市：関西大学）

PLATEAU から取得した渋谷区と新宿区（一部）の 3D データを本提案システムに適用した例を示す．PLATEAU のような都市の詳細な 3D データを用いることにより，本システムは効率的に暑熱環境を評価可能である．さらに，気象情報データベースに格納されている時間に応じた気象データと組み合わせることで，**図-5**，**図-6** に示すように日夜間における詳細な熱中症リスクの分布を可視化できることを示している．尚，本稿執筆時では，2023 年 8 月の気象情報は取得不可能であったため，2022 年 8 月 11 日のデータを CG 生成に使用しているが，最新の気象予測データが利用可能な場合，それらを用いて WBGT 分布の予測ヒートマップを提供可能となっている．

(2) 熱中症リスク予測の検証例

2023 年のゴールデンウィーク期間中において，気象庁が公表した平均気温 18.8℃を上回る気温が観測された．特に 5 月 6 日の東京の最高気温は 27.9℃に達し，これにより外出者に対する熱中症リスクが高まる潜在的な状況が発生していた．2023 年 5 月 6 日 12 時 30 分の気象観測データを本システムに適用した結果，**図-7** に示すように新宿駅前の熱中症リスクは積極的に水分補給を行うことを推奨するリスクレベルにあった．この結果は，一般的に熱中症リスクが低いと認識されている期間であっても，リスクが存在する可能性を示唆しており，本システムはそれを検証するための効果的な手段であることを示している．

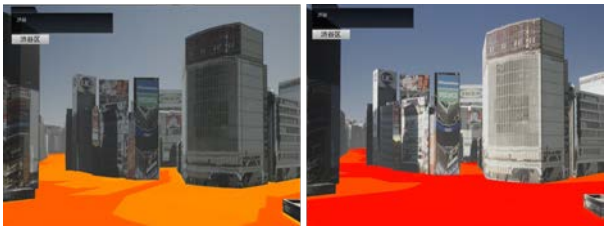


図-5　日中での渋谷区のヒートマップ
2022 年 8 月 11 日 10 時(左) 8 月 11 日 14 時(右)

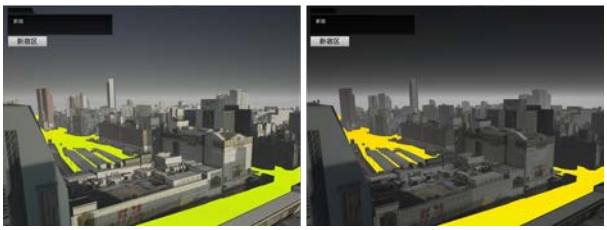


図-6　夜間での新宿区のヒートマップ
2022 年 8 月 11 日 18 時(左) 8 月 11 日 22 時(右)

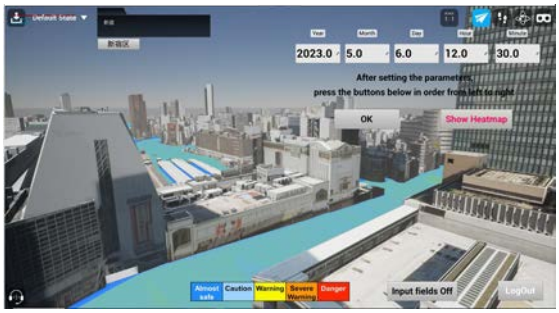


図-7　日中での渋谷区のヒートマップ
2023 年 5 月 6 日 12 時 30 分

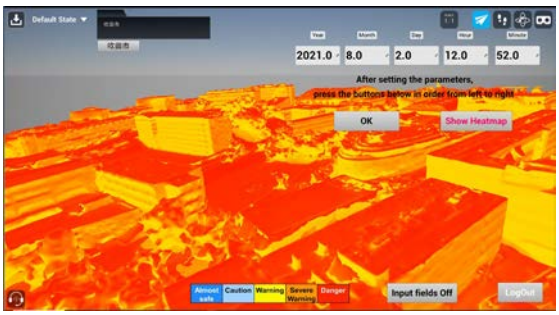


図-8　吹田市：関西大学のヒートマップ
(SfM に基づく 3 次元再構成), 2021 年 8 月 2 日 12 時 52 分

(3) 大阪府 吹田市 関西大学における適用例

(1)の PLATEAU のようなオープンソースの 3D データが利用できない地域については，GoogleMap の 3D 表示のような既成のサービスから，SfM で 3 次元再構成することで本手法に適用し，**図-8** に示すようなヒートマップを生成することが可能である．Google Earth Studio を用いて周囲の地域を網羅的に空撮することで，低コストで大規模な 3D データの収集が可能となることを示した．

6. おわりに

本研究では公開気象情報と 3D データを活用するシステムをゲームエンジンを用いて開発し，多様な地域・時刻での WBGT 推定とリアルタイムヒートマップの提供を可能にした．今後は，気象データから得られる晴天や曇天などの天候情報を基に，曇天時の WBGT 推定を可能にする新たな日射相関式を作成することを目指している．また，地物の 3D モデルの特性(例：葉の透過率)は現在考慮していないため，これらのパラメータを実測値により精緻化することについても研究を進める予定である．

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 IDEAS2022I4, IDEAS202321 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），<https://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/jinkou/tokusyu/necchusho19/index.html>,（入手 2023.6.1）.
2) 総務省：令和 4 年（5 月から 9 月）の熱中症による救急搬送状況 p4，<https://www.fdma.go.jp/disaster/heatstroke/items/r4/heatstroke_geppou_202205-09.pdf>,（入手 2023.7.6）.
3) 厚生労働省：職場における熱中症による死傷災害の発生状況 p6，<https://www.mhlw.go.jp/content/11200000/000900487.pdf>,（入手 2023.7.6）.
4) 環境省：令和 4 年 9 月 26 日～10 月 2 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 4 年度第 22 報），<https://www.wbgt.env.go.jp/pdf/R04_heatillness_report_22.pdf>,（入手 2023.6.1）.
5) 尾崎他：「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 2022.6.1）.
7) 環境省，文部科学省：学校における熱中症対策ガイドライン作成の手引き（令和 3 年 5 月），<https://www.mext.go.jp/content/210528-mxt_kyousei01-000015427_02.pdf>,（入手 2023.6.1）
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」, ヒートアイランド論, Vol.8, p.13-21, 2013.
9) 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-IIII-8, 2018.
10) 角田他：「リアルタイム GI による屋外環境の暑熱リスクの可視化」, 土木学会論文集, Vol. 79, No. 22, 22-22016, 2023.
11) 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.
12) 倉地紀子：CG Magic:レンダリング, オーム社, 2007.