

デジタルツインとゲームエンジンを活用した暑熱環境リスクの可視化

関西大学 環境都市工学部 教授 安室喜弘

1 研究目的

1.1 背景

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、熱中症患者数並びに死亡者数が増加傾向にある¹⁾。職場での熱中症患者数は、2017年から2023年にかけて建設業が全業種中で最高を記録し886件に上る。同期間中、建設業における熱中症による死亡事故は54件であり、これも各業種の中で最多となっている²⁾。熱中症は命に関わる病気であるが、個人が発生リスクや予防法を知ること

暑さ指数 (WBGT)	注意すべき生活活動の目安
危険 (31以上)	すべての生活活動でおこる危険性
嚴重警戒 (28~31) ※1	
警戒 (25~28) ※2	中等度以上の生活活動でおこる危険性
注意 (25未満)	強い生活活動でおこる危険性

図-1 WBGT 値に関する注意喚起(環境省 HP^{注4)})

ことで簡単に回避できる可能性が高い。熱中症防止のための指標としては、暑熱環境指標である WBGT(Wet Bulb Globe Temperature)³⁾ が広く用いられている。これは、米軍の演習における熱中症を予防する目的で提案された指標で、ISO7243⁴⁾ (JIS Z 8504⁵⁾)にて規格化されており、労働環境や日常環境における指針として認められている⁶⁾。環境省は WBGT を Web 上で公開し⁷⁾、図-1 に示すような基準で、熱中症予防を啓発しているが、このような指標は都市域を単位とした数値であり、更新頻度も1時間単位であるため、建設現場に代表されるような屋外活動の環境内での具体的な場所ごとのリスクの認識には結び付き難い。特に、施設や現場の管理者は、来訪者や作業者に与える環境のリスクを的確に把握することが必要である。しかし、多数の WBGT 計測器を広範囲に配置し情報を集約するような方法にも限界があり、多くの現場では、個々人が自らの経験に従って判断し、対処しているのが実情である。また、人体への熱ストレスは日射だけでなく湿度や風等の気象要素にも大きく影響されるため、特に湿度の高い日本の夏は、特有の過ごし難さとなっている⁸⁾。実際に、晴天時以外に熱中症が発生する可能性も決して低くなく、例えば、2024年7月から8月に大阪府下では熱中症警戒アラートが30回出され、そのうち7回は雲量7以上であった⁹⁾。本研究では、熱中症リスクが必ずしも晴天時に限って高いわけではないことに注目し、天空の雲量パラメータによって地表の日射量が決まるようなモデルを導入し、地物によってできる陰影を考慮しながら、様々な空模様の下で暑さ指数分布を推定する方法を考案する。

1.2 関連研究

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、乾球温度の公開気象データを説明変数として黒球温度を推定した¹⁰⁾。安室らは、地表に置いた標準反射板上で日射や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、写真画像を大域照明(Global Illumination; GI)を用いた3次元CGに置き換えて、画素毎に全天日射量を推定し、さらに岡田らの方法でWBGTを推定した¹¹⁾。角田らは、リアルタイムにGIを運用できるゲームエンジンを用い、基本的な気象情報をWebで参照することで、時間と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システムを提案した¹²⁾。GI

は、多様な光の経路を考慮して、拡散や相互反射などの光の授受を光学的・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写実的な表現が可能である¹³⁾。しかし、安室や角田の手法では、時刻と緯度経度で定まる太陽高度だけで日射条件を設定するため、基本的に快晴状態が想定できる場合のみ適用できる。晴天から曇天にかけて、無限に変化する雲量によって散乱する太陽光の影響を表現できず、快晴以外の様々な天空状況下で生じる熱中症リスクに対応できないことは大きな課題である。

2 本研究の方針

本研究では、既往研究の課題に対して、ゲームエンジンにおけるシーン内に雲を発生させ、快晴以外の天空光を表現することで、様々な天候時の地表での暑さ指数を推定することを考える。図-2(上段)に示すように、地表への全天日射量に影響を及ぼす主たる要素は、直達日射量として直接太陽から到達する光と、天空全体から降り注ぐ天空日射である。天球の雲量が増えると、雲の層における透過・散乱を経て地表に届く光の経路が複雑化し、直達日射量が減少し、天空日射の割合が増加する。ここでは、簡単のため、ゲームエンジンの天空光環境設定(図-2(下段))において、雲が天空を占める割合(Cloud Coverage: 以下 CC)と雲の層の厚さ(Layer Height Scale: 以下 LHS)をパラメータとする。気象条件と地表での日射量の実測値を取得しておき、これらの組合せをゲームエンジンで再現できるように、これら2つの雲のパラメータを設定することで、特定の気象情報から、地表での日照量を推定が可能になると考えた。日照量が推定されれば、既往の研究^{11, 12)}で用いられる処理に基づいて黒球温度推定および WBGT 推定に繋がられる。パラメータの設定方法としては、図-3 に示すように、CC を雲量の値から、LHS を基本的な気象情報を入力値として日射量を出力値とする回帰モデルを作成し、推定された日射量と対応する値を事前に決定しておくことで行う。本研究で提案する処理フローを図-4 に示す。本手法では、ユーザは暑熱リスクを知りたい日時と場所を入力するものとする。ユーザ入力に対応する 3D データと基本的な気象情報を、角田らの先行研究¹²⁾と同様に、それぞれ 3D データサーバと気象サーバから



図-2 天空光の模式図(上段)とゲームエンジンによる様々な雲量・時間帯の天空照光環境設定(下段)

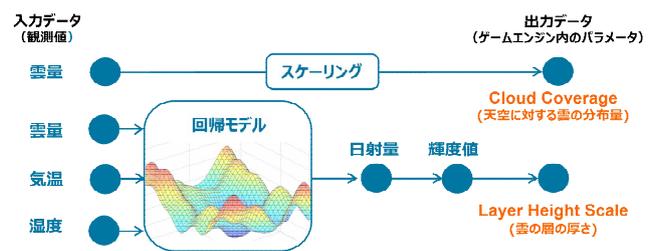


図-3 雲のパラメータ決定モデルのデータフロー

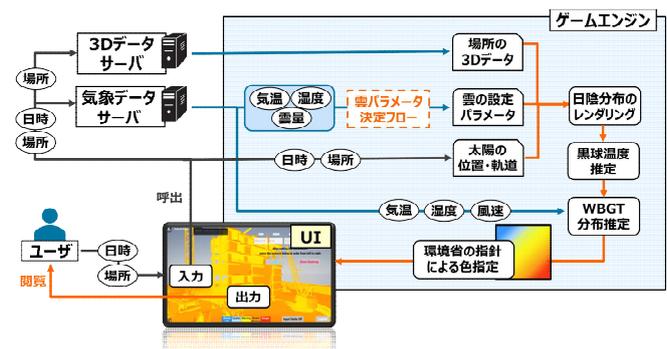


図-4 提案手法のフローチャート

取得するものとする。周囲の地物の影響を受けにくい開けた場所での代表地点において、全天日射量を回帰モデルで推定し、その直達日射量を再現する雲のパラメータ値を設定することで、対象地域の日陰分布をCGで描画し、周囲全体の日射状況を表現する。このように生成されるCGの画素に対して、既往研究¹¹⁾の処理により黒球温度推定および、気温(乾球温度)・湿度(湿球温度)・風速の各参照値を適用することで画素毎にWBGTを推定する。推定値に応じて、環境省が示す図-1の4段階の指標に対応した色を補間して色付けしたヒートマップ状のテクスチャマッピングでCGを生成する。気象データとして、気象庁が提供している予測データや、OpenWeather社が提供するOpen Weather Map API¹⁴⁾により国内や、世界各地の気温、湿度、風速、雲量の各データが自動的に取得可能である。3Dデータとしては、国土地理院により公開されている3Dデータや、角田らの先行研究¹²⁾により、公開情報を元にした3Dデータが使用できるものとし、ユーザは日時・場所を指定することで、様々な天空条件下における暑さ指数分布の閲覧が可能となる枠組みである。



図-5 計測地点(関西大学千里山キャンパス)(上段)と3次元データ(下段)



図-6 データを5分割した交差検証過程

3 研究の経過

3.1 回帰モデルの構築

本研究では、雲量が異なる天候において、気温・湿度・雲量を説明変数として全天日射量日射量を推定するための回帰モデルを構築するために、2023年6月下旬から9月下旬にかけて、様々な雲量での天気において、吹田市関西大学の悠久の庭(図-7)で測定し収集した気象データを使用した。それぞれデータ構成として、乾球温度・湿球温度・黒球温度・湿度・日射量・照度・風速・雲量を計測し、データ数は102組であった。回帰モデルの構築において、容易に公開情報が入手可能な気温・湿度・雲量を説明変数とし、目的変数を日射量として設定した。モデル構築では、線形回帰・回帰木・SVM・ガウス過程回帰・カーネル近似回帰・ニューラルネットワークの各手法で構築したモデルを比較した。図-6に示すように、各手法でモデルを構築しデータを5分割して1/5のデータを訓練とテストに切り替えて交差検証を行い、スコアのRMSEと決定係数を算出した。そのうち、図-6に示すガウス過程回帰が最

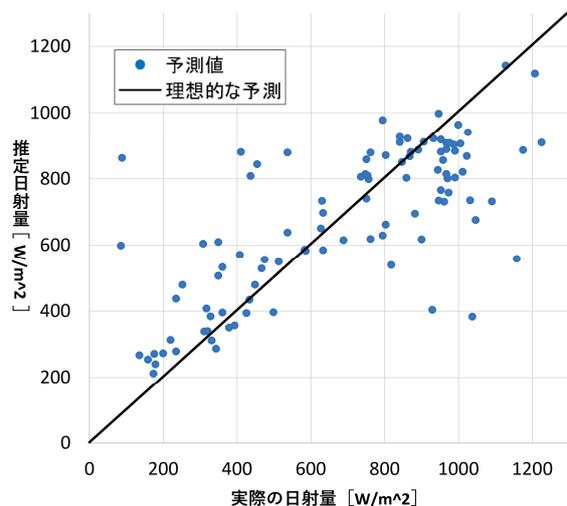


図-7 日射量の推定結果

も精度が高かった。ガウス過程回帰は小規模なデータセットに適しており、推定される関数は一つの関数ではなく、関数の分布として得られるため、推定の不確実性も含めて表現することができる¹⁵⁾。モデルの精度としては、RMSE(Root Mean Squared Error)=207.8, 決定係数 R2=0.55 となった。

3.2 暑熱リスクの可視化

本稿では、暑熱リスクの指標であり WBGT 値の推定実測値の比較をより正確に行うために、実測地点の地物に基づく 3D モデルを作成した。本研究では、実測地点である関西大学の悠久の庭において、地上型レーザスキャナを用いて詳細な測定を実施した。取得した点群データに対してメッシュ処理を施し、高精度な 3D モデルを生成した(図-7(下段))。実環境の地物を忠実に再現しているため、実際の陰影状況を再現することが可能になり、推定 WBGT の精度の信頼性を向上できる。

リアルタイム GI による CG 描画が可能なゲームエンジンとして Unreal Engine5(以下 UE)¹⁶⁾を用いて、UE 内の太陽光の最大照度(lux)を設定し、標準拡散反射板と同様の表面反射特性を設定した地物の 3D モデルで日照状況を CG 描画した。UE 内での雲の詳細設定には Ultra Dynamic Sky のライブラリ(以下 UDS)を用いた。日時と当該地域の緯度経度を指定し、公開されている気象情報から雲のパラメータを設定する。雲量 0~100 の値を 0~2.2 にスケールを正規化して CC に入力し、気温・湿度・雲量から回帰モデルを通して決まる推定日射量と一致するように LHS を設定することで、天空状態を決定することが可能となった。これを基に決まった地表の陰影状況(図-8)に対し、角田らの方法¹²⁾と同様に、CG の画素ごとに WBGT 値を推定し、ヒートマップ状のテクスチャにより、身の回りの熱中症リスクを表示された(図-9)。同図の中で、雲量が増えた曇り空の下では、地表の陰影の境界が曖昧になった

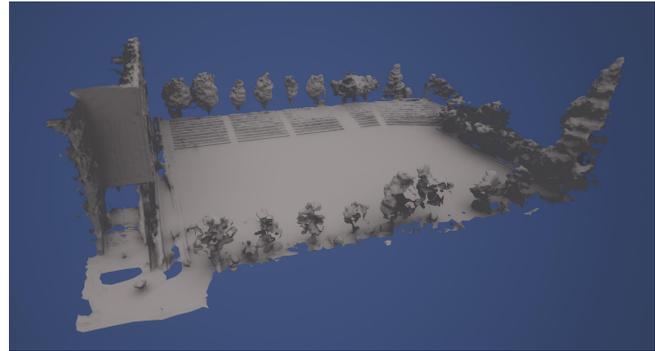


図-8 地表の陰影 CG

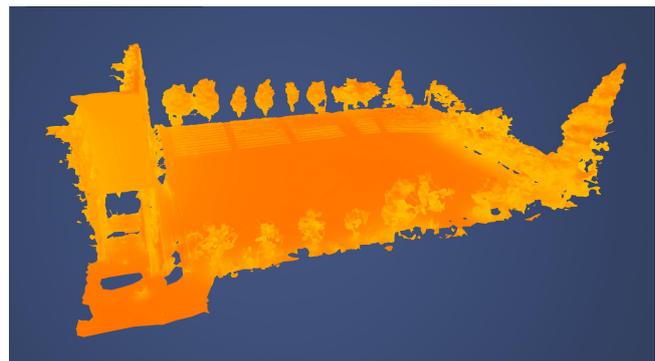


図-9 WBGT ヒートマップ

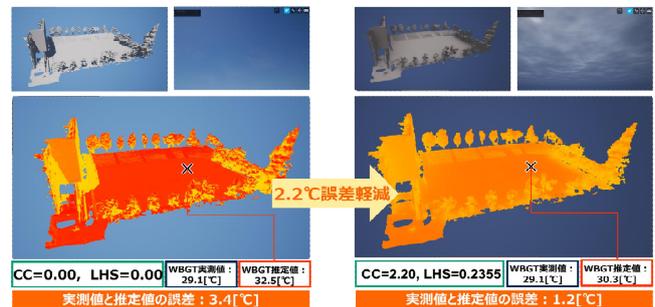


図-10 2023/9/2/11:11, 乾球温度: 35.7[°C], 湿球温度: 24.7[°C], 風速: 1.03[m/s], 雲量: 100 での比較

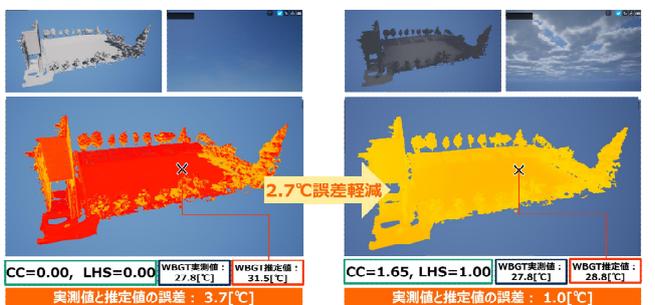


図-11 2023/9/6/12:26, 乾球温度: 32.3[°C], 湿球温度: 24.8[°C], 風速: 2.06[m/s], 雲量: 75 での比較

状況で、密度の高い WBGT による暑さ指数分布が表示できている。

4 結果

4.1 回帰モデルの精度

天空での雲の存在を考慮していない角田らの方法と提案手法とで、WBGT 推定の精度比較を行った。実測を行った地点を含む関西大学キャンパスの 3 次元モデルをゲームエンジン内に用意し、同条件で比較した例を図-10 と図-11 に示す。Open Weather Map API で得られる基本気象データとして、2023 年 9 月 2 日 11 時における乾球温度：35.7℃，湿球温度：24.7℃，風速：1.03m/s，雲量：100 を入力とした場合、角田らの既往手法では、実測値よりも 3.4℃高く WBGT が推定されているのに対し、提案手法では、+1.2℃まで誤差が低減された(図-10)。同様に、雲量：75 の 2023 年 9 月 6 日 12 時では、既往手法で+3.7℃の誤差に対して、提案手法で+1.0℃まで誤差に抑えられたことが分かった(図-11)。誤差が低減され、赤色から橙色～黄色に表示が変わったとはいえ、依然、嚴重警戒から警戒という指標に相当するため、曇天下での暑熱リスクへの注意喚起として適切である。

今回取得した計測データ全体に対して、得られた回帰モデルで推定される日射量から算出された WBGT の推定値を実測値と比較した結果を図-12 に示す。全体として平均誤差は実測値より 1.4℃(標準偏差 0.55℃)程度高く推定されていたことが確認された。この誤差は、暑熱リスク提示としては安全側ではあるものの、回帰モデルの精度を向上が望まれる。誤差の原因は、計測したデータが全て瞬間値である点とデータ不足が挙げられる。また、同じ雲量値の時間帯においても、地表 1 点での計測では、図-13 に示すように、雲の流れによって日差しが刻々変わるため、日射量は時間的に大きく

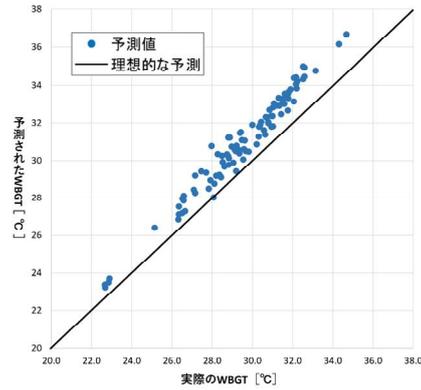


図-12 推定日射量から推定された WBGT 値

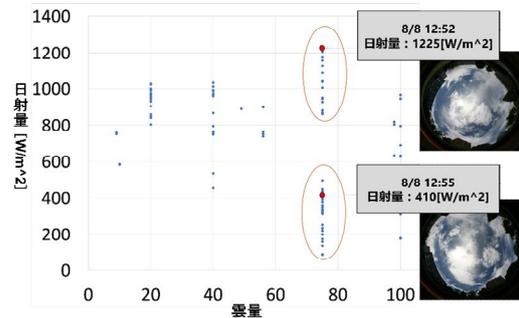


図-13 同じ状況下における日射量の違い

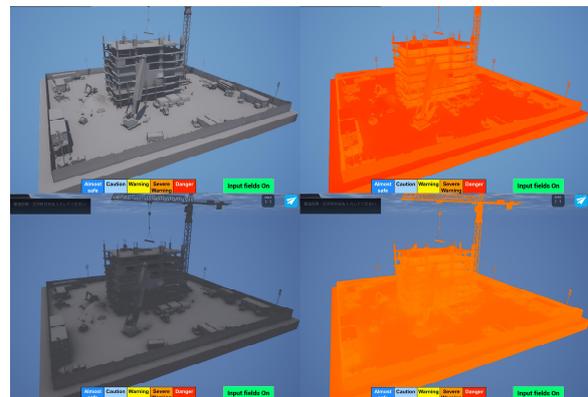


図 14 仮想的な建設現場でのシステムの適用例
 (上段 2023/6/29/11:34, 乾球温度：35.6[℃],
 湿球温度：25.8[℃], 風速：4.20[m/s], 雲量：40)
 (下段 2023/6/29/12:26, 乾球温度：35.5[℃],
 湿球温度：25.7[℃], 風速：3.60[m/s], 雲量：75)

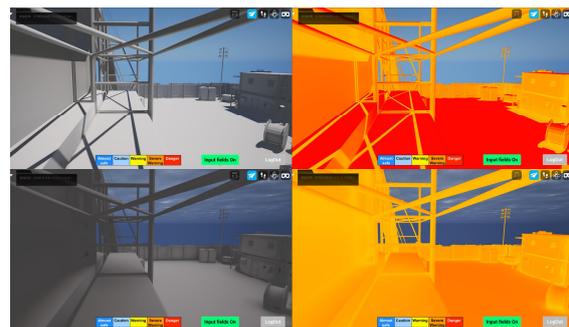


図-15 作業者目線での日射状況(左列)と WBGT 分布(右列)

変動する場合がある。このような天空での雲の分布や計測値の時間変動を考慮して、今後データを増やす必要があると考える。

4.2 個別現場へのシステムの適用例

BIM のデータや設計資料などを基に建設現場の 3D モデルが利用可能となるという想定の下、提案システムを適用した例を図-14 に示す。このシステムでは、現場の位置(緯度、経度)や日時を指定することで、管理者は作業現場の所望の時間帯の暑熱リスクを把握することが可能となる。また、図-15 に示すように、足場のような作業者の動線上における暑熱状況を可視化可能であることから、管理者が作業現場の暑熱リスクを細部まで把握できる可能性を示している。これにより、作業対象箇所のスケジューリングや、簡易的な庇蔭を増やすなどの熱中症への具体的な対策を講じることができる。また、可視化結果は、スマートフォンやタブレット等で容易に共有でき、現場で各人が確認し対応することにも繋がると考える。特に、本手法により、盛夏以外の季節の変わり目や、1 日の中での気圧配置の変化において、気温の数値以上に体感的に蒸し暑い状況で、熱中症リスクを見逃すことなく定量化できることから、建設作業環境等での健康・安全管理面に寄与できるものと期待する。

4.3 グローバルな都市データへの適用例

ここでは、多機能な CG モデリング・レンダリング用のフリーソフト Blender の Blender GIS アドオンを使用して、公開されている海外の都市への適用を図った。このアドオンを使用すると、ウェブから直接地理データを取得し(図-15 ①)、汎用的な 3 次元モデルデータとして OBJ 形式でエクスポート可能である。一般的な GIS データ形式を Blender にインポートし、NASA SRTM ミッションから実際の標高データを取得するオプションにより OpenStreetMap データ(建物、道路など)をリクエスト可能(図-15 ②)である。地形データに対して、建物などの構造物のデータを追加して入手し、OBJ 形式の 3 次元データに付随する mtl 形式のファイルにて標準拡散板の反射特性を設定することで、反射率や色彩などの表面材質を本手法に整合させて適用できる(図-15 ③)。本事



図-16 海外の 3 次元データに本手法を適用した例：

業現場の暑熱リスクを把握することが可能となる。また、図-15 に示すように、足場のような作業者の動線上における暑熱状況を可視化可能であることから、管理者が作業現場の暑熱リスクを細部まで把握できる可能性を示している。これにより、作業対象箇所のスケジューリングや、簡易的な庇蔭を増やすなどの熱中症への具体的な対策を講じることができる。また、可視化結果は、スマートフォンやタブレット等で容易に共有でき、現場で各人が確認し対応することにも繋がると考える。特に、本手法により、盛夏以外の季節の変わり目や、1 日の中での気圧配置の変化において、気温の数値以上に体感的に蒸し暑い状況で、熱中症リスクを見逃すことなく定量化できることから、建設作業環境等での健康・安全管理面に寄与できるものと期待する。

例では、南半球のヨハネスブルグのデータにて実行できることを確認した(図-15 ④)。

4.4 結論

本研究では限られた気象情報を基にゲームエンジン内の雲量設定パラメータを決定するモデルを構築し、天空光環境を再現することで様々な空模様の下で暑さ指数分布を面的に推定することを可能にした。現在、本稿で用いている各気象データの瞬間値の代わりに、時間的ばらつきを考慮したデータ収集を進め、回帰モデルの精度向上を図っている。また、ゲームエンジンでの雲の

パラメータは、推定された日射量が地表での標準拡散版の色と同じ RGB 値となるように、手動で探索した過程がある。この過程の自動化に向けては、太陽からの直達日射と、天球に存在する雲により拡散されてあらゆる方向から到達する天空光日射とに分解して数値化¹⁷⁾することで、ゲームエンジンでの光源設定を簡単化する方法の検討を進めている。さらには、現状では、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。

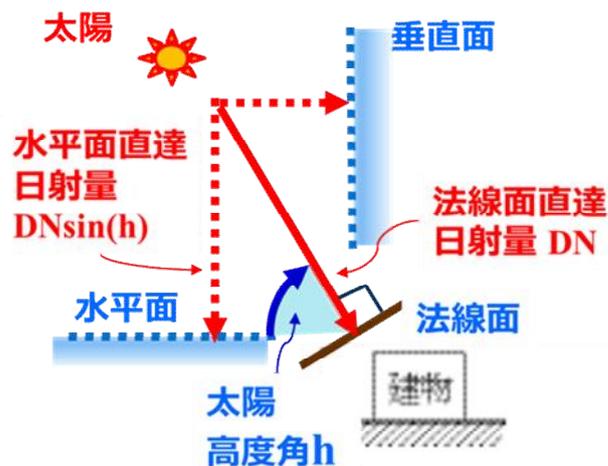


図-17 直達日射量

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/tokusyuu/necchusho20/index.html>>,(入手 2024.10.21)
- 2) 厚生労働省：熱中症による死傷者数の業種別の状況（2018～2022年）p2,
<<https://www.mhlw.go.jp/content/11200000/000900487.pdf>>,(入手 2024.10.21)
- 3) Control of Heat Casualties at Military Training Centers : American Medical Association Archives of Industrial Health ,Vol. 16, pp. 302-316, 1957.
- 4) International Organization for Standardization. Ergonomics of the thermal environment : Assessment of heat stress using the WBGT (wet bulb globe temperature) index. ISO7243: 2017.
- 5) 日本産業規格：熱環境の人間工学—WBGT(湿球黒球温度)指数を用いた熱ストレス評価. JIS Z8504: 2021 [JIS Z8504: 2021 Ergonomics of the thermal environment -- Assessment of heat stress using the WBGT (wet bulb globe temperature) index]
- 6) 日本生気象学会：日常生活における熱中症予防指針 Ver.4 : <<https://seikishou.jp/committee/>>, (入手 2024.10.21) .
- 7) 環境省：熱中症予防サイト, <<https://www.wbgt.env.go.jp/>>, (入手 2024.5.19) .
- 8) 一般財団法人 日本気象協会：“熱中症ゼロへ「熱ゼロ研究レポート：外国出身者に聞いた「日本の暑さ」に関する調査 第2弾” <<https://www.netsuzero.jp/netsu-lab/lab04>>(入手 2024.10.21)
- 9) 気象庁：「過去の気象データ・ダウンロード」<<https://www.data.jma.go.jp/risk/obsdl/>>(入手 2024.10.21)
- 10) 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，ヒートアイランド学会論文集，Vol.8, pp.13-21, 2013. [Okada, M., Okada, M. and Kusaka, H.:Parameter Ad-justment and Application to an Extension Area of Okada and Kusaka’s Formula for the Black Globe Temperature, Journal of Heat Island Institute International , Vol.8, pp. 13-21, 2013.]

- 11) 安室 喜弘, 市原 和幸, 西浦 佑紀, 池川 大哉, 林 倫子, 尾崎 平 : 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. [Yasumuro, Y., Ichihara, K., Nishiura, Y., Ikegawa, D., Hayashi, M. and Ozaki, T.: 3D CG-based Estimation Method of WBGT and its Application, *Transaction of the Japan Society of Civil Engineers G*, Vol. 74, No. 6, pp. II-1-III-8, 2018.]
- 12) 角田 直嵩, 尾崎 平, 窪田 諭, 檀 寛成, 安室 喜弘 : 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.[Sumida, N, Ozaki, T., Kubota, S., OkaDan H., and Yasumuro, Y.: Visualization of Heat Risks in Outdoor Environment Using Real-time Global Illumination in Game Engine, *Transaction of the Japan Society of Civil Engineers*, Vol. 79, No. 22, 22-22016, 2023]
- 13) 倉地紀子 : CG Magic: レンダリング, オーム社, 2007.
[Kurachi, N: CG Magic: Rendering, Ohm Company, 2007.]
- 14) OpenWeather 社 : Open Weather Map API <<https://openweathermap.org/>>(入手 2024.10.21)
- 15) 赤穂昭太郎 : ガウス過程回帰の基礎, システム/制御/情報, Vol.62 , No.10, pp.390-395, 2018.
- 16) UnrealEngine , < <https://www.unrealengine.com/ja>>, (入手 2024.10.21)
- 17) D.G. Erbs, S.A. Klein, J.A. Duffie, Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly average global radiation, *Solar Energy*, 28, pp. 293-302, 1982.