

天空光源シミュレーション

Sky Radiation Simulator

奥村 知之

要約 BIPROGY 株式会社では地上から見上げる太陽光線をシミュレートする「天空光源シミュレーション」の技術研究を進めている。この技術研究は構造物の劣化や人類の健康などに関係する太陽紫外線と、植物の育成や景観に関係する太陽可視光線、熱に関係する太陽赤外線各波長に対するエネルギー強度や積算値を日時・場所・照射される方向に応じて計算するものである。

実際に計測した紫外線・可視光線・赤外線強度の実測値とシミュレーションの計算値を比較したところ、よく一致していることが分かった。また、太陽光線のシミュレーション結果を活用して、太陽光線が照射された物質の温度予測の検証を進めている。具体的には、構造物の劣化や室内環境の検討につながる構造物の壁面温度の予測、熱中症の予防につながる暑さ指数の予測、太陽熱土壌消毒などの農地の土壌管理につながる農地温度の予測である。

Abstract We are conducting technical research on an “air radiation simulator” that simulates the sun’s rays looked up from the ground. This technical research will be conducted for each wavelength of sun rays related to structural deterioration and human health, visible sun rays related to plant growth and landscape, and sun rays related to heat. For each of them, the energy intensity and integral value are calculated according to the date and time, location, and irradiation direction.

Comparing the actually measured UV / visible / infrared intensity values with the calculated values in the simulation, we found that they were in good agreement. In addition, we are verifying the temperature prediction of substances irradiated by sunlight using the simulation results of sunlight. In particular, we predict the wall temperature of structures, which leads to the examination of the deterioration of structures and the indoor environment, as well as the heat index, which leads to the prevention of heatstroke, and predict the farmland temperature, which leads to the soil management of farmlands such as solar soil disinfection.

1. はじめに

1970年代初頭、日本ユニバック株式会社（現：BIPROGY 株式会社 以降、BIPROGY）はアメリカ航空宇宙局（NASA：National Aeronautics and Space Administration）が開発した物理設計用シミュレーションプログラム「NASTRAN」（NASA structural analysis）の日本での提供を開始した。国内の建設・重工・製造業におけるシミュレーション利用の幕開けである^[1]。

それを機に、シミュレーションプログラムの入力データ（解析モデル）を作成する CAE（Computer Aided Engineering）システムの開発や提供が始まった。また、製図用に開発された CAD（Computer Aided Design）システムと形状モデルが連携され、製品形状デザインに利用される CG（Computer Graphics）システムに拡張された。CG システムは、形状の滑ら

かさや人間の目が感じる色彩を現実に近いリアルな画像として創り出し、その形状やデザインを評価するシステムである。そして、CGシステムで屋外デザインを評価するために、太陽光線の色情報（可視光線）を求める、可視光線の太陽光シミュレーターが作成された。

2017年より、BIPROGYでは、太陽光線が人類の健康や構造物劣化などの社会課題に密接に関係することに着目し、紫外線・可視光線・赤外線を含む太陽光シミュレーターとして「天空光源シミュレーション」の技術研究を進めている。天空光源シミュレーション研究は、任意の地点・日時・照射方向などに応じた太陽光線の強度や積算値をシミュレートするものである。前稿^[2]で天空光源シミュレーション技術について解説し、いくつかの計算例を紹介した。

本稿では、まず2章で太陽光スペクトルの概要と太陽光スペクトルが方位や高度（仰角）に応じてダイナミックに変動することを示す。3章～5章では具体的なシミュレーション事例を示す。3章では構造物の壁面温度予測について、4章では人が感じる暑さ指数予測について、そして5章では農地の表面温度と土壌温度予測による土壌消毒法への適用可能性について述べる。6章では、それらの事例を通して得られた天空光源シミュレーションの活用技術が長期的な社会課題の解決に貢献し得る方向性について述べる。

2. 太陽光スペクトル

本章では、太陽光をシミュレートする際に考え方の基本となる太陽光スペクトルについて概説する。光を波長毎に区別して扱うことを「分光」、その配列を「スペクトル」という。大気上端における太陽光スペクトルを図1に示す。この太陽光スペクトルが場所や季節に応じた大気の影響を受けて、地表に到達する。地表に到達した太陽光線は、表1に示す様々な物理現象の起因となる。

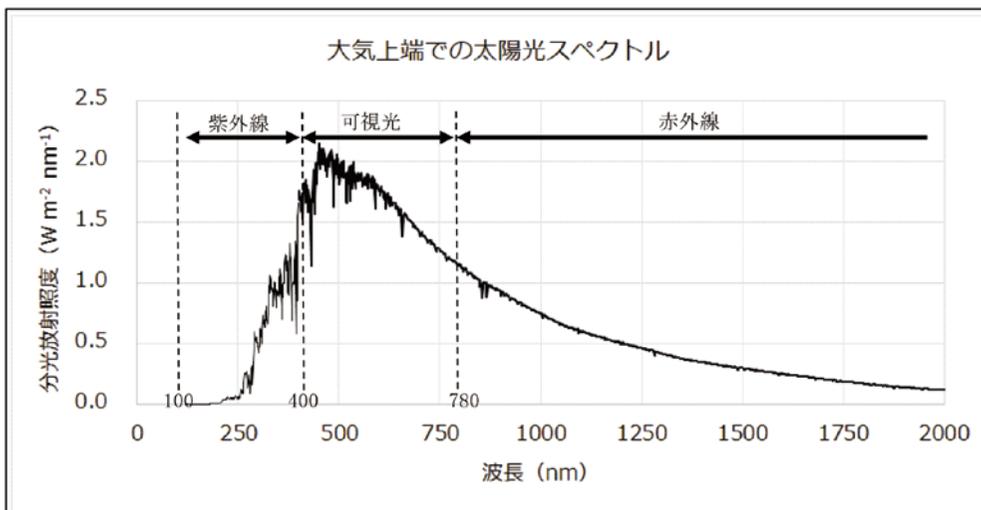


図1 大気上端での太陽光スペクトル (ASTM規格 E-490より作成)

表1 太陽光線に起因する物理現象

分類	物理現象	
紫外線	主に分子の電子遷移エネルギー (分子構造変化, 化学反応等)	●電磁波の伝播 (反射・透過): 散乱・回折・干渉・屈折現象
可視光線		
赤外線	主に分子の振動遷移エネルギー (化学反応, 熱応答等)	●エネルギー吸収応答 (吸収): 熱・化学反応・イオン化・光電効果

地表に照射される太陽光線は、時刻や方向によって、その強度やスペクトル分布が異なる。2021年3月3日12:00の「陣馬山頂」(東京都八王子市、標高855m; 図2)で実測した太陽光スペクトル(分光放射輝度の実測値)を図3に示す。太陽光スペクトルは方位や高度(仰角)に応じて、ダイナミックに変動することがわかる。



図2 実測地点と気象状況

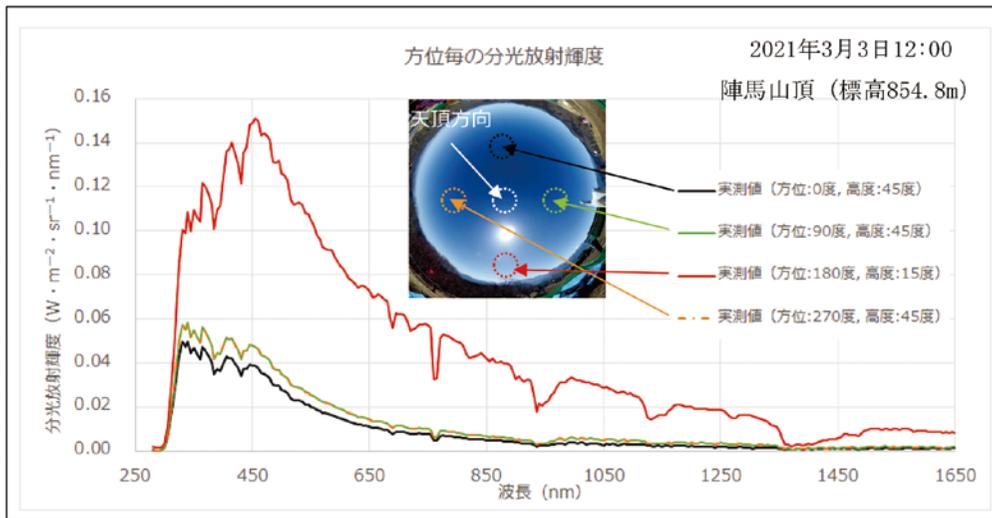


図3 太陽光スペクトルの実測値

3. 構造物の壁面温度の予測

本章では、太陽光線が照射された構造物の壁面温度予測について述べる。構造物の劣化要因の一つは太陽紫外線である。また、太陽光照射による照射面(表面温度)の温度上昇も劣化要因である^[3]。これまで、ビル等の建築物やインフラ構造物の表面温度を知るには、個別に実測

するか、気象庁発表の気温データに頼らざるを得なかった。ところが、建造物の表面温度は日中の太陽光線照射や大気放射などによって温められるため、気温とは一致しない。そこで、天空光源シミュレーションを活用して、建造物の表面温度を予測するという研究・検証を進めている。また、建造物表面の温度変化の予測は、建造物の劣化推定につながるため、塗料・塗装関連企業との技術適用検討も進めている。

ここでは、2019年12月12日の「BIPROGY 本社ビル」(東京都江東区 図4)にて実測した、ビルの壁面温度とシミュレーションによる計算値との比較検証について述べる。

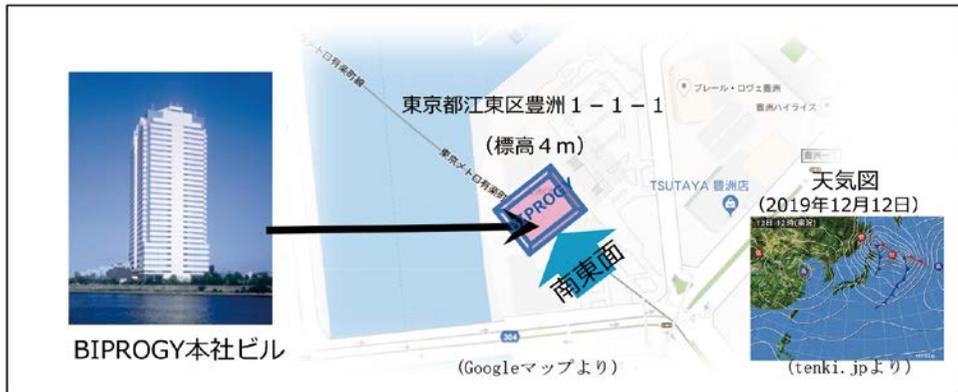


図4 ビル壁面(南東面)と気象情報

3.1 計算手法

太陽光線が照射された物質の温度計算について述べる。物質表面における熱収支のイメージを図5に示す。

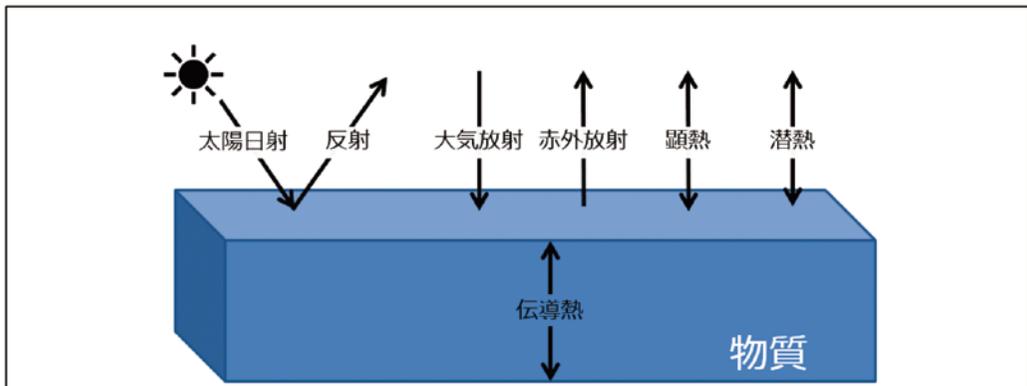


図5 物質表面における熱収支のイメージ

太陽光線が照射される物質と、外界との熱収支は、太陽光線の照射(太陽日射)、大気から物質への放射(大気放射)、物質から大気への放射(赤外放射)、大気との対流熱伝達(顕熱)、物質表面の相変化(潜熱)により数式1で表すことができる。また、物質内部の熱伝導は、エネルギー保存則とフーリエの法則から非定常熱伝導方程式(数式2)で規定される。

物質とその外界との熱収支 = 太陽日射量 + 大気放射量 - 赤外放射量 + 顕熱量 + 潜熱量

$$q = al + \varepsilon L - \varepsilon\sigma_b(\theta_{si})^4 + \alpha_c(\theta_i - \theta_{si}) + \frac{k\alpha_c H}{C_o}(x_o - x_{si})$$

q : 物質とその外界との熱収支 a : 物質の日射吸収率 l : 日射量
 ε : 放射率 L : 大気放射量 σ_b : ステファン・ボルツマン定数
 θ_{si} : 物質表面温度 α_c : 対流熱伝達率 θ_i : 外気温度
 k : 蒸発比 H : 蒸発潜熱 C_o : 外気の湿り比熱
 x_o : 外気の絶対湿度 x_{si} : 物質表面温度に対する飽和絶対湿度

(数式 1)

物体の内部温度の時間変化 = 熱伝導度 × 2 次の温度勾配

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2\theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\theta}{\partial z^2} \right), \quad a = \frac{\lambda}{c_p\rho}$$

θ : 温度 t : 時間 a : 熱拡散率 λ : 熱伝導率 c_p : 比熱 ρ : 密度

(数式 2)

物質の表面において、物質外界との熱収支と物体内部からの熱収支が均衡するので、熱伝導方程式 (数式 2) の境界条件として、物質と外界との熱収支 (数式 1) を設定し、温度計算を実行した (図 6)。

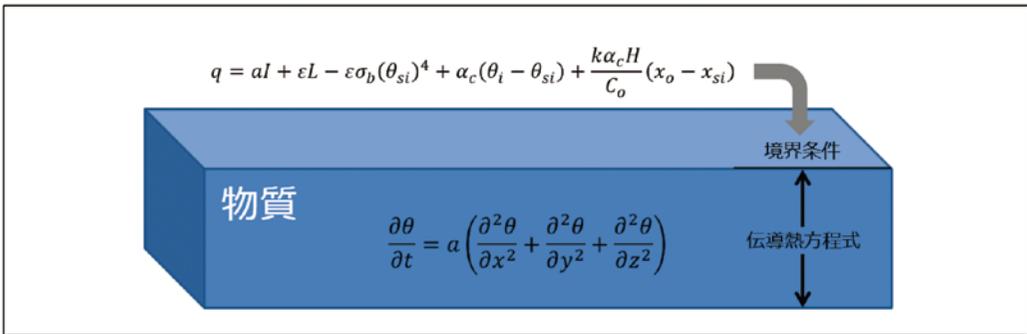


図 6 熱収支均衡による温度計算のイメージ

3.2 実測手法

ビル壁面温度の実測は、屋外で実施するため、電源確保が困難である。また、実測には徒歩移動を伴うことが多いため、ポータブル性 (小型・軽量) が求められる。そこで、ノート PC の USB 端子から給電できる小型・軽量の遠赤外線サーモグラフィカメラシステムを選定した。表 2 と図 7 に示す。

表 2 ビル壁面温度の計測装置

メーカー	分光計測器	計測温度範囲
(株)ビジョンセンシング	遠赤外線カメラ VIM-640G2ULC	-20 ~ +120℃

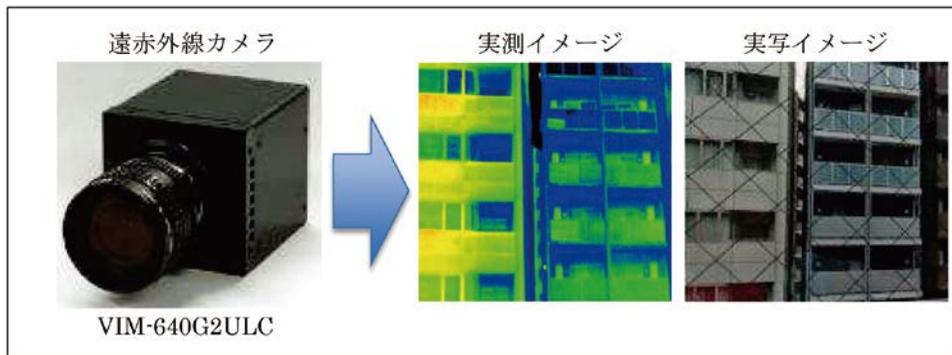


図 7 計測装置外観と実測イメージ

3.3 比較検証

実測値を図 8 に、計算値との比較検証結果を図 9 に示す。図 8 の下段では、遠赤外線カメラの出力と矢印で示した点の温度を示す。

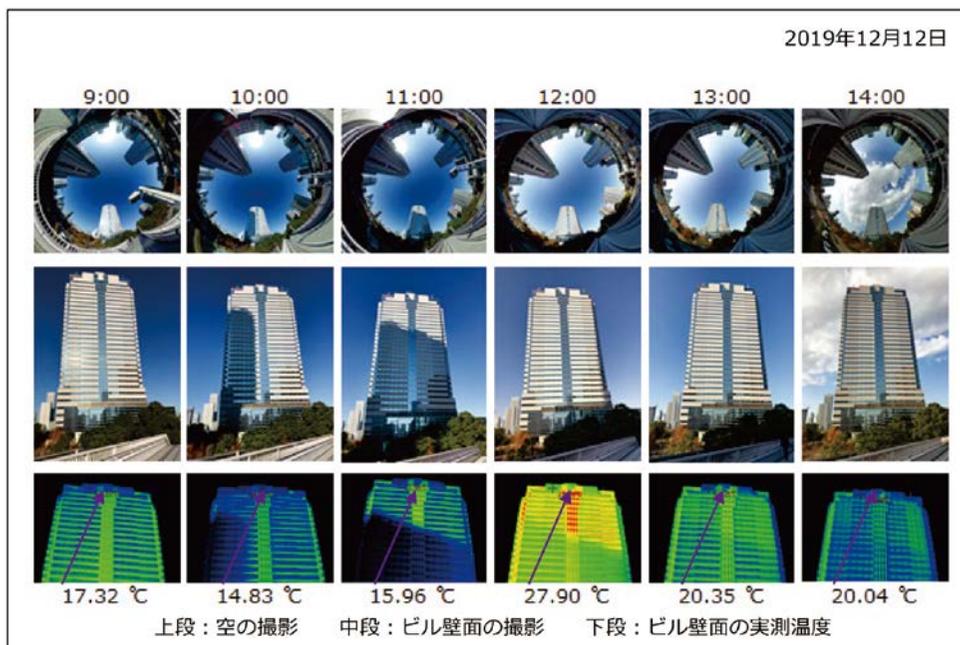


図 8 ビルの南東壁面温度の実測値

この計算では、ビル壁面の反射率を 30% (当該ビル壁面素材の平均的な計測値)、風速を 0m/sec と仮定した。図 9 から、気象庁発表の気温 (●点線) と実測温度 (▲点線) では 5 ~ 10℃ 程度の乖離があることがわかる。太陽光線の照射エネルギーを考慮した計算温度 (■実線)

は、実測温度に近づいており、壁面温度の予測によって構造物の劣化予測への活用が期待できる。今後は、日向面と日陰面の状況における実測検証や風速の影響も視野に、研究を進める予定である。

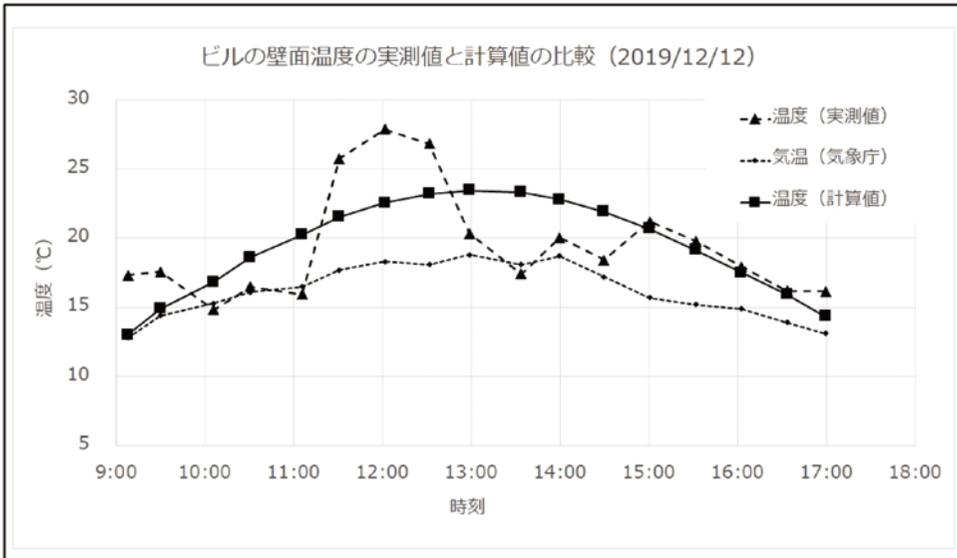


図9 ビルの壁面温度の実測値と計算値の比較

4. 暑さ指数の予測

本章では、「暑さ指数」(WBGT: Wet Bulb Globe Temperature) の実測値と天空光源シミュレーションによる計算値の比較検証について述べる。人が野外で感じる暑さは、その場所の環境に応じて異なる。例えば、私たちは、芝生や土壌、コンクリートの上で感じる暑さが異なることを知っている。また、風の有無や風速に応じて感じる暑さが異なる。しかしながら、予報される暑さ指数は、代表地点や代表的な環境における予測値であった。そこで、場所や日射方向、周辺環境や風速の違いに応じた「暑さ指数」の予測を可能にすることで、公園・遊園地・運動場や、学校・児童施設、工事現場における熱中症の予防や対策検討に貢献したい。ここでは、札幌・東京・那覇における、芝生・土壌・コンクリート、風速0m/sec・5m/secの環境毎に暑さ指数を予測した。

暑さ指数の計算は、屋外用の計算式(数式3)と屋内用の計算式(数式4)があり、湿球温度、黒球温度、乾球温度により計算される^[4]。計算式中の温度を計測する計測器を図10に示す。これらの計測器のうち、日射の影響を受ける計測器は黒球のみである。

屋外での計算式:

$$\text{暑さ指数}(\text{°C}) = 0.7 \times \text{湿球温度} + 0.2 \times \text{黒球温度} + 0.1 \times \text{乾球温度} \quad (\text{数式 3})$$

屋内での計算式:

$$\text{暑さ指数}(\text{°C}) = 0.7 \times \text{湿球温度} + 0.3 \times \text{乾球温度} \quad (\text{数式 4})$$

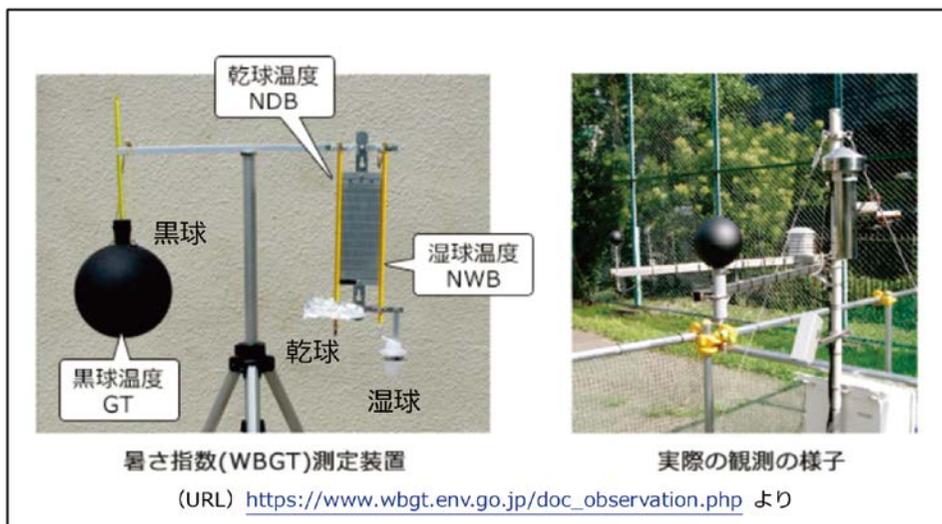


図 10 暑さ指数の計測器

4.1 計算手法

黒球温度の計算について述べる。黒球温度は、黒色に塗装された薄い銅板の球（空洞）の中心温度で、直射日光にさらされた状態での黒球の中の平衡温度である。この黒球温度は、体感温度と良い相関があるとされる^[4]。黒球温度の計算イメージを図 11 に示す。

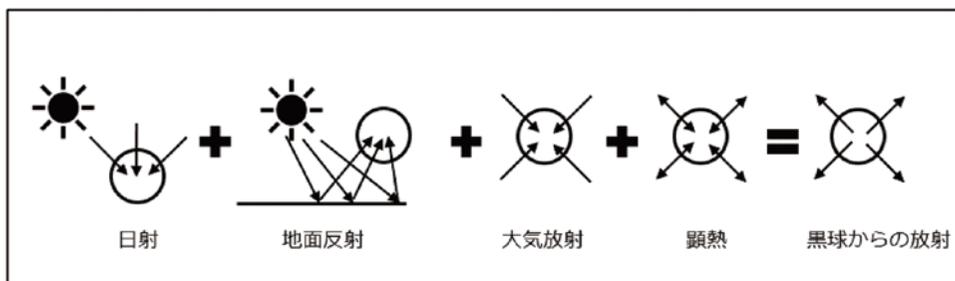


図 11 黒球温度の計算イメージ

黒球温度を（数式 5）より算出後、（数式 3）を用いて、札幌、東京、那覇での、芝生、土壌、コンクリート上における暑さ指数を、無風（風速 0m/sec）と風速 5m/sec について計算した。ここで、乾球温度は気温（気象庁計測値）、湿球温度は乾球温度と湿度（気象庁計測値）より、湿球温度換算表にて算定した。

$$S_u + S_d + L + h(T_a - T_g) = \sigma T_g^4$$

S_u : 黒球が上方から受ける太陽日射

S_d : 黒球が下方から受ける地面反射

L : 大気から黒球への赤外放射

h : 対流熱伝達率

T_a : 気温

T_g : 黒球温度

σ : ステファン・ボルツマン定数

σT_g^4 : 黒球から大気への赤外放射

(数式 5)

4.2 計測手法

暑さ指数の実測値は、環境省の「熱中症予防情報サイト」^[4] (図 12) より入手することができる。計算値との比較検証のため、このサイトより過去の実測データを入手した。

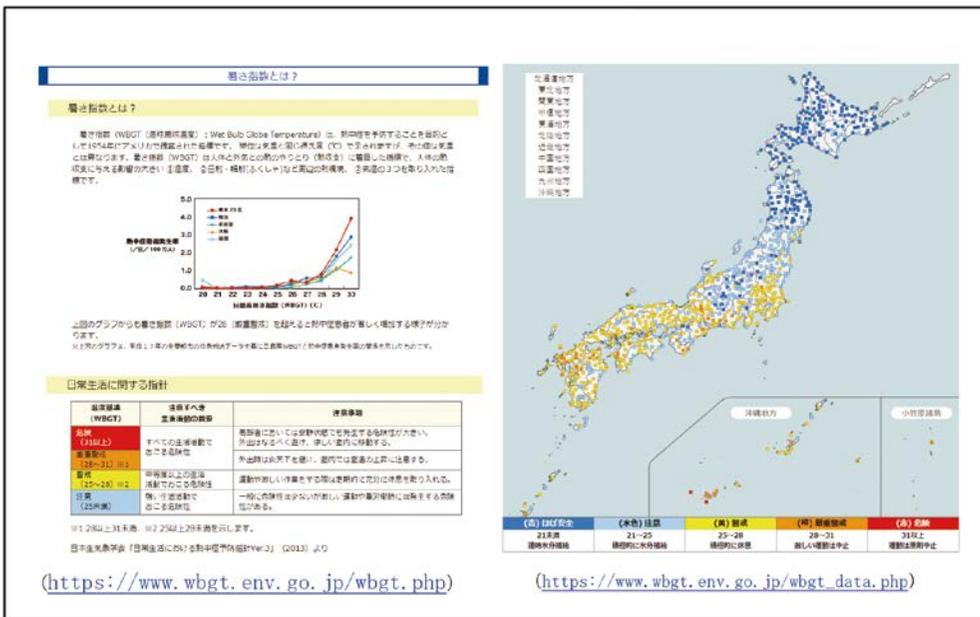


図 12 熱中症予防情報サイト

4.3 比較検証

札幌，東京，那覇における，暑さ指数の計算値と環境省実測値との比較を図 13 (札幌)，図 14 (東京)，図 15 (那覇) に示す。緑色は芝生，土色は土壌，灰色はコンクリート上の計算値である。点線は無風時 (風速 0m/sec)，実線は風速 5m/sec の場合である。赤色は環境省の実測値のプロットである。札幌，東京，那覇における暑さ指数の計算値は，風の影響を考慮した黒球温度を計算することにより，環境省の実測値に近い予測ができていることが確認できる。

橙色は危険レベル (31.0) を示し、それ以上は危険な暑さである。また、水色は気象庁の風速観測値 (右軸) を示す。無風 (風速 0m/sec) と風速 5m/sec の暑さ指数の計算値の比較から、暑さ指数において風の影響が大きいことがわかる。

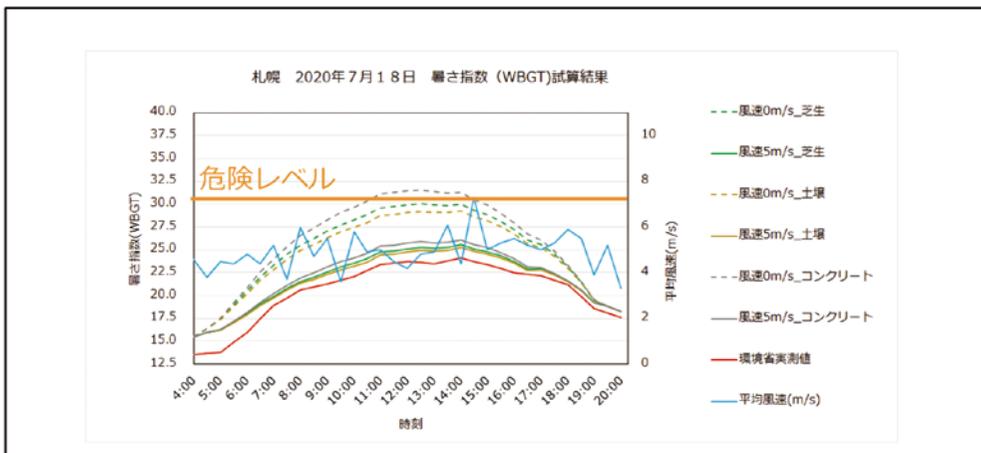


図 13 暑さ指数の比較検証 (札幌)

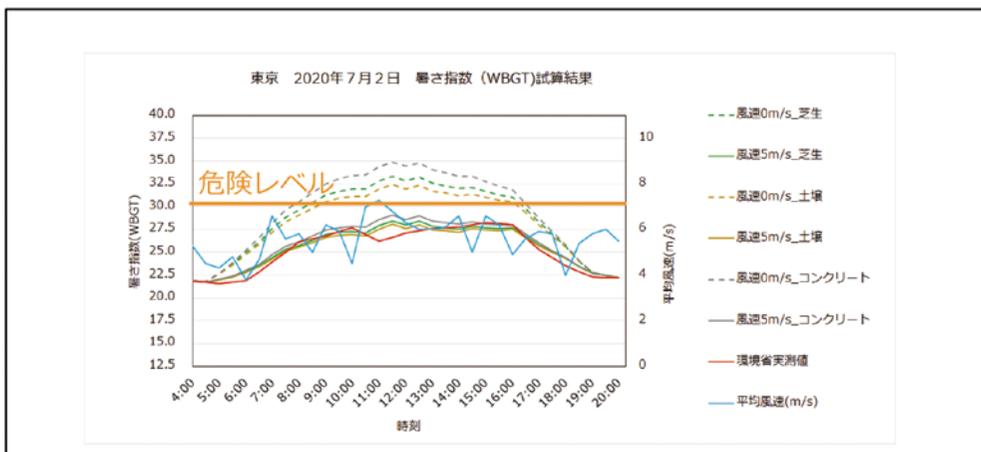


図 14 暑さ指数の比較検証 (東京)

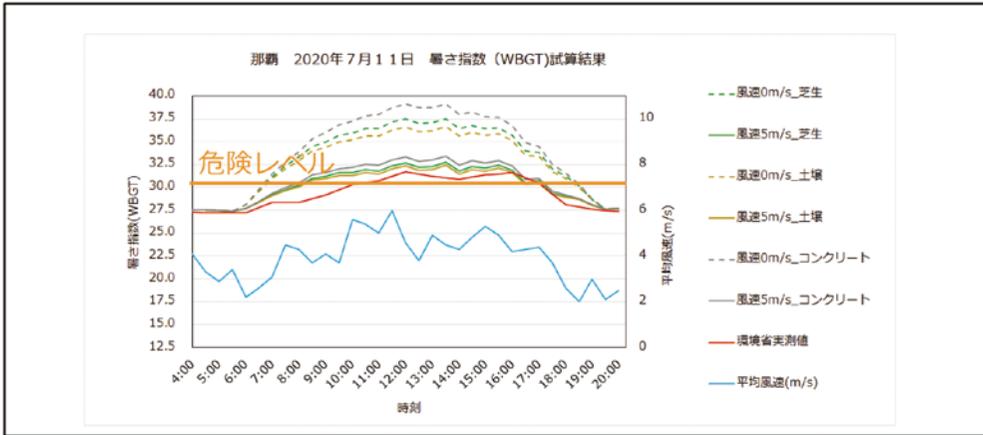


図 15 暑さ指数の比較検証 (那覇)

5. 農地温度の予測

本章では、太陽光線が照射された農地の温度予測について述べる。農業の課題として、土壌中の栄養バランスの偏りや、病害虫の増加をきたす連作障害がある。その対策のひとつに、土壌消毒法がある。土壌消毒法は、焼土や熱蒸気、太陽光や熱水などの熱を利用して、病害虫を死滅させる手法である。特に、太陽熱による土壌消毒法は、太陽光を利用するため、低コストである。ところが、太陽光線が照射される農地の温度は、農地の場所や向きや土壌の物性、湿り具合と、土壌の深さに応じてダイナミックに変化するため、適切な土壌消毒の実施時期や実施期間を推測するのが困難である。

そこで、天空光源シミュレーションを活用して、農地の表面温度と深さに応じた土壌温度を予測した。それを基に土壌消毒時期や実施期間を推定し、農作物の作付け計画に反映すれば、効率的な農業生産に貢献できる。本章では、長崎における土壌温度の実測値と天空光源シミュレーションによる計算値の比較検証について述べる。

5.1 計算手法

太陽光線が照射された農地の温度計算について述べる。農地表面における熱収支のイメージは、3.1節の図5に同じである。また、太陽光線が照射される物質と、外界との熱収支は、太陽光線の照射（太陽日射）、大気から物質への放射（大気放射）、物質から大気への放射（赤外放射）、大気との対流熱伝達（顕熱）、物質表面の相変化（潜熱）により3.1節の数式1で表すことができる。そして、物質内部の熱伝導は、エネルギー保存則とフーリエの法則から非定常熱伝導方程式（数式2）で規定される。

物質の表面において、物質外界との熱収支と物体内部からの熱収支が均衡するので、熱伝導方程式（数式2）の境界条件として、物質と外界との熱収支（数式1）を設定し、温度計算を実行した。

5.2 実測手法

農地温度は、温度データロガー（サーミスタ温度センサー）を土壌中に設置して実測した（図16）。

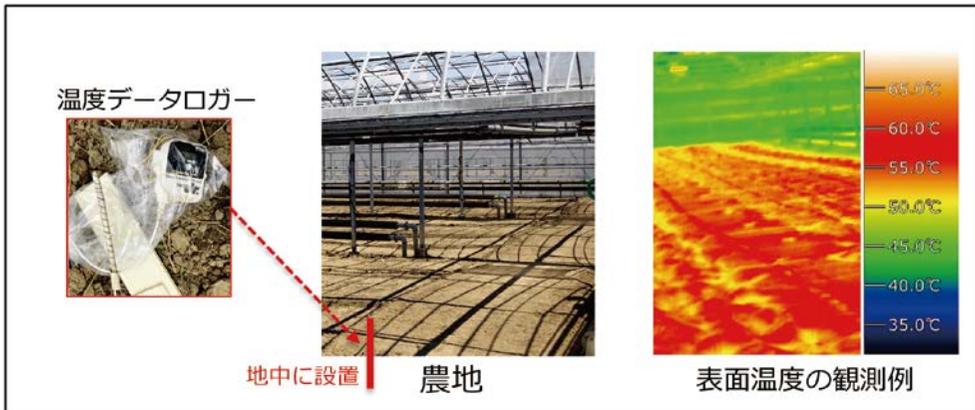


図 16 農地温度の実測イメージ

5.3 比較検証

2021年7月27日から28日の2日間における、長崎の農地温度の計算値と実測値との比較結果を図17に示す。農地温度の計算値について、深さ0cm（農地表面）は茶色、深さ10cmは橙色、深さ20cmは緑色、深さ30cmは黄色、深さ40cmは紫色でプロットした。これに対して、農地温度の実測値として、深さ20cmにおける農地温度の実測値を赤色点線、気温の実測値を青色点線としてプロットを追加した。深さ0cmの農地表面の計算温度は、日中において日射の影響、夜間において土壌内部からの熱伝導の影響を受けるため、ハウス内気温の実測値より高い温度となる。土壌消毒法において着目される土壌の深さ領域は、農地表面から深さ50cm程度までである。深さ20cmの農地温度において、計算値（緑色）と実測値（赤色点線）は、良く一致することを確認した。

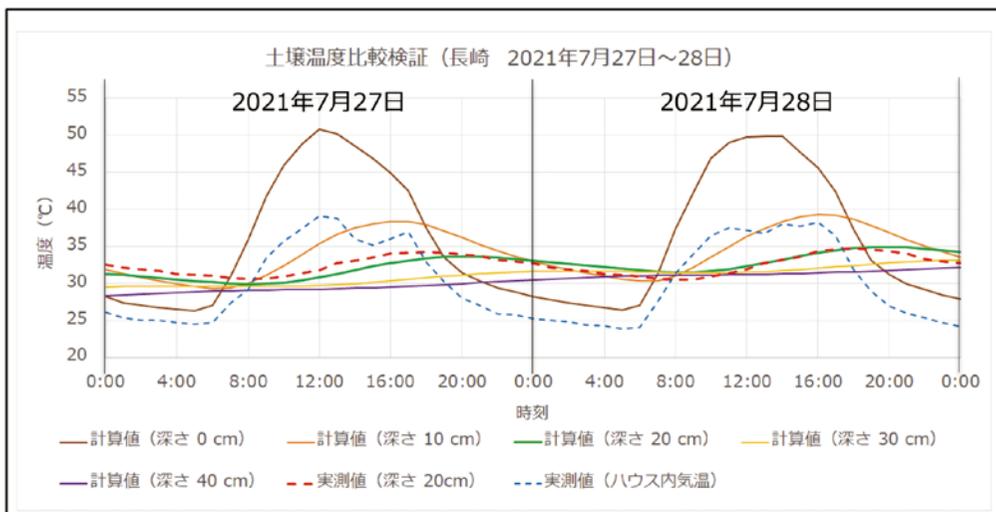


図 17 農地温度の比較検証（長崎）

比較検証結果から、農地の深さに応じた農地温度を計算することにより、土壌内部の温度分布や温度変化を推定できることが分かった。本手法を用いることで、効果的な土壌消毒法の運用計画を作成することができ、土壌消毒法の改善に貢献できることが示された。

6. お わ り に

本稿では、紫外線、可視光線、赤外線から成る太陽光線のシミュレーション技術（天空光源シミュレーション）について解説し、太陽光線の計算結果を利用した温度計算について、実測値とシミュレーションによる予測結果との比較検証結果を示した。3章では、構造物の劣化予測にあたり、壁面温度が気温と一致しないという課題に対して、太陽光線の照射エネルギーを考慮することにより、壁面の実測温度に近づくことを示した。4章では、熱中症の予防・対策検討にあたり、個別環境毎の暑さ指数がわからないという課題に対して、風の影響を考慮した黒球温度を計算することにより、個別環境毎の暑さ指数が予測できることを示した。5章では、深さに応じた農地温度がわからないため、土壌消毒法の時期や期間を計画できないという課題に対して、農地の深さに応じた土壌内部の温度分布や温度変化を予測できることを示した。これらの予測技術は、農業における消毒法や収量予測、建設・設計における劣化予測やメンテナンス計画、活動空間における健康被害予測等に関連する社会課題の解決に寄与するものである。また、本技術を応用し、植物の光合成効率や炭素貯蓄量を推定することで、CO₂のコントロールや、カーボンニュートラルを促進できる可能性がある。

このように、BIPROGY 総合技術研究所では、場所と時間に応じた太陽光線のエネルギー強度をシミュレーションする技術研究を進めている。

最後に、本研究は社内外の多くの方々を支えられた活動である。この場を借りて心より感謝いたします。

-
- 参考文献**
- [1] 渡部義維, ちょっと一息「ユニバック時代のCAE(その1) — Univac NASTRAN —」, 計算工学, 一般社団法人日本計算工学会, Vol.13, No.3 2008, p11, 15, 19, 28, 50, 51
 - [2] 奥村知之, 天空光源シミュレーション, ユニシス技報, BIPROGY, Vol.40 No.2, 通巻145号, 2020年9月.
 - [3] 西田徳行, 気象現象がコンクリート管体温度に及ぼす影響, 西松建設技報, 西松建設, Vol.22, 1999, P1~8
https://www.nishimatsu.co.jp/solution/report/pdf/vol22/g022_01.pdf
 - [4] 暑さ指数(WBGT)について, 熱中症予防情報サイト, 環境省
<https://www.wbgt.env.go.jp/wbgt.php>
 - [5] 紫外線環境保健マニュアル2020, 環境省, 2020年3月.
<http://www.env.go.jp/chemi/matsigaisen2020/matsigaisen2020.pdf>
 - [6] K. N. Liou, "An Introduction to Atmospheric Radiation", Elsevier Science, 2002, 583pp.
 - [7] K. N. Liou [著], 藤枝鋼, 深堀正志 [共訳], 「大気放射学」, 共立出版, 2014, 646pp.
 - [8] S. Chandrasekhar, "Radiative Transfar", Dover Publications Inc., 1950, 402pp.
 - [9] M. Hess, P. Koepke, I. Schult, "Optical properties of aerosols and clouds: The software package OPAC", Bulletin of the American meteorological society, Vol.79, No.5, 1998, p831-844.
 - [10] F. X. Kneizys, "Users Guide to LOWTRAN 7", Defense Technical Information Center, 1988, 137pp.

- [11] T. Nakajima, M. Tanaka, “Matrix formulations for the transfer of solar radiation in a plane-parallel scattering atmosphere”, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, Vol.35, Issue 1, January 1986, p13-21.
- [12] 浅野正二, 大気放射学の基礎, 朝倉書店, 2010, 267pp.
- [13] 柴田清孝, 応用気象学シリーズ1 光の気象学, 朝倉書店, 1999, 182pp.
- [14] 日本エアロゾル学会, エアロゾル学の基礎, 森北出版, 2003, 221pp.
- [15] 本間克典, 実用エアロゾルの計測と評価, 技報堂, 1990, 310pp.
- [16] 竹内延夫, 地球大気分光リモートセンシング, 学会出版センター, 2001, 206pp.
- [17] 日本エアロゾル学会, エアロゾル用語集, 京都大学学術出版会, 2004, 270pp.
- [18] 北山直方, 伝熱工学の学び方, 1982, 218pp.
- [19] G20 新潟農業大臣会合展示会出展:「天空光源シミュレーション」～ G20 会合に日本ユニシスとして初出展～, 旧日本ユニシスのトピックス, BIPROGY, Jun.21, 2019, https://pr.biprogy.com/topics/G20_niigata.html

※ 上記参考文献に記載の URL のリンク先は, 2022 年 7 月 22 日現在の存在を確認。

執筆者紹介 奥村知之 (Tomoyuki Okumura)

1986 年より通産省工業技術院電子技術総合研究所磁性材料研究室にて光と磁気や超伝導に関する素材研究に従事。1989 年日本ユニシス(株)入社。シミュレーション技術の主管部門にて、シミュレーション開発プロジェクトに従事。2017 年より天空光源シミュレーション研究を開始し、研究成果を活用したビジネス開発に取り組む。特許出願 19 件。国内学会論文 6 件。国際学会論文 3 件。

