

# 天空光源シミュレーション

## Sky Radiation Simulator

奥村知之

**要約** 日本ユニシスでは地上から見上げる太陽光線をシミュレーションする「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とを比較したところ、よく一致していることが分かった。このシミュレーションにより、日本付近の20年後の紫外線分布といった未来の観測データの予測も可能である。

**Abstract** We are conducting technological research on “Sky Radiation Simulator” that simulates the sun’s rays looking up from the ground. This technological research is conducted for each wavelength of solar ultraviolet rays related to deterioration of structures and human health, visible solar rays related to plant growth and landscape, and solar infrared rays related to heat. The energy intensity and integrated value are calculated according to the date and time, the place, and the irradiation direction.

Comparing the actually measured values of UV/visible/infrared intensity with the calculated values of the simulation, it was found that they agree well. With this simulation, it is possible to predict future observation data such as the UV distribution in Japan 20 years later.

### 1. はじめに

1970年代初頭、日本ユニバック株式会社（現：日本ユニシス株式会社 以降、日本ユニシス）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<sup>[1]</sup>。

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。

一方、2015年、世界の課題として17の「持続可能な開発目標」<sup>[2]</sup>（以下、SDGs）が国連において合意された。SDGsの「③健康・福祉」や「⑩持続可能な都市の実現」には、太陽光線

に起因する課題がある。すなわち前者の課題としては、世界的な長寿化を背景とした健康寿命延伸に向け「皮膚がん」や「白内障」「免疫機能低下による感染症」などの身体的損傷リスクがある。これらの主因は太陽紫外線である<sup>[3]</sup>。また後者の課題として、高度成長期に建設された築50年以上の老朽化インフラ構造物の増加がある。構造物が劣化する要因には、太陽紫外線と、太陽光の照射熱による温度上昇が挙げられる<sup>[4]</sup>。このように、太陽光線に起因する社会課題は、人間社会の広い分野で存在している。

日本ユニシスでは「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、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ことで、SDGsの達成に貢献しようとするものである。本稿では「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する。まず2章で太陽光線と大気について概説し、3章で天空光源シミュレーションに用いる放射伝達方程式を解説する。4章でシミュレーションの検証結果、5章でシミュレーションの計算例を挙げる。

## 2. 太陽光線と大気

本章では、太陽光線と地球の大気について説明する。太陽光線は太陽中心部における水素の核融合を発生源とする電磁波エネルギーである。太陽から放射された電磁波エネルギーは地球大気の上端に達したあと、大気中の微粒子によって散乱・吸収を受けながら地上まで到達する。従って、大気上端でのエネルギー強度を出発点として、地球大気による散乱・吸収現象を計算することにより、地上に到達する太陽光線の状況を知ることができる。地上から見上げる太陽光線のエネルギー量は、日時と場所と空の方向に応じてダイナミックに変化している。

### 2.1 太陽光線の分類

晴天日の空の光は、早朝の朝焼けにはじまり日中には青空が広がる。また、夕方になるとオレンジ色に染まって日没後のトワイライトで衰える。これは、地球を取り巻く大気によって太陽光線が散乱・吸収しているためである。

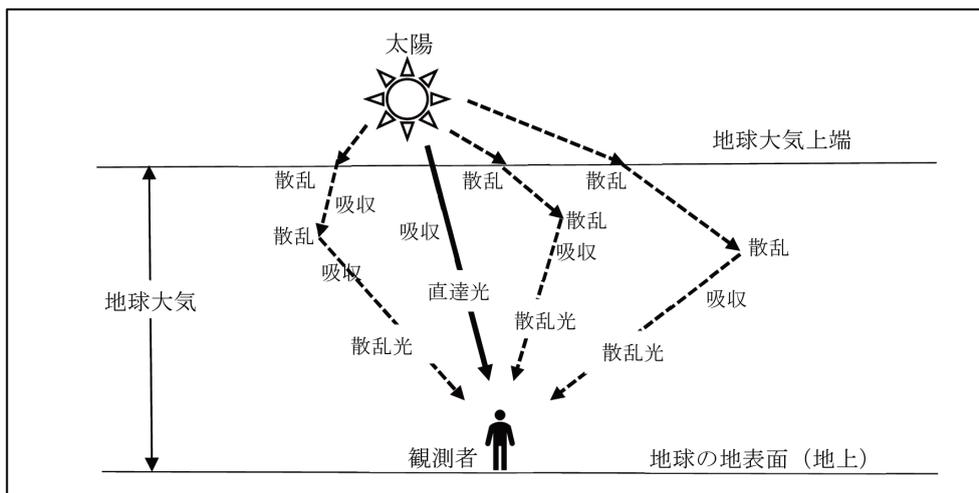


図1 地上に到達する太陽光線のイメージ

太陽から地球の地表面に到達する太陽光線のイメージを図1に示す。太陽からの光は、直接観測者に到達する光と、地球大気中で散乱を繰り返して観測者に到達する光がある。前者を直接光（図中実線矢印）、後者を散乱光（図中点線矢印）という。青い空は、散乱光によるものである。

太陽から地球に到達する光は電磁波である。電磁波の分類を図2に示す。このうち地上に到達する光は、紫外線と可視光線と赤外線である。波長の短い紫外線はエネルギーが高く、人体の健康被害やインフラ構造物の劣化に影響する。可視光線は植物の育成や景観に関係する。また、波長の長い赤外線は、熱エネルギーとなり、照射面の温度を上昇させる効果がある。

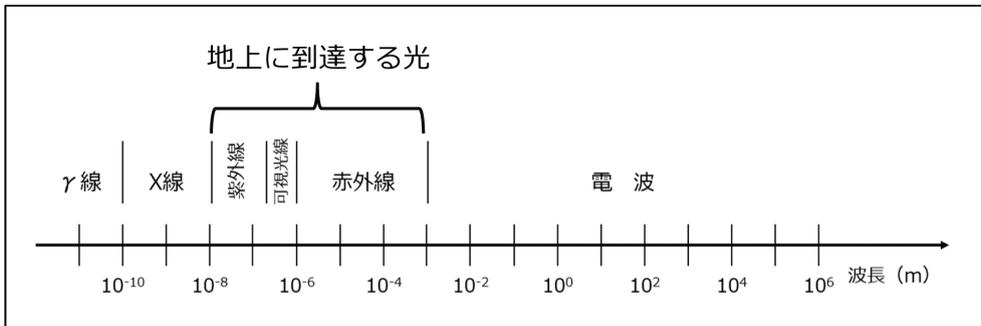


図2 電磁波の分類

## 2.2 大気上端での太陽光線

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。大気上端での太陽光スペクトルを図3に示す。これは地球上の場所や日時で変化しない量であり、人工衛星により観測された既知のデータがある。これを初期値として、散乱・吸収計算を実行する。

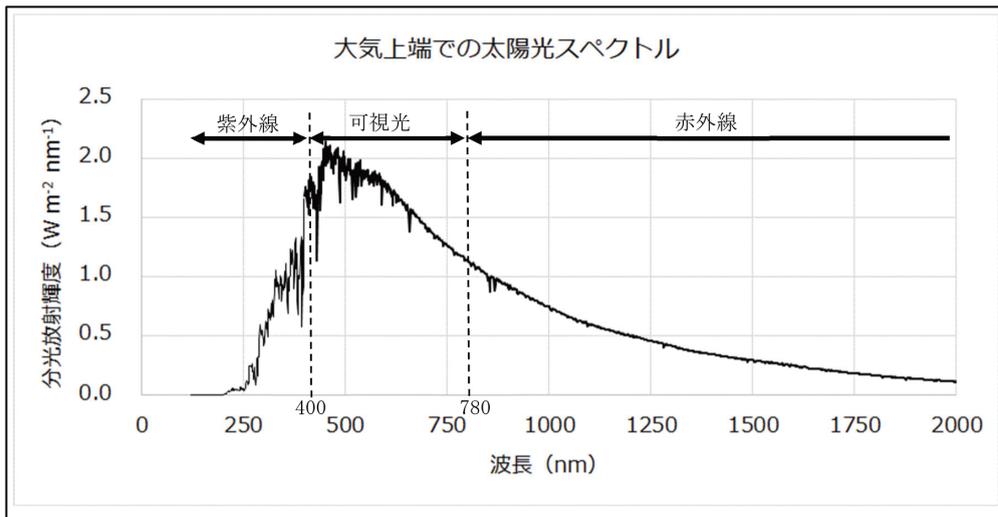


図3 大気上端での太陽光スペクトル (ASTM規格 E-490より作成)

### 2.3 地球の大気

地球の大気には濃度がほぼ不変な成分と濃度が変化する成分がある。地球大気の主要成分について、化学式と体積混合比率を表1に示す。

表1 地球大気の主要成分 (理科年表より作成)

濃度が不変な成分			濃度が変化する成分		
成分	化学式	体積混合比(%)	成分	化学式	体積混合比(%)
窒素	N <sub>2</sub>	78.084	水蒸気	H <sub>2</sub> O	0 ~ 0.04
酸素	O <sub>2</sub>	20.948	オゾン	O <sub>3</sub>	0 ~ 12×10 <sup>-4</sup>
アルゴン	Ar	0.934	二酸化硫黄	SO <sub>2</sub>	0.001×10 <sup>-4</sup>
二酸化炭素	CO <sub>2</sub>	0.036	二酸化窒素	NO <sub>2</sub>	0.001×10 <sup>-4</sup>
ネオン	Ne	0.0018	アンモニア	NH <sub>3</sub>	0.004×10 <sup>-4</sup>

大気的主要な成分は、窒素が78%、酸素21%、アルゴンが0.9%、二酸化炭素が0.04%である。大気中の水蒸気の成分濃度は蒸発、凝結、及び降水を経た局所的な水循環や広域的な輸送過程のため、時間的、空間的に激しく変化する。

また、大気中のオゾンはその90%が地上高度10~16kmから50kmの範囲に存在する(図4)。オゾン濃度が高いオゾン層の高度分布は場所により異なるが、高度15~30km付近に存在し、太陽から地球に到達する有害な紫外線を吸収している。

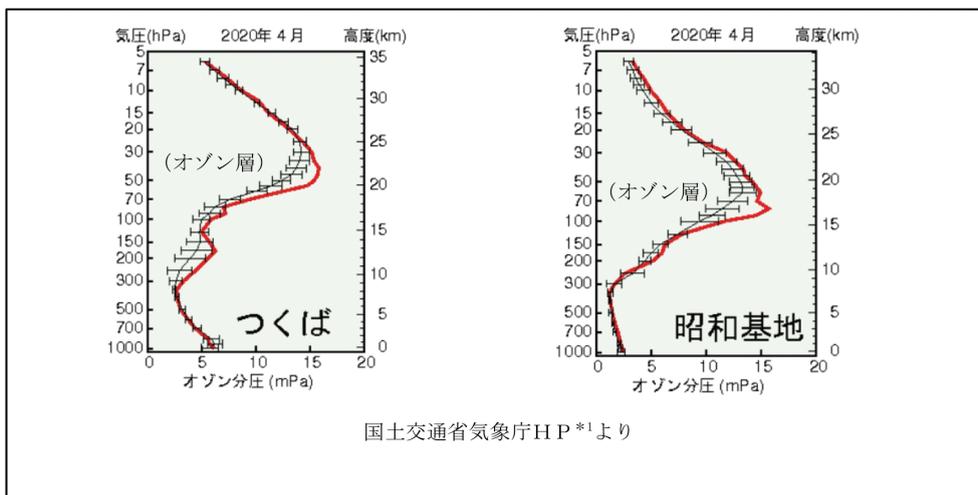


図4 オゾンの高度分布 (つくばと昭和基地の例)

大気中には、エアロゾルと呼ばれる、人間活動などによって生じる微小な液体または固体の粒子も浮遊している。主なエアロゾルの種類を表2に示す。エアロゾルの濃度や体積混合比は、地域や季節で変動する。

天空光源シミュレーションでは、エアロゾルの濃度情報として、世界のエアロゾル観測ネットワーク「AERONET」\*2 (図5) の公開データを参考利用している。AERONETは地上にあ

る観測所のネットワークで、フォトメータを配置して大気中のエアロゾル特性を測定している。2020年6月19日時点で、887地点の観測所がネットワークに登録しており、地球の陸地範囲はおおむね網羅されている。

表2 エアロゾルの種類

種類	説明
土壌粒子	土粒子の風化等による粒子（有機物も含む）
水溶性粒子	水分を含んだ硝酸塩など（化石燃料などから発生）
すす	黒鉛。都市部に多く存在
海塩	海洋または沿岸部に多く存在

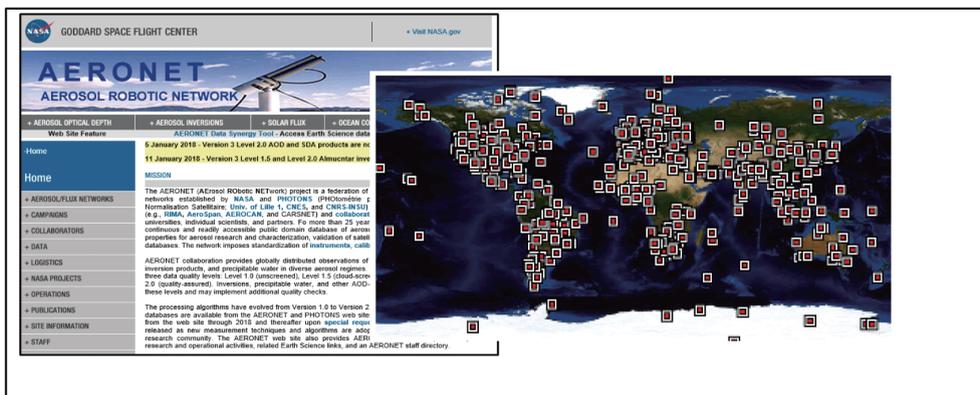


図5 エアロゾル観測ネットワーク

## 2.4 大気中の散乱・吸収現象

太陽光線は電磁波であるので、地球大気中に突入した後、表1に示した大気中に存在する窒素、酸素、アルゴン等の分子や、表2に示した土壌粒子、海塩等のエアロゾルとの間で相互作用を起こす。太陽光線と地球大気との相互作用には、表3に示すように散乱と吸収がある。

表3 太陽光線と地球大気との相互作用

相互作用	物理現象（相互作用する主な波長帯）
大気分子の散乱	レイリー散乱（紫外線・可視光線・赤外線）
大気分子の吸収	電子のエネルギー状態として吸収（紫外線・可視光線） 分子の振動・回転エネルギーとして吸収（赤外線）
エアロゾルの散乱・吸収	ミー散乱（紫外線・可視光線・赤外線）

大気中での散乱現象には、レイリー散乱とミー散乱がある。レイリー散乱の散乱イメージを図6に示す。レイリー散乱は主に大気中の分子による散乱である。レイリー散乱の散乱強度は波長の4乗に反比例する（波長の短い方が散乱強度が強い）ので、波長の長い赤い光（波長610～750nm程度）より、波長の短い青い光（波長435～480nm程度）の方が散乱されやすい。その結果、地上から見上げる空は青く見える。一方、夕日が赤く見えるのは太陽高度が低いた

めである。太陽高度が低くなると、大気中の太陽光線の通過距離が長くなる。その結果、赤い光より青い光の方が多く散乱されるため、観測者には赤い光の割合が相対的に増加して見えるので、夕日は赤く見える。

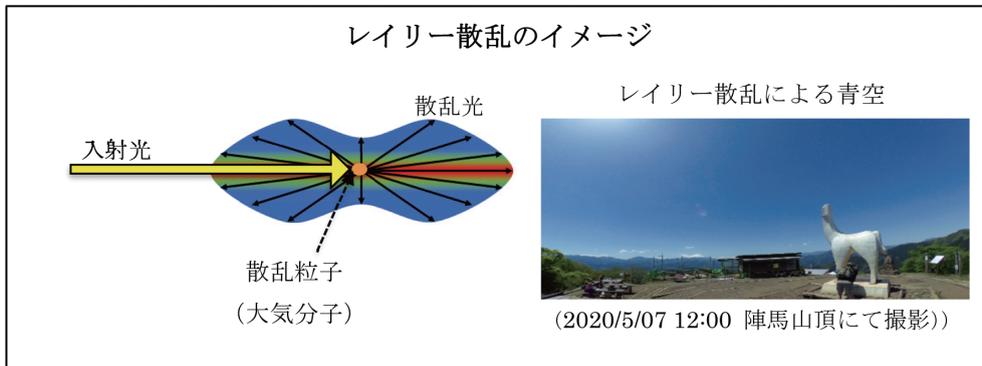


図6 レイリー散乱

ミー散乱の散乱イメージを図7に示す。ミー散乱は、主に大気中の雲やエアロゾルによる散乱で、散乱粒子のサイズが大きくなるにつれて前方への指向性が強くなり、側方や後方への散乱が弱くなる。空気が清浄でないときに白っぽく見えるのは、ミー散乱によるものである。雲によるミー散乱は、波長の長さに関係なく（色の違いに関係なく）散乱するため、色が混じってグレー（混色して灰色）になる。

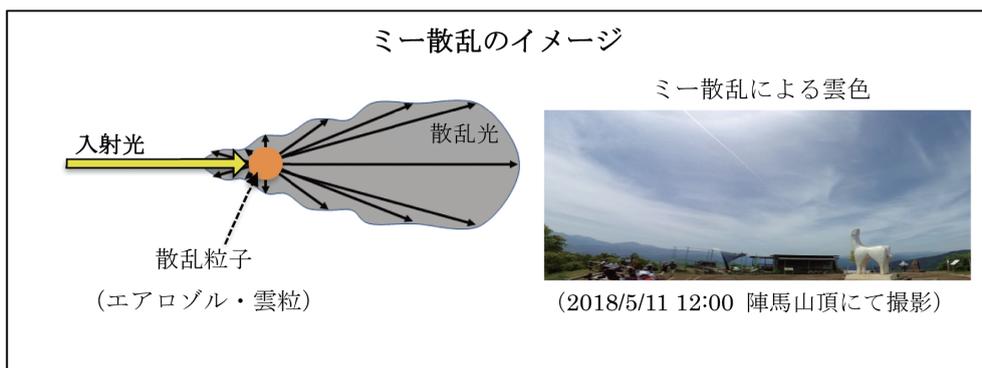


図7 ミー散乱

一方、大気中の吸収現象は、大気分子に起因する。大気分子による主な透過率（吸収効果）を図8に示す。水蒸気（ $\text{H}_2\text{O}$ ）、オゾン（ $\text{O}_3$ ）、酸素（ $\text{O}_2$ ）、及び二酸化炭素（ $\text{CO}_2$ ）等の大気分子は、それぞれの分子構造（分子の電子構造）や分子振動に応じて、紫外線・可視光線・赤外線の特長波長を吸収する。分子の電子構造による吸収（電子の状態遷移）は、紫外線・可視光線の領域の電磁波を吸収する。また、分子の振動や回転エネルギーによる吸収は、赤外線を吸収する。

このように地球の大気中を通過する太陽光線は、大気分子やエアロゾルとのレイリー散乱、ミー散乱、または分子による吸収現象を相互作用として受けながら、地上まで到達する。

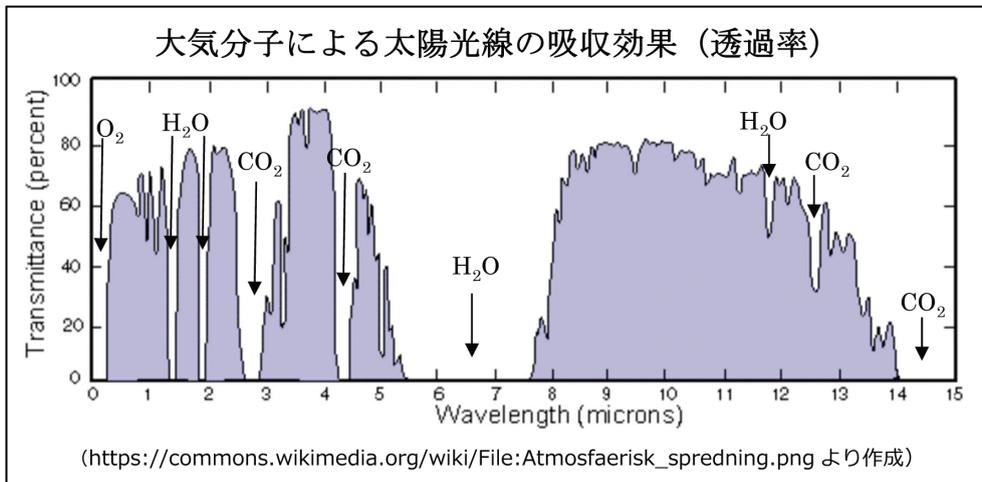


図8 大気分子による吸収効果の波長依存性

### 3. 天空光源シミュレーションと放射伝達方程式

本章では、天空光源シミュレーションと、それに用いる放射伝達方程式 (radiative transfer equation) を説明する。天空光源シミュレーションは、指定された緯度、経度、日時から太陽高度を算定後、大気上端の太陽光線を波長毎に分光したスペクトル分布を初期値として、大気中の散乱・吸収現象について放射伝達方程式を解くことにより、地上に到達する太陽光線 (紫外線・可視光線・赤外線) のエネルギー強度を計算する。ここで、大気による光の散乱を図9のように考えると、つぎのような放射伝達方程式 (数式1) が導かれる<sup>[5][6]</sup>。

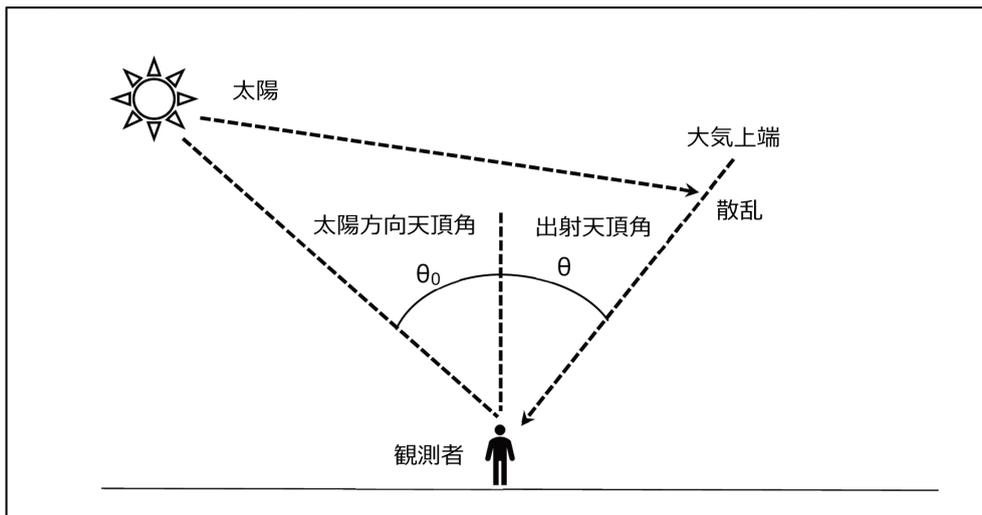


図9 大気による光の散乱モデル

$$\mu \frac{dI(\tau; \mu, \phi)}{d\tau} = I(\tau; \mu, \phi) - \frac{\tilde{\omega}}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_{-1}^1 I(\tau; \mu', \phi') P(\mu, \phi; \mu', \phi') d\mu' d\phi' - \frac{\tilde{\omega}}{4\pi} \pi F_0 P(\mu, \phi; -\mu_0 \phi_0) e^{-\tau/\mu_0}$$

但し,

$\mu = \cos\theta$ ,  $\theta$ : 出射天頂角,  $\phi$ : 出射方位角

$\mu_0 = \cos\theta_0$ ,  $\theta_0$ : 太陽方向天頂角,  $\phi_0$ : 太陽方向方位角

$I$ : 分光放射強度,  $\tau$ : 光学的厚さ,  $\tilde{\omega}$ : 単一散乱アルベド,  $P$ : 散乱位相関数

$F(z) = \pi F_0 \exp(-\tau/\mu_0)$ ,  $F$ : 太陽放射の直達成分,  $F_0$ : 大気上端での太陽照度

(数式1)

太陽光線の計算は、放射伝達方程式を、プレーンパラレル鉛直不均一大気 (vertically inhomogeneous plane-parallel media) について解く。実際の地球の大気は球状に存在するが、地球の半径が約 6400km であるのに対し、大気は高度約 100km までを扱えば良いので、プレーンパラレル条件は良い近似モデルとなる。地球大気は鉛直方向に不均一であるが、図 10 のように、いくつかの大気層に分割し、その内部では均一大気とみなせるモデルを考える。さらにフーリエ展開することにより方位角依存性を解消し、均一大気の条件で放射伝達を計算できるようにする。放射伝達の計算には、離散座標法 (discrete ordinate method) 及びアディング法 (adding method) を用いる。これにより、複数の均一層の透過関数と反射関数を合成し、不均一な大気全域にわたって透過関数と反射関数を評価することができ、各層ごとの分光放射状態を計算することができる。そして、全層について足し合わせてフーリエ展開を戻すことにより、プレーンパラレル鉛直不均一大気の分光放射輝度を計算することができる (図 10)。

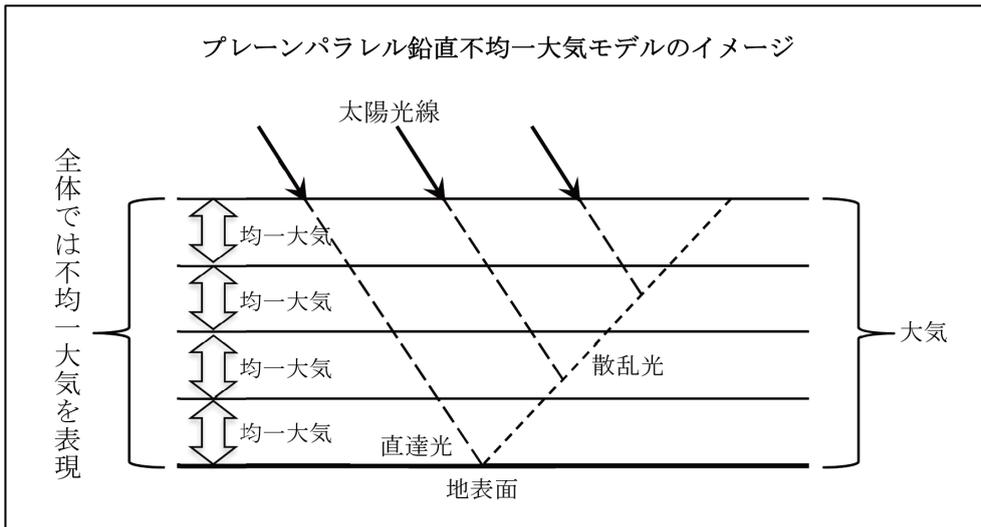


図 10 プレーンパラレル鉛直不均一大気モデルのイメージ

大気中の散乱・吸収現象の計算では、指定された場所における大気分子とエアロゾルの成分構成や、大気分子とエアロゾルの複素屈折率・吸収係数をパラメータとする。また、標高が高

い地表では大気上端と地表との間に存在する大気分子とエアロゾル量が少ないため、実際の標高に応じて大気分子とエアロゾル量を補正する。

このようにして、地上から見上げる空から地上に到達する可視光線の分光強度に加え、目に見えない紫外線と赤外線の分光強度の定量評価を可能とした。

#### 4. 計算結果の検証

本章では、2018年3月12日12:00の「辰巳の森海浜公園」(東京都江東区、標高5m)と2018年3月13日12:00の「陣馬山頂」(東京都八王子市、標高855m)で実際に計測した紫外線・可視光線・赤外線強度の実測値(分光放射輝度の計測値)とシミュレーションの計算値(分光放射輝度の計算値)とを比較した精度検証について述べる。「陣馬山頂」での計測は、3章で述べた標高による大気分子とエアロゾル量の補正の効果を確認するためである。

##### 4.1 計測装置と測定方法

紫外線・可視光線・赤外線強度の計測作業は、屋外で実施するため、電源確保が困難である。また、徒歩移動が前提のため、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・軽量の紫外域・可視光域・赤外域の電磁波強度の分光測定装置を選定した。表4と図11に示す。

表4 紫外線・可視光線・赤外線の測定装置

No.	メーカー	分光測定器	測定波長(nm)
測定器1	オーシャンフォトンクス(株)	FLAME-S(紫外・可視域用)	250-800
測定器2	オーシャンフォトンクス(株)	FLAME-NIR(赤外域用)	950-1650



図11 計測装置外観と構成イメージ

この計測装置を空に向け、紫外線・可視光線・赤外線を計測する。太陽光線は方向によって強度が変化するので、カメラ用三脚を利用して方向毎の太陽光線を計測した。方位角は45度間隔とし、北、北東、東、南東、南、南西、西、北西の各方位に対して、仰角15度、30度、45度、60度、75度と天頂方向の41方向について、紫外線・可視光線・赤外線の強度を分光計測する(図12)。

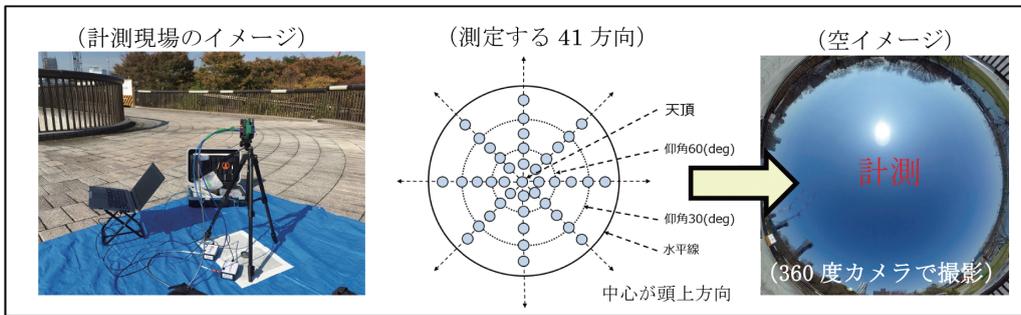


図 12 太陽光線の計測イメージ

#### 4.2 実測比較検証① (辰巳の森海浜公園)

2018年3月12日12:00に、辰巳の森海浜公園で紫外線・可視光線・赤外線を実測した。計測条件と天気図(日本気象協会)を図13に示す。

また、図14に実際のデジタルカメラによる撮影イメージとシミュレーションとの比較を示す。デジタルカメラとシミュレーションとは、カラーマネージメントが異なるので、色味による直接比較はできないが、全体のイメージ傾向は一致している。

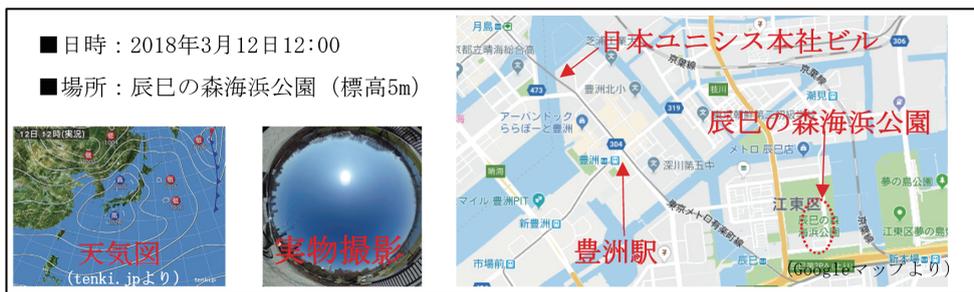


図 13 計測条件 (辰巳の森海浜公園)

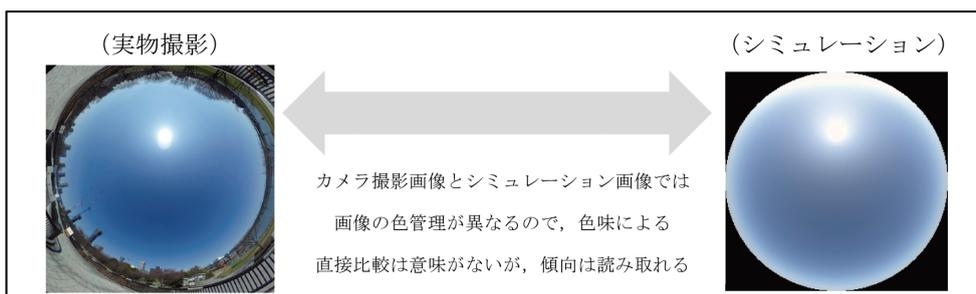


図 14 実測とシミュレーションの比較 (辰巳の森海浜公園)

方位 225 度 (南西) の仰角 45 度方向からの太陽光線強度について、測定器で計測した実測値 (▲) とシミュレーションの計算値 (実線) との比較結果を図 15 に示す。横軸は波長で、左端は波長の短い紫外線の領域、右端が波長の長い赤外線領域である。縦軸は分光放射輝度 (波長に依存するエネルギー強度) である。計測波長の全域において、分光放射輝度の実測値と計算値はよく一致していることがわかる。なお、実測値 (▲) の 840 ~ 970nm の波長範囲は、計測器 (測定器 1, 測定器 2) の測定範囲外の波長帯であるので、計測値が欠落している。

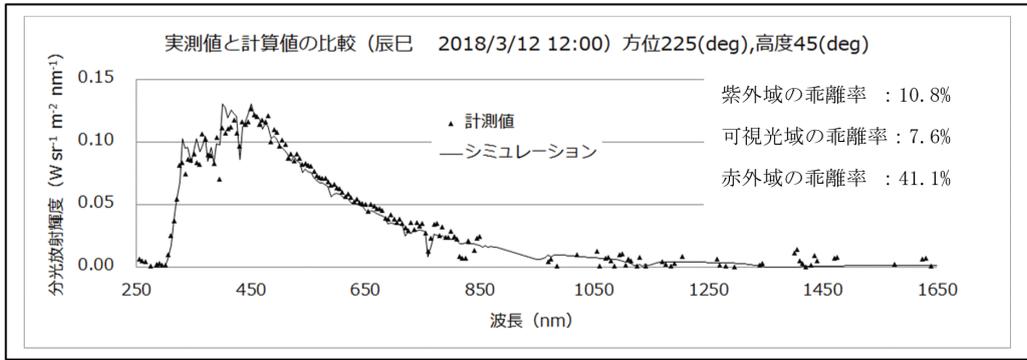


図 15 比較検証 (辰巳の森海浜公園) (2018/3/12 12:00)

実測値とシミュレーションの計算結果との乖離を定量的に評価するため、乖離率の評価式(数式2)を定義する。乖離率は、実測値とシミュレーションの結果が一致すると0%となる指標である。

$$\text{乖離率}(\%) = \frac{1}{p \times \lambda} \sum_p \sum_\lambda \frac{\text{シミュレーション値}(p, \lambda) - \text{実物計測値}(p, \lambda)}{\text{実物計測値}(p, \lambda)}$$

ここで、p: 測定点 (41 ポイント) λ: 波長 (5nm 毎) である

(数式2)

図 15 に示すとおり、方位 225 度 (南西) の仰角 45 度方向における乖離率は、紫外域 10.8%、可視光域 7.6%、赤外域 41.1% となった。物理計測では、計測値が小さくなると相対的にノイズの影響が大きくなり SN 比 (Signal Noise 比) が低下する。図 15 の方向における赤外域では、計測値が小さいために計測誤差が過大に評価 (SN 比が低下) されてしまい乖離率が高くなっている。

### 4.3 実測比較検証② (陣馬山頂)

2018 年 3 月 13 日 12:00 に、標高の高い場所 (陣馬山頂, 855m) で紫外線・可視光線・赤外線計測を実施した。図 16 に計測条件を示す。

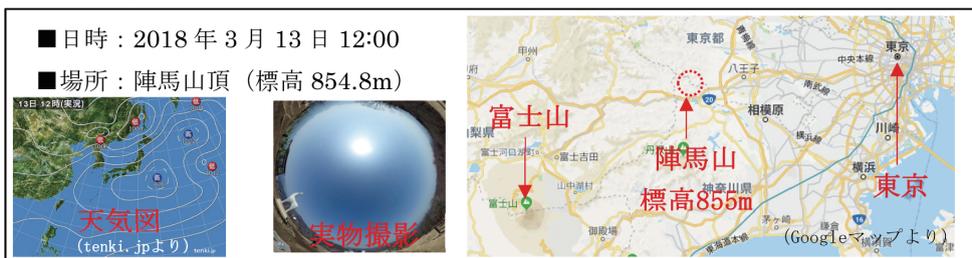


図 16 計測条件 (陣馬山頂, 標高 855m)

標高の高い場所 (855m) での実測比較検証結果について、標高 0m の条件によるシミュレーションとの比較を図 17 に示す。また、標高 855m の条件によるシミュレーションとの比較を

図 18 に示す。計測方位は図 15 と同じ方向（方位 225 度（南西）の仰角 45 度方向）で、太陽光線の実測値は▲、シミュレーションの計算値は実線で示している。図 17 に示す標高 0m での計算値と実測値との乖離率は、紫外域 24.9%，可視光域 37.1%，赤外域 25.0%である。一方、図 18 に示す標高 855m での計算値と実測値との乖離率は、紫外域 15.8%，可視光域 8.7%，赤外域 15.0%であり、改善されていることがわかる。太陽光線のシミュレーションでは、標高を考慮することの重要性を確認した。

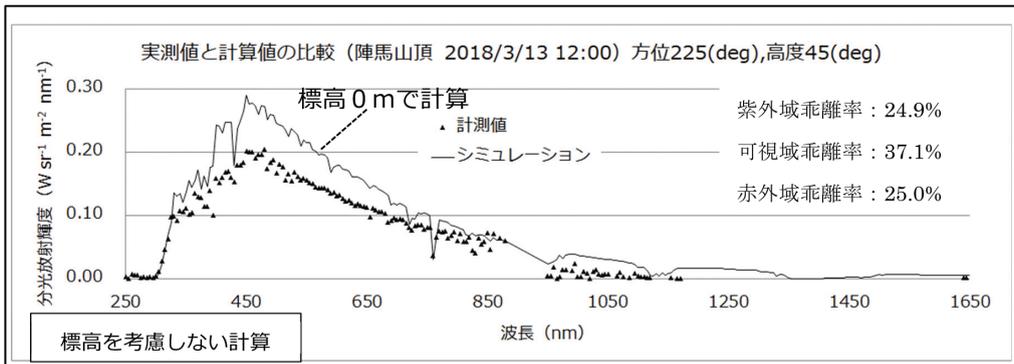


図 17 比較検証（陣馬山頂）（2018/3/13 12:00）【標高 0m で計算】

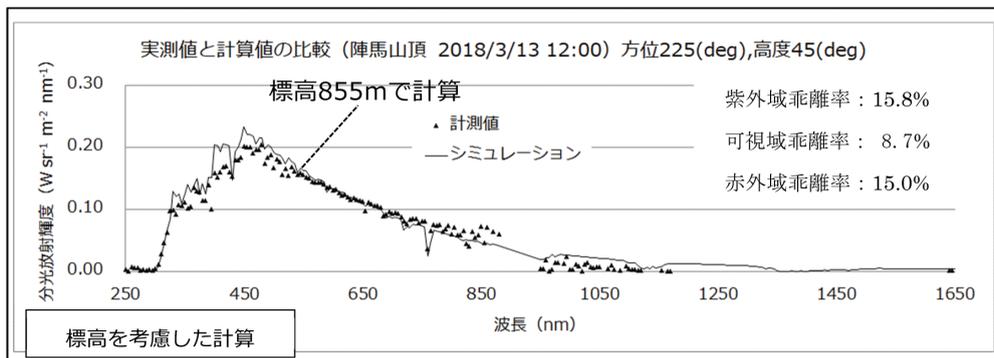


図 18 比較検証（陣馬山頂）（2018/3/13 12:00）【標高 855m で計算】

## 5. シミュレーションの計算例

本章では、天空光源シミュレーションによるいくつかの計算例を紹介する。

### 5.1 国内の計算例

国内の太陽光線分布の計算結果（紫外線，可視光線，赤外線）を図 19 に示す。太陽と地球の位置関係は 3 月（春分）と 9 月（秋分）でほぼ等しくなるので、3 月と 9 月の分布はほぼ等しくなることが予想される。ところが、図 19 の 3 月と 9 月の計算結果を比べると（特に紫外線分布）等しい結果にはならない。これは大気中のエアロゾル量が季節に応じて変化しており、その状況が計算結果に反映されるためである。このように、太陽光線は地球上の地点や季節に応じてダイナミックに変化する。

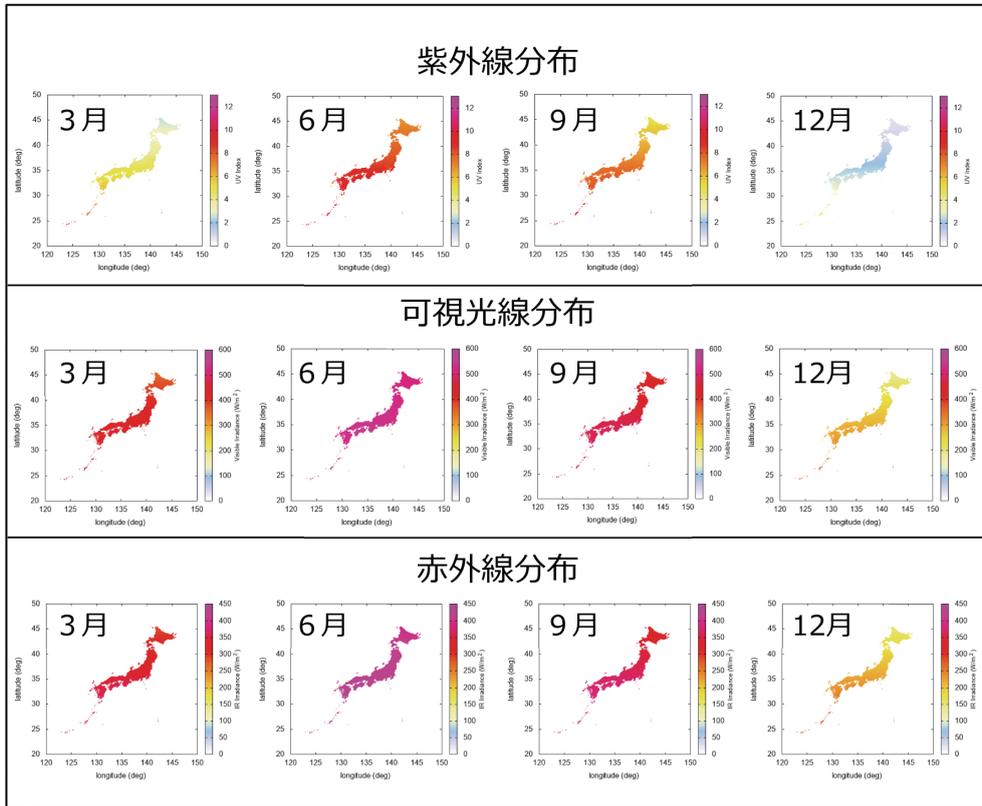


図 19 国内の太陽光線分布の計算結果（紫外線分布，可視光線分布，赤外線分布）

## 5.2 グローバルの計算例

グローバルの太陽光線分布の計算結果（紫外線分布，赤外線分布）を図20に示す. このシミュレーションでは，太陽光線の計算地点として地球上のすべての地点を緯度と経度で指定することができる. 図20のようにグローバルな分布図を作成することで，太陽光線のグローバルな季節変化を確認することができる.

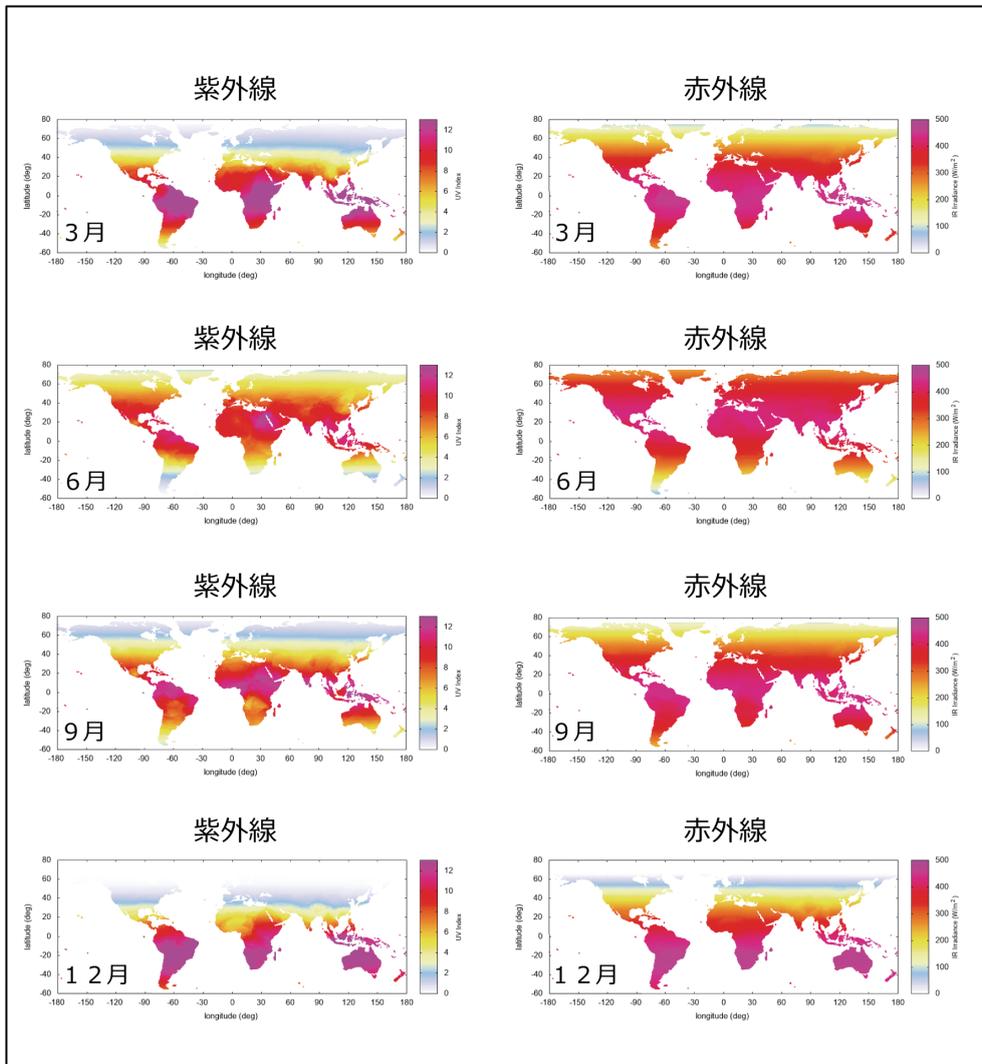


図 20 グローバル計算結果（紫外線分布，赤外線分布）

### 5.3 未来予測

未来予測の方法として，過去のエアロゾルの光学的厚さ（AOT：Aerosol Optical Thickness）の観測データのトレンドから未来の観測データを予測して，未来の太陽光線を予測するというアイデアがある．図 21 に，日本付近の 20 年後の紫外線分布の計算結果を示す．この計算では，20 年後の日本付近では，紫外線強度は 10% 程度増加するという予測結果になった．これはあくまでも，天空光源シミュレーションによる未来予測の例示である．

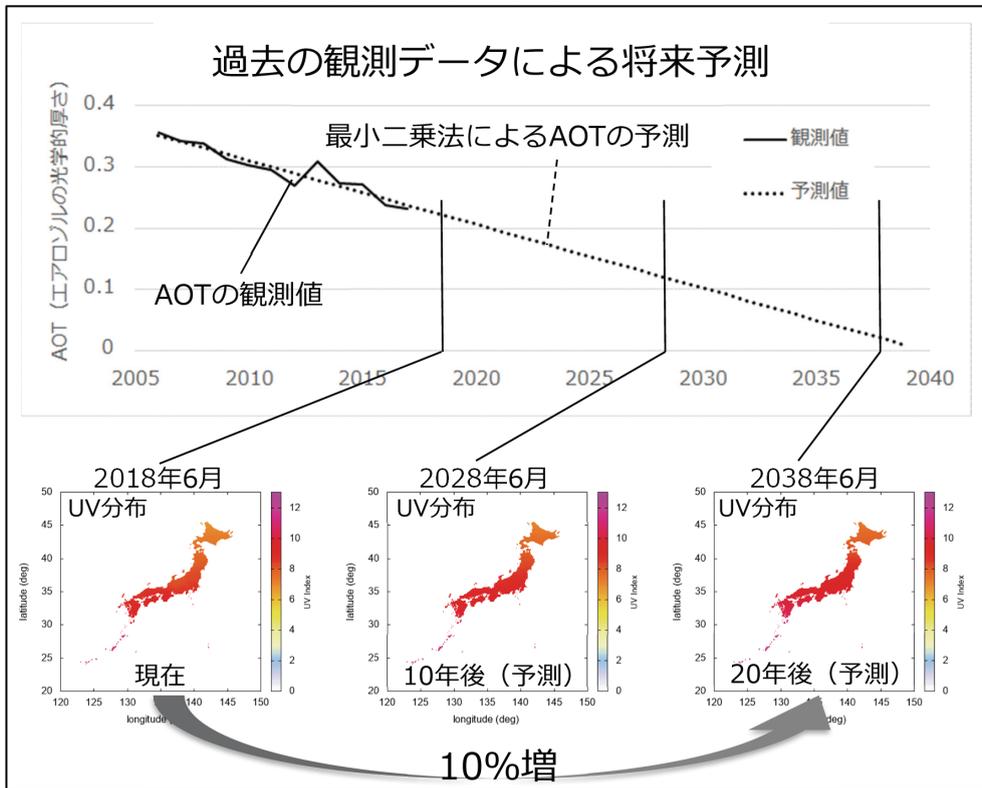


図 21 未来予測 (紫外線)

#### 5.4 東京オリンピックのマラソン競技会日時における東京と札幌の照射量の違い

2019年11月1日(金)、国際オリンピック委員会 (IOC) から四者協議を経て、東京2020オリンピック競技大会のマラソンと競歩の開催地を札幌市に変更することが発表された。その後、女子マラソン競技は2020年8月8日(土)7:00、男子マラソン競技は2020年8月9日(日)7:00に、札幌大通り公園をスタートする計画が発表された(2019年12月4日発表)<sup>[7]</sup>。

2020年8月9日の晴天時の日射エネルギーについて、天空光源シミュレーションによる東京(北緯35.68°, 東経139.77°, 図中点線)と札幌(北緯43.07°, 東経141.35°, 図中実線)の計算結果を図22に示す。7:00での水平面に照射されるエネルギーは、東京が332.04 (W/m<sup>2</sup>), 札幌で387.74 (W/m<sup>2</sup>)と予測され、札幌の方が照射エネルギーは高くなった。また、当日の1日のエネルギー照射量の積算値は東京が27,216 (KJ/m<sup>2</sup>), 札幌が27,645 (KJ/m<sup>2</sup>)となり、東京より札幌の方が1.6%増加することがわかった。

マラソンランナーの顔は、コースの走行方向に向かっているため、東西南北それぞれの方向へ向かう場合、図23のような照射を受けるものと予測される。特に、東向き状況では、東京(図中点線)の643.26 (W/m<sup>2</sup>)に対して札幌(図中実線)では755.12 (W/m<sup>2</sup>)と13.5%も増加する。

この計算結果に、気象庁発表の8月9日の東京と札幌の気温データ(2010年から2019年の平均値)と、人体比熱0.83 (kcal/kg/K)、人体平均反射率0.3<sup>[8]</sup>とを仮定して、人体表面温度を簡易的に予測した結果を図24に示す。この予測によると、7:00時点での東京と札幌の気温差4.5°Cに対して、人体表面での温度差2.0°Cとなった。また、東京でスタートを1時間繰り上

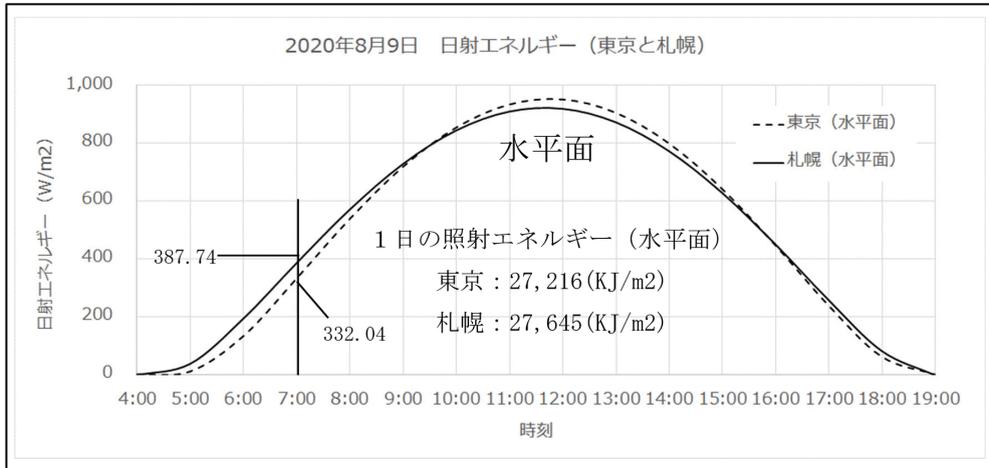


図 22 東京と札幌の日射エネルギー比較 (水平面)

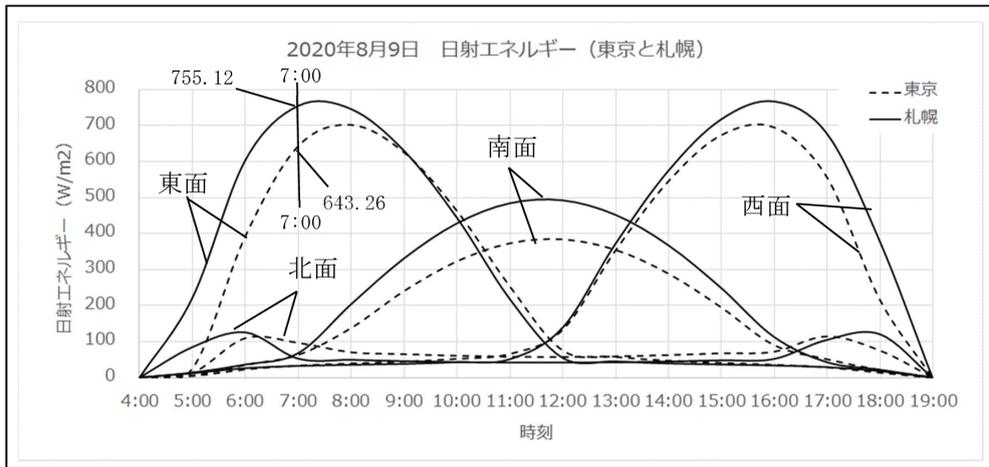


図 23 東京と札幌の日射エネルギー比較 (各照射面)

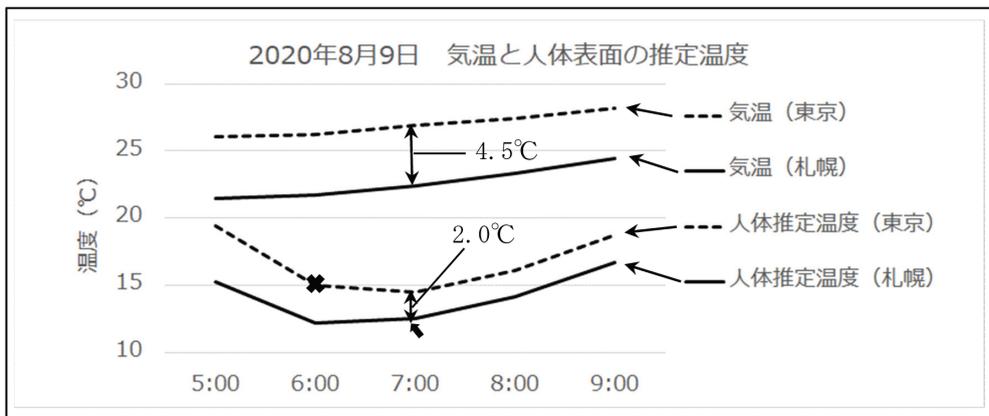


図 24 東京と札幌の日射エネルギー比較 (気温と人体表面)

げて6:00にスタートした場合(図中×印)でも、札幌の7:00時点の予測温度(図中矢印)より高い温度が予測される結果となった。

このように、天空光源シミュレーションでは、その時、その場所、その方向における、太陽光線の照射エネルギーを定量的に予測することができるので、これまでの直観的な予想ではなく、データに基づいた対策の検討や判断に貢献できるものと考えます。

## 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、実測値とシミュレーション計算値との比較検証結果を示した。また、このシミュレーションの活用シーンを想定し、照射方向や太陽光線の熱エネルギーの定量的な評価例を紹介した。

このように、日本ユニシスの総合技術研究所では、場所と時間に応じた太陽光線エネルギー強度をシミュレートする技術研究を進めている。

また、「顧客・パートナーと共に社会を豊かにする価値を提供し、社会課題を解決する企業」として、ビジネスエコシステムの中核となるデジタルトランスフォーメーションの実現に貢献するため、この技術の検証を進めてイノベーションの創出につなげたい。

最後に、本研究は社内外の多くの方々を支えられて活動しており、この場を借りて心より感謝いたします。

- 
- \* 1 国土交通省気象庁ホームページ：  
[https://www.data.jma.go.jp/gmd/env/ozonehp/sonde\\_graph\\_monthhave.html](https://www.data.jma.go.jp/gmd/env/ozonehp/sonde_graph_monthhave.html)
  - \* 2 エアロゾル観測ネットワーク「AERONET」 <https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>

- 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] JAPAN SDGs Action Platform, 外務省  
<https://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/oda/sdgs/about/index.html>
  - [3] 紫外線環境保健マニュアル 2020, 環境省  
<http://www.env.go.jp/chemi/matsigaisen2020/matsigaisen2020.pdf>
  - [4] 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](https://www.nishimatsu.co.jp/solution/report/pdf/vol22/g022_01.pdf)
  - [5] K.N.Liou, “An Introduction to Atmospheric Radiation”, Elsevier Science, 2002, 583pp.
  - [6] K.N.Liou [著], 藤枝鋼, 深堀正志 [共訳], 「大気放射学」, 共立出版, 2014, 646pp.
  - [7] 東京2020オリンピックマラソンと競歩の会場・コース・競技日程について, (公財)東京オリンピック・パラリンピック競技大会組織委員会, 2019年12月  
<https://tokyo2020.org/ja/news/news-20191204-01-ja>
  - [8] Catherine, C., Cooksey, David, W., Allen., Reference Data Set of Human Skin Reflectance, DATA.GOV, Dec.6, 2019,  
<https://catalog.data.gov/dataset/reference-data-set-of-human-skin-reflectance>
  - [9] S.Chandrasekhar, “Radiative Transfar”, Dover Publications Inc., 1950, 402pp.
  - [10] 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.
  - [11] F.X.Kneizys, “Users Guide to LOWTRAN 7”, Defense Technical Information Cen-

- ter, 1988, 137pp.
- [12] 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.
  - [13] 浅野正二, 大気放射学の基礎, 朝倉書店, 2010, 267pp.
  - [14] 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.
  - [15] 日本エアロゾル学会, エアロゾル学の基礎, 森北出版, 2003, 221pp.
  - [16] 本間克典, 実用エアロゾルの計測と評価, 技報堂, 1990, 310pp.
  - [17] 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.
  - [18] 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.
  - [19] 北山直方, 伝熱工学の学び方, 1982, 218pp.
  - [20] 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～, Jun.21, 2019,  
[https://www.unisys.co.jp/topics/G20\\_niigata.html](https://www.unisys.co.jp/topics/G20_niigata.html)

※ 注釈および参考文献に含まれる URL のリンク先は, 2020 年 7 月 15 日時点での存在を確認。

**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 13 件。国内学会論文 6 件。国際学会論文 3 件。

