

## 数値解析による街路空間における樹木の紫外放射遮蔽効果の比較

Comparison of UV Radiation Shading Effect by Trees on Urban Street Using Simulation tool

熊倉 永子\* 中大窪 千晶\*\* 梅干野 晁\*\*\*

Eiko KUMAKURA Kazuaki NAKAOHKUBO Akira HOYANO

**Abstract:** This paper describes the effect analysis on ultraviolet radiation environments in the summer in actual urban street for various tree planting types using a numerical simulation tool previously developed. As an index of UV environment, in order to evaluate UV radiation received by the human body in an urban street, we used UV scalar luminance after considering the weighting factor for the surface area of the human body. A holiday promenade as a typical type of actual urban greenery area was selected for the analysis. We planted several types of trees different tree crown shapes and planting position for the street to compare the effects of the greenery. Simulation results showed that diurnal variations of UV scalar luminance for the tree planting types are different from the direction of human and sky view factor. For UV environments in an urban street, we received high reflected UV radiation from building façades and paved surfaces, including areas with shadows depending on the area. Therefore, spreading tree crown shapes will not only reduce UV radiation, but combining multi-layered planting with both tall and low tree coverage is effective.

**Keywords:** *Ultraviolet radiation environment, Numerical analysis, Urban greenery, 3D-CAD, Street canyon*

**キーワード:** 紫外放射環境, 数値解析, 都市緑化, 3D-CAD, 街路空間

## 1. はじめに

近年、オゾン層の破壊による地上へ到達する紫外放射量(UV-B)の増加に伴い、過度に浴びることによる健康被害の意識が高まっている。環境省が刊行する「紫外線健康保健マニュアル」<sup>1)</sup>では、紫外放射の人体へのリスクを避けるための指導が提示されており、紫外放射が強い時間帯の屋外活動を避けること、衣類や日傘により人体側を調節することに加え、木陰などの日陰を利用すること等が推奨されている。しかし、紫外放射は波長が短い電磁波であるため、レイリー散乱の影響が大きく天空紫外放射の割合が多い<sup>2)</sup>ことから、特に夏季などに天蓋や緑陰で陰になった空間でも、天空からの影響が無視できない。更に、都市の生活空間では、太陽方向や天空からの紫外放射だけでなく、建物の壁面や舗装面からも反射を受け、人体が受ける紫外放射量が増加することが既往研究<sup>3),4)</sup>でも指摘されており、日傘や日陰の利用だけでは都市部における紫外放射の防御対策は不十分と考える。

そこで本研究では、都市緑化による生活空間における紫外放射の遮蔽に着目する。既往研究によると、葉の紫外放射吸収率は高く、反射率が非常に小さい<sup>5)</sup>ことから、樹木には都市の生活空間における紫外放射量の軽減が期待できるため、数値解析により建物の配置や形状、壁面や地面からの反射等、周囲からの影響を考慮しながら、都市緑化を設計していくことは有効であると考えられる。

都市の生活空間における紫外放射環境を予測する方法として、新らは<sup>6)</sup>、紫外放射反射率が高い壁面材料が使用された建物で構成されるストリートキャニオンを想定し、材料の違い、街路の方位、人体の向き、時間帯や季節別に、人体が受照する紫外放射量を比較できる数値解析手法を提案している。しかし、地面の材料の考慮や建物の凹凸やデザイン、緑化等による改善案等は検討されていない。中大窪らは<sup>7)</sup>、都市の生活空間における紫外放射環境を考慮した建築設計を支援する視点から、3D-CADで再現した建物の形状や材料が、紫外放射環境に与える影響を予測・評価するシミュレータを開発しており、本研究で対象とする都市緑化に

よる効果分析が可能なツールと言える。

以上より本研究では、上記の紫外放射環境シミュレータを用いて、都市緑化の設計に役立つ知見を得るために、樹冠形状や樹木の配置が異なる様々な都市緑化について、その紫外放射遮蔽効果を比較することを目的とする。

## 2. 紫外放射環境シミュレータについて

本研究で使用する紫外放射環境シミュレータは、3D-CADにより建物、街区形状を再現した上で解析用質点モデルを200 mmの空間分解能で作成し、紫外放射解析を行うものである。紫外放射解析の流れを以下に述べる。図-1に計算概要のフローを示す。

## (1) 建物・地面における紫外放射量の算出

木陰における紫外放射環境を評価する上で、建物の壁面や地面からの反射の影響を考慮する必要があるため、建物・地面における紫外放射照度を算出する。主な解析アルゴリズムは3D-CAD対応熱環境シミュレータ<sup>8)</sup>のものを用い、新たに天空紫外放射輝度分布<sup>9)</sup>を加え紫外放射解析を行う。建物・地面の紫外放射反射率は、既往の研究<sup>8)</sup>を参考にデータベースを作成している。

## (2) 人体に入射する紫外放射量の算出

人体に入射する紫外放射量は、生活空間高さ(高さの設定は任意)において微小六面体を仮定し、微小六面体の各面に入射する紫外放射量を以下の流れで算出する。

- 1) 微小六面体の各面に入射する直達紫外放射量をレイトレーシング法により算出する。
- 2) 立体角投影率に分割した半球を想定し、各分割した要素の方向にマルチレイトレーシングを行い、建物に衝突せず天空に抜けたレイの仰角・方位角から紫外放射輝度を求め、その積算値より天空紫外放射量を算出する。
- 3) 反射紫外放射量については、1), 2)で算出した建物・地面における紫外放射照度を元に、マルチレイトレーシング法により算出する。反射の指向特性については、鏡面反射と拡

\*首都大学東京都市環境学部 \*\*佐賀大学大学院工学系研究科 \*\*\*放送大学教養学部

散反射について考慮している。

4) 算出した微小六面体の各面の紫外放射量を基に、スカラー照度を算出する。

(3) 樹木の紫外放射遮蔽モデル

20種の個葉の分光反射率を測定したGrantの研究<sup>9)</sup>より、紫外域における透過率が非常に小さく樹種による差が少ないことや、本報では樹木の配置や樹冠形状の違いを比較することから、樹冠部を抜ける紫外放射透過率は20%とする。樹種は、東京都で多く用いられている街路樹<sup>10)</sup>として、樹冠形状や葉張りが異なるケヤキ、プラタナス、イチョウ、ユリノキ、イロハモミジを対象とし、それぞれ3次元で樹冠形状を再現する。表-1に樹冠形状、樹高、葉張りを示す。高木の樹高は大きな緑陰が形成できるよう20m、中木は8mとし、樹高に対する葉張りの比率は、既往文献<sup>11)</sup>の自然樹形を参考に樹種別に与えている。いずれも歩行空間を確保するため、既往文献<sup>12)</sup>を基に枝下高さは一律2.5mとする。

3. 数値解析による実在市街地の紫外放射環境の実態把握

近年都心部では、歩行者天国や常設の路面カフェの設置等、街づくりの一環として自治体により積極的な屋外での活動が推進されている<sup>13)</sup>。そこで本章では、屋外活動が推進されている実在街区を対象に、立地条件や活動時間帯を考慮した紫外放射環境の実態を、2の紫外放射環境シミュレータを用いて定量的に把握する。

(1) 計算対象地と計算条件

熱線反射ガラスなど紫外放射の反射率が高いファサードを持つ建物に囲まれた商業地区である銀座中央通りを対象とする。南東方向から北西方向へ伸びる街路の車道は歩行者天国としても利用され、休日の日中は街路全体が滞在空間となる。図-2に3D-CADで再現した街路空間のモデルを示す。表-2に街路を構成する主な建築材料の紫外放射反射率を示す。計算は、紫外放射量が多い東京の夏季晴天日<sup>14)</sup>の12時、14時、15時とする。

(2) 紫外放射環境の実態

図-3に12、14、15時における地上高さ1.5mの紫外放射スカラー照度分布を示す。図-4には街路全体で平均した紫外放射スカラー照度と、その時の直達紫外放射、天空紫外放射、拡散・鏡面反射紫外放射の割合をそれぞれ示す。

12時では、西側歩道から車道が全て日向であり、スカラー照度は車道中央で300 mW/m<sup>2</sup>に近い。東側歩道の日陰でも80 mW/m<sup>2</sup>であり、街路全体の平均は180 mW/m<sup>2</sup>である。14時は、街路に入射する紫外放射量が減少するが、東側歩道と車道の半分以上が日向となり、街路全体の平均は150 mW/m<sup>2</sup>である。15時には、西側歩道から車道にかけて西側建物の陰となり、西側歩道は25 mW/m<sup>2</sup>程度であるが、西日を受けた街路東側のガラス面からの鏡面反射や高い天空率により、車道は45 mW/m<sup>2</sup>程度あり、街路全体では60 mW/m<sup>2</sup>となる。また今回の対象街路では、いずれの時間帯でも全紫外放射量に対する天空紫外放射量、反射紫外放射量の割合がそれぞれ3割程度を占めている。建物の陰となり直達紫外放射の影響が小さい15時では、天空紫外放射と反射紫外放射を合わせると50 mW/m<sup>2</sup>程度となり、12時の約3割の紫外放射を受けている。

4. 樹木の配植方法の違いが街路の紫外放射環境に与える影響

本章では3で把握した実態を踏まえ、樹木による紫外放射遮蔽効果を、樹種や配植方法が異なる様々なケースで比較していく。

(1) 比較する樹木の配植

既往文献における樹木の配植方法<sup>15)</sup>を基にした単列植栽、二列植栽、互いの目植栽、三列植栽の異なるケースで比較する。本報では、様々な方向からの紫外放射を遮蔽しやすくするために、表-1に示す樹冠形状や樹高、葉張りの違いやそれらの組み合わせ

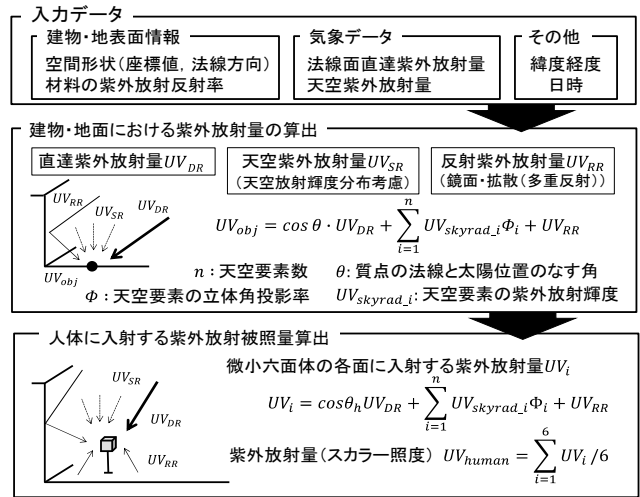


図-1 紫外放射環境の計算概要

表-1 計算に用いる樹種とその寸法

	ケヤキ	プラタナス	イチョウ	ユリノキ	イロハモミジ
樹冠形状	杯型	卵型	円錐型	卵型	ドーム型
樹高[m]	20	20	20	20	8
葉張り[m]	14	16	8	8	5

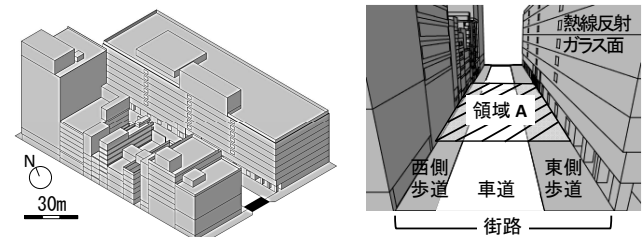


図-2 解析対象地の3D-CAD

表-2 街路を構成する材料の紫外放射反射率

位置	壁面					ガラス		地面	
	タイル(濃)	石張り(濃)	コンクリート	銅板	アルミ	単層ガラス	熱線反射ガラス	コンクリート	タイル舗装面
反射率	8.1	6.4	18.9	4.3	55.4	9.5	25.2	18.9	8.1

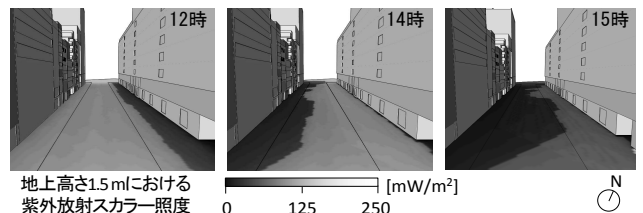


図-3 時刻別の地上高さ1.5mの紫外放射スカラー照度分布

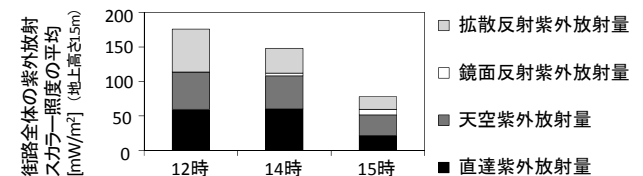


図-4 紫外放射スカラー照度の日変化

方に着目し、表-3に示す全16ケースで比較をする。また、樹冠の投影面積が図-2中の街路面積に占める割合から算出した緑被率も示す。樹冠同士が重なる部分は投影面積に追加していない。単列では(1)ケヤキと(2)プラタナスの葉張りが大きいため、(3)イチョウと(4)ユリノキに比べて緑被率も2倍程度大きい。(5)イチョウ、

(6)ユリノキによる二列植栽と互いの目植栽は、単列の(1)と(2)と同程度の緑被率としている。三列植栽は樹木の本数を増やし、緑被率が大きいケースとし、高木と中木の組み合わせや、異なる樹冠形状の組み合わせを比較する。以上のようなケースを作成し、街路空間を歩行する人を想定した、地上高さ1.5mにおける紫外放射スカラー照度で比較をする。

### (2) 紫外放射遮蔽率の日変化の比較

図-2中の街路全体で平均した、地上高さ1.5mにおける夏季晴天日の12時、14時、15時の紫外放射スカラー照度を各ケースで算出する。樹木がない場合の紫外放射スカラー照度で除した紫外放射遮蔽率を算出し図-5に示す。ケースにより最大50%程度遮蔽率が異なり、大きい場合で(16)イチョウ、モミジ、プラタナスによる三列植栽が80%程度、小さい場合は(3)単列のイチョウで30%程度であり、この差は樹木本数の違いが影響している。

緑被率に着目すると、25%程度の緑被率であり樹冠形状が異なる単列の(3)イチョウ、(4)ユリノキでは、円錐型の(3)イチョウよりも細長の卵形の(4)ユリノキの方が5-7%効果が高い。45%程度の緑被率である単列の(1)ケヤキ、(2)プラタナス、二列の(5)イチョウ、(6)ユリノキ、互いの目の(8)イチョウ、(9)ユリノキを比較すると、遮蔽率は10%程度差があり、単列で樹冠形状が杯型の(1)ケヤキが最も遮蔽率が小さく、(6)や(9)のユリノキがいずれの時刻でも遮蔽率が高い。樹木の本数が多く緑被率が60-80%の三列では、樹冠形状が異なる3樹種による(15)と(16)を比較すると、ほぼ同じ緑被率にも関わらず、(16)の方が5-8%遮蔽率が高い。緑被率が20%異なる(15)と(13)を比較しても遮蔽率は等しく、(15)の樹冠形状の組み合わせでは、多層による遮蔽効果が十分に発揮できないと言える。

次に時刻別の変化を見る。12時から15時の間で遮蔽率が変化する割合は、(1)ケヤキの単列植栽が最も大きく8%程度変化し、(14)高木のプラタナスと中木のイロハモミジの多層植栽や、(8)イチョウの互いの目植栽等の、樹冠が街路全体を覆う配植は2%程度と変化が小さい。図-4に示したように、街路空間の紫外放射環境は太陽方向からの直達紫外放射に加え、天空紫外放射や反射紫外放射も影響し、太陽高度が低くなるほど相対的に後者の割合が増加する。したがって、太陽方向に対する遮蔽だけでなく、天空や建物壁面からの反射に対する効果的な遮蔽もできるケースほど、時刻による変化も小さい。

以上の結果から、街路空間における樹木の樹冠形状や配植が異なるケースにおける紫外放射遮蔽効果の違いは、緑被率などの平面的な指標だけで表すことは難しいと言える。そこで次に12時、15時において各ケースの立体的な遮蔽の違いを比較していく。

### (3) 紫外放射量の断面分布の比較

図-6に、図-2中の領域Aにおける12時、15時の地上高さ1.5mの紫外放射スカラー照度の断面分布を示す。紫外放射スカラー照度と、その時の成分である直達紫外放射、天空紫外放射、反射紫外放射スカラー照度もそれぞれ示している。

12時には太陽高度が高いため、いずれのケースも樹木の位置に応じた分布が形成されている。単列の(1)~(4)では紫外放射の遮蔽率は低く、特にモミジとユリノキは紫外放射を遮る樹冠が小さいため、図-6中の西側の歩道部分では、樹木がない場合に比べ数mW/m<sup>2</sup>程度しか紫外放射量が減少していない。二列の(5)~(7)では、遮るものがない道路中央の紫外放射量が大きく、緑被率がほぼ等しいが樹冠形状が異なる(5)イチョウと(6)ユリノキでは50mW/m<sup>2</sup>差がある。これは天空紫外放射の遮蔽効果の差が主に影響しており、円錐型より卵型の樹冠形状の方がより広範囲の紫外放射の遮蔽に有利であることを示している。(11)~(16)の三列のケースでは樹木の本数が多くなることから、街路のどの部分でも3割以上紫外放射量が減少している。三列では天空がほぼ覆われる

表-3 比較に用いる緑化ケースとその緑被率

配植	平面図	断面図	ケース名(緑被率)	
単列植栽			(1)ケヤキ(45.5%)	(3)イチョウ(24.3%)
			(2)プラタナス(48.6%)	(4)ユリノキ(23.8%)
二列植栽			(5)イチョウ(48.7%)	(7)モミジ(32.0%)
			(6)ユリノキ(47.5%)	
互いの目植栽			(8)イチョウ(44.5%)	(10)モミジ(30.5%)
			(9)ユリノキ(44.5%)	
三列植栽			(11)ユリノキ,ケヤキ,ユリノキ(66.1%)	
			(12)モミジ,プラタナス,モミジ(61.3%)	
			(13)ユリノキ,ユリノキ,ケヤキ(60.3%)	
			(14)モミジ,モミジ,プラタナス(62.8%)	
			(15)イチョウ,ユリノキ,ケヤキ(79.7%)	
			(16)イチョウ,モミジ,プラタナス(79.0%)	

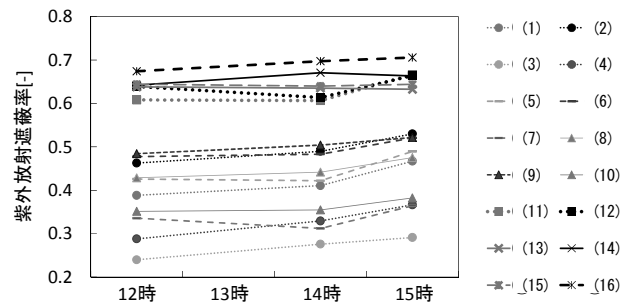


図-5 各ケースの紫外放射遮蔽率の日変化

ため、特に天空紫外放射に対する遮蔽効果が高い。

太陽が傾く15時には、歩道部分を含む西側の建物から10m程度は日陰となり、直達紫外放射は影響せず、西側の建物から4m辺りまでは天空紫外放射が、4mから10m辺りまでは反射紫外放射も影響している。西側の日陰部分における天空紫外放射の遮蔽は、12時と同様の傾向で、樹冠形状や配植の形態の違いで遮蔽効果に差がある。しかし反射紫外放射量の場合は、(2)単列のプラタナスや(9)二列のユリノキでも三列の(11)や(12)とほぼ同程度の遮蔽効果が見られる場所もある。これらは、局所的ではあるが、反射紫外放射の影響が大きい向きに対して、効果的に遮蔽する樹冠形状や配置であることが示唆される。そこで次に、反射紫外放射の遮蔽と樹冠形状や配置との関係を詳しく見るため、反射紫外放射の影響が大きい15時において、微小六面体の各面に入射する反射紫外放射量と樹木の遮蔽効果を各ケースで比較する。

### (4) 15時における微小六面体の各面が受ける反射紫外放射量に対する遮蔽効果の比較

歩行する人を想定し、地上高さ1.5mにおける微小六面体の上面、下面、鉛直面(4方位)が受ける15時の反射紫外放射量を(3)と同様の範囲で平均して算出し、樹木がない場合との差を図-7に示す。向き別に紫外放射量を比較すると、下からの反射が最も多く、他の向きに比べて2倍以上入射してくることが分かる。更に太陽が傾く15時は、建物の壁面からの反射も影響し、今回のケースでは特に南を向いた場合に他の鉛直面に比べて、3割程度入射する紫外放射量が増加している。ケース別に遮蔽効果を見ると、下からの反射は、地面へ入射する紫外放射が多いほど反射量も多くなるため、緑被率が大きく、天空を覆うような樹冠形状や配植のケースの遮蔽効果が高い。鉛直面が受ける反射も緑被率が大きい方が遮蔽効果は高い傾向が見られるが、樹冠形状の違いでも遮蔽効果は異なる。例えば緑被率が45%程度のケースでは、大きな樹冠や縦長の樹冠形状を持つ樹木による列植により、西日を受けた街路東側のガラス面からの反射を面的に遮蔽できる、(2)プラタナスの単列、(9)ユリノキの互いの目植栽と(6)列植の効果

高い。杯型や円錐型のケヤキやイチョウの場合は、列植をしても鉛直方向からの面的な入射に対しては遮蔽しきれず、反射紫外放射の受照量が増加する。しかし、(13)や(15)のように樹冠形状が異なる組み合わせで多層の三列植栽にすることで、中木が鉛直方向からの紫外放射を遮り、遮蔽効果は大きく増加する。また今回のケースのように、建物の面的な反射が問題となる場合には、街路の中央よりも反射面の前面に大きな樹冠を植えたケースの方が、遮蔽効果が高いことが分かる。

以上より、都市の紫外放射環境を樹木により改善することを検討するためには、直達紫外放射の遮蔽に対しては緑被率の指標も有効であるが、天空が開けた場所や、建物の陰にも関わらず周辺地物からの反射を考慮する必要がある場合等については、滞在空間の用途、時間帯に合わせた配植や多層構造を工夫して、立体的な植栽計画も検討する必要があると言える。

### 5. まとめ

本研究では実在する都市の街路空間に形成される紫外放射環境を数値解析により定量的に把握した上で、樹木の配植別に紫外放射の遮蔽効果を比較した。得られた知見は以下の通りである。

- (1) 都市の街路空間における紫外放射環境は、いずれの時間帯においても、直達紫外放射だけでなく、天空紫外放射、反射紫外放射が同程度影響していることを定量的に示した。
- (2) 夏季 15 時における街路を対象に、樹冠形状、樹種の配植構造が異なるケースで比較した結果、多層の方が遮蔽効果は高く、特に鉛直面への効果が影響することが分かった。
- (3) 今回対象とした街路空間の場合、建物の壁面全体からの反射を遮るためには、建物への日射の入射角が大きく影響し、街路樹の形態と反射面との位置により、配植や樹冠形状を検討する必要性が示された。

今回対象とした街路では、中央分離帯を設け植栽箇所を増やしたが、より多くの街路で紫外放射量の遮蔽対策を検討する際には、紫外放射を反射しやすい建築壁面材料への壁面緑化や、地面からの反射防ぐ地被植物による緑化、天空紫外放射量を防ぎやすい樹冠形状に剪定すること等も有効であると考えており、今後の検討課題としたい。

謝辞：本研究の一部は、渡辺圭祐君（当時東京工業大学大学院生）の修士論文研究として実施されたものである。ここに記して感謝の意を表す。

### 補注及び引用文献

- 1) 環境省 (2008) : 「紫外線健康保健マニュアル 2008」, 30-32
- 2) 小松 秀隆, 竹下 秀, 坂田 俊文, 佐々木 政子 (1999) : 晴天時の太陽 UV-B 放射の天空輝度分布 : 照明学会誌 83 (8A), 548-555
- 3) Alois W. Schmalwieser, Enzi C., Wallisc S., Halawe F., Marier B., and Weihs P. (2010) : UV Exposition During Typical Lifestyle Behavior in an Urban Environment : Photochemistry and Photobiology 86 (3), 711-715
- 4) Joanna T. et al. (2009) : Measuring the influence of UV reflection from vertical metal surfaces on humans : Photochemistry and Photobiology 8 (1), 62-69
- 5) Richard H. Grant, Gordon M. Heisler, et. Al. (2003) : Ultraviolet leaf reflectance of common urban trees and the prediction of reflectance from leaf surface, characteristics : Agricultural and Forest Meteorology 120, 127-139
- 6) 新聖子, 垂水弘夫, 久保猛志 (2006) : ストリートキャニオンにおける紫外域日射の人体被照量推定に関する研究 : 日本建築学会環境系論文集 (602), 77-84
- 7) 中大窪千晶, 梅干野晃, 熊倉永子 (2013) : 都市空間の熱・紫外放射環境の予測・評価に関する研究 その1 紫外放射環境の予測手法の開発, 日本建築学会全国大会梗概集 (北海道), 877-878
- 8) Asawa T., Hoyano A., Nakaohkubo K. (2008) : Thermal design tool for outdoor spaces based on heat balance simulation using a 3D-CAD system : Building and Environment Volume 43, Issue 12, 2112-2123
- 9) 桐生伸喜, 川西利昌, 井川憲男, 矢口浩 (2001) : 晴天時の天空紫外放射輝度分布と紫外日光率に関する基礎的研究 : 日本建築学会計画系論文集 (540), 9-14
- 10) 松江正彦, 飯塚清男ら (2011) : 公園樹木管理の高度化に関する研究 : 国土技術政策総合研究所資料, Vol. 623, 41-46
- 11) 国土交通省都市・地政整備局公園緑地・景観課緑地環境室 監修 (2009) : 公共用

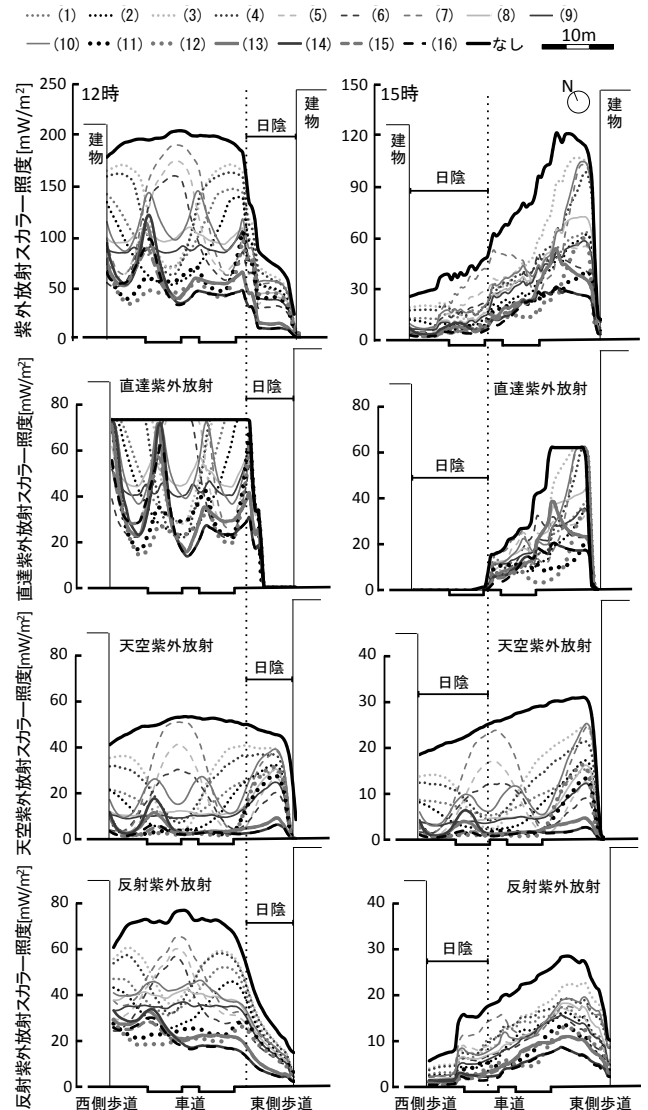


図-6 紫外放射スカラー照度の断面分布

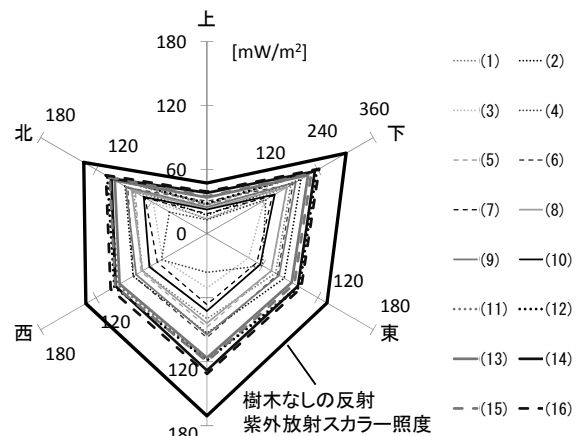


図-7 微小六面体の各面が受ける反射紫外放射量の比較

- 12) 社団法人日本道路協会 (1988) : 道路緑化技術基準・同解説, 43pp
- 13) 「道路を活用したオープンカフェ」, 新宿区, 平成 24 年 11 月
- 14) M. sasaki I, S. takeshita, and T. sakata (1993) : Ground-Based Observation of Biologically Active Solar Ultraviolet-B Irradiance at 35°N Latitude in Japan : J. Geomag. Geoelectr., 45, 473-485
- 15) 社団法人日本公園緑地協会 公園緑地研究委員会 造園施工管理委員会編 (2011) 改訂 26 版 造園施工管理技術編, 58pp