【論文】

建物による日影が衛星リモートセンシングから 算出された都市域のアルベドへ及ぼす影響

泉 岳樹・岡部篤行・貞広幸雄・平野勇二郎

The effect of the shadow of buildings on the satellite derived albedo in urban area
using 3-dimensional building data and remotely-sensed data

Takeki IZUMI, Atsuyuki OKABE, Yukio SADAHIRO and Yujiro HIRANO

Abstract: This paper aims to clarify the effects of the building shadow on the albedo in urban areas using remotely-sensed data. The albedo distribution was estimated from a set of remotely-sensed data of resolution 18m. The shadow of buildings was then obtained from land use data in a vector format. Analysis of the relationship between the building shadow ratio and the satellite derived albedo in a central area of Tokyo showed a negative correlation between them. The negative correlation found in the high-rise building area of Nishi-Shinjuku was the most significant. These results suggest that the albedo value of a certain location in urban areas which is estimated from satellite data is strongly affected by the building shadow in its neighboring area.

Keywords: アルベド(albedo), 日影(shadow), 建物形状 (building height and shape),
リモートセンシング (remote sensing), ヒートアイランド (heat island)

1. はじめに

都市ヒートアイランドによる熱環境の悪化は、ピーク電力の増大や大気汚染の悪化など、様々な問題を引き起こしている。そのため近年では、ヒートアイランドの緩和を目指し、気象モデルを利用した数値シミュレーションによるヒートアイランドの再現や予測、それに基づく政策の検討などが行われている (Ichinose et al., 1999; 泉ら, 1999)。

ヒートアイランドの重要な成因の一つに、地表面アルベドがある。地表面アルベドとは、地表面上での天空半球方向に反射され出ていく短波放射の全天

日射量に対する比であり、アルベドメータにより実測可能である。しかし、都市域では建物が複雑な幾何形状を持っているため、直接測定することが非常に難しい。そのため、既往のシミュレーション研究の多くでは、衛星リモートセンシングから推定した値を利用している。このように計算された値の空間分布は、一般的に、都心部に近いほど低アルベドになる傾向があると報告されている (Vukovich, 1983; 中川・大井, 1992)。

しかし、衛星リモートセンシングによる都市域の地表面アルベドの算出にあたっては、上向き放射フラックス密度を求めるため、衛星観測される鉛直上向き放射強度を π 倍する。そのため、地面や屋上などの水平面に落ちる日影の影響を強く受け、地表面アルベドを過小評価する可能性があるとの指摘もなされており (谷治, 1999)、都市域におけるアルベドが本当に低いかどうかは必ずしもはっきりしな

泉: 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

東京大学大学院工学系研究科都市工学専攻

Department of Urban Engineering, University of Tokyo,
7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, JAPAN

Phone: 03-5841-6259

E-mail: izumi@ua.t.u-tokyo.ac.jp

い。これは、既存の研究が、① 使用している衛星データの解像度が最大で 80m 程度のものであり、日影がミクセルとなり判別困難なこと、② 衛星撮影時の実際の日影データが存在しないこと、などのためである。

そこで、本研究では、18m の高空間分解能衛星データによるアルベドの算出、並びに、実際の建物形状データを用いた日影算出を行うことにより、日影が衛星リモートセンシングに基づき算出されるアルベドに与える影響を実証的に明らかにする。これは、GIS のもつ衛星データ（ラスタデータ）と他の地理情報（主にベクタデータ）とのオーバーレイ機能により、初めて実現されるものである。具体的には、図 1 に示したフローのように、衛星データの処理・解析にはラスタ型 GIS、建物形状データの処理や日影算出にはベクタ型 GIS を利用し、これら 2 種類のデータを統合し解析を行う。

図 1 研究のフロー

2. 研究の手法

2. 1. アルベドの算出

本研究で求めるアルベドは、厳密には狭帯域惑星アルベドと呼ばれるもので、JERS-1/VNIR の波長域の大気上端での入射放射量と反射放射量の比であり、以下の式で定義される。

$$\text{狭帯域星アルベド} = \frac{\text{狭帯域反射太陽放射量}}{\text{狭帯域入射太陽放射量}} \quad (1)$$

ヒートアイランドのシミュレーションなどに利用される地表面アルベドを求めるためには、さらに水蒸気、二酸化炭素、オゾンの影響やレーリー散乱の影響を取り除くための大気補正が必要となる。ただし、Chen and Ohring (1984) によれば、晴れた日の

惑星アルベドと地表面アルベドには線形の関係がみられる。本研究では、日影がアルベドに与える影響を分析することを目的としており、アルベドの絶対値を議論することを目的としているわけではない。そのため、本研究では、狭帯域惑星アルベドをそのまま使用する。

図 2 JERS-1 のデータ (1997 年 10 月 1 日)

反射放射量は、1997 年 10 月 1 日の午前 10 時 40 分頃に撮影された JERS-1/VNIR のバンド 1-3 (波長域 0.52-0.60 μm , 0.63-0.69 μm , 0.76-0.86 μm) の南関東付近 (PATH:064, ROW:241) のデータ (図 2) を用いて計算した。衛星データの DN 値から絶対放射量への変換は、NASDA (1993) に示されている以下の式を用いた。

$$R_i = \frac{A_i}{A'_i} Dn_i \quad (2)$$

ただし、 R_i はバンド i の絶対放射量、 Dn_i はバンド i の DN 値、 A_i 、 A'_i はバンド i の DN 値から絶対放射量への変換係数 (表 1) である。

表 1 JERS-1 の DN 値から絶対放射量への変換係数

i	A_i	A'_i
1	1	2.253
2	1	2.968
3	1	2.992

入射放射量は、JERS-1/VNIR の波長域の狭帯域太陽定数であり、Thekaekara and Drummond (1971) が提案している大気上端での波長別太陽放

射量をもとに求めた結果、378.84 (w/m²) であった。

上記により求められた反射放射量と、入射放射量に Gurney and Hall (1983) の地心太陽距離の調整項を加えると、狭帯域惑星アルベドは次の式で定義される。

$$A_p = \frac{[1 + 0.0167 \sin\{2\pi(J - 93.5)/365\}]^2 \pi \sum R_i}{378.84 \sin \alpha} \quad (3)$$

ただし、 A_p は惑星アルベド、 J はユリウス日、 α は太陽高度である。

また、アルベドの分布図の作成に当たっては、GCP を利用し行った 2 次の精密幾何補正の精度 (RMSE = 0.5234) などを考慮し、メッシュサイズを 40m とした。ただし、大気上端での上向き短波放射は等方性であると仮定している。

2. 2. 日影の算出

日影の算出に当たっては、東京都都市計画情報システムのデータ (1996 年) を使用した。このデータには建物の水平形状と階数が入力されており、階高 3m と仮定して、建物の立体形状を得た。これに衛星撮影日時を対象地における太陽高度 (49.2 度)、方位角 (160.3 度) を与え、ARC/INFO のシェーディング機能を利用して建物による日影を 2m メッシュで計算した。これをアルベドの分布と比較するため 40m メッシュで集計し、メッシュ内の日影面積率を計算して解析に利用する (図 3)。

図 3 日影から日影面積率への変換

2. 3. NDVI の算出

日影は、建物のみでなく樹冠などによっても作られる。都市内にも、街路樹や、公園には比較的大き

な樹木が存在しており、これらによる日影も本来は考慮すべきである。しかし、樹木に関する適当なデータがないこと、植生は他の都市構成物質と明らかに異なる分光反射特性を持つことなどから、NDVI (正規化植生指標) が 0 以上になるメッシュは解析対象から除いた。植生と同じく、水体も本来は解析対象から除くべきである。ただし、水体の比率が最も大きい都心部全体の対象領域でも、その比率は 2% と小さく、作業効率を考慮し本研究では除去しないこととした。

NDVI は、式 (4) により定義される植物の活性度を表す指標で、植物の活性度が大きいほど大きな値となる。

$$NDVI = \frac{NIR - VIS}{NIR + VIS} \quad (4)$$

ただし、NIR は JERS-1 のバンド 3 にあたる近赤外の観測値、VIS はバンド 2 の可視域の観測値である。

3. 結果と考察

結果の解析にあたっては、都心部全体を対象とした解析と土地利用による差を見ることを目的とした特定の地区での解析の 2 種類を行った。

3. 1. 都心部全体での解析

まず、図 4 に示した東京の都心部の東西 7.5 km、南北 4.5 km の領域を対象とし、解析を行う。

図 5 は、この領域内で計算された日影面積率の分布を示している。新宿、大手町、丸の内、赤坂など、高層建築が多いところで、日影面積率が比較的高いことが分かる。

図 6 はアルベド分布である。水のアルベドが低いので皇居の周りのお堀や河川などの水面が目立つ。また、日影面積率の高かった新宿、丸の内などの地域で比較的低いアルベドが観測されている。

図 7 は NDVI の分布である。明治神宮、代々木公園、新宿御苑、皇居など都心付近には多くの緑が残っていることが分かる。

図 8 は、NDVI が負という条件を満たす 15325 メッシュ (全体で 21244 メッシュ) の、アルベドと

図4 解析対象地域（東京の都心付近 東西7.5km×南北4.5km）

図5 日影面積比率（40m メッシュ）

図6 アルベドの分布（40m メッシュ）

図7 NDVI の分布（40m メッシュ）

図8 アルベドと日影面積率の関係

図9 新宿区新宿の建物形状と階数

図11 建物形状を元に計算された衛星撮影時における日影（西新宿）

図13 日影面積率の分布（西新宿）

図10 中野区本町付近の建物形状

図12 建物形状を元に計算された衛星撮影時における日影（中野区本町）

図14 日影面積率の分布（中野区本町）

日影面積率の散布図である。全体的に負の相関があることが見てとれる。実際、Spearmanの順位相関係数を求めると -0.3599 となり、アルベドと日影面積率には負の相関が確認される。なお、この相関係数は1%水準で有意である。これにより、衛星リモートセンシングに基づき算出される都市域でのアルベドの低下が、建物により生じる日影の影響を受けていることが明らかとなった。

相関係数の値が低いのは、都市域のアルベド決定の第一要因である建物や地面の素材や色の違いが、順位の変動を生じさせるためと考えられる。ただし、次の特定地区の解析の中でも言及するよう、日影面積率が高くなる地区の方が、素材や色によるアルベドの値は大きくなる傾向がある。このことは、素材や色と日影面積率の相関により、負の相関が観察されているのではなく、素材や色による正の相関をう

ち消し、負の相関が観察されていることを示唆している。また、建物の素材や色のデータベースは存在していないし、実測も非常に困難である。日影がアルベド低下に与える影響をみるには、前記の解析で十分であるといえよう。

3.2. 特定の地区での解析

次に、市街地の形態の違いの影響をみるために新宿区西新宿の高層ビル街区（図9）と中野区本町の低層高密度住宅地区（図10）を対象地とし、同様の解析を行った。

図11と図12は、それぞれの対象地での日影、図13と図14は、日影面積率を表している。西新宿では、高層ビルにより大きな日影が生じるが、中野区本町では、青梅街道沿いに多少大きめの日影がある以外は、小さな日影が多く、日影面積率も低いメッ

図 15 アルベドの分布（西新宿）

図 17 NDVI の分布（西新宿）

図 19 アルベドと日影面積率（西新宿）

図 16 アルベドの分布（中野区本町）

図 18 NDVI の分布（中野区本町）

図 20 アルベドと日影面積率(中野区本町)

シュが多い。

図 15 と図 16 は、アルベド分布である。西新宿では、対象地域の南西部にアルベドの高い領域が見られる。これは、都庁と都議会議事堂の間にある白いタイル張りの都庁前広場である。このように、アルベドの分布は、素材や色により大きく左右される。中野区本町には目立った特徴は見られない。

図 17 と図 18 は、NDVI の分布である。西新宿では、都庁のすぐ西の新宿中央公園が確認できる。中野区本町でも、近隣公園や寺社など比較的緑被率の高いところの確認できる。NDVI が負であるという条件を満たすのは、西新宿では 504 メッシュ中 445 メッシュ、中野区本町では、1224 メッシュ中 1133 メッシュであった。

図 19 と図 20 は、アルベドと日影面積率の散布図である。Spearman の順位相関係数を求めると、そ

れぞれ -0.6777 と -0.1588 となり、両対象地において負の相関がみられ、日影によるアルベドの低下が確認された。相関係数は両対象地とも、1%水準で有意である。

中野区本町で相関係数が著しく低いのは、素材や色による問題だけでなく、アルベドや日影面積率の集計単位に大きな影響を受けているためと考えられる。実際、日影面積率の分布が、西新宿では、比較的均一なのに対し、中野区本町では、低い面積率に偏在している。このことは、40m という解像度が、西新宿での日影を表現するには適合するが、建物スケールがより小さい、中野区本町などの日影を表現するには不十分であることを示唆している。今後は、民間でも解像度 1m 程度の超高解像度の衛星が利用できる時代となる。密集市街地での解析には、このような高解像度の衛星を利用することが望まし

いと考えられる。

また、表2に示したように、両対象地区での平均日影面積率は、西新宿では19.2%、中野区本町では11.3%となり、平均のアルベドは西新宿で18.3%、中野区本町で20.1%となった。西新宿での日影面積の割合が大きいのは、特定街区制度や総合設計制度を利用しているため容積率が高い反面、グロス建蔽率が密集市街地より低く、日影が、地面に落ちる割合が大きいためと考えられる。また、素材や色からは高アルベドと予想される西新宿の方が平均アルベドが小さい。これは、端的に日影の影響により都心部での低アルベドが観測されることを物語っている。

表2 両対象地区での日影面積率とアルベド

	西新宿	中野区本町
平均日影面積率	19.2%	11.3%
平均アルベド	18.3%	20.1%

衛星は、ほぼ鉛直下向きを観測しているため、地面に落ちた日影のみが観測され、壁面に落ちた日影は考慮されない。従って、衛星データに基づき算出された都市域のアルベドは、日影が地面や屋上面に落ちる割合の大きい場所ほど低い値になるのである。衛星データを利用し都心部ほど低アルベドになることを示したVukovich (1983) や中川・大井 (1992) をはじめとする既存研究の結果は、この影響を捉えている可能性が高い。

Aida (1982) は、コンクリートブロックで作った都市模型を用いて観測を行い、水平面に比べ建物がある場合にアルベドが低くなることや、建物高さが高くなり都市キャニオンが深くなると、アルベドがより低くなることを明らかにした。この結果は、都心部ほどアルベドが低くなることを示唆しており、衛星データに基づき算出されたアルベドが都心部ほど低くなることは、この実験の結果に適合している。

だが、都市模型は地面だけでなく壁面に落ちた日影も捉えており、多重反射の効果が考慮されている一方で、衛星データを用いた場合には多重反射の効果は考慮されていない。また、都市模型は、全ての構成面の反射率が等しいこと、道路幅員は一定にして建物を高くするなど、実際の都市とは異なった条

件での実験結果である。これらのことを考慮すると、衛星データに基づく計算や都市模型による観測だけで、実際の都市が都心部ほど低アルベドであるという結論を導くことには問題がある。この問題の解決のためには、天空半球方向に反射する放射を全て観測するか、天頂半球方向の非等方性反射に関する数値実験を行うなどの研究を進めねばならない。

4. おわりに

本研究では、① 高分解能の衛星データからのアルベドの算出、② 実際の建物形状データから日影の計算、を行い両者の比較を行った。

その結果、衛星データから算出された都市域のアルベドが、① 建物による日影の影響を受けること、② 高層ビル街区に代表される低建蔽率かつ高容積率で、日影が地面や屋上面に落ちる割合が高い地域において低くなること、などが明らかとなった。

ただし、この結果は、太陽高度に強く依存することが予想されるので、今後は季節変動なども考慮する必要がある。また、直下視の衛星からは直接捉えることのできない、多重反射の影響について解析し、衛星データに基づくアルベド推定の精度評価を行うことも重要な課題である。

謝辞

本研究を進めるにあたり、東京大学大学院工学系研究科都市工学専攻の花木啓祐教授に多くの御指導をいただきました。衛星データの処理にあたっては東京大学空間情報科学研究センターの高橋昭子さんに多大な御協力を頂きました。UCN（都市気候研究会）のメンバーの方々には、様々なアドバイスや励ましを頂きました。また、査読者の方からは多くの有益なコメントを頂きました。記して深謝の意を表します。

本研究は、科学技術振興事業団戦略的基礎研究「都市ヒートアイランドの計測制御システム」（代表者：久保幸夫）及び東京都立大学都市研究所・共同研究「大都市の地域情報と居住システムに関する計画論的研究」、「循環型社会とまちづくりに関する総合的研究」の研究成果の一部である。

参考文献

- 泉 岳樹・岡部篤行・貞広幸雄・花木啓祐・一ノ瀬俊明 (1999) 首都機能移転による熱環境変化の予測. 環境システム研究, **27**, 171-178.
- 中川清隆・大井祐成 (1992) 新潟県長岡市街地およびその周辺における LANDSAT/MSS 波長域地表面アルベドの分布とその季節変化. 地理学評論, **65A**, 769-790.
- 谷治正孝 (1999) 中川清隆氏論文「都市地表面アルベドの表面形状依存性に関する数値実験」への疑問. 地理学評論, **72A**, 381-384.
- Aida, M (1982) Urban albedo as a function of the urban structure -A model experiment. *Boundary Layer Meteorology*, **23**, 405-413.
- Chen, T. S. and Ohring, G. (1984) On the relationship between clear-sky planetary albedo and surface albedos. *Journal of the Atmospheric Science*, **41**, 156-158.
- Gurney, R. J. and Hall, D. K. (1983) Satellite-derived surface energy balance estimates in the Alaskan Sub-Arctic. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, **22**, 115-125.
- Ichinose, T., Shimodozono, K. and Hanaki, K. (1999) Impact of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo. *Atmospheric Environment*, **33**, 3897-3909.
- NASDA (1993) Conversion formula for OPS DN to input radiance, Earth Observation Center, HE-93066.
- Thekaekara, M. P. and Drummond, A. J. (1971) Standard values for the solar constant and its spectral components. *Nature Physical Science*, **229**, 6-9.
- Vukovich, F. M. (1983) An analysis of the ground temperature and reflectivity pattern about St. Louis, Missouri, using HCMM satellite data. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, **22**, 560-571.