

# Google Earth Engine を用いた町丁目別緑被率オープンデータ（全国版）の作成と評価

# DEVELOPMENT AND EVALUATION OF AN OPEN DATASET FOR VEGETATION COVER FRACTION IN EACH TOWN BLOCK ACROSS JAPAN USING GOOGLE EARTH ENGINE

清野友規 — \* 1 藤原邦彦 — \* 2  
鶴見隆太 — \* 3

Tomoki KIYONO — \* 1 Kunihiro FUJIWARA — \* 2  
Ryuta TSURUMI — \* 3

キーワード：  
緑被率, 都市, オープンデータ, Google Earth Engine,  
Sentinel-2 衛星, s2cloudless

Keywords:  
Percent of green space (Fractional Vegetation Cover), Urban, Open  
data, Google Earth Engine, Sentinel-2, s2cloudless

Although the percent of green space is the most frequently used index for quantifying urban green, it is currently unavailable in most cities in Japan. Here we provide an open dataset of the index for each town block across the country based on Sentinel-2 satellite images in Google Earth Engine. The dataset is calibrated and validated with airborne datasets obtained in nine cities in Tokyo. The precision of our dataset is 2.8%pt in RMSE for eight cities out of the nine. One exception shows significant bias, but it is most likely due to differences in the definition of green space.

## 1. はじめに

環境・社会インフラとしての都市緑地の価値は古くから認識されてきた。緑被率は都市計画における基本的な指標の一つであり、市街地の生活環境改善のために一定の目標値を掲げている自治体が複数ある。しかし我が国では一部の大都市以外ではデータは整備されておらず、また公表されている値も横断分析ができるような統一の基準では評価されていない。例として図 1 に東京都区部の緑被率を示す(出典は表 1)。全て直近の公表値であるが観測年は異なっている。各調査報告書には、「観測年だけでなく緑被率の算定手法も自治体間で異なるため単純には比較できない」と注意を促す記述がある。

緑地がもたらす便益について、特に 1990 年代以降は公衆衛生(例えば QOL) や不動産評価に関する研究が増えている<sup>1,2)</sup> が、これらの data-driven な方法によって計画・設計などの意思決定に役立つ知見を得るため、また得られた知見を各地域の実態に応じて活用するためには、地域毎の緑量データが不可欠である。英国や米国ではこうしたデータ整備が既に進んでおり、例えば米国の Walk Score 社は同社が提案する住環境指標 Walk Score<sup>注1)</sup> の中で地域毎の緑量を考慮している。Walk Score は近年日本にも導入され、LIFULL 社が管理する賃貸物件周辺のスコアが公開されている。しかし日本版では公園以外の街路樹などの緑は考慮されていない。例えば文京区の調査報告書(表 1)によると公園は区の緑被面積の 25%程度であり、公園面積を緑被率の代理指標と見做すことは限界がある。

データの全国整備を阻む原因として、各自治体への経済的負担が挙げられる。一般に緑被率の算定には航空機観測が用いられるため、経済的余裕のある自治体のみが実施している状況と考えられる。

衛星観測は航空機のそれに対する有力な代替手段になり得るが、

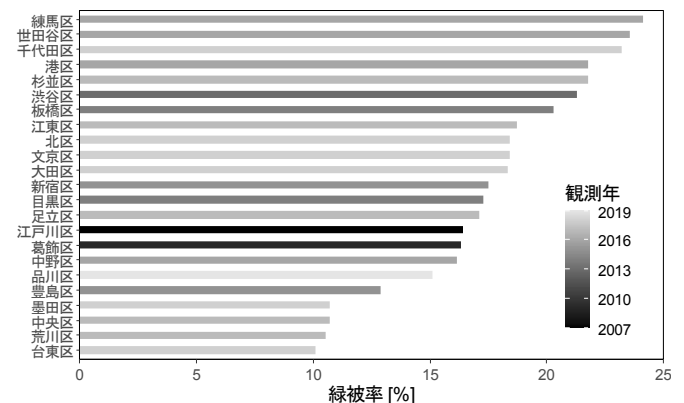


図 1 東京 23 区の公表緑被率。

表 1 校正・検証に用いた緑被率データ(航空機観測値)。

対象	観測日	調査報告書
中央区	2017/6/16	中央区緑の実態調査(第5回)報告書
港区	2016/6/18	港区みどりの実態調査(第9次)報告書
文京区	2018/6/4	第8次文京区緑地実態調査報告書
墨田区	2018/5/22	墨田区緑と生物の現況調査報告書
江東区	2017/6/10	平成29年度江東区緑被率等調査報告書
世田谷区	2016/7/30, 9/1	平成28年度みどりの資源調査報告書
杉並区	2017/6/10	平成29年度杉並区みどりの実態調査報告書
北区	2018/8/1	平成30年度北区緑の実態調査報告書
練馬区	2016/6/18, 7/11	練馬区みどりの実態調査報告書

赤字で示した4区は目視判別や課税台帳から算出した農地(非着葉期の畑やビニールハウスも含む)面積を緑被に加えている。

従来無償利用できた光学画像の空間分解能は Landsat 衛星の 30 m が限界であり<sup>注2)</sup>、建築分野ではこうした低分解能データを建築空間

本稿は 2021 年度日本建築学会大会(東海)・日本ヒートアイランド学会全国大会(2021 年・オンライン)での発表内容に加筆修正を加えたものである。

<sup>1)</sup> 国立環境研究所 博士(工学)  
(〒305-8506 つくば市小野川 16-2)

<sup>2)</sup> 竹中工務店技術研究所 博士(工学)

<sup>3)</sup> 日建設計総合研究所 修士(工学)

<sup>1)</sup> National Institute for Environmental Studies, Dr.Eng.

<sup>2)</sup> Takenaka Research & Development Institute, Dr.Eng.

<sup>3)</sup> Nikken Sekkei Research Institute, M.Eng.

の評価に利用できるようダウンスケーリングする手法が研究されていた<sup>3)</sup>。しかし近年、欧州宇宙機関 ESA から 10 m 分解能を有する Sentinel-2 衛星（以下 S2）の画像が無償提供されるようになり、更に、大規模計算能力と高度な地理空間分析機能を併せ持つクラウドサービス Google Earth Engine<sup>4)</sup> (GEE) が登場し、S2 画像のような大容量データを容易に扱える時代が到来した。そこで本研究では、S2 画像を GEE 上で処理し、日本全国の緑被率を町丁目単位で整備することを試みた。集計単位を町丁目としたのは、これが自治体公開データ（表 1）の最小単位であり、このデータを利用することで様々な地域で S2 データから計算した緑被率（以下、S2 緑被率）の精度・正確度が検証できるためである。

本研究で作成した町丁目別緑被率は WEB で無償公開する。各年の緑被率を算出し、今後も毎年更新していく予定である。データ品質管理・誤差評価を済ませたプロダクトを公開することは、特にリモートセンシングの専門知識を持たないユーザーにとって有益であろうと信じる。これを前提に、本論文では以下の問いに答える。

- ① S2 緑被率の精度はどの程度か？地域間の違い（例えば図 1）を評価する上で十分か？
  - ② 公園だけでなく街路樹を評価できるか？
  - ③ S2 で算出可能な植生指数と緑被率の関係はどの程度強いのか？
- 地表面の状態に関する他の要因（例えば地面の種類の違い）によるバイアスはどの程度の誤差を生じるのか？
- つまり、作成したプロダクトがどのような用途に耐えうるかを評価し、その結果をプロダクトの潜在的ユーザーである読者に提供することが本論文の狙いである。

## 2. データと方法

### 2.1 正規化植生指数 NDVI による緑被抽出

緑葉の反射率 $\rho^{\text{注}3)}$ は赤色 (RED) から近赤外 (NIR) 域の境で顕著に増す (図 2)。この性質を利用した緑葉の量の代理指標である  $\text{NDVI} = (\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{RED}}) / (\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{RED}})$  は広範に用いられる（概ね水面以外では 0-1 の値を取る）。NDVI は緑被率と強い正の相関を持つが、葉の鉛直方向の重なりを表す葉面積指数 LAI と、地面などの葉以外の構成物の反射率も影響する<sup>5)</sup>。なお一般には紅葉・黄葉も強く影響するが、本研究では夏季観測値のみを用いるので影響は限定的である。

### 2.2 NDVI と緑被率の関係式の校正手順

本研究では、表 1 の自治体における緑被率の算定方法と同様に、評価期間中（本研究では年間）の NDVI の代表値が一定の閾値を超えたピクセルを緑被と見做して二値化した（期間代表値の決め方は後述する）。二値化する際の NDVI 閾値の設定では、表 1 の自治体が公開している町丁目単位の航空機ベース緑被率 $y$ に対する S2 緑被率 $\hat{y}$ の平均誤差  $\text{ME} = \sum (\hat{y} - y) / N$  を最小にする閾値を最良と見做した。ただし衛星観測では、このピクセルスケールの最適 NDVI 閾値（以下、単に最適 NDVI 閾値）が地域毎に変わらう。

空間分解能が粗い（1 ピクセル内に緑被・非緑被が混在する）衛星画像を用いて様々な地域を評価する場合、最適な閾値は一つに決まらない。市街地に疎らに存在する緑を検出するには低い閾値が望ましいが、公園などの纏まった緑地の周縁部にある混在ピクセルの寄与を過大評価しないためにはある程度高い閾値が適切となるためである。そこで本研究では、町丁目境界内の平均 NDVI（以下、 $\overline{\text{NDVI}}$ ）

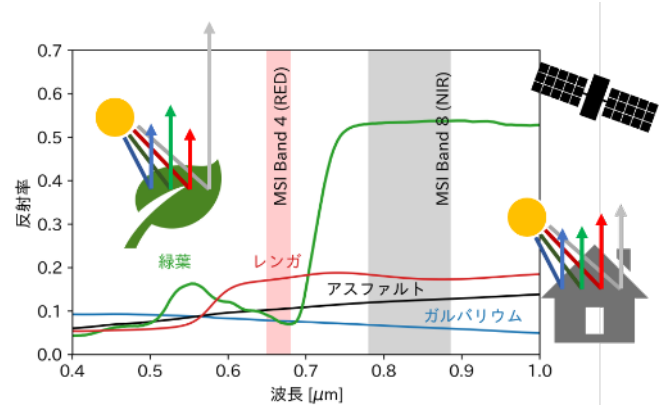


図 2 地表面反射率の例<sup>5)</sup>と S2 搭載 MSI センサの感度波長帯。

を市街化の目安と考え、校正・推定手順を二段階に分けた。校正の段階では、まず 1) 町丁目ごとに既知の $y$ の値から最適 NDVI 閾値を求め、次に 2) 複数の町丁目より得られた最適 NDVI 閾値と $\overline{\text{NDVI}}$ のデータから両者の関係式を決める。推定段階では逆に、まず 1) 対象町丁目の $\overline{\text{NDVI}}$ を計算し、その値から 2) 校正済みの関係式によって対象町丁目における適切な NDVI 閾値を予測し、その閾値を超えるピクセルの割合（つまり S2 緑被率 $\hat{y}$ ）を計算する、という方法を採用した。

### 2.3 校正・検証用の航空機データ

前記の校正、および校正後の緑被率推定値の検証を行うため、自治体が公開する航空機データを収集した。文献調査の結果、都内 9 区から町丁目単位の航空機ベース緑被率 $y$ の値が得られた（表 1）。この 9 区のデータには、日本の最大規模の緑地である皇居から 10 m 以下の小さな街路樹まで含まれており、また緑被率 $y$ の値で 0-0.8 までの広い範囲をカバーしていることから、日本の都市（緑被率 0.8 以下の地域）を評価する上で十分な一般化可能性を持つと考えられる<sup>注4)</sup>。なお、前記の通り原理的には地面の違い（土壌 vs アスファルト等）と LAI の違いもバイアスを生じうるが、本研究では $\overline{\text{NDVI}}$ と最適 NDVI 閾値の関係式を決める段階で暗に地面などの違いが考慮される筈と考え、これらを陽に扱うことは今後の課題とした<sup>注5)</sup>。

GEE 上での空間解析には平成 27 年度国勢調査の町丁目境界データ (<https://www.e-stat.go.jp/gis>) を用いた。なお幾つかの地域で自治体公表値との間に面積の不一致が見られたため、本研究では両者の誤差が 5%以下の町丁目（総地域数  $N = 1276$ ）を解析対象とした。校正には各区から 75%ずつ無作為抽出した町丁目を用い、残り 25%を検証に充てた（hold-out 検証）。

### 2.4 Sentinel-2 衛星データ

S2 シリーズは現在 S2A・S2B の 2 機が運用されており、同一仕様の 2 機によって高い時空間分解能を両立している。打ち上げ時期はそれぞれ 2015・2017 年である。なお、港区など 3 区の航空機データの観測時期は 2016 年だが（表 1）、S2A のみが運用されていた 2016 年の反射率には顕著なノイズが見られたため（結果省略）、これら 3 区での校正・検証には 2017 年の値を用いた。使用する S2 画像の観測時期は、航空機ベース緑被率の観測時期（表 1）との整合性とデータ数のバランスから 5-9 月とした。雲被覆率 < 70% の画像を抽出した結果、年間 10 枚以上得られた。雲検出の詳細は 3.1 節で示す。

衛星による観測輝度には大気中での光の吸収・散乱が影響するため、これを補正し地表面反射率に直す必要がある<sup>注3)</sup>。ESA からは大



表2 大気補正に用いたデータセット

物理量	プロダクト/パラメータ型名
気柱水蒸気量	NCEP/NCAR Reanalysis-1 <sup>(9)</sup>
気柱オゾン量	OMTO3e <sup>(10)</sup>
エアロゾル光学の厚さ	MOD08_M3 Collection 6 <sup>(11)</sup>
エアロゾルタイプ	Continental (6S プリセット)
観測対象地の標高	SRTM Digital Elevation Model <sup>(12)</sup>

気補正済み反射率は 2019 年以降分しか提供されていないため、本研究では大気放射伝達コード 6SV<sup>7,8)</sup> を用いて大気上端反射率 (L1C プロダクト) から地表面の値を推定した (入力データは表 2)。

NDVI は S2 に搭載された MSI センサのバンド 4・8 から計算した (図 2)。各ピクセルについて NDVI の年間最大値または中央値を算出した後、画像合成した。2 種類の合成方法にはそれぞれ長所がある。中央値はセンサの放射校正の誤差や雲検出の不完全さなどによるノイズに対して頑健である。一方、最大値は高層街区の評価に有効と考えられる。地表面の起伏を斜めから観測した際に生じる歪み (倒れ込み) を直下視の状態に直すオルソ補正は、S2 の公開プロダクトである L1C では処理済みであるが、この L1C では地形だけを考慮しており建物は考慮していない。そのため高層建物の陰に緑地が隠れてしまう問題が生じうるが、同一地点でも衛星の軌道によって観測角度は変わるため、最大値画像では高層建物周りの緑地を適切に評価できる可能性がある。このような合成方法の違いは筆者らの知る限り過去に報告されていないため、3.2 節で結果を一部示す。

## 2.5 補助データ

本研究で作成した S2 緑被率と既存のプロダクトを比較し、整合性や長所・短所を確認するため、宇宙航空研究開発機構 JAXA が提供する 2021 年 3 月公開の高解像度土地利用土地被覆図<sup>13)</sup> ver. 21.03 (以下 JAXA 土地被覆図) を用いた。JAXA 土地被覆図は本研究と同様 S2 に基づく 10 m 分解能のプロダクトだが、他のデータも併用しており、(1) 緑被面積だけでなく植物種の違いも判別している、(2) 2016–2018 年の平均値を評価している、(3) 夏季限定ではなく通年のデータを用いている、という違いがある。比較結果は 4.2 節で示す。

## 3. 雲検出・データ品質管理の検討

本論文中の空間分布図は全て北が上で、ピクセルサイズは 10 m である。図 3c、4、6、7b、8 の背景画像には Google Maps を使用した。

### 3.1 雲・雲影の検出

ピクセル毎の雲の検出・除去 (マスク) には ESA/Sentinel Hub の機械学習アルゴリズム s2cloudless (<https://github.com/sentinel-hub/sentinel2-cloud-detector>) の処理結果を用いた。雲影も見かけ上の反射率を低下させる誤差要因であるが、s2cloudless の評価対象外であるため、雲ピクセルから日影方向の一定範囲内で閾値判別を行い除去した (図 3a・表 3)。なお建物屋根などの誤判別によって雲・雲影と判定されたピクセルがパッチ状に出現することがしばしば見られたため、雲・雲影マスク領域にオープニング処理を施して一定面積以下のものはマスクから除外した (晴天と見做した)。また収縮距離よりも膨張距離を大きく取ることで、隣接効果 (後述) などによる誤差が生じやすい雲近傍もバッファ領域としてマスクした。

図 3 に雲・雲影の検出例を示す。全て 2019 年 8 月の東京周辺の結果である。図 3a では雲とその北西側の影がうまく検出できているが、

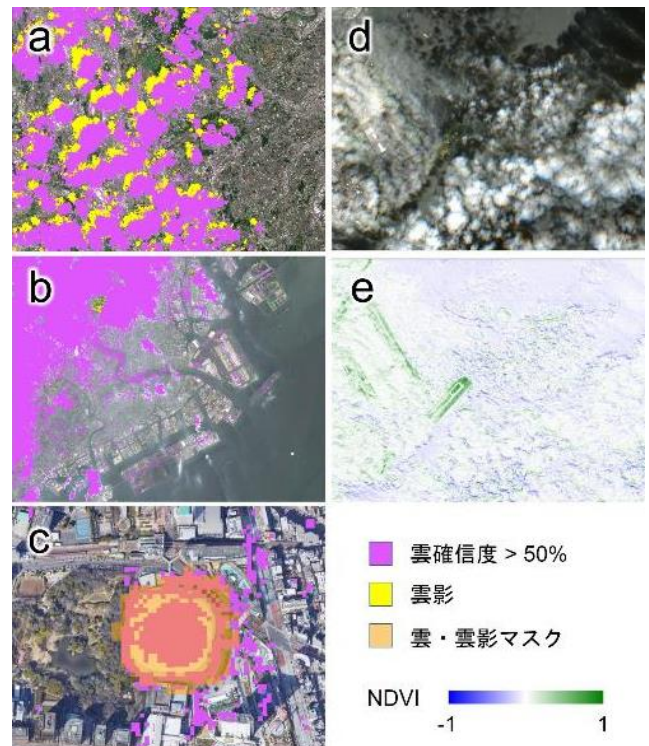


図3 雲の検出結果の例。(a) 適切に検出できたシーン、(b) 巻雲の検出に失敗したシーン、(c) 白色屋根を雲と誤判別したシーン、(d, e) 海上の雲近傍で NDVI > 0 となっていたシーン (RGB・NDVI 画像)。

表3 雲・雲影の検出パラメータ設定

パラメータ	設定値
雲確信度の閾値 (s2cloudless)	> 50%
雲影の検出範囲	雲ピクセルから日影側 < 1 km
雲影の判定基準	$\rho_{NIR} < 0.1$
収縮距離 (オープニング処理)	20 m
膨張距離 (オープニング処理)	50 m

地表面が見えるような薄い巻雲が画像全体に現れている図 3b のシーンでは北西側以外を雲と判定できていない。また都市域では、図 3c の東京ドームのような白色の大屋根を持つ建物 (スタジアム・工場など) の雲との誤判別もしばしば見られた。この誤判別が問題になるのは、バッファ領域によって周辺の緑被 (図 3c ではドーム西側) もマスクされてしまう点である。図 3d、3e は東京湾上 (羽田空港付近) の同一シーンのものであり、雲の縁が NDVI 画像 (図 3e) で緑色 (NDVI > 0) になっている。水面上で NDVI が大きな正の値を取ることは本来ないため、これは陸域植生からの反射光が雲で再反射されセンサに入射したもの (隣接効果) と思われる。

以上より、次のことが言える: 巻雲の検出率を高めるには雲判別の確信度の閾値を下げる必要があるが、これは建物などを雲と誤判別するリスクを高める。またバッファ領域を広く取ることによって隣接効果の影響を回避できるが、建物の誤判別の影響を拡大することになる。

これらのトレードオフを踏まえた試行錯誤の結果、本研究では雲・雲影検出パラメータを表 3 のように設定した。

### 3.2 画像合成方法の検討

図 4a、4b は 2017 年の中央値・最大値画像の比較である。最大値画像 (図 4a) では東京湾・相模湾上に人工的な境界線が見られる。南北軸から約 9°傾いた線は S2 の軌道 (南北極を通る極軌道) に平行

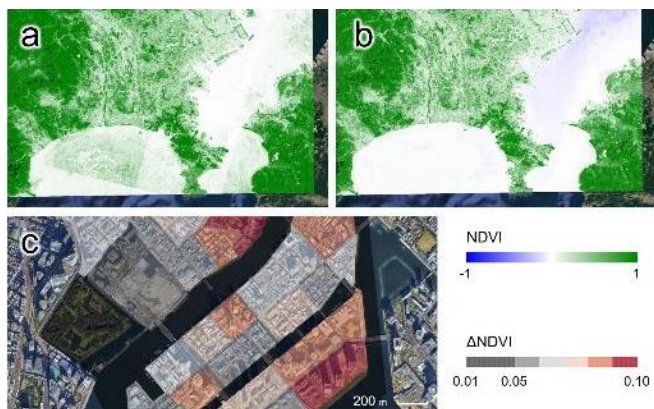


図4 期間代表値の決め方によるNDVIの差。(a) 最大値画像と(b) 中央値画像。(c) 高層街区でのNDVIの差画像。

なものであり、それに直交した線はMSIセンサの瞬時視野範囲に対応する。こうした人工的なノイズ(アーティファクト)はセンサの放射校正の誤差などによって生じるものである。この2017年の中央値画像(図4b)ではアーティファクトは殆ど除去されている。

一方、図4cは中央区南部でのNDVIの町丁目平均値( $\overline{\text{NDVI}}$ )の差画像(最大値画像－中央値画像)であるが、南東部(晴海地区東部)などの高層街区において他の街区より大きな差(最大で $\Delta\text{NDVI} \sim 0.1$ )が見られる。これは2章で説明したオルソ補正の不完全さから生じた誤差の影響と解釈でき、高層街区での最大値画像の有用性を支持する結果と言える。ただし、アーティファクト(図4a)や隣接効果(図3d, e)は広域的に大きな誤差を生じうるため、本研究では中央値に基づく緑被率をメイン推定値として扱い、最大値に基づくものは高層街区用のバックアップと定めた。

#### 4. 緑被率の推定結果

以下に示す結果はいずれも中央値画像に基づくものである。

##### 4.1 校正と検証

表1の9区での各町丁目における緑被率と $\overline{\text{NDVI}}$ の関係、および緑被を判定する最適NDVI閾値の校正結果を図5に示す。なお地域ごとに閾値を校正することの重要性を示すために、全データを対象に単一閾値で校正した結果も併せて示す。まず、期待されたように、緑被率が增大するほど $\overline{\text{NDVI}}$ は増大している(図5a黒円)。両者の値は近いが関係は弱い非線形性を示しており、仮に $\overline{\text{NDVI}}$ を緑被率推定値と見做した場合、緑被率の低い地域で過大評価になり緑被率の高い地域で過小評価になる結果である。次に、単一閾値を用いて校正した緑被率推定値(図5a灰十字)の場合、 $\overline{\text{NDVI}}$ とは逆に推定値は緑被率の低い地域で過小になり緑被率の高い地域で過大になっている(なおこの単一最適閾値は $\text{NDVI} = 0.35$ だった)。図5bは町丁目ごとに校正した際の最適NDVI閾値と $\overline{\text{NDVI}}$ との関係を示している。 $\overline{\text{NDVI}}$ の値が高い地域でばらつきが大きいが、明らかな正の相関がある。この散布図から得られた平均的な関係(図5b赤破線)を用いて緑被率を推定した最終的な推定結果が図5a赤十字であり、単一閾値の場合に比べてバイアスが補正され、自治体データの値に近づいている。

無作為抽出された25%分の検証用データ(全町丁目数が50弱である中央区・文京区では12地域、他は22–68地域)を用いてS2緑被率の正確度・精度を評価した結果を表4に示す。区ごとの値では、

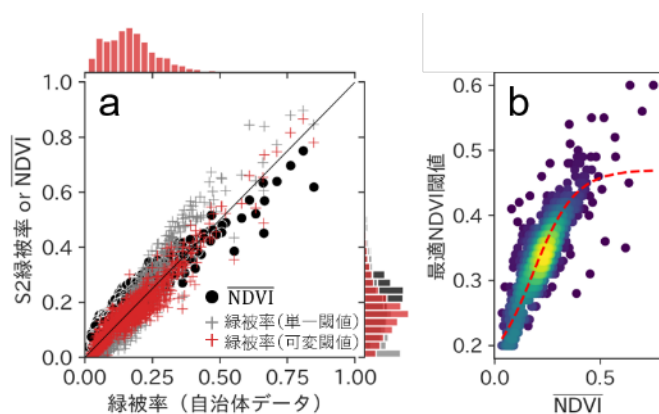


図5 (a) 自治体公開の航空機ベース緑被率に対するS2緑被率およびNDVIの町丁目境界内平均値( $\overline{\text{NDVI}}$ )の関係、(b) 最適NDVI閾値の探索結果。(b)の点群の色はデータ密度、赤破線は局所帰帰(Savitzky-Golay法)を表す。

表4 S2緑被率推定値の検証結果(単位は%pt)。

	中央	港	文京	墨田	江東	世田谷	杉並	北	8区	練馬
ME	-0.2	0.8	1.6	1.0	1.4	-1.0	-2.6	1.8	0.1	-4.8
RMSE	1.9	2.8	2.4	2.9	2.5	2.9	3.3	2.4	2.8	5.7
MAE	1.7	2.1	2.0	2.1	1.9	2.3	2.8	1.9	2.1	4.9

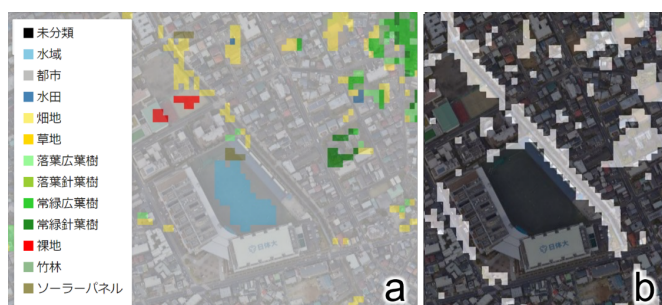


図6 (a) JAXA土地被覆図と(b) 本研究で作成したS2緑被率(白抜きが緑被)の比較。

練馬区での $\text{ME} = -4.8\text{pt}$ という大きなバイアス(過小評価)が目立つ。練馬区を除く8区全体ではバイアスはほぼ無く( $\text{ME} = +0.1\text{pt}$ )、二乗平均平方根誤差RMSEと平均絶対誤差MAEはそれぞれ約3%pt、約2%ptとなった。なお8区の町丁目単位の最大誤差は、(田園地域として知られる)世田谷区北鳥山での $-9.4\text{pt}$ であった。この値は校正結果(図5a)での最大誤差とほぼ一致している。

##### 4.2 JAXA土地被覆図との比較

図6に、校正結果に基づいて評価したS2緑被率(2020年)とJAXA土地被覆図の比較結果を示す。対象は世田谷区(日本体育大学キャンパス周辺)である。緑被と判定された領域は両者で重なっているが、S2緑被率の方が面積は広い。日体大前には高木が密に植わった呑川緑道があり、S2緑被率では適切に評価できているが、JAXA土地被覆図での分布は疎らな上に高木ではなく畑地に分類されてしまっている(日体大の人工芝グラウンドも水域と誤分類されている)。

##### 4.3 空間分解能の確認

図7に世田谷区内(図6の広域版)のNDVIとS2緑被率の空間分布を示す。公園などの纏まった緑地だけでなく、線状に並んだ緑が



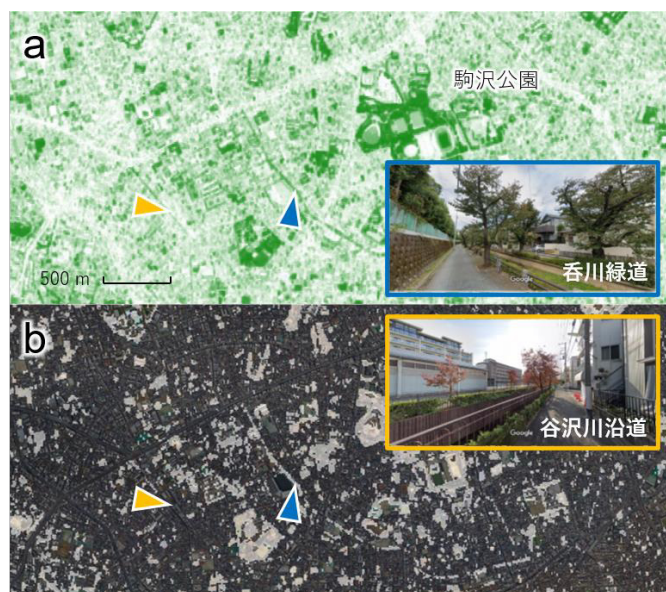


図7 (a) 世田谷区の2020年夏季NDVIと(b)緑被の判定結果(白抜きが緑被), および2地点のGoogle Street View.

判別できる。疎らな高木と植込みからなる谷沢川沿道は、NDVIでは線状の分布が判別できるものの緑被判定はされなかった。呑川緑道は広域的に見ても緑被判定されている。総じて、〇〇並木といった名称が付く主要な街路樹は緑被判定されていた。

GEEの並列計算の恩恵により、全国の場合でも晴天画像の合成・表示に要する時間は東京のみの際の2倍程度だった(〜45秒)。図8に2020年の各地の緑被分布の例を示す。5-9月の画像合成によって概ね欠測なく全国評価できた。図8aの団地では特徴的な45度振られた緑道によって住棟配置が浮き彫りにされている。図8bの大規模緑化建築(アクロス福岡)では、建物北側・半円形のホール・南側入口が非緑被と判定されている。

## 5. 考察と結論

以下、1章で示した問いごとに考察と結論を述べる。

問い①について: 表4より、本研究で開発したS2緑被率プロダクトの推定精度は練馬区を除く8区全体でMAE = 2.1%ptであった。図1を振り返ると、本プロダクトでは、中央区・墨田区などの緑被率が低いグループ、文京区・江東区・北区などの中位グループ、世田谷区・練馬区などの上位グループの3階級程度の区別は出来ると言える。表4の練馬区の結果ではME = -4.8%ptという大きなバイアス誤差が見られた(また、8区の町丁目単位での最大誤差は田園地域である世田谷区北鳥山で確認された)が、これは表1にも示した農地の扱いが原因の可能性が高い。各区の調査報告書によると、練馬区は今回対象とした9区の中で唯一、課税台帳の値から得られた農地面積(非着葉期間の畑などを含めた値)を緑被率に加えている区であり、また23区の中で最も農地面積が大きい区である。更に杉並区・世田谷区・北区も、航空機画像の目視判別によって非着葉期の畑を緑被面積に含めており、表1の調査報告書によると農地面積はそれぞれ1.02%、1.80%、0.02%である。これらの調査報告書の内容は、表4において杉並区・世田谷区のS2緑被率のMEが練馬区に次いで小さく、また北区ではMEが小さくならなかった結果と整合的である。

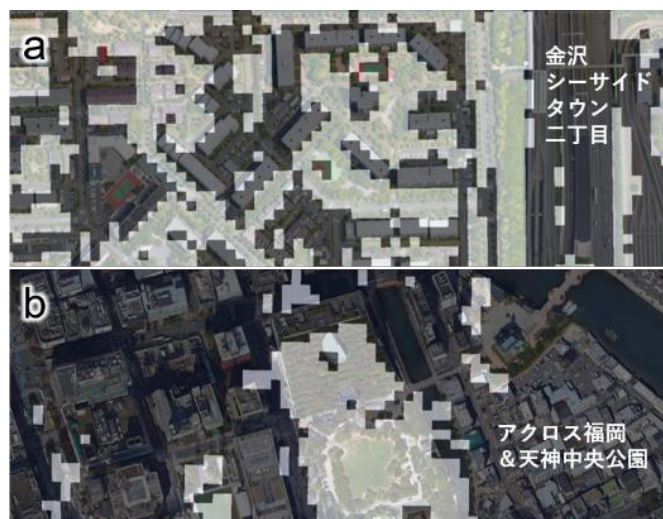


図8 各地の緑被判定結果の例(白抜きが緑被)。

従ってこの結果は、地域間で緑被率の算定基準が統一されていない問題の影響を定量的に示すと共に、本研究のS2緑被率による評価の一貫性の高さを裏付けるものと言える。

問い②について: 主要な街路樹は考慮できていた(図6・7)。また図8より、集合住宅や大規模施設であればS2によって建物配置などがある程度解像できることが分かった。なお、図8bのアクロス福岡の屋上でGoogle Mapsでのホールの位置とS2で非緑被と判定された位置が若干ずれているのは、2.3節で述べたオルソ補正の不完全さによるものと思われる。

問い③について: 図5bの $\overline{NDVI}$ と最適NDVI閾値の関係は、ばらつきが大きかった。この原因の一部は前記の区ごとの緑被率の算定基準の違いである。また、特に $\overline{NDVI}$ の値が大きな地域でばらつきが大きかったことは、公園などの緑地においてピクセル毎のNDVIと緑被率の関係が大きくばらついていたことを意味する。公園などの緑地を構成する植物・地面の種類は多様なため、2章で述べたLAIや地面の反射率の違いが影響していた可能性が高い。表4より8区のRMSEが2.8%ptであり、またRMSE/MAE = 1.33だった(正規分布のRMSE/MAE = 1.25に近い)ことから誤差の正規性を前提に評価すると、町丁目単位の緑被率の推定誤差は大きく見積もって(8区全データの2.5%または97.5%分位点で)約5.6%ptと推定される。

以上まとめると、MAE ~ 2%pt(ただし緑量の多い公園などの場所で最大6%pt)近い誤差を許容できる目的に対しては、本研究で作成した緑被率プロダクトは有用と考えられる。一例を挙げると、オランダ全域を対象に自殺率(QOLの指標)と小地域毎の緑被率の関係を調べたHelbich et al. (2018)は、緑被率を25%以下、25-85%、85%以上の3クラスに分類して多変量解析を行い、緑被率と自殺率の有意な相関を見出している。従って、本研究で作成したS2緑被率は日本国内を対象にした同様の分析を行う上で十分な精度を持っていると言える。なお、提供する緑被率プロダクトの対象領域には都市域以外の農林地や自然植生も含まれるが、本プロダクトは東京都区部の航空機データを用いて校正したものであるため、都市域以外での利用は慎重な判断を要する(MAE ~ 2%pt等の誤差評価結果も対象が都市域であることが前提である)。都市域か否かの判別にはJAXA土地被覆図などの利用が望ましい。

## 6. 今後の展望

### 6.1 プロダクト提供形式

町丁目別緑被率プロダクトは CSV ファイル形式で以下の URL から既に配布している (<https://doi.org/10.5281/zenodo.4836500>)。当画面は最新の 2020 年観測値を対象として、今後 2021 年以降も毎年更新する予定である。社会調査結果などの他のデータと併せた分析を容易にするため、地域名に加えて平成 27 年度国勢調査と共通の 11 桁の地域コードでタグ付けした上で提供している。

なお、緑被率としての定量評価・検証は町丁目単位で行ったため、本研究のコアプロダクトは前記 CSV ファイルであるが、GIS ソフト等で利用するために 10 m 分解能の NDVI 画像 (5-9 月) を使いたいという要望があれば、これもバイプロダクトとして配布を検討する。

### 6.2 研究としての発展

緑被率推定値の不確実性の低減 (LAI や地面の反射率などを陽に考慮すること) や、空間分解能の向上 (10 m ピクセル内の緑被率推定) も実現可能性はあるが、多数の追加データ・アルゴリズムの複雑化を要するため、需要に応じて検討する。オルソ補正の問題については、最近、国土交通省が PLATEAU プロジェクト (<https://www.mlit.go.jp/plateau/>) を展開し、建物高さデータの整備を進めている状況であるため、近い将来に改善できる可能性がある。

衛星観測は広域を長期的に一貫した基準で評価できる。S2 緑被率を社会調査結果などと併せることで、緑地が QOL や不動産価値に及ぼす影響の定量化に貢献できるものと期待する。また S2 の燃料は 10 年持ち、更に ESA は同シリーズ衛星の S2C・S2D の打ち上げを計画しているため、今後 10 年は連続的に緑被率データを提供できるものと考えられる。時系列データが十分に集まれば、横断的分析に留まらず、より直接的に緑地がもたらす便益についての因果効果の推定ができるようになるものと期待できる。

## 謝辞

ESA より S2/MSI データを、ESA・Sinergise 社より s2cloudless を、総務省統計局より町丁目境界データを、また表 1 に記載した各自治体より緑被率公開データをご提供頂いた。ここに謝意を表する。

## 注記

- 1) 米国・カナダを対象とした Walk Score データと API は Walk Score 社のホームページ (<https://www.walkscore.com/professional/walkability-research.php>) から提供されている。
- 2) ESA の SPOT-5/HRG, JAXA の ALOS/AVNIR-2 も 10 m 分解能を持つ光学センサであったが、いずれも既に運用停止している。なおこれらの衛星から得られた過去のデータは無償提供されている。
- 3) 正確には、一回のリモートセンシング観測から得られる反射率は双方向性反射係数 BRDF である。地表面が均等拡散面と近似できる場合、衛星の観測輝度  $L$  は  $L = \tau \rho (E_{dir} + E_{dif}) / \pi + L_p$  と書ける (波長依存性は省略した)。ここで、 $\tau$  は大気透過率、 $\rho$  は地表面反射率、 $E_{dir}$  と  $E_{dif}$  は大気下端での放射照度 (それぞれ直達・散乱日射)、 $L_p$  は気体分子・エアロゾル・雲による吸収・散乱で生じるパスラディアンズである。上式の右辺の内、 $\rho$  以外の値は全て大気放射伝達過程に依存する。
- 4) 緑葉・NDVI を特徴づける赤色光の強い吸収は、葉緑素の (つまり分子スケールの) 分光特性に由来する。また、近赤外光の反射率の高さは、この波長を強く吸収する分子が葉内に存在しないことに由来する。このため NDVI は緑葉の量の指標として、植物種や地域の違いによらず高い一般性を持つ。なお、気候モデル・数値気象モデルのメッシュ内緑被率の算定にも NDVI が使われている。
- 5) LAI は緑被率より推定が難しく、植生放射伝達モデルを用いて LAI と緑

被率を同時推定する必要がある。しかし 3 次元放射伝達計算に必要な樹木形状や建物の高さ情報、建物外装材の分光反射率データは整備されていない。地面の反射率の空間分布を精緻化することは LAI に比べれば容易と考えられるが、これも検証が必要である (LAI や地面の設定値の不確実性が大きい場合、本研究で採用した単純な方法よりも精度が悪化する)。

## 著者貢献 (Contributor Roles Taxonomy)

- T.K.: Conceptualization, Methodology, Software, Validation, Formal analysis, Resources, Data curation, Writing - Original Draft, Visualization, Supervision  
K.F.: Conceptualization, Software, Validation, Formal analysis, Investigation, Resources, Data curation, Writing - Review & Editing  
R.T.: Conceptualization, Validation, Investigation, Resources, Data curation, Writing - Review & Editing

## 参考文献

- 1) Helbich, de Beurs, Kwan, O'Connor, Groenewegen: Natural environments and suicide mortality in the Netherlands: a cross-sectional, ecological study. *The Lancet Planetary Health*, 2(3), e134-e139, 2018, DOI:10.1016/S2542-5196(18)30033-0
- 2) Donovan, Butry: Trees in the city: Valuing street trees in Portland, Oregon. *Landscape and Urban Planning*, 94(2), pp. 77-83, 2010, DOI: 10.1016/j.landurbplan.2009.07.019
- 3) Komatsu, Hoyano, Matsunaga: Detailed urban vegetative cover map with estimation of vegetation location in mixel. *Journal of Architecture and Planning (Transactions of AIJ)*, 66(543), 77-83, 2001 (in Japanese). 小松, 梅干野, 松永: ミクセルの画素内緑被配置推定による都市緑被分布図の精細化, 日本建築学会計画系論文集, 66 巻 543 号, pp. 77-83, 2001.
- 4) Gorelick, Hancher, Dixon, Ilyushchenko, Thau, Moore: Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, pp. 18-27, 2017, DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.031
- 5) Kokaly, Clark, Swayze, Livo, Hoefen, Pearson, Wise, Benz, Lowers, Driscoll, Klein: USGS Spectral Library Version 7: U.S. Geological Survey Data Series 1035, 61 p., 2017, DOI: 10.3133/ds1035
- 6) Carlson, Ripley: On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index, *Remote Sensing of Environment*, 62(3), pp. 241-252, 1997, DOI: 10.1016/S0034-4257(97)00104-1
- 7) Kotchenova, Vermote, Matarrese, Klemm: Validation of a vector version of the 6S radiative transfer code for atmospheric correction of satellite data. Part I: Path radiance, *Applied Optics*, 45(26), pp. 6762-6774, 2006, DOI: 10.1364/AO.45.006762
- 8) Wilson: Py6S: A Python interface to the 6S radiative transfer model, *Computers and Geosciences*, 51, pp. 166-171, 2013, DOI: 10.1016/j.cageo.2012.08.002
- 9) Kalnay, Kanamitsu, Kistler, Collins, Deaven, Gandin, Iredell, Saha, White, Woollen, Zhu, Chelliah, Ebisuzaki, Higgins, Janowiak, Mo, Ropelewski, Wang, Leetmaa, Reynolds, Jenne, Joseph: The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77(3), pp. 437-471, 1996, DOI: 10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2
- 10) Pawan: OMI/Aura TOMS-Like Ozone and Radiative Cloud Fraction L3 1 day 0.25 degree x 0.25 degree V3, NASA Goddard Space Flight Center, USA, 2012, DOI: 10.5067/Aura/OMI/DATA3002
- 11) Platnick: MODIS Atmosphere L3 Monthly Product. NASA MODIS Adaptive Processing System, Goddard Space Flight Center, USA, 2015, DOI: 10.5067/MODIS/MOD08\_M3.006
- 12) Jarvis, Reuter, Nelson, Guevara: Hole-filled SRTM for the globe Version 4, 2008. (ダウンロード: <http://srtm.csi.cgiar.org/>, 確認: 2021/6/2)
- 13) 橋本, 田殿, 小野里, 堀: 多時期光学観測データを用いた高精度土地被覆分類手法の開発, 日本リモートセンシング学会誌, 34 巻 2 号, pp. 102-112, 2014, DOI: 10.1144/rssj.34.102. (ダウンロード: [https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/lulc/lulc\\_jindex\\_v2103.htm](https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/lulc/lulc_jindex_v2103.htm), 確認: 2021/4/12)

[2021 年 6 月 2 日原稿受理 2021 年 9 月 10 日採用決定]