

令和元年6月15日現在

機関番号：34406

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K21096

研究課題名(和文) 衛星夜間光データを用いた土木構造物ストック量の推計

研究課題名(英文) Estimation of Civil Engineering Structure Stock Using Lighttime Light Data

研究代表者

杉本 賢二 (Sugimoto, Kenji)

大阪工業大学・工学部・講師

研究者番号：70596858

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題は、衛星夜間光を用いて構造物ストック量の推計モデルを開発することを目的とする。東京都市圏の1都4県(茨城県、千葉県、埼玉県、東京都、神奈川県)を対象に、Suomi NPPによる夜間光輝度と、建築物ストック量との相関性評価を行うとともに、回帰分析により推計モデルを構築した。その結果、線形モデルを適用することで精度良く推計できるが、建物面積が大きい高層ビル地域では過小評価となり、湾岸部のコンビナート地域では工場操業による光源に起因して過大推計となることが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

人口増加と経済成長の著しい発展途上国では都市域が進展しているが、統計データの収集網や機関、統計精度に課題がある。既往の物質動態分析では統計データに基づく推計が行われていたが、先進国を対象とした分析が多かった。統計データの整備状況に依存せず、人為的バイアスが含まれない人工衛星による観測データを用いた構造物ストック量の推計は、世界を対象とした資源管理や物質循環等の環境動態分析において有用な情報となる。

研究成果の概要(英文)：This study aimed to develop an estimation model of a structure stock using nighttime light data. For Tokyo Metropolitan Area (Ibaraki, Chiba, Saitama, Tokyo and Kanagawa) estimation model was constructed using a regression analysis and evaluated the correlation between nighttime luminance and the construction stock. As a result, it was found that the estimation model using a liner regression can achieve an accurate estimation. However, the areas among groups of skyscrapers were underestimated, and it was shown that in regions around Tokyo Bay Area with large numbers of industrial complexes, the light sources were overestimated owing to the operation of the factories.

研究分野：土木環境システム，物質循環システム，リモートセンシング

キーワード：衛星夜間光 土木構造物 物質ストック 物質動態分析

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

今日の社会経済は、自然から大量の資源を採取し、それを様々な形に加工し、そこから得られる社会サービスを活用することにより発展してきた。環境省によれば、2015 年度における日本の物質フローは、16.1 億トンの総物質投入量の 31% にあたる 5.0 億トンが、構造物や耐久消費財などの蓄積純増となっている。総物質投入量に占める蓄積純増の割合は 2002 年までは 50% を超えており、その後は減少傾向にあるものの、これまでに大量の物質が国土に蓄積している。しかし、構造物が耐用年数を迎え取り壊される際に、建設時に投入されたコンクリートや木材といった資材が廃棄物として排出される。今後の循環型社会の構築に向けて、循環利用率や資源生産性の向上が必要であるが、それには人間の経済活動に伴い投入・蓄積・廃棄される物質の挙動を定量評価することが重要であり、それには物質ストック・フロー分析(Material Stock Flow Analysis; MSFA)が有効である。MSFA により、物質循環の各段階において生じる環境負荷を推計でき、持続可能な資源利用に有用となる情報となる。

MSFA に関する既往研究では、国や世界を対象とした分析が数多く行われている。しかし、これらの推計は統計資料に基づく推計であるため、その結果は国や自治体単位の大きなスケールとなり、地区や都市域といった空間的な広がりを持つ特定の区域における物質動態を把握することは困難である。さらに、MSFA には耐用年数の推計やパラメータの同定には時系列データが必要であるため、分析可能な地域は統計が整備されている先進国に限られる。そのため、今後人口増加と経済成長に伴う都市拡大により著しい物質動態が見込まれる発展途上国は、統計収集網が十分に整備されておらず、統計の精度自体にも課題があるため MSFA の研究事例は少ない。あるいは、経年での GIS データを構築することで空間詳細な MSFA を行った研究もあるが、分析可能な地域は GIS データの整備状況に依存しており、これも同様に発展途上国で適用可能であるとは言い難い。したがって、発展途上国を含めた世界全体での MSFA には、空間詳細かつ普遍的で、均質な時系列データを用いた推計手法が求められている。

ところで、1970 年代以降に人工衛星の打ち上げが相次ぎ、その後の観測とデータ蓄積により全球を対象とした高解像度で時系列のデータが利用可能となっている。人工衛星による観測データは地表面の物理状態を直接観測しているため、データの収集や集計過程において人為的なバイアスが混入しないという均質性がある。これにより、対象国の統計整備状況に依存しない普遍的なデータが得られる利点もある。このような衛星観測データを用いた構造物ストック量との相関性評価の既往研究は多数あるが、構造物密度の強弱の推定にとどまっており面積やストック量を推計するに至っていない。

### 2. 研究の目的

本研究では衛星夜間光データを用いて構造物ストックの推計モデルを開発することを目的とする。人工衛星による夜間光データとして、Suomi NPP により観測された夜間における地表面の輝度を用い、構造物として物質ストック量に占める割合が大きい建築物を対象とする。対象地域である東京都市圏の 1 都 4 県(茨城県、千葉県、埼玉県、東京都、神奈川県)において夜間光輝度と建物面積との相関性評価を行うとともに、回帰分析により推計モデルの構築を行う。

### 3. 研究の方法

本研究で構築する推計モデルの算出フローについて図-1 に示す。分析に用いるデータは、建築物データと衛星夜間光データの 2 種類である。これらのデータを用いて 500m メッシュ内における延床面積と夜間光輝度を算出する。続いて、対象地域から 400 メッシュをサンプルとして抽出し、建築物データによる延床面積を目的関数、衛星夜間光データの輝度を説明変数として推計

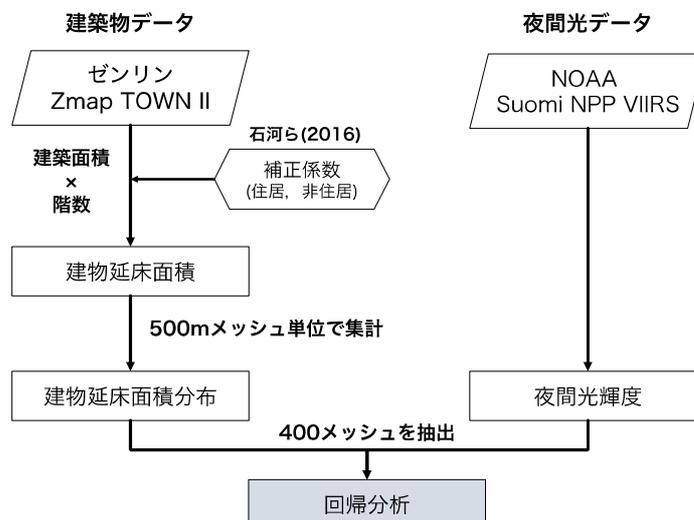


図-1 構造物ストック量の推計モデル算出フロー

モデルを推定する。

#### (1) 延床面積データ

建築物データとして、ゼンリンによる住宅地図データベース「Zmap TOWN II」の2016年版(以下、Zmap とする)を用いる。各建築物の延床面積は、Zmap の建物ポリゴン形状から算出した平面の面積である建築面積に、属性情報として付与されている階数を乗じることにより算出する。ただし、Zmap では2階以下の建物は階数の調査対象となっていないため、属性情報で階数はゼロとなっている。そのため、2階以下の建物は2階として計算した。また、この手法では建物内の吹き抜けや、斜線制限による上層階で床面積が小さくなることを考慮できず、建築基準法上の延床面積よりも課題に計算されることが指摘されている。そのため、石河ら(2016)により推計された都道府県別・建物用途別の補正係数を用いた。係数は住宅(戸建)、住宅(集合)、非住宅に区分されており、Zmap の建物用途に対応する値を適用した。以上により算出された各建物の延床面積を、衛星夜間光データの空間解像度である15秒(約500m)単位で集計した。

#### (2) 衛星夜間光データ

衛星夜間光データとして、地球観測衛星 Suomi NPP に搭載された可視赤外放射計群 VIIRS(Visible Infrared Imager and Radiometer Suite)により観測された、夜間における地表面の輝度(以下、VIIRS とする)を用いた。以前は衛星夜間光として DMSP/OLS が利用されることが多かったが、空間解像度が1kmであり都市域で値が飽和することが課題であった。また、同データは衛星の運用期間が終了した2013年以降は更新されていないため、最近のデータが利用できない状況にあった。それに対し、VIIRS は解像度が約500mと高くなり、工場や漁船などの非定常光を含むものの、都市域でも飽和しないデータである。同データは NOAA の HP より入手した。

### 4. 研究成果

#### (1) 推計モデルの構築

図-2 で示した対象地域のメッシュ(約9万メッシュ)から、400メッシュをランダムで抽出し、建物延床面積を目的変数、夜間光輝度を説明変数とする推計式を構築する。回帰式は、説明変数及び非説明変数を線形あるいは対数変換し、それぞれの変数を線形・対数回帰の場合分けを考慮し、以下の4種類を検討する。

$$TFA = \alpha NL + \beta \quad (1)$$

$$\ln(TFA) = \alpha NL + \beta \quad (2)$$

$$TFA = \alpha \ln(NL) + \beta \quad (3)$$

$$\ln(TFA) = \alpha \ln(NL) + \beta \quad (4)$$

ここで、TFA：建物延床面積[1,000m<sup>2</sup>]、NL：夜間光輝度[10-9W/cm<sup>2</sup>/sr]、 $\alpha$ 、 $\beta$ ：係数、をそれぞれ表す。

表-1 に、式(1)から式(4)の回帰結果を示す。まず、いずれの回帰式においても係数、切片ともに0.1%有意水準で有意であり、さらに、t値は夜間高輝度に係る係数の方がより大きい値であることから、夜間光輝度を用いた建物延床面積の推計が有効であることが示された。また、夜間光輝度に係る係数は正であることから、輝度が大きくなるにつれて延床面積が広がる関係性がある。次に、決定係数についてみると、線形回帰の式(1)が0.592と最も高くなり、その一方で延床面積のみを対数変換した式(2)が0.247と最も低い値となった。夜間光輝度を対数にした式

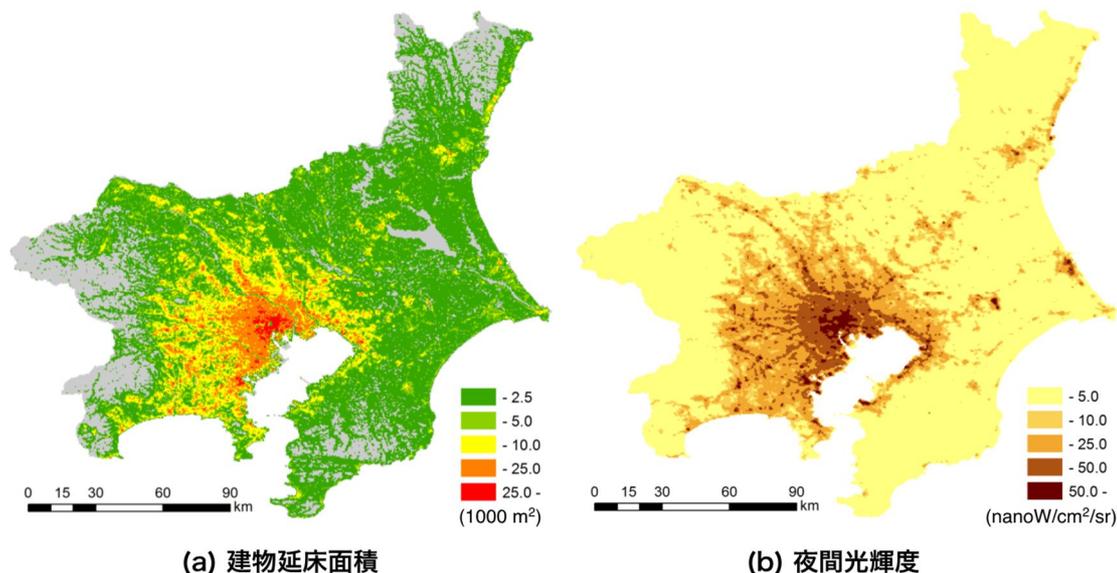


図-2 建物延床面積及び夜間高輝度の空間分布

(3)と比較しても式(2)は低い決定係数となっており、輝度が指数的に増加するにつれて延床面積が増えないことが、当てはまりが良くない結果に起因していると考えられる。

表-1 式(1)から式(4)の回帰結果

式			R <sup>2</sup>
式(1)	3.024 (24.08)	3.156 (6.45)	0.592
式(2)	0.273 (11.49)	0.622 (6.72)	0.247
式(3)	7.287 (19.45)	9.994 (21.48)	0.486
式(4)	0.895 (15.59)	1.245 (17.60)	0.378

注1) カッコ内の数値は t 値を表す。

注2) いずれの変数も 0.1%有意水準で有意である。

## (2) 推計結果と実際の値との比較

前節で推定した回帰式を用いた推計結果と、実際の延床面積との比較を行った。表-2 に各推計式により算出した RMSE(平均平方二乗誤差)を示す。式(2)のみ極端に大きな値となっている。これは回帰式が夜間光輝度の指数関数となっており、輝度の変化により推計される延床面積が過大になってしまうからである。本研究で対象とした地域では、都市圏であるため輝度が大きな都心部から小さい郊外部まで含まれているが、回帰式はサンプル抽出したメッシュを用いている。そのため、全地域に当てはまりの良い回帰式が推定されてはいるが、超高層ビルのメッシュでも延床面積が指数的に大きくなるためであると考えられる。

表-2 回帰式(1)～(4)の RMSE

[単位：1000m<sup>2</sup>]

式	RMSE
式(1)	29.81
式(2)	7.79E+52
式(3)	44.35
式(4)	33.04

式(2)以外の推計式の RMSE を比較することにより、線形回帰した式(1)が RMSE として算出した最も誤差が小さい。そこで、図-3 に式(1)を適用した場合の推計値と実測値との誤差について、空間分布として示す。これまで明らかにしたように、式(1)は当てはまり精度が良いことから、誤差率が小さいメッシュ(凡例が淡い色)が多く分布している。具体的には、東京 23 区西部や八王子、さいたま市、神奈川県南部といった、都心部よりやや離れたメッシュが精度良く推計できていることが明らかとなった。しかし、皇居周辺の、超高層ビル群付近にあるメッシュでは過小推計となっていることから、輝度の低いメッシュで推定された線形のモデルでは延床面積が大きくなる場所には適切でない可能性が考えられる。一方で、千葉県から神奈川県にかけての東京湾地域では過大に推計されている。これらの過大推計となるメッシュが概ね湾岸部にあることから、前述のようにコンビナートの工場操業による光源が誤差要因であると考えられる。

## (3) 推計誤差に関する検討

本研究における推計には、以下のようなデータが起因する誤差要因が考えられる。まず、夜間光輝度は光の特性から、周辺に存在する光源の影響を受けることである。例えば、図-3 で示した皇居周辺のメッシュのように、近隣に高層ビル群がある場合、そのメッシュの輝度は周りの光が影響している。空間解像度を 500m として推計モデルの構築を行ったが、光の特性を考慮するためには低い解像度でも検証する必要がある。次に、夜間光輝度には建築物以外の光源も含まれていることである。都心部のネオンなど商業活動が発する光や、幹線道路の街灯なども夜間光となり、必ずしも建築物のみから発せられた光だけではない。他地域への拡張により推計手法の汎用

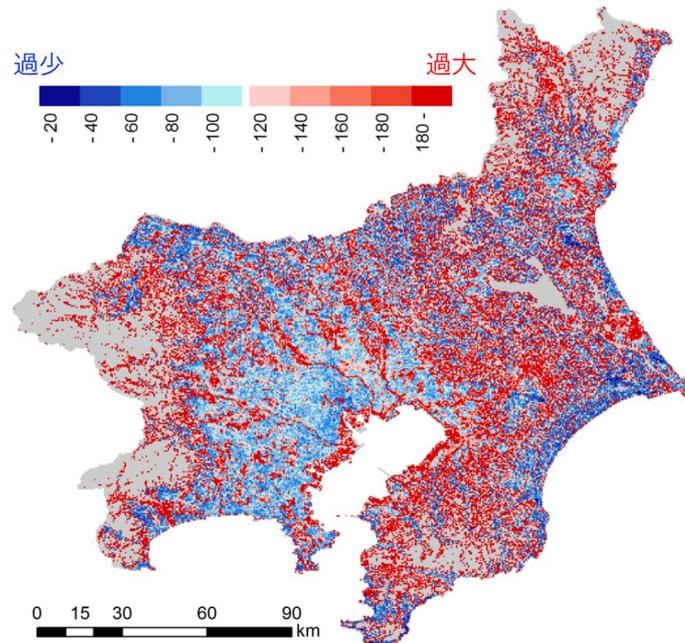


図-3 推計モデルによる誤差の空間分布

性を検証するだけでなく、他の構造物についても適用することが必要である。

#### (4) 今後の課題

今後の課題として以下が挙げられる。まず、本研究では先駆的な検証として東京都市圏を対象としたが、建築物データ及び夜間光輝度データは他地域でも利用可能であり、空間特性を含めたさらなる検証が必要である。次に、誤差要因となった高層建物の密集地域や工場地域を区分した分析が求められる。最後に、本研究においては建物延床面積の推計モデルの構築を目的としていたが、例えば建物延床面積あたり建設資材投入量を用いることで、建築物ストック量を推計することが可能となる。以上により、途上国を含めた全世界における MSFA を空間分布として詳細に把握することができる、資源利用の基盤データとなりうる。

#### [文献]

石河正寛, 松橋啓介, 有賀敏典 (2016) 建物ポイントデータの床面積補正を通じた民生部門エネルギー消費量の推計, 土木学会論文集 G(環境), Vol.72, No.6, pp.II\_87-II\_94.

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計2件)

杉本賢二, 奥岡桂次郎, 秋山祐樹, 谷川寛樹 (2017) 熊本地震による失った建築物ストックの推計. 土木学会論文集 G(環境), Vol.73, No.6, pp.II\_293-II\_300. [査読有]

杉本賢二, 奥岡桂次郎, 谷川寛樹 (2017) 都市部における浸水解析のための三次元地下鉄 GIS データの構築. 土木学会論文集 G(環境), Vol.73, No.5, pp.I\_283-I\_289. [査読有]

[学会発表](計16件)

杉本賢二, 奥岡桂次郎, 谷川寛樹 (2018) 地下構造物の空間配置特性に関する分析. CSIS DAYS 2018.

杉本賢二, 奥岡桂次郎, 谷川寛樹 (2018) 衛星夜間光を用いた建築物・道路ストック量の推計. 環境科学会 2018 年会.

杉本賢二, 奥岡桂次郎, 谷川寛樹 (2017) 経年道路 GIS データを用いた道路拡充とストック効果の時空間分析. 第 56 回土木計画学研究発表会(秋大会).

杉本賢二, 奥岡桂次郎, 谷川寛樹 (2017) Suomi NPP VIIRS による夜間光を用いた建物延床面積の推計. 環境科学会 2017 年会.

Sugimoto, K., S. Kuroda, K. Okuoka and H. Tanikawa (2016) Material stock estimation using nighttime lights data. The International Society for Industrial Ecology (ISIE) joint 12th Socio-

Economic Metabolism Section Conference and 5th Asia-Pacific Conference.