夜間光衛星画像とGISを用いた建築用鋼材蓄積量の推計

田口 現貴¹⁾・許 峰旗¹⁾・谷川 寛樹²⁾・松野 泰也^{1)*}

Estimation of Steel Use in Buildings by Night Time Light Image and GIS

Genki TAGUCHI, Feng-Chi HSU, Hiroki TANIKAWA and Yasunari MATSUNO

Synopsis : Steel is the most widely used material among all metals. As the concern about effective use of the in-use steel stock as secondary resource grows, numerous studies analyzing the flow and stock of steel have been conducted. Though top-down and bottom-up approaches have been employed in material flow analysis, the applicability of these approaches is largely restricted by the data availability. To overcome this problem, we have proposed a method for estimating in-use steel stock based on satellite images. Our previous studies had shown effective regression of steel stock in buildings and nighttime lights on country and sub-national level. However, the relationship has not been examined in micro level, i.e. building stocks and pixels. Therefore, in this study, geographic information system (GIS) was used to estimate the in-use steel stock for buildings in Tokyo, Japan. The volume of buildings in 145 areas with 1 km square in Tokyo was calculated with GIS. Then, the correlation was investigated between the building volume, in-use building steel stock and the radiance of nighttime light. As the result, building volume and in-use building steel stock were found to be highly correlated with the radiance of nighttime light.

Key words : geological information system; material flow analysis; night time light; steel stock.

1. 背景

資源保全と環境保護の観点から、社会中の製品に蓄積された素材を二次資源として有効利用することが重要視されている。そのために、社会中の各種素材のフローとストックを解析するマテリアルフロー分析 (Material Flow Analysis, MFA) の手法が開発され、研究が行われてきている。特に2000年以降、マテリアルフロー分析によって世界各域の素材のフローとストックが明らかにされてきた¹⁻³⁾。

各種素材の中で鋼材は最も使用量の大きい金属素材であり、MFAの事例研究が多く行われている。Kozawa and Tsukihashiは1950年から2005年までの55年間で、世界の鋼材生産量はおよそ8倍まで成長し、年間8億tに達したことを示した⁴⁾。さらに、既存のMFA研究により、社会での鋼材の蓄積の中で、土木・建築用途の鋼材蓄積量が最も大きいことが定量的に示されてきた。Daigoらは、日本の建築物や社会基盤などに蓄積された鋼材が、2000年にはその総量は約9億tに達していたことを示した⁵⁾。また、Hiratoらはトップダウン手法とボトムアップ手法の両方を用いて社会中に存在する鋼材蓄積量を推計し、2005年には日本の社会中に蓄積された鋼材の約50%が建築物として存在している可能性を示唆した⁶⁾。さらに、Hatayamaらは世界42ヶ

国において動的物質フロー分析を行うことで、世界大での鋼材蓄積量は2005年時点で約13億tにのぼり、その60%は建築・土木分野に存在することを示した⁷⁾。

また、建築における素材蓄積量の推計に関しては、様々な汎用地理情報システム (Geographic Information System, GIS) を組み合わせることにより、詳細な分析が行われてきている。Tanikawa and Hashimotoは、建築物や鉄道・道路だけでなく、建築物の基礎や下水道などの地下に存在する構造物も考慮する事で、地上部と地下部を分けて物質フロー分析を行っている⁸⁾。しかしながら、これら建築鋼材蓄積量の推計に関する研究は、市町村単位での床面積別の構造分布データなどの入手が必要であり、データ利用可能性が大きな制約となる。

そこで、Hsuらは、夜間光衛星画像と都市分布及び人間活動強度の関心に注目し、夜間光と建築鋼材蓄積量との相関を解析し、日本国内、アジア諸国および世界各域での建築鋼材蓄積量とその分布を推計した⁹⁾。衛星画像は世界全体をカバーしており、さらに行政境界に制限されることなくデータの分布を把握することができる特長を有している。

一方、近年では、Google EarthTMなどの汎用GISが急速に発展、普及し、日本の各域、および世界の大都市等に関して、建築物の所在地、高さ、外形の詳細なデータが得られ

平成23年11月30日受付 平成24年4月6日受理 (Received on Nov. 30, 2011; Accepted on Apr. 6, 2012)

1) 東京大学工学系研究科マテリアル工学専攻 (Department of Materials Engineering, Graduate School of Engineering, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo Bunkyo-ku Tokyo)

2) 名古屋大学大学院環境学研究科 (Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University)

* Corresponding author : E-mail : matsuno@material.u-tokyo.ac.jp

DOI : <http://dx.doi.org/10.2355/tetsutohagane.98.450>

るようになってきている。これらGIS情報を活用することで、日本および世界各域での建築ストックを推計することが可能であると考えられる。

そこで本研究では、GISを用い、日本の東京都内における建築物の高さ、容積を推計するとともに、各域における建築形式組成から建築鋼材蓄積量を推計することを目的とする。さらには、GIS情報は、現在、発展中であり、全球をカバーしたものは限られている。そこで、GISを用いて推計した結果と、夜間光衛星画像を用いて推計したHsuらの研究結果と比較することで、夜間光衛星画像を用いて建築鋼材蓄積量を推計する場合の誤差の要因に関して考察を行った。

2. 研究手法

2・1 GIS情報を用いた建築物容積の定量手法

本論文では、Google社の配布するGISソフトウェアであ

Fig. 1. Schematic diagram of height search algorithm.

るGoogle Earth™を用いる。Google Earth™では、地球全球の衛星画像を閲覧する事が可能であり、日本においては高い精度で建築物の3次元モデルが整備されている。また、緯度と経度を指定することで、その位置にある建築物の高さを取得する事が出来る。本研究では、この機能を利用する事で、東京都に存在する建築物の容積を定量した。

まずは、米国海洋大気庁(National Oceanic and Atmospheric Administration:NOAA)が作成した夜間光衛星画像(radiance calibrated night time light image¹⁰⁾)の位置と一致するように1km²の分析地域を選択した(2・2で後述する)。

次に、選択した1km²の分析地域を5m×5mの正方形によって40,000個のメッシュに分割する。そして、それぞれの正方形の中心点に対して、建築物が存在していた場合には建築物の高さを取得した上で、そのメッシュは建築物で満たされているとみなし、建築物が中心点に存在していなかった場合にはそのメッシュには建築物が存在しないものとみなした。それぞれのメッシュの中心点は緯度と経度によって指定し、緯度と経度の指定を5mずつ増減させることによって全メッシュに対して同様の操作を行った。操作の概要はFig.1に示す。

しかしながら、Fig.2に示すように、衛星画像の上に再現された建築物の3次元モデルでは、建築物を斜めから捉えてしまい、建築物の側面部分の高さを取得してしまう事がある。この問題を回避するために、本研究ではFig.3に示すようなアルゴリズムを採用した。このアルゴリズムでは、緯度と経度を指定した際に、その地点から東西南北方向に2mだけ離れた4地点の緯度と経度も指定し、それら5地点の建築物の高さの最大値を求め、その最大値が最初に指定した中心地点の値であればその値を、他の4地点の値で

Fig. 3. Flowchart of roof height estimation algorithm.

Fig. 2. Diagonal view of buildings happening at 3D model images.

Fig. 4. Roof height estimation algorithm in 3D model image.

あった場合にはその地点を真ん中の地点として再び同じ操作を行う。これによって、緯度と経度により建築物の側面部分を指定してしまった際にもFig.4に示すように、建築物の屋上部分の高さを取得出来るようになっている。

2・2 対象とする地域の選定

本研究では、鋼材蓄積量と統計データの利用可能性の観点から、東京都を分析の対象地域とした。既存研究によって、東京都は最も鋼材蓄積量が多い都道府県であることが確認されている¹¹⁾。また、東京都は建築統計年報が整備されており、毎年の着工統計のデータを用いることによって、建築物の形式組成を推計することが出来る。

なお、今回の研究では、NOAAが作成した夜間光衛星画像と一致するように東京都を1km×1kmのメッシュで分割し、その中から145メッシュを抽出して分析した。メッシュの抽出に際しては、鋼材蓄積量が最も多いと予想される高

輝度の23メッシュを全て抽出した後に、夜間光の輝度の分布に従ってランダムに122メッシュを抽出し、合計145メッシュとした。抽出した145メッシュの位置をFig.5に示す。

2・3 都内における建築物の形式組成の推計

東京都内の2008年時点の建築物の形式組成の推計については、東京都が毎年刊行している東京都建築統計年報の37年間分(1972年～2008年)のデータを用いた。建築物の形式は木造(Wood)、鉄骨造(S)、鉄筋コンクリート造(RC)、鉄骨鉄筋コンクリート造(SRC)、コンクリートブロック造(CB)、その他(Other)の6分類とした。

東京都建築統計年報には、着工建築物の階数ごとに形式組成別の着工棟数が記載されている。また、Komatsuら¹²⁾の研究によって、建築物は形式組成によって異なる寿命分布を持つことが分かっている。よって、本研究では、小松らの示した寿命分布を各形式組成に適用し、毎年の着工量

Fig. 5. Locations of all 145 sample meshes (1 km square) in Tokyo.

Table 1. Lifetime distribution and parameters for each building structure.

Building Structure	Usage	Lifetime Distribution	Parameter					Average Life-span
			m	σ	μ	η	δ	
Wood	Resident	lognormal ^a		0.633	3.655			38.7
	Nonresident	lognormal ^a		0.633	3.655			38.7
S	Resident	Weibull ^b	6.747			64.372	-28.441	32.5
	Nonresident	Weibull ^b	3.127			40.444	-7.329	28.6
RC	Resident	normal ^c	40.683	12.168				40.7
	Nonresident	lognormal ^a		0.39	3.549			34.8
SRC	Resident	Weibull ^b	14.06			154.9	-112.4	38.5
	Nonresident	Weibull ^b	14.06			154.9	-112.4	38.5
CB	Resident	Weibull ^b	3.091			61.19	-3.74	50.6
	Nonresident	lognormal ^a		0.39	3.549			34.8
Other	Resident	Weibull ^b	3.091			61.19	-3.74	50.6
	Nonresident	lognormal ^a		0.39	3.549			34.8

$$a: 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t \frac{1}{x} \exp \left\{ -\frac{(\ln x - \mu)^2}{\sigma^2} \right\} dx \quad b: \exp \left\{ -\left(\frac{t - \delta}{\eta} \right)^m \right\} \quad c: 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t \exp \left\{ -\frac{(x - m)^2}{\sigma^2} \right\} dx$$

に寿命分布を掛け合わせることで、2008年における階数別の建築物の形式組成を推計した (Table 1)。

2・4 建築物の階数の推計

Google Earth™では、建築物の高さを取得することは出来るが、建築物の階数は取得することが出来ない。したがって、Google Earth™を用いて調べた建築物の階数を推計するには、建築物の1階当たりの平均高さを求める必要がある。

そこで、本研究では、東京都建築統計年報から得た2008年時点の建築物の階数分布と、Google Earth™を用いて調べた建築物の高度分布を比較することで、建築物の1階当たりの平均高さを3.0mとした。

2・5 鋼材蓄積量の推計

分析地域である各メッシュの鋼材蓄積量は、建築物の延床面積と鋼材使用原単位を用いて推計した。

まず、研究手法2・1より、5m×5mのメッシュの中心点に建築物が存在すれば、そのメッシュは建築物に満たされているとみなすので、1階当たりの床面積は25m²となる。次に、2・4より、取得した建築物の高さから階数を求める。したがって、各メッシュにおいて、1階当たりの床面積と

Table 2. Steel intensity of each building structure.

Building Structure	Steel Intensity [t/m ²]
Wood	0.01184
SRC	0.15387
RC	0.10585
S	0.12367
CB	0.0472
Others	0.0352

階数を掛け合わせることで、その建築物の延床面積を得ることが出来る。最後に、2・3により得た階数別の建築物の形式組成を用いて、延床面積と形式組成別の鋼材使用原単位を掛け合わせることで鋼材蓄積量を推計した。使用した鋼材原単位に関しては、1978年～2008年の30年間で10回行った鋼材原単位調査の平均を用いた¹³⁾ (Table 2)。

以上をまとめると、各メッシュを i 、メッシュに存在する建築物の階数を F_i 、階数ごとの鋼材原単位を SI_{Fi} として、式(1)のように 1km^2 内の鋼材蓄積量を推計することになる。

$$\text{Steel Stock} = \sum_i 25 \times F_i \times SI_{Fi} \quad (1)$$

3. 結果

3・1 都内における建築物の形式組成の推計結果

1972年から2008年までの37年間分の東京都建築統計年報を用いて推計した東京都内における階数別の建築物の形式組成をFig.6に示した。

Fig.6に示されるように、5階建て以下の低層建築物においては鋼材使用量の小さい木造が大きなシェアを持つのにに対し、6階建て以上の建築物においては鋼材使用量の大きいRCやSRCが大きなシェアを持つことが分かる。しかし、建築物の形式組成ごとに最適な寿命分布は適用できたものの、着工年に関わらず同じ寿命分布を用いたために、形式組成は誤差を含むことに留意する必要がある。

また、階数別の建築物の形式組成に対して、形式組成別

Fig. 6. Building structure distribution of each floor number in 2008.

Table 3. Average steel intensity of each floor number.

Floor Number	Average Steel Intensity [t/m^2]
1	0.059
2	0.031
3 to 5	0.089
6 to 9	0.124
10 to 15	0.148
over 16	0.129

の鋼材使用原単位を掛け合わせて得られる階数別の建築物の鋼材使用原単位をTable 3に示した。

Table 3に示されるように、鋼材使用量は建築物の階数によって大きく異なり、階数の増加に対して単純比例して増加するわけではないことが分かる。

3・2 対象とした地域における建築物容量および鋼材蓄積量

本研究で分析した東京都内の145メッシュにおける建築物容量と夜間光輝度の関係をFig.7に、鋼材蓄積量と夜間光輝度との関係をFig.8に示す。夜間光輝度はDN (Digital Number) として記録され、実際の輝度とは式(2)、式(3)に示すような関係となっている¹¹⁾。ここで R_{sat} は、夜間光を記録するセンサーの特定感度における観測可能な最大輝度を示す¹⁰⁾。

$$\text{Radiance} = \frac{\text{DN}}{63} \times R_{\text{sat}} \quad (2)$$

$$R_{\text{sat}} = 9.88 \times 10^{-9} (\text{w} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}) \quad (3)$$

夜間光輝度と建築物容量については、夜間光輝度の増加

Fig. 7. Linear regression of correlation between buildings volume and night time light.

Fig. 8. Power regression of correlation between buildings steel stock and night time light.

にともなって建築物容量も増加する関係が示されている。線形モデルのパラメータを、最小二乗法を用いて推計することで、Fig.7に示す回帰式について水準5%で有意な相関が確認された。一方、夜間光輝度と建築鋼材蓄積量については、対数線形モデルを、最小二乗法を用いてパラメータを推計することで、Fig.8に示す回帰式について水準1%で有意な相関が確認された。これは、低輝度地域に多く存在する低層木造建築の影響と、高輝度地域に多く存在するSRCやRCなどの高層建築の影響であると思われる。低層木造建築は、建築物の延床面積も鋼材使用原単位も小さいために、低輝度地域の鋼材蓄積量は小さくなる。一方、SRCやRCで建てられた高層ビルは、建築物の延床面積も鋼材使用原単位も大きいために、高輝度地域の鋼材蓄積量は累乗的に大きくなる。この2つの効果によって、低輝度地域においてばらつきが収縮し、建築物容量と比較して R^2 値が大きく向上する結果となっている。

Fig.7, Fig.8の両方で、回帰式から大きく外れるようなサンプルが存在する原因としては、夜間光衛星画像に起因する誤差が考えられる。NOAAの夜間光衛星画像は2006年のものであるのに対して、本研究が利用したGoogle Earth™の3Dモデルは2008年のものであるため、タイムラグに起因する誤差が生じていると考えられる。また、NOAAの夜間光衛星画像では光源位置のズレが生じる可能性があることも確認されている¹⁴⁾。この光源のズレによって、繁華街の夜間光を近くの大きな公園の夜間光として観測してしまった場合には、高輝度にも関わらず建築鋼

材蓄積量が少ないといった誤差が生じうる。

3・3 夜間光画像から推計した鋼材蓄積量

NOAAの夜間光衛星画像を用いて推計した東京都内の夜間光輝度の分布 (Fig.9) と、Fig.8に示されるモデル式を用いて東京都の建築鋼材蓄積量を推計した。本研究の結果と、トップダウン手法を用いて東京都の建築鋼材蓄積量を推計したKakiuchiら¹¹⁾の結果をTable 4に示す。

なお、Kakiuchiら¹¹⁾は、東京都の建築鋼材蓄積量を推計する際に、全ての建築物に対して平均寿命28.85年を用いており、また2006年時点の東京都の建築鋼材蓄積量を推計している。一方、本研究では、建築構造ごとに異なった平均寿命を設定しており、2008年時点の東京都の建築鋼材蓄積量を推計している。鋼材が主に含まれる建築構造であるSRC、RC、Sの寿命の単純平均を算出すると35.6年となる。そこで、Kakiuchiらの推計において建築物の平均寿命を35.6年として2008年時点までの蓄積量を概算した。Table 4より、トップダウン手法を用いた推計結果に対して、本研究の推計結果は大きくなった。

推計結果に含まれる誤差としては、建築物容量を推計するアルゴリズムと研究手法2・4で設定した建築物1階当たりの平均高さの2つが考えられる。本研究ではGISを用いて建築物容量を推計する際に、建築物の側面部分の高さを取得するのを避けるため、Fig.3に示すようなアルゴリズムを用いた。このアルゴリズムにより、建築物の形状が直方体でない場合は建築物容量を過大評価してしまう。次に、本研究では建築物1階当たりの平均高さとして3.0mとい

Fig. 9. Histogram of night time light in Tokyo.

Table 4. Comparison of the results for in-use steel stock of buildings in Tokyo (10^6 t).

This work	91
Estimation by top-down approach (update of Kakiuchi et al.)	59

う値を用いているが、この値は建築鋼材蓄積量に対する感度が高い。本研究では東京都建築統計年報に従い「1階建て」「2階建て」「3～5階建て」「6～9階建て」「10～15階建て」「16階建て」の6分類で建築物を階数ごとに区分したが、このうち「2階建て」の建築物と「3～5階建て」の建築物が東京都内の建築物の90%以上を占める。Table 3に示したように、建築物の階数ごとに平均的な鋼材原単位は大きく異なっており、「2階建て」の建築物と「3～5階建て」の建築物とでは鋼材原単位におよそ3倍の差異がある。従って、建築物1階当たりの平均高さを変化させると、「2階建て」に区分される建築物の数と「3～5階建て」に区分される建築物の数が増減し、結果として建築鋼材蓄積量も大きく変化する。以上より、本研究の推計結果には、建築物容量の推計アルゴリズムと建築物1階当たりの平均高さの2つに起因する誤差が含まれると考えられる。

4. 結論

本研究では、汎用GIS (Google Earth™) を用い、日本の東京都内における建築物の高さ、容積を推計するとともに、各域における建築形式組成から建築鋼材蓄積量を推計することを試みた。さらに、推計した鋼材蓄積量と夜間光衛星画像の分析を通じて、夜間光輝度のデータから建築鋼材蓄積量を推計する際の誤差要因についても検討した。

まず、Google Earth™を用いた建築物の高さ、容積の推計に関しては、2008年時点の3次元モデルの情報しか主に利用できないものの、対象地域(メッシュ)における建築物の位置と高さを推計するアルゴリズムを開発した。今後、汎用GISが発展することで利用可能な情報の量と質が向上すれば、世界大のマクロな分析と世界各地のミクロな分析の両方を行うことが出来るようになる。

次に、本研究で得られた夜間光輝度と建築鋼材蓄積量の有意な相関は、夜間光輝度が低い場所には低層木造住宅が多く、夜間光輝度が高い場所にはSRCやRCの高層商業ビルが多いという事実を反映した結果となっている。さら

に、回帰式を用いて推計した東京都の鋼材蓄積量からは、夜間光衛星画像を用いて建築鋼材蓄積量を推計する有効性を示した。

今回の研究では東京都を対象としたが、地域毎の建築形式組成を考慮して、回帰式に修正を加えれば、夜間光衛星画像から世界各域の建築鋼材蓄積量を推計することが可能となる。したがって、本手法は、南アフリカや中東などの統計データの入手が容易ではない地域においても、建築鋼材蓄積量や各種資源蓄積量を推計出来る可能性を持つ。

本研究は科研費(22360384)の助成を受けたものである。

文 献

- 1) T.E.Graedel, D.B.Beers, M.Bertram, K.Fuse, R.B.Gordon, A.Gritsinin, A.Kapur, R.J.Klee, R.J.Lifset, L.Memon, H.Rechberger, S.Spatari and D.Vexler: *Environ. Sci. Technol.*, **38**(2004), 1252.
- 2) T.Wang, D.B.Müller and T.E.Graedel: *Environ. Sci. Technol.*, **41**(2007), 5129.
- 3) S.Spatari, M.Bertram, R.B.Gordon, K.Henderson and T.E.Graedel: *Ecol. Econ.*, **54**(2005), 51.
- 4) S.Kozawa and F.Tsukihashi: *Tetsu-to-Hagane*, **95**(2009), A719.
- 5) I.Daigo, Y.Igarashi, Y.Matsuno and Y.Adachi: *ISIJ Int.*, **47**(2007), 1069.
- 6) T.Hirato, I.Daigo, Y.Matsuno and Y.Adachi: *Tetsu-to-Hagane*, **95**(2009), 96.
- 7) H.Hatayama, I.Daigo, Y.Matsuno and Y.Adachi: *Environ. Sci. Technol.*, **44**(2010), 6463.
- 8) H.Tanikawa and S.Hashimoto: *Building Research and Information*, **37**(2009), 502.
- 9) F.Hsu, I.Daigo, Y.Matsuno and Y.Adachi: *ISIJ Int.*, **51**(2011), 319.
- 10) D.Ziskin, K.Baugh, F.C.Hsu, C.Elvidge and T.Ghosh: Proc. 30th Asian Pacific Advance Network, Hanoi, (2010), 142.
- 11) E.Kakiuchi, H.Hatakeyama, I.Daigo, Y.Matsuno and Y.Adachi: *Tetsu-to-Hagane*, **95**(2009), 902.
- 12) Y.Komatsu, Y.Kato, T.Yoshida and T.Yashiro: *Journal of Archit. Environ. Engng.*, **439**(1992), 101-110.
- 13) 建設労働・資材月報, 建設労働・資材対策研究会編, 大成出版社, 東京, (1978-2008) .
- 14) C.D.Elvidge, J.Safran, I.L.Nelson, B.T.Tuttle, V.R.Hobson, K.E.Baugh, J.B.Dietz and E.H.Erwin: Remote Sensing and GIS Accuracy Assessment, ed. by R.S.Lunetta, J.G.Lyon, CRC Press, Boca Raton, (2004), 292.