

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年5月28日現在

機関番号： 12601  
 研究種目： 基盤研究 (B)  
 研究期間： 2010 ~ 2012  
 課題番号： 22360384  
 研究課題名 (和文) 衛星画像および地理情報を用いた世界鋼材ストック量・需要量の解析

研究課題名 (英文) Estimation of in-use stock and demand of steel in global scale using nighttime lights and geological information

研究代表者

松野 泰也 (MATSUNO YASUNARI)

東京大学・大学院工学系研究科・准教授

研究者番号： 50358032

研究成果の概要 (和文)：本研究では、マテリアルフロー分析 (MFA) におけるデータ利用可能性による制約を克服するために、夜間光衛星画像および地理情報を用いて、世界の中でも最も消費量の大きい土木・建築用鋼材のストック量を推計する手法を開発し、今までに統計データが得られず鋼材ストック量が推計できなかった国のストック量を推計した。また、動的 MFA 手法を用い、将来の鋼材ストック量と需要量を推計した。

研究成果の概要 (英文)：Data availability has been recognized as major obstacles to conduct material flow analysis (MFA). To overcome this issue, we have developed a method to use nighttime light satellite data and geological information for estimating in-use steel stock for building and civil engineering in the world which have the largest share in consumption. Then we estimated the in-use steel stock in countries whose statistical data were not available. In addition, we have investigated the in-use stock and demand of steel in the future by dynamic MFA.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	5,400,000	1,620,000	7,020,000
2011年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
2012年度	2,600,000	780,000	3,380,000
総計	11,500,000	3,450,000	14,950,000

研究分野： 工学

科研費の分科・細目： 総合工学、リサイクル工学

キーワード： 再資源化、マテリアルストック勘定、衛星画像解析

### 1. 研究開始当初の背景

2008年における世界での粗鋼生産量は13億トンを超え、鋼材ストック量は約300億トンと推計されている。今後、地球温暖化の抑制と天然資源保全のためには、社会中の製品に蓄積された素材を二次資源として有効活用する必要がある。そのためには、世界大での素材のフローと用途別ストック量の把握が必要となり、2000年頃よりマテリアルフロー解析 (Material Flow Analysis, MFA) による世界各域の素材のフローとストックの

解析が盛んに行われてきている (Graedel ら, Environ. Sci. Technol. 2004)。

素材の中で最も消費量の大きいのは鋼材であり、その中でも建築および土木での消費量が大きい。また、これらの製品は寿命が長い故に、社会中でのストック量が最も大きくなっており、我が国では鋼材全ストック量の7割程を占めている (Daigo ら, ISIJ International, 2007)。さらには、使用済み製品から排出される鋼材スクラップの大半は、電炉にて再資源化され建築および土木用途

に使用されるので、建築および土木は、リサイクル材の受皿になってきた。しかしながら先進国では都市の成熟化により鋼材需要が飽和しつつあることも解析されている(柿内ら、鉄と鋼、2009)。従って、今後の循環型社会形成を検討するにあたり、世界大での建築および土木分野での鋼材ストック量および需要量、そしてフローの把握が必須である。素材のストックの推計方法には、大別してトップダウン手法とボトムアップ手法がある。前者は、統計データ等から素材の最終用途別消費量を求め、製品の寿命分布より動的にストック量を求める手法であり、後者は、対象とする地域における製品保有台数と製品別素材使用原単位から、素材ストック量を求める方法である(平戸ら、ISIJ International, 2009)。しかしながら、両手法ともデータ利用可能性に依存しており、適用できる地域は一部の先進国に限られている。それゆえ世界大での推計では単年でのフローを概数で把握するに留まっているのが現状である。そこで、既存のMFA研究におけるデータ利用可能性の制約を克服する新たな手法を開発する必要性が生じていた。

統計データに対して、人工衛星が観測する画像等のデータは、同一の手法において全球を網羅する特長を有している。現在、日本および世界において、人工衛星による全球的な土地被覆状態や夜間光が計測され、そのデータが公開され利用できる状況になっている。

全球的な土地被覆状態の衛星による計測では、米国の国立海洋気象研究所(NOAA)のAVHRR センサや、衛星TERRAに搭載された日本のASTER センサによる可視域から熱赤外域のバンドデータが観測され、公開され利用できるようになっている。その画像は、ほぼ全球をカバーしており、世界各地での都市部、森林部など土地被覆の状態の経年変化を解析することが可能である。

夜間光衛星データに関しては、NOAAが1992年より全球をカバーしたデータを収録している。衛星から送信されたデータから雲や森林火災などの一時光を削除した夜間光の経年画像が作成され、公開に向けて準備が進められている。(現在、既に公開されている。)夜間光輝度は、人間活動に密接に関係し、地域別電力消費量や経済活動(GDP)と相関があることが示されている(Elvidgeら, Sensors, 2007)。また研究代表者である松野らは、夜間衛星画像から得られる各国の光量と導電性材料である銅のストックとの間に強い相関があることを示した(高橋ら, Materials Transactions, 2009)。上記の衛星画像データ以外では、航空写真(Google Earthなど)や、地域毎のメッシュ人口密度などの様々なGISデータが公開されている。

本研究では、全世界をカバーするこれらの

衛星画像や地理情報を活用することで、世界における鋼材ストック量の推計を行うことを提案した。さらには、近年の新興国における鋼材消費の急激な増大を鑑み、将来(2050年まで)における世界各国の鋼材需要を、動的MFAにより求めることに取り組んだ。具体的な目的は以下に記す。

## 2. 研究の目的

### (1) 衛星画像や地理情報を用いた鋼材ストック量の推計

本研究では、全世界をカバーする衛星画像の中でも人間活動や素材蓄積量と相関の高い夜間光衛星画像および地理情報(Geographic Information System, GIS)を用いることにより、金属の中で最も消費量の多い鋼材ストックを世界大で推計することを目的とする。特に、社会中での滞留時間の長い、土木・建築用鋼材に焦点を当てる。

### (2) 将来の鋼材需要量の推計

将来の人口およびGDPの増大、都市化度の進展に伴う鋼材ストック量と需要量を動的MFAにより推計する。

## 3. 研究の方法

### (1) 衛星画像や地理情報を用いた鋼材ストック量の推計

#### ① トップダウン手法による世界鋼材ストック量の推計

まずは、鋼材の用途別消費量が得られる42カ国を対象に、トップダウン手法を用い鋼材のフローとストック量の詳細な解析を行う。これにて、2005年時点における世界の鋼材消費量の85%をカバーすることになる。

#### ② 夜間光衛星画像および地理情報を用いた鋼材蓄積量の推計

NOAAとの共同研究により夜間光衛星画像を入手し鋼材のストック量推計のために加工した。NOAAでは、1992年より安定光(Stable Light)の衛星画像を蓄積している。これらの画像は、センサーの感度を高く設定されているので、都心部などでは光が飽和してしまい、光の強度が識別できない。(図1)

そこで、低感度および中感度のセンサーが撮った画像を合成することで、広範囲の輝度が表現可能となる輝度調整済み(Radiance calibrated)夜間光衛星画像を作成した。(図2)

得られた夜間光衛星画像には、ガスフレアによる夜間光も含まれる。ガスフレアの輝度は都市部の夜間光よりも輝度が大きい、鋼材蓄積量との相関は低いと考えられる。図3に例を示す。そこで、世界各地のガスフレアの位置情報を入手し、ガスフレアを削除した夜間光衛星画像を作成した。

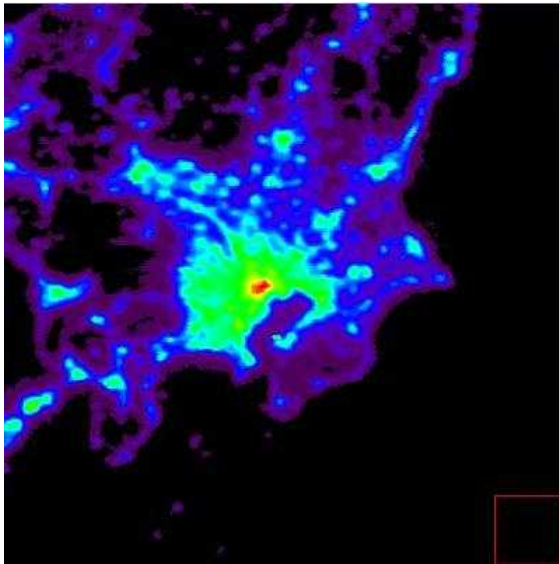


図1 東京近辺の安定光の衛星画像

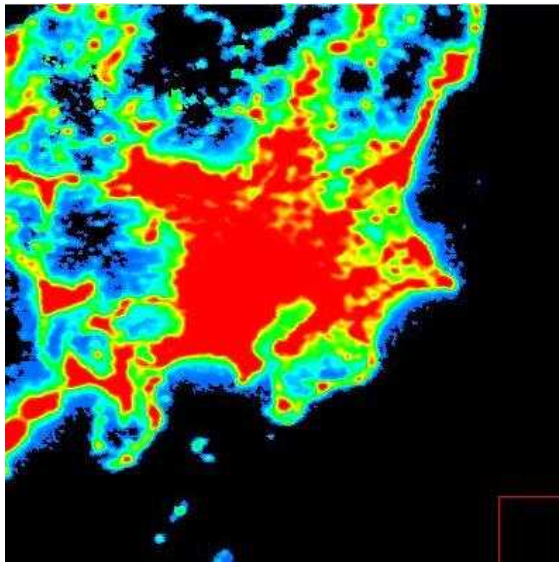


図2 輝度調整済み夜間光衛星画像

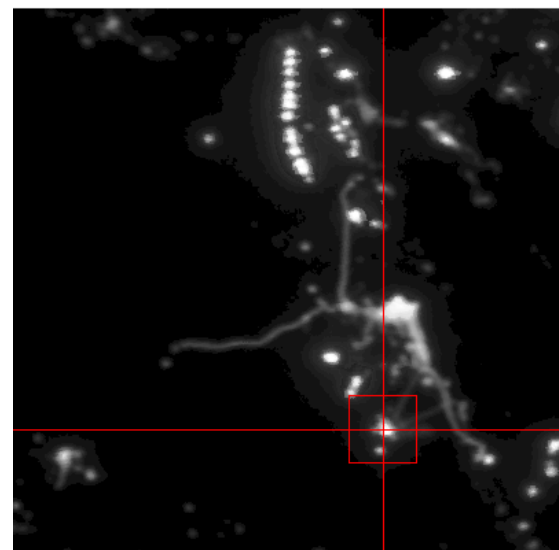


図3 クウェートにおけるガスフレアの画像

さらには、主として都市に所在する建築物（鋼材）との相関を検討するために、ISCGMが公開している土地被覆データを用い都市部における夜間光を抽出した。（図4）

そして、①で求めた用途別鋼材ストック量の推計結果を用い、世界各地の夜間光の強度と、鋼材ストック量との相関を解析した。得られた相関式を用いることで、今までは統計データが得られなかった61カ国の鋼材ストック量を推計した。

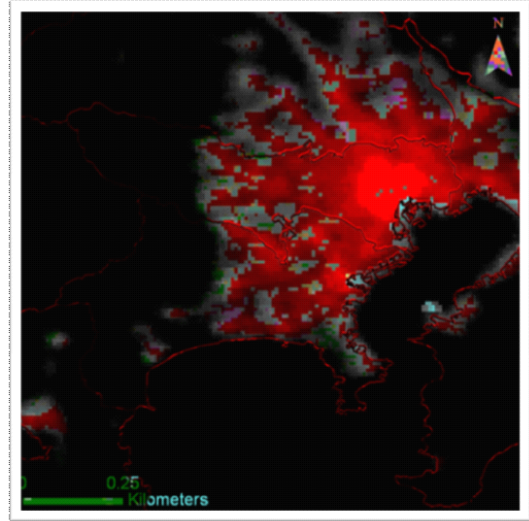


図4 東京の都市域における夜間光衛星画像

なお、本研究では、汎用GISであるGoogle Earthを用い、日本および世界の主要都市の建築物の3D画像データより、建物の高さと容量、さらには延床面積を推計し、用いられている建築用鋼材ストックの推計も行った。そこでは、図5に示すように、対象とする地域を5mメッシュに分け、3D画像データから各メッシュの中心の地上高を割り出し、所在する建築物の容量を推計した。さらには、平均的な床の高さを3mと仮定し延床面積を推計した。そして、東京都における階層毎の平均的な建築物組成をもとめ、各建築組成の鋼材使用平均原単位( $\text{ton}/\text{m}^2$ )から各域における建築物鋼材ストック量を推計した。

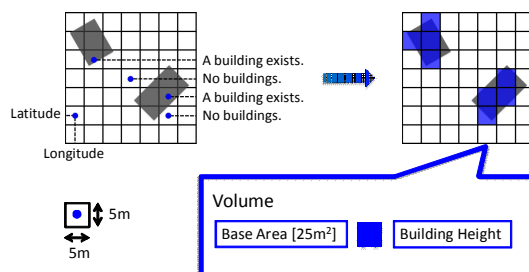


図5 汎用GISの3D画像データから建築物の高さと容量の推計方法

(2) 将来の鋼材需要量の推計

将来の世界の地域毎の人口と GDP の増大を鑑みた、建築および土木での鋼材ストック量を推計する。これまでの研究により、一人当たりの鋼材のストック量は、各国の GDP/Cap. の増大に伴い増大するがある程度の値で頭打ちになり、ロジスティック曲線にて推計することができることが分かっている。そして、各年の鋼材ストック量の変化分に社会に排出される鋼材量を加えたものが鋼材需要量を表すので、需要量についても推計を行った。

#### 4. 研究成果

##### (1) 衛星画像や地理情報を用いた鋼材ストック量の推計

##### ① トップダウン手法による世界鋼材ストック量の推計

トップダウン手法を用いた 1980-2005 年までの世界地域別鋼材蓄積量の推計結果を、図 6 に示す。

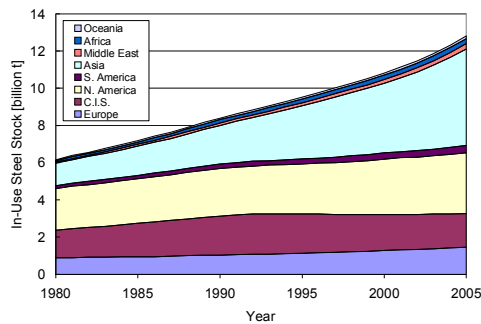


図 6 1980-2005 年までの地域別鋼材蓄積量

2005 年における世界の鋼材蓄積量は 127 億トンを超え、1980 年の蓄積量の 2 倍以上となった。特に、近年のアジア諸国における鋼材蓄積量の増大が目立つ。

##### ② 夜間光衛星画像および地理情報を用いた鋼材蓄積量の推計

図 7 に世界各域における各種一人当たりの夜間光量と一人当たりの土木・建築物鋼材ストックとの相関を示す。

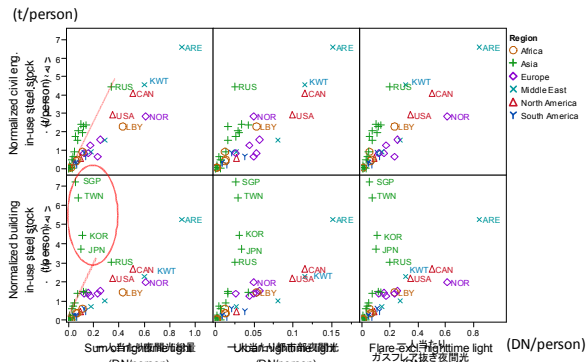


図 7 世界各域における各種一人当たりの夜間光量と一人当たりの土木・建築物鋼材ストックとの相関

図 7 から分かるように、地域毎に鋼材のストック量と最も相関の高い夜間光は異なる。土木鋼材ストックは、主に夜間光総量との相関が高いが、アジア地域（ロシアはアジアに分類している）ではガスフレア抜き夜間光との相関が最も高かった。また、建築用鋼材ストック量は、中東などを除いて都市部夜間光との相関が高かった。中東では、土地被覆に関するデータが都市域を正確に把握できていないなどの理由により相関が低かったものと推測される。また、同じ夜間光輝度で比較した場合、アジア地域での土木・建築鋼材ストック量は他の地域よりも相対的に大きいことが把握できた。

以上得られた相関式を用い、夜間光から統計データの得られない 61 カ国に関して土木・建築鋼材ストック量を推計した結果を図 8 に示す。

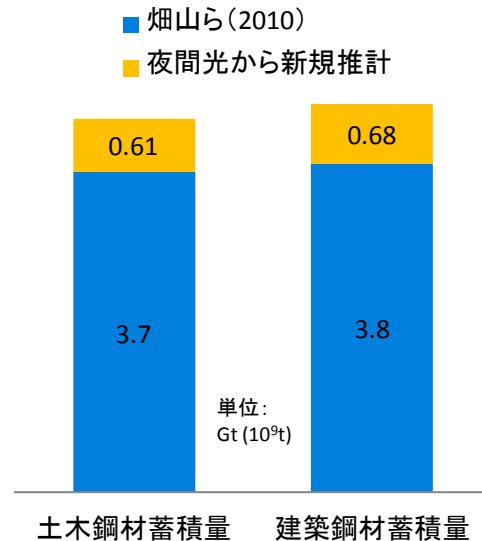


図 8 世界の土木・建築鋼材ストック量

トップダウン手法により求めた土木・建築鋼材ストック量 7.5 Gt (図 8 の畑山ら (2010) に相当) に対して、今回夜間光から推計したストック量は合計 1.3 Gt になり総計の 15% を占めることになった。さらに、推計した土木・建築鋼材ストックの分布を世界地図上に示したものが図 9 である。

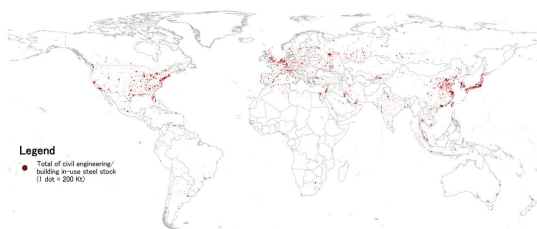


図 9 世界の土木・建築鋼材蓄積量分布

このように夜間光衛星画像から鋼材ストックを推計する手法では、各域におけるストック量の分布も把握できることに大きな特長を有している。

さらに汎用 GIS である Google Earth を用い推計した東京都および世界主要都市各域の建築物容量と夜間光強度の関係を図 10 に示す。

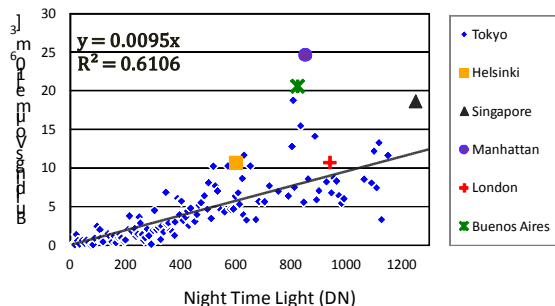


図 10 京都および世界主要都市各域の建築物容量と夜間光強度の関係

図 10 から分かるように、低輝度領域では夜間光強度と建築物容量の相関は高いが、高輝度領域では、両者のばらつきが目立つ。さらに、建築物容量から鋼材ストック量を推計し、夜間光輝度との相関を求め、東京都における建築物鋼材ストック量を推計した結果、91 million t となった。研究代表者らのトップダウン法を用いた既存研究（柿内ら、鉄と鋼、2009）より得られた東京都の建築鋼材ストック量は 59 million t であり、本手法により推計したストック量の方が大きくなった。GIS から求まる建築物容量および鋼材ストック量は、地上部のストックを推計したものであり、トップダウン法により推計された値よりも小さくなってしかるべきである。しかしながら、結果はその逆になってしまった。図 10 から分かるように高輝度部分でのばらつきが大きく、適した相関式が得られていないこと、GIS から求めた建築物容量は、建築物の計上を適正に評価できていないことから大きな誤差が生じたと考えられる。今後の検討課題である。

## (2) 将来の鋼材需要量の推計

図 11 および 12 に、動的 MFA から求めた 2050 年までの世界における土木・建築・自動車用途の鋼材ストック量および需要量を示す。この 3 用途に関して、2050 年では鋼材ストックは 500 億トンを超える推計となった。

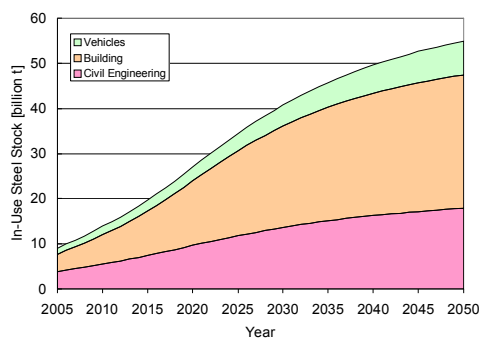


図 11 2050 年までの世界における土木・建築・自動車用途の鋼材ストック量

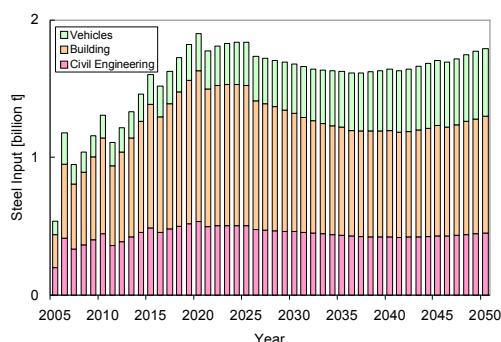


図 12 2050 年までの世界における土木・建築・自動車用途の鋼材需要量

需要量に関しては、2020 年頃に 20 億トン近い需要になり、その後は若干の増減を示す結果となった。但し、この推計は、各国の GDP/Cap. の増大シナリオ、用途別一人当たりの鋼材ストック飽和値の設定に大きく依存するゆえ、今後も詳細な検討が必要である。

以上より、本研究では、夜間光衛星画像および地理情報を用いて、世界の中でも最も消費量の大きい土木・建築用鋼材のストック量を推計する手法を開発し、今までに統計データが得られず鋼材ストック量が推計できなかった国のストック量を推計した。また、動的 MFA 手法を用い、将来の鋼材ストック量と需要量を推計した。手法の精緻化、得られた結果の検証などの課題は残すものの、MFA 研究に大きな進捗を残せたと確信する。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 6 件)

① Feng-Chi Hsu, Christopher D. Elvidge and Yasunari Matsuno, Exploring and estimating in-use steel stocks in civil engineering and buildings from night-time lights, International Journal of Remote

Sensing, 査読有, Vol. 34, No. 2, (2013), 490-504

② 田口現貴、許峰旗、谷川寛樹、松野泰也、夜間光衛星画像とGISを用いた建築用鋼材蓄積量の推計、鉄と鋼、査読有、Vol. 98, No. 8 (2012), 62-68

③ 許峰旗、藤本郷史、松野泰也、建築鋼材原単位の国別差異の考察、鉄と鋼、査読有、98(4), (2012) 35-42

④ Feng-Chi Hsu, Ichiro Daigo, Yasunari Matsuno and Yoshihiro Aadachi, Estimation of Steel Stock in Building and Civil Construction by Satellite Images, ISIJ International, 査読有, 51 (2), (2011) 313-319

⑤ 許峰旗、醍醐市朗、松野泰也、足立芳寛、衛星画像を用いた建築・土木における鋼材ストック推計、鉄と鋼、査読有、Vol. 96 (8), (2010) 517-523

⑥ Hatayama, Hiroki; Daigo, Ichiro; Matsuno, Yasunari; Adachi, Yoshihiro, Outlook of the world steel cycle based on the stock and flow dynamics, Environmental Science & Technology, 査読有, 44 (16), (2010) 6457-6463

[学会発表] (計 8 件)

① Yasunari Matsuno, Exploring and estimating in-use steel stocks in civil engineering and buildings from night-time light images, 7th Society & Materials International Conference, SAM-7, Aachen, ドイツ, April 25, 2013

② Matsuno Y, Taguchi G, Hsu F, and Tanikawa H, Estimation of in-use steel stock in buildings by nighttime light image and geographic information system, The 10th International Conference on EcoBalance, Yokohama, November 22, 2012

③ Hanwei LIANG, Ryo SHIMIZU, Hiroki TANIKAWA, Yasunari MATSUNO, Application of High Resolution PALSAR Data for Modeling Building Stock: Case Study of Sapporo, Japan, The 10th International Conference on EcoBalance, Yokohama, November 22, 2012

④ Yasunari Matsuno, Kengo Kawahara, Hiroki Hatayama and Ichiro Daigo, Flow and Stock Dynamics for Outlook of The World Steel Cycle, 6th Society & Materials International Conference, SAM-6, Leuven, ベルギー, May 30, 2012

⑤ 許峰旗、エルビッジクリストファー、松野泰也、衛星画像に基づいた建築・土木の鋼材ストック推計、第7回日本LCA学会研究発表会、千葉、March 8, 2012

⑥ Feng-Chi Hsu, Christopher D. Elvidge,

Yasunari Matsuno, Estimating in-use steel stock of civil engineering and building in China by nighttime light image, The Asia Pacific Advanced Network, Hong Kong, 中国, Feb. 22, 2011

⑦ 許峰旗、醍醐市朗、松野泰也、エルビッジクリストファー、足立芳寛、衛星画像に基づいた建築および土木の鋼材ストック推計、第6回日本LCA学会研究発表会、仙台 March 3, 2011

⑧ Feng-Chi HSU, Ichiro DAIGO, Yasunari MATSUNO, Yoshihiro ADACHI, Estimation of Steel Stock in Building and Civil Construction by Satellite Image, The 9th International Conference on EcoBalance, November 11, 2010, Tokyo

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://park.itc.u-tokyo.ac.jp/matsuno/research.html#title02>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

松野 泰也 (MATSUNO YASUNARI)

東京大学・大学院工学系研究科・准教授  
研究者番号： 50358032

### (2) 研究分担者

藤本 郷史 (FUJIMOTO SATOSI)

広島大学・工学系研究科・助教

研究者番号： 30467766

谷川 寛樹 (TANIKAWA HIROKI)

名古屋大学・環境学研究科・教授

研究者番号： 90304188