衛星夜間光観測データを用いた銅のストック解析

高橋和枝^{1,2,*} 寺角隆太郎^{1,*} 中村二郎² 醍醐市朗¹
松野泰也¹ 足立芳寛¹

¹東京大学大学院工学系研究科

²日本電信電話株式会社 NTT 環境エネルギー研究所

J. Japan Inst. Metals, Vol. 72, No. 11 (2008), pp. 852-855

© 2008 The Japan Institute of Metals

Analysis of In-Use Stock of Copper by Using Satellite Nighttime Light Observation Data

Kazue Ichino Takahashi^{1,2,*}, Ryutaro Terakado^{1,*}, Jiro Nakamura², Ichiro Daigo¹,
Yasunari Matsuno¹ and Yoshihiro Adachi¹

¹Department of Materials Engineering, Graduate School of Engineering, The University of Tokyo, Tokyo 113-8656

²NTT Energy and Environment Systems Laboratories, Nippon Telegraph and Telephone Corporation, Atsugi 243-0198

We developed a novel methodology to analyze world-scale stock-in-use of copper by using a nighttime light image. Radiance calibrated nighttime light imaged data (RCD) of the world has been assembled from the Defense Meteorological Satellite Program (DMSP) Operational Linescan System (OLS) by the National Geophysical Data Center. It has been recognized that the intensities of nighttime light are strongly associated with human settlement, such as population density and energy consumption. We assumed that wherever the light exists the electrical conducting material, such as copper should be used. The stock-in-use data of copper such as in Japan, North America, Australia and China were obtained from existing studies on material flow analysis. We analyzed the relationship between the light accumulation density and the amount of stock of copper in those countries. A significant correlation was found and the feasibility of this method was confirmed. We applied this method to analyze stock-in-use in other Asian countries. The in-use stock of copper was correlated with gross domestic product (GDP).

(Received March 27, 2008; Accepted July 25, 2008)

Keywords: resource recycling, copper stock, defense meteorological satellite program/operational linescan system, satellite, remote sensing, nighttime light image

1. はじめに

資源循環を促進する上で、マテリアルフローを把握することは有効な回収システムを構築する上で必要不可欠である。マテリアルフローを把握する手法として、マテリアルフロー解析(Material Flow Analysis, MFA)とサブスタンスフロー解析(Substance Flow Analysis, SFA)が知られている。MFA/SFA 解析の既存研究として、世界の銅¹⁻³⁾、銀⁴⁾、クロム⁵⁾、鉄^{6,7)}に関するマテリアルフローが報告されている。また過去のストックとフローが資源保護に重要な情報を与えるとして、MFA/SFA 動的モデルが、近年、注目を集めている。そこでさまざまなマテリアルと物質について動的マテリアルフロー分析が報告されている。例えば鉛⁸⁾、鉄^{9,10)}、ニッケル¹¹⁾、銅^{12,13)}、アルミニウム^{14,15)}、ステンレス鋼¹⁶⁾などである。これらの報告において、マテリアルサイクルシステムはダイナミックに表現され、廃棄物発生量と収集量を推定することにより環境への排出量が可視化されている。中でもマテリアルストックを第二の資源として注目

し、オランダの鉛ストック⁸⁾、日本¹⁰⁾・アメリカ¹⁷⁾の鉄鋼、アメリカ¹²⁾および北米¹⁸⁾の銅の過去のストック量を定量化した報告もある。さらに Gordon らは、金属のストックを分析することにより金属消費の持続可能性を議論している¹⁹⁾。

MFA/SFA においてストックを推定する方法は、トップダウン手法とボトムアップ手法の二つに大別できる。ここで、トップダウン手法とは、各種素材の生産統計や産業連関表などの統計データと、素材の最終用途製品の寿命分布から、社会中の素材蓄積量を試算する手法であり、既存のマテリアルフロー分析の多くはこの手法を用いている。それに対して、ボトムアップ手法とは、統計データなどが得られない場合に、対象とする地域において使用されている製品の数を推計し、その製品に含有される素材成分に関するデータから素材の蓄積量を積算する手法であり、G. Xueyi などの事例研究がある²⁰⁾。

しかしながら途上国などの各種データが未整備の国々に関しては、どちらの手法でも銅ストックを推定することは困難である。

そこで本研究では、米国軍事気象衛星 DMSP / OLS (Defense Meteorological Satellite Program/Operational Linescan System) より撮影された夜間の地球表面の観測光と

* 東京大学大学院生(Graduate Student, University of Tokyo)

人間の経済活動に密接な関係があることに注目した。夜間の地上を衛星から撮影した写真は、近年、一般にも関心を集めており、エネルギー消費や GDP などの経済活動と相関があることが報告されている^{21,22)}。経済活動の結果である銅ストックも光強度と強い関係があると推定できる。すなわち、人口の光があるところには電気があり、送電ケーブルを構成する銅が使われているはずである。しかしながら、これまでにこのような光量と銅ストック量の相関を検討した例はない。また、地球全土のデータが入手できる夜間光観測データを使うことにより、データ未整備地域でも銅ストックを同様に推定することが期待できる。本報では、夜間光から銅ストックを推定する手法を開発したので報告する。

2. 分 析 手 法

2.1 銅ストックの推定方法

夜間光観測データを対象国または地域に分割した。次にヒストグラム解析により光強度の分布図を作成し、式(1)に定義する光蓄積量(Illuminated Urban Area (IUA) dome volume)を評価した²¹⁾。

光蓄積量=Σ(輝度×ピクセル数) (1)

解析の一例を Fig. 1 に示す。

銅ストックに関しては、後述する既存研究^{10,18,20,23)}から求め、光蓄積量との関係をプロットした。

2.2 用いたデータ

2.2.1 夜間観測データ

夜間観測データは米国の軍事気象衛星により撮影された夜間の光強度画像データ(Defense Meteorological Satellite Program/Operational Linescan System, DMSP/OLS)を、C. D. Elvidge ら²²⁾が加工した 1996 年から 1997 年(1996 年 3 月および 1997 年 1-2 月)の輻射低標夜間灯光強度データ(Radiance calibrated nighttime lights imaged data, RCD)²⁴⁾を用いた。RCD は DMSP/OLS のゲインが異なる画像を重ね合わせて作成されたものであり、センサーのゲインの変動による影響を除去されるため、輝度が飽和することなく光蓄積量を定量化できる利点がある。またこの光量の情報は地図にマッ

ピングされた形で提供されているため、国・地域別の解析が可能である。一例としてこの RCD データより光蓄積量を求め、人口や電力消費量に正の相関があることが報告されている²²⁾。このように RCD データは地球全土を対象に経済活動を推定する指標の一つとして用いられている。

2.2.2 銅ストックの量

オーストラリア全体及び州別の銅ストックの量は、D. van Beers らが、代表的な製品の銅の濃度に製品の量を掛け合わせ、積算することにより求めた値²³⁾を用いた。北アメリカの銅ストック量は S. Spatari らによるサブスタンスフロー解析において、寿命分析モデルに基づいて求めた銅ストック量¹⁸⁾を用いた。日本の銅ストックは醍醐らの文献¹⁰⁾におけるポピュレーションバランスモデルにより求められた値を参照した。さらに中国の銅ストックは G. Xueyi らによる銅のマテリアルフロー分析²⁰⁾にある各年の導入量と廃棄量から著者らが推算した。また世界全体、スイスおよびスウェーデンの銅ストックは D. van Beers らの既報²³⁾に記載されている各国の stock/capita から、著者らが推算した値を用いた。使用した銅ストックの量、対応年度、文献を Table 1 に示す。複数のデータがあるものはその平均とし、また対応年度が明らかではない場合は文献の発行年とした。

Table 1 In-use stock of copper.

Region	Copper stock (Gg)	Year	Reference
World	284000*1	2001*2	D. van Beers ²³⁾
North America	70000	1999	S. Spatari ¹⁸⁾
USA	77605*1	1999*2	D. van Beers ²³⁾
Japan	19000	2000	I. Daigo ¹⁰⁾
China	11000	2000	G. Xueyi ²⁰⁾
Australia	4300	2000	D. van Beers ²³⁾
Sweden	1200	2003*2	D. van Beers ²³⁾
Swiss	1600	2003*2	D. van Beers ²³⁾

*1 The average is shown.
*2 The publication date is shown.

Fig. 1 The imaging analysis.

Fig. 2 The relationship between net of radiance and copper stock.

Fig. 3 The relationship between net of radiance and copper stock in Australia.

3. 銅ストックと光蓄積量の関係

3.1 国レベルでの銅ストックと光蓄積量の関係

日本、北アメリカ、中国、スイス、スウェーデン、アメリカ合衆国、オーストラリアおよび世界全体の光蓄積量と銅ストックの関係を Fig. 2 に示す。

銅ストックと光蓄積量には強い相関 (R^2 は 0.99) があり、光蓄積量から国レベルの銅ストックを推定できることが明らかとなった。

3.2 オーストラリア国内での銅ストックと光蓄積量の関係

次に地域別のストックの推定に使用できるかどうかをオーストラリアの各州の銅ストック量²³⁾と光蓄積量の関係から調べた。その結果を Fig. 3 に示す。図に示したようにより狭い対象範囲であっても両者には強い相関 (R^2 は 0.97) があり、適用可能であることが示唆された。

Fig. 4 Relationship between estimated copper stock/capita and GDP/capita.

3.3 本手法のアジア各国への適応

次に銅ストックの量が明らかではなく、データも未整備であるアジア諸国について光蓄積量を測定し、3.1 の結果から銅ストックを推計した。結果を Table 2 に示す。

Binder らは銅の単年(1994 年)のフローを 50 カ国について解析し、購買力平価(purchasing power parity, PPP)あたりの GDP と強い相関があることを明らかにしている²⁵⁾。そこで本研究でも銅ストックと GDP (PPP) との関係求めた。結果を Fig. 4 に示す。Fig. 4 より、両者には直線の相関関係 (R^2 は 0.61) があることが示された。Binder らの論文では単年でのフローを解析し、本論文ではストックを解析しているが、ストックに関しても GDP (PPP) との正の相関を示す結果が得られた。

4. 結 論

衛星から観測される地表夜間光と銅ストックには強い相関があるが明らかとなり、新たな銅ストックのボトムアップ推定手法が開発できた。本手法は世界、国だけではなく州などの地域単位でも利用可能である。さらに本手法使って、銅ストック量が不明なアジア地域に適用したところ、GDP との強い相関があり、既存研究において銅のフローと GDP に強い相関を示した結果と同じ傾向を示している。今後、推定した銅ストックを他の手法で検証するとともに他のマテリアルについても同手法が適応可能であるかを検討していく。

独立行政法人国立環境研究所の一ノ瀬俊明様には本研究に対し、有益なコメントをいただきました。ここに感謝いたします。

Table 2 Estimated In-use stock of copper in Asian countries.

	India	South Korea	Malaysia	Singapore	Taiwan	Thailand	Vietnam	Sri Lanka
Net of radiance/Watts cm-2 sr-1 mm-1	3030000	1470000	485000	346000	339000	235000	94400	63500
Copper stock/Gg	6000	2900	970	690	680	470	190	130

文 献

- 1) T. E. Graedel, M. Bertram, K. Fuse, R. B. Gordon, R. Lifset, H. Rechberger and S. Spatari: *Ecological Economics* **42**(2002) 9–26.
- 2) T. E. Graedel, D. 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) 1242–1252.
- 3) S. Murakami, M. Yamanoi, T. Adachi, G. Mogi and J. Yamatomi: *Mater. Trans.* **45**, (2004) 3184–3193.
- 4) J. Johnson, J. Jirikowic, M. Bertram, D. Beers, R.B. Gordon, K. Henderson, R. J. Klee, T. Lanzano, R. Lifset, L. Oetjen and T. E. Graedel: *Environ. Sci. Technol.* **39**(2005) 4655–4665.
- 5) J. Johnson, L. Schewel and T. E. Graedel: *Environ. Sci. Technol.* **40**(2006) 7060–7069.
- 6) T. Wang, D. B. Muller and T. E. Graedel: *Environ. Sci. Technol.* **41**(2007) 1520–1529.
- 7) H. Yoshimoto: *Tekkokuikai* **35**, 9 (1985) 70–78.
- 8) A. Elshkaki, E. Voet, M. Holderbeke and V. Timmermans: *Resour. Conserv. Recycl.* **42**(2004) 133–154.
- 9) I. Daigo, D. Fujimaki, Y. Matsuno and Y. Adachi: *Tetsu-to-Hagane* **91**(2005) 171–178.
- 10) I. Daigo, Y. Igarashi, Y. Matsuno and Y. Adachi: *ISIJ Int.* **47**, 7 (2007) 1065–1069.
- 11) K. Tsunemi and H. Wada: *Tetsu-to-Hagane* **92**, 10 (2006) 49–56.
- 12) C. Zeltner, H. P. Bader, R. Scheidegger and P. Baccini: *Regional Environmental Change* **1**(1999) 31–46.
- 13) S. Spatari, M. Bertram, K. Fuse, T. E. Graedel, H. Rechberger: *Ecol. Econ.* **42**(2002) 27–42.
- 14) M. T. Melo: *Resour. Conserv. Recycl.* **26**(1999) 91–113.
- 15) H. Hatayama, H. Yamada, I. Daigo, Y. Matsuno and Y. Adachi: *Mater. Trans.* **48**(2007) 2518–2524.
- 16) Y. Igarashi, I. Daigo, Y. Matsuno and Y. Adachi: *ISIJ Int.* **47**(2007) 753–757.
- 17) D. B. Muller, T. Wang, B. Duval and T. E. Graedel: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **103**(2006) 16111–16116.
- 18) M. Spatari, R. B. Bertram, K. Gordon and T. E. Henderson: *Ecological Economics* **54**(2005) 37–51.
- 19) R. B. Gordon, M. Bertram and T. E. Graedel: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **103**(2006) 1209–1214.
- 20) G. Yueyi and S. Yu: *Resources, Conservation and Recycling* **52**(2008) 874–882.
- 21) R. Welch: *Remote Sensing of Environment* **9**(1980) 1–9.
- 22) C. D. Elvidge, K. E. Baugh, J. B. Dietz, T. Bland, P. C. Sutton, and H. W. Kroehl: *Remote Sens. Environ.* **68**(1999) 77–88.
- 23) D. Beers and T. E. Graedel: *Journal of Cleaner Production* **15**(2007) 849–861.
- 24) http://www.ngdc.noaa.gov/dmsp/download_rad_cal_96-97.html
- 25) C. R. Binder, T. E. Graedel and B. Reck: *Journal of Industrial Ecology* **10**(2006) 1–2, 111–132.