

日本における鉄鋼材の物質ストック量の導出

醍醐 市朗*・五十嵐 佑馬*・松野 泰也*・足立 芳寛*

Accounting for Steel Stock in Japan

Ichiro DAIGO, Yuma IGARASHI, Yasunari MATSUNO and Yoshihiro ADACHI

Synopsis : During the last two decades, the total material input in Japan has been about 2 billion tons, and approximately 50%, *i.e.*, about 1 billion tons has accumulated as the net addition to stock in the form of buildings, social infrastructure, and various kinds of products. The amount of the net addition to stock is calculated annually from the differential between the input and the output. Therefore, the contents of the accumulated stock are unknown. It is said that these unknown contents include material that has already been discarded as invisible waste. In this study, dynamic material flow analysis was conducted to quantify the amount of stock that is not associated with social activities and cannot possibly be collected as scrap in the future. First, we defined some terms: in-use stock, hibernating stock, and overall stock. Hibernating stock comprises the steel used for the constructional material of landfill site, the steel dissipated by corrosion and erosion, *etc.* Furthermore, we defined the system boundary to account for the steel stock and constructed equations to calculate the three types of stock. To calculate the amount of in-use stock, a dynamic model—the population balance model—was adopted. The amounts of in-use stock and hibernating stock in Japan from 1980 to 2000 were calculated. The result shows that 0.96 billion tons of the in-use stock is included in the 1.22 billion tons of overall stock in the year 2000.

Key words: in-use stock; hibernating stock; material stock accounting; dynamic material flow analysis; societal stock.

1. 緒言

最近の二十数年間、日本には国内外から毎年20億トン程度の天然資源が投入されている。毎年、そのうち約半分の10億トン程度は、蓄積増分として計上されており、社会中の物質ストック量は増加の一途をたどっている¹⁾。しかしながら、蓄積増分は、その量を把握して導出されているわけではなく、投入量と排出量の差分として計上されているため、社会中の物質ストック量の内容は、解明されていない。その内容の不明な蓄積増分の中には、認識されていない排出フロー量も含まれていると考えられている。Brunner²⁾は、物質ストック量の中には、有効に利用されず退蔵している物質ストック(Hibernating stock)があると指摘している。橋本³⁾は、日本における建設鉱物の物質収支から、建設鉱物の物質ストックの中に、失われたストックがあると指摘している。ここで、認識されていない排出フロー、退蔵している物質ストック、失われたストックは、ほぼ同義であり、鉄鋼材を例にすると、使われなくなった後も残留している隧道や柵などの土木構造物、腐食や磨耗により飛散したもの、地中に埋設されたままのものなどがあると考えられる。その退蔵している物質ストックは、社会活動に寄与する物質ストックでなく、将来スクラップとして回収される可能性もない。つまり、この社会活動に寄

与せず、資源循環にも寄与しない物質ストックの増加が緩和されれば、天然資源消費量は削減されることが考えられる。そのため、まずは物質ストックの内容を解明し、退蔵物質ストックの量を、物質ストック量の中で区分する必要がある。それにより、物質ストック量を分析し、区分することにより、散逸分や埋設残材などの退蔵物質ストックも考慮した資源有効利用が議論できると考えられる。

近年、Material flow analysis (MFA)やSubstance flow analysis (SFA)といった資源の循環に関する研究が、有害物質による人体影響や資源有効利用の観点から行われている⁴⁾。鉄鋼材の物質ストック量に関しては、業界においても日本鉄源協会が統計値からの鉄鋼蓄積推計量⁵⁾を公表しており、戸井と佐藤⁶⁾がそれらを用いた将来予測もおこなっている。また、鉄鋼材におけるマテリアルフローに関する研究には、過去に、戸井と佐藤⁷⁾、角館⁸⁾、醍醐^{9,10)}、中島¹¹⁾、玉城^{12,13)}による研究がある。しかしながら、いずれも物質ストック総量あるいは物質フローに関する研究であり、物質ストックの内訳に言及した研究はほとんどない。

そこで、本研究では日本における鋼材ストックの中で、社会活動に寄与せず、将来スクラップとして回収される可能性のない鋼材の物質ストックを区分することを目的とする。

平成18年7月31日受付 平成18年9月8日受理 (Received on July 31, 2006; Accepted on Sep. 8, 2006)

* 東京大学大学院工学系研究科マテリアル工学専攻 (Department of Material Engineering, Graduate School of Engineering, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo Bunkyo-ku Tokyo 133-8656)

2. 物質ストックの定義と導出

2.1 物質ストックの区分と定義

はじめに、物質ストックに関する用語の定義をおこなう。本研究においては、社会活動に寄与している物質ストックを In-use stock (使用物質ストック; S_{use})、社会活動に寄与せず、将来スクラップとして回収される可能性のない物質ストックを Hibernating stock (退蔵物質ストック; S_{hib}) と区別し、両者の合計を Overall stock (総物質ストック; S_{all}) と定義する。Hibernating stock には、埋立地などの土木構造物に使用される材の一部や磨耗や腐食により飛散した物質が含まれると考えられる。しかし、物質の存在 (利用) 形態によっては、In-use stock と Hibernating stock、フローとストックの間の境界があいまいな部分もあり、具体的なシステム境界の設定には更なる議論が必要である。本研究で設定したシステム境界については、次節で詳述する。

次に、数式による定義をおこなう。ある時点 τ における物質ストック量は、初期年 t_0 からの蓄積変化量 ΔS の積算により導出される (式 (1))。また、 t 年における1年間の蓄積変化量 $\Delta S(t)$ は、 t 年の投入量 $F_{in}(t)$ と t 年の排出量 $F_{out}(t)$ の差により導出される (式 (2))。

$$S(\tau) = \sum_{t=t_0}^{\tau} \Delta S(t) \dots\dots\dots (1)$$

$$\Delta S(t) = F_{in}(t) - F_{out}(t) \dots\dots\dots (2)$$

なお、後段で記したように、本研究において用いたデータは、各年報としての統計値から得ており、分かり易さのために、上記定義は、観測期間が1年であることを前提に説明した。それ以外の観測期間であっても、上記定義は適用可能である。

2.2 物質ストックのシステム境界

鉄鋼材において、日本の鉄鋼蓄積量⁵⁾として推計されている物質ストック量は、先の定義の Overall stock の量であり、投入量を t 年の鋼材消費量と鋼材間接輸入量、排出量を t 年の市中スクラップ回収量 (加工スクラップ発生量と老廃スクラップ回収量の合計) と鋼材間接輸出品とすることで導出されている。ここで、鋼材間接輸出入とは、鋼材としてではなく製品として輸出入されるものに含まれる鋼材のことであり、KDセットなどの部品として輸出入されるものも含む。なお、その量はマテリアルに関する統計には記されていないため別途推計されている。

システム境界を考えるにあたり、まずフローとストックの区分を考える。Faber¹⁴⁾らは、観測期間と比較して短い時間での変化は、ストックとはならないとしている。鉄鉱石が採掘されてから、最終製品として消費者の手に渡るまでの製造・流通プロセスは、本研究における観測期間の1年よりプロセスに要する期間が比較的短いため、フローであると見ることができる。これにより、先述の導出方法に

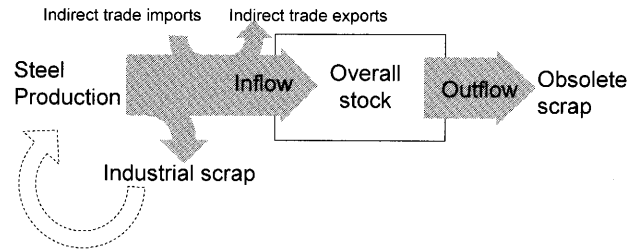


Fig. 1. System boundary of Overall stock of steel in Japan.

おける、投入物や排出物であった加工スクラップと間接輸出入を、システム境界の外でのフローと考えることができ、国内で消費される最終製品に含まれる鋼材が投入物となり、老廃スクラップが排出物となる (Fig. 1)。Overall stock としての鉄鋼蓄積量が計上されているシステム境界を Fig. 1 中の実線で示した。なお、先のフローとストックの区分と同様に、ある年に投入された製品であって、その寿命が観測期間の1年と比較して短い場合には、フローとして扱われるべきと考えられる。しかし、それらを投入物、流出物において区分するのは、物質ストック量の導出においては実務的でないため、本研究では、同一期間内に投入物や流出物に計上されるものがあることとした。

2.3 物質ストックの導出方法

Overall stock の導出方法に関しては、システム境界の節で既に記した。それに対し、In-use stock を推計するには、投入量を t 年の鋼材の国内需要量、排出量を t 年の使用済み鋼材排出量とすることで導出される。ここで、使用済み鋼材排出量とは、動的手法により推計される量である。マテリアルフロー分析における動的手法は、ストックが時間緩衝の役割を果たし、流入が後年に排出となるモデルであり¹⁵⁾、遅延時間モデル (Delay model)¹⁶⁾ と分類されることもある。鉄鋼材のマテリアルフロー分析における動的手法は、鋼材が構成する最終製品の使用期間 (寿命) を考慮したモデルであり、導出される使用済み鋼材排出量は、使用済みとなり社会活動に寄与しなくなると予想される製品に含まれる鋼材の量を推計していることとなる。本研究で用いた動的分析手法は、Population balance model^{8,17)} と呼ばれ、過去からの国内需要量 F_{in} とそれぞれの用途における使用年数分布から使用済み鋼材排出量 F_{out} を導出する。ある用途 i の t 年の需要量を $F_{in}(i, t)$ とし、同用途の使用年数分布を、使用年数 α に対し累積密度関数として $G(i, \alpha)$ とすると、同用途 i の使用済み鋼材排出量 $F_{out}(i, t)$ は、式 (3) のようにあらわされる。また、同じく式 (3) に示したように、全ての用途の使用済み鋼材排出量を合算したものが、 t 年における排出量 $F_{out}(t)$ となる。

$$F_{out}(i, t) = \sum_{\alpha=0}^{\infty} F_{in}(i, t-\alpha) \cdot \{G(i, \alpha-1) - G(i, \alpha)\} \dots\dots\dots (3)$$

$$F_{out}(t) = \sum_i F_{out}(i, t)$$

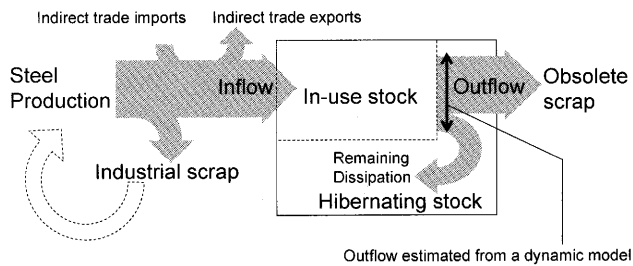


Fig. 2. System boundary of In-use stock and Hibernating stock of steel in Japan.

なお、国内需要に関しては Overall stock のそれと同じである。

最終製品中の鋼材のライフサイクルを見ると、鋼材は、最終製品に含まれ社会 (Overall stock) に投入され In-use stock となり、最終製品の寿命が終わり使用済み鋼材として In-use stock から排出され、一部はスクラップとして一時的に社会 (Overall stock) から排出され、残りは Hibernating stock として社会中に残存する。つまり、Overall stock では、物質ストックとして計上されているもののうちの一部が、In-use stock では排出された物質として扱われている。この差分が、Hibernating stock となり、社会活動に寄与せず、将来スクラップとして回収される可能性はないが、社会中に存在する物質ストックとなる。In-use stock と Hibernating stock のシステム境界を Fig. 2 の破線と実線で示す。なお、本研究では便宜上 Overall stock のシステム境界内を社会と表現したが、社会や人工物圏という用語の定義については、議論の残るところである。

3. データ収集

3.1 投入量データ

素材の国内需要量は、一般的に統計値として得られる。しかし、本研究のシステム境界への投入量は、素材メーカーの販売量や製品メーカーの購入量ではなく、製品として社会に投入された量として必要であり、最終製品メーカーでの加工歩留りも考慮される必要がある。そのため、用いる値が、製品への形成時の歩留りを考慮しているかどうかを確認する必要がある。日本における鉄鋼材の製品として社会に投入される量に関しては、国内需要量¹⁸⁾が把握されていることと、加工屑発生実態調査として、加工歩留りに関する調査がおこなわれていることより¹⁹⁾、把握することができる⁵⁾。よって、本研究では、鉄鋼材の国内需要量の統計値、加工屑発生実態調査を用い、1920年から2003年までの鉄鋼材の社会中への投入量を得た。なお、1971年以降は、用途別国内需要量が得られたが、それ以前は1971年の粗鋼生産量と用途別国内需要量の比率を用い、各年の粗鋼生産量から用途別国内需要量を推計した。さらに、1944年以前の粗鋼生産量は、1945年から1971年までの粗鋼生産

Table 1. Category of application and corresponding categories in statistic.

Application	Corresponding categories in statistics
Construction	Civil engineering and Other construction
Buildings	Buildings
Passenger vehicles	Automotive
Trucks	Automotive
Machines	Industrial machinery, Electric machine, Household and commercial appliances, Ships and marine engineering, Rail vehicles and Other transport machine
Containers	Containers
Other products	Other products, Next processes, Re-processes

量を指数関数によりフィッティングした関数を外挿することにより、1920年まで推計した。なお、フィッティングした関数により、 t 年の粗鋼生産量は $14750 \times e^{0.1669 \times (t-1920)}$ トンとしてあらわされた。また、間接輸出入量は、1993年までは世界鉄鋼協会のデータ²⁰⁾を用い、1994年以降は日本鉄源協会の推算値²¹⁾を用いた。

3.2 排出量データ

スクラップに関する統計データは、市中スクラップ消費量が把握されている²²⁾。前節で説明した方法により加工スクラップ発生量が把握されるため、市中スクラップ消費量から加工スクラップ発生量を減じることにより、老廃スクラップ回収量が把握できる。

3.3 動的分析手法に用いたデータ

製品の構成部材となる鉄鋼材は、組み込まれた製品の寿命にしたがって使用済みとなるため、動的モデルの適用が望まれる。しかしながら、確実な製品の寿命は、多くの製品において得ることが困難であることと、全てのデータを整備することの煩雑さから、製品用途区分とそれぞれの寿命について、以下のように設定した。

統計区分からは、鉄鋼材の国内需要量を15種の用途別に得ることができる¹⁸⁾。本研究では、それらを Table 1 に、統計区分とともに示す7用途区分に統合、配分した。土木用は、統計区分の土木用とその他建設用を統合した。建築用は、統計区分の建築用とした。乗用車用、トラック用は、統計区分の自動車用を配分することにより得た。配分にあたっては、トラックの車重が乗用車の車重の2倍あるもの²³⁾とし、それぞれの新規登録台数²⁴⁾から按分した。機械用は、統計区分の産業機械用、電気機械用、家庭用・業務用機器用、船舶用、鉄道車両用、その他輸送機器用を統合した。容器用は、統計区分の容器用とした。その他の製品用途は、統計区分のその他諸成品用、次工程用、最終用途不明の再加工作用を統合した。また、統計区分の販売業者は、コイルセンターとシャー・スリットの間接部門への需要量である⁵⁾ため、それぞれの業界団体における当該年次の用途調査を用いて各用途に配分したデータを得た²⁵⁾。

次に、投入量において区分された用途別の製品寿命分布に関するデータを設定した。乗用車用途、トラック用途の

Table 2. Lifetime distribution by each application.

Application	Average lifetime [year]	Parameters of Weibull distribution functions	Ref.
Construction	34.5	$m=3.1, \eta=48.4, \delta=8.8$	26, 27
Buildings	28.9	$m=3.1, \eta=40.4, \delta=7.3$	26
Passenger vehicles	8.7-10.8 (Across the age)	Non-parametric	24
Trucks	8.5-14.1 (Across the age)	Non-parametric	24
Machines	12.1	$m=3.5, \eta=13.4, \delta=0$	8, 28
Containers	< 1	-	-
Other products	12.1	$m=3.5, \eta=13.4, \delta=0$	8, 28

製品寿命分布は、統計値²⁴⁾からノンパラメトリックな寿命分布を得た。ノンパラメトリックな寿命分布の得られなかった用途の寿命分布は、式(4)に累積確率密度関数で示すワイブル分布関数によるパラメトリックな寿命分布を設定した。

$$G(x; m, \eta, \delta) = 1 - \exp\left(-\frac{(x-\delta)^m}{\eta^m}\right) \dots\dots\dots (4)$$

土木用途の製品寿命分布は、既往研究²⁶⁾から得た鉄骨事務の形状母数 m を用い、文献²⁷⁾から得た主な土木構造物の耐用年数60年において95%が廃棄されるよう平均寿命を設定した。建築用途の製品寿命分布は、既往研究²⁶⁾から得た鉄骨事務の寿命分布を用いた。機械用途の製品寿命分布は、既往研究から得た平均寿命⁷⁾と形状母数²⁸⁾を用いた。容器用途の製品寿命は、観測期間の1年と比較して短いことから、寿命分布関数を設定せず、投入された当該年に全て廃棄されると仮定した。その他製品用途の製品寿命分布は、その他製品がネジやバネなどを含むことから、本研究で機械用途に分類した製品に最終製品として組み込まれているものとし、機械用途と同様の寿命分布関数を仮定した。設定された寿命分布をTable 2に一覧表として示す。なお、既報^{29,30)}と同様に、1990年から2000年の間で一定の回収率を仮定し、動的分析から得られる使用済み鋼材排出量と老廃スクラップ回収量を比較検討することにより、上記パラメータの妥当性を確認した。

4. 日本における鉄鋼材の物質ストック量

2章で記した方法と3章で記したデータを用い、日本国内の鉄鋼材におけるOverall stockとIn-use stockを導出した。Overall stockとIn-use stockの差分がHibernating stockであり、In-use stockとHibernating stockの積上げグラフとして導出結果をFig. 3に示した。In-use stock, Hibernating stockともに、単調増加を示しているが、Hibernating stockは定義からも分かるように減少することはなく、今後も増加の一途をたどる。また、Overall stockに占めるHibernat-

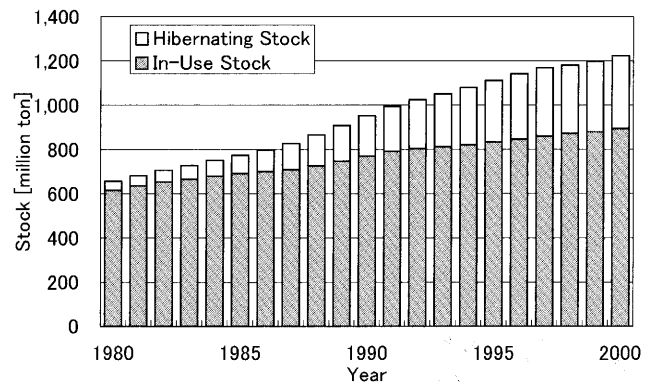


Fig. 3. Steel stock in Japan divided into in-use stock and hibernating stock from 1980 to 2000.

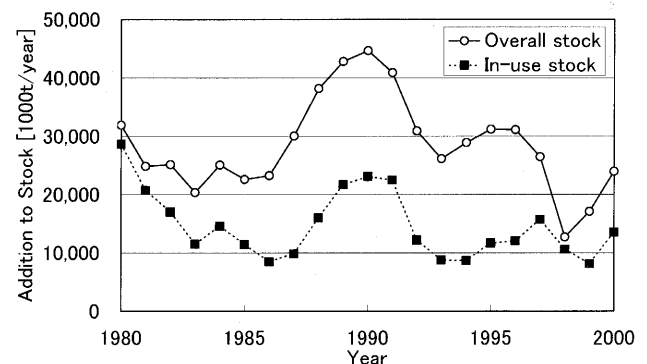


Fig. 4. Change in annual addition to stock from 1980 to 2000.

ing stockの割合が、年を経るごとに大きくなっているのがわかる。2000年において、約12億トンと言われる鉄鋼蓄積量は、本研究におけるOverall stockの量であり、そのうち約9億トンがIn-use stockであると推計された。

Overall stockとIn-use stockの蓄積変化量について導出した結果を、Fig. 4に示した。Overall stockの蓄積変化量は、1980年からの20年において、1990年の大きな山と、1998年の局所的な谷はあるものの、2千万から3千万トン程度で推移してきたことがわかる。Overall stockの蓄積変化量は、1980年からの20年において、1990年のピークを除けば漸減してきたことがわかる。また、1980年代前半では、Overall stockとIn-use stockの蓄積変化量の差は小さいが、その差が年を経るごとに大きくなってきているのがわかる。その結果、1998年から2000年において、In-use stockへの蓄積変化量は1千万トンより小さくなっていることがわかった。この2つの蓄積変化量の差分が、Hibernating stockへの蓄積増分を示しており、1980年代後半以降は毎年1千万トン程度がHibernating stockとして増加していることがわかった。

さらに、本研究において、既往の鉄鋼蓄積量(Overall stock)をIn-use stockとHibernating stockに区分できたことにより、将来の鉄鋼需要やスクラップ回収量の推測に対し新たな示唆が得られると考えられる。ただし、本研究で導

出した数値は、In-use stockを導出する際に用いられた、製品の寿命分布により高い感度で影響を与えられるため、今後それらパラメータの導出に対する確度の高い研究が望まれる。

5. 結言

鉄鋼材の物質ストックを導出する方法を確立できた。資源有効利用の観点から物質ストックの内訳を区分するための用語の定義をおこなった。物質ストックを、既存の鉄鋼蓄積量(Overall stock)だけでなく、In-use stockとHibernating stockに区分して、それぞれの量を2000年まで推計できた。2000年における12億トンの鉄鋼蓄積量のうち、約9億トンがIn-use stockであることがわかった。今後は、本研究で用いたパラメータの導出に対する確度の高い研究が望まれるとともに、本結果を用い将来の鉄鋼需要やスクラップ回収量の推測に対し新たな示唆が得られると考えられる。

(社)日本鉄源協会 林誠一氏ならびに(株)日鉄技術情報センター 玉城わか氏には、本論文について貴重なご助言ならびに貴重な情報をいただきました。心より御礼申し上げます。なお、本研究は、鉄鋼研究振興助成研究「社会蓄積量から見た鉄鋼材有効利用の評価(受給者:醍醐市朗)」により得られた成果の一部である。

文 献

- 1) Ministry of the Environment: private communication.
- 2) P.H.Brunner: *Environ. Sci. Pollut. Res.*, **6** (1999), No. 1, 1.
- 3) 橋本征二, 谷川寛樹, 森口祐一: 建設鉱物のマテリアルバランス ~失われるマテリアルストックと再生碎石の需給に関する検討, 第31回環境システム研究論文発表会講演集, 北九州市, (2003), 497.
- 4) P.H.Brunner and H.Rechberger: *Practical Handbook of Material Flow Analysis (Advanced Methods in Resource and Waste Management Series, 1)*, Lewis Pub., (2003).
- 5) The Japan Ferrous Raw Materials Association: *Year Book of Ferrous Raw Material Statistic 2005*, Tokyo, (2006), 55, 68, 89.
- 6) A.Toi and J.Sato: *Tetsu-to-Hagané*, **84** (1998), No. 7, 534.
- 7) A.Toi and J.Sato: *Energy Resour.*, **18** (1997), No. 3, 271.
- 8) K.Kakudate, M.Kawamura, Y.Adachi and T.Suzuki: *Tetsu-to-Hagané*, **86** (2000), No. 6, 425.
- 9) I.Daigo, Y.Matsuno, K.N.Ishihara and Y.Adachi: *Tetsu-to-Hagané*, **91** (2005), No. 1, 159.
- 10) I.Daigo, Y.Matsuno and Y.Adachi: *Tetsu-to-Hagané*, **91** (2005), No. 1, 171.
- 11) K.Nakajima, W.Tamaki, D.Fujimaki and I.Daigo: *Tetsu-to-Hagané*, **91** (2005), No. 1, 150.
- 12) W.Tamaki, Y.Igarashi, D.Fujimaki, S.Hayashi, Y.Tomota, Y.Matsuno and T.Nagasaka: *Tetsu-to-Hagané*, **92** (2006), No. 5, 40.
- 13) W.Tamaki, Y.Igarashi, D.Fujimaki, S.Hayashi, Y.Tomota, Y.Matsuno and T.Nagasaka: *Tetsu-to-Hagané*, **92** (2006), No. 5, 46.
- 14) M.Faber, K.Frank, B.Klauer, R.Manstetten, J.Schiller and C.Wissel: *Ecol. Econ.*, **55** (2005), 155.
- 15) R.Kleijn, R.Huele and E. van der Voet: *Ecol. Econ.*, **32** (2000), 241.
- 16) E. van der Voet, R.Kleijn, R.Huele, M.Ishikawa and E.Verkuiljen: *Ecol. Econ.*, **41** (2002), 223.
- 17) K.Yokota, Y.Matsuno, M.Yamashita and Y.Adachi: *Int. J. LCA*, **8** (2003), 129.
- 18) Committee on Iron and Steel Statistics, The Japan Iron and Steel Federation (JISF): *Handbook for Iron and Steel Statistics 1971-2003*, JISF, Tokyo, (1971-2003).
- 19) S.Hayashi and W.Tamaki: *Tetsu-to-Hagané*, **91** (2005), No. 1, 167.
- 20) Commission on Economic Studies, Indirect Trade in Steel 1962-1993, Int. Iron and Steel Institute, Brussels, (1982-1996).
- 21) The Japan Ferrous Raw Materials Association: *Quarterly Ferrous Raw Material Statistics/Monthly Ferrous Raw Material Statistics*, (1988-2002).
- 22) Ministry of Economics, Trade and Industry: *Yearbook of Iron and Steel, Non-ferrous Metal, and Fabricated Metals Statistics, Economy, Trade and Industry Statistics Association*, Tokyo, (1976-2001).
- 23) Japan Automobile Manufacturers Association: *Automotive Guidebook of Japan 2000-2001*, 47, (2000), 221.
- 24) Road Transport Bureau Ministry of Land Infrastructure and Transport: *Jidosha Hoyu Sharyosu 1-31*, Automobile Inspection & Registration Association, Tokyo, (1958-2001).
- 25) Japan Technical Information Service: private communication.
- 26) Y.Komatsu, H.Kato, T.Yoshida and T.Yashiro: *J. Archit. Plann. Environ. Engng. AIJ*, **439** (1992), Sep., 101.
- 27) Ministry of Land Infrastructure and Transport: *White Paper on Land Infrastructure and Transport 2006*, Gyosei, Tokyo, (2006).
- 28) T.Tasaki, M.Oguchi, T.Kameya and K.Urano: *J. Jpn. Soc. Waste Manag. Experts*, **12** (2001), No. 2, 49.
- 29) I.Daigo, Y.Matsuno and Y.Adachi: *J. Jpn. Inst. Met.*, **70** (2006), No. 2, 114.
- 30) D.Fujimaki, Y.Igarashi, I.Daigo, Y.Matsuno and Y.Adachi: *Tetsu-to-Hagané*, **92** (2006), No. 6, 45.