

将来の日本及びアジア諸国における鋼材消費量と老廃スクラップ排出量の予測

五十嵐 佑馬*・柿内 エライジャ*²・醍醐 市朗*³・松野 泰也*³・足立 芳寛*³

Estimation of Steel Consumption and Obsolete Scrap Generation in Japan and Asian Countries in the Future

Yuma IGARASHI, Elijah KAKIUCHI, Ichiro DAIGO, Yasunari MATSUNO and Yoshihiro ADACHI

Synopsis : In this paper the present flows of steel scraps in Japan, China, South Korea and Taiwan are clarified, and a dynamic model which analyzes future scraps flows is developed. To estimate the amount of collected obsolete scraps, a Population Balance Model (PBM) was used for Japan, South Korea and Taiwan. PBM is a model which estimates the amount of discards dynamically by taking into account the steel input to a society by end-uses and the lifetime distributions of each end-use. For China, a Leaching Model was used to estimate the amount of collected obsolete scraps. This model uses the amount of steel stocked in a society and the collection ratio of obsolete scraps. Three different methods were applied to predict future steel inputs for each country. The first method is applying the assumption that steel demand in the future remains constant at the present level. The second method is applying a logistic curve for future steel stocks. The third method is applying regression equations to future steel inputs by each end-use. GDP and population were used as variables. Finally the results of the steel input predictions by each method were substituted into the collected obsolete scraps estimation model. Under the logistic curve method, it was estimated that in 2030 the amount of collected obsolete scraps would be 29 million tons in Japan, 83 million tons in China, 20 million tons in South Korea and 3.7 million tons in Taiwan.

Key words: China; Japan; South Korea; Taiwan; steel scrap.

1. 研究背景

2005年に世界の粗鋼生産量は11億3千万トンとなった。中でも、日本、中国、韓国、台湾の粗鋼生産量は5億3千万トンであり、世界全体のおよそ47%を占めている。しかしながら、中国、韓国、台湾においては近年粗鋼生産量を急増させたことから、国内におけるスクラップ回収量と鉄スクラップ需要量に格差が生じており、その差を鉄スクラップ輸入によって補っているのが現状である¹⁾。

一方、我が国においては、長年の鉄鋼増産計画により1972年に粗鋼生産量が1億トンを越え、それ以来、1億トン前後を推移している。鉄鋼蓄積量も年々増大するとともに、循環型社会形成推進基本法に基づき、使用済み製品から鉄スクラップが回収されリサイクルされる割合が高くなってきている。それゆえ、我が国は1996年から鉄スクラップ輸出国となり、主な輸出先は、中国、韓国及び台湾である。2004年の輸出量は中国が279万トン、韓国が266万トン、次いで台湾が93万トンと、上位3カ国で総輸出量681万トン中90%以上を占めている。

著者らは、過去の日本国内用途別鋼材消費量の調査に基

づき、ポピュレーションバランスモデル (Population Balance Model, PBM) を適用した、将来の日本国内におけるスクラップ排出量を予測した研究を実施してきた²⁾。そこにおいて、今後も現在の鋼材需要が続く場合、日本国内におけるスクラップ発生量は2015年までに4500万トン程度まで増加することが予測された。さらに、輸出スクラップの品位変化が国内鋼材の品位変化に大きな影響を与えることを検証した。以上のことから、今後日本国内で発生が予想されるスクラップの使用法などを考えるには、将来における輸出量の動向の把握が必要であることが示された。

特に中国など、近年、経済成長が著しく鉄源需要が急増しているアジア諸国においては、将来どれだけの鋼材需要が見込まれるかを解析し、鋼材の需給バランスに伴う鉄のマテリアルフローを解析する必要がある。各国の鋼材需要は、人口増加、経済成長、鋼材の最終製品（自動車、建築物、家電製品など）の需要予測など、様々な因子に影響を受けることが予想され、それらの因子を考慮した解析を行うことが必要である。鉄鋼についての需要量の将来予測に関する研究はいくつかあるものの^{3,4)}、需要の将来予測をもとに、将来の老廃スクラップ排出量等マテリアルフロー

平成19年6月29日受付 平成19年8月28日受理 (Received on June 29, 2007; Accepted on Aug. 28, 2007)

* 東京大学大学院生 (現: JFE スチール (株)) (Graduate Student, Department of Materials Engineering, Graduate School of Engineering, University of Tokyo, now JFE Steel Corporation, 7-3-1 Hongo Bunkyo-ku Tokyo 113-8656)

* 2 東京大学大学院生 (Graduate Student, Department of Materials Engineering, Graduate School of Engineering, University of Tokyo)

* 3 東京大学大学院工学系研究科マテリアル工学専攻 (Department of Materials Engineering, Graduate School of Engineering, University of Tokyo)

を解析した研究は、Elshkakiらが鉛について分析している⁵⁾他にほとんどない。

そこで本論文においては、日本、中国、韓国、台湾における将来の鋼材需要を推計し、それに基づいた老廃スクラップ排出量など、鉄スクラップの動的マテリアルフローを解析することを目的とする。

2. マテリアルフローモデルの構築

2.1 鋼材投入量の推計

まず、現在までの社会への鋼材投入量を推計した。鋼材の社会における滞留時間及び老廃スクラップとしての回収率は用途ごとに大きく異なることから²⁾、鋼材投入量を用途別に推計した。

鋼材生産量に鋼材輸入量を加え、鋼材輸出量を減じて鋼材消費量を算出した。鋼材消費量から加工スクラップ出荷量を減じ、間接輸入量を加え、間接輸出量を減じて鋼材投入量を導出した。間接輸出入量とは、最終製品の輸出入に伴って輸出入される鉄鋼の量である。

日本については、以下の手順により1945年から2004年までの用途別鋼材投入量を推計した。ヒアリング調査⁶⁾により1971年から2000年までの用途別鋼材消費量を得た。1980年から2000年までの用途別加工スクラップ出荷量を加工スクラップ発生実態調査⁷⁾から得た。1971年から1979年までの加工スクラップ出荷量は用途別の加工スクラップ出荷率を1980年の値と同値であると仮定して推計した。ヒアリング調査⁶⁾により1971年から2000年までの間接輸入量及び間接輸出量を得た。以上のデータから1971年から2000年までの用途別鋼材投入量を推計した。1945年から1970年までの用途別鋼材投入量を、1971年の用途別鋼材投入量に当該年の粗鋼生産量⁸⁾を乗じ、1971年の粗鋼生産量を除すことにより得た。2001年から2004年までの用途別鋼材投入量を、2000年の用途別鋼材投入量に当該年の用途部門別鋼材受注量⁹⁾を乗じ、2000年の用途部門別鋼材受注量を除すことにより得た。

中国については、以下の手順により1949年から2004年までの用途別鋼材投入量を推計した。1949年から2002年までの鋼材生産量、鋼材輸入量、鋼材輸出量を得た⁶⁾。鋼材消費量に世界主要国鉄鋼ハンドブック¹⁰⁾から得た1983年から2000年までの用途別鋼材出荷割合を乗じて1949年から2002年までの用途別鋼材消費量を得た。世界主要国鉄鋼ハンドブックに記載されていない年の用途別鋼材出荷割合は、記載されている年の値同士の間を一次近似することにより推計した。1982年以前の用途別鋼材出荷割合は1983年の値と同値であると仮定し、推計した。2001年と2002年の用途別鋼材出荷割合はヒアリング調査⁶⁾より得た。1949年から2002年までの加工スクラップ出荷量は、用途別の加工スクラップ出荷率を日本における1994年の

値と同値であると仮定して、推計した。日本において建設用、容器用の間接輸出入量が非常に小さいことから、中国においても自動車用、機械用、その他用において間接輸入量及び間接輸出量が生じるとして推計した。1955年から2002年までの自動車用途の間接輸入割合及び間接輸出割合を、自動車の生産台数、輸入台数、輸出台数¹¹⁾から推計した。1954年以前の間接輸入割合及び間接輸出割合は1955年の値と同値であると仮定した。1991年から2003年までの電気機械用途の間接輸入割合及び間接輸出割合を、電子工業の生産額、輸入額、輸出額^{12,13)}から推計した。1990年以前の間接輸入割合及び間接輸出割合は1991年の値と同値であると仮定した。1990年から2003年までの機械用途の間接輸入割合及び間接輸出割合を電気機械用途の間接輸出入量と同様に、機械工業の生産額、輸入額、輸出額^{11,14)}から推計した。1989年以前の間接輸入割合及び間接輸出割合は1990年の値と同値であると仮定した。その他用の大部分が次工程用であることがわかっており、次工程用の多くが機械製品の部品として使われている¹⁵⁾ことから、その他用途の間接輸出入割合は機械用途の間接輸出入割合と等しいとした。推計した間接輸入割合及び間接輸出割合を鋼材消費量から加工スクラップ出荷量を減じた値に乗じて間接輸入量及び間接輸出量を推計した。以上のデータから1949年から2002年までの用途別鋼材投入量を推計した。2002年の用途別鋼材投入量に2003年及び2004年の粗鋼生産量¹⁶⁾を乗じ、2002年の粗鋼生産量で除すことにより、2003年及び2004年の用途別鋼材投入量を得た。

韓国については、以下の手順により1930年から2003年までの用途別鋼材投入量を推計した。鉄源年報¹⁷⁾より1930年から2003年までの鋼材消費量、間接輸入量、間接輸出量を得た。鉄源年報に記載されていない年の鋼材消費量、間接輸入量、間接輸出量は、経年での変化率が一定で推移したと仮定して推計した。鋼材消費量に世界主要国鉄鋼ハンドブック¹⁰⁾から得た1988年から2000年までの用途別鋼材出荷割合を乗じて1949年から2002年までの用途別鋼材消費量を得た。世界主要国鉄鋼ハンドブックに記載されていない年の用途別鋼材出荷割合は、記載されている年の値同士の間を一次近似することにより推計した。1987年以前の用途別鋼材出荷割合は1988年の値と、2001年以降の用途別鋼材出荷割合は2000年の値と同値であると仮定し、推計した。1930年から2003年までの加工スクラップ出荷量は、用途別の加工スクラップ出荷率を日本における1994年の値と同値であると仮定して、推計した。日本において建設用、容器用の間接輸出入量が非常に小さいことから、韓国においても自動車用、機械用、その他用において間接輸入量及び間接輸出量が生じるとして推計した。1965年から2003年までの自動車用途の間接輸入割合及び間接輸出割合を、自動車の生産台数、輸入台数、輸出台数¹⁸⁾から推計した。統計に記載されていない年の輸入台数及び

輸出台数は生産台数の変化と同様の变化をしたと仮定して推計した。1964年以前の間接輸入割合及び間接輸出割合は1965年の値と同値であると仮定した。推計した自動車用途の間接輸入割合及び間接輸出割合を鋼材消費量から加工スクラップ出荷量を減じた値に乗じて、1930年から2003年までの自動車用途の間接輸入量及び間接輸出量を推計した。1930年から2003年までの間接輸入量及び間接輸出量の総量から自動車用途の間接輸入量及び間接輸出量を減じて、機械用途とその他用途の間接輸入量及び間接輸出量の合計を得た。その他用の大部分が次工程用であることがわかっており、次工程用の多くが機械製品の部品として使われている¹⁵⁾ことから、その他用途の間接輸出入割合は機械用途の間接輸出入割合と等しいとした。そこで、この機械用途とその他用途の間接輸入量及び間接輸出量の合計を、“機械用鋼材消費量から機械用加工スクラップ出荷量を減じたもの”と“その他用鋼材消費量からその他用加工スクラップ出荷量を減じたもの”の比で按分し、機械用とその他用の間接輸入量及び間接輸出量をそれぞれ得た。以上のデータから1930年から2003年までの用途別鋼材投入量を推計した。

台湾については、以下の手順により1949年から2003年までの用途別鋼材投入量を推計した。IISI Steel Statistical Yearbook¹⁶⁾より1971年から2003年までの鋼材消費量を得た。鋼材消費量に世界主要国鉄鋼ハンドブック¹⁰⁾から得た1983年から2000年までの用途別鋼材出荷割合を乗じて1949年から2003年までの用途別鋼材消費量を得た。世界主要国鉄鋼ハンドブックに記載されていない年の用途別鋼材出荷割合は、記載されている年の値同士の間を一次近似することにより推計した。1982年以前の使用別鋼材出荷割合は1983年の値と、2001年以降の使用別鋼材出荷割合は2000年の値と同値であると仮定し、推計した。1949年から2003年までの加工スクラップ出荷量は、用途別の加工スクラップ出荷率を日本における1994年の値と同値であると仮定して、推計した。日本において建設用、容器用の間接輸出入量が非常に小さいことから、台湾においても自動車用、機械用、その他用において間接輸入量及び間接輸出量が生じるとして推計した。1979年から2003年までの自動車用途の間接輸入割合及び間接輸出割合を、自動車の生産台数、輸出台数¹⁹⁾、輸入台数の新規登録台数に占める割合^{20,21)}から推計した。統計から得られなかった年の輸出台数は生産台数と同様の变化をしたとして推計した。1978年以前の間接輸入割合及び間接輸出割合は1979年の値と同値であると仮定した。1997年から2002年までの機械製品の生産額、輸入額、輸出額を台湾経済総覧²²⁾から得た。1976年から1997年までの輸入総額及び輸出総額を台湾総覧²³⁾から得た。1976年から1996年までの機械製品輸入額及び輸出額は、1997年の輸入総額に占める機械製品輸入額の割合及び輸出総額に占める機械製品輸出額の割合

が一定のまま推移したと仮定し、推計した。以上のデータから機械用途の間接輸入割合及び間接輸出割合を推計した。1975年以前の間接輸入割合及び間接輸出割合は1976年の値と同値であると仮定した。その他用の大部分が次工程用であることがわかっており、次工程用の多くが機械製品の部品として使われている¹⁵⁾ことから、その他用途の間接輸出入割合は機械用途の間接輸出入割合と等しいとした。推計した間接輸入割合及び間接輸出割合を鋼材消費量から加工スクラップ出荷量を減じた値に乗じて間接輸入量及び間接輸出量を推計した。以上のデータから1949年から2003年までの用途別鋼材投入量を推計した。

2・2 スクラップ回収量の推計

スクラップは鋼材製造時に発生する自家発生スクラップ、製品製造時に発生する加工スクラップ、使用済み製品として発生する老廃スクラップの3つに大別することができる。しかしながら、多くの国や地域において、スクラップ回収量に関する統計値は、自家発生スクラップ、加工スクラップ、老廃スクラップの別に整備されていない。そこで、まず現在までの自家発生スクラップ発生量、加工スクラップ出荷量、老廃スクラップ回収量それぞれの推計方法を説明する。日本、中国、韓国、台湾の統計から入手できる鉄スクラップの回収量に関するデータは異なるため、スクラップ回収量の推計方法は異なる。加工スクラップ出荷量は2・1に記したように推計した。日本、韓国、台湾については以下のように加工スクラップ出荷量以外のスクラップ回収量を推計した。自家発生スクラップ発生量は統計から得ることができた。老廃スクラップ回収量は、統計から得た市中スクラップ購入量から加工スクラップ出荷量を減じて得た。以上のように、日本、韓国、台湾のスクラップ回収量は発生源別に把握することができた。一方、中国については以下のように加工スクラップ出荷量以外のスクラップ回収量を推計した。まず、自家発生スクラップ発生量を推計した。統計から得た製鋼工程において投入されたスクラップ量から、自家発生スクラップ発生量と加工スクラップ出荷量、統計から得たスクラップ輸入量を減じて老廃スクラップ回収量を推計した。

自家発生スクラップ発生率と連続鋳造比率の間には相関がある²⁴⁾ことから、自家発生スクラップ発生率を連続鋳造比率で説明した回帰式を導出し、中国における1993年から2004年までの自家発生スクラップ発生率を推計した。具体的な方法を以下に記す。まず、1976年から2004年までの27年間において、日本における連続鋳造比率と自家発生スクラップ発生率との次の相関式を最小二乗法により求めた。

$$y=0.1097x^2-0.2289x+0.2171\cdots\cdots\cdots(1)$$

ここで、 y は自家発生スクラップ発生率を、 x は連続鋳造比率を表す。分析の結果、決定係数は0.9010であった。

相関式を導出するためのデータの範囲を、1976年からとしたが、これは1993年における中国の連続鋳造比率が1976年における日本の連続鋳造比率の35%とほぼ等しいためである。次に、年ごとの補正係数を導出した。文献¹⁾から冶金工業企画研究院が1995年及び2003年の中国における自家発生スクラップ発生率を18.6%及び6.9%と発表したことを得た。式(1)に連続鋳造比率を代入して算出した1995年及び2003年の y は、13.5%及び9.9%であった。そこで、1995年及び2003年の補正係数は、それぞれ18.6%を13.5%で除すことにより1.377と、6.9%を9.9%で除すことにより0.6966と得た。1994年以前、1996年から2003年の間、2004年以降の補正係数は、補正係数の経年の変化率が一定のまま推移したと仮定して導出した。製鋼工程において投入されたスクラップ量から、推計した自家発生スクラップ発生量、2・1において推計した加工スクラップ出荷量、輸入スクラップ量を減じて、老廃スクラップ回収量を得た。以上のように日本、中国、韓国、台湾の自家発生スクラップ発生量、加工スクラップ出荷量、老廃スクラップ回収量を推計した。

2.3 老廃スクラップ回収量推計モデルの構築

本論文において、2つの老廃スクラップ回収量推計モデルを用いた。1つはPBM²⁵⁾であり、もう1つはリーチングモデル²⁶⁾である。前者は式(2)のように、ある年(t 年)の用途別老廃スクラップ回収量 $O_{PBM}(t)$ を、用途毎の寿命分布 $g(a)$ と回収率 C_{PBM} を設定し、当該年以前の用途別鋼材投入量 $I(t-a)$ から推計する手法である。ここで、 a は製品の使用年数、 a_{max} は製品の最大寿命である。後者は式(3)のように、鉄鋼蓄積量 $S(t)$ に対する老廃スクラップ回収量の割合(老廃スクラップ発生率) $C_{Leaching}$ を用いて老廃スクラップ回収量 $O_{Leaching}(t)$ を推計する手法である。

$$O_{PBM}(t) = C_{PBM} \times \sum_{a=0}^{a_{max}} I(t-a)g(a) \dots\dots\dots(2)$$

$$O_{Leaching}(t) = C_{Leaching} \times S(t) \dots\dots\dots(3)$$

日本、韓国、台湾にPBMを適用する際に設定したパラメーターをTable 1に示す。

まず、日本について以下のようにパラメーターを設定した。建築用として社会に投入された鋼材の寿命分布関数は小松らによる研究報告²⁷⁾における鉄骨造事務所の平均年数から得た。土木用として社会に投入された鋼材の寿命分布関数は、平均年数を国土交通白書²⁸⁾から、耐用年数表の単純平均として得て関数の形を建築用と同様とした。機械用として社会に投入された鋼材の平均寿命は戸井らによる研究報告²⁹⁾から得た。乗用車用として社会に投入された鋼材の寿命分布関数は醍醐らによる研究報告³⁰⁾から得た。トラック・バス用として社会に投入された鋼材の寿命分布関数は著者らによる研究報告³¹⁾から得た。容器用として社会

Table 1. Lifetime distribution functions for each product in Japan, South Korea and Taiwan.

	Average life time [year]	Collection ratio	Reference	
Japan	Buildings	28.9	70%	27
	Infrastructure	34.5	30%	28
	Machinery	12.1	80%	25,29
	Passenger cars	11.9	85%	30,32,33
	Trucks	14.1	85%	31-33
	Containers	Annual collection	89%	2,34
	Other products	12.1	50%	15,29
South Korea	Buildings	17	79%	35
	Infrastructure	50	39%	
	Machinery	12.1	89%	
	Automobiles	12.8	94%	
	Containers	3	98%	
	Other products	12.1	59%	
Taiwan	Construction	30	37%	35
	Machinery	5	67%	
	Automobiles	16.4	72%	
	Containers	3	11%	38
	Other products	5	37%	

に投入された鋼材の寿命分布関数は醍醐らによる研究報告²⁾から得た。その他用の主な用途は次工程用であることがヒアリング調査⁶⁾からわかっている。次工程用は、具体的には、ばね、金型、ネジ等として用いられ¹⁵⁾、機械製品として最終的に社会に投入される量が多いと考えられる。そこで、その他用として社会に投入された鋼材の寿命分布関数を、機械用として社会に投入された鋼材の寿命分布関数と同様と仮定して得た。分布関数は全用途においてワイブル分布とした。機械用途からの使用済み鋼材排出量に対する老廃スクラップ回収率は角館らによる研究報告²⁵⁾から得た。乗用車用途及びトラック・バス用途からの使用済み鋼材排出量に対する老廃スクラップ回収率は、1990年から2001年までは高度技術集約型産業等研究開発調査報告書³²⁾より、2002年から2004年までは財務省輸出統計³³⁾より輸出台数を得ることにより得た。1990年から2004年までの容器用途からの使用済み鋼材排出量に対する老廃スクラップ回収率はスチール缶リサイクル協会ホームページ³⁴⁾から得た。その他用途からの老廃スクラップ回収率は、寿命分布関数と同様に機械用途と同値であるとした。建築用途及び土木用途からの使用済み鋼材排出量に対する老廃スクラップ回収率はヒアリング調査⁶⁾により、それぞれ70~80%、30~40%と得た。

以上のように決定したPBMを、用途別鋼材投入量に適用し、現在までの用途別老廃スクラップ回収量を得た。得られた結果を、2・2において老廃スクラップ回収量と、1990年から2004年までの15年間において比較した結果を、Fig. 1(a)に示す。建築用途及び土木用途からの使用済み鋼材排出量に対する老廃スクラップ回収率は、それぞれ70%及び30%とし、その他用途の老廃スクラップ回収率を50%と設定したところ、下図のように統計値と推計値が合致した。

次に、韓国について以下のようにパラメーターを設定した。土木用として社会に投入された鋼材の平均寿命は日本における法定耐用年数³⁵⁾である50年とした。同様に容器

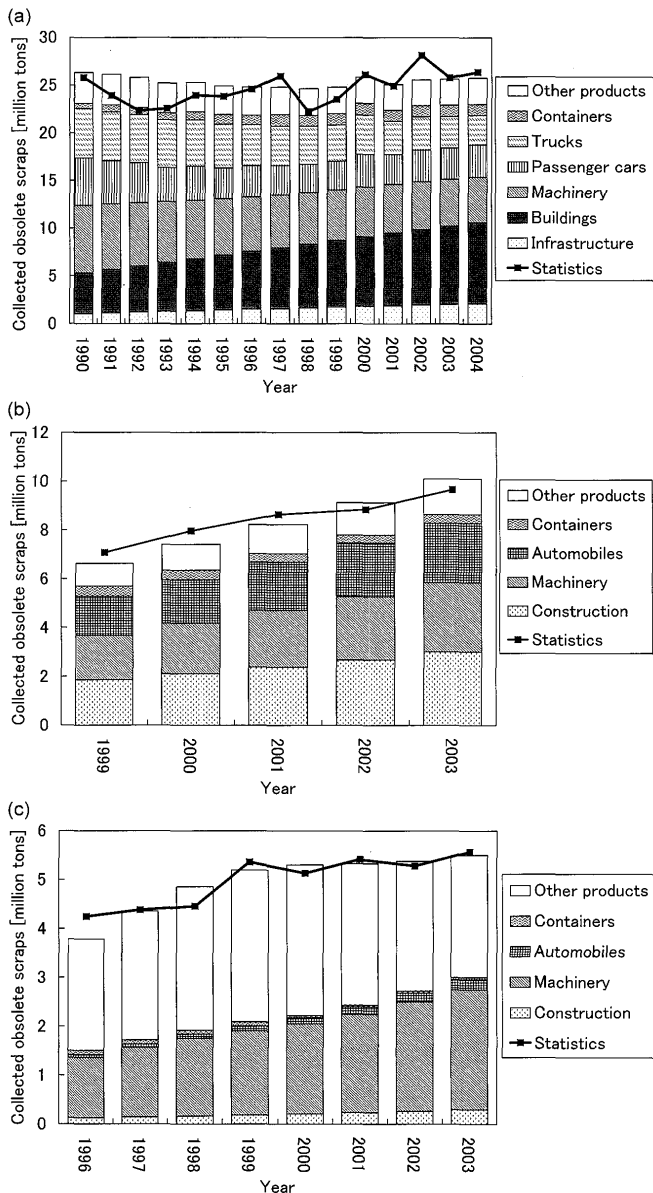


Fig. 1. Statistics and estimation of collected obsolete scraps in (a) Japan, (b) South Korea, (c) Taiwan.

用として社会に投入された鋼材の平均寿命は3年であるとした。機械用として社会に投入された鋼材の平均寿命は日本と等しく12.1年とした。自動車用として社会に投入された鋼材の寿命分布は以下のように推計した。2・1に記したように、自動車の生産台数、輸出台数、輸入台数を統計等から推計した。自動車保有台数の推移を韓国建設交通省の発表資料³⁶⁾から得た。ある年の自動車廃棄台数は、一年前から当該年にかけての保有台数の変化と当該年の新規登録台数(生産台数+輸入台数-輸出台数)から導出することができる。そこで、新規登録台数にPBMを適用した際に廃棄台数を導出できるように平均寿命をTable 1のように決定した。この時、経年による平均寿命の変化は日本と同様とした。建築用として社会に投入された鋼材の平均寿命は、以下のように推計した。韓国建設交通省のホームページ³⁷⁾から一人当たり住宅占有面積及び住宅着工面積を

得た。一人当たり住宅占有面積に人口を乗じて、住宅占有面積を求めることができる。ある年の滅失面積は、一年前から当該年にかけての住宅占有面積の変化と当該年の住宅着工面積から導出することができる。そこで、住宅着工面積にPBMを適用した際に滅失面積を導出できるように平均寿命をTable 1のように決定した。ワイブル分布において、平均寿命の他に形状母数と呼ばれるパラメーターが必要となるが、形状母数は得られなかったため、日本における用途別の寿命分布関数の形状母数が3から4の間であったことから全用途一律で平均値の3.5を採用した。その他用として社会に投入された鋼材の寿命分布は日本と同様に、機械用として社会に投入された鋼材の寿命分布と等しいとした。直近の5年間に於いて、統計等から推計した老廃スクラップ回収量とPBMの推計結果の残差平方和が最小となるように回収率をTable 1と決定した。この時、日本における老廃スクラップの回収率と上記回収率の差を各用途において一定であると仮定した。

以上のように決定したPBMを、用途別鋼材投入量に適用し、現在までの用途別老廃スクラップ回収量を推計した。Table 1に示した通り、建築用途の寿命分布関数は土木用途と別に推計することができた。日本において近年建築用鋼材投入量と土木用鋼材投入量の比がおおよそ2:1で推移していることから、この比を用いて建設用鋼材投入量を建築用鋼材投入量と土木用鋼材投入量に按分した。得られた結果を2・2において推計した老廃スクラップ回収量と、1999年から2003年までの5年間に於いて比較した結果を、Fig. 1(b)に示す。

最後に、台湾について以下のようにパラメーターを設定した。これまで、台湾における老廃スクラップ回収量は著しく増加してきたが、近年ほぼ横ばいに推移している。旺盛なスクラップ需要に対して回収率が減少することが考えにくい。そこで、老廃スクラップ回収量の変化を導出することができるように機械用として社会に投入された鋼材の平均寿命を5年と決定した。建設用として社会に投入された鋼材の平均寿命は日本における法定耐用年数³⁵⁾である30年とした。同様に容器用として社会に投入された鋼材の平均寿命は3年であるとした。2・1に記したように、自動車の生産台数、輸出台数、輸入台数を統計等から推計した。自動車保有台数の推移を「台湾の自動車産業の概要」²⁰⁾及び「台湾における自動車メーカーの企業数と産業政策との関連について」²¹⁾から得た。ある年の自動車廃棄台数は、一年前から当該年にかけての保有台数の変化と当該年の新規登録台数(生産台数+輸入台数-輸出台数)から導出することができる。そこで、新規登録台数にPBMを適用した際に廃棄台数を導出できるように平均寿命をTable 1と決定した。この時、経年による平均寿命の変化は日本と同様とした。形状母数は得られなかったため、日本における用途別の寿命分布関数の形状母数が3から4

の間であったことから全用途一律で平均値の3.5を採用した。容器用からの使用済み鋼材の回収率はYuh-Ming Leeらの研究報告から11%と設定した³⁸⁾。その他用として社会に投入された鋼材の寿命分布は日本と同様に、機械用として社会に投入された鋼材の寿命分布と等しいとした。直近の5年間に於いて、統計等から推計した老廃スクラップ回収量とPBMの推計結果の残差平方和が最小となるように容器用からの使用済み鋼材以外の用途からの使用済み鋼材回収率をTable 1と決定した。この時、各用途において日本における老廃スクラップの回収率と上記回収率の差を一定であるとした。

以上のように決定したPBMを、用途別鋼材投入量に適用し、現在までの用途別老廃スクラップ回収量を得た。得られた結果を2・2において推計した老廃スクラップ回収量と、1999年から2003年までの5年間に於いて比較した結果を、Fig. 1(c)に示す。

リーチングモデルを適用するにあたり、中国について以下のようにパラメーターを決定した。

$$\text{Stock}(t) = \text{Stock}(t_0 - 1) + \sum_{x=t_0}^t (I(x) - O(x)) \dots\dots\dots(4)$$

ここで、Stock(*t*):ある年 (*t*年)における鉄鋼蓄積量、*t*₀:鋼材蓄積開始年、*I*(*x*):*x*年における鋼材の社会投入量、*O*(*x*):*x*年における老廃スクラップ回収量である。

式(4)を用いて2004年までの鉄鋼蓄積量を推計した。式(4)を用いて鉄鋼蓄積量を推計するためには、Stock(*t*₀-1)を0と見なすことができる*t*₀を設定する必要がある。後述する指数関数近似した鉄鋼蓄積増分が1000トン以下となる1926年を*t*₀とした。*I*(*x*)は、2・1において推計した1949年から2004年までの鋼材投入量である。老廃スクラップ回収量である*O*(*x*)は以下のように推計した。まず、1949年から2004年までの中国における粗鋼生産量を得た⁹⁾。1982年以前の製鋼工程におけるスクラップ投入原単位を1983年の値で一定で推移していたと仮定し、1949年から2004年までのスクラップ総回収量を得た。さらに、1992年以前の自家発生スクラップ発生率を1993年の値で一定で推移していたと仮定し、1949年から2004年までの自家発生スクラップ発生量を得た。ところで、1984年以前におけるスクラップ輸入量及び輸出量は、スクラップ総回収量と比較して無視できるほど小さいと考えられるため、0とした。以上の推計結果から、2・2における手法を用いて1949年から2004年までの老廃スクラップ回収量を推計した。鋼材投入量から老廃スクラップ回収量を減じて、鉄鋼蓄積増分を算出することができる。1949年から1960年までの鉄鋼蓄積増分を指数関数近似することにより、1926年から1948年までの鉄鋼蓄積増分を推計した。以上のように推計したデータから1926年から2004年までの鉄鋼蓄積量を推計した。中国においては五ヵ年計画が発表さ

れている。中国の五ヵ年計画に基づいた2010年における粗鋼生産量及び鋼材投入量を、冶金工業企画研究院がそれぞれ4億4000万トン及び4億2000万トンと推計している¹⁾。そこで、この推計に基づいて、2005年から2010年までの鋼材投入量を決定した。この時、2005年から2010年までの年ごとの変化率が一定のまま推移したと仮定した。以上の結果から、式(3)を用いて2005年から2010年までの鉄鋼蓄積量を推計した。この時、式(3)中の老廃スクラップ発生率*C*_{Leaching}は2004年の値(0.00667)で一定のまま推移すると仮定した。

3. 結果と考察

3.1 鋼材投入量の将来予測

本研究においては、3つの推計手法を用いて将来の鋼材投入量を推定した。

1つ目は、著者らによる研究報告²⁾で用いられてきた手法で、現在のまま鋼材需要が一定で推移するとして将来の鋼材投入量を推計する手法である。具体的には、推計した現在までの鋼材投入量のうち、直近の年における鋼材投入量と等しい値で将来にかけて鋼材投入量が推移するとした。

2つ目は、式(5)に示すロジスティック曲線を用いて現在までの鉄鋼蓄積量の推移を回帰し、将来の鉄鋼蓄積量を予測する推計手法である³⁹⁾。

$$S_t = \frac{S_{\max}}{1 + e^{\beta_0 - \beta t}} \dots\dots\dots(5)$$

ここで、*S*_{*t*}:鉄鋼蓄積開始年から*t*年後の鉄鋼蓄積量、*S*_{max}:鉄鋼蓄積量の収束値、*β*₀および*β*:パラメーター、*t*:鉄鋼蓄積開始年からの経過年数である。本研究において*S*_{max}は14t/人と設定した。これは、米国の一人当たりの鉄鋼蓄積量が近年ほぼ一定(14t/人)で推移している⁴⁰⁾ためである。鉄鋼蓄積量の変化量が式(6)で表されるように鋼材投入量と老廃スクラップ回収量の差であることから、将来の鋼材投入量を推計することができる。

$$\frac{dS(t)}{dt} = \text{Inflow}(t) - \text{Outflow}(t) \dots\dots\dots(6)$$

ここで*dS*(*t*)/*d*_{*t*}:ある年 (*t*年)における鉄鋼蓄積量の変化、*Inflow*(*t*):ある年 (*t*年)における鋼材の社会投入量、*Outflow*(*t*):ある年 (*t*年)における老廃スクラップ回収量である。

中国と、日本、韓国及び台湾とで具体的な手法は異なる。中国においては、まず、ロジスティック曲線を用いて鉄鋼蓄積量を回帰し、将来の鉄鋼蓄積量を推計した。次に、推計した将来の鉄鋼蓄積量からリーチングモデルを用いて将来における老廃スクラップ回収量を導出した。最後に、将

Table 2. Parameters for logistic curves.

	β_0	β
Japan	6.878	0.06907
China	8.376	0.08422
South Korea	10.11	0.1258
Taiwan	11.87	0.1771

Table 3. Regression equations for each product in each country.

	Regression equation	R ²	
Japan	Buildings	S/capita = 4000/(1 + exp(3.1 - 0.011GDP/capita))	0.98
	Infrastructure	S/capita = 3000/(1 + exp(2.4 - 0.008GDP/capita))	0.98
	Machinery	Input/capita = 4.85 * 10 ² / GDP/capita + 51.0	0.37
	Passenger cars	Use/capita = 600/(1 + exp(3 - 0.009GDP/capita))	0.96
	Trucks	Use/capita = 0.888 / GDP/capita - 0.00786	0.32
	Containers	Input/capita = 0.0458GDP/capita - 7.17	0.78
	Other products	Input = 0.800Input_M + 1.68*10 ⁵	0.47
China	Construction	Input = -3765 + 1226GDP/capita	0.86
	Machinery	Input = 6626 + 235GDP/capita	0.27
	Automobiles	Input = -721 + 135GDP/capita	0.73
	Containers	Input = 340 + 16GDP/capita	0.51
	Other products	Input = -10053 + 6550GDP/capita	0.82
South Korea	Construction	Input = -2602 + 1.71GDP/capita	0.92
	Machinery	Input = -368 + 0.48GDP/capita	0.79
	Automobiles	Input = -136 + 0.405GDP/capita	0.75
	Containers	Input = -59 + 0.0452GDP/capita	0.91
	Other products	Input = -224 + 0.262GDP/capita	0.83
Taiwan	Construction	Input = -1182 + 0.255GDP/capita	0.97
	Machinery	Input = -578 + 0.115GDP/capita	0.86
	Automobiles	Input = -173 + 0.0298GDP/capita	0.86
	Containers	Input = -30 + 0.0181GDP/capita	0.7
	Other products	Input = -389 + 0.153GDP/capita	0.85

来のある年における鋼材投入量は、当該年の一年前から当該年にかけての鉄鋼蓄積増分に、当該年の老廃スクラップ回収量を加えることにより得た。日本、韓国及び台湾においては、まず、ロジスティック曲線を用いた回帰式により、将来の鉄鋼蓄積量を推計した。次に、現在までの鋼材投入量にPBMを適用し、一年後の老廃スクラップ回収量を推計した。現在から一年後にかけての鉄鋼蓄積増分に、一年後の老廃スクラップ回収量を加えることにより、一年後の鋼材投入量を得た。そして、一年後までの鋼材投入量にPBMを適用し、二年後の老廃スクラップ回収量を推計した。以上の手順を繰り返すことにより、将来の鋼材投入量及び老廃スクラップ回収量を推計した。鉄鋼蓄積量を回帰したロジスティック曲線に用いたパラメーターをTable 2に示す。

3つ目は、用途別の鋼材投入量を、国内総生産(Gross Domestic Product, GDP)や人口を説明変数とした回帰式で表し、GDPや人口の将来動向を設定することにより、用途別に鋼材投入量を推計する手法である。まず、日本におけるGDPや人口等を説明変数とし、用途別鋼材投入量を目的変数とした回帰式を説明変数としてGDP及び人口を取ることとした。最後に、回帰分析により、用途ごとの回帰式の係数を決定した。Table 3に示す。得られた回帰式にGDPの将来推計^{41,42)}及び人口の将来推計^{23,43-45)}を代入することで、用途別鋼材投入量の将来推移を決定することができた。

以上のように、3つの推計手法に基づいた鋼材投入量の将来推移をFig. 2(a), (b), (c), (d)に示す。

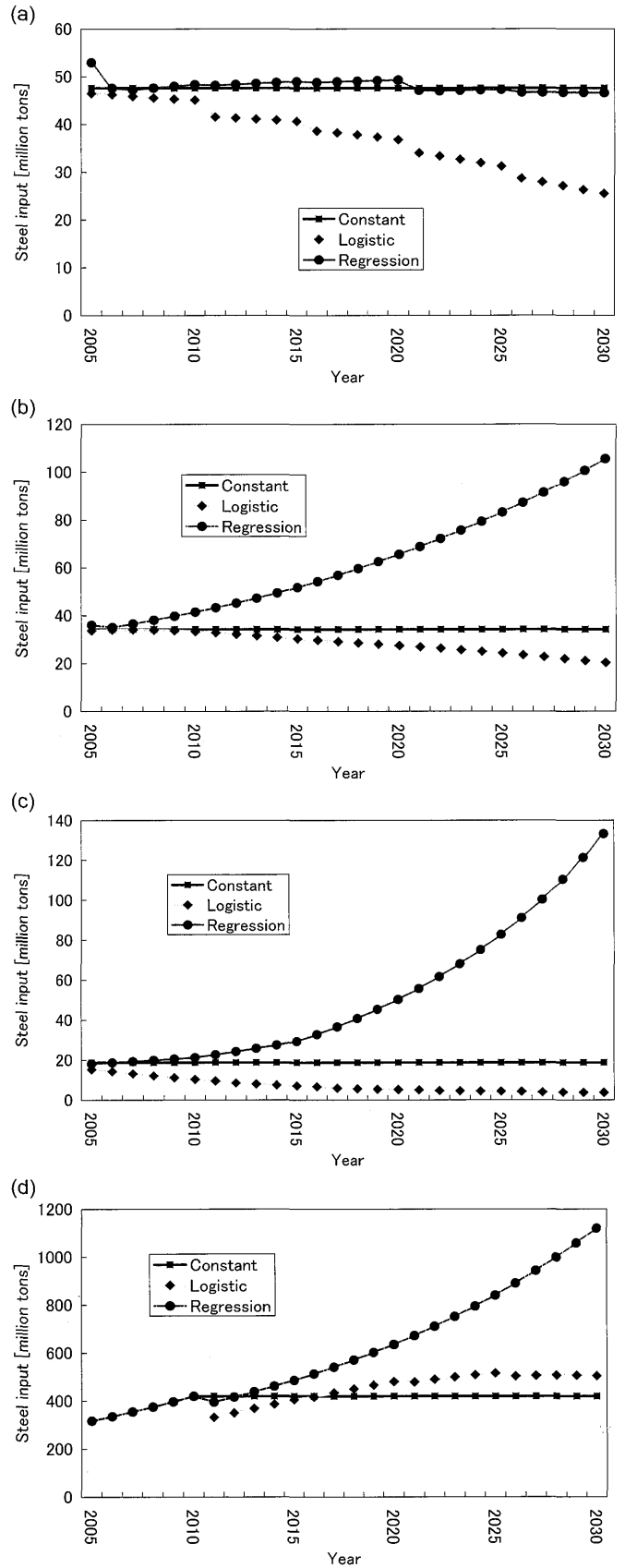


Fig. 2. Amount of future steel input predicted by three methods in (a) Japan, (b) South Korea, (c) Taiwan, (d) China.

ロジスティック曲線を用いた推計手法の下においては、中国における鋼材投入量がゆるやかに増加するのに対して、日本、韓国、台湾における鋼材投入量はゆるやかに減少することが推計された。これは、次の理由によるものである。現在、日本、中国、韓国、台湾の一人当たり鉄鋼蓄積量は、それぞれ10t、2.0t、8.0t、12t程度である。ロジスティック曲線において、一人当たり鉄鋼蓄積量は14tで収束することとなるため、7tまでは一人当たり鉄鋼蓄積量の増分が増加し、7tを超えると一人当たり鉄鋼蓄積量の増分が減少していくこととなる。そのため、日本、韓国、台湾において今後鋼材投入量が減少する結果となった。

回帰分析を用いた推計手法の下においては、日本における鋼材投入量がほぼ一定で推移するのに対して、中国、韓国、台湾における鋼材投入量は著しく増加することが推計された。しかしながら、現在各国が持っている高炉の基数と比較しても、著しく増加した中国、韓国、台湾における2030年の鋼材投入量は、実現が非常に困難である数値と言える。

これまで、マテリアルフロー解析における将来の需要推計には主に回帰分析が用いられてきた³⁻⁵⁾。しかしながら、単純に過去の傾向から将来の推移を予測する回帰分析を、近年急速に鋼材投入量を増加させてきた中国、韓国、台湾に適用することは困難であることが示された。

3.2 将来における老廃スクラップ回収量の推計

3.1において推計した将来の鋼材投入量を2.3において構築した老廃スクラップ回収量推計モデルに代入し、将来の老廃スクラップ回収量を推計した。Fig. 3(a), (b), (c), (d)に示す。なお、PBMを適用した日本、韓国、台湾については、ロジスティック曲線を用いて推計した鋼材投入量に基づいた老廃スクラップ回収量のみ用途別に示した。

図に示したように、鋼材投入量の推計手法の違いによって、老廃スクラップ回収量の推計結果が大きく異なった。このことから、さらなる鋼材投入量推計手法の精緻化が必要であると言える。鋼材投入量とGDPの相関については既に報告があるため^{3,4)}、以下、ロジスティック曲線を用いて推計した鋼材投入量の下で導出した老廃スクラップ回収量の将来推移について詳細に記す。

日本における老廃スクラップ回収量は、今後緩やかに増加し2020年に3300万トンを超えた後減少し、2030年には3100万トン程度となることが推計された。韓国における老廃スクラップ回収量は、今後緩やかに増加し、2023年に2100万トン程度となった後減少し、2030年には2000万トン程度となることが推計された。ロジスティック曲線を用いて推計した鋼材投入量は、日本においては2005年以降、韓国においては2008年以降減少する結果となったにもかかわらず、その老廃スクラップ回収量は2020年頃までは鋼材投入量を一定とした場合の老廃スクラップ回収量とほとんど変わらないことが分かった。これは、鋼材投入

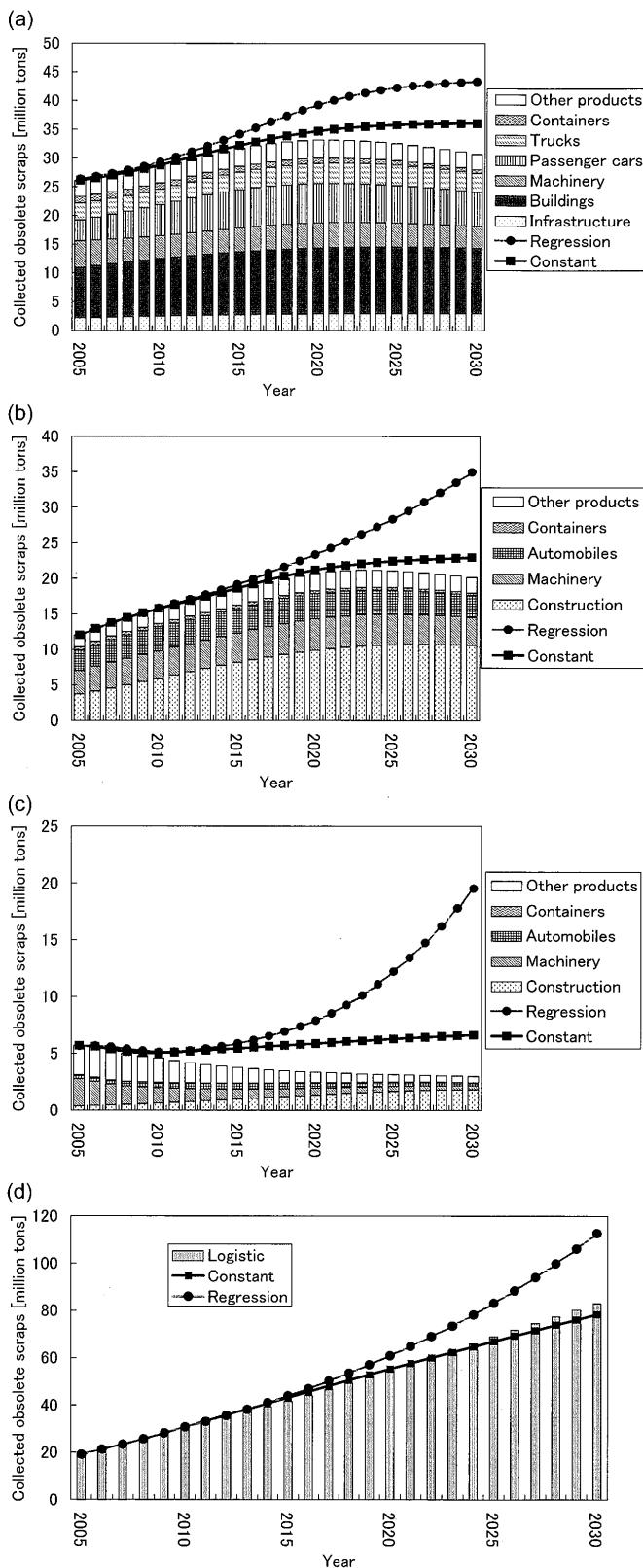


Fig. 3. Amount of future collection of obsolete scraps estimated by three methods in (a) Japan, (b) South Korea, (c) Taiwan, (d) China.

量の減少が遅れを持って老廃スクラップ回収量に影響を与えたためである。用途別に見ると、日本においては乗用車用途及び建築用途から今後老廃スクラップ回収量が増加することが予測された。これは、全鋼材投入量がほぼ一定で

推移する中で、乗用車用途の鋼材投入量が増加していたこと、建築用途として社会に投入された鋼材の平均寿命が非常に長いことが理由として挙げられる。同様に用途別に見ると、韓国においても今後非常に寿命の長い建設用途からの老廃スクラップ回収量が増加し、その増加が全老廃スクラップ回収量の増加のほとんどを占めることがわかった。

台湾における老廃スクラップ回収量は、緩やかに減少し、2030年には300万トン程度となることが推計された。機械用途及びその他用途からの老廃スクラップ回収量は著しく減少し、建設用途及び自動車用途からの老廃スクラップ回収量は増加することがわかった。鋼材投入量は2004年以降減少することがFig. 3(c)に示したように予測されたが、平均寿命の長い建設用途ほど減少傾向が現れるのが遅く、平均寿命の短い機械用途ほど減少傾向が速く現れた。

中国においては、老廃スクラップ回収量が2030年に8000万トンを超えることが推計された。中国についてはリーチングモデルを適用したため、鉄鋼蓄積量の変化がそのまま老廃スクラップ回収量の変化となる。将来における鋼材投入量を一定と仮定してリーチングモデルを適用した際の老廃スクラップ回収量の結果と、このロジスティック曲線を用いて推計した鋼材投入量にリーチングモデルを適用した際の老廃スクラップ回収量の結果にはさほど変わりはないことがわかった。

なお、ロジスティック曲線を用いて推計した鋼材投入量の下では、中国においては、2021年、韓国においては2010年、台湾においては2006年にスクラップ回収量がスクラップ需要量を上回ることが分かった。

4. 結論

本論文において、PBMとリーチングモデルを併用した一般化したマテリアルフローモデルを構築することができた。そこでは、日本、韓国、台湾についてはPBMを用いて、中国についてはリーチングモデルを用いて、用途別に老廃スクラップ回収量推計モデルを構築することができた。

さらに、3つの鋼材投入量推計手法を提案し、老廃スクラップ回収量の将来推移を推計することができた。この時、鋼材投入量の推計手法の違いにより老廃スクラップ回収量の推計結果が大きく異なったため、鋼材投入量の推計には更なる精緻化が必要であると言える。ロジスティック曲線を用いて推計した鋼材投入量の下においては、2030年に老廃スクラップ回収量が、日本において2900万トン、中国において8300万トン、韓国において2000万トン、台湾において370万トンとなることが分かった。

なお、本研究は、文部科学省科学研究費補助金（基盤研究C）の交付によって遂行させていただいたものである。付記して謝意を表す。

文 献

- 1) 環太平洋圏における鉄源需給の現状と展望，社団法人日本鉄源協会編，社団法人日本鉄源協会，東京，(2006)，25，26，33，42，110，111，124.
- 2) I.Daigo, D.Fujimaki, Y.Matsuno and Y.Adachi: *Tetsu-to-Hagané*, **91** (2005), 171.
- 3) D.P.van Vuuren, B.J.Strengers and H.J.M.De Vries: *Resour. Policy*, **25** (1999), 239.
- 4) P.Crompton: *Resour. Policy*, **26** (2000), 103.
- 5) A.Elshkaki, E.Van der Voet, M.Van Holderbeke and V.Timmermans: *Resour., Conserv. Recycl.*, **42** (2004), 133.
- 6) (株)日鉄技術情報センター，私信，(2006).
- 7) クォーターリーてつげん，社団法人日本鉄源協会編，社団法人日本鉄源協会，東京，24，(2005)，19.
- 8) 鉄鋼統計年報，通商産業大臣官房調査統計部編，日本鉄鋼連盟，東京，(1954-1970).
- 9) 鉄鋼統計要覧，社団法人日本鉄鋼連盟編，社団法人日本鉄鋼連盟，東京，(2005)，74，75，84，85.
- 10) 世界主要国鉄鋼ハンドブック第1版-第8版，日本鉄鋼輸出組合編，日本鉄鋼輸出組合，東京，(1984-2001).
- 11) 中国機械工業年鑑，中国機械工業年鑑編集委員会編，機械工業出版社，北京，(2004)，19，67，557.
- 12) 中国電子工業年鑑，中国電子工業年鑑編集委員会編，電子工業出版社，北京，(1999)，24.
- 13) 中国電子工業年鑑，中国電子工業年鑑編集委員会編，電子工業出版社，北京，(2004)，17，21，22.
- 14) 中国機械工業年鑑，中国機械工業年鑑編集委員会編，機械工業出版社，北京，(2003)，530.
- 15) 鉄鋼用途別・地域別受注統計の手引き，社団法人日本鉄鋼連盟編，鉄鋼統計委員会用途別統計委員会，東京，(1991)，135.
- 16) *Steel Statistical Yearbook*, International Iron and Steel Institute (IISI), Brussels, (1983-2004).
- 17) 鉄源年報(2006)，社団法人日本鉄源協会編，社団法人日本鉄源協会，東京，(2006)，52.
- 18) *World Motor Vehicle Statistics 2006*，日本自動車工業会編，日本自動車工業会，東京，(2006)，5,123,145.
- 19) 台湾区車両工業同業公会ホームページ，<http://www.ttvma.org/information.php> アクセス日2006年11月15日
- 20) 日台ビジネスステーションホームページ，https://www.jptwbiz-j.jp/bizinfo_j/tmk_j/pdf/topics/tp030219_j.pdf アクセス日2006年11月15日
- 21) N.Jumpei: *Doshisha Univ. World Wide Bus. Rev.*, **3** (2002); 20.
- 22) 台湾経済総覧，日僑通訳出版社編，日僑通訳出版社，台北，(2005)，328.
- 23) 台湾総覧，台湾問題研究所，台湾問題研究所，東京，(2001)，24，412.
- 24) W.Tamaki, Y.Igarashi, D.Fujimaki, S.Hayashi, Y.Tomota, Y.Matsuno and T.Nagasaka: *Tetsu-to-Hagané*, **92** (2006), 334.
- 25) K.Kakudate, Y.Adachi and T.Suzuki: **86** (2000), 837.
- 26) E.van der Voet, R.Kleijn, R.Huele, M.Ishikawa and E.Verkuiljen: *Ecol. Econ.*, **41** (2002), 223.
- 27) Y.Komatsu, Y.Kato, T.Yoshida and T.Yashiro: *J. Archit. Plan. Environ. Eng., AIJ*, No. 439, (1992), Sep.
- 28) 国土交通白書 H17年版，国土交通省編，ぎょうせい，東京，(2006).
- 29) A.Toi and J.Sato: *Energy Resour.*, **18** (1997), 271.
- 30) Y.Adachi, I.Daigo, H.Yamada and Y.Matsuno: *Dev. Eng.*, **11** (2005), 19.
- 31) 藤巻大輔：東京大学大学院工学系研究科修士論文，(2006).
- 32) 高度技術集約型産業等研究開発調査報告書，日本自動車研究所，東京，(2003)，13.
- 33) 財務省輸出統計ホームページ，<http://www.customs.go.jp/toukei/info/index.htm> アクセス日2006年12月3日
- 34) スチール缶リサイクル協会ホームページ，<http://www.steelcan.jp/> アクセス日2006年12月1日
- 35) 高岸秀俊：減価償却資産の耐用年数表とその使い方 15年版，日本法令，東京，(2003)，28.
- 36) Ministry of Construction & Transportation, Korea, Website. <http://minwon.moct.go.kr/Civil/Search/EngListMain.jsp?QU=&FD=0&CCH=1&DT1=&DT2=&SH=0&PART=&LC=10&CT=3&FD2=&>

PG=3 アクセス日2006年12月5日

- 37) Ministry of Construction & Transportation, Korea, Website. <http://www.moct.go.kr/EngHome/DataCenter/Statistic/Statistic01.htm?oneDep=4&twoDep=42> アクセス日2006年12月5日
- 38) Y.-M.Lee, A.M.-J.Cheng and C.-L.Su, *Eco Balance 要旨集*, (2006), 385.
- 39) A.Toi and J.Sato: *Tetsu-to-Hagané*, **84** (1998), 534.
- 40) 資源と環境を考慮した素材戦略モデル開発に関するシンポジウム, 社団法人日本鉄鋼協会編, 社団法人日本鉄鋼協会, 東京, (2007), 18.
- 41) 人口が変えるアジア, 社団法人日本経済研究センター, 社団法人日本経済研究センター, 東京, (2007), 145.
- 42) 京都大学環太平洋データベースホームページ, <http://www.econ.kyoto-u.ac.jp/pacific/> アクセス日2006年12月20日
- 43) 日本の統計2006, 総務省統計研修所編, 総務省統計局, 東京, (2006).
- 44) United Nations, Website. <http://esa.un.org/unpp/> アクセス日2006年12月10日
- 45) Korean Statistical Information Service, Website. <http://kosis.nso.go.kr/Magazine/NEW/PJ/PJ0104.xls> アクセス日2006年12月10日