

マルコフ連鎖モデルを適用した鉄元素のライフサイクルにおける平均使用回数ならびに社会での平均滞留時間の解析手法の構築

醍醐 市朗^{*,*2}・松野 泰也^{*}・石原 慶一^{*2}・足立 芳寛^{*}

Development of Methodology for Analyzing the Average Number of Times of Use and the Average Residence Time of Iron Element in Society by Applying Markov Chain Model

Ichiro DAIGO, Yasunari MATSUNO, Keichi N. ISHIHARA and Yoshihiro ADACHI

Synopsis : The life cycle of steel begins in the mining of iron-ore from the earth. Steels are produced in steel works and used in various products. Some of the steels are recycled at the end-of-life of the products and used as a resource for the production of steel products in electric furnace, while the other steels are used just one time in products and go into landfill. As the recycle ratios of steel from used products increase, the average number of times of use and residence time of Iron element that comes into society as iron ore and goes out from the society as landfill will increase. So these values indicate "sustainability of material use" in a society. In this work, a methodology was developed for analyzing the average number of times of use and residence time of Iron element in a society by applying Markov chain model. It was calculated that the average number of times of use and residence time of Iron element in a society based on the material flow of steels in Japan in 2000 are 2.67 and 62.9 years, respectively. Both of these values are significantly dependent on the recycle ratio of steels from civil & building facilities and automobiles. It was indicated that the average number of times of use and residence time of Iron element in a society would increase up to 3.17 and 75.8 if the recycle ratio of steels from civil and building facilities increase from 50 to 60%.

Key words: Markov chain, number of times of use, material flow, recycling, residence time, steel

1. 緒言

鋼材のライフサイクルは、鉄鉱石が地中から採掘されることに始まる。採掘された鉄鉱石を原料として一貫製鉄所において転炉鋼材が生産される。転炉鋼材には、一度だけ製品に使用され廃棄されるものもあれば、ある製品に使用後回収され、電炉鋼材として再生されるものもある。電炉鋼材も同様に、ある製品に使用後回収され、再生されるものもある。その場合、鋼材に含有されている鉄元素(原子)は、繰り返し製品に使用されることになる。このように、ある年に地中から採掘された鉄元素が、その後どのような経路をたどり最終的に地中に廃棄されるかについては、確率論で解析することができる。

鉄元素が社会中に存在している状態とマテリアルフローは、Fig. 1に示すようにモデル化することができる。鉄元素は、社会中において様々な状態で存在し、Fig. 1に示すある状態から矢印で示す次の状態になる確率は、その間に絡むプロセスに依存し、プロセスに変化が無い限り一定の値となる。このように、次の状態になる確率

が今の状態により一意に決定される構造はマルコフ性と呼ばれ、そのような事象はマルコフ連鎖モデルにより解析できる¹⁾。マルコフ連鎖モデルは、待ち行列理論の中心的研究手法として知られている他、在庫モデルや分岐過程の

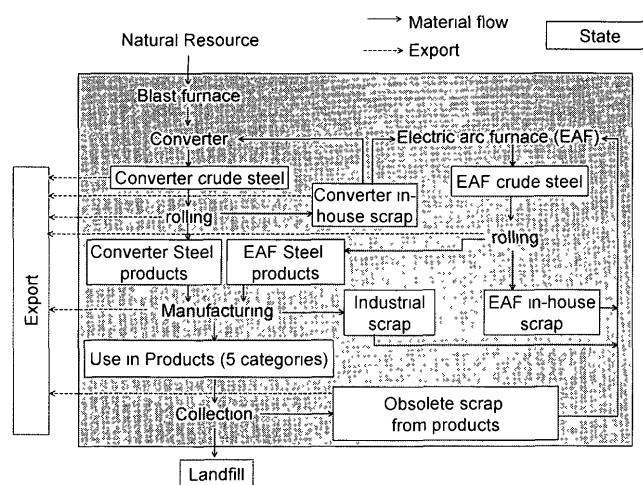


Fig. 1 Diagram of material flow and state of iron element

平成16年4月30日受付 平成16年8月11日受理 (Received on Apr. 30, 2004, Accepted on Aug. 11, 2004)

* 東京大学大学院工学系研究科 (Graduate School of Engineering, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo Bunkyo-ku Tokyo 113-8656)

*2 京都大学大学院エネルギー科学研究科 (Graduate School of Energy Science, Kyoto University)

解析に、最近ではクレジットリスク分析に用いられている^{1,2)}。

本研究では、マルコフ連鎖モデルを適用することにより、日本国内における鉄エレメントの滞留状況を検討することを目的とする。具体的には、国内において生産された転炉粗鋼が廃棄または輸出されるまでの、鉄エレメントの平均使用回数と社会での平均滞留年数を算出する。但し、後述するように、国内で生産された転炉鋼材は、国内で廃棄される前に輸出される確率が高い。そこで、国外での鋼材の利用状況が日本国内と同じであると仮定した場合の、国内で生産された転炉粗鋼が最終的に廃棄されるまでの、鉄エレメントの平均使用回数と社会での平均滞留年数についても算出する。さらに、求めた鉄エレメントのライフサイクルにおける平均使用回数から、鋼材の1回使用あたりの平均環境負荷誘発原単位を求める。

なお、本論文で構築した手法は、ある年における我が国の鉄のマテリアルフローから、その年における鋼材の利用状況を評価する指標として、平均使用回数および社会での平均滞留年数を導出するものである。過去の各年における生産履歴、用途別使用履歴および再資源化率に基づいて、実際の使用回数と社会での滞留年数を求めるものではない。また、国外での鋼材の生産・利用状況を反映した滞留状態の解析は、今後の課題とする。

2. マルコフ連鎖モデルを適用した鉄エレメントの社会での平均使用回数と平均滞留時間の解析

2.1 鉄エレメントの社会での滞留状態のモデル化

本研究において、鉄エレメントは、天然資源として日本

国内に流入し、全て転炉粗鋼になるとした。その後、転炉粗鋼は、鋼材、製品に使用の状態となる。また、自家発生スクラップ、加工スクラップとなる鉄エレメントもある。製品に使用された鋼材が、次の状態（廃棄、老廃スクラップ）に推移する確率は、製品毎に大きく異なる。これは主に、使用済み製品の回収率の違いによる。そこで本論文では、鋼材の用途を、土木・建設用鋼材、機械用鋼材、自動車用鋼材、容器用鋼材、その他用鋼材の5つに区分した。また、発生する老廃スクラップを電炉鋼材の生産に使用するには、発生源による用途の差異はないものとした。その他、輸出による、鉄エレメントの国内からの流出がある。輸出に関しては、粗鋼、半製品、製品、スクラップ、鋼材の間接輸出の全てを考慮した。また、流通量が微量であると考えられる加工スクラップと老廃スクラップの転炉への投入は考えなかった。スラグ中の鉄分も非常に微量なため、考慮に入れなかった³⁾。

以上から、本研究においては、鉄エレメントが国内に滞留する状態を、転炉粗鋼、転炉自家発生スクラップ、転炉鋼材、土木・建設用製品、機械用製品、自動車用製品、容器用製品、その他用製品、老廃スクラップ、電炉粗鋼、電炉自家発生スクラップ、電炉鋼材、加工スクラップの13に分類した。そしてさらに、輸出、廃棄を加え、合計15の状態に分類した。

2.2 マテリアルフローに基づく状態推移表の作成

前述した15の状態の分類に基づき、鉄鋼材のマテリアルフローから鉄エレメントの状態推移表を作成する。例として、2000年度の状態推移表をTable 1に示す。この表は、2000年度において鉄エレメントが、行で示す状態から列に示す状態へ推移した量を示している。

第1行は、転炉粗鋼の各状態への推移量を示している。

Table 1 State transition table of elemental iron (FY 2000).

Unit 1,000 t

		Converter crude steel	Converter in-house scrap	Converter Steel products	Use in construction	Use in machines	Use in cars	Use in containers	Use in other products	Obsolete scrap	EAF crude steel	EAF in-house scrap	EAF steel products	Industrial scrap	Export	Waste	Total
1	Converter crude steel	0	7,457	45,421	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	23,998	0	76,876
2	Converter in-house scrap	6,825	0	0	0	0	0	0	0	0	428	0	0	0	0	204	7,457
3	Converter Steel products	0	0	0	9,147	3,353	8,887	1,269	2,462	0	0	0	0	6,802	13,502	0	45,421
4	Use in construction	0	0	0	0	0	0	0	0	8,202	0	0	0	0	0	8,202	16,404
5	Use in machines	0	0	0	0	0	0	0	0	5,200	0	0	0	0	0	1,300	6,500
6	Use in cars	0	0	0	0	0	0	0	0	7,712	0	0	0	0	0	857	8,568
7	Use in containers	0	0	0	0	0	0	0	0	1,324	0	0	0	0	0	110	1,435
8	Use in other products	0	0	0	0	0	0	0	0	2,760	0	0	0	0	0	690	3,450
9	Obsolete scrap	0	0	0	0	0	0	0	0	0	22,324	0	0	0	2,874	0	25,198
10	EAF crude steel	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,977	27,348	0	3,578	0	33,903
11	EAF in-house scrap	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,977	0	0	0	0	0	2,977
12	EAF steel products	0	0	0	17,060	1,529	1,921	153	1,771	0	0	0	0	1,031	3,882	0	27,348
13	Industrial scrap	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8,663	0	0	0	0	0	8,663
14	Export	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	Waste	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

転炉自家発生スクラップ発生量、転炉鋼材生産量、輸出量は、統計および文献より得た^{4,6)}。第2行は、転炉自家発生スクラップの各状態への推移量を示している。自家消費量、電炉消費量は統計⁴⁾より得て、発生量との差分を輸出量とした。第3行は、転炉鋼材の各種用途製品^{5,6)}、それらの輸出⁶⁾、加工スクラップへの推移量を示している。加工スクラップ発生量は、統計値⁴⁾のうち電炉鋼材由来の量を推計した。第4行から第8行は、製品中の鋼材が回収され老廃スクラップとなるものと、非回収となるものへの推移量を示している。ここでは、まず、行和となる使用済み製品中の鋼材排出量を求め、各用途別の回収率 (Table 2)⁷⁾を乗じ、老廃スクラップ回収量と廃棄量を算出した。老廃スクラップは、過去からの生産履歴⁶⁾と寿命分布 (Table 2)からポピュレーションバランスモデル (PBM. Population Balance Model)^{7,8)}を用い算出し、これを各行和とした。なお、非回収分 (廃棄)とは、スクラップとしては視認されない土木用鋼材の埋設分や、他材と分離不能なことにより埋立てられるもの等である。第9行は、老廃スクラップから電炉粗鋼、輸出への推移量となっている。回収された老廃スクラップの輸出量は、統計⁴⁾におけるスクラップ輸出量から、先述の転炉自家発生スクラップ輸出量を引いた量とした。第10行は、電炉粗鋼の次の状態への推移量となっている。電炉においては、鉄源を区別することなく鋼材を生産すると仮定し、統計と既往調査^{4,6,9)}から得た電炉の生産割合に応じて電炉自家発生スクラップ、電炉鋼材、輸出になると

した。第11行、第13行は、電炉自家発生スクラップと加工スクラップの次の状態への推移量である。ともに全量が再び電炉に投入され、電炉粗鋼になるものとした。第12行は電炉鋼材の各種用途製品⁵⁾、それらの輸出⁶⁾、加工スクラップへの推移量を示している。加工スクラップ発生量は、転炉鋼材と同様、統計値⁴⁾のうち電炉鋼材由来の量を推計した。第14~15行は、輸出、廃棄から各状態への推移量であるが、輸出および廃棄された状態から他の状態へ推移することはないので、全要素が0となっている。

なお、原則として年度データを用いたが暦年データしか得られないものもあったため、行和が統計値と異なる場合もある。

2.3 推移確率行列の作成

鉄エレメントが、ある状態から次の状態に推移する際には、状態推移表 (Table 1) から得られる確率に基づき一意に決定されるとし、マルコフ連鎖モデルを適用した。以下のように、状態推移表から、鉄エレメントの状態推移確率行列を作成する。

正方行列*X*の各要素を*x_{ij}*、行和を*X_i*として、式(1)により算出される要素を成分に持つ正方行列*A*を求める。

$$a_{ij} = x_{ij} / X_i, (X_i \neq 0)$$

$$a_{ij} = 0, (X_i = 0)$$

..... (1)

行列*A*の要素*a_{ij}*は、状態*i*から状態*j*に推移する確率となるので、行列*A*は、鉄エレメントが属する状態*i*から1回の推移により次の状態*j*になる確率を示す、状態推移確率行列になっている。2000年度の状態推移表から作成された状態推移確率行列*A*をTable 3に示す。

ここで、*k*回の推移により状態*i*から*j*になる確率を表す関数を*P_{ij}(k)*と定義すると、ある状態*i*から1回の推移により状態*j*になる確率は、行列*A*の*ij*要素であるので、式(2)が成り立つ。

Table 2 Collection ratio, average lifetime and distribution function of each application.

Application	Collection ratio[%]	Average lifetime [Years]	Distribution function
Construction	50	30	Gamma
Machines	80	12	Normal
Automobiles	90	13	Gamma
Containers	92.3	1	-
Others	80	12	Normal

Table 3 Transition probability matrix *A* of iron by state (FY 2000)

	Converter crude steel	Converter in-house scrap	Converter Steel products	Use in construction	Use in machines	Use in cars	Use in containers	Use in other products	Obsolete scrap	EAF crude steel	EAF in-house scrap	EAF steel products	Industrial scrap	Export	Waste
Converter crude steel	0.00	0.10	0.59	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.31	0.00
Converter in-house scrap	0.92	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00
Converter Steel products	0.00	0.00	0.00	0.20	0.07	0.20	0.03	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.15	0.30	0.00
Use in construction	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.50
Use in machines	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20
Use in cars	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10
Use in containers	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.92	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08
Use in other products	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20
Obsolete scrap	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.89	0.00	0.00	0.00	0.11	0.00
EAF crude steel	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09	0.81	0.00	0.11	0.00
EAF in-house scrap	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
EAF steel products	0.00	0.00	0.00	0.62	0.06	0.07	0.01	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.14	0.00
Industrial scrap	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Export	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Waste	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

$$P_{ij}(1) = a_{ij} \dots \dots \dots (2)$$

ある年に生産され製品に使用された鋼材は、その後、製品寿命を経た年にスクラップとして排出され、鉄源として消費され、社会に再投入される。実際には、投入時と再投入時では、国内における鋼材の生産・消費構造は異なり、状態推移確率も異なる。しかしながら、本研究では、この状態推移確率が時間に依らず一定である（斉時的マルコフ連鎖）と仮定した。つまり、何回目の利用であっても、同じ消費構造を持つ社会に投入され、同じ状態推移確率により状態が推移するとした。従って、本論文で構築したモデルは、生産、消費および再資源化率の経年変化に即して、実際の使用回数と社会での滞留年数を求めるものではない。本モデルにより得られる平均使用回数および社会での平均滞留年数は、ある年における我が国の鋼材生産および消費、そしてスクラップの回収状況から、その年における鉄エレメントの滞留状態を評価する指標となる。

状態推移確率が時間に依らず一定としたことから、 k 回目の状態推移確率を表す行列は、行列 A を k 回乗じた行列 A^k となり（付録1）、その行列の要素を $[A^k]_{ij}$ と表すと、式（3）が成り立つ。

$$P_{ij}(k) = [A^k]_{ij}, (j \in W) \dots \dots \dots (3)$$

ただし W は、輸出および廃棄の状態を示している。

状態 j が W に属しているとき、 $[A^k]_{ij}$ は $k-1$ 回目の状態推移後には国内に滞留する状態に存在し、 k 回目の状態推移後に状態 j に推移する確率となる。状態 j に推移した後は、その状態に留まるため、 k 回の状態推移により状態 i から状態 j に推移する確率は、 k 回目の状態推移までに状態 j になる確率の和を取り、式（4）のように表される。

$$P_{ij}(k) = \left[\sum_{l=0}^k A^l \right]_{ij}, (j \in W) \dots \dots \dots (4)$$

2.4 鉄エレメントの社会での平均使用回数と平均滞留時間の算出

A^k が、 k 回目の状態推移により状態 i から状態 j ($j \in W$) になる確率を y_j 要素を持つ行列であるので、この行列を用いて、鉄エレメントの国内での平均使用回数、平均滞留年数を導出する。

鉄エレメントが、ある初期状態 s から無限回の状態推移により、輸出または廃棄されるまでの間に、国内に滞留する状態 u に存在する平均回数を N_{su} と表すと、 N_{su} は式（5）により表せる。

$$N_{su} = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^n P_{su}(k) = \left[\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^n A^k \right]_{su}$$

$$= [(I-A)^{-1}]_{su} \dots \dots \dots (5)$$

なお、ここでは初期状態も回数に含めているが、初期状態を除外する場合、 k の範囲を1からとすることで算出できる。ここでの式変形は付録2を参照のこと。

また、式（4）において推移回数を無限大まで考慮する、すなわち状態 s から無限回の状態推移により、輸出または廃棄される状態に推移する確率は、式（5）と同様に式変形することにより、式（6）により表せる。

$$P_{sj} = [(I-A)^{-1}]_{sj}, (j \in W) \dots \dots \dots (6)$$

なお、鉄エレメントが無限回の推移の後に、輸出または廃棄される状態に推移する確率の和は1である。

ここで、鉄エレメントの国内での平均使用回数を、5用途に区分された製品中の鋼材として使用された回数と定義する。粗鋼、鋼材、各種スクラップの状態は、社会中に滞留する状態ではあるが、使用された回数に計上しない。5用途に利用されている状態（Table 1における要素4~8）の集合を U と定義すると、初期状態 s から無限回の推移により最終的に輸出または廃棄されるまでの、国内での平均使用回数は、式（7）により導出できる。

$$t_s = \sum_{u \in U} N_{su} \dots \dots \dots (7)$$

さらに、各使用状態 u における平均社会滞留時間 T_u を用い、式（8）により初期状態 s から無限回の推移により最終的に輸出または廃棄されるまでの国内での平均社会滞留時間を算出できる。

$$T_s = \sum_{u \in U} T_u N_{su} \dots \dots \dots (8)$$

Table 2に本研究で設定した5用途の製品の平均寿命を示す¹⁰⁾。これらが、用途別に製品中の鋼材として使用されている状態における、鉄エレメントの平均滞留年数を示す。なお、式（7）、式（8）で導出される鉄エレメントの平均使用回数ならびに平均社会滞留時間は、Fig. 2に示すよう

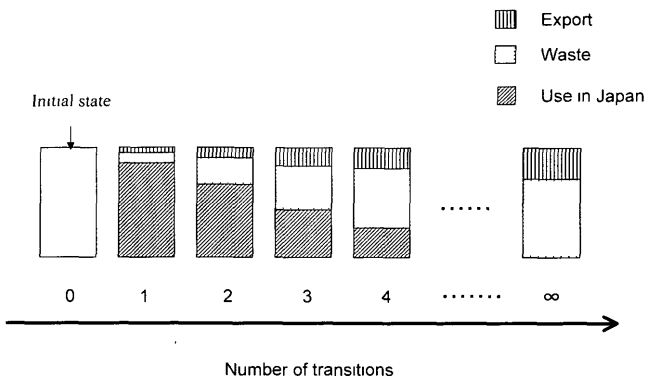


Fig. 2 Transition of the state of iron element.

に、国内で鉄エレメントが初期状態*s*として投入された後、輸出または廃棄されるまでに、国内において製品中の鋼材として使用される回数および滞留時間を意味している。

輸出された鉄は、輸出先において使用された後に、廃棄あるいは再輸出される。本論文では、国外における鋼材の生産・消費構造が日本と同一であると仮定として、日本国内で初期状態*s*として生産・投入されたすべての鉄エレメントが最終的に廃棄されるまでの使用回数ならびに社会滞留時間を算出した。その場合、輸出先国においても、鉄エレメントは日本と同じ状態推移確率を持つ。また、推移確率行列*A*においては、「輸出」という状態の項目を設けていたが、輸出は状態と状態をつなぐプロセスに過ぎないので、輸出という状態項目を削除した推移確率行列を新たに作成する必要がある。そこで、以下の手順により推移確率行列*B*を作成し、式(5)~(8)と同様の導出方法により、平均使用回数ならびに平均社会滞留時間を算出した。

- ・ 15行15列のマテリアルバランス表 (Table 1) において輸出の行と列を削除し、その他は全て同じ14行14列の状態推移表を作成する。
- ・ 行和を算出する。
- ・ 式(1)により14行14列の推移確率行列*B*を作成する (Table 4)。

3. 解析結果と考察

3.1 平均使用回数、平均社会滞留時間の算出

2000年における状態推移確率行列*A* (Table 3) を用い、国内で鉄エレメントが転炉粗鋼として生産・投入された後、各種用途での使用回数*N_{su}*、平均使用回数*t_s*、平均社会滞留時間*T_s*、そして最終的に輸出および廃棄される確率*P_y*を算出した。結果を、Table 5に示す。平均使用回数は0.77回、平均社会滞留時間は17.1年となった。鉄エレメントが転炉粗鋼として国内に投入された後、最終的に輸出される確率は0.732と、国内で廃棄される確率0.268よりもはるかに大きな確率となっている。この場合、輸出された鋼材の使用回数は考慮していないので、使用回数が1回に満たない値になっている。

そこで、状態推移確率行列*B* (Table 4) を用い、すべての鉄エレメントが完全に廃棄されるまでに、各種用途として使用される回数*N_{su}*、平均使用回数*t_s*、平均社会滞留時間*T_s*を算出した。結果をTable 6に示す。平均使用回数は2.67回、平均社会滞留時間は62.9年となった。各種用途での利用回数を見ると、土木建設用が1.72回と最も大きく、次に自動車用が0.438回である。土木建設用の値が大きいのは、電炉鋼材の消費用途として大きな割合を占めていることが

Table 4 Transition probability matrix *B* of iron by state (FY 2000).

	Converter crude steel	Converter in-house scrap	Converter Steel products	Use in construction	Use in machines	Use in cars	Use in containers	Use in other products	Obsolete scrap	EAF crude steel	EAF in-house scrap	EAF steel products	Industrial scrap	Waste
Converter crude steel	0.00	0.14	0.86	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Converter in-house scrap	0.94	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00
Converter Steel products	0.00	0.00	0.00	0.29	0.11	0.28	0.04	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.21	0.00
Use in construction	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.50
Use in machines	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20
Use in cars	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10
Use in containers	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.92	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08
Use in other products	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20
Obsolete scrap	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
EAF crude steel	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.90	0.00	0.00	0.00
EAF in-house scrap	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
EAF steel products	0.00	0.00	0.00	0.73	0.07	0.08	0.01	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00
Industrial scrap	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Waste	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Table 5. Results of calculation of Eqs (5)–(8) based on transition probability matrix *A*

Items	<i>N_w</i> Average number of times used in each state (Times)					<i>P_y</i> Probability of final state		<i>t_s</i> Average number of times used in all states (Times)	<i>T_s</i> Average residence time in use (Years)
	Use in construction	Use in machines	Use in cars	Use in containers	Use in other products	Export	Waste		
Results	0.443	0.076	0.162	0.021	0.068	0.732	0.268	0.769	17.1

Table 6. Results of calculation of Eqs. (5), (7) and (8) based on transition probability matrix *B*

Items	<i>N_w</i> Average number of times used in each state (Times)					<i>t_s</i> Average number of times used in all states (Times)	<i>T_s</i> Average residence time in use (Years)
	Use in construction	Use in machines	Use in cars	Use in containers	Use in others		
Results	1.72	0.233	0.438	0.052	0.226	2.67	62.9

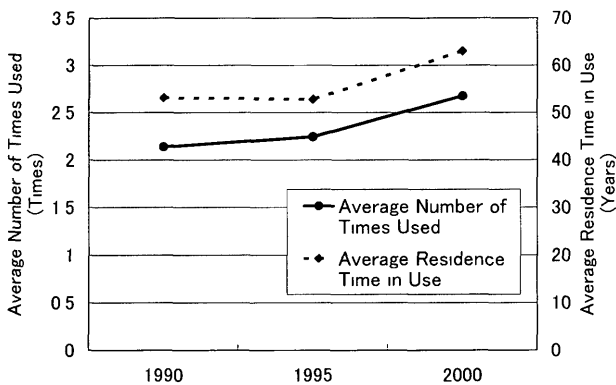


Fig. 3 Average number of times of use and residence time of Iron element during 1990 to 2000.

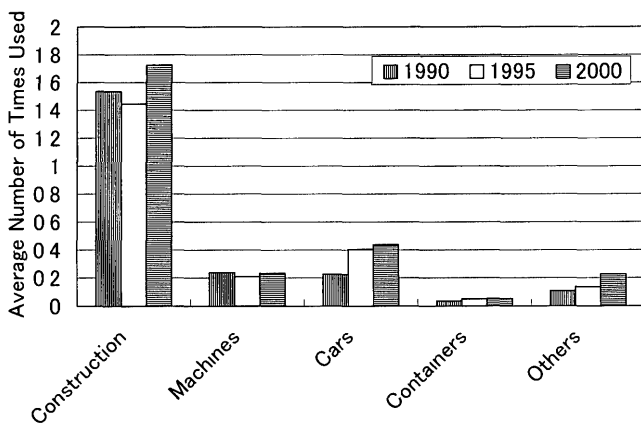


Fig. 4 Average number of times of use and residence time of Iron element in each product.

理由である。

次に、1990年と1995年についても状態推移確率行列 B を作成し、各年の鉄元素の滞留状態を評価する指標としての平均使用回数と平均社会滞留時間を算出した。なお、1990年、1995年においても Table 2 に示した条件を用いた。Fig 3 に結果を示す。また、Fig. 4 に用途別使用回数の算出結果を示す。平均使用回数は、1990年の2.14回から2000年の2.67回まで単調増加している。一方、平均社会滞留年数は、1990年と1995年ではほぼ一定であり、2000年において10年以上増加している。利用回数の増加は、Fig 4 に示すように、1990年から2000年にかけて自動車などの回収率の高い用途での鋼材の利用回数が増加したことが一因となっている。しかし、1995年には土木建設用における利用回数が減少し、その結果、平均利用回数は増加したものの平均社会滞留時間は増大しない結果となった。2000年には、自動車用における利用回数がさらに増加したこともあり、電炉鋼材の主用途である建設用鋼材の利用回数も増加し、平均使用回数、平均社会滞留時間も増加する結果となった。

3.2 回収率の変動による影響度の解析

資源循環型社会の構築のためには、素材のライフサイクルにおける平均使用回数を多く、平均社会滞留時間を長く

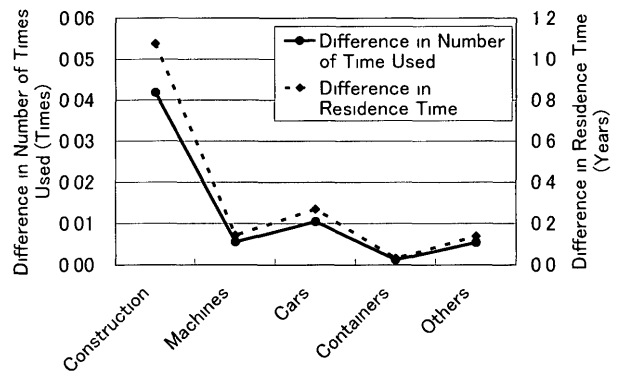


Fig. 5 Effect of the increase in collection ratio (by 1 point) on the average number of times of use and residence time of Iron element in each product.

する必要がある。そこで、ある資源循環システムの変更や新技術の導入をした場合の、素材のライフサイクルにおける平均使用回数および平均社会滞留時間への影響度を、本モデルを用いて解析することで評価することができる。ここでは、各用途の使用済み製品の回収率を変動させることによる、影響度の比較を試みた。

鉄元素が製品に使用された後、回収され再利用される割合が増大するに従い、鉄元素の平均使用回数および平均社会滞留時間は増大すると考えられる。そこで、5用途のスクラップの回収率を1ポイント増加させた場合の、平均使用回数ならびに平均社会滞留時間の変化量を解析した。結果を Fig. 5 に示す。

回収率の増大による平均使用回数の影響は、土木建設用において最も大きな変化を示し、0.04回/ポイント増加し、次に、自動車用が0.01回/ポイント増加した。なお平均社会滞留時間の変化量は、土木建設用が1.1年/ポイント増加し、自動車用が0.27年/ポイント増加した。さらに、鉄鋼材の循環利用に影響の大きな用途であった土木建設用鋼材の回収率を50%から60%まで引き上げると、平均使用回数が3.17回、平均社会滞留時間が75.8年となることがわかった。

3.3 鋼材1回使用あたりの平均CO₂誘発量

前述したように、2000年に国内において転炉粗鋼として投入された鉄元素は、完全に廃棄されるまでに、鋼材として平均2.67回使用される。その間に、転炉粗鋼、電炉粗鋼としてそれぞれ、1.00回、1.97回製造されている。また、中間処理されるものは老廃スクラップだけであると考えられるので、1.67回中間処理されることとなる。従って、転炉鋼材、中間処理、電炉鋼材のそれぞれの製造にかかるCO₂誘発量には、それぞれ1.679、0.048、0.499t-CO₂/t⁽¹⁾の値を用い、ライフサイクルにおいて誘発されるCO₂重量を平均使用回数で割ると、鉄鋼材1t・回利用あたり1.03tのCO₂誘発量となることがわかった。また、建設用鋼材の回収率を10ポイント上昇させ、60%とした場合の鉄鋼材1t利用あたりのCO₂誘発量は、0.954tとなり、約

7%の削減効果があることがわかった。

4. 結言

本研究では、マルコフ連鎖モデルに基づいた、鉄エレメントの社会での循環を解析する手法を構築した。そして構築した手法に基づき、鉄エレメントの社会での平均滞留時間とライフサイクルにおける鋼材としての平均使用回数を求めた。ある年における鋼材の生産、消費、回収状況から、鉄エレメントの状態推移確率行列を作成し、その年における鋼材の利用状況を評価する指標を簡便に導出できるのが、本手法の大きな長である。

2000年における日本国内で生産された転炉粗鋼は、7割以上が最終的には輸出されていることがわかった。国外での鋼材の使用状況が日本と同一と仮定した場合に、日本国内で生産された転炉粗鋼が完全に廃棄されるまでの平均使用回数および平均社会滞留時間を求めた結果、以下のことがわかった。

- ・ 2000年の鉄鋼材の消費構造における平均使用回数および平均社会滞留時間は、それぞれ2.67回、62.9年である。
- ・ 1990年から2000年までの10年間で、平均利用回数は0.5回、平均社会滞留時間は10年増加した。
- ・ 建設用鋼材の回収率が、鋼材の循環利用には大きな影響度をもつ。土木建設用鋼材の回収率を50%から60%まで引き上げると、平均使用回数が3.17回、平均社会滞留時間が75.8年となる。
- ・ 鋼材1回使用あたりの環境負荷誘発量は1.03t-CO₂/t・回である。

今後の課題として、国外での鋼材生産、使用、回収状況に関するデータを収集し、推移確率行列に反映することで、より精緻な結果を得る必要があることがあげられる。また、どのような品位のスクラップであっても、同じ確率において次の電炉鋼材の状態へと推移するとしたが、実際には高品位のスクラップと低品位のスクラップにおいて生産される鋼材の用途は異なることと考えられる。よって、スクラップや鋼材の品位を考慮したモデルを構築することも今後の課題として挙げられる。なお、本論文では鋼材のみを対象としたが、本手法は他の素材についても適用可能である。

文 献

- 1) MFNeuts Matrix-geometric Solutions in Stochastic Models—An Algorithmic Approach, The John Hopkins University Press, Baltimore and London, (1981), 1
- 2) 楠岡成雄, 青沼君明, 中川秀敏, クレジット・リスク・モデル, 社団法人金融財政事情研究会, (2001), 76
- 3) 鉄鋼スラグ協会: 鉄鋼スラグの高炉セメントへの利用, (2003), 3
- 4) (社)日本鉄源協会: 鉄源年報2001, (社)日本鉄源協会,

- (2002), 5, 15
- 5) 鉄鋼統計委員会: 鉄鋼統計要覧2001, 鉄鋼連盟, (2002), 168
- 6) W Tamaki, S Hayashi, T Suzuki and Y Tomota *CAMP-ISIJ*, **16** (2003), 1100
- 7) K Kakudate, Y Adachi and T Suzuki *Tetsu-to-Hagané*, **86** (2000), 837
- 8) K Yokota, Y Matsuno, M Yamashita and Y Adachi *Int J Life Cycle Assess*, **8** (2003), 129
- 9) 鉄鋼スラグ協会: 鉄鋼スラグ統計年報 平成14年, (2003), 5
- 10) A Toi and J Sato *Energy Resour*, **18** (1997), 271
- 11) A Toi and J Sato *Tetsu-to-Hagané*, **83** (1997), 677
- 12) 津野義道: 経済数学II, 培風館, 東京, (1990), 182

付 録 1

$m \times m$ の推移確率行列を M とおく。推移確率行列 M は、1回の状態推移により、状態 i から状態 j へ推移する確率を y 要素に持つ行列である。

ここで、 $k-1$ 回の状態推移により、状態 i から状態 j へ推移する確率を y 要素として持つ行列が $M^{(k-1)}$ により導出されると仮定する。

すると、 k 回の状態推移により状態 i から状態 j に推移する確率は、 $k-1$ 回の状態推移により状態 i から各状態 l から m へ推移する確率に、1回の状態推移により各状態 l から m から状態 j に推移する確率をそれぞれ乗じて足したものとなる。 $k-1$ 回の状態推移により状態 i から各状態 l から m へ推移する確率は $M^{(k-1)}$ の i 行の要素であり、1回の状態推移により各状態 l から m から状態 j に推移する確率は、推移確率行列 M の j 列の要素であるので、行列 M を行列 $M^{(k-1)}$ の右からかけると、 k 回の状態推移により状態 i から状態 j に推移する確率を y 要素に持つ行列となり、その行列は M^k と表せる。

よって、帰納法により k 回の状態推移により状態 i から状態 j に推移する確率を y 要素に持つ行列は M^k と表せることが示せた。

付 録 2

本研究では、マテリアルフローから推移確率行列 A を作成したため、廃棄・輸出から廃棄・輸出というフローは考えず、廃棄・輸出項目の対角成分は0である。鉄エレメントが廃棄・輸出された次の状態推移は考慮しないので、推移回数が無限大に近づくと、全ての推移確率が0に収束する。

$$\lim_{n \rightarrow \infty} p_{ij}(n) = 0, (i, j \in N) \dots \dots \dots (A1)$$

ここで、

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^n (I-A)A^k = \lim_{n \rightarrow \infty} (I-A^n) \dots \dots \dots (A2)$$

であり、 A の各要素 a_{ij} は $0 \leq a_{ij} < 1$ を満たすので、 $\lim_{n \rightarrow \infty} A^n$ の全ての要素 $\lim_{n \rightarrow \infty} [A^n]_{ij}$ は0に収束し、式 (A3) が成り立ち、式 (A3) の成立と $(I-A)$ が正則で $(I-A)^{-1}$ が非負行列であることと同値条件である¹²⁾ ため、式 (A2) は式 (A4) のように変形できる。

$$\lim_{n \rightarrow \infty} A^n = 0 \dots \dots \dots (A3)$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^n A^k = (I-A)^{-1} \dots \dots \dots (A4)$$

さらに、式 (A1) と式 (A4) から式 (A5) が導かれる。これが、1 単位の素材が状態 s から無限回推移して廃棄あるいは輸出に到達するまでの間に、 U に属する各要素 u に存在する平均回数 P_{su} を表す、

基本式である。

$$P_{su} = \left[(I - A)^{-1} \right]_{su} \dots \dots \dots (A5)$$