

■ 研究論文 ■

素材リサイクルシステムの解析的モデルの導出と分析

Construction of an Analytical Model for Recycling System of Materials and Its Evaluation

戸井 朗 人*・佐藤 純 一**・片桐 広 貴***

Akito Toi

Junichi Sato

Hirotaka Katagiri

(原稿受付1996年3月21日, 原稿受理8月8日)

Abstract

Recycling of various materials has been urged worldwide for environmental reasons. Promotion of recycling is expected to reduce the environmental pollution caused by material production. However, recycling of materials can also result in concentration of impurities in the material, which usually reduces social utility of the use of the material. To evaluate total effects of recycling, establishment of analyzing method of the whole recycling system is needed. In this study, a model for material recycling was constructed and an analytical method was developed. This method can be used for forecast and evaluation of material production, recycling ratio, concentration of impurities, environmental burden, etc. In addition, effective method for the environmental assesment of recycled material is proposed.

These methods were applied to steel, which has huge production quantity and has been the principal recycled material.

The analytical method developed in this study is thought to be effective for the detailed analysis of the recycling system. The results of the study show that, in the long run, while the concentration of impurities converges to a certain level, accumulated environmental burden diverges.

1. はじめに

鉄等の素材は、原材料から新たに製造される以外に、廃棄された素材がリサイクルされ、社会において数度にわたり使用される。近年、地球環境問題への意識の高まりとともに、様々な素材のリサイクルの一層の促進が求められるようになってきているが、リサイクル過程を経た素材は不純物の混入などにより質が低下しており、素材の利用という観点からは効用を低下させることとなる。本論文においては、素材の新規の投入と廃棄物の再使用を含むシステム（リサイクルシステム）をモデル化し、このようなシステムが環境にどのような負荷を与えているのか、素材の質がどのように低下していくのか等を総合的に分析する。なお、本論文においては、鉄のリサイクルをイメージしてモデル構築を行っているが、リサイクルされる他の素材にも適用できるよう汎用的なモデルを構築することとする。

* 東京大学工学部金属工学科客員助教授

** " " 教授

*** " 大学院工学系研究科材料系専攻

〒113 東京都文京区本郷7-3-1

る。

2. 素材のリサイクルシステム

図-1のような素材のリサイクルシステムを考える。鉄を例にとると、リサイクルシステム中の素材メーカは高炉メーカ、製品メーカは鉄を利用して製品をつくる自動車、家電等の製造業者、素材ストックは自動車、家電、建造物等として社会に存在している鉄のストック、リサイクラーはスクラップ事業者及び電炉メーカとなる。

このシステムにおいては、 t 時点において社会に S_t の量の素材ストックが存在して様々な用途に使用されており、単位時間当たりにならぬうち α の割合に当たる量の素材が老朽化又は用途を終えて廃棄されていると考える。廃棄された素材のうち b の割合に当たるものが回収・再処理過程を経て再生されて、社会に投入されて再びストックとなる。したがって、 $(1-b)$ に当たるものは再生されずに埋め立て地等に投棄される。また、このシステムにおいては、外部から供給される原材料から単位時間当たり q_t の新たな素材が生産され社会へ供給される。ただし、新たな素材のうち一定

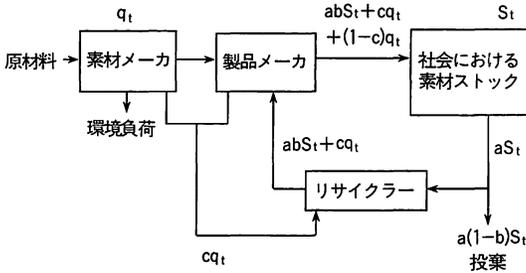


図-1 リサイクルシステム

割合 c に当たるものは製品メーカーの加工工程等において加工くず等として排出され、再生過程に送られる。残りの $(1-c)$ に当たるものがそのまま製品になり社会へ供給される。

新たな素材は鉱石、石油等の原材料から製造され、その製造に際しては環境に対して大きな負荷がかかる。さらに、図中では省略してあるが、素材の使用、リサイクル、廃棄物投棄等に際しても一定の負荷が環境にかかることとなる。

3. 素材リサイクルシステム解析モデルの導出

3.1 素材のフロー及びストック

上記のようなシステムについて、それぞれの要素の動きを数式によりフォローすることを試みた。まず、社会における素材のストック S_t については (1) 式に示す関係が成立する。

$$dS_t = q_t dt + abS_t dt - aS_t dt \dots\dots\dots (1)$$

次に、素材のストックうち、原材料から直接製造された新たな素材（すなわち、再生過程を経たことのないもの）の量を $S_{p,t}$ 、再生過程から供給されたものの量を $S_{r,t}$ とすると、それぞれについて以下のような方程式を立てることができる。（なお、社会の素材ストック中から廃棄される割合は新たな素材も再生素材も同一であり、ともに a の割合で廃棄されるものと仮定する。）

$$dS_{p,t} = (1-c)q_t dt - aS_{p,t} dt$$

$$dS_{r,t} = (abS_t + cq_t) dt - aS_{r,t} dt$$

S_t に関する (1) 式を微分方程式に書き直し、これを S_t について解くと、以下の式を得る。

$$S_t = e^{-a(1-b)t} \left\{ \int q_t e^{a(1-b)t} dt + c_1 \right\} \dots\dots\dots (2)$$

同様に、 $S_{p,t}$ 及び $S_{r,t}$ についても以下のように解くことができる。

$$S_{p,t} = e^{-at} \left\{ \int (1-c)q_t e^{at} dt + c_2 \right\} \dots\dots\dots (3)$$

$$S_{r,t} = e^{-at} \left\{ \int (abS_t + cq_t) e^{at} dt + c_3 \right\} \dots\dots\dots (4)$$

今、社会における素材のストックが微小単位時間当たり r の割合で増加すると考えると、 S_t を以下のように書くことができる。

$$S_t = S_0 e^{rt} \dots\dots\dots (5)$$

S_0 : $t=0$ 時点における素材ストックの量。

(2) 式に (5) 式を代入して、 q_t について解くと、以下の式を得る。

$$q_t = S_0(a+r-ab)e^{rt} \dots\dots\dots (6)$$

(6) 式を (3) 式に代入して解くと、 $S_{p,t}$ について以下の式を得る。

$$S_{p,t} = S_0(1-c) \left(1 - \frac{ab}{a+r} \right) e^{rt} + \left\{ S_{p0} - S_0(1-c) \left(1 - \frac{ab}{a+r} \right) \right\} e^{-at} \dots\dots\dots (7)$$

S_{p0} : $t=0$ 時点での新しい（リサイクルされたことのない）素材ストックの量。

$S_{r,t}$ も (4) 式から同様に求めることができる。

$$S_{r,t} = \frac{S_0(ab+c(a+r-ab))}{a+r} e^{rt} + \left[S_{r0} - \frac{S_0(ab+c(a+r-ab))}{a+r} \right] e^{-at} \dots\dots\dots (8)$$

S_{r0} : $t=0$ 時点での再生過程を経た素材ストックの量。

また、社会に存在する全素材ストック中の再生素材ストックの割合 $\frac{S_{r,t}}{S_t}$ は、次式のようになる。

$$\frac{S_{r,t}}{S_t} = \frac{ab+c(a+r-ab)}{a+b} + \left\{ \frac{S_{r0}}{S_0} - \frac{ab+c(a+r-ab)}{a+r} \right\} e^{-(a+r)t} \dots\dots\dots (9)$$

(5) ~ (9) 式より、 a 、 b 、 c 及び r の諸設定値に対応して、新たな素材の生産量 q_t 、再生素材生産量 $abS_t + cq_t$ 、ストック中の新たな素材量 $S_{p,t}$ 、再生素材量 $S_{r,t}$ 及び素材ストック中の再生素材の割合 $\frac{S_{r,t}}{S_t}$ の時間変化を求めることができる。

なお、 $\frac{S_{r,t}}{S_t}$ は時間の経過とともに次の一定値に収束していく。

$$\left. \frac{S_{r,t}}{S_t} \right|_{\infty} = \frac{ab+c(a+r-ab)}{a+r} = \frac{ab}{a+r} + c \left(1 - \frac{ab}{a+r} \right) \dots\dots\dots (10)$$

(10) 式最右辺の第 1 項は社会から廃棄された後再生された素材が社会に供給される全素材に占める割合を表しており、第 2 項は廃棄・再生過程を経ない（すなわち新たに生産される）素材のうち加工くず等として再生過程に送られるものの割合を表している。

また、フローについては、単位時間当たりの素材の

生産量に占める再生素材の生産量の割合は (11) 式のようになる。

$$\frac{abS_i + cq_i}{abS_i + cq_i + q_i} = \frac{ab + c(a+r-ab)}{a+r+c(a+r-ab)} \dots\dots\dots (11)$$

同式から分かるように、再生素材の生産割合は、時間にかかわらず一定となる。

3.2 素材中の不純物濃度

素材の再生のための廃棄物の分別に際しては、通常、様々な素材が混在した状態となっており、その中から目的とする素材を分離・抽出することが必要となるが、他の素材を完全に除去することは技術的又は経済的に困難であり、結果として有害な不純物元素が混入した状態でリサイクルをせざるを得ない。例えば、鉄の再生過程においては、銅の混入が熱間圧延特性、冷延材の深絞り性の劣化等で重要な問題とされている。

ここでは、まず社会における素材ストック中に含まれる不純物元素の総量 f_i を求める。簡単のために、再生過程での不純物元素の混入に着目することにし、原材料から新たに生産される素材の不純物元素レベルをゼロと仮定する。素材の再生過程において、廃棄・回収された素材の単位量当たりさらに g の割合の不純物元素が付加されるとすると、素材ストック中の不純物元素の総量 f_i について以下のような方程式を立てることができる。

$$df_i = gabS_i dt + abf_i dt - af_i dt \dots\dots\dots (12)$$

(12) 式を微分方程式に書き直し、これを解くことにより以下の式を得る。

$$f_i = e^{-a(1-b)t} \left\{ \int gabS_i e^{a(1-b)t} dt + c_3 \right\} \dots\dots\dots (13)$$

(5) 式をもとに (13) 式を書き換えると、社会における素材ストック中に含まれる不純物元素の総量は (14) 式のようになる。

$$f_i = \frac{S_0 gab}{a+r-ab} e^{rt} + \left(f_0 - \frac{S_0 gab}{a+r-ab} \right) e^{-a(1-b)t} \dots\dots\dots (14)$$

f_0 : $t = 0$ 時点における素材ストック中の不純物量。
また、単位量の素材ストック中の不純物元素量 (不純物濃度) は、 f_i をストック量 S_i で割ることにより、(15) 式のように表される。

$$\frac{f_i}{S_i} = \frac{gab}{a+r-ab} + \left(\frac{f_0}{S_0} - \frac{gab}{a+r-ab} \right) e^{-(a+r-ab)t} \dots\dots\dots (15)$$

さらに、再生素材ストック中の不純物濃度は、(14) 式を (8) 式で割ることにより (16) 式のようになる。

以上の式より、全素材ストック中及び再生素材ストック中の不純物濃度の時間変化を求めることができる。

$$\frac{f_i}{S_i} = \frac{\frac{gab}{a+r-ab} + \left(\frac{f_0}{S_0} - \frac{gab}{a+r-ab} \right) e^{-(a+r-ab)t}}{\frac{ab+c(a+r-ab)}{a+r} + \left\{ \frac{S_0}{S_0} - \frac{ab+c(a+r-ab)}{a+r} \right\} e^{-(a+r)t}} \dots\dots\dots (16)$$

また、(15) 式及び (16) 式から、全素材ストック中の不純物濃度及び再生素材ストック中の不純物濃度は、時間が経つにつれ、以下の値に収束することがわかる。

$$\left. \frac{f_i}{S_i} \right|_{\infty} = \frac{gab}{a+r-ab} \dots\dots\dots (17)$$

$$\left. \frac{f_i}{S_i} \right|_{\infty} = \frac{gab(a+r)}{\{ab+c(a+r-ab)\}(a+r-ab)} \dots\dots\dots (18)$$

(17) 式は、充分時間が経過した後の全素材中の不純物濃度は、廃棄された素材の再生過程において付加される不純物量を新たに生産される素材量で割ったものと等しくなることを示している。また、新たな素材中の不純物レベルをゼロと仮定しているため、(18) 式は (17) 式を充分時間が経過した後の再生素材ストックの割合を表す (10) 式で割ったものとなっている。

次に、フローについて検討する。再生素材の単位生産量当たりに含まれる不純物元素量は、廃棄・再生される素材ストックの単位量中に含まれる不純物元素量に再生過程で混入する不純物元素量を加えたものであり、以下のようになる。

$$\begin{aligned} \frac{abf_i}{abS_i + cq_i} + \frac{abS_i}{abS_i + cq_i} &= \frac{ab}{abS_i + cq_i} (f_i + gS_i) \\ &= \frac{gab(a+r)}{\{ab+c(a+r-ab)\}(a+r-ab)} + \frac{ab}{ab+c(a+r-ab)} \\ &\quad \left(\frac{f_0}{S_0} - \frac{gab}{a+r-ab} \right) e^{-(a+r-ab)t} \end{aligned}$$

したがって、充分時間が経過した後は、生産される再生素材中の不純物濃度は、再生素材のストック中の不純物濃度と同一となる。

3.3 素材リサイクルシステムの及ぼす環境負荷

ついで、このようなリサイクルシステムが環境に及ぼす負荷を定量的に評価する。システム中のそれぞれの過程で単位量の素材が環境に与える負荷を以下のように表す。

- P_1 : 原材料から新たな素材を製造する過程
- P_2 : 再生されずに投棄される過程
- P_3 : 再生過程

例えば、 P_1 は、原材料から新たな素材を製造する際に排出される二酸化炭素量等と考えることができる。これらを用いて、システムが環境に与える累積負荷 H_i に関する方程式を求めると、以下のようになる。

$$dH_i = p_1 q_i dt + p_2 a(1-b)S_i dt + p_3 (abS_i + cq_i) dt$$

..... (19)

両辺を積分することにより、 H_i を以下のように求めることができる。

$$H_i = \int dH_i = \frac{S_0}{r} [p_1(a+r-ab) + p_2a(1-b) + p_3(ab+c(a+r-ab))] (e^{rt}-1) + H_0 = \frac{S_0}{r} \{p_1(a+r) + p_2a + p_3c(a+r) + (a+r)(e^{rt}-1) - \frac{S_0}{r} ab(p_1+p_2-(1-c)p_3)(e^{rt}-1) + H_0\} \dots\dots\dots (20)$$

H_0 : $t=0$ 時点での累積環境負荷量。

(20) 式の第1項はリサイクルが行われない場合の環境負荷を、第2項はリサイクルによる環境負荷の低減分を表している。第2項と第1項の比を取ることにより、以下の式を得る。

$$\frac{ab\{p_1+p_2-p_3(1-c)\}}{p_1(a+r)+p_2a+p_3c(a+r)} \dots\dots\dots (21)$$

(21) 式から、リサイクルによる累積環境負荷の低減割合は時間に関わらないこと、また、その値は回収率 b に比例し、かつ、素材ストックの増加率 r が低いほど大きくなるのが分かる。

ついで、原材料から生産される新たな単位量の素材がそのライフサイクルにわたって生産・再生・投棄される過程で環境に及ぼす総合的な負荷を求める。 t 時点で新たな素材が製造されて社会に投入されることにより、社会の素材ストックが ΔS_t だけ増加したとすると、当該増加分のその後の時間 s に対する変化について以下の関係が成立する。

$$d\Delta S_s = ab\Delta S_s ds - a\Delta S_s ds \text{ ただし、 } s=t \text{ の時 } \Delta S_s = \Delta S_t.$$

これを解くことにより、以下の解を得る。

$$\Delta S_s = \Delta S_t e^{a(1-b)(t-s)} \dots\dots\dots (22)$$

ΔS_t の量の新たな素材がそのライフサイクルにわたって環境に与える負荷 $H_{\Delta s}$ は、当該素材が原材料から製造される過程で生じる負荷に、素材がリサイクルシステムの中で廃棄・再生される過程で生じる負荷を加えたものであり、以下のようなになる。

$$H_{\Delta s} = p_1\Delta S_t + p_3c\Delta S_t + \int_t^\infty \{p_2a(1-b)\Delta S_s + p_3ab\Delta S_s\} ds = \Delta S_t \left\{ p_1 + p_2 + \frac{b+c(1-b)}{1-b} p_3 \right\} \dots\dots\dots (23)$$

(23) 式を ΔS_t で割ることにより、リサイクルシステムにおいて原材料から製産される単位量の新たな素材がライフサイクルにわたって環境に与える負荷の総量を以下のように計算することができる。

$$\frac{H_{\Delta s}}{\Delta S_t} = p_1 + p_2 + \frac{b+c(1-b)}{1-b} p_3 \dots\dots\dots (24)$$

一方、リサイクルシステムにおいては、リサイクルにより繰り返し環境に負荷を与えることとなるため、リサイクルを促進すればするほど (24) 式で計算される環境負荷量は大きくなる。そこで、リサイクルされる素材はされないものに比べてより長期間使用されることに着目し、使用期間を考慮した環境負荷を求めることとする。

(22) 式から、新たな素材の生産によるストックの増加分 ΔS_t と当該増加分が社会に存在し使用に供される時間との積の総和を以下のように求めることができる。

$$\int_t^\infty \Delta S_t ds = \Delta S_t \int_t^\infty e^{a(1-b)(t-s)} ds = \frac{\Delta S_t}{a(1-b)} \dots\dots\dots (25)$$

(25) 式を ΔS_t で割ることにより、製造された新たな素材が社会において繰返し使用される累積期間の平均値 \bar{T} を以下のように求めることができる。

$$\bar{T} = \frac{1}{a(1-b)} \dots\dots\dots (26)$$

以上より、(24) 式を (26) 式で割ることにより、リサイクルを含む全使用期間を通しての素材の単位量・単位使用期間当たりの環境負荷 \bar{h} を以下のように求めることができる。

$$\bar{h} = a(1-b)(p_1+p_2) + a\{b+c(1-b)\}p_3 \dots\dots\dots (27)$$

リサイクルが行われる場合には、素材のライフサイクルの始めと終わりは必ずしも明確でなく、環境負荷を総合的に評価することは難しい。本式を用いることにより、リサイクルシステムにおける素材の環境負荷の評価をある程度定量的に行いうるものと考えられる。

4. 鉄鋼のリサイクルへのモデルの適用結果及び考察

4.1 鉄鋼のストック及び生産

ここでは鉄鋼を例に、前項までで導いた式を適用してみる。鉄鋼の場合には、そのプロセスの特徴から言って、高炉鋼を新たな素材、電炉鋼を再生素材と考えることができる。パラメータは以下のように設定した。

(1) 社会における鉄鋼ストックの増加率は、1991～93年の平均値¹⁾を取り、 $r=3.5\%$ とした。我が国の鉄鋼ストックの量は1993年において約10.6億トンと推計されており¹⁾、その後の増加を考え1995年 ($t=0$) において11億トンと設定した。また、1970年から94年までの我が国粗鋼生産量のうち高炉鋼の占める割合が約75%である²⁾ことから、我が国の鉄鋼ストックもこ

の割合に近いものとなっていると考え、鉄鋼ストックの7割強に当たる8億トンが高炉鋼であると仮定する。

(2) 我が国における鉄鋼の老廃くず発生率(廃棄された鋼材のうち回収されたもの)は鉄鋼ストックの約2.7%で推移してきている³⁾。一方、老廃くずの回収率は、鉄を使用する代表的製品に対する業界団体の調査では84.6%となっている⁴⁾が、調査の範囲外で回収率の低いものもあると考えられ、実際にはこの値より低いものと考えられる。以上より、ここでは回収率 $b=80\%$ 、社会から素材が廃棄される割合 $a=3.5\%$ とする。また、加工くず発生率は、1993年度のデータ⁵⁾(鋼材国内出荷7230万トン、加工くず発生量710万トン)から、10%と設定する。

以上の設定値の下で(9)式を用いて算出した鉄鋼のストック全体に占める電炉鋼の割合の時間変化を図-2に示す。(10)式から鉄鋼ストック中に占める電炉鋼の割合は46%に収束していくことが分かる。

また、(11)式から全粗鋼生産量に占める電炉鋼の割合は一定で約43%となる。我が国の国内向け粗鋼生産量に占める電炉鋼の生産割合は近年41~42%程度となっており、推計値とほぼ一致する。次に、回収率が変化した場合の鉄鋼ストック中の電炉鋼割合の収束値の変化を、種々の r 値に対して(10)式により計算した結果を図-3に示す。ストック増加率が低下すると、

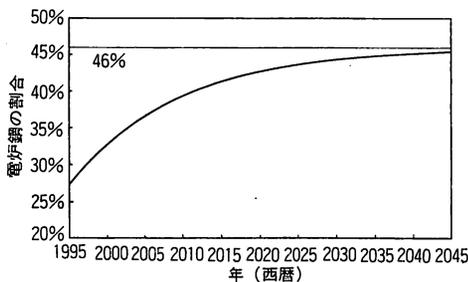


図-2 鉄鋼ストック中の電炉鋼の割合

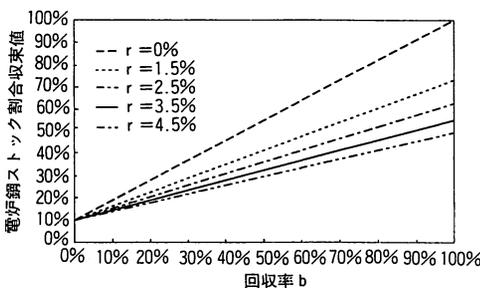


図-3 回収率と鉄鋼ストック中の電炉鋼割合収束値との関係

回収率上昇に伴う電炉鋼ストックの割合の増大がより急激になることが分かる。

4.2 リサイクル過程における鉄鋼への銅元素の蓄積

次に、鉄鋼リサイクルにおける不純物元素の濃度増加を銅に着目しモデルにより推計してみる。文献^{3,6)}を参考として、不純物元素である銅の混入割合 g を0.2%と設定した。また、現時点での鉄鋼ストック蓄積量については、老廃くず(電炉鋼)のサンプルに対して行われた銅元素濃度の測定値0.23%及び高炉鋼中の銅元素濃度測定値0.01%という調査結果³⁾をもとに、高炉鋼中の銅元素は無視できるものと考え、電炉鋼ストック3億トンの0.23%として0.007億トンと仮定した。以上に基づき推計した電炉鋼ストック中の銅元素濃度及び生産される電炉鋼中の銅元素濃度の時間変化を図-4及び図-5に示す。(17)式から全鉄鋼ストック中の銅元素濃度は約0.13%に、また、(18)式から電炉鋼ストック中の銅元素濃度は約0.29%に収束していくことが分かる。次に、回収率が変化した場合の電炉鋼中の銅元素濃度の収束値を、種々の r 値に対して(18)式により計算した結果を図-6に示す。回収率を今後80%以上に向上させていった場合、銅元素濃度の収束値は一層急激に増加していき、その増加の割合はストック増加率が低いほど大きくなることが分かる。

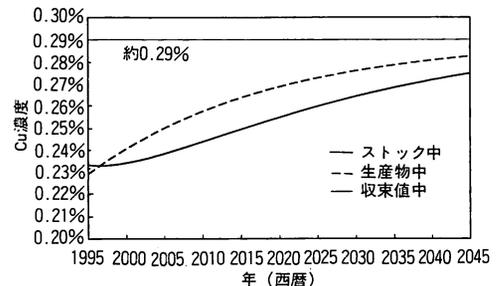


図-4 電炉鋼のストック中及び生産物中のCu濃度 ($g=0.2\%$)

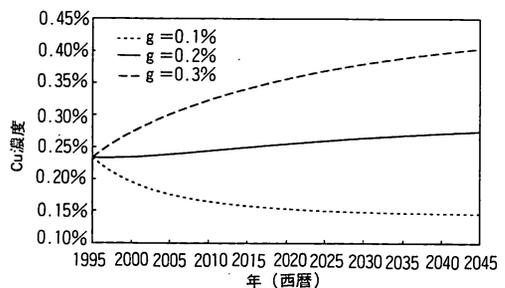


図-5 電炉鋼ストック中のCu濃度 (g を変化させた場合)

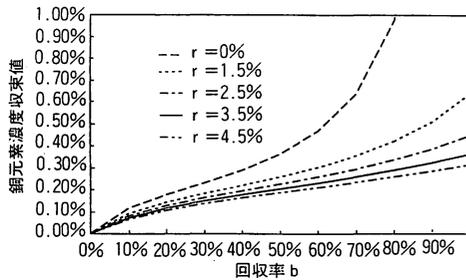


図-6 回収率と電炉鋼中の鋼元素濃度収束値との関係 (g=0.2%)

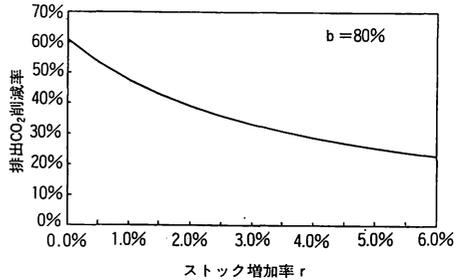


図-8 ストック増加率とリサイクルによる二酸化炭素削減率との関係

4.3 二酸化炭素発生量から見た鉄鋼のリサイクルシステムによる環境負荷

ここでは、モデルを用いて、鉄鋼のリサイクルシステムが環境に及ぼす負荷を二酸化炭素発生量として推計してみた。推計に当たっては、当研究室の調査等をもとに、高炉鋼生産時の二酸化炭素排出量 p_1 を炭素換算で0.4トンC/トン、鉄鋼投資過程の排出量(主に運送に係るもの) $p_2=0.01$ トンC/トン、電炉鋼生産時の排出量 p_3 を高炉鋼生産時の4分の1として0.1トンC/トンとした。(20)式から求めたこの場合の二酸化炭素排出量累積値の時間変化を、再生利用しない場合($b=0$)と併せて図-7に示す。80%の回収・再生利用を行うことにより、排出量の約3割を削減することができる。また、回収率を80%のままとし、素材ストックの増加率を変化させた場合の二酸化炭素排出量累積値の削減割合の変化を(21)式から求め図-8に示す。

さらに、(26)式から高炉鋼の再生利用を含む全使用期間の平均値は約143年となり、リサイクルシステムにおける高炉鋼の単位使用期間・単位量当たりの二酸化炭素排出量 \bar{h} は(27)式から約0.006トンC/トン・年となる。これに対し、廃棄鋼回収率が90%に上昇した場合には、約0.005トンC/トン・年となる。

5. 結言

(1) 原材料から生産された新たな素材の供給を受け

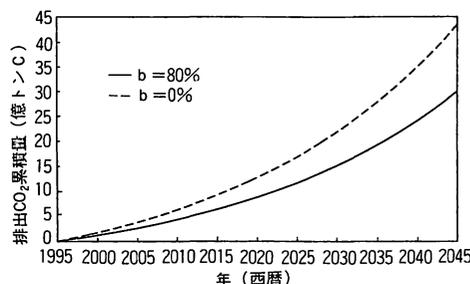


図-7 今後排出される二酸化炭素の累積量

るとともに、社会から廃棄された素材の一定割合を再生して循環利用するリサイクルシステムについて、素材量、不純物濃度、環境負荷等のストック及びフローを解析的に分析することを可能とするモデルを構築することができた。また、本モデルを鉄鋼のリサイクルシステムに対して適用し、その有効性を示した。

(2) 本モデルによる分析により、リサイクルに関連する様々なパラメータが再生素材の割合や材質、さらには環境負荷の程度に与える影響を明らかにすることができた。これにより、素材ストック増加率、廃棄素材回収率、不純物混入率等のパラメータを適宜設定することにより、社会の素材ストック中の再生素材の割合、素材中の不純物濃度等の時間変化並びにこれらの収束値を定量的に求めることが可能となった。

(3) さらに、モデルに基づき、新たに製造された素材がライフサイクルにわたって生産・再生・廃棄過程において環境に及ぼす負荷を算出し、かつ、社会での使用期間を考慮することにより、リサイクルされる素材の環境負荷を効果的に評価することが可能となった。

今後、各種パラメータの時間変化等も考慮することにより本モデルの拡張を行うとともに、より多くの具体的事例に適用していきたいと考えている。

参考文献

- 1) ㈱日本鉄源協会；鉄源年報第6号(1995)。
- 2) ㈱日本鉄鋼連盟鉄鋼統計委員会；鉄鋼統計要覧(1995)。
- 3) ㈱金属系材料研究開発センター新製鋼技術研究推進室；環境調和型金属系素材回生利用基盤技術の研究，JRCMニュース，100号(1995.2)，10~11。
- 4) ㈱日本鉄リサイクル工業会；鉄リサイクル事業のマニュアルブック(1992)，62。
- 5) 武内美継；鉄源プロセスの動向，鉄鋼界，1995年2月号，2~10。
- 6) 松岡滋樹；鉄スクラップの発生と利用，鉄鋼界，1995年2月号，11~18。