

■ 研究論文 ■

素材リサイクルシステムにおける環境負荷削減と素材の質的劣化のモデルに基づく評価

Evaluation of Reduction in Environmental Burden and Accumulation of Impurities in Material Recycle System

戸井 朗 人*・佐藤 純 一**

Akito Toi Junichi Sato

(原稿受付1996年3月28日, 原稿受理8月8日)

Abstract

Recycle of materials is expected to reduce the environmental burden caused by their production process. However, recycle may also lead to the accumulation of impurities and other effects which usually lower social utility of the use of materials. To evaluate these effects totally, we have constructed analytical models of recycle system and proposed formulas to estimate CO₂ emission, impurity concentration, etc. in the recycle system. In this report, by using our models and formulas, we evaluated the influences of change in recovery ratio and life expectancy of steel products on the environmental burden as CO₂ emission and the quality of materials as accumulation of Cu element. The result shows that change in each parameter has different influences and that appropriate combination of the parameters can lead to reduction in CO₂ emission and improvement of material qualities simultaneously.

1. はじめに

近年、地球環境問題への意識の高まり等から、素材のリサイクルの促進が求められている。素材のリサイクルは、素材生産に係る環境負荷を減少させることが期待される一方、再生過程における不純物混入により素材の質的劣化が生じる場合が多い。このような点を考慮に入れてリサイクルシステムの総合的な評価を行うため、本研究室においてはリサイクルシステムの解析的モデルを構築し、不純物蓄積や環境負荷の定量的評価手法を提案してきた^{1) 2) 3)}。本論文においては、現在までに得られたモデル及び式をもとに、社会における素材の寿命や廃棄素材の回収率を変化させた場合の環境負荷等の変化を分析し、一定の素材の質を確保しつつ環境負荷を減らしていく方策について検討する。なお、素材のリサイクルシステムの分析・評価に関する他の研究としては、素材の生産量が一定の場合について一定割合のリサイクルが行われた場合のエネルギー消費量の変化を分析しているもの⁴⁾があるが、不純物の蓄積を考慮したものは極めて少ない。近年、柴田ら

は、再生素材中の不純物が増加した場合の再生時における希釈の必要性を考慮してリサイクルシステムの消費エネルギー量の評価を試みている^{5) 6)}。しかしながら、これらは素材再生に必要なエネルギー量の変化によるシステム全体の消費エネルギー量の評価等が中心となっており、不純物の蓄積、再生素材の蓄積及び環境負荷を考慮した素材リサイクルシステムの総合的評価は現在までに充分に行われていない。

2. リサイクルシステムのモデル

前報²⁾と同様に、図-1のようなリサイクルシステムのモデルを考える。 q_t は t 時点における単位時間当たりの社会への素材投入量を、 S_{pr} 及び S_{nr} はそれぞれ社会における新たな素材及び再生素材のストック量を、 b は廃棄された素材の回収率を表す。また、 a_1 及び a_2 はそれぞれ新たな素材及び再生素材の単位時間当たりの廃棄率を表す。また、社会における素材ストックの全体量 S_t ($S_t = S_{pr} + S_{nr}$) 及び素材全体の平均的廃棄率 a を考える。 S_t は単位時間当たり一定割合 r で増加しており、 $S_t = S_0 e^{rt}$ と表せるものとする。 $(S_0$ は $t=0$ における素材量。) また、前報と同様に、新たな素材及び再生素材が社会に投入されてから廃棄されるまでの期間は、新たな素材か再生素材かによってのみ一律

* 東京大学工学部金属工学科助教授

** " " " 教授

〒113 東京都文京区本郷7-3-1

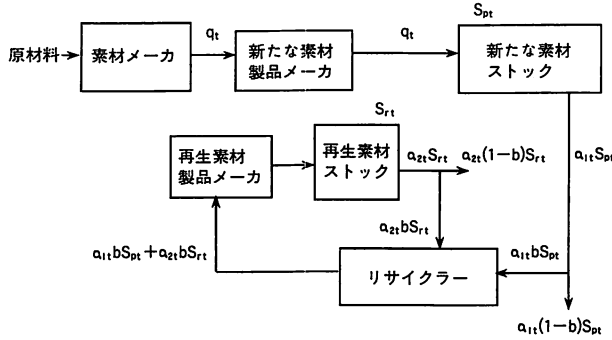


図-1 リサイクルシステムのモデル

に決定されるガンマ分布に従うものとする。

3. リサイクルシステムの総合的評価のための式

素材の社会における使用期間の長期化、回収率の向上等に努めることにより、環境負荷をある程度削減することが可能と考えられるが、一方このような対応は再生素材中の不純物濃度を増加させたり、社会のストック中の再生素材の割合を大きなものとし、ひいては材料の使用から社会が得る効用を低下させることとなる。そこで本研究では、二酸化炭素排出量で表される環境負荷に加えて、再生素材中の不純物量及び全素材中の再生素材量の割合を指標として取り上げ、回収率、製品寿命等が変化した場合に社会が得る総合的な効用について定量的に分析を行う。

図-1に示したリサイクルシステムのモデルにおいて、素材の社会からの平均的廃棄率 a 、全素材ストック中の再生素材の割合 S_r/S_t 及び再生素材中の不純物濃度 f_i/S_r は、既報²⁾の通り以下の式によって表すことができる。

$$a = \frac{r \left(\frac{\lambda_1}{r + \lambda_1} \right)^{\alpha_1}}{1 - (1-b) \left(\frac{\lambda_1}{r + \lambda_1} \right)^{\alpha_1} - b \left(\frac{\lambda_2}{r + \lambda_2} \right)^{\alpha_2}} \quad \dots (1) \quad (r \neq 0 \text{ の場合})$$

$$a = \frac{1}{(1-b) \frac{\alpha_1}{\lambda_1} + b \frac{\alpha_2}{\lambda_2}} \quad \dots (2) \quad (r = 0 \text{ の場合})$$

$$\frac{S_r}{S_t} = \frac{ab}{r} \left\{ 1 - \left(\frac{\lambda_2}{r + \lambda_2} \right)^{\alpha_2} \right\} \quad \dots (3) \quad (r \neq 0 \text{ の場合})$$

$$\frac{S_r}{S_t} = \frac{b \frac{\alpha_2}{\lambda_2}}{(1-b) \frac{\alpha_1}{\lambda_1} + b \frac{\alpha_2}{\lambda_2}} \quad \dots (4) \quad (r = 0 \text{ の場合})$$

$$\frac{f_i}{S_r} = \frac{g}{1 - b \left(\frac{\lambda_2}{r + \lambda_2} \right)^{\alpha_2}} \quad \dots (5)$$

ここで、 α 及び λ はガンマ分布のパラメータで、添字の1は新たな素材を、2は再生素材を表す。また、 g は不純物の混入率である。

ここで、素材の寿命が変化した場合の分析を行うに当たって、使用期間が異なる場合でも素材廃棄率の分布の形は相似であり、従って変動係数は変化しないものとする。この時、新たな素材及び再生素材の平均使用期間をそれぞれ E_1 及び E_2 、変動係数を x_1 及び x_2 とすると、(1)～(5)式は以下のように書き換えられる。

$$a = \frac{r \left(\frac{1}{rE_1x_1^2 + 1} \right)^{\gamma_{x_1^2}}}{1 - (1-b) \left(\frac{1}{rE_1x_1^2 + 1} \right)^{\gamma_{x_1^2}} - b \left(\frac{1}{rE_2x_2^2 + 1} \right)^{\gamma_{x_2^2}}} \quad \dots (6) \quad (r \neq 0 \text{ の場合})$$

$$a = \frac{1}{(1-b)E_1 + bE_2} \quad \dots (7) \quad (r = 0 \text{ の場合})$$

$$\frac{S_r}{S_t} = \frac{ab}{r} \left\{ 1 - \left(\frac{1}{rE_2x_2^2 + 1} \right)^{\gamma_{x_2^2}} \right\} \quad \dots (8) \quad (r \neq 0 \text{ の場合})$$

$$\frac{S_r}{S_t} = \frac{bE_2}{(1-b)E_1 + bE_2} \quad \dots (9) \quad (r = 0 \text{ の場合})$$

$$\frac{f_i}{S_n} = \frac{g}{1 - b \left(\frac{1}{rE_2 x_i^2 + 1} \right)^{1/2}} \dots\dots\dots (10)$$

ただし、 $x_i = \frac{\sqrt{V_i}}{E_i} = \alpha_i^{-1/2}$ ($i = 1, 2$) ここでVは分散を表す。

また環境負荷の指標として二酸化炭素をとると、モデルのようなリサイクルシステムから排出される二酸化炭素の過去からt時点までの累積量は、以下のよう
に表すことができる。

$$H_t = \frac{S_0}{r} \{ p_1(a + r - ab) + p_2 a(1 - b) + p_3 ab \} e^{rt} \dots\dots\dots (11)$$

ここで、 p_i は以下のようにそれぞれの過程から排出される二酸化炭素量を表す。

- p_1 : 原材料から新たな素材を製造する過程
- p_2 : 素材が使用後再生されずに投棄される過程
- p_3 : 素材が再生される過程

以上の式をもとに、回収率、素材の使用期間等が異なる社会における環境負荷や素材の質的劣化を定量的に評価することが可能となる。

4. 鉄鋼への適用

既報^{1) 2)}と同様に、鉄鋼について現在 ($t = 0$) の鉄鋼ストック量を約11億トン、年間当たりのストック増加率 r を3.5%、使用後廃棄された鉄の回収率を80%と設定する。不純物としては銅元素を取り上げる。再生過程における銅元素混入率については、シュレッダー処理工程において配線等から0.2%程度の銅元素混入が生じると考えられる¹⁾ほか、合金等からも銅元素の混入が考えられる。これらについて網羅的なデータはないが、ここでは再生過程における平均的な銅元素混入率を0.1%と仮定する。また高炉・転炉による一貫製鉄で生産された高炉鋼を新たな素材、電炉鋼を再生素材と考え、それぞれの鋼の社会における使用期間をガンマ分布で近似したところ、高炉鋼の平均使用期間は13.6年、電炉鋼は33.6年と算定された²⁾。変動係数は、それぞれ0.261及び0.447となった。さらに各プロセスからの二酸化炭素排出量についても、前々報¹⁾と同様に p_1 を0.4tC/t、 p_2 を0.01tC/t、 p_3 を0.1tC/tと設定した。

以上の設定値をベースとし、高炉鋼の平均使用期間 E_1 、電炉鋼の平均使用期間 E_2 及び回収率 b をパラメータとして変化させた場合の二酸化炭素累積排出量、全鉄鋼ストック中の電炉鋼割合及び銅元素濃度の変化を

見る。ただし、(11)式から算定される累積二酸化炭素排出量 H_t は時間とともに変化するため、パラメータを変化させた場合と現状のままの場合との比 H_t/H_0 を取り、二酸化炭素排出量の削減率を指標として用いることとする。

4.1 パラメータを変化させた場合の分析結果

まず他のパラメータを現状のままに固定し、高炉鋼の平均使用期間 E_1 を変化させた場合のそれぞれの項目の変化を(6)式、(8)式及び(10)式により計算した結果を図-2に示す。使用期間が長くなるにしたがい二酸化炭素排出量比が低下していくとともに、ストック中の電炉鋼の割合も低下していつている。一方、高炉鋼の使用期間の長期化は電炉鋼中の銅元素濃度には影響を与えない。したがって、高炉鋼の使用期間の長期化は、環境負荷を減らすとともに、材料の使用に係る効用の観点からも効用を増加させる方向に働くこととなる。

ついで電炉鋼の平均使用期間 E_2 のみを変化させた場合のそれぞれの項目の変化を図-3に示す。電炉鋼の使用期間が長い場合、二酸化炭素排出量は削減されるものの、使用期間の伸び率に対する削減の割合は高炉鋼の場合より低くなっている。また素材の質の観点から

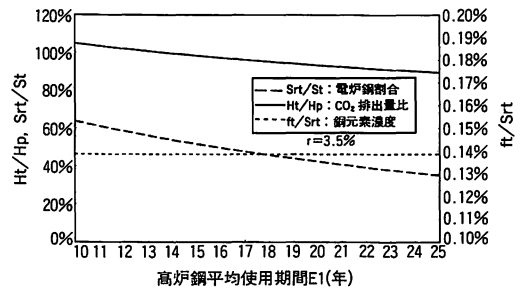


図-2 高炉鋼平均使用期間によるCO₂排出量及び素材の質的变化

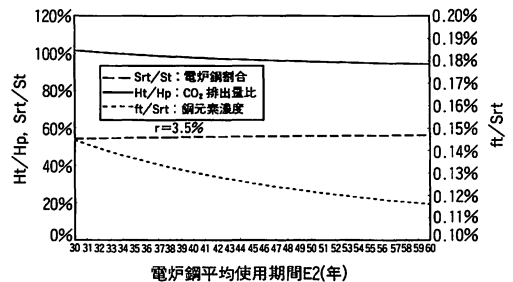


図-3 電炉鋼使用期間によるCO₂排出量及び素材の質的变化

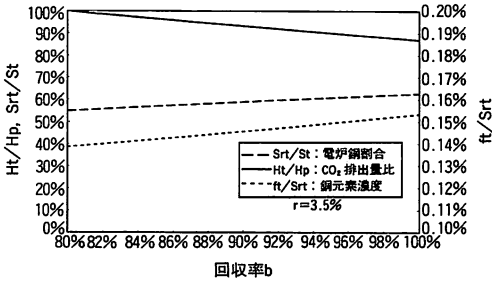


図-4 回収率によるCO₂排出量及び素材の質的变化

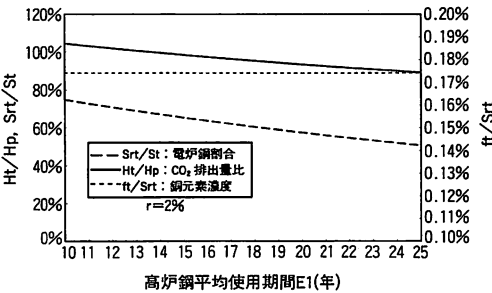


図-5 高炉鋼平均使用期間によるCO₂排出量及び素材の質的变化

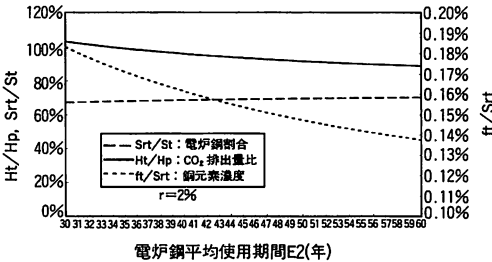


図-6 電炉鋼平均使用期間によるCO₂排出量及び素材の質的变化

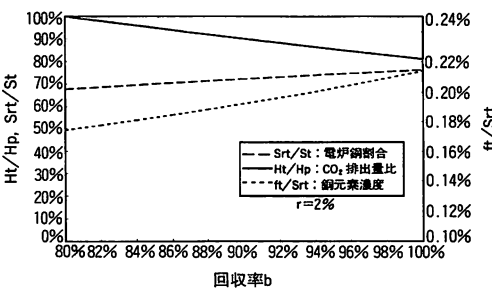


図-7 回収率によるCO₂排出量及び素材の質的变化

については、電炉鋼の長期間の使用は全鉄鋼ストック中の電炉鋼の割合をわずかに増加させるものの、電炉鋼中の銅元素濃度を相当程度引き下げの効果を有してい

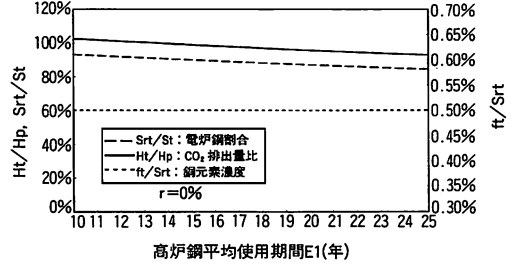


図-8 高炉鋼平均使用期間によるCO₂排出量及び素材の質的变化

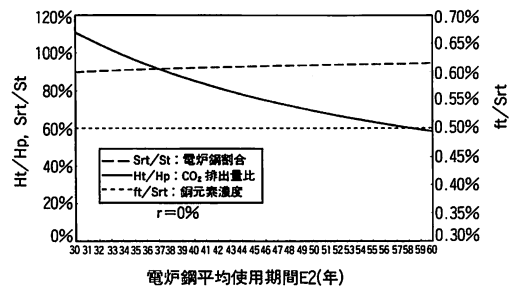


図-9 電炉鋼平均使用期間によるCO₂排出量及び素材の質的变化

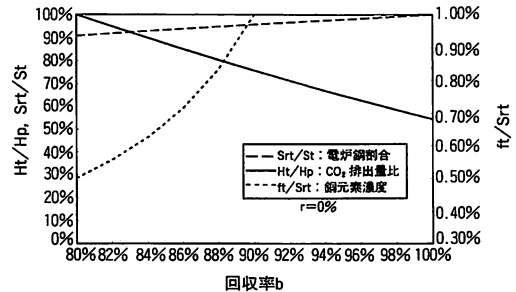


図-10 回収率によるCO₂排出量及び素材の質的变化

る。

また回収率bを変化させた場合について図-4に示す。回収率が高い場合には、二酸化炭素排出量比が小さくなっている一方、素材の質の観点からは、電炉鋼の割合、電炉鋼中の銅元素濃度ともに高いものとなってしまう。

次に鉄鋼ストック成長率rが2%及び0%と相対的に低い水準にあるケースについて(6)~(10)式により同様の計算を行った結果を図-5~10に示す。ストック成長率が低い場合、高炉鋼の平均使用期間E₁の長期化に伴う二酸化炭素排出量削減率は低くなるが、電炉鋼の平均使用期間E₂の長期化及び回収率bの増加については成長率が高いケースに較べてより大きな二

酸化炭素排出量削減が達成される。ただし、素材の質の面からは、ストック成長率の低下はいずれの場合も全鉄鋼ストック中の電炉鋼割合及び電炉鋼中の銅元素濃度を引き上げる方向に働く。

なお、鉄鋼中の銅元素濃度については、比較的low質の鉄鋼から生産されることの多い棒鋼、形鋼等の場合でも0.3~0.4%が許容限度であると報告されており⁹⁾、濃度がこれを越える場合には再生しても社会に受け入れられない恐れがある。

4.2 三つのパラメータを同時に変化させた場合

個別のパラメータの変化の影響を見た場合には、高炉鋼の使用期間を増加させることが、環境負荷を削減しつつ素材の利用上の問題も起こさない比較的優れた方法であるということが出来る。

一方、高い回収率は鉄鋼ストック中の電炉鋼の割合と電炉鋼中の銅元素濃度を増加させるが、高炉鋼の長期間の使用は鉄鋼ストック中の電炉鋼割合を低下させ、また電炉鋼の長期間の使用は電炉鋼中の銅元素濃度を低下させる。そこで、これらを組み合わせることにより、材料の質的劣化を防ぎつつより効果的に環境負荷を削減することが考えられ、この可能性について検討する。このため、今までに求めた式をもとに、再生素材中の不純物濃度及び全素材ストック中の再生素材割合を一定に保ちつつ二酸化炭素排出量を削減していくことを可能とする素材の使用期間 E_1 及び E_2 と回収率 b との関係を求めてみる。まず、再生素材中の不純物濃度を一定に保つための E_2 と b の関係を求める。(10)式から、再生素材中の不純物濃度を θ (一定)とすると、この時の E_2 を以下のように求めることができる。

$$E_2 = \frac{1}{rx_1^2} \left\{ \left(\frac{b\theta}{\theta - g} \right)^{x_1^2} - 1 \right\} \dots\dots\dots (12)$$

ついで、全素材ストック中の再生素材ストックの割合を ϕ (一定)とすると、(12)式も考慮することにより、(6)式及び(8)式からこの時の E_1 を以下のように求めることができる。

$$E_1 = \frac{1}{rx_1^2} \left[\left\{ \frac{g - \theta(1-b)(1-\phi)}{\phi g} \right\}^{x_1^2} - 1 \right] \dots\dots\dots (13)$$

(12)式及び(13)式は、不純物濃度及び再生素材割合を一定に維持するためには、 b を増加させていった場合、 E_1 及び E_2 を長くしていくことが必要であることを示している。逆に言えば、回収率 b を増加させていくとともに、 E_1 及び E_2 を(12)式及び(13)式か

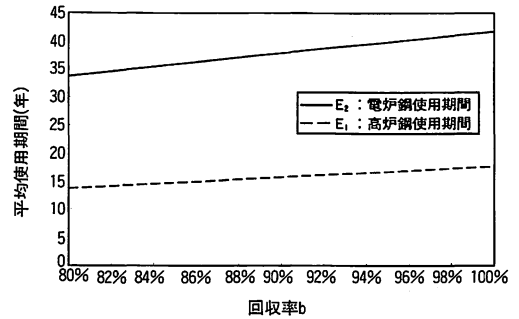


図-11 回収率増加に伴う高炉鋼及び電炉鋼使用期間の変化

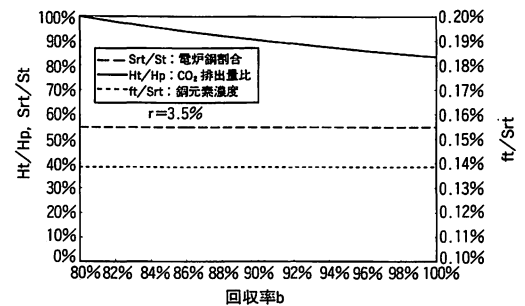


図-12 E_1 、 E_2 及び b を同時に変化させた場合の CO_2 排出量及び素材の質的变化

ら算出される値となるよう長期化していくことにより、素材の質的劣化を防ぎつつ環境負荷を削減していくことが可能となる。この時、リサイクルシステムからの二酸化炭素排出量の累積値は、 θ 及び ϕ を用いて以下のように表すことができる。

$$H_t = S_0 \left[\frac{\phi}{b-1 + \frac{g}{\theta}} \left\{ p_1 + p_2 - b(p_1 + p_2 - p_3) \right\} + p_1 \right] e^{rt} \dots\dots\dots (14)$$

b を変化させた場合の(14)式の値の比をとることにより、素材の質的劣化を防ぎつつ回収率を増加させた場合の二酸化炭素排出量削減率を得ることができる。

なお、ストック増加率 r が0の場合には、(10)式から、不純物濃度に関する E_2 への制約はない。また、(9)式から、以下の式が得られる。

$$E_1 = \frac{b(1-\phi)}{\phi(1-b)} E_2 \dots\dots\dots (15)$$

この場合、 E_2 の値を変化させなくても、回収率の増加とともに E_1 の値を(15)式に基づき長期化していくことにより、素材の質的劣化を伴うことなく環境

負荷の削減を行うことができる。鉄鋼に関し、ストック増加率 r が3.5%の場合について、回収率 b を現状の80%から順次増加させた場合に銅元素濃度及び電炉鋼割合を現状レベルに保つための E_1 及び E_2 を(12)式及び(13)式により算出した結果を図-11に、また、これら三つのパラメータの組み合わせに対応する電炉鋼中銅元素濃度、鉄鋼ストック中電炉鋼割合及び二酸化炭素排出量削減率を図-12に示す。素材の使用期間及び回収率を組み合わせることで変化させることにより、素材の質の劣化を防ぎつつ環境負荷の削減が達成されている。

既に示したように、高炉鋼の使用期間のみを長くすることによっても素材の質の劣化を防ぎつつ環境負荷を削減することは可能であるが、この場合、図-2に示したように、高炉鋼の平均使用期間を現状から30%程度増加させた場合でも二酸化炭素排出量削減率は5%以下となっている。これに対し、回収率の増加並びに高炉鋼及び電炉鋼の使用期間の長期化を組み合わせた場合には、図-11及び図-12に示すように、例えば、回収率を80%から88%に増加させるとともに、高炉鋼及び電炉鋼の平均使用期間をそれぞれ現状から約12%及び10%長くすることにより、約8%の二酸化炭素排出量削減が達成される。実際の社会への適用を考えると、新たな素材で生産された製品の使用期間のみを大幅に長期化することは現実的とは考えられず、したがって、ここで示したように、回収率の向上と素材の使用期間の長期化を組み合わせることにより、素材の質的問題に対応しつつ環境負荷を削減していくことが適当であると考えられる。

5. まとめ

(1) 素材の回収率及び使用期間を変化させた場合

の二酸化炭素排出量削減の効果と素材の質的劣化の間のトレードオフ関係を定式化することができた。

(2) これをもとに、回収率の向上、素材使用期間の長期化といったそれぞれの対応策のメリットとデメリットを明確にすることができた。

(3) 高い回収率並びに新たな素材及び再生素材のより長期間の使用を組み合わせることにより、素材の質の問題に対応しつつ環境負荷を削減していくことが可能であることを示し、そのために回収率の増加に対応して素材の使用期間をどれだけ長くする必要があるかを明らかにした。

文 献

- 1) 戸井朗人, 佐藤純一, 片桐広貴; 素材リサイクルシステムの解析的モデルの導入と分析, エネルギー・資源, 18巻, 1号 (1997), 92~97.
- 2) 戸井朗人, 佐藤純一; 廃棄までの期間の分布を考慮したリサイクルシステムの解析的モデルの導入とその適用, エネルギー・資源, 18巻, 3号 (1997), 61~67.
- 3) 戸井朗人, 佐藤純一; 鉄鋼リサイクルシステムの不純物蓄積及び環境負荷の解析, 材料とプロセス, 10 (1997), 268.
- 4) 元田欽也; 資源消費とリサイクル, 精密工学会誌, 58 (1992), 43~46.
- 5) 柴田清, 早稲田嘉夫; 鉄鋼スクラップ再生システムの評価モデル, 材料とプロセス, 9 (1996), 894.
- 6) 柴田清, 早稲田嘉夫; 製品組成, スクラップ組成関数を導入した素材生産・リサイクルシステムモデル, 材料とプロセス, 10 (1997), 267.
- 7) 松岡滋樹; 鉄スクラップの発生と利用, 鉄鋼界, 2 (1995), 11~18.
- 8) 片山裕之, 水上義正; 鉄のリサイクルプロセス, まてりあ, 35 (1996), 1285~1289.