

素材ストックの成長率が低減していく場合の 素材リサイクルシステムの解析と鉄鋼への適用

戸井 朗人*・佐藤 純一*

Analysis of Recycle System of Material with Decrease in Stock Growth Rate and Its Application to Steel
Akito TOI and Junichi SATO

Synopsis : 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 leads to increase in concentration of impurities in the material, which usually lowers social utility of the use of the material. Therefore, establishment of analyzing methods of the whole recycling system is needed to evaluate the effect of recycling totally.

In this study, we proposed an analytical model for recycling system and developed formulas for the comprehensive evaluation of recycling system, assuming that the stock of materials in our society will continue to increase but will converge to a certain level.

Our proposed method can be used for forecast and evaluation of material production, recycling ratio, concentration of impurities, environmental load, etc.

By applying this model to iron and steel materials, quantitative trade-off relation between the improvement of environment and deterioration of the quality by copper accumulation was made clear.

Key words : recycle ; modelling ; iron stock ; tramp element ; environmental burden ; carbon dioxide.

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にもない、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が低下することとなる。したがって鉄等、素材のリサイクルの促進には、環境負荷、不純物の混入による質の劣化等を含む総合的な評価が必要である。

このような観点から、本研究室においては、素材の新規の投入とスクラップの再使用を含むシステム(リサイクルシステム)を対象として、社会の素材ストックが一定の割合で増加していく場合について、リサイクルシステムの環境負荷及び素材の質的劣化に関する解析的モデルを構築してきた^{1,2)}。

しかしながら、鉄をはじめとする基幹素材においては、今後ストックの伸び率が低下していくことが予想されており、これが素材の質的劣化や環境負荷の程度に様々な影響を及ぼすことが予想される。そこで、本研究においては、既に当研究室において構築したモデルをストック増加率が

低下していく場合に対して拡張するとともに、モデルを鉄鋼へ適用し再生材の質的劣化と環境負荷の評価を行った³⁾。

2. 社会における素材ストックの変化と使用期間

社会における素材ストック量は、経済が発展するにつれて増加していくが、その増加には限度があると考えられる。鉄を例にとると、我が国における社会の鉄鋼ストックは、1960年代及び70年代前半においては年率8~13%程度で増加していたが、70年代半ばからは増加率が低下し、3~5%程度の増加率で推移してきている。また、米国においては、近年、一人当たり鉄鋼蓄積量が13トンを超えた辺りで一定に近づきつつある⁴⁾。そこで、本研究においては、素材ストックの単位時間当たりの増加量が今後指数的に減少していき長期的にある値に漸近するものとして、t時点におけるストック S_t を以下のような式で表すことができるものと仮定する。

$$S_t = S - R e^{-\beta t} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、Sは素材ストックの収束値、Rは収束値と初期値の差、 β は単位時間当たり増加量の減衰率である。

ついで、上式を我が国の鉄鋼ストック量の推移に対して

適用してみる。データは入手できた1965~93年のものを用いた⁴⁾。最小二乗法を用いて鉄鋼ストック量の推移を(1)式により近似した。ここで、我が国の鉄鋼ストックは一人当たり鉄鋼ストックがほぼ一定に達しつつある米国と将来的には同程度となるものと考え、Sを16億トンと設定した。また、データの起点である1965年における(1)式の値と実績値が一致するよう設定した。以上により算出した結果を実績値と併せてFig. 1に示す。βは0.028、1995年をt=0と設定したところRは約6.1億トンと算定された。

3. 素材のリサイクルシステム

次に、Fig. 2のような素材のリサイクルシステムを考える。鉄鋼を例にとると、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、建材等の製造業者、鉄鋼ストックは自動車、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。

本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、単位時間あたりにそのうちa_t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

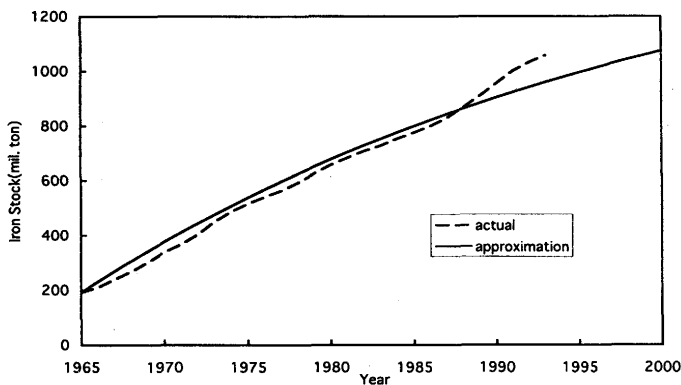


Fig. 1. Actual accumulation of Iron Stock in Japan and approximation by function whose growth rate decreases exponentially.

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)の割合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。このほか、実際には新たな素材が加工くず等として直接リサイクラーに送られる等のフローもあるが、ここではモデルの簡単化のため省略してある。

4. 解析的モデルの導出

4.1 廃棄率及び再生材の割合

上で述べたリサイクルシステムの物質収支を考える。社会における素材ストックS_tのバランスについて(2)式が得られる。

$$\frac{dS_t}{dt} + a_t S_t = q_t + a_t b S_t \quad \dots\dots\dots (2)$$

ついて、素材の社会での使用期間について考える。社会に投入された素材の使用期間は新たな素材が再生材かによるほか、用途・製品によっても異なるが、素材全体の平均的なフロー及びストックを考える場合には、ある平均的期間が経過した時点で一律に廃棄されると考えても近似的に差し支えないと考えられる。そこで、ここでは、社会に投入された素材は、一定期間Tが経過した時点で一律に廃棄されるものとする。この場合、(3)式が成り立つ。

$$a_t S_t = q_{t-T} + a_{t-T} b S_{t-T} \quad \dots\dots\dots (3)$$

以上の式をもとに、社会からの素材の廃棄率a_tを求める。(1)、(2)及び(3)式から、以下の式を得る。

$$S(a_{t-T} - a_t) + (a_t + \beta e^{\beta T} - a_{t-T} e^{\beta T}) R e^{-\beta t} = 0$$

ここでa_tが時間に関わらない定数であると仮定すると、廃棄率(以下単にaと書く)を以下のように求めることができる。

$$a = \frac{\beta}{1 - e^{-\beta T}} \quad \dots\dots\dots (4)$$

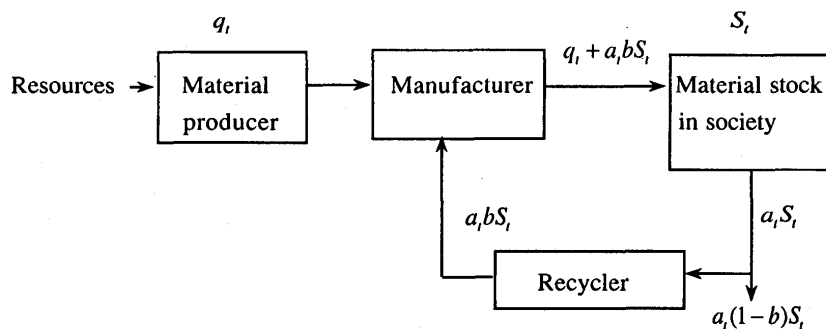


Fig. 2. Model of recycle system of material used in the analysis.

(4)式から分かるように、素材の廃棄率は、素材の使用期間Tが長いほど減少する。

このaを用いて、単位時間に社会に投入される新たな素材の量 q_t 及び再生材の量 abS_t をそれぞれ以下のように求めることができる。

$$q_t = a(1-b)S - a(e^{-\beta T} - b)Re^{-\beta t} \dots\dots\dots(5)$$

$$abS_t = ab(S - Re^{-\beta t}) \dots\dots\dots(6)$$

ついで、新たな素材も再生素材も同じ廃棄率aで廃棄されると仮定すると、素材ストック中の再生材ストック S_{rt} について次式が成立する。

$$\frac{dS_{rt}}{dt} = abS_t - aS_{rt}$$

(6)式と併せてこれを解くことにより、再生材ストック量を以下のように求めることができる。

$$S_{rt} = Sb - (Sb - S_0 - bRe^{\beta T})e^{-at} - bRe^{\beta T}e^{-\beta t} \dots\dots\dots(7)$$

ここで、 S_0 は、 $t = 0$ における再生材ストックの量。

(7)式を(1)式で割ることにより、素材ストック中の再生材ストックの割合を算出することができる。十分な時間が経過した後は、全素材ストックに占める再生材ストックの割合はbに収束していく。

次に、フローベースでみた素材の全生産量に占める再生材の割合を求めると、次式が得られる。

$$\frac{abS_t}{q_t + abS_t} = \frac{b(S - Re^{-\beta t})}{S - Re^{-\beta T}e^{-\beta t}} \dots\dots\dots(8)$$

(8)式においても、時間が充分経過した後は、全生産量に占める再生材の割合はストックの場合と同様にbに収束していく。

4・2 再生材中の不純物濃度

廃棄物は、通常様々な素材が混在した状態となっており、素材の再生のために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。例えば鉄のリサイクルにおいては、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、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_t を求める。簡単にするために、再生過程での不純物元素の混入に着目することにし、新たな素材の不純物元素レベルをゼロと仮定する。再生過程において、廃棄・回収された素材の単位量あたりにgの割合の不純物元素が付加されるとすると、不純物のバランスから素材ストック中の不純物元素の総量 f_t について以下のような式を立てることができる。

$$\frac{df_t}{dt} = gadS_t + abf_t - af_t$$

これに(1)式を代入して解くことにより、全素材中の不純物量を以下のように求めることができる。

$$f_t = \frac{Sgb}{1-b} - \frac{Rgb}{e^{-\beta T} - b}e^{-\beta t} + \left(f_0 - \frac{Sgb}{1-b} + \frac{Rgb}{e^{-\beta T} - b}\right)e^{-a(1-b)t} \dots\dots\dots(9)$$

(9)式を(1)式及び(7)式で割ることにより、全素材ストック中及び再生材ストック中の不純物濃度をそれぞれ得ることができる。時間が経つにつれ、全素材ストック中及び再生材ストック中の不純物濃度は以下の値に収束していく。

$$\left. \frac{f_t}{S_t} \right|_{\infty} = \frac{gb}{1-b} \dots\dots\dots(10)$$

$$\left. \frac{f_t}{S_{rt}} \right|_{\infty} = \frac{g}{1-b} \dots\dots\dots(11)$$

4・3 環境負荷

次に、このようなり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。本研究では、二酸化炭素量に着目し、システム中のそれぞれの過程での単位量の素材処理から発生する二酸化炭素量を以下のように表す。

p_1 ：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

また、大気中に排出された二酸化炭素のうち海洋面への吸収等により減少していく量は大気中の二酸化炭素量に比例すると考え、その割合を μ とする。これらを用いて、リサイクルシステムからの排出による大気中の二酸化炭素量 E_t の微小単位時間当たりの増加分を、以下のように表すことができる。

$$dE_t = p_1q_tdt + p_2a(1-b)S_tdt + p_3abS_tdt - \mu E_tdt \dots\dots\dots(12)$$

本式に(1)式及び(5)式を代入して解くことにより、リサイクルシステムからの排出による大気中の二酸化炭素量を以下のように求めることができる。

$$E_t = \frac{aS\{p_1 + p_2 - b(p_1 + p_2 - p_3)\}}{\mu}(1 - e^{-\mu t}) + \frac{R\{(a - \beta)p_1 + ap_2 - ab(p_1 + p_2 - p_3)\}}{\beta - \mu}(e^{-\beta t} - e^{-\mu t}) + E_0e^{-\mu t} \dots\dots\dots(13)$$

E_0 は $t = 0$ 時点におけるリサイクルシステムからの排出二酸化炭素量。

E_t は、時間の経過とともに以下の値に収束していく(解法

はここで示さないが、 $\beta = \mu$ の場合も同様に以下の値に収束する)。

$$E_t \Big|_{\infty} = \frac{aS\{p_1 + p_2 - b(p_1 + p_2 - p_3)\}}{\mu} \dots\dots\dots (14)$$

すなわち、素材ストックがその単位時間当たり増加量を指数的に減少させながら一定値に漸近していく状態にある社会において素材のリサイクルを行った場合、リサイクルシステムから排出される大気中二酸化炭素量は(14)式で表される値に収束していく。そして、その値は廃棄率に比例して増加し、回収率に比例して減少する。

5. モデルの鉄鋼のリサイクルシステムへの適用

5.1 鉄鋼の使用期間及び廃棄率

前節までに導出したモデル式を鉄鋼のリサイクルシステムに適用する。鉄鋼については、そのプロセスの特徴から、高炉鋼を新たな素材、電炉鋼を再生材とみなすことができる。まず、社会における鉄鋼の平均的使用期間を求める。Table 1に示す鉄鋼の用途ごとの投入量と使用期間をもとに、当研究室において使用期間をガンマ分布により近似したところ、高炉鋼(新たな素材)の平均使用期間は13.6年、電炉鋼(再生材)は33.6年と推計された²⁾(ガンマ分布による近似では、平均値は単純平均より長く算出される)。これらの加重平均を取り、鉄鋼全体の平均使用期間Tを21年と設定する。このとき、(4)式から、鉄鋼の廃棄率は約6.3%と推計される。一方、廃棄される鉄鋼の回収率は、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%となっているが³⁾、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。ここでは、回収率bを80%と設定する。このとき、鉄スクラップの発生率(すなわち発生率aと回収率bの積)の推計値は約5.0%となり、

Table 1. Use of steel and life expectancy of steel in various products.

		percentage	Mode(years)
EF Steel	Construction	21%	25
	Civil Eng.	8%	35
	Construction(others)	6%	30
	Others	3%	12
BF Steel	Construction & Civil	11%	25
	Industrial Machines	8%	10
	Electrical Machines	5%	14
	Business Machines	2%	12
	Ships	4%	12
	Automobiles	22%	9
	Trains	1%	20
	Containers	3%	1
	Others	5%	12

Average of BF Steel 12.7years
Average of EF Steel 26.9years

我が国における近年の平均的スクラップ発生率2.7%を相当上回っている。これは、1970年以前に一定水準の増加率で増加してきていたストックを指数的に減衰する関数により近似させたためと考えられる。すなわち、鉄鋼ストック S_t が一定の割合rで増加し $S_t = S_0 e^{rt}$ と表されるとすると、(2)及び(3)式から算定される廃棄率 a は $\frac{r}{e^{rT} - 1}$ となり、平均使用期間Tが21年の場合には廃棄率は2.6%、スクラップ発生率は2.1%とより実績値に近くなる。

しかしながら、今後鉄鋼ストックが増加し一定値に漸近していくにつれ、廃棄率は増加率が減衰するモデルに基づく推計値に近づいていくものと予想される。本研究においては、将来へ向けての長期的分析に重点を置いているため、廃棄率としてはストックの成長が減衰していく場合の推計値を用いて試算を行うこととする。

鉄鋼の使用期間Tが変化した場合の廃棄率の変化を(4)式により計算した結果をFig. 3に示す。

5.2 電炉鋼割合及び銅元素濃度

モデル式を用いて今後の推計を行うには、初期値として、現在(1995年において $t = 0$)における再生材ストックと鉄鋼ストック中の不純物量が必要となる。鉄鋼ストック中の再生材ストックの割合については、当研究室の研究結果をもとに約41%であると考え²⁾、 S_0 を $t = 0$ 時点のストック推計値の41%として約4.1億トンと設定した。再生材ストック中の不純物量については銅元素に着目することとする。電炉鋼中の銅元素濃度は文献⁵⁾を参考として0.2%と仮定し、銅元素量を約82万トンと設定する。また、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ほか⁶⁾、合金等からも銅元素の混入が考えられる。これらについても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gを0.1%と仮定する。

以上の諸設定値をもとに、全鉄鋼ストックに占める電炉鋼ストックの割合の変化を様々なbの値について(1)及び(7)式により計算した結果をFig. 4に示す。ついで、フローについて、各時点で社会に投入される全鉄鋼量に占める電炉鋼

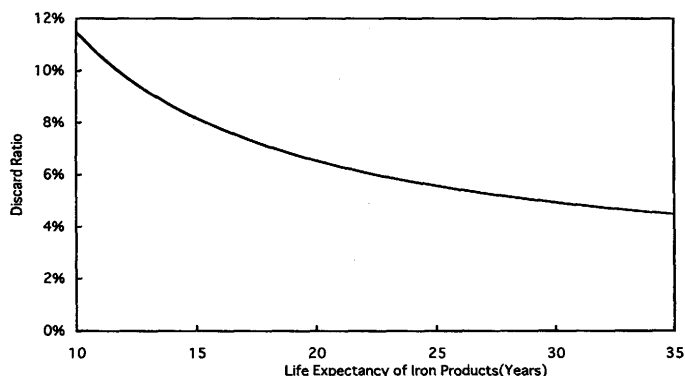


Fig. 3. Relation between life expectancy of steel in products and discard ratio from the society.

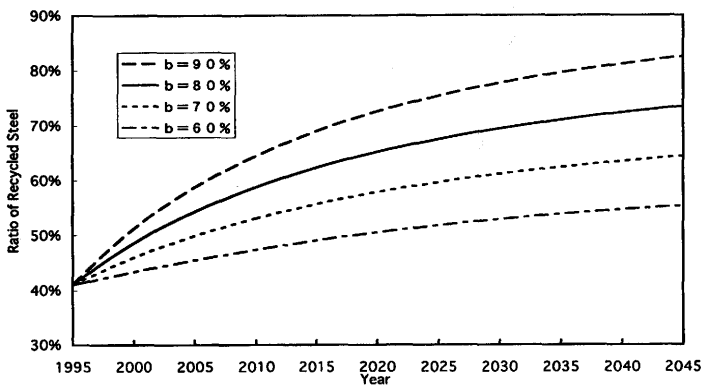


Fig. 4. Calculated ratio of recycled steel in iron stock with various recovery rate b.

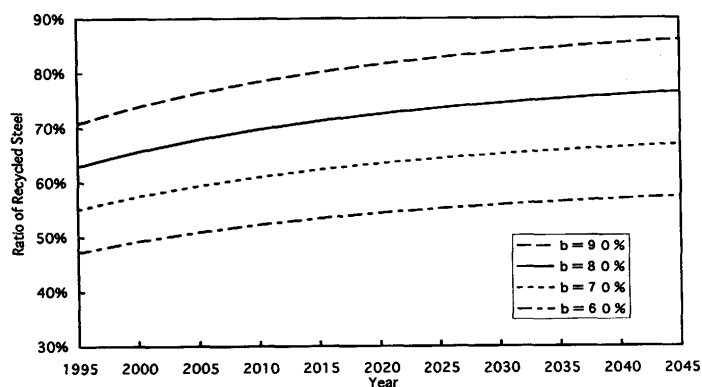


Fig. 5. Calculated ratio of recycled steel in total steel inflow with various recovery rate b.

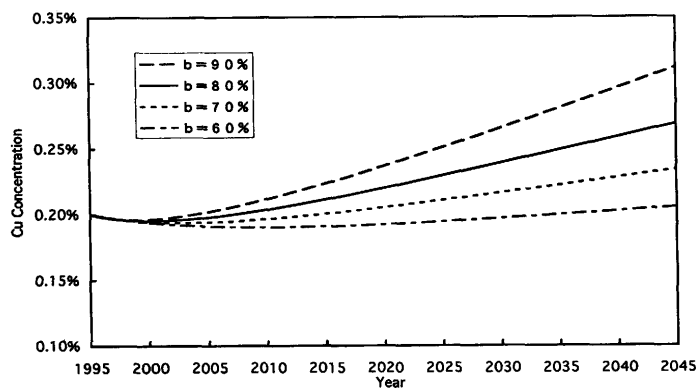


Fig. 6. Calculated concentration of Cu in recycled iron stock with various recovery rate b.

の割合の推移を(8)式に基づきFig. 5に示す。現状の回収率80%の場合、フローベースでの電炉鋼の割合の推計値は現時点($t=0$)で約63%となっている。直接輸出及び間接輸出を除くネットの国内鉄鋼投入量に占める電炉鋼の割合は近年50%程度であり、推計値は実際の値より相当高くなっているが、これは廃棄率として実測値よりも大きな推計値を使用しているためであると考えられる。

さらに、再生材中の銅元素濃度の推移を様々な回収率b

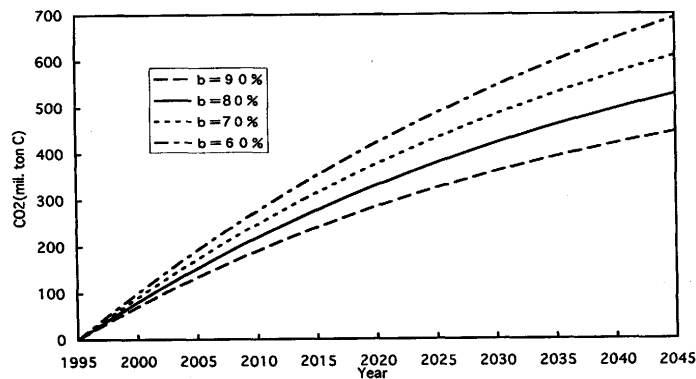


Fig. 7. Calculated amount of CO₂ in the atmosphere from the recycle system with various recovery rate b.

について推計した結果をFig. 6に示す。回収率が高いほど、回収率を上昇させた時の銅元素濃度の増加分が大きくなることが分かる。

5.3 環境負荷

リサイクルシステムからの二酸化炭素排出量について、当研究室の研究等をもとに、 p_1 及び p_2 を、炭素換算でそれぞれ0.4トンC/トン及び0.1トンC/トンと設定する。 p_2 については、昭和60年度産業連関表に基づく吉岡らの推計⁷⁾により、産業廃棄物処理業の売上高100万円当たりの二酸化炭素排出量が炭素換算で約2.7トンCと算定されており、また、日本鉄源協会の調査によれば、同年度の廃棄物(ダスト)処理費が全国平均トン当たり5000円であることから、これらデータをもとに鉄鋼廃棄にかかる二酸化炭素排出量を0.013トンC/トンと設定する。また、海洋等による二酸化炭素吸収割合 μ は、文献⁸⁾を参考として2%と設定する。以上の設定値のもとで、大気中の二酸化炭素量の推移を(13)式で様々なbに対して計算した結果をFig. 7に示す。回収率が現状の80%の場合には、我が国の鉄鋼のリサイクルシステムからの排出による大気中二酸化炭素量は、炭素換算で約8.2億トンCへと収束していく。

各プロセスからの環境負荷が一定であるとする、環境負荷を削減するためには回収率を向上させることが必要となる。しかしながら、回収率の向上は、結果として社会に投入される鉄鋼の質の劣化を招く。そこで、(14)式から得られる二酸化炭素量の収束値と(10)式から算出される鉄鋼ストック中の銅元素濃度の収束値の関係を回収率bをパラメータとして求めるとFig. 8のようになる。この図は、銅元素濃度と二酸化炭素量で表される環境負荷とのトレードオフ関係を表している。現状の80%程度の回収率は環境負荷を比較的強く抑えるものとなっているが、再生過程の銅元素混入率が今後とも現状レベルであるとする鉄鋼ストック中の銅元素濃度は0.4%程度の相当高い値に収束していくこととなる。一方、銅元素濃度を将来的に0.3%程度に抑えるとする、大気中の二酸化炭素量収束値は約9億トンへと

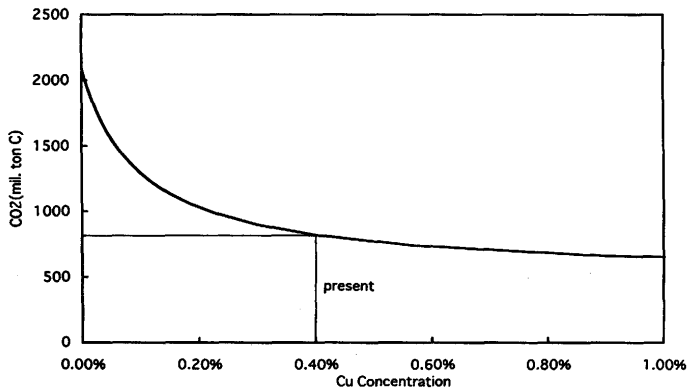


Fig. 8. Trade-off between CO₂ in the atmosphere from the recycle system and concentration of Cu in iron stock.

と10%程度増加することとなる。

社会は、廃棄物からの素材の分別技術や再生材の利用技術の進展を踏まえながら、良質の材料から得られる便益と環境負荷による不利益を両方勘案して、最適な点を選び、それに対応した回収率を決定することが必要となる。

最後に、鉄鋼へのモデル適用に際して用いたパラメータを一覧表としてあらためてTable 2に示す。

6. まとめ

(1) 社会の素材ストックの増加率が減衰していく場合について、素材のリサイクルシステムのフロー及びストックを解析的に分析することのできるモデルを構築することができた。

(2) このモデルを用いて分析を行うことにより、素材ス

Table 2. Parameters used in the calculation.

Converging amount of iron stock : S	1.6 billion ton
Rate of decrease in stock growth : β	0.028
Life expectancy of iron products : T	21 years
Recovery ratio : b	80%
Tramp element addition rate : g	0.10%
CO ₂ absorption rate of the earth :	2%/year
CO ₂ discharged from BF process :	0.4tC/t
CO ₂ discharged from abandonment :	0.013tC/t
CO ₂ discharged from EF process :	0.1tC/t

トック中の再生素材の割合、不純物濃度及び環境負荷の時間変化、収束値等を定量的に明らかにすることができた。

(3) モデルに基づく理論式を鉄鋼に適用し、様々な回収率の値に対して電炉鋼割合、銅元素濃度、環境負荷等の時間変化を推計した。

(4) 回収率の向上による鉄鋼のリサイクルシステムからの大気中二酸化炭素量の削減と鉄鋼の質の劣化とのトレードオフ関係を定量的に明らかにすることができた。

文 献

- 1) 戸井朗人, 佐藤純一, 片桐広貴: エネルギー・資源, 18 (1997)1, 92.
- 2) 戸井朗人, 佐藤純一: エネルギー・資源, 18 (1997)3.
- 3) 戸井朗人, 佐藤純一: 材料とプロセス, 10 (1997), 268.
- 4) 鉄源年報, (社)日本鉄源協会, (1995), 114.
- 5) 鉄リサイクル事業のマニュアルブック, (社)日本鉄リサイクル工業会, (1992), 62.
- 6) 松岡滋樹: 鉄鋼界, 2 (1995), 11.
- 7) 吉岡完治, 早見 均, 池田明由, 菅 幹雄: イノベーション&I-Oテクニク, 3 (1993), 31.
- 8) 宇沢弘文: 地球温暖化の経済学, 岩波書店, (1995), 138.