

ロジットモデルを用いた素材のリサイクルシステムの評価

戸井 朗人*・佐藤 純一*

Evaluation of Material Recycling System with Logit Model

Akito TOI, and Junichi SATO

Synopsis : Recycling of various materials has been urged worldwide for environmental reasons. Promotion of recycling is expected to reduce environmental pollution caused by material production. However, recycling of materials can lead to increase in tramp element concentration in the material, which often causes difficulties in manufacturing and other processes. Therefore, it is necessary to evaluate every aspect of recycling in order to achieve both reduction in environmental burden and efficient use of the material.

In this study, we assume that the historic change of the amount of material stock can be approximated by logistic equation and made long term simulation of tramp element accumulation, CO₂ emission, etc. in recycling system of steel. By using this method, we evaluated various recycling systems and showed that combination of several policies can achieve significant reduction of CO₂ emission while maintaining quality of the material.

Key words : recycle ; modelling, tramp element ; environmental burden.

1. はじめに

近年、地球環境問題への意識の高まり等に伴い、鉄等の素材の一層のリサイクルが求められるようになってきている。リサイクルは、素材の生産等に必要エネルギー量を削減することにより環境への負荷を減少させる効果があると考えられるが、一方、リサイクルによる素材中への不純物蓄積が使用上の問題を引き起こすことも考えられる。このような観点から、筆者らは素材のリサイクルシステムをモデル化し、社会における素材ストック量が一定割合で増加していく場合及びストックの増加率が一定割合で低減していく場合について素材中への不純物蓄積、環境負荷等の解析を行ってきた¹⁻³⁾。本論文においては、社会における素材ストック量が極めて低い水準から、急速にその量を増加させる時期を経て、再び増加率が低下して一定値に漸近していく場合について、ロジスティックモデルを用い、数値計算法により素材生産量、素材中不純物濃度、環境負荷量等の長期間にわたる時間変化を評価し、これをもとに今後素材の質の劣化を抑えつつ環境負荷を削減する方策について検討を行う。

2. 社会における素材ストック量の推移

社会において使用される鉄鋼等のストック量は、経済規模の拡大等に伴い増大していくが、無限に増大していくの

ではなく、やがて一定値に漸近していくことが考えられる。そこで、ここでは、社会に存在する素材のストック量の時間推移に伴う変化は、家電、自動車等が社会に普及していくプロセスと同様に、ロジスティック方程式により近似することができるものとする。ロジスティック方程式を用いることにより、 t 時点における社会の素材ストック量 S_t を以下のように表すことができる。

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

ここで、 S は素材ストック量の収束値、 β_0 及び β はパラメータ。

代表的な素材として鉄鋼を取り上げ、1965～1995年の約30年間の我が国における鉄鋼ストック量のデータ⁴⁾をもとに、鉄鋼ストック量を(1)式を用いて近似したところ、パラメータ β_0 及び β の値はそれぞれ-0.832及び0.085と算出された。この結果を用いて1920年～2120年の200年間にわたる鉄鋼ストック量の推移を(1)式により推計した結果を実績値と併せてFig. 1に示す。なお、ここでは、近年米国における一人当たりの鉄鋼ストック量が13トン程度で推移していること⁵⁾を考慮して、我が国においても将来的に一人当たり鉄鋼ストックがこの程度となるものと仮定し、鉄鋼ストック量の収束値 S を16億トンと設定した。また、図中には、 S を10%ほど増減させ17.6億トン及び14.4億トンとした場合についても併せて示した。

平成9年9月29日受付 平成10年3月21日受理 (Received on Sep. 29, 1997; Accepted on Mar. 21, 1998)

* 東京大学工学部 (Faculty of Engineering, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo Bunkyo-ku Tokyo 113-8656)

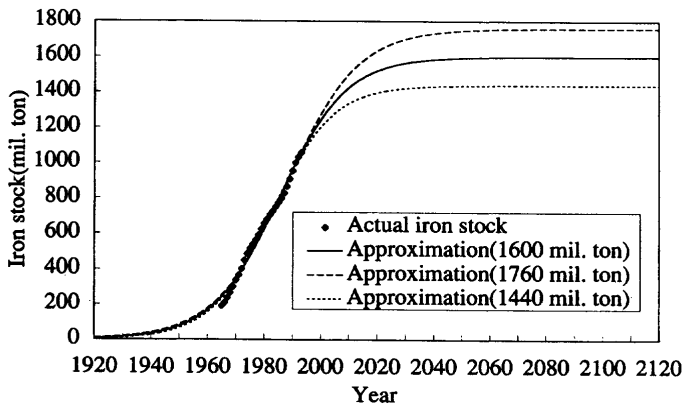


Fig. 1. Actual iron stock in Japan and approximation by logistic equation.

3. 素材のリサイクルシステム

社会における素材のリサイクルのあり方を踏まえてFig. 2のようなリサイクルシステムのモデルを考える。同図に示すように、 t 時点での社会における素材の全ストック量 S_t を、鉄鋼石等の原材料から生産される新たな素材のストック量 S_{pt} と廃棄された素材から生産される再生素材のストック量 S_{rt} に分けて考える。この系には、単位時間に q_t の量の新たな素材が供給されている。また、新たな素材ストックのうち単位時間に a_{1t} の割合のものが廃棄され、そのうち b の割合が回収されてリサイクルされる。再生素材ストックについても同様に単位時間に $a_{2t}S_{rt}$ がリサイクルされ、これら両者を合計した $a_{1t}S_{pt} + a_{2t}S_{rt}$ が再び社会に投入されることとなる。このリサイクルシステムのマテリアルフローについて、以下の式を立てることができる。

$$S_{pt} + S_{rt} = S_t \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{dS_{pt}}{dt} = q_t - a_{1t}S_{pt} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{dS_{rt}}{dt} = ba_{1t}S_{pt} - (1-b)a_{2t}S_{rt} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ついで、社会で使用される素材が廃棄されるまでの期間について考える。実際には、素材は、その使用期間に応じて一定の確率分布に従って廃棄されるものと考えられる。しかし、ここではモデルを単純化するため、新たな素材及び再生素材はそれぞれ社会において平均使用期間 T_1 及び T_2 を有し、それぞれの素材はこの期間が到来した時点で一律に廃棄されるものとする。この時、リサイクルシステムにおけるマテリアルフローについて、以下の式が成立する。

$$a_{1t}S_{pt} = q_{t-T_1} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$a_{2t}S_{rt} = b(a_{1t-T_2}S_{pt-T_2} + a_{2t-T_2}S_{rt-T_2}) \quad \dots\dots\dots (6)$$

また、リサイクルによる再生素材中への不純物蓄積について、新たな素材中の不純物量を0とし、リサイクラーでの再生過程において単位量の素材当たり g の割合の不純物が

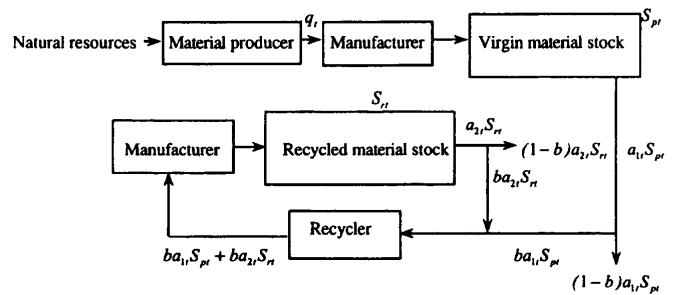


Fig. 2. Model of recycling system of material.

混入するものと考え、 t 時点における素材中の不純物量 f_t について以下の式が成立する。

$$\frac{df_t}{dt} = b(a_{1t}S_{pt} + a_{2t}S_{rt})g - (1-b)a_{2t}f_t \quad \dots\dots\dots (7)$$

さらに、環境負荷について、新たな素材単位量生産時のCO₂排出量を p_1 、素材単位量投棄時のCO₂排出量を p_2 、再生素材単位量生産時のCO₂排出量を p_3 とすると、単位時間にリサイクルシステムから排出されるCO₂の総量 h_t を以下の式により求めることができる。

$$h_t = p_1q_t + p_2(1-b)(a_{1t}S_{pt} + a_{2t}S_{rt}) + p_3b(a_{1t}S_{pt} + a_{2t}S_{rt}) \quad \dots\dots\dots (8)$$

以上でリサイクルシステムの各構成要素及び環境負荷の時間に伴う推移を表す式を求めることができたが、数値計算を行うため、(3)、(4)及び(7)式を単位時間当たりの変化に関し近似的に以下のように書き換える。

$$S_{pt+1} - S_{pt} = q_t - a_{1t}S_{pt} \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$S_{rt+1} - S_{rt} = ba_{1t}S_{pt} - (1-b)a_{2t}S_{rt} \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$f_{t+1} - f_t = b(a_{1t}S_{pt} + a_{2t}S_{rt})g - (1-b)a_{2t}f_t \quad \dots\dots\dots (11)$$

また、(9)式及び(10)式から、

$$q_t = S_{t+1} - S_t + (1-b)(a_{1t}S_{pt} + a_{2t}S_{rt}) \quad \dots\dots\dots (12)$$

以上の式をもとに、リサイクルシステムの各構成要素及び環境負荷の時間変化等を見ていくこととする。

4. モデルの鉄鋼のリサイクルへの適用

ここでは、前節で求めた式を鉄鋼のリサイクルシステムに適用する。

鋼材の用途と使用期間に関する筆者らの研究³⁾をもとに、鉄鋼石等の原材料から生産される鋼材(以下、新規鋼材という。)の平均寿命 T_1 を14年、スクラップから生産される鋼材(以下、再生鋼材という。)の平均寿命 T_2 を34年と設定する。

鉄鋼ストック量が十分に小さい時期からの推移を見るため、計算の起点として1920年を取る。(1)式により推計さ

れる1920年の鉄鋼ストック量は約680万トンである。計算の簡単化のため、この時点で存在する鉄鋼ストックはすべて新規鋼材であり、これらは1920年以降の14年間に一定の廃棄率で社会から廃棄されるものと仮定する。ただし、1920年におけるストック量は極めて小さいため、この時点で存在する素材ストックの廃棄に関する仮定のあり方は長期的なシミュレーションの結果にほとんど影響を与えない。

既報¹⁻³⁾と同様に、回収率 b を80%とする。また、他産業における誘発排出量までを含めた鉄鋼生産による総合的なCO₂排出量に関する筆者らの研究⁶⁾の結果をもとに、各プロセスに関する総合的CO₂排出量 k_1 、 k_2 及び k_3 を、それぞれ458 kgC/t、13kgC/t及び136kgC/tと設定する。再生プロセスにおいて混入する不純物としては銅に着目することとする。現時点で再生鋼材ストック中銅元素濃度の計測値の平均が0.3%程度となっている⁷⁾ことから、現在($t=0$ を1995年とする。)における再生鋼材ストック中の銅元素濃度の数値計算の結果が0.3%となるように値を調整したところ、混入率 g は0.28%と算定された。

5. 計算結果と考察

(1) 推計結果

まず、回収率、不純物混入率等が今後とも変化しないものとして推計を行った。Fig. 3に年間当たりの新規鋼材の生産量と再生鋼材の生産量の推移を推計した結果を示す。図中には、我が国の高炉鋼(平炉鋼を含む。)及び電炉鋼の過去の年間生産量の実績値を併せて示してある。ただし、本研究におけるモデルは鋼材の輸出入を考慮しておらず基本的に国内のマテリアルフローを対象としたものであるため、直接輸出される鋼材の量は鉄鋼生産量の実績値から差し引いてある。また、年度毎の経済変動の影響を抑えるため、実績値は3年間の移動平均を取ったものを示してある。便宜的に高炉鋼を新規鋼材、電炉鋼を再生鋼材と考えると、過去のトレンドは推計値と比較的よく一致している。高炉鋼生産量の実績値がピーク時において推計値を相当上回っ

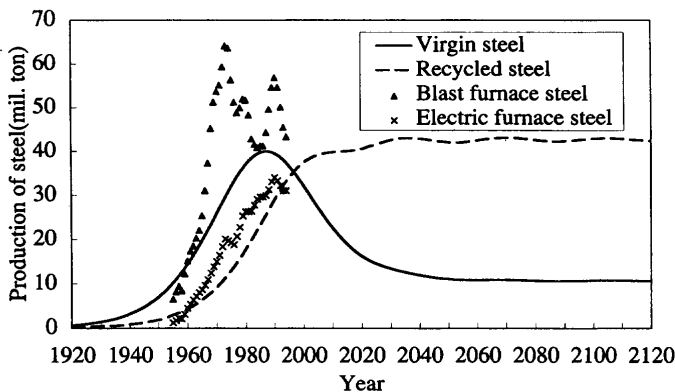


Fig. 3. Calculated production amount of virgin and recycled steel.

ているのは、この実績値が間接輸出される鋼材の量を含んでいるためであると考えられる。これに対し、電炉鋼の間接輸出は極めて少ないと考えられる。長期的に、年間当たりの新規鋼材の生産量は1100万トン程度に、再生鋼材の生産量は4300万トン程度に収束していつている。また、社会における鉄鋼ストック量の収束値 S を10%ほど増減させてその影響を見たところ、グラフ全体としては変化させる前と同様のトレンドを示しつつ、新規鋼材と再生鋼材の生産量の長期的収束値は S と同様に10%程度増減した。

ついで、全鉄鋼ストック中の再生鋼材ストックの割合の推移を推計した結果をFig. 4に示す。再生鋼材ストックの割合は、1970年頃から急激に増加した後増加率が低下し、長期的には90%程度の値に漸近していつている。同図中に、鉄鋼ストック量の収束値 S を10%ほど増減させた場合の計算結果を併せて示してある。また、フローベースで見た全鉄鋼生産量中の再生鋼材生産量の割合の推移をFig. 5に示す。再生鋼材の生産割合は、長期的に回収率と同一の80%に漸近していつている。Fig. 5にも鉄鋼ストック量収束値 S に関する感度分析の結果を示してあるが、Fig. 4及びFig. 5ともに、 S の変化による影響は全体として小さく、かつ、長期的収束値には影響を与えていない。

また、再生鋼材ストック中の銅元素濃度の推移を推計し

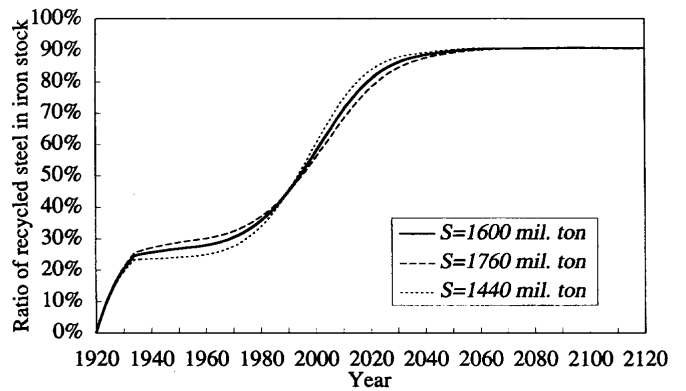


Fig. 4. Calculated ratio of recycled steel in total iron stock.

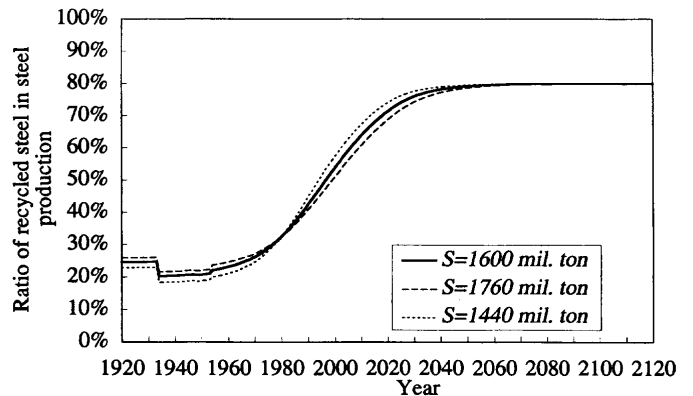


Fig. 5. Calculated ratio of recycled steel in total steel production.

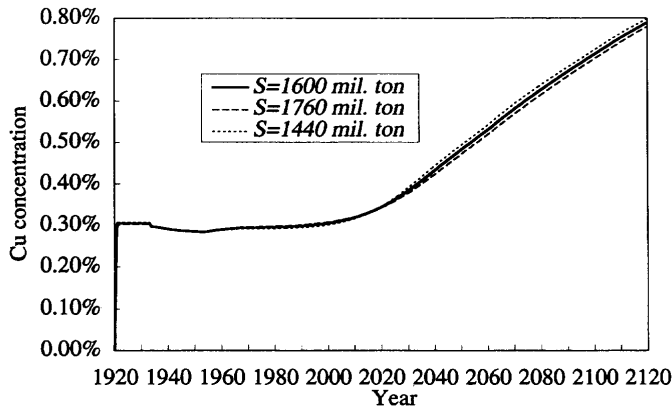


Fig. 6. Calculated Cu concentration in recycled steel stock.

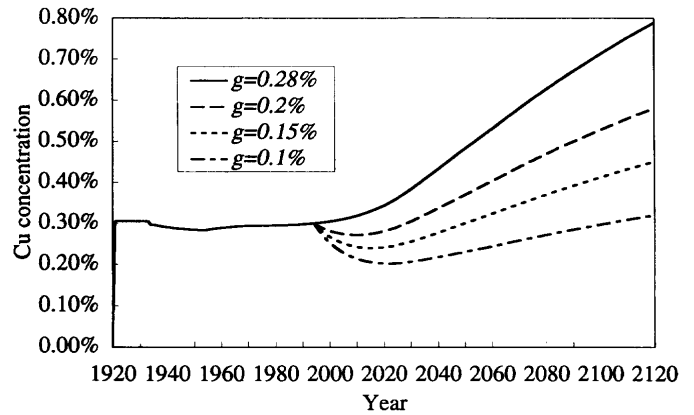


Fig. 8. Calculated Cu concentration in recycled steel stock with different g .

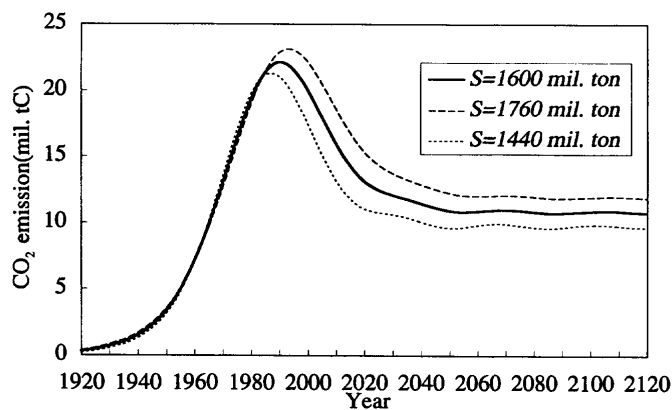


Fig. 7. Calculated CO_2 emission from recycling system of steel.

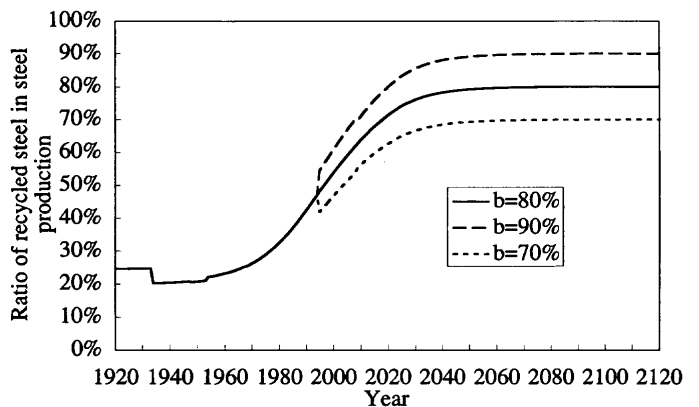


Fig. 9. Calculated ratio of recycled steel in total steel production with various recovery ratio b .

た結果をFig. 6に示す。銅元素濃度は、2000年頃まで0.28~0.3%程度の値を取った後増加し始め、2050年において約0.47%、2100年において約0.70%となるものと推計される。全国から採取した鉄スクラップを対象とした筆者らの調査⁷⁾においては、生産時期が古いと考えられる電炉鋼スクラップと新しいと考えられる電炉鋼スクラップの銅元素濃度にはほとんど差は見られなかった。本研究における推計結果はこの観察結果と一致しており、我が国においてはまた鉄のリサイクルによる不純物濃度の濃化が発生していない可能性がある。Fig. 6中にもSの値を10%増減させた場合の感度分析の結果を示してあるが、対象とした期間内における銅元素濃度への影響は割合にして2%程度又はそれ以下と小さなものとなっている。

次に、鉄鋼のリサイクルシステムから排出される年間当たりの CO_2 量の推移を推計した結果をFig. 7に示す。 CO_2 排出量は1990年に約2200万tCに達した後減少していき、長期的には1080万tC程度の値となっている。また、Sの値を10%増減させた場合には、 CO_2 排出量の長期的収束値は同様に10%程度増減した。

(2)回収率及び不純物混入率を変化させた場合
つぎに、不純物混入率、廃棄された鋼材の回収率が変化した場合の推計結果を示す。鉄鋼のリサイクルプロセスにお

ける銅元素の混入率については、最近計測された再生鋼材ストック中の銅元素濃度が0.3%程度であることから g を0.28%と設定して推計を行ってきた。しかしながら、廃棄された製品の破碎・分離・回収技術等は昔に比べて相当程度向上してきており、今後は不純物混入率が相当低下していくことが予想される。そこで、銅元素混入率 g が今後、0.2%、0.15%及び0.1%となる場合について再生鋼材ストック中の銅元素濃度の推移を推計した。結果をFig. 8に示す。例えば g が0.15%の場合、再生鋼材ストック中銅元素濃度は今後しばらくの間低下していき、2015年頃に底を打った後増加に転じるが、2050年において約0.3%、2100年においても約0.41%と比較的低い値となる。

また、フローベースでの全鉄鋼生産量に占める再生鋼材の生産量の割合の推移を異なる回収率に対して推計した結果をFig. 9に示す。いずれの場合も、再生鋼材の割合は長期的に回収率と等しい値に漸近していつている。ついで、銅元素混入率 g を0.28%としたままで回収率を変化させた場合の結果をFig. 10に示す。今後回収率が90%に増加した場合、例えば2050年において再生鋼材中の銅元素濃度は約0.52%となるが、逆に回収率が70%まで低下した場合には、この値は0.45%となる。さらに、リサイクルシステムから排出

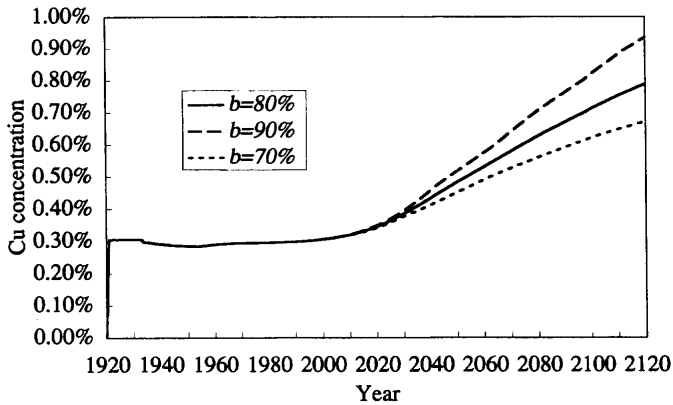


Fig. 10. Calculated Cu concentration in recycled steel stock with various recovery ratio b .

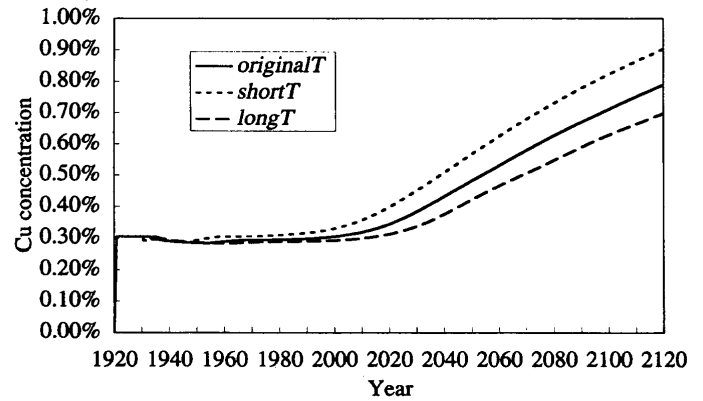


Fig. 12. Calculated Cu concentration in recycled steel stock with various steel longevity T .

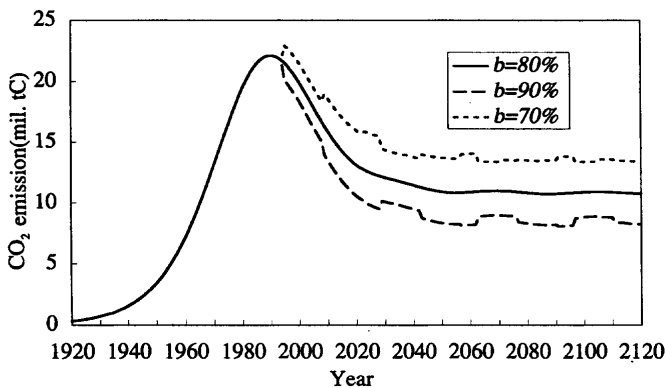


Fig. 11. Calculated CO_2 emission from recycling system of steel with various recovery ratio b .

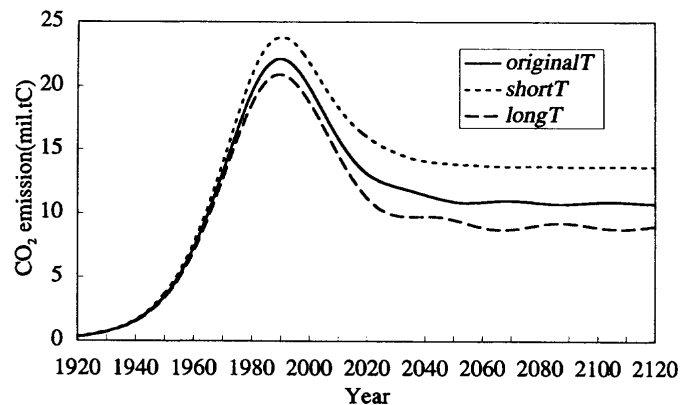


Fig. 13. Calculated CO_2 emission from recycling system of steel with various steel longevity T .

される CO_2 量を異なる回収率に対して推計した値をFig.11に示す。回収率が90%の場合、 CO_2 排出量は長期的に820万tC程度の値へ近づいていくが、回収率が70%へと低下した場合には、この値は約1350万tCとなる。

すなわち、例えば、再生鋼材の質を一定以上に維持するため2050年における再生鋼材ストック中銅元素濃度を約0.45%程度に抑えようとする場合には、廃棄された鋼材の回収率を70%程度まで低下させることが必要となるが、この場合 CO_2 排出量の長期的な漸近値は回収率80%の場合に比べて約26%増加する。一方、銅元素混入率を従来の半分程度の0.15%程度まで低下させた場合には、 CO_2 排出量は変化せず、再生鋼材ストック中銅元素濃度は2100年においても0.4%程度の値に抑えられる。

(3) 鋼材の平均使用期間を変化させた場合

ついて、新規鋼材及び再生鋼材の廃棄までの平均的使用期間をそれぞれ約2割長くした場合及び短くした場合について推計した。平均使用期間を長くした場合の T_1 及び T_2 はそれぞれ17年及び41年、短くした場合は11年及び27年である。 $t=0$ の時点から平均使用期間を変化させた場合には推計結果に不連続が生じるため、全期間にわたって鋼材の寿命が変化したものとして推計を行った。再生鋼材ストック

中銅元素濃度及び年間当たり CO_2 排出量の推計結果をFig.12及びFig.13に示す。

(4) 対応策のシミュレーション

環境負荷削減のため、鉄鋼の回収率の向上、製鉄時等の CO_2 排出量削減や鉄鋼を用いた製品の長寿命化が必要であると言われている。また、鉄鋼の利用上の観点から再生時における不純物混入の抑止が求められている。このうち、回収率の向上、製品寿命の変化及び不純物混入率低下については、前節までにそれぞれを単独で行った場合についてシミュレーションを実施した。また、製鉄時等における CO_2 排出量削減の影響については、モデル中の ρ_1 、 ρ_2 及び ρ_3 の値を変化させることによりシミュレーションを行うことができる。一方、社会における対応策を考えると、いくつかの方策を組み合わせることが実際的かつ有効ではないかと考えられる。そこで、ここでは、今後(1995年以降)、回収率の向上と不純物混入率削減を組み合わせた場合及び製品寿命の長期化を組み合わせた場合についてシミュレーションを実施した。結果をそれぞれFig.14及びFig.15に示した。Fig.14から、回収率を今後90%に向上させた場合でも、同時に銅元素混入率を0.23%にまで引き下げることにより、再生鋼材中銅元素濃度を回収率等が現状のままで推移した場合

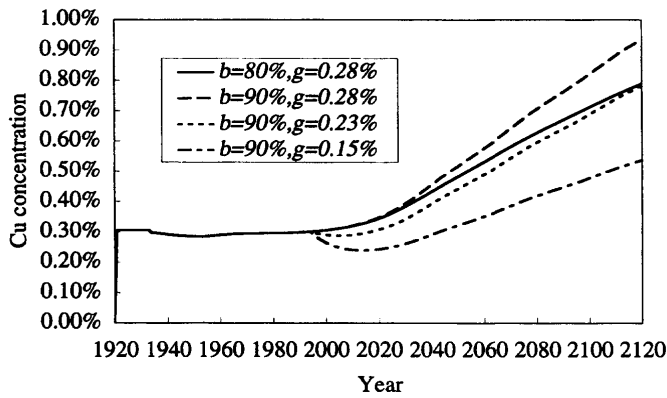


Fig. 14. Calculated Cu concentration in recycled steel stock with different recovery ratio b and g .

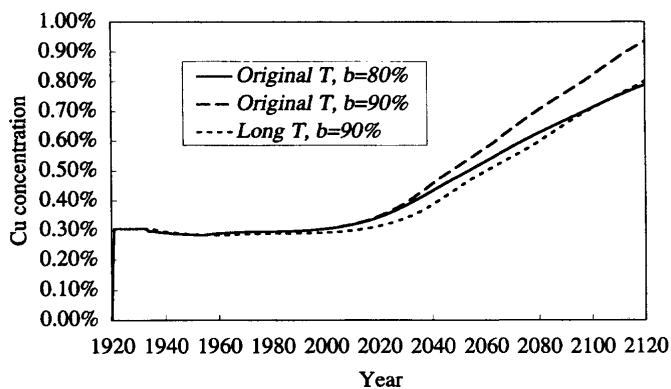


Fig. 15. Calculated Cu concentration in recycled steel stock with different recovery ratio b and steel longevity T .

と同じ程度まで引き下げることが可能であることが分かる。また、Fig.15からも同様に、回収率を今後90%まで引き上げた場合でも、製品寿命を2割ほど長期化することにより、再生鋼材中銅元素濃度を回収率等が現状のままで推移した場合と同じ程度まで引き下げることができることが分かる。また、この時のCO₂排出量の推移をFig.16に示す。回収率の90%への引き上げと製品寿命の2割の長期化により、CO₂排出量は約35%削減される。

(5) 対応策の評価

最後に、当面の目標年として2050年を考え、対応策の組み合わせに対応した2050年時点での各項目の推計値をTable 1に示す。ここで示したような対応策は、その実現のための技術開発、設備投資、あるいは租税上の措置等のコストを伴う。現在様々な対応策の研究・検討が行われているが、単独の対応策を推し進めていくことは、技術的な困難性等の増大から必要なコストの大幅増を引き起こすものと考えられることから、不純物混入率の削減、回収率の向上、製品使用期間の長期化等の技術上、政策上の対応策を多面的に進めていくことが必要であると考えられる。

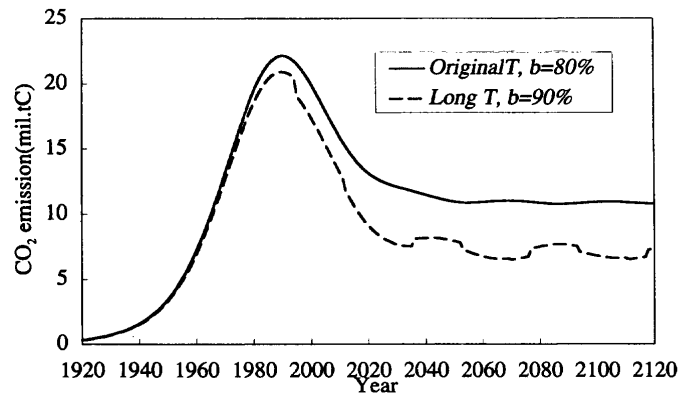


Fig. 16. Calculated CO₂ emission from recycling system of steel with different recovery ratio b and steel longevity T .

Table 1. Combination of policies and calculated outcome for year 2050.

Policies			Outcome		
Recovery ratio b (%)	Impurity mixture(%)	Longevity T	CO ₂ emission (mil.Ct)	Cu concentration (%)	Total steel production (mil.t)
80	0.28	Original	10.9	0.48	53.1
90	0.28	Original	8.3	0.52	48.3
90	0.28	Long	7.9	0.44	45.7
90	0.23	Original	8.3	0.44	48.3
90	0.15	Original	8.3	0.32	48.3
90	0.15	Long	7.9	0.28	45.7

6. 結言

我が国の鉄鋼ストック量の推移をロジスティック方程式で近似し、リサイクルシステムにおけるマテリアルフロー及び環境負荷に関するモデルに基づき数値計算を行うことにより、新規鋼材・再生鋼材の生産量、再生鋼材ストック中不純物濃度、CO₂排出量等の長期間にわたる推移を推計することができた。また、再生過程における不純物混入率、廃棄された鉄鋼の回収率、鋼材の平均使用期間等が変化した場合の各項目の動きについても明らかにすることができた。

さらに、回収率の向上と不純物混入率の低下及び製品寿命の長期化を組み合わせた場合についてシミュレーションを行い、これらの組み合わせにより鉄鋼の質劣化の進展を抑えつつCO₂排出量を削減していくことが可能であることを定量的に示した。

文 献

- 1) 戸井朗人, 佐藤純一, 片桐広貴: エネルギー・資源, 18(1997), 92.
- 2) 戸井朗人, 佐藤純一: エネルギー・資源, 18(1997), 271.
- 3) 戸井朗人, 佐藤純一: 鉄と鋼, 83(1997), 407.
- 4) 鉄源年報, 日本鉄源協会, 東京, (1995), 114.
- 5) 鉄源年報, 日本鉄源協会, 東京, (1995), 118.
- 6) 戸井朗人, 片桐広貴, 佐藤純一: 鉄と鋼, 83(1997), 677.
- 7) 戸井朗人, 佐藤純一, 加根魯和宏: 鉄と鋼, 83(1997), 850.