

ポピュレーションバランスモデルによる 日本鋼材利用パターンのマクロモデル

角館 慶治*・河村 光隆*²・足立 芳寛*³・鈴木 俊夫*³

A Macro Model for Steel Usage Pattern in Japan Using the Population Balance Model

Keiji KAKUDATE, Mitsutaka KAWAMURA, Yoshihiro ADACHI and Toshio SUZUKI

Synopsis : The macro model for evaluating the amount of CO₂ emission by virgin production, disposal and recycling of steels in Japanese society is proposed. The steels are classified into two groups for machinery and constructions, and it is assumed that steels are discharged from the society in accordance with each lifetime distribution, which is approximated by the gamma distribution. The amount of recycling steel and the stock are calculated using the population balance model with the input data of the statistics and estimated values for basic steel production, domestic consumption ratio and consumption ratio for constructions. The validity of this model is verified by the comparison with the calculated results and statistics of stock and steel production by electric furnaces. The copper concentration in recycling steel and the amount of total CO₂ emission are also calculated. The effect of recycling ratio on the total amount of CO₂ emission is analyzed under the assumption that recycled steel is diluted with virgin steel not so as to exceed the allowable copper concentration. The results show that recycling ratio is upper-bounded at 21st century because of the necessary dilution and that the total amount of CO₂ emission is not much reduced by increase of recycling ratio.

Key words : recycle; steel production; lifetime distribution; population balance model; CO₂ emission; copper concentration.

1. 緒言

様々な活動によるCO₂排出の集積が地球温暖化を引き起こすと言われている。活動の中でも工業製品群の生産、使用(蓄積)、廃棄による寄与が大きく、製品のリサイクルと長寿命化がCO₂排出削減の一つの手段と考えられる。製品群の環境負荷予測手法の1つにSFA(Substance Flow Analysis)¹⁾がある。これは一定の地域、時間内(通常1年)における製品または製品群の流れと蓄積にLCA(Life Cycle Assessment)のLCI(Life Cycle Inventory)を加え、分析するものである。しかし、鋼材のように新規製造時の環境負荷が大きく、その使用も長期間にわたる場合には、SFAとは異なった手法が必要となる。すなわち、新規製造に加え、製品寿命により社会から排出された製品の廃棄、リサイクルに伴う一連のCO₂排出量予測手法が必要である。

本論文では、製品として鋼材を例にとり流量、蓄積量、使用年数分布を予測するモデルを構築し、CO₂排出量、鋼材の不純物濃度を解析した結果を述べる。このような鉄鋼産業の環境負荷について、戸井ら²⁾は蓄積量に排出量が比例するリサイクルモデルを導出し、CO₂排出量を予測している。本研究では、より現実的な状況を想定し、鋼材の寿命分布による社会における鋼材の蓄積量時間変化を考慮し

たモデルにより、リサイクル量、蓄積量の推移を解析した。そして、解析結果と統計値との比較によりモデルの妥当性を検討するとともに、リサイクル材の不純物濃度増加に伴うCO₂排出量増加を考察した。

2. 鋼材流量のマクロモデル

鋼材寿命はさまざまな要因で決まる。しかし、鋼材の多くは機械、土木建築用として使用されるので、使用年数 α により決まると考えてよい。ただ、用途によりその使用年数は異なり、同一の鋼材でも排出されるまでの使用年数には分布が生じる。この分布は製造時に製品の寿命を決定する寿命分布 $g(\alpha)$ として定義され、各種統計中の廃棄率分布から求まる。廃棄率分布は、ある年度の総排出量を使用年数について、割合で整理したものである。鋼材の使用形態がさほど変化しないとすれば、廃棄率分布を寿命分布 $g(\alpha)$ と考えてよい。また、鋼材の在庫期間は使用期間に比べて十分短いので、製造後の年数を使用年数 α と見なすことができる。

鋼材の用途は自動車を含む一般機械用と土木建築用とに大別できる。両者の寿命分布は大きく異なるので、一般機械用鋼材の寿命分布を $g_m(\alpha)$ 、土木建築用鋼材の寿命分布を $g_c(\alpha)$ とすれば、時刻 t に流入した鋼材全体の寿命分布は

平成11年11月8日受付 平成12年3月1日受理 (Received on Nov. 8, 1999; Accepted on Mar. 1, 2000)

* 東京大学大学院生 (Graduate Student, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo Bunkyo-ku 113-8656)

* 2 工業技術院物質工学工業技術研究所 (National Institute of Materials and Chemical Research)

* 3 東京大学大学院工学系研究科 (Graduate School of Engineering, The University of Tokyo)

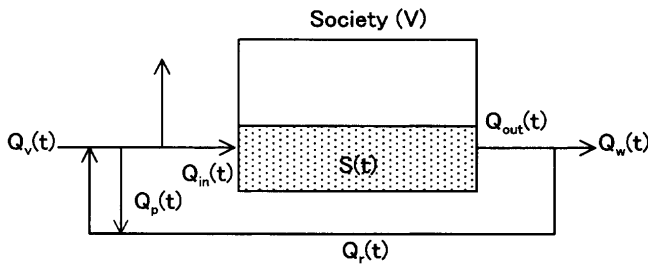


Fig. 1. Model for Japanese steel production flow.

$$g(\alpha, t) = (1 - \beta(t))g_m(\alpha) + \beta(t)g_c(\alpha) \dots \dots \dots (1)$$

となる。ここで、 t は時間（年度）、 $\beta(t)$ は粗鋼国内流入量に占める土木建築用鋼材率であり、寿命分布は連続関数として取り扱う。

ここでは鋼材の使用年数と社会への流入流出による収支を考えるので、Population balance model³⁾を用いることができる。Population balance modelは外部座標と内部座標を持つ空間内で、物質分布の収支を求める手法である。本研究の場合、外部変数は時間、内部変数は使用年数となる。これまで、Population balance modelは混合状態にある反応槽内の滞留時間、粒子径等を内部変数とし、反応率、粒子成長などの解析に用いられてきた⁴⁾。反応槽モデルでは流入量と排出量を与え、排出時の混合状態を求めるのに対し、本研究では内部変数である使用年数により排出を求める点異なる。

3. 解析方法

3.1 鋼材流量と蓄積量

本研究では、日本国内の鋼材収支を Fig. 1 のように考える。新規製造量 $Q_v(t)$ は転炉鋼生産量、リサイクル量 $Q_r(t)$ は電炉鋼生産量、その合計は粗鋼生産量に対応する。製品中に含まれる鋼材の輸出入も考慮し、粗鋼生産量に対する国内流入率を $d(t)$ とする。輸出入後の鋼材量に対する加工屑発生率を $p(t)$ とすると、国内流入量 $Q_{in}(t)$ は $(1-p(t))d(t)(Q_v(t)+Q_r(t))$ となる。排出量 $Q_{out}(t)$ はリサイクル率 r によりリサイクルされ、残りの $Q_w(t)$ は廃棄される。加工屑発生量 $Q_p(t)$ はすべてリサイクルされ、リサイクル量 $Q_r(t)$ は $rQ_{out}(t)+Q_p(t)$ となる。また、アメリカなど先進国では一人あたり鉄鋼蓄積量が一定となる傾向が見られる⁵⁾ ことから、社会は一定の蓄積可能量 V を持つとし、最大蓄積量 S_{max} と等しいとする。

Population balance model では、蓄積量の変化量は、社会への鋼材の流入量から排出量を引いたものと等しいとする。社会内部で生成消滅はないので、その一般式は

$$V \frac{\partial n(\alpha, t)}{\partial t} + V \frac{\partial}{\partial \alpha} \left(\frac{d\alpha}{dt} n(\alpha, t) \right) = [Q_{in}(t)n_{in}(\alpha, t) - Q_{out}(t)n_{out}(\alpha, t)] \dots \dots \dots (2)$$

となる。ここで、 $n(\alpha, t)$, $n_{in}(\alpha, t)$, $n_{out}(\alpha, t)$ はそれぞれ蓄積可能量 V , 流入量 $Q_{in}(t)$, 排出量 $Q_{out}(t)$ に対する使用年数 α で整理した鋼材量の割合を表すものである。

本モデルの場合、鉄鋼製品は一度製造されると社会から排出されるまで変化しないこと、社会内部は混合状態にはないとみなせることから、 $d\alpha/dt=1$ とする。社会への流入時の新規製造材、リサイクル材の使用年数を 0 とすると、 $n_{in}(\alpha, t) = \delta(0, t)$ となり、(2)式は

$$V \frac{\partial n(\alpha, t)}{\partial t} + V \frac{\partial n(\alpha, t)}{\partial \alpha} = Q_{in}(t)\delta(0, t) - Q_{out}(t)n_{out}(\alpha, t) \dots \dots (3)$$

となる。

寿命分布 $g(\alpha, t)$ は、そのままでは(3)式に適用できない。時刻 t において、使用年数 α の蓄積量 $Vn(\alpha, t)$ のうち排出される割合を考え、これを排出率分布 $h(\alpha, t)$ とする。時刻 t における使用年数 α の鋼材の排出量は、

$$Q_{out}(t-\alpha) \left(1 - \int_0^\alpha g(x, t-\alpha) dx \right) h(\alpha, t-\alpha) = Q_{in}(t-\alpha)g(\alpha, t-\alpha) \dots \dots \dots (4)$$

で与えられるので、排出率分布は

$$h(\alpha, t) = \frac{g(\alpha, t)}{1 - \int_0^\alpha g(x, t) dx} \dots \dots \dots (5)$$

となる。時刻 t における使用年数 α の蓄積量 $Vn(\alpha, t)$ に対する排出率分布は $h(\alpha, t-\alpha)$ なので、使用年数 α の鋼材の排出量は、 $h(\alpha, t-\alpha)Vn(\alpha, t)$ となる。よって、(3)式の右辺第2項は、

$$Q_{out}(t)n_{out}(\alpha, t) = h(\alpha, t-\alpha)Vn(\alpha, t) \dots \dots \dots (6)$$

となり、(3)式は

$$V \frac{\partial n(\alpha, t)}{\partial t} + V \frac{\partial n(\alpha, t)}{\partial \alpha} = Q_{in}(t)\delta(0, t) - h(t-\alpha)Vn(\alpha, t) \dots \dots (7)$$

となる。また、 $\int_0^\infty n_{out}(\alpha, t) d\alpha = 1$ なので(6)式より

$$Q_{out}(t) = V \int_0^\infty h(\alpha, t-\alpha)n(\alpha, t) d\alpha \dots \dots \dots (8)$$

となる。また、蓄積量 $S(t)$ は

$$S(t) = V \int_0^\infty n(\alpha, t) d\alpha \dots \dots \dots (9)$$

となる。初期条件 $n(0, t) = Q_{in}(t)/V$ で、(7)式を解くと流量、蓄積量、使用年数分布が求まる。

3.2 不純物濃度およびCO₂排出量

不純物は、鋼材および製品の製造、使用、リサイクルなど様々な場面で混入する。ここでは、不純物はリサイクル

時のみ混入し、濃度はリサイクル材中で均一になるとする。リサイクル量に対する不純物混入量の割合を混入率 $m(t)$ とすると、不純物混入量 $i(t)$ は、

$$i(t) = m(t)rQ_{out}(t) \dots\dots\dots(10)$$

となる。時刻 t 、使用年数 α の排出物の不純物濃度を $c(\alpha, t)$ とすると、リサイクル材に含まれている不純物量 $i_r(t)$ は、

$$i_r(t) = rQ_{out}(t) \int_0^\infty c(\alpha, t)n_{out}(\alpha, t)d\alpha \dots\dots\dots(11)$$

となり、新たなリサイクル材の不純物濃度 $c_r(t)$ は、

$$c_r(t) = \frac{i(t) + i_r(t)}{Q_r(t)} \dots\dots\dots(12)$$

となる。ただし、不純物量はリサイクル量に対して十分小さいので、計算簡略化のため分母には加えていない。

リサイクルが進むと不純物濃度は上昇し、各種鋼材製造時の許容濃度 c_{lim} を超える。このためリサイクル材中の不純物は、低不純物濃度スクラップ、還元鉄、転炉鋼等を用いて希釈される。転炉鋼が希釈に用いられるとすれば、希釈用転炉鋼量 $Q_{dil}(t)$ は

$$Q_{out}(t) = \frac{i(t) + i_r(t)}{c_{lim}} - Q_r(t) \dots\dots\dots(13)$$

となる。

本論文では、CO₂排出の境界を日本国内とし、使用中に排出されるCO₂は含まないとした。新規製造材、リサイクル材、廃棄材の単位量あたりのCO₂排出量をそれぞれ a_v , a_r , a_w とする。希釈用転炉鋼はリサイクル材の原料となるので、新規製造に加えリサイクル材と同量のCO₂を排出するとした。国内における総CO₂排出量 Q_{CO_2} は、

$$Q_{CO_2}(t) = a_vQ_v(t) + a_r(Q_r(t) + Q_{dil}(t)) + a_wQ_w(t) \dots\dots\dots(14)$$

によって得られる。

3.3 統計値

粗鋼生産量は統計値⁵⁾とし、1998年以降は年産1億tで推移するとした。また、比較のために

$$Q_v(t) + Q_r(t) = 10^8 / (1 + 300e^{-0.3t}) \dots\dots\dots(15)$$

と近似した式による計算も行った(Fig. 2)。国内流入率は次のような手順で求めた。まず、間接輸出入量は、1955年以前はデータを得られなかったので0とし、1956年から1969年は統計値⁵⁾より、前年間接輸出入量 / (前年機械輸出入額 - 前年機械輸入額) × (今年機械輸出入額 - 今年機械輸入額) として推算し、1970年以降は統計値によった。次に、国内流入量を粗鋼生産量から粗鋼輸出入量と間接輸出入量を差し引いたものとして求め、粗鋼生産量で割り国内流入率を得た。1998年以降については一定値0.705で推移

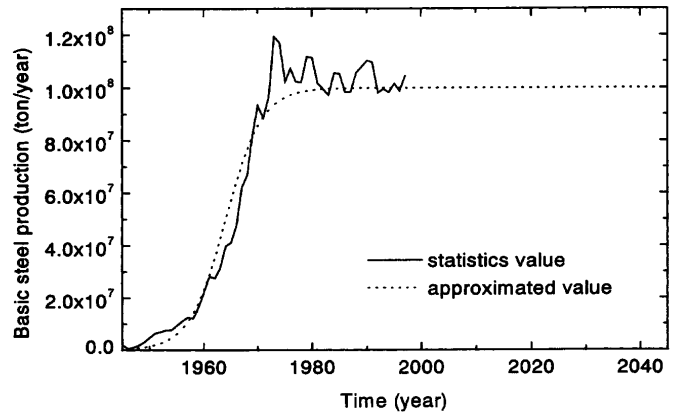


Fig. 2. Time change of the basic steel production. A solid line is statistics value and a broken curve is an approximated one.

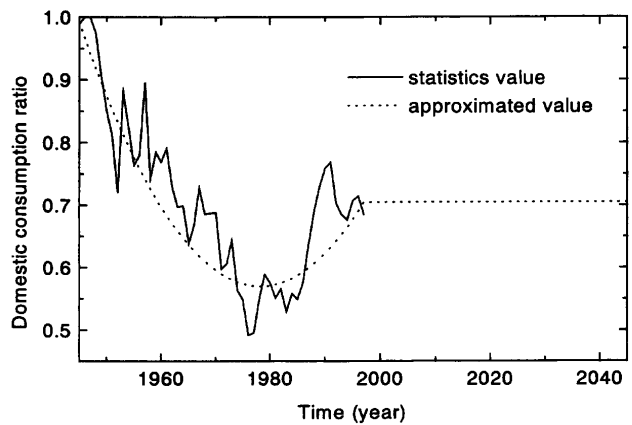


Fig. 3. Time change of the domestic consumption ratio. A solid line is statistics value and a broken curve is an approximated one.

するとした。また、粗鋼生産量の場合と同様に、1945年から1997年までは以下の式(16)

$$d(t) = 1.50 \cdot 10^3 - 1.51 \cdot (t + 1945) + 3.82 \cdot 10^{-4} \cdot (t + 1945)^2 \dots\dots(16)$$

で、1998年以降は0.705で推移する近似式を用いた計算も行った(Fig. 3)。加工屑発生率 $p(t)$ は加工屑発生量を国内流入量で除して得られる。1970年から1998年までは統計値⁶⁾を用い、それ以外の年は0.11とした。また、粗鋼生産量の場合と同様に、近似式 $p(t) = 0.11$ を用いた計算もした(Fig. 4)。

土木建築鋼材率 $\beta(t)$ は、1962年から1997年は統計値⁵⁾による土木建築用鋼材量を先ほど推算した国内流入量で割り、得られる。統計値のない年は0.61で一定とした。また、ここでも粗鋼生産量の場合と同様に、 $\beta(t) = 0.61$ で近似した式を用いた計算も行った(Fig. 5)。Fig. 2, 3, 4, 5では統計値(一部推算値も含む)を実線、近似曲線を破線で表している。なお、1945年を $t=0$ とし、この時の社会の中蓄積量は0とした。

文献⁷⁾より鋼材の寿命分布はガンマ分布で近似されるとした。平均寿命の倍使用されれば、製品のほとんどは社会から排出されていると考え、分散は0から平均寿命の倍ま

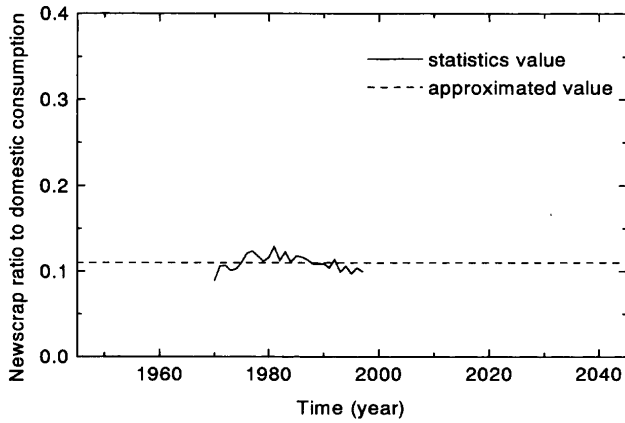


Fig. 4. Time change of the news scrap ratio to domestic consumption. A solid line is statistics value and a broken line is an approximated one.

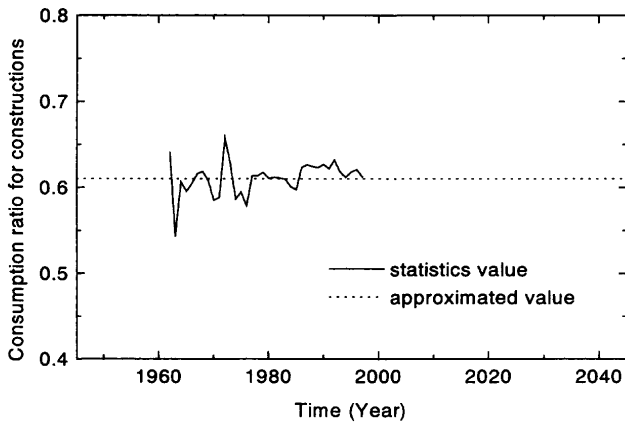


Fig. 5. Time change of the consumption ratio for constructions. A solid line is statistics value and a broken line is the approximated one.

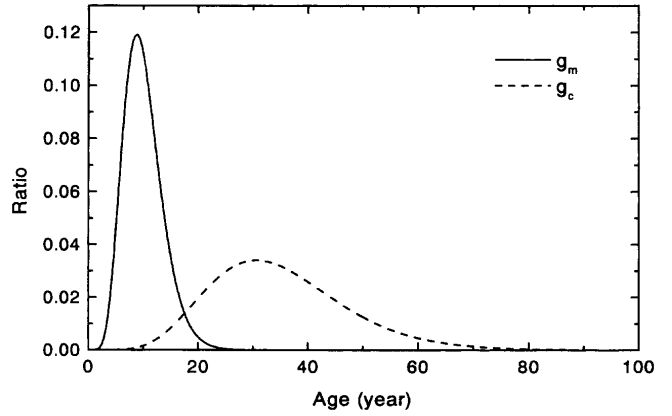


Fig. 6. Lifetime distributions of steels for machinery and constructions.

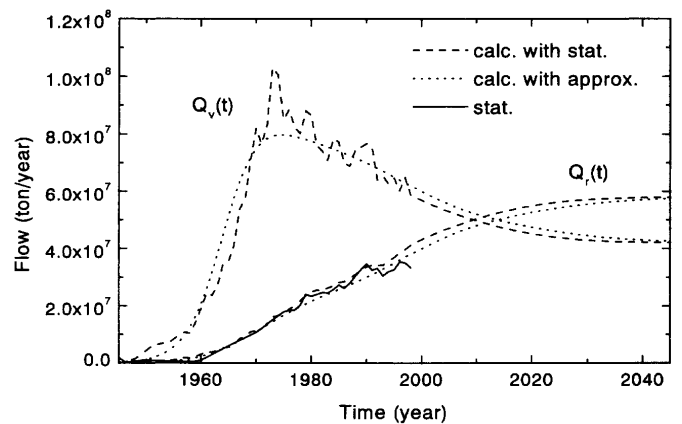


Fig. 7. Time change of the virgin steel flow and the recycled steel flow. Broken curves are calculated results using statistics value and dotted curves is a calculated result using approximated equations. The solid line is statistics value, $Q_{stat}(t)$.

での積分値が無大までの積分値の99%を占めるように決定した。文献⁷⁾より、機械用および土木建築用鋼材の平均寿命はそれぞれ10.06年、27.45年と算定される。しかし、土木建築用鋼材は50年以上使用される例もまれではないので、もう少し長く使用されると推定し、35.0年とした。分散はそれぞれ12.50、153.5となる。計算に用いた寿命分布をFig. 6に示す。

3.4 数値計算方法

まず、(7)式を、時間、使用年数について前進差分、後進差分により差分化し、陽解法により解を求めた。 $\delta(\alpha, t) = 0$ ($\alpha \neq 0$)より、(7)式中のデルタ関数は差分方程式に含まれない。

$$n(\alpha, t + \Delta t) = \left(-h(\alpha, t - \alpha) \Delta t \frac{\Delta t}{\Delta \alpha} + 1 \right) n(\alpha, t) + \frac{\Delta t}{\Delta \alpha} n(\alpha - \Delta \alpha, t) \dots \dots \dots (17)$$

ここで、 $\Delta t = 0.05$ 年、 $\Delta \alpha = 0.1$ 年とした。使用年数0の鋼材量は $Q_{in}(t)$ なので、初期条件は $n(0, t) = Q_{in}(t) / V$ となる。時刻 $t + \Delta t$ における $n(\alpha, t + \Delta t)$ を α について $\Delta \alpha$ から $t + \Delta t$ まで

(17)式により求める方法を、時刻0から Δt ずつ時刻を進めて計算した。ただし、使用年数は時刻を超えない。

文献²⁾からリサイクル率 r は0.8とし、 a_v, a_r, a_w にはそれぞれ0.458, 0.136, 0.013 C-ton/Fe-tonを用いた。不純物濃度の希釈を考慮する場合については、2000年まで0.8とし、2000年以降のリサイクル率を0.7, 0.8, 0.9と変化させた。不純物は、トランプエレメントの1つである銅を対象とした。文献⁸⁾から不純物混入率 $m(t)$ は0.0025とし時間変化しないとした。また、許容不純物濃度 c_{lim} は形鋼の0.3%⁹⁾よりも少し低い0.25%とした。

4. 結果と考察

4.1 リサイクル量と蓄積量の推移

新規製造量 $Q_v(t)$ とリサイクル量 $Q_r(t)$ の計算結果をFig. 7に示す。図には統計値⁵⁾より(電炉生産量-輸出入鉄くず量)として得られる $Q_{stat}(t)$ も合わせて示してある。また、蓄積量 $S(t)$ の計算結果をFig. 8に示す。図には統計値⁵⁾より得られる蓄積量 $S_{stat}(t)$ も合わせて示してある。計算結果

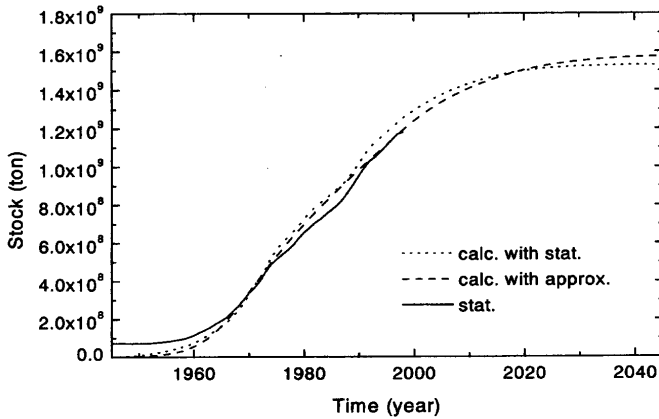


Fig. 8. Time change of the amount of stock. A dotted curve is a calculated result using statistics value and a broken curve is a calculated result using approximated equations. The solid line $S_{stat}(t)$ is statistics value.

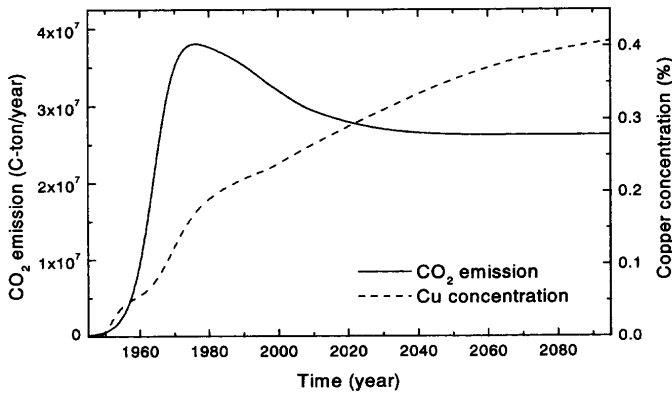


Fig. 9. Time change of CO₂ emission and Cu concentration.

より、蓄積量は一定値に収束して行く傾向にあり、最大蓄積量 S_{max} は約 $1.6 \times 10^9 t$ となる。よって蓄積可能量 V は約 $1.6 \times 10^9 t$ と与えられる。Fig. 7, 8において、実線は統計値を、破線および点線は計算結果を表している。これら統計値と計算値を比較すると、良く合っている。1945年の統計蓄積量は約 $7.0 \times 10^7 t$ であり、蓄積可能量 V に比べて小さいので初期値を $S=0$ としても差し支えないであろう。また、統計値と近似式を用いた結果の間にはあまり差がなく、以下、近似式を用いた計算結果により議論を行う。

不純物が希釈されない場合のCO₂排出量と不純物濃度の計算結果をFig. 9に示す。実線はCO₂排出量を、破線はリサイクル材中銅濃度を表している。CO₂排出量は1975年あたりをピーク(約3800万C-t)とし、新規製造量の減少に伴い減少する。CO₂排出量を戸井ら²⁾の結果と比較すると、本論文の結果は約1300万C-t多い。文献²⁾では、CO₂排出量は国内流入量から求められており、過小評価されている。また、不純物濃度は2000年で約0.24%となっており、時間が経過するにつれ上昇する。

4.2 CO₂排出量に及ぼすリサイクル率の影響

不純物濃度の希釈はCO₂排出量に影響を与える。2000

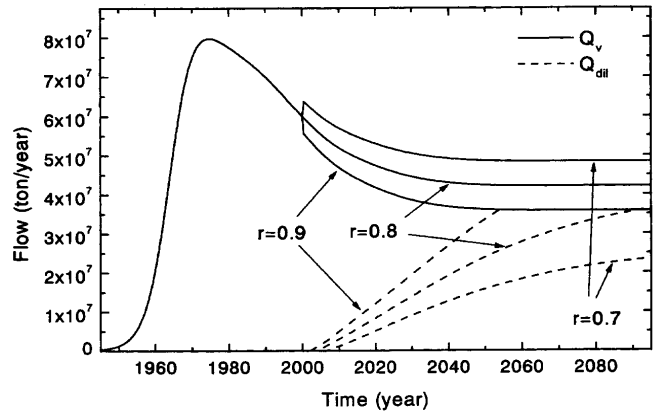


Fig. 10. Time change of the amount of virgin steel product and virgin steel consumed for the dilution with different recycle ratios. Solid curves are the amount of virgin steel product and broken curves are the amount of virgin steel consumed for the dilution.

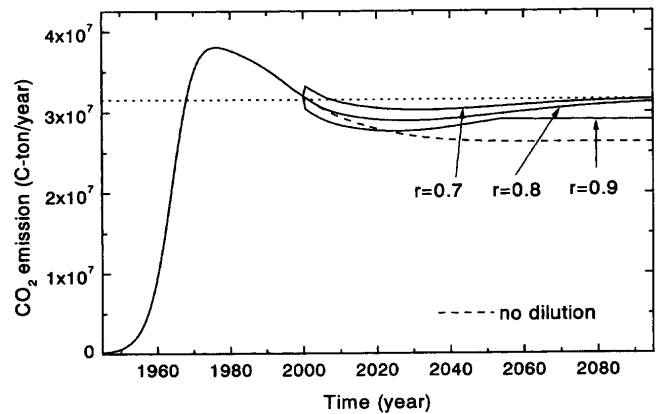


Fig. 11. Time change of CO₂ emission with different recycle ratios. Solid curves are calculated results, a dot curve is a calculated result without the dilution and a broken line is required by the voluntary plan of the Japan iron and steel Federation.

年でリサイクル率 r が変化する場合の新規製造量、希釈用転炉鋼量の計算結果をFig.10に示す。実線は新規製造量、破線は希釈用転炉鋼量を表す。リサイクルが進むと希釈用転炉鋼の新規製造量に占める割合が増加していく。この傾向はリサイクル率が高いほど顕著であり、リサイクル率が0.9の場合2054年以降は国内新規製造量で希釈用転炉鋼量をまかなえない。

国内における鋼材の総CO₂排出量 Q_{CO_2} の計算結果をFig.11に示す。実線は計算値を、点線はCOP3を受けた鉄鋼連盟の自主行動計画(2010年時点で1990年の10.5%削減)の目標値を表す。破線は希釈しない場合の計算結果($r=0.8$)を表す。CO₂排出量は先ほど同様1975年あたりをピークに減少し、希釈によるCO₂排出量付加によりその後上昇する。リサイクル率0.7と0.8の場合の比較から、リサイクル率の上昇によるCO₂削減効果が認められるが、やがてその効果は薄くなる。リサイクル率が0.9の場合、2054年以降国内新規製造材はすべて希釈用転炉鋼として利用さ

れ、その結果CO₂排出量の上昇は止まるが、不純物濃度は許容限界濃度を超える。2100年までにリサイクル材中銅濃度を許容範囲内に保つリサイクル率には上限が存在し、リサイクル率増加によるCO₂排出量削減効果は減少することになる。

5. 結言

新規製造、リサイクル、使用（蓄積）、廃棄からなり、鋼材が寿命分布にしたがって社会から排出される日本鉄鋼産業のモデルを構築した。寿命分布はガンマ分布で近似できるとし、用途の異なる一般機械用と土木建築用について求めた。粗鋼生産量、国内流入率、土木建築鋼材率を統計値および推算値から求めた。また、これらに対する近似式を求めた。それぞれの場合について、Population balance modelの適用により鋼材のリサイクル量、蓄積量を計算した。これらの結果と統計による（電炉鋼生産量－スクラップ輸出入量）、蓄積量を比較し、このモデルの妥当性を確かめた。また、リサイクル材中銅濃度、CO₂排出量を計算

し、許容銅濃度を超えないようにリサイクル材を転炉鋼で希釈する場合について、リサイクル率がCO₂排出量に及ぼす影響を調べた。その結果、21世紀には、リサイクル材中銅濃度を許容範囲内に保つリサイクル率には上限が存在し、リサイクル率増加によるCO₂排出量削減効果は減少することを予測した。

文 献

- 1) A.Tukker, A.S.Jasser and R.Kleijn: *Environ. Sci. Pollut. Res.*, **4** (1997), 113.
- 2) A.Toi and J.Sato: *Tetsu-to-Hagané*, **84** (1998), 534.
- 3) D.M.Himmelblau and K.B.Bischoff: *Process Analysis and Simulation; Deterministic Systems*, John Wiley & Sons, Inc., New York, (1968).
- 4) V.W.Uhl and J.B.Gray: *Mixing Theory and Practice*, Academic Press, New York, (1966).
- 5) 鉄鋼統計要覧（1961-1998年度版）、日本鉄鋼連盟鉄鋼統計専門委員会編、日本鉄鋼連盟、東京、(1961-1998).
- 6) 鉄源年報、日本鉄源協会、東京、(1999), 21.
- 7) A.Toi and J.Sato: *Energy Resour.*, **18** (1997), 271.
- 8) A.Toi, J.Sato and T.Kanero: *Tetsu-to-Hagané*, **83** (1997), 850.
- 9) H.Katayama and Y.Mizukami: *Materia Jpn.*, **35** (1996), 1285.