

鋼材循環利用における環境負荷誘発量解析のための 動態モデルの構築

醍醐 市朗^{*,*2}・藤巻 大輔^{*}・松野 泰也^{*}・足立 芳寛^{*}

Development of a Dynamic Model for Assessing Environmental Impact Associated
with Cyclic Use of Steel

Ichiro DAIGO, Daisuke FUJIMAKI, Yasunari MATSUNO and Yoshihiro ADACHI

Synopsis : Steels are produced in large quantities and being recycled at high rate in Japan. However, recycling of steel scraps would lead to the enhancement of contamination of undesirable tramp metals in steel scraps. So, the limitation of recycling of the steel scraps would be expected in the near future. This may increase in the production of virgin steels and environmental impacts associated with total steel production in Japan. The authors have developed a dynamic model to assess the maximum recyclable ratio of steel scraps and the total environmental impacts caused by the steel production in Japan. The model is based on population balance model (PBM), material pinch technology in corporate with LCA. The amount of steel scraps generated in Japan and their concentration of tramp metal during 1990–2030 were estimated by PBM. The maximum recyclable ratio of steel scraps in each year was calculated by material pinch technology, in which assessed were optimal balance between the amount and quality of steel scraps and those of steel products. The total CO₂ emissions caused by steel production in Japan during 1990–2030 were estimated by LCA.

Key words : pinch technology, population balance model, LCA, CO₂ emissions, degradation, steel recycling

1. 緒言

鉄鋼材は、年間生産量が1億t程度と大きく、リサイクル率も高い材料であり、我が国における循環型社会構築の規範たる材料と位置づけられる。しかしながら、スクラップのリサイクル工程において、CuやSn等の鋼材中に一度含まれると除去が難しいトランプエレメントが混入する。そのため、スクラップの再利用が促進されるに伴い、経年的に鋼材中のトランプエレメントの濃化が起こる¹⁾。鋼材中においてCuやSnの含有率が增大すると、表面赤熱脆性や成形性に悪影響を及ぼすことが知られている^{2,3)}。従って、将来、トランプエレメントの濃化により、発生する鉄スクラップの利用に限界が生じ、現行の再資源化率を低下させるか、新技術の開発に期待せざるを得ないことが予想されている^{1,4)}。

このように鋼材の循環利用では、スクラップ中に含有されるトランプエレメント濃度を、スクラップの質の劣化指標として用いることができる。その上で、将来において生産される鋼材と供給されるスクラップの質と量のバランスを考慮した、鉄スクラップ利用の評価モデルの構築が必要となっている^{5,6)}。

本研究では、鉄スクラップ中のトランプエレメントであるCuに着目し、将来における鋼材の需要量と鉄スクラッ

プの供給量およびその質を考慮した、鉄スクラップ循環利用評価モデルの構築を行うことを目的とする。その上で、将来の各年におけるスクラップの最大利用可能量と必要となる銑鉄生産量を解析するとともに、国内全体での粗鋼生産により誘発される環境負荷量の経年変化を解析する。解析年は2000~2030年の31年間とした。

2. 鋼材循環利用における環境負荷誘発量解析のための動態モデルの構築

本研究では、将来の日本国内における鋼材の循環利用を解析するモデルを構築することを目的とする。鋼材およびスクラップの輸出入量は考慮するが、海外での鋼材およびスクラップ利用は考慮しないこと（システム境界の外）とする。

2.1 国内における鉄のマテリアルフローのモデル化

はじめに、国内における鋼材の生産と消費、そしてスクラップの発生と消費を把握するために、鉄のマテリアルフローをモデル化した。Fig. 1に示す。鋼材のライフサイクルは、一貫製鉄所にて鉄鉱石がコークスにより還元され、「①銑鉄」が生産されることに始まる。「①銑鉄」はその後、転炉へ投入され、「②転炉粗鋼」が生産される。ある年における「②転炉粗鋼」生産量から、「③自家発生スクラッ

平成16年4月16日受付 平成16年7月17日受理 (Received on Apr 16, 2004, Accepted on July 17, 2004)

* 東京大学大学院工学系研究科 (Graduate School of Engineering, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo Bunkyo-ku Tokyo 113-8656)

* 2 京都大学大学院エネルギー科学研究科 (Graduate School of Energy Science, Kyoto University)

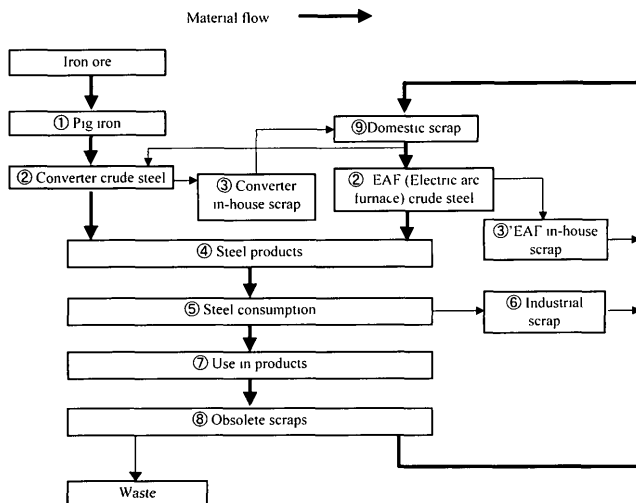


Fig. 1. Schematic diagram of material flow of iron.

プ」量、および粗鋼・半製品の輸出入量を差し引きしたものが、当該年の「④鋼材」生産量となる。「④鋼材」生産量から輸出入量を補正したものが、「⑤鋼材消費」量となる。鋼材が各種製品に使用される際に加工され、「⑥加工スクラップ」が発生する。「⑤鋼材消費」量から「⑥加工スクラップ」発生量を差し引いたものが当該年の「⑦製品中の使用」量として得られる。但し、鋼材は製品の輸出入に伴い、間接輸出入されるので、その量を補正したものが国内での使用量となる。

その後、使用された製品が廃棄され、使用済み製品から「⑧老廃スクラップ」が発生し回収される。しかしながら、製品に使用された全ての鋼材が、「⑧老廃スクラップ」として回収されるわけではなく、土木建設鋼材における埋設のように、未回収鋼材となるものもある。「③自家発生スクラップ」、「⑥加工スクラップ」および「⑧老廃スクラップ」が、国内において発生し回収されるスクラップの全てである。これらスクラップの一部は輸出され、残りが「⑨国内スクラップ」量となる。

将来、トランプ元素含有濃度増大によるスクラップの質の劣化や、鋼材需要の縮小が生じると、鉄源として有効利用されない国内スクラップが増大すると考えられる。

2.2 ポピュレーションバランスモデルによるスクラップ発生量の解析と鋼材中のCu含有率の解析

Fig. 1のマテリアルフローの中で、「③自家発生スクラップ」と「⑥加工スクラップ」は、鋼材の生産と同一年に発生するとみなすことができる。それらスクラップの発生量は、各年の粗鋼生産量、鋼材消費量から、スクラップ発生率を掛け合わせることで求めることができる。それに対して「⑧老廃スクラップ」は、鋼材の生産・製品への使用後、製品寿命を経た、数年から数十年後に発生する。ある年における社会中の「⑧老廃スクラップ」の発生量は、鋼材の当該年以前の生産履歴とそれらが使用された製品の寿

命分布から、ポピュレーションバランスモデル (Population Balance Model: PBM)^{1,4)}を用いて算出することができる。各年のスクラップ発生量に回収率を掛け合わせ、輸出量を差し引き、「⑨国内スクラップ」量を求める。

粗鋼製造時に鋼材中に含有されたトランプ元素 (Cu) の濃度は、基本的には製品に使用后、回収され再溶解されるまで変わらない。しかしながら、使用済み製品をリサイクルする際に、製品中の銅線などを完全に分離できない場合には、新たなCuが老廃スクラップ塊に混入する。従って、循環型社会形成が促進されるにつれ、老廃スクラップ塊中のCuの濃度は経年的に増大し、スクラップの質は劣化していくことが予想される。鋼材用途別にリサイクル時のCu混入量を考慮し、「⑧老廃スクラップ」中のCu含有率の経年変化を求める。

2.3 ピンチ解析の適用によるスクラップの最大利用可能量の解析

前述したように、各年に発生するスクラップ、特に老廃スクラップの質は経年的に劣化するので、各年において鉄源としての利用可能性を検討する必要がある。そこで、スクラップと銑鉄の供給と、粗鋼の需要の間で、量と質から物質の需給バランスを解析するピンチ解析法⁷⁾を用いる。それにより、各年におけるスクラップの最大利用可能量と共に銑鉄生産量を求めることができる。

本論文では、以下の手順に従い、鋼材にピンチ解析法を適用する。

- 1) 粗鋼の生産を、転炉と電炉に二分する。鉄源は、銑鉄とスクラップとする。また、電炉での粗鋼生産に、銑鉄は投入しないものとする。
- 2) 2.2で求めた各年の「⑨国内スクラップ」発生量およびCu含有濃度から、横軸に国内スクラップ発生量、縦軸に総Cu含有量を示す線図 (Limiting CurveのSource線図⁷⁾) を描画する。
- 3) 各年の「②電炉粗鋼」の需要量と許容されるCu含有濃度から、横軸に電炉粗鋼の需要量、縦軸に総Cu含有量を示す線図 (Limiting CurveのSink線図⁷⁾) を描画する。Limiting CurveのSource線図とSink線図が交差していないか (ピンチポイント⁷⁾の有無)を確認する。
- 4) 「⑨国内スクラップ」量が電炉での消費量を上回る場合、転炉でもスクラップを消費し、スクラップ利用率を最大化させるものとする。但し、一般に高品質が要求される転炉鋼材の生産に、素性を把握することが困難な低品位スクラップを利用することは非現実的である。従って、転炉で生産する高品位な鋼材には、素性の把握が容易な高品位スクラップから順番に利用する。その条件のもと、電炉粗鋼および転炉粗鋼に関して、Limiting CurveのSource線図とSink線図を作成し、ピンチポイントが出現しない範囲において、スクラップの最大利用可能量を求める。(補遺参照。)なお、電

炉鋼の Limiting Curve においてピンチポイントが出現する場合は、老廃スクラップ中に含有される Cu の濃度が高いことにより、利用できない「⑨国内スクラップ」が発生することを示す。

5) 「②転炉粗鋼」を需要量分生産するに必要な、銑鉄量を求める。

2.4 社会全体での粗鋼生産により誘発される環境負荷の経年変化の解析

2.3 で求めた、各年において国内スクラップを最大利用する状態において、国内全体での粗鋼生産により誘発される環境負荷を、ライフサイクルアセスメント (Life Cycle Assessment, LCA) により解析する^{8,9)}。この場合、国内全体での粗鋼生産により誘発される環境負荷とは、銑鉄からの粗鋼製造および冷鉄源 (スクラップ) からの粗鋼製造により誘発される環境負荷の総和となる。それぞれの生産量に、LCA により求めた環境負荷誘発原単位を掛け合わせ、合算することで求めることができる。

以上、本論文において構築した解析モデルの概要を Fig. 2 に示す。本モデルを用い、2030 年までの我が国の各年における国内スクラップの最大利用量可能量と銑鉄生産必要量そして国内全体での粗鋼生産により誘発される環境負荷量の経年変化を解析した。なお、本論文では、環境負荷として CO₂ 排出量を検討した。

3. 解析の条件設定と用いたデータ

解析にあたり、本論文では、以下のように諸条件を設定した。また、用いたデータの詳細を示す。

3.1 鋼材の分類と各種鋼材消費量

鋼材は、普通鋼と特殊鋼に大別し、それぞれを生産炉別に転炉、電炉に区別し、4 種類に大分類した¹⁾。そして大分類毎に、鋼種別に 4 種類、用途別に 8 種類の合計 32 種類に分類した。ここで、鋼種の分類は、鉄鋼統計年報での分類を、形鋼、棒鋼、板材 (鋼矢板、鋼板、鋼帯)、その他 (軌条、管材、線材、外輪) の 4 種にまとめたものである。また、用途の分類は、鉄鋼統計年報での分類を、土木用、建設用、乗用車、トラック、機械用 (産業機械用、電気機械用、家庭用・業務用機器用、船舶用、鉄道車両用、その他輸送機械用)、容器用、その他用 (その他諸製品用、次工程用、最終用途不明・加工用) の 7 種にまとめ、さらに輸出鋼材を加えて 8 種類としたものである¹²⁾。

上記の分類に基づいた過去各年の鋼材消費量に関しては、統計¹⁰⁾と既存の調査研究¹¹⁾から 1970~2000 年のデータ

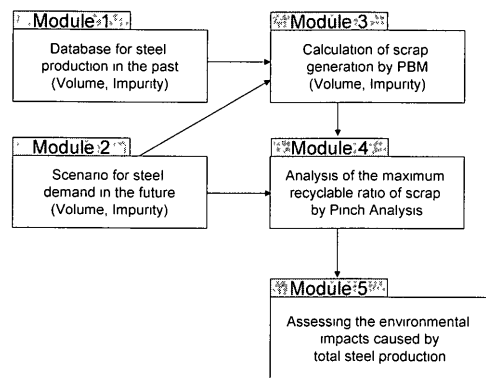


Fig. 2 Outline of the model for analysis of change in environmental impact associated with crude steel production in Japan.

を得た。また特に、製品での使用年数の長い土木・建設用鋼材に関しては、1945 年まで遡った。但し、1945~1969 年に関しては国内の鋼材消費総量に関するデータしか入手できなかったため、その期間の鋼材消費総量に占める土木・建設用鋼材の割合は 1970 年の割合と同じものと仮定して、土木・建設用鋼材の消費量を推算した。そして、2030 年までの将来における粗鋼の需要量は、製品の将来の需要から鋼材消費量を予測し、それに自家発生スクラップと加工スクラップ発生分を上乗せして求めた。将来予測については、後述する。

粗鋼の輸出入量は、相対的に微量であるので無視した。鋼材、スクラップの輸出入、および製品による鋼材の間接輸出入に関しては、2001 年以降も 2000 年と等量であるとした。輸入鋼材に関しては、統計¹²⁾から各年の鋼種別輸入量のデータが得られたので、それを国内消費量に基づいて用途別に配分し推計した。製品による鋼材の間接輸出入に関しては、既存の研究から、鋼材の用途別輸入量データを入手し¹³⁾、それを国内消費量に基づいて鋼種別に配分し推計した。但し、自動車用鋼材に関しては、自動車用鋼材の消費量と年間生産台数から、自動車 (乗用車およびトラック) 1 台あたりの鋼種別鋼材消費量を求め、それに年間輸出入台数を乗ずることで鋼材の間接輸出入量を求めた。また、輸出されるスクラップは老廃スクラップのみとし、自家発生スクラップと加工スクラップは国内で消費されるものとした。

粗鋼生産に対する自家発生スクラップ発生割合に関しては、文献¹⁴⁾からデータを得た。そして将来の各年においても変わらないと仮定した。鋼材消費量に対する加工スクラップ発生率は、ヒアリングと統計値¹⁴⁾に基づき用途別に発生率を試算し、Table 1 のように想定した。

†1 我が国では、1977 年までは平炉による鋼材生産が行われており、その履歴も考慮した。2000 年において、平炉鋼材由来のスクラップは、約 3% 程度であり微量である。

†2 鉄鋼統計年報の分類では、「自動車用」は、乗用車とトラックに分割されていないが、PBM を適用する際に乗用車とトラックの平均廃棄年分布が異なるために、本論文では分割した。その際には、過去各年の乗用車とトラックの生産台数と自動車用鋼材消費量から、乗用車とトラックの鋼材消費量を推算した。各年の乗用車とトラックの鋼材消費量は、乗用車 1.24t/台×各年の生産台数、トラック 2.19t/台×各年の生産台数で算出した。

Table 1 Ratio of industrial scrap generation to steel consumption (%)

	Construction	Machines	Automobiles	Containers	Others
1984	4.53	10.87	16.9	8.4	3.47
1985	4.34	11.13	17.4	8.5	3.38
1986	4.15	11.39	17.9	8.5	3.29
1987	3.95	11.66	18.4	8.6	3.21
1988	3.76	11.92	18.9	8.6	3.12
1989	3.57	12.18	19.4	8.7	3.03
1990	3.41	12.02	18.6	8.8	2.64
1991	3.25	11.86	17.8	8.9	2.26
1992	3.08	11.7	17	9	1.87
1993-1999	2.92	11.54	16.2	9.1	1.49
2000	2.89	12.82	14.92	17.8	6.53

Table 2 Lifetime distribution functions, parameters and collection ratios of obsolete scrap for each product type

Application	Distribution functions	Mean life time [years]	Variance	Collection ratio [%]	
Construction	Infrastructure	30	113	50	
	Buildings	30 *1	113 *1		
Machines	Normal	12	22	80	
Automobiles	Cars *2	(1) Gamma	9.6-14	4.4-9.3	90
		(2) Gamma	5.5	4.5	
	Trucks	Gamma	8.5-13	9.4-22	
Containers	—	1	—	93	
Others	Normal	12	22	80	

*1 In scenario III, these values were changed to the following
 Mean life time 30 for the years 1945-1998 and 90 for the years after 1999,
 variance 113 for the years 1945-1998 and 1010 for the years after 1999

*2 Lifetime distribution of cars was obtained by $0.9 \times (1) + 0.1 \times (2)$

鋼材が使用される各種製品の寿命分布は、Table 2に示す分布関数およびパラメータを用いた。統計資料¹⁵⁾の整備されている自動車に関しては、統計値から毎年の廃棄分布関数を求めた。2001年以降の廃棄分布関数は2000年と同じとした。その他の製品については、文献¹⁶⁾に基づき分布関数およびパラメータを決定し、各年による変化はないものとした。なお、分散は、平均寿命の2倍において99%の製品が廃棄されるように設定した。

老廃スクラップの回収率は、既存の調査研究に基づきTable 2のように設定し、各年による変化はないものとした。なお、自家発生スクラップと加工スクラップは全量回収されるものとした。なお、本論文では、発生・回収されたスクラップは、その年内に消費され、翌年に消費されることはないとした。

3.2 鋼材およびスクラップのCu含有濃度

2000年における鋼材のCu含有濃度に関するデータは、既存の調査研究^{13,17,18)}から得た。Table 3, 4に示す。転炉鋼は鋼種別に、電炉鋼は用途別にCu含有濃度が示されている。各種鋼材に許容されるCuの濃度にはほとんど明確な規定が無いため、2000年におけるCu含有濃度が、将来における各種鋼材に許容される濃度であるとした。ただし、電炉で生産される土木・建設用鋼材のみ、銅の許容濃度にまだ余裕があり、0.4%まで許容されると仮定した¹³⁾。

Table 3 Cu concentration in converter steel products in 2000.

Application	Cu concentration [wt%]	
	Lowest	Highest
Ordinary steel	Sheets	0
	Sections	0.008
	Bars	0.005
	Others	0
Special steel	0.01	

Table 4 Cu concentration in EAF steel products in 2000.

Application	Cu concentration [wt%]	
Ordinary Steel	Construction	0.304
	Machines	0.285
	Automobiles	0.287
	Containers	0.287
	Others	0.274
	Exports	0.274
Special Steel	0.105	

Table 5 Cu concentration [wt%] in each type of scrap

		Converter steel	Electric arc furnace steel	
In-house scrap		0.00717 *1	Average *7	
Industrial scrap	Ordinary steel	0.00726 *2	Average *8	
	Special steel	0.0100 *3	0.105 *3	
Obsolete scrap	Ordinary steel	Construction	0.00981 *4	
		Machines	0.404 *5	
		Automobiles	Press	2.80 *6
			Shredder	0.403 *5
		Containers	0.00530 *4	
	Special steel	Construction	0.0100 *3	
		Machines	0.408 *5	
		Automobiles	Press	2.80 *6
			Shredder	0.408 *5
		Containers	0.0100 *3	
Others	0.0100 *3			

*1 Average Cu concentration in all ordinary converter steel products

*2 Average Cu concentration in industrial scrap from all ordinary converter steel products

*3 Literature data (Ref 18)

*4 Calculated by Cu concentration in converter products and their share in each product

*5 These values were calculated in accordance with the balance of total Cu inputs and outputs from automobile scrap and machine scrap in electric furnaces

*6 Literature data (Ref 13)

*7 Average Cu concentration in all ordinary EAF steel

*8 Average Cu concentration in industrial scrap from all ordinary EAF steel products

*9 Same values as in Table 4

従って、将来の各年において発生するスクラップ中のCu濃度が増大する場合、土木・建設用電炉鋼材のCu含有濃度が0.4%を上限に増大するが、他の鋼材のCu含有濃度は一定となる。また、粗鋼に要求される品位は、鋼材と同じとした。

一方、国内スクラップのCu含有濃度を、種類別用途別にTable 5に示す。前述したように、土木・建設用電炉鋼

材のCu含有濃度が年ごとに変動するため、土木・建設用電炉鋼材から発生するスクラップのCu含有濃度は経年変化する。それは、2000年における土木・建設用電炉鋼材のCu含有濃度(0.304%)を基に、過去の土木・建設用電炉鋼材の生産履歴および製品(建築物)の寿命分布から計算により求めた。また、自動車から排出され回収されるスクラップは、処理方式によってCu含有濃度が大きく異なるので、プレス、シュレッダーに分類した¹³⁾。

輸出入される鋼材に関しても、国内で消費される鋼材と同等の品位が要求されるものとした。輸入スクラップは相対的に少量であるので、輸出スクラップ量から差し引いて、詳細は検討しなかった。輸出スクラップは、老廃スクラップのみとし、発生源別にそれぞれ発生量に比例した量が輸出されるとした。

3.3 インベントリデータ

国内全体での粗鋼生産により誘発される環境負荷量を算出するに当たり、銑鉄からの粗鋼製造、廃製品の間処理および冷鉄源(スクラップ)からの粗鋼製造のCO₂排出原単位には、それぞれ1679、0.048、0.499 t-CO₂/t¹⁹⁾を用いた。

3.4 将来シナリオの設定

将来のシナリオに関しては、以下に示すように3通りのシナリオを設定した。

(I) 将来の製品需要に基づく鋼材の消費量が、2000年の消費量のまま一定であるととする。

(II) 鋼材の消費量は(I)と同じとする。近年の中国における鉄源需要の急激な増大から、中国における高品位なスクラップの需要を見込み、2001年以降の輸出スクラップは、自家発生スクラップなどの品位の高いものから順に輸出されるとする。但し、輸入スクラップは、国内老廃スクラップの平均的な品位をもつものとする。

(III) 1999年以降の建設物の寿命が3倍に長寿命化されると仮定し²⁰⁾、建設用鋼材の需要が縮小するとする。建設用鋼材の需要は、人口変動も考慮した上で、一人当たりの

建築床面積が一定となるようにした。また、鋼材輸入量に関しても、需要に比例して減少するものとした。

4. 結果および考察

4.1 PBMによる国内スクラップ発生量算出結果

シナリオI~IIIでの、2000~2030年における国内スクラップ量を、発生源別に求めた結果をFig. 3(a)~3(c)に示す。シナリオIとIIでは、国内スクラップ発生総量の経年変化は等しく、単調増加し、2030年では3570万tとなる。総量の増加は、主に土木・建設物から発生する老廃スクラップの増大に起因している。シナリオIIでは、社内リターンスクラップ、加工スクラップ、容器由来の老廃スクラップの一部が、輸出されることになるため、シナリオIとは由来別発生量が異なっている。

Fig. 3(c)からわかるように、シナリオIIIにおいては、将来における建設用鋼材の需要量が減少することにより、同鋼材由来の老廃スクラップ量がその他のシナリオより少なくなる。建設由来の老廃スクラップ量は、2014年をピークに減少する。また、建設用鋼材の需要量の減少から、自家発生スクラップと加工スクラップも単調減少する。国内スクラップ総量は、2007年をピークに減少し、2030年では2870万tとなる。

4.2 ピンチ解析結果

Fig. 4(a)~(d)に、シナリオIでの2000~2030年における、電炉鋼材に関するピンチ解析のLimiting Curveを示す。シナリオIでは鋼材需要は変化しないことからSink線図は全て同じである。それに対してSource線図は経年変動する。これは、スクラップ中の銅含有量が経年とともに増大し、スクラップの品位が劣化していることを示している。なお、Source線図の右端にある傾きの大きな線分は、自動車由来のAプレスを表す線分である。2000~2030年において、原点以外にSource線図とSink線図は交差しておらず(ピンチポイントが発現しておらず)、すべてのスクラップが利

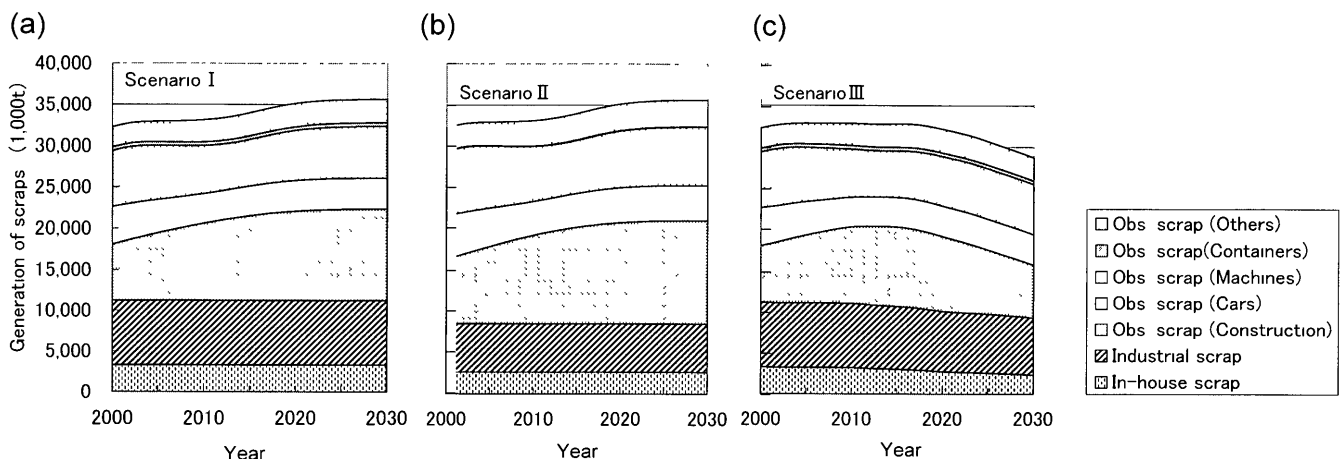


Fig. 3 Generation of scrap in Japan during 2000–2030, (a) Scenario I, (b) Scenario II, (c) Scenario III.

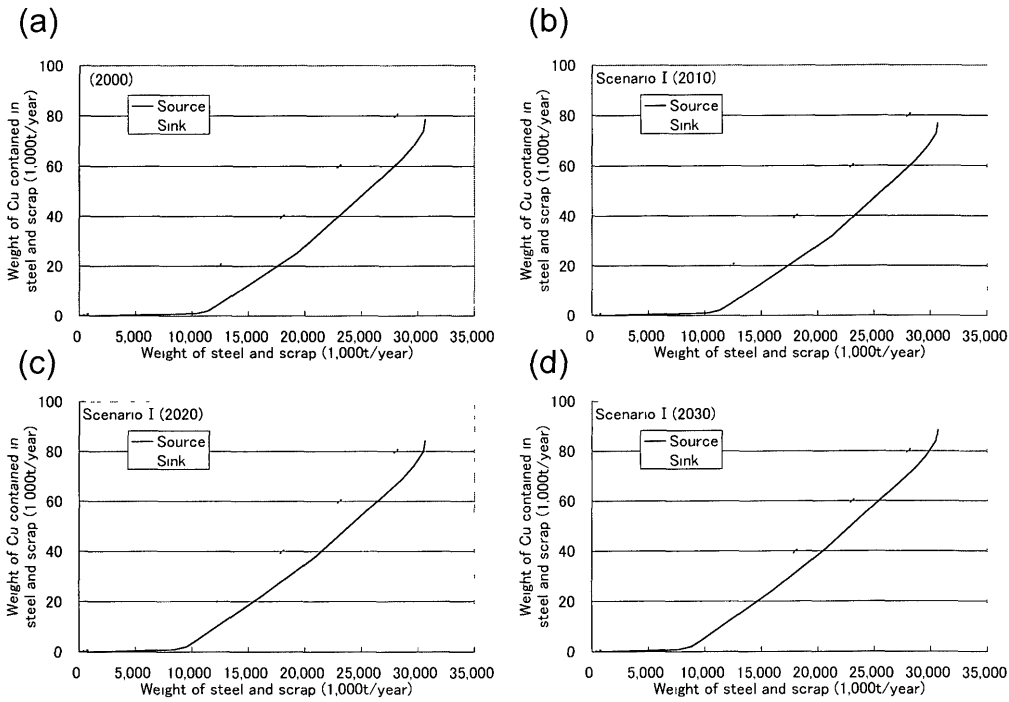


Fig 4 Limiting Curves for scrap and EAF crude steel in (a) 2000, (b) 2010, (c) 2020 and (d) 2030 under the scenario I

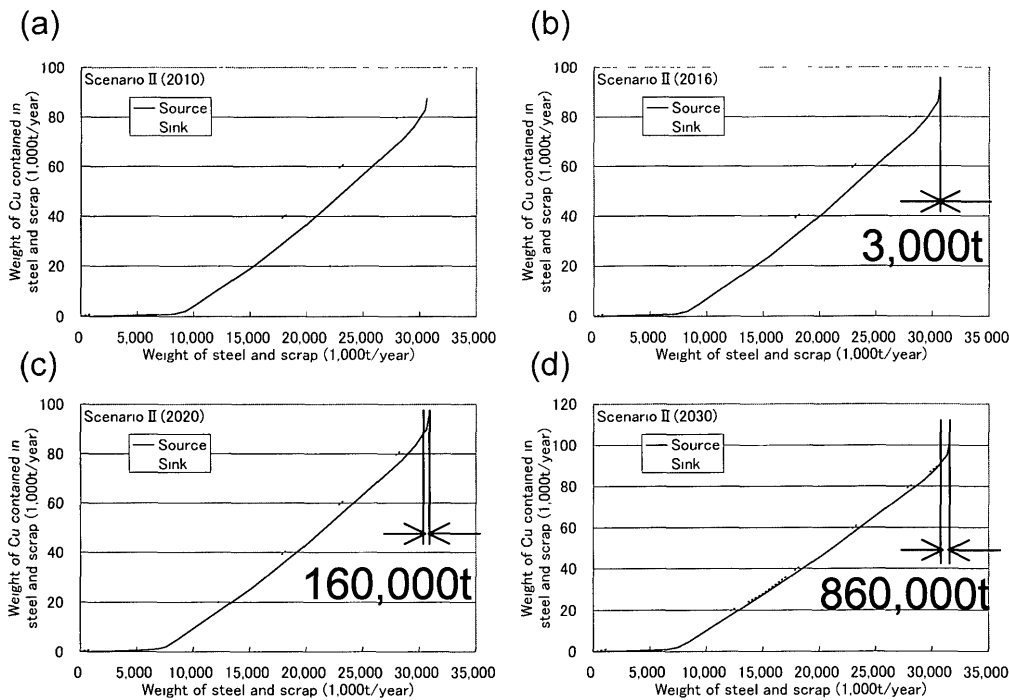


Fig 5. Limiting Curves for scrap and EAF crude steel in (a) 2010, (b) 2016, (c) 2020 and (d) 2030 under the scenario II.

用できることを示している。ただし、2030年では、右端において Source線図が Sink線図に接近しており、スクラップの質の更なる劣化によりピンチポイントが発現する可能性を示唆している。また、転炉粗鋼の鉄源となるスクラップ量は、2000年において160万t、2010では250万t、2020年では450万t、2030では500万tと求まり、年を経るごとに単調増加することが分かった。

同様に Fig. 5(a)~(d)にシナリオIIにおける2010年、2016年、2020年、2030年での電炉鋼材に関するピンチ解析の Limiting Curveを示す。Fig 5(a)に示すように、2010年には、

ピンチポイントが発現しておらず、国内スクラップが全量利用されることを示している。しかしながら、Fig 5(b), (c)に示すように、2016年にピンチポイントが発現し、2020年には16万tのスクラップが利用できないことが示されている。以降、廃棄スクラップ量は単調増加し、2030年には86万tに達する。また、2016年から数年間は国内スクラップ量が増大し、2022年に転炉粗鋼の鉄源として消費されるスクラップ量が440万tとなりピークを迎える。輸出されるスクラップの品位が高くなれば、国内において相対的に質の低いスクラップが再利用されることにより、

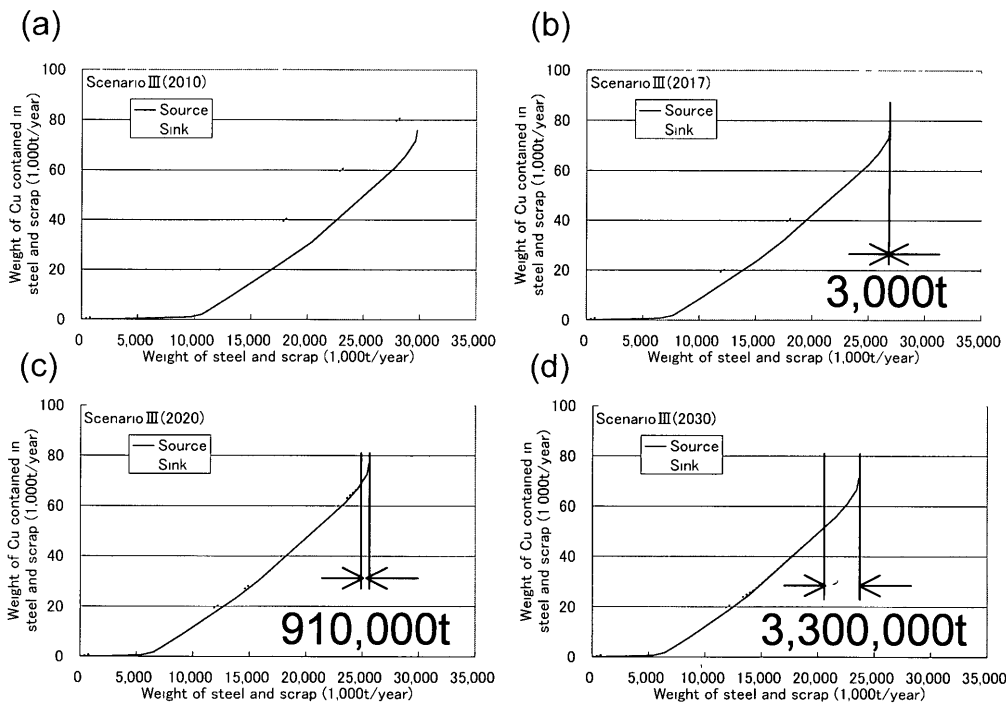


Fig 6. Limiting Curves for scrap and EAF crude steel in (a) 2000, (b) 2010, (c) 2020 and (d) 2030 under the scenario III.

スクラップ品位の劣化は促進されることを示唆している。

Fig 6(a)~(d)にシナリオ IIIにおける2000年から10年ごとの電炉鋼材に関するピンチ解析のLimiting Curveを示す。シナリオ IIIでは、鋼材需要量が単調減少するため、Sink 曲線が年を経るごとに短くなる。そして、2017年にピンチポイントが発現し、利用できない国内スクラップが発生する。2018年以降も利用できないスクラップ量は単調増加し、2020年には91万t、2030年には330万tとなり国内スクラップの11%にも達する。また、ピンチポイント発現後の数年間は、転炉粗鋼の鉄源として消費されるスクラップ量は増大し、2020年にピークに達し660万tとなる。建設用鋼材の需要の減少にともなうスクラップ発生量の減少は、需要の減少から10年以上遅れるため、鋼材需要に対するスクラップの供給が過剰となり、他のシナリオと比較して、多くの転炉粗鋼鉄源と利用できないスクラップが生じる結果となる。

3つのシナリオにおける土木建設用電炉生産鋼材のCu濃度の2000から2030年までの経年変化をFig 7に示した。ピンチ解析からもわかるようにシナリオ Iにおいては、2030年までは許容値である0.4%に達しないことがわかった。すなわち、現行のスクラップの回収、輸出、鋼材需要が続けば、2030年までCuの濃化による品位劣化は顕在化しない。しかしながら、2012年以降、Cu濃度は単調増加しており、2030年には許容限界まで0.013%に近づいている。シナリオ I と II において2004年から2011年まで、シナリオ III において2004年から2010年までは、スクラップの平均Cu濃度が減少している。これは、自動車由来や機械由来のCuを相対的に高濃度に含有する老廃スクラップの発生量が減少していることに起因すると考えられる。しか

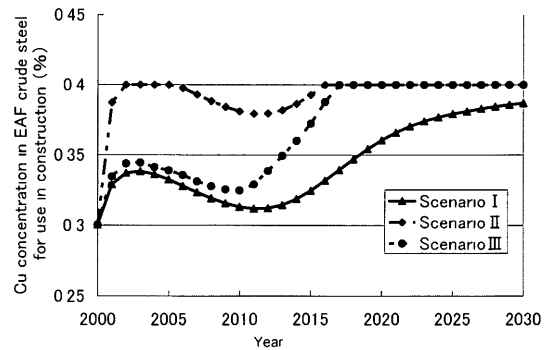


Fig 7. Cu concentration in EAF crude steel for use in construction, from 2000 to 2030

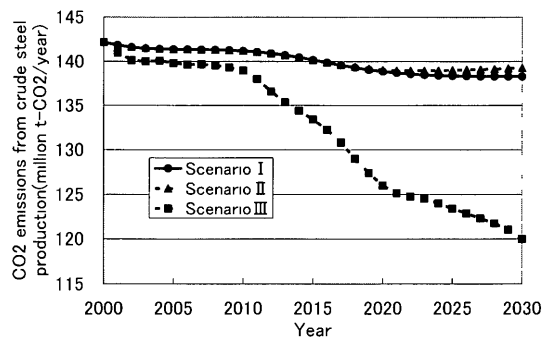


Fig 8 CO₂ emissions from crude steel production in Japan, from 2000 to 2030

しながらそれ以降は、全てのシナリオにおいてスクラップ中のCu濃度は増大する。

4.3 CO₂排出量の経年変化解析結果

ピンチ解析より得られたスクラップの消費量と銑鉄の生産量から、各シナリオにおける国内全体での粗鋼生産により誘発されるCO₂量の経年変化を解析した結果をFig 8に

示す。2000年の鋼材消費量がそれ以降も一定としたシナリオIでは、CO₂誘発量は2030年まで単調減少となった。国内スクラップが増加し、それらを余すことなく利用することで、銑鉄の消費量が削減されるためである。京都議定書の約束期間の2008~2012年において、CO₂誘発量は1990年比4.35%減少することがわかった。

シナリオIIでは、2000~2030年の期間において、シナリオIとほぼ変わらない結果となった。しかしながら、2016年以降、CO₂排出量の差異が大きくなる傾向にある。

シナリオIIIにおいては、鋼材需要の減少によるCO₂誘発量の減少が大きく現れている。2017年にピンチポイントが発現して以降、廃棄するスクラップが発生し、その分の銑鉄製造によるCO₂誘発量が增大するが、需要の減少による削減効果と比較すると相対的に影響は小さい。京都議定書の約束期間の2008~2012年において、CO₂誘発量は1990年比6.14%減少することがわかった。

5. 結言

本研究では、ピンチ解析手法を導入することにより、鋼材とスクラップの質と量のバランスを考慮した、スクラップの利用可能性を検討した初めての事例である。将来のスクラップ発生量を、ポピュレーションバランスモデルにより予測し、さらにピンチ解析を行うことにより、将来における国内スクラップの最大利用量可能量と銑鉄生産必要量の予測が可能となった。さらにLCA手法の知見を導入することにより、国内全体での粗鋼生産により誘発される環境負荷量の経年変化を予測するモデルが構築できた。

将来の3つのシナリオを想定し、構築したモデルを用い解析した結果、現行のスクラップの回収、輸出、鋼材需要が続けば、2030年までCuの濃化による品位劣化は顕在化しないことがわかった。次に、高品位なスクラップから輸出された場合は、2016年に利用不可能な国内スクラップが発生することがわかった。また、建設物の長寿命化に伴う鋼材需要の減少が見込まれる場合、需要に対してスクラップの供給が過剰となり、多くのスクラップが転炉粗鋼鉄源となるとともに利用不可能なスクラップも多くなることわかった。

文 献

- 1) K Kakudate, Y Adachi and T Suzuki *Tetsu-to-Hagané*, **86** (2000), 837
- 2) M Hatano, K Kunishige and Y Komizo *Tetsu-to-Hagané*, **88** (2002), 142
- 3) K Shibata, K Kunishige and M Hatano *Bull Iron Steel Inst Jpn*, **7** (2002), 252
- 4) K Kakudate, Y Adachi and T Suzuki *Sci Technol Adv Mater*, **1** (2000), 105
- 5) I Daigo, Y Matsuno and Y Adachi *CAMP-ISIJ*, **16** (2003), 1094
- 6) I Daigo, D Fujimaki, Y Matsuno and Y Adachi *CAMP-ISIJ*, **16** (2003), 1095

- 7) Y Matsuno, I Daigo and Y Adachi *Tetsu-to-Hagané*, **91** (2005), 127
- 8) ISO Environmental management—Life cycle assessment—Principle and framework, Reference number ISO 14040, (1997)
- 9) ISO Environmental Management—Life cycle assessment—Goal and scope definition and inventory analysis, ISO/FDIS 14041, (1998)
- 10) (社) 日本鉄鋼連盟鉄鋼統計専門委員会：鉄鋼統計要覧 (1971~2001年版), (社) 日本鉄鋼連盟, 東京, (1971~2001)
- 11) W Tamaki, S Hayashi, T Suzuki and Y Tomota *CAMP-ISIJ*, **16** (2003), 1100
- 12) (社) 日本鉄鋼連盟鉄鋼統計専門委員会：鉄鋼統計要覧 (2001年版), (社) 日本鉄鋼連盟, 東京, (2001), 176
- 13) (株) 日鉄技術情報センター：私信
- 14) (社) 日本鉄源協会：鉄源年報2001, 東京, (2001), 18, 59
- 15) 自動車検査登録協会：昭和62年版~平成12年版わが国の自動車保有動向, 東京, (1987~2000)
- 16) A Toi and J Sato *Energy Resour*, **18** (1997), 271
- 17) A Toi, J Sato and K Kanero *Tetsu-to-Hagané*, **83** (1997), 850
- 18) (社) 日本鉄鋼協会：トランプエレメントの鉄鋼材料科学, 東京, (1997), 13
- 19) A Toi and J Sato *Tetsu-to-Hagané*, **84** (1998), 534
- 20) T Ikaga, S Murakami, S Kato and Y Shiraishi *J Aecht Plann Environ Eng, AIJ*, **535** (2000), 53

補 遺

Fig 9において、ピンチ解析のLimiting Curveを用いて説明する。Source線図はスクラップを、Sink線図は電炉粗鋼のみを示している (Fig 9-a)。従来であれば、この時点で原点がピンチポイントとなっており、Source線図の右側、すなわち低品位側のSourceが余剰分となる。しかしながら本論文では、スクラップ利用量を最大化させるため、転炉においてもスクラップを消費することにした。その場合、高品位なスクラップを優先させて余らせ、転炉で消費することにした。それは、Source線図の左端を余剰分とすることであるので、Source線図を原点から離れないように左下方に平行移動させる (Fig. 9-b)。移動させることにより、いずれ原点以外のピンチポイントが発現する (Fig. 9-c)か、あるいは、Source線図の右端とSink線図の右端が揃う状態に至る。この時点が、この制約条件下の最適な利用状態となる。第1象限は従来法のピンチ解析と同様に理解でき、第3象限に存在するSource線図分が、転炉に供給されるスクラップの量と品位を示している。

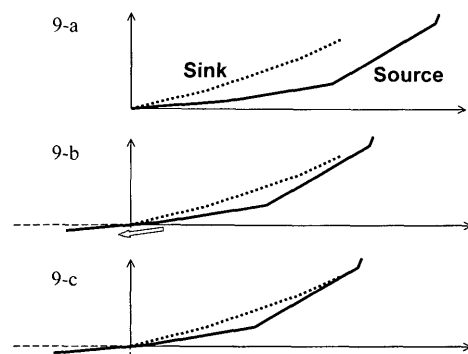


Fig 9. Concept for pinch analyses for assessing the maximum recyclable ratio of steel scrap.