金属材料リサイクルフローの最適化手法の開発とアルミニウムへの応用

山田 宏之* 畑山 博樹* 醍醐 市朗 松野 泰也 足立 芳寛

東京大学大学院工学系研究科マテリアル工学専攻

J. Japan Inst. Metals, Vol. 70, No. 12 (2006), pp. 995-1001
© 2006 The Japan Institute of Metals

Optimization Method for Metal Recycling System and Its Application to Aluminum Recycling Flow in Japan

Hiroyuki Yamada*, Hiroki Hatayama*, Ichiro Daigo, Yasunari Matsuno and Yoshihiro Adachi

Graduate School of Engineering, The University of Tokyo, Tokyo 113-8656

In this paper an optimization method for metal recycling flow has been developed. The method adopts a linear programming to optimize the recycling of material, in which the concentrations of two or more tramp elements in the scraps are considered.

The method was applied to analyze the aluminum recycle flow in Japan in 2003. It was found that the 65% of virgin material could be substituted by recycled material.

When the use of casting from end-of-life vehicles (ELV) is expanded, Cu included in the aluminum casting will be predominant restriction for the reduction of virgin material. The other side, when the use of aluminum scrap from construction is expanded, the maximum recyclable amount of aluminum scrap is dominated by Mn concentration in the scrap.

(Received July 20, 2006; Accepted October 10, 2006)

Keywords: aluminum, recycle flow, linear programming, optimization, tramp element

1. 緒 言

アルミニウム等の金属材料は、用途に応じて様々な元素が添加され、多くは合金として用いられる。これらの合金のリサイクルを行う際には、用途に応じてリサイクル材の成分調整が不可欠となる。しかしながら、合金として製造する際に添加された元素、あるいは使用済み製品から回収する際に混入した元素のうち、除去することが困難な元素(トランプエレメント)の成分調整は、様々な成分濃度を持つ材料を適切に混合すること(希釈)によって行うことになるため、その材料のリサイクルは制限される。また、リサイクル時にトランプエレメントが混入するような場合には、リサイクルが繰り返されることによってトランプエレメントが濃化し、リサイクル材の使用が困難になる可能性が指摘されている¹⁾。

鋼材リサイクルにおける銅の混入と濃化による、将来の鉄スクラップリサイクルの限界については、著者らが、銅濃度を「質」の尺度としたピンチ解析を適用し、解析を行っている²⁾。

アルミニウムにおいては、主として経済的な理由で除去困難な元素が複数存在する^{3,4)}。また、一般にトランプエレメント濃度の低い圧延材から、高い濃度を許容する鋳物・ダイカストへのカスケード型リサイクルが行われている。圧延材

の需要が増加傾向にあることを背景として、圧延材から圧延材へのリサイクルの必要性も指摘されている⁵⁾が、トランプエレメントの除去が、技術的、経済的に困難である上に、現時点では鋳物・ダイカストの需要が十分大きいことから、飲用缶以外には一般的に行われていない。

本研究では、複数のトランプエレメントを同時に扱う素材のリサイクルフロー最適化の手法を開発する。また、これを我が国のアルミニウムのリサイクルフローに適用したケーススタディを行い、アルミニウムのバージン材(新地金)投入量の削減可能性を検討する。

2. 解 析 方 法

2.1 考慮すべきトランプエレメントが一つ場合のリサイクルフロー最適化

著者らは、銅をトランプエレメントとし、銅濃度を「質」の尺度として鉄スクラップリサイクルにピンチ解析法を適用し、最大リサイクル可能量の解析を行っている。ピンチ解析とは、量と質から物質の需給バランスを解析する方法であり、プラントやコンビナートでの水利用システムの最適化等に用いられている^{6,7)}。銅をトランプエレメントとした例のように、トランプエレメントが一つの場合は、図解法による解析が可能である⁸⁾。

* 東京大学大学院生(Graduate Student, The University of Tokyo)

2.2 考慮すべきトランプエレメントが複数ある場合のリサイクルフロー最適化モデル

考慮すべきトランプエレメントが複数あって、それらを同時に扱う場合は、図解法によって解析することはできない。数学的な解法が必要となる。本研究では、線形計画法を適用した解析を行った。

線形計画法は、1 次不等式で表される制約条件の下で、目的関数の最大化(あるいは最小化)を満たす最適解を見つける手法であり、様々な分野で応用されている^{9,10)}。本研究では、国内における素材のリサイクルフローの最適化に線形計画法を適用した。目的関数と制約条件は、以下のように考える。

- (a) 目的関数：材料使用に関する環境負荷やコストの最小化
- (b) 制約条件：
 - (i) 「供給量」 $\geq$ 「需要側での材料使用量」
 - (ii) 「生産量」 $\geq$ 「需要量」
 - (iii) 「生産材のトランプエレメント濃度」 $\leq$ 「需要側材料のトランプエレメント許容濃度」
 - (iv) 「生産材のトランプエレメント濃度」 $\geq$ 「需要側材料のトランプエレメント必要濃度」

2.3 定式化

供給される材料(供給材)の種類が i 種あって、それらの供給材を混合して j 種の生産材を製造するときの最適化条件を求める。また、解析にあたっては、 k 種のトランプエレメントを扱う (Fig. 1)。

以下に、線形計画法の解析における定式化の手順を示す。

2.3.1 リサイクルフローのモデル化

供給材の供給量、需要量を設定する。あわせて、供給材のトランプエレメントの成分濃度と、需要側のトランプエレメント濃度の許容範囲を設定する。この許容範囲は、上限値、下限値あるいはいずれか一方を設定する。

2.3.2 目的関数の定式化

s_i は供給材 i の供給量、 d_j は生産材 j の需要量、 c は供給あるいは消費 1 単位毎に必要な負担を表す定数とすると、目的関数 $f(s_i, d_j)$ を式 (1) のように表すことができる。

最適化の目的をコスト最小とする場合は、 c に供給、消費に要するコストを、環境負荷誘発量の最小化を目的とする場合は、それぞれに要する環境負荷誘発量を設定する。

$$f(s_i, d_j) = \sum_{i=0}^m c_i s_i + \sum_{j=0}^n c_j d_j \quad (1)$$

2.3.3 制約条件の定式化

(i) 「供給量」 $\geq$ 「需要側での材料使用量」

需要量以上の供給量が確保されるように条件を設定する。

$$\sum_{i=0}^m s_i \geq \sum_{j=0}^n d_j \quad (2)$$

(ii) 「生産量」 $\geq$ 「需要量」

生産材 j は、供給材の混合により生産される。ここで p_j は、生産材の生産量であり、混合した供給材の和に等しい。需要量を上回る生産量が必要となるので、式 (3) の制約条件が設定される。

$$p_j \geq d_j \quad (3)$$

(iii) 「生産材のトランプエレメント濃度」 $\leq$ 「生産材のトランプエレメント許容濃度」

供給材 i から生産材 j に配分する比率を r_{ij} としたとき式 (4) で示される、生産材 j のトランプエレメント k の濃度 q_{kj} は、需要 j のトランプエレメント k の許容濃度 u_{kj} 以下でなければならない。従って、式 (5) の条件式が設定できる。

$$q_{kj} = \sum_i (e_{ki} \cdot s_i \cdot r_{ij}) / \sum_i (s_i \cdot r_{ij}) \quad (4)$$

$$q_{kj} \leq u_{kj} \quad (5)$$

(iv) 「生産材のトランプエレメント濃度」 $\geq$ 「生産材のトランプエレメント必要濃度」

生産材 j のトランプエレメント k の濃度 q_{kj} は、生産材 j のトランプエレメント必要濃度許容濃度 l_{kj} 以上でなければならない。従って、制約条件式は式 (6) となる。ただし、

Fig. 1 Optimization.

希釈に用いられるバージン材投入量の最小化が目的である場合、こうした濃度下限値を制約条件にする必要はない。

$$q_{kj} \geq l_{kj} \tag{6}$$

2.3.4 線形計画法の計算方法

制約条件を表す連立 1 次不等式を満たす目的関数の最適解を求める問題は、「線形計画」と呼ばれ、図解法やシンプレックス法で解くことができる。また、制約条件の設定を行えば最適解を算出できる、線形計画法を解くためのソフトウェアも市販されている。本研究でも市販のソフトウェア^{11,12)}を用いた。

2.4 仮想モデルへの適用

バージン材を含む 4 つの供給材と 3 つの製品からなる仮想モデルに線形計画法を適用する。このモデルでは、希釈に用いられるバージン材の使用量削減を目的とする。

2.4.1 目的関数

目的関数は、バージン材の供給量の最小化のみを考慮するように設定した(式(7))。ここで、 s_0 はバージン材供給量である。

$$f(s_0) = s_0 \tag{7}$$

2.4.2 供給材の条件

考慮するトランプエレメントが 1 つ(α)の場合(ケース 1)、2 つ(α, β)の場合(ケース 2)および 3 つ(α, β, γ)の場合(ケース 3)のそれぞれにおいて、最適化条件を求めた。バージン材以外の供給材(スクラップ A、スクラップ B、スクラップ C)の供給量はいずれも 100 t とした。それぞれのトランプエレメント濃度を Table 1 に示す。

2.4.3 生産材の条件

希釈に用いられるバージン材の使用量削減を目的とするので、生産材のトランプエレメント許容濃度は、上限値のみ設定する(Table 2)。

2.4.4 解析結果(トランプエレメントが一つの場合)

ケース 1 における最適化の結果を Fig. 2 に示す。

図の左に供給材の供給量とトランプエレメント濃度を、図

の右に生産材の生産量とトランプエレメント濃度を示している。図の上にはバージン材の供給量、図の下にリサイクルできない供給材の量を示している。

ケース 1 の条件では、少なくとも 50 t のバージン材の供給が必要であり、リサイクルできない供給材も同量発生することが示されている。

このときの供給材の配分を Table 3 に示す。

スクラップ A は、生産材 A に 50 t、生産材 B に 50 t 供給される。スクラップ B は生産材 B と C にそれぞれ 50 t 供給されている。スクラップ C は、生産材 C に 50 t 供給しているが、残りの 50 t は、トランプエレメントの許容濃度の条件から、生産材で使用されていない。

また、バージン材は生産材 A 向けに供給され、スクラップ A を希釈している。

2.4.5 解析結果(トランプエレメントが 2 つある場合)

考慮するトランプエレメントの数が 2 つの場合(ケース 2)の解析結果を Fig. 3 に示す。なお、トランプエレメント α に関する条件は、ケース 1 と同じである。

バージン材の必要供給量は、118.8 t となった。

供給材の配分状況(Table 4)は、供給材(スクラップ)A における β の濃度 5% が制約となり、生産材 B におけるスクラップ A 使用量が、ケース 1 に比べ減少していることがわかる。このため、スクラップ A は、37.5 t がリサイクルされずに残ることになる。スクラップ B は、生産材 B、C で全て使用されるが、スクラップ C については、生産材 C での使用量がケース 1 に比べ減少し、リサイクルできない量が 81.3 t に増大する。

結果として、リサイクルできないスクラップの量は 118.8

Table 1 Concentration of tramp element.

	Scrap A	Scrap B	Scrap C
Case 1	$\alpha : 1.0\%$	$\alpha : 2.0\%$	$\alpha : 4.0\%$
Case 2	$\alpha : 1.0\%$ $\beta : 5.0\%$	$\alpha : 2.0\%$ $\beta : 2.0\%$	$\alpha : 4.0\%$ $\beta : 2.0\%$
Case 3	$\alpha : 1.0\%$ $\beta : 5.0\%$ $\gamma : 3.0\%$	$\alpha : 2.0\%$ $\beta : 2.0\%$ $\gamma : 4.0\%$	$\alpha : 4.0\%$ $\beta : 2.0\%$ $\gamma : 3.0\%$

Table 2 Requirement of concentration of alloy element.

	Product A	Product B	Product C
Case 1	$\alpha : 0.5\%$	$\alpha : 1.5\%$	$\alpha : 3.0\%$
Case 2	$\alpha : 0.5\%$ $\beta : 4.0\%$	$\alpha : 1.5\%$ $\beta : 2.0\%$	$\alpha : 3.0\%$ $\beta : 1.0\%$
Case 3	$\alpha : 0.5\%$ $\beta : 4.0\%$ $\gamma : 2.0\%$	$\alpha : 1.5\%$ $\beta : 2.0\%$ $\gamma : 2.0\%$	$\alpha : 3.0\%$ $\beta : 1.0\%$ $\gamma : 0.5\%$

Fig. 2 Optimization Case 1.

Table 3 Optimization results : Case 1.

Supply \ Demand	Product A	Product B	Product C	Unrecyclable scrap	Total
Scrap A	50.0	50.0	0.0	0.0	100.0
Scrap B	0.0	50.0	50.0	0.0	100.0
Scrap C	0.0	0.0	50.0	50.0	100.0
Virgin	50.0	0.0	0.0	0.0	50.0
Total	100.0	100.0	100.0	50.0	

t まで増大する.

2.4.6 解析結果(トランプエレメントが3つある場合)

考慮するトランプエレメントの数が3つの場合(ケース3)の解析結果を Fig. 4 に示す. なお, トランプエレメント α ,

β の条件は, ケース 2 と同じである.

バージン材の必要供給量は, 170.8 t まで増大した.

ただし, 配分状況 (Table 5) は, スクラップの使用量が一律に減少しているわけではない. スクラップ A と C の使用量は, ケース 2 に比べ増大している.

Fig. 3 Optimization Case 2.

Table 4 Optimization results : Case 2.

Supply	Demand	Product A	Product B	Product C	Unrecyclable scrap	Total
Scrap A		50.0	12.5	0.0	37.5	100.0
Scrap B		0.0	68.8	31.3	0.0	100.0
Scrap C		0.0	0.0	18.8	81.3	100.0
Virgin		50.0	18.8	50.0	0.0	118.8
Total		100.0	100.0	100.0	118.8

Fig. 4 Optimization Case 3.

Table 5 Optimization results : Case 3.

Supply	Demand	Product A	Product B	Product C	Unrecyclable scrap	Total
Scrap A		50.0	25.0	0.0	25.0	100.0
Scrap B		0.0	12.5	0.0	87.5	100.0
Scrap C		0.0	25.0	16.7	58.3	100.0
Virgin		50.0	37.5	83.3	0.0	170.8
Total		100.0	100.0	100.0	170.8	

3. 日本国内のアルミニウムリサイクルフローの最適化

線形計画法によるリサイクルフロー最適化モデルを, 2003 年度の日本におけるアルミニウムのリサイクルフローに適用した.

3.1 日本におけるアルミニウムの需給構造

アルミニウムは, 広くリサイクルが行われている金属材料の一つである. 用途に応じて様々な元素が添加され, 多くは合金として用いられているため, 回収スクラップからリサイクル材(再生地金)を製造する際には, 合金成分の調整が欠かせない. 一方, それらの合金成分の多くや, 使用済み製品から回収する時に混入する一部の元素は, 混入後に除去することは極めて困難とされる. こうした混入成分の除去技術の開発も行われている¹³⁾が, 主として経済的理由から実用化に至ったものは少なく, リサイクル時の成分調整は, 回収スクラップからの異物除去の徹底と混合(希釈)により行われるのが一般的である.

一方, 我が国におけるアルミニウムの需給構造は次のような特徴を有する. ①原料の約 57% がバージン材(新地金)である. ②新地金の 99% 以上を海外からの輸入に依存している. ③再生地金の 75% 以上は, 鋳物, ダイカストとして製品化される⁵⁾.

ここで, 鋳物, ダイカスト製品の大半は自動車であり, その国内生産量の約半数は輸出される¹⁴⁾ことを考慮すると, 日本におけるアルミニウムのマテリアルフローは, 添加元素, 混入元素の少ない純アルミニウム輸入し, それに合金元素を添加して使用し, 国内のリサイクル過程で合金元素の濃度を高め, 合金元素の濃度が高い状態で輸出するという構造になっているとすることができる.

そこで, 日本におけるアルミニウムのリサイクルフローに線形計画法を適用し, その最適化による新地金使用量の削減可能性を検討した.

3.2 データの準備

3.2.1 日本国内のアルミニウムのリサイクルフローのモデル化

アルミニウムのリサイクルフローは, 供給材を 23 種(新地金, 老廃スクラップ材 8 種, 加工スクラップ材 14 種), 製品を 16 種に分類し, トランプエレメントは, Si, Fe, Cu, Mn の 4 元素として解析した.

本研究では, 国内で回収されるスクラップ材と, そのスクラップ材から製造されるリサイクル材(再生地金)のトランプエレメント濃度は等しいものとし, 新地金以外の供給材(老廃スクラップ材, 加工スクラップ材)のトランプエレメント

濃度は、国内で回収されるスクラップ材のトランプエレメント濃度推定値¹⁵⁾の値を用いた。新地金のトランプエレメント濃度は 0 とした。

また、国内で製造される再生地金と海外から輸入する再生地金も区別せず、輸入も含めた再生地金供給量(2003 年度統計値)と、国内回収スクラップの回収量が一致するように、スクラップの国内回収量に一定の割合を乗じた。

新地金以外の供給材(老廃スクラップ材、加工スクラップ材)のトランプエレメント濃度と供給量を Table 6 に示す。

需要側のトランプエレメント許容濃度は、JIS に規格される化学成分の上限値を用い、最低必要量(下限値)は考慮しなかった。需要量は、2003 年度の統計値^{16,17)}を用いた(Table 7)。

3.2.2 目的関数

アルミニウムの再生地金の製造に要するエネルギーは、新地金製造に要するエネルギーの 3% 以下といわれている³⁾。アルミニウム新地金の消費を低減することは、エネルギー消費量および地球温暖化などの環境負荷に大きく貢献する。そこで、本研究では、バージン材使用量の最小化を目的関数とした。従って、目的関数は式(7)で示される。

Table 6 Scrap supply and Tramp elements concentration.

Source	Supply (kt)	Tramp elements concentration (%)			
		Si	Fe	Cu	Mn
Obsolete scrap					
Fabricated metal	109	0.760	0.410	0.340	0.100
Food (including recycled can)	289	0.290	0.590	0.220	1.140
General machinery	14	6.120	0.830	2.030	0.330
Electrical communication machinery	60	3.210	0.610	1.000	0.230
Transportation (mill products)	89	1.790	0.450	0.260	0.160
Engine	476	9.970	1.180	3.700	0.500
Building and construction	191	0.610	0.380	0.120	0.170
Other	78	3.050	0.850	1.310	0.550
Industrial scrap					
1000 series	52	0.320	0.380	0.090	0.050
2000 series	3	0.780	0.730	4.940	0.810
3003	4	0.600	0.700	0.200	1.500
3004	48	0.300	0.700	0.250	1.500
other 3000 series	31	0.600	0.750	0.280	1.110
4000 series	3	13.500	1.000	1.300	0.000
5052	24	0.250	0.400	0.100	0.100
5182	21	0.200	0.350	0.150	0.500
other 5000 series	17	0.290	0.310	0.130	0.560
6061	8	0.800	0.700	0.400	0.150
6063	237	0.600	0.350	0.100	0.100
other 6000 series	14	0.960	0.500	0.230	0.630
7000 series	4	0.180	0.210	2.080	0.160
8000 series	14	0.230	1.500	0.050	0.000

3.3 シナリオ解析

日本国内における現在のアルミニウムの需給構造は、需要がスクラップ材の供給量を大きく上回っているため、スクラップ材の余剰は生じていない。そこで、スクラップ材の供給量が増加したり、鋳物・ダイカストの国内需要が減少する等、トランプエレメント濃度の高いスクラップ材の流通量が増えるケースを想定したシナリオ解析を行い、国内のリサイクルフローの許容し得る、将来の需給構造の変化の範囲を考察した。また、感度解析も行った。

3.3.1 再生地金による新地金代替可能性の検討

(i) 廃自動車から製造する再生地金の使用量の増加を想定したシナリオ解析

陸運分野から排出されるスクラップ材のうちエンジンブロック等の鋳物、ダイカスト由来のもの(廃自動車鋳物)の供給量(同等成分の輸入再生地金を含む)が増加した場合の新地金代替最大可能量を算出した。また、感度解析を行った。

(ii) 廃建材から製造する再生地金の使用量の増加を想定したシナリオ解析

土木建築分野から排出されるスクラップ(廃建材)の供給量(同等成分の輸入再生地金を含む)が増加した場合の新地金代替最大可能量を算出した。また、感度解析を行った。

(iii) 鋳物、ダイカストの国内需要縮小

現在のアルミニウムの需給構造では、トランプエレメントは、鋳物、ダイカスト製品に含有され海外に輸出されている。そこで、生産拠点の海外移転等による鋳物、ダイカストの国内需要縮小があった場合の新地金必要量を考察した。

具体的には、鋳物、ダイカストの需要を縮小(総需要も縮小)させ、利用できないスクラップが発生する限界点を求めた。

Table 7 Tramp elements concentration upper limit and Demand.

	Si	Fe	Cu	Mn	Demand
1000 series	0.325	0.381	0.086	0.048	435519
2000 series	0.779	0.726	4.935	0.810	22624
3003	0.600	0.700	0.200	1.500	32950
3004	0.300	0.700	0.250	1.500	270818
other 3000 series	0.600	0.748	0.275	1.112	193443
4000 series	13.500	1.000	1.300	0.000	28492
5052	0.250	0.400	0.100	0.100	150440
5182	0.200	0.350	0.150	0.500	117461
other 5000 series	0.288	0.311	0.130	0.562	113931
6061	0.800	0.700	0.400	0.150	30150
6063	0.600	0.350	0.100	0.100	802461
other 6000 series	0.958	0.496	0.229	0.628	55507
7000 series	0.182	0.215	2.076	0.157	37107
8000 series	0.225	1.500	0.050	0.000	113837
Castings (AC2B)	7.000	1.000	4.000	0.500	408770
Die-	12.000	1.300	3.500	0.500	867464

4. 解析結果と考察

4.1 再生地金による新地金代替可能性のシナリオ解析結果

シナリオ解析の結果を Table 8 に示す。

4.1.1 廃自動車から製造する再生地金の使用量の増加を想定したシナリオ解析

廃自動車鋳物の回収量を増やす、あるいは同等の成分を有する再生材の輸入を増やした場合、2003 年度の新地金使用量を 1290 kt まで削減可能という結果を得た (Table 8 Case (i))。これは、2003 年度実績値の 2409 kt の約 54% に相当する。言い換えると、新地金使用量のうち、その約 46% までは、廃自動車鋳物から製造する再生地金で代替できるということがわかった。

このときの感度解析の結果を Fig. 5 に示す。グラフの高さは、投入するスクラップのトランプエレメント濃度が、1 ppm 変化した場合の新地金投入量の変化量を示しており、廃自動車鋳物の供給における Cu の感度が高くなっている。以下で、この理由について考察する。

投入する廃自動車鋳物を最も多く消費するのはダイカストである。そこで、廃自動車鋳物のトランプエレメント濃度とダイカストの許容するトランプエレメント濃度を比較すると、ダイカスト許容濃度に対する廃自動車鋳物のトランプエレメント濃度の割合は、それぞれ、Si : 83%, Fe : 91%, Cu : 106%, Mn : 100% であった。このことから、廃自動車鋳物の Cu 濃度の削減により、ダイカスト側の許容値を超える Cu 濃度を希釈するために消費されている新地金の消費を

削減することが可能になると考えられる。

4.1.2 廃建材から製造する再生地金の使用量の増加を想定したシナリオ解析

廃建材のみで代替した場合は、新地金使用量を 768 kt まで削減可能という結果を得た (Table 8 Case (ii))。これは、2003 年度実績値の約 32% に相当する。すなわち新地金の約 68% までは廃建材から製造する再生地金で代替可能という結果を得た。

このときの感度解析の結果を Fig. 6 に示す。

廃建材の供給における Mn の感度が高い。以下でこの理由を考察する。

投入する廃建材を最も多く消費するのは 6063 である。廃建材のトランプエレメント濃度と 6063 のトランプエレメント許容濃度を比較すると、Si : 102%, Fe : 109%, Cu : 120%, Mn : 170% と、廃建材における Mn の濃度が、6063 の許容値を大きく上回っていることがわかる。このことから、廃建材で新地金を代替する場合には、Mn の濃度を下げることによって、新地金必要量を削減できると考えられる。

4.2 鋳物、ダイカストの国内需要縮小のシナリオ解析結果

鋳物ダイカストの国内需要が 50% まで縮小しても、リサイクル不可能なスクラップ材は発生しなかった。鋳物、ダイカストの許容するトランプエレメント濃度には、十分余裕があることが確認できた。

5. 結 言

本研究では、金属材料のリサイクルフローに線形計画法を適用し、複数のトランプエレメントを考慮したリサイクルフローの最適化手法を開発した。

また、日本国内のアルミニウムのリサイクルフローに本手法を適用し、需要の変化に対する新地金の最低必要量を求めた。

その結果、廃自動車鋳物の供給量を増加した場合、2003

Table 8 Scenario analysis results.

(unit : kt)

Added source	Case (i)	
	Engine scrap	Building & Construction scrap
Added amount of scrap supply	602	1108
Requirement of Virgin Material	1293	766

Fig. 5 Sensitivity analysis results (1).

Fig. 6 Sensitivity analysis results (2).

年度実績比で約 46%まで新地金を廃自動車鋳物から製造した再生地金で代替できることがわかった。

新地金の代替材料として、廃建材を用いた場合は、約 68%の新地金を代替できることがわかった。

また、感度解析を行った結果、廃自動車鋳物による新地金代替を進める場合は、廃自動車鋳物中の Cu の濃度が新地金の使用量に大きく影響することがわかった。同様に廃建材による新地金代替を進める場合は、廃建材中の Mn の濃度の感度が高いことがわかった。

また、高いトランプエレメント濃度で輸出されている鋳物、ダイカストの需要が 50%まで減少しても、リサイクルできないアルミニウムスクラップが発生することはないことが確認できた。

本研究は、平成 17-18 年度科学研究費補助金(若手研究(B): 循環型社会における素材リサイクル最適化モデルの構築)の支援を受けて実施した。ここに謝意を表する。

文 献

- 1) K. Kakudate, Y. Adachi and T. Suzuki: *Tetsu-to-Hagané* **86**(2000) 837.
- 2) I. Daigo, D. Fujimaki, Y. Matsuno and Y. Adachi: *Tetsu-to-Hagané* **91**(2005) 171-178.
- 3) K. Okuma: *Kinzoku* **66**(1996) 117.
- 4) T. Nakamura: *Materia Japan* **35**(1996) 1290.
- 5) The Japan Institute of Light Metals: *Aluminium no kanzen recycle system kochiku ni mukete* (2005).
- 6) H. Tatsumi and K. Matsuda: *Pinch Technology*, (The Energy Conservation Center, Japan, Tokyo, 2002).
- 7) J. Jacob, H. Kaïpe, F. Couderc and J. Paris: *Chem. Eng. Comm.* **189**(2002) 184.
- 8) Y. Matsuno, I. Daigo and Y. Adachi: *Tetsu-to-Hagané* **91**(2005) 127-134.
- 9) K. Kanaya: *Korenarawakaru Saitekika Suugaku* (2005) 159.
- 10) G. B. Dantzig: *Linear programming and extensions*, (Princeton University Press, Princeton, 1963).
- 11) K. Ohno, T. Ito and T. Tamura: *Excel niyoru shisutemu saitekika*, (CORONA Publishing Co., Ltd., Tokyo, 2001).
- 12) KBC Process Technology Ltd.: *WaterTarget*.
- 13) T. Ohzono, M. Ohtaki and M. Yanagawa: *Kinzoku* **74**(2004) 1172.
- 14) Japan Automobile Manufacturers Association, Inc.: *The Motor Industry of Japan* (2005).
- 15) H. Hatayama, H. Yamada, I. Daigo, Y. Matsuno and Y. Adachi: *J. Japan Inst. Metals* **70**(2006) 975-980.
- 16) Japan Aluminium Association: *Aluminium Statistics in Japan* (2003).
- 17) Ministry of Economy, Trade and Industry: *Yearbook of Iron and Steel, Non-ferrous Metals, and Fabricated Metals Statistics* (2004).