

# 多目的スクラップ配合問題に対する解法とその解分析

佐藤 輝<sup>†1,a)</sup> 渡邊 真也<sup>†2,b)</sup> 下保 知輝<sup>†1,c)</sup>

**概要：**電気炉（アーク炉）を用いる電気炉製鋼法では、一般的に複数種類の鉄スクラップを最適に配合することにより目的とする鋼の製造を行う。本研究では、電気炉製鋼法におけるスクラップ配合問題を多目的混合整数計画問題として定式化し、多目的の視点に基づく複数個のパレート解を導出することを試みた。検証実験では、従来までの専門性を有する人手での配合との比較を行い、本研究で得られた配合結果が同程度以上の質を持つことを確認した。

**キーワード：**多目的混合整数計画問題, 分枝限定法, スクラップ配合問題

## Approach to multi-objective scrap compounding problem and its solution analysis

HIKARU SATO<sup>†1,a)</sup> WATANABE SHINYA<sup>†2,b)</sup> TOMOKI KAHO<sup>†1,c)</sup>

**Abstract:** In the electric furnace steelmaking method using an electric furnace (arc furnace), the target steel is generally manufactured by optimally blending multiple types of iron scrap. In this study, we formulated the scrap compounding problem in the electric furnace steelmaking method as a multi-objective mixed integer linear programming problem, and tried to derive multiple Pareto solutions from viewpoint of multi-objective. In the verification experiment, we compared it with the conventional manual formulation, and confirmed that the formulation results obtained in this study had the same or higher quality.

**Keywords:** multi-objective mixed integer linear programming, branch and bound, scrap compounding problem

### 1. 序論

製鋼法には、鉄鉱石を原料として高炉を用いる高炉製鋼法と鉄スクラップ（以下、スクラップと呼ぶ）を原料として電気炉（アーク炉）を用いる電気炉製鋼法がある [1]。電気炉製鋼法では、要求される量の目標成分および量となる鋼を実現するため、複数の条件下で多数存在するスクラップの最適な配合を算出する必要がある [2]。しかしながら、

品質だけでなくコスト、かさ密度などの複数の評価指標に基づき総合的に判断をする必要があるため、配合量の決定を自動化することは難しく、熟練者の経験と知見に基づき決定しているのが現状である。

そこで本研究では、スクラップ配合を人的コストの削減、最適性の向上を目的とした3目的最適化問題としてモデル化、及びそのシミュレーション最適化を試みた。具体的には、製鋼のためのスクラップ配合を、コスト、エネルギー、品質の3つを目的関数として持つ、多目的混合整数計画問題 (multi-objective mixed integer linear programming) として定式化を行い、複数の厳密解を導出することを試みた。

本稿の構成を述べる。次章では、まず多目的混合整数計画問題についてその定義およびそこで得られるパレート解の性質について説明する。3章では、スクラップ配合問題の概要及び定式化に関して説明し、4章では定式化した問

<sup>†1</sup> 現在、室蘭工業大学大学院  
Presently with The Graduate School of Engineering, Muroran Institute of Technology

<sup>†2</sup> 現在、室蘭工業大学 しくみ解明系領域  
Presently with College of Information and Systems, Muroran Institute of Technology

a) 20043023@mmm.muroran-it.ac.jp

b) sin@csse.muroran-it.ac.jp

c) kaho15024042@gmail.com

題を解くための具体的な解法を記述する。5章では、数値実験を通しての解分析や実際の製造実績との比較について記述し、最後に結論を述べる。

## 2. 多目的混合整数計画問題

本研究では、スクラップ配合問題を多目的混合整数計画問題として定式化することを試みた。これは、スクラップ配合では扱うスクラップの種類により整数と実数のものが混在している一方、評価関数や制約条件は線形式として表すことができるためである。

多目的混合整数計画問題として定義することで、厳密解法による解導出が容易となり、複数のパレート解を現実的な時間内で導出することが可能となる。

ここでは、多目的混合整数計画問題の定式および多目的混合整数計画問題により得られるパレート解について概説する。多目的混合変数計画問題は、複数の目的関数が存在する混合変数計画問題であり、一般に以下の標準形で表される [3]。

$$\begin{aligned} & \text{minimize} && \mathbf{c}_i^T \mathbf{x} \quad (i = 1, \dots, k, k \in \mathbb{Z}_+) && (1) \\ & \text{subject to} && \mathbf{Ax} \geq \mathbf{b} \\ & && \mathbf{x} \in S_i \quad (i = 1, \dots, m) \\ & \text{where} && S_i \in \mathbb{R} \text{ または } S_i \in \mathbb{Z} \end{aligned}$$

混合整数計画問題は、制約条件が示すように、整数と実数の両方が設計変数に含まれた線形計画問題である。また、多目的混合整数計画問題ではパレート面が凸になるといった特徴もある。

## 3. スクラップ配合問題

電気炉製鋼法では、数十種類のスクラップを最適な配合で組み合わせることで、要求された量の目標成分を持つ溶鋼を生成する。しかし、この最適配合では、スクラップの組み合わせを目標成分に対する厳しい許容誤差の範囲で、下記に示す複数の基準に基づく総合的判断から決定する必要がある。

- 理想的な成分への近さ（高品質性）
- コスト（スクラップの単価に基づく費用）
- 溶解に関わるエネルギー（溶解のしやすさに関わるかさ密度）

また、コストや在庫スクラップ量は都度変化するため、その時々状況に応じた最適な組み合わせを求めなければならない。

本研究では、スクラップ配合問題を多目的混合整数計画問題として定式化した。ここでは、スクラップ配合問題を定式化にあたっての本問題の前提条件についてまず説明し、その上で定式化にかかる設計パラメータ、目的関数、

制約条件などについて説明する。

### 3.1 概要

本研究では、スクラップを原料に製鋼する電気炉製鋼法におけるスクラップ配合を対象とし、共同研究先企業事業所で扱うスクラップ、及びその区分に基づき定式化を試みた。

スクラップは大きく分けて、リターンスクラップと外部から購入したスクラップ（以下、購入屑と呼ぶ）の2種類に分類することができる。リターンスクラップはさらに、サイズに応じてTurning ScrapとForging scrapに分類され、購入屑はTurning Scrapに分類される。Turning ScrapとForging scrapは、形状や材質によってさらに細かく分類される。

#### Turning Scrap

サイズの小さいスクラップである。鉄の鋼材から部品を加工した段階で発生する、ドライ屑がこれに含まれる。ドライ屑は切削屑であり、ドライ粉とも呼ばれる。

#### Forging scrap

サイズの大きいスクラップである。F屑は形状によってさらにヘビー屑と板屑の2種類に分類される。ヘビー屑は主に切断加工されたサイズの比較的大きいものである。板屑はプレス加工された屑である。

作業コストやエネルギー効率、品質、操作性などの観点から様々な条件が存在する。また、技術情報に関しては企業秘密の観点から、抽象的な値を用いる。

スクラップ配合を定式化にあたっての様々な前提条件が存在するが、紙面の都合上、材料コスト面の制約のみを詳細に示す。

#### 材料コスト面の制約

- リターンスクラップ優先使用制約  
購入屑を使用するよりも安価であり、有価元素（Ni, Mo）を回収するため
- 購入屑使用割合制約  
購入屑はリターンスクラップよりも高価であり、過度に使用するとコストが増加してしまうため

#### 品質面の制約

#### 操作性面の制約

#### エネルギー面の制約

#### その他の制約

### 3.2 定式化

前述の条件等に基づき、本論文で定義したスクラップ配

合問題について詳細を述べる。以下、定式化のための設計変数、目的関数、制約条件を順に示す。

### 3.2.1 設計変数

スクラップはステンレスか否かでも分類される。その性質からステンレスは取りうる値が整数であり、非ステンレスは取りうる値が実数値となる。厳選した非ステンレス 66 種類、ステンレス 13 種類、計 79 種類のスクラップの配合量を設計変数として、以下のように設定した。

$$\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_{79}),$$

$$\mathbf{x}_i \in \mathbb{R}_+ (i = 1 \sim 66), \quad \mathbf{x}_i \in \mathbb{Z}_+ (i = 67 \sim 79)$$

#### 非ステンレスの配合量 (実数)

$x_1, x_2$ : 購入屑,  $x_3, \dots, x_{37}$ : ヘビー屑,  
 $x_{38}, \dots, x_{44}$ : 板屑,  $x_{45}, \dots, x_{66}$ : ドライ屑

#### ステンレスの配合量 (整数)

$x_{67}, \dots, x_{71}$ : ヘビー屑,  $x_{72}, \dots, x_{74}$ : 板屑,  
 $x_{75}, \dots, x_{79}$ : ドライ屑

### 3.2.2 目的関数

コスト (材料コスト), エネルギー, 品質の 3 種類の項目を評価基準として用いた。紙面の都合上, コストに関する評価関数のみ詳細を示す。

#### コスト $F^c(\mathbf{x})$

各スクラップには 1 トン当たりの単価が設定されている。スクラップの合計金額を目的関数とし, 最小化を目的とする。

$$F^c(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^{79} x_i c_i \quad (2)$$

$c_i$ : 各スクラップ  $i$  の 1 トン当たりの値段

#### エネルギー $F^e(\mathbf{x})$

目的関数としてエネルギーの式を作成するためにかさ密度を使用した。各スクラップごとにかさ密度が設定されており, 出鋼時のかさ密度はそれらから求めることができる。

かさ密度が大きくなるとスクラップの装入回数が増えてしまうため, 生産性が悪化してしまう。一方, かさ密度が小さくなる場合を考える。かさ密度が小さくなるということは, 比表面積が小さいヘビー屑を多く使用しているということである。ヘビー屑は溶けにくくエネルギー効率の観点から見ると, かさ密度が小さいすぎるのも良くない。

そこで, ある出鋼時の理想的なかさ密度の値を想定

し, その値と求めたかさ密度との差を目的関数として定義した。

$$F^e(\mathbf{x}) = |d^{total}(\mathbf{x}) - d^{ideal}| \quad (3)$$

$$d^{total}(\mathbf{x}) = \frac{\sum_{i=1}^{79} x_i}{\sum_{i=1}^{79} a_i} \quad (4)$$

$d^{total}$ : かさ密度の総和

$d^{ideal}$ : 理想的なかさ密度の値

$a_i$ : 各スクラップ  $i$  のかさ密度

#### 品質 $F^q(\mathbf{x})$

各元素には, 目標成分に対する上下限値が設定されている。上限値を超えることが許されない。一方, 下限値に対しては, スクラップ溶解後の精錬工程で調整可能なため, ある程度下回ることが許容される。そこで本研究では, 上限値違反に関しては制約条件として扱い, 下限値違反については品質に関する目的関数として定式化した。

元素は不純物か否かで扱いが異なるため, それぞれの場合のペナルティ値を以下のように定義した。

- 不純物以外の元素の場合 (Ni, Cr, Mo)  
不純物以外の元素では, 各元素が下限値を下回っている場合にその差分から全体に対する割合を求め, ペナルティとして与える。また, 後述する不純物に比べて値が軽視されてしまう傾向にあるため, 10 倍の重みを設定した。
- 不純物元素の場合 (Cu, As, Sn, Sb)  
不純物元素では, 小さければ小さいほど結果が良い。したがって, 各元素の含有量の最小化を目指す。全体に対する不純物の割合をペナルティとして与えるように定式化した。

品質の評価関数は, この 2 点のペナルティ値の和で定義される。

### 3.2.3 制約条件

前述した前提条件を定式化した。紙面の都合上, 最小配合量制約についてのみ式を示す。

#### (1) 在庫量制約

スクラップの使用量は現在在庫量以下に抑えなくてはならず, 最低在庫量以上でなければならない。

#### (2) 総重量制約

スクラップの配合量の合計値と総重量は等しい。

#### (3) 分類ごとの使用量制約

コストやエネルギー効率, 操業性の観点から各スクラップの限界量が与えられている。各スクラップはその限界量以下に抑えなくてはならない。

(4) 品質上限制約

各元素の上限値を超えてはならない。

(5) 購入層制約

購入層の使用を全体の3割以下とする。

(6) 最小配合量制約

スクラップの最小配合量を1トン以上とする。

$$x_i = 0 \text{ または } x_i \geq 1 \quad (5)$$

#### 4. 多目的混合整数計画問題に対する解法

スクラップ配合問題は、整数値をとるステンレスと実数値をとる非ステンレスの2種類の設計変数と、3つの線形な目的関数を持つ。したがって、この問題は多目的混合整数計画問題とみなすことができる。

混合変数計画問題であれば、分枝限定法 [4] を利用することで厳密解を得ることができるが、3目的をもつ多目的問題であるためそのまま利用することはできない。

そこで、本研究では3目的問題を複数の単目的問題へ分解するアプローチを試みた。具体的には、MOEA/D (Multi-Objective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition) [5] における分解の概念を用いて多目的問題を複数の単目的問題に分解して解を求めるアプローチを提案する。

MOEA/D はスカラー適応度関数を用いる非常に高い探索性能を持つアルゴリズムである。本研究では、MOEA/D の主なスカラー適応度関数である Weighted Sum Approach [6] を用いて問題の分解を行った。スクラップ配合問題の目的関数を Weighted Sum Approach を用いて分解した式を以下に示す。

$$\text{minimize } \lambda_c F_s^c(\mathbf{x}) + \lambda_e F_s^e(\mathbf{x}) + \lambda_q F_s^q(\mathbf{x}) \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \lambda_c + \lambda_e + \lambda_q &= 1, \\ \lambda_c, \lambda_e, \lambda_q &= \frac{1}{100}, \dots, \frac{98}{100} \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、 $F_s^c, F_s^e, F_s^q$  は各目的関数  $F^c, F^e, F^q$  を 0~1 の範囲で正規化したものである。λ の値を調節することによって、どの目的関数に比重をおくか選択することができる。

上記のアプローチを用いることで、多目的混合整数計画問題に対して、単目的混合整数計画問題に対する解法を適用することができる。今回の研究ではこの問題分解を行った上で、分枝限定法を用いて各単目的問題を解いた。分枝限定法と前述したアプローチを組み合わせることで、複数の厳密解を導出することができ、単に計算にかかるコストもより抑えることができるといったメリットがある。

#### 5. 数値実験

提案するスクラップ配合問題の定式化の妥当性を検証するため、実用鋼を用いて、共同研究先企業の製造実績に対する検証実験を行った。具体的には、実際の製造実績と、

4章で示したシミュレーションに基づき求めた結果との比較を行い、シミュレーション結果の妥当性、最適性を検証するための評価を行った。

##### 5.1 評価指標

本実験において用いた得られた解に対する評価指標を以下に示す。

- コスト  
低いほど良い。
- エネルギー  
かさ密度が製造実績に近いほど良い。
- 品質  
出鋼成分目標を遵守できているかで判断を行う。不純物は低いほど良い。

##### 5.2 実験設定

製鋼する鋼の種類により決定する定数が存在する。今回は実用鋼の製造実績を参考に入力定数の値を設定した。入力定数の種類とその値を以下に示す。

- 総重量  $M$   
 $M = 122.43$
- 非不純物元素に与える重み  $w$   
 $w = 10$
- 理想的なかさ密度の値  $d^{ideal}$   
製造実績と同じ値。  
ここでは、 $d^{ideal} = 1$  とする。
- 各元素の上限値・下限値  
本研究でターゲットとなる元素は Ni, Cr, Mo, Cu, As, Sn, Sb の7種類である。各元素に与えられた「配合組成狙い」をもとに上限値・下限値を設定する。また、7種類の元素のうち Cu, As, Sn, Sb は不純物であり、0に近いほど良い。  
配合組成狙いは上限値のみ設定されているが、実際に許容される誤差は 0.01% である。

##### 5.3 実験結果

結果については、

- 得られた複数解の分析、特に端点とバランス解の比較
- 過去製造実績との比較

の2つの視点に基づき考察した。

前者の視点では、多目的で解くことによって導出される複数の解をそれぞれ比較することによって、解がどのような特徴を持つのかを分析する。特に解の特徴が顕著に表れる端点と、端点の性質をバランスよく引き継いだバランス解とを比較することで、解の中身を分析した。後者の視点では、実際に共同研究先企業で作成された過去製造実績と今回の実験で得られた解とを比較し、シミュレーションに

表 1 コストの端点  
 Table 1 End point of cost

No	使用量 (ton)	現在在庫量 (ton)	最低在庫量 (ton)	Ni	Cr	Mo	Cu	As	Sn	Sb	単価 (千円/ton)	かさ密度 (g/cm <sup>3</sup> )
$x_4$	2.022	207	0	0.223	0.075	1.368	0.333	0.200	0.200	0.400	0.029	2.083
$x_{28}$	11.766	60	0	0.986	0.100	0.395	0.667	1.000	1.000	0.800	0.040	2.083
$x_{41}$	15.000	120	100	0.507	0.750	0.526	1.000	1.000	1.000	0.800	0.029	1.272
$x_{46}$	1.005	10	0	0.008	0.010	0.053	0.133	0.667	0.667	0.800	0.036	0.883
$x_{56}$	50.000	150	100	1.028	0.800	1.184	1.000	0.800	0.800	0.800	0.032	0.353
$x_{58}$	38.637	280	100	1.014	0.850	1.184	0.267	0.200	0.200	0.400	0.032	0.353
$x_{76}$	4.000	80	0	1.408	7.250	0.526	22.000	0.533	0.533	0.800	0.021	0.353

表 2 エネルギーの端点  
 Table 2 End point of energy

No	使用量 (ton)	現在在庫量 (ton)	最低在庫量 (ton)	Ni	Cr	Mo	Cu	As	Sn	Sb	単価 (千円/ton)	かさ密度 (g/cm <sup>3</sup> )
$x_{20}$	27.118	100	50	0.282	0.100	1.579	0.400	0.467	0.467	0.800	0.040	2.083
$x_{27}$	1.636	790	200	1.056	0.850	1.184	1.000	0.800	0.800	0.800	0.040	2.083
$x_{37}$	8.246	240	20	10.197	0.025	0.132	0.333	0.200	0.200	0.800	1.000	2.083
$x_{42}$	61.577	100	0	0.062	0.015	0.368	0.200	0.200	0.200	0.400	0.072	1.302
$x_{61}$	10.853	1130	100	0.282	0.100	1.579	1.333	0.467	0.467	0.800	0.032	0.353
$x_{73}$	5.000	52.2	0	3.310	9.250	5.526	1.333	0.667	0.667	0.800	0.208	1.272
$x_{74}$	5.000	26.1	0	3.310	9.250	6.842	1.333	0.667	0.667	0.800	0.208	1.272
$x_{75}$	3.000	78	0	0.197	9.500	0.132	0.333	0.667	0.667	0.800	0.035	0.353

よって得られた解が実際に運用できるかを検証した。

また、下記に示す解における元素成分は上限値を 1, 下限値を 0 として正規化した値を用い、コストに関する評価値は最大値を 1, 最小値を 0 として正規化した値を用いる。

ここでは、紙面の都合上、コスト・エネルギーのバランス解のみ結果を載せる。

### 5.3.1 コスト・エネルギーのバランス解

まず、3 目的およびそれを 2 次元に射影した 2 次元 map から目的関数空間における解の分布を示す。

図 1 では、赤い五角形がコストの端点、青い五角形がエネルギーの端点、緑の五角形が品質の端点をそれぞれ表しており、黄の星型がバランス解を示している。

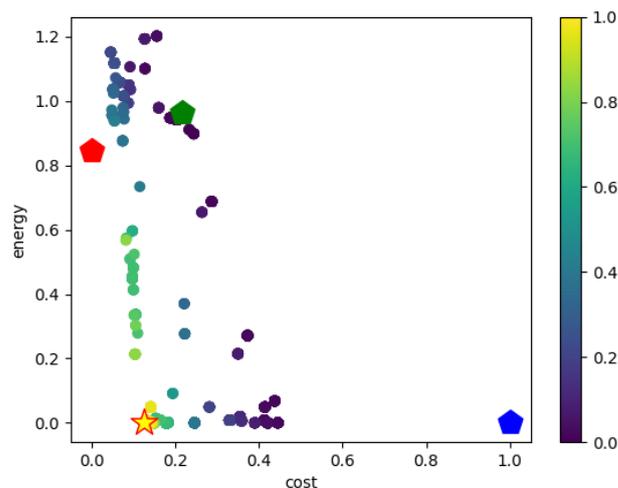


図 1 コスト・エネルギーのバランス解と端点との比較  
 Fig. 1 Comparison of cost-energy balance solution and end points

図 1 を見ると多様な解が一様に得られていることが確認できる。また、4 章で前述したアプローチによって得られたこれらの解は全て分枝限定法によって得られた厳密解である。

また、それぞれ評価値の比較結果とバランス解の各元素の値を示す。

バランス解として選考した解は、 $\lambda_c = \frac{55}{100}$ ,  $\lambda_e = \frac{40}{100}$ ,  $\lambda_q = \frac{5}{100}$  の重みを持つ解 (表 3) である。

コストとエネルギーのバランス解を見ると、 $x_{42}, x_{72}$  といった比較的単価の高いスクラップが含まれている。これ

表 4 コスト・エネルギーの評価値の比較

Table 4 Comparison of cost-energy evaluation values

	コストの端点	エネルギーの端点	バランス解
$F^c$	0.000	1.000	0.124
$F^e$	0.845	0.000	0.000
$F^q$	2.488	3.553	3.117

表 5 コスト・エネルギーのバランス解の各元素の値

Table 5 Value of each element in cost-energy balance solution

	Ni	Cr	Mo	Cu	As	Sn	Sb
バランス解	0.997	0.995	0.974	0.692	0.823	0.823	0.779
上限値	1	1	1	1	1	1	1
下限値	0.997	0.995	0.974	0	0	0	0

表 3 コストとエネルギーのバランス解  
 Table 3 Cost-energy balance solution

No	使用量 (ton)	現在在庫量 (ton)	最低在庫量 (ton)	Ni	Cr	Mo	Cu	As	Sn	Sb	単価 (千円/ton)	かさ密度 (g/cm <sup>3</sup> )
$x_4$	2.685	207	0	0.223	0.075	1.368	0.333	0.200	0.200	0.400	0.029	2.083
$x_{28}$	34.315	60	0	0.986	0.100	0.395	0.667	1.000	1.000	0.800	0.040	2.083
$x_{38}$	6.431	70	0	3.487	2.195	4.605	0.133	0.667	0.667	0.000	0.056	1.272
$x_{41}$	4.569	120	100	0.507	0.750	0.526	1.000	1.000	1.000	0.800	0.029	1.272
$x_{42}$	4.916	100	0	0.062	0.015	0.368	0.200	0.200	0.200	0.400	0.072	1.302
$x_{43}$	11.413	250	100	0.085	0.125	0.211	1.333	1.333	1.333	1.200	0.047	1.302
$x_{45}$	32.900	32.9	0	0.972	0.800	1.447	0.667	0.667	0.667	0.800	0.036	0.883
$x_{46}$	10.000	10	0	0.008	0.010	0.053	0.133	0.667	0.667	0.800	0.036	0.883
$x_{58}$	8.202	280	100	1.014	0.850	1.184	0.267	0.200	0.200	0.400	0.032	0.353
$x_{72}$	4.000	4	0	3.099	9.500	1.579	1.333	0.667	0.667	0.800	0.152	1.272
$x_{77}$	3.000	19	0	2.958	9.250	0.526	1.000	0.667	0.667	0.800	0.036	0.353

らのスクラップはいずれもかさ密度が入力値に近く、かさ密度を調整するために使用されているスクラップだと考えられる。

一方、これらを除くスクラップはいずれも単価の低いものであり 90 %程度を占めている。

したがって、バランス解はできるだけ単価を下げようとしつつも、かさ密度をできるだけ正確な値に調整するような解であることがわかる。すなわち、得られたバランス解は端点の性質を引き継いだ解となっていることが確認できた。

#### 5.4 製造実績と得られた解の比較

得られた解の中で、エネルギーが 0 付近かつコストが最小のものを選択し、製造実績との比較を行った。得られた解は  $\lambda_c = \frac{30}{100}, \lambda_e = \frac{68}{100}, \lambda_q = \frac{2}{100}$  となる解である。

下記にそれぞれの評価値と各元素の成分を示す。

表 6 製造実績と得られた解との評価値の比較

	製造実績	得られた解
$F^c$	0.179	0.124
$F^e$	0	0
$F^q$	3.049	3.117

表 7 製造実績と得られた解との各元素の成分比較

	Ni	Cr	Mo	Cu	As	Sn	Sb
製造実績	1	0.99	1	0.8	0.733	0.667	0.8
得られた解	0.997	1	1	0.693	0.813	0.813	0.776
上限値	1	1	1	1	1	1	1
下限値	0.997	0.996	0.972	0	0	0	0

実際に日本製鋼所でこの解を評価していただいた。その結果、不純物の値で製造実績を上回ってしまっている部分はあるが許容範囲内であり、コストが製造実績よりも小さいため計算で得られた解の方が優れているという評価をいただいた。

## 6. 結論

本研究では、スクラップ配合を 3 目的最適化問題として定式化し、導出した解が優れているか検証を行った。提案アプローチは、スクラップ配合問題を多目的混合整数計画問題として定式化し、MOEA/D における分解の概念を用いて多目的問題の分解を行なった上で、分枝限定法を用いて解を導出する仕組みとなっている。

数値実験では、各端点とバランス解との比較、製造実績と実際に得られた解との比較を行い、解を評価した。具体的には、多様な特徴を持つ解が複数導出できたことや、それらの解が人手で求めた実績解と比較して同等以上の性質を有する実用解であったことを確認し、提案アプローチで得られた解が有用性を持つことが確認できた。

今後は、バランス解の選考を主観に基づいて行っている部分があるため、より詳しい解分析を行うことで特徴抽出を行い、それらを活かしたアプローチを展開することなどが考えられる。

## 参考文献

- [1] Schneider C.A. 高炉-LD 転炉対電気炉製鋼法の比較分析, 鉄と鋼 60 巻 (5 号), 549~556, 1974
- [2] 林 誠一, 玉城 わかな, 友田 陽. 電気炉における鉄スクラップ配合と生産鋼材の関係, 鉄と鋼 91 巻 (1 号), 147~149, 2005
- [3] 志水清孝, 安西祐一郎. 整数計画法とシステム設計 [I], 計測と制御 13 巻 (1 号), 202-214, 1974.
- [4] 柳浦 睦憲, 野々部 宏司. 分枝限定法: さらなる計算効率の希求, システム/制御/情報 50 巻 (9 号), 350-356, 2006
- [5] Q. Zhang and H. Li. Moea/d: A multi-objective evolutionary algorithm based on decomposition. IEEE Trans on Evolutionary Computation, pp. 712-731, 2007.
- [6] 坂根悠治, 塚本実孝, 能島裕介, 石淵久生. 進化型多数目的最適化におけるスカラー適応度関数の利用の効果, 日本知能情報ファジィ学会ファジィシステムシンポジウム講演論文集 24(0), 121-121, 2008.