1J-06

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 [†]　渡邉 真也 [†]　高橋 一樹 [‡]　生方 貴 [‡]
室蘭工業大学 [†]　日本製鋼所 M&E 株式会社 室蘭製作所 [‡]

1　序論

電気炉製鋼法により製造を行っている日本製鋼所では，製鋼した鋼塊から製品への加工中に発生するリターンスクラップと外部から購入したスクラップ（主に自動車関係）の 2 種を主な原料としている．製鋼では，電気炉出鋼時の目標成分や様々な操業条件に応じてスクラップの配合量を決定する．

この配合量の決定作業を，過去の知見や経験に基づいて人間が手動で決定しており，その都度様々な条件に応じて配合量の決定を行わなければいけないため，決定作業に大きく時間を費やしているというのが現状である．そのため配合量の決定作業をコンピュータを用いて自動化することが本研究の目的である．自動化によって，時間の削減による人件費の削減や，より精度の高い配合量の決定などのメリットがある．

スクラップ配合問題では，材料コストやエネルギー効率，品質，操業性などの観点から様々な条件が存在する．これらの条件を考慮した上で，スクラップ配合問題を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，解法の検討を行う．

2　スクラップ配合問題

目標となる組成に近づけることはもちろん，スクラップ購入のためのコストを考慮し，さらに溶解の際にある程度溶けやすくなるよう配合スクラップの密度に配慮した配合を行う必要がある．そのため，本研究では，3 目的問題としてスクラップ配合問題を定式化した．

また，スクラップ配合ではその種類により実数と整数が混在しているため，整数混合問題として扱う必要がある．一方，制約やその評価は線形式により記述できることから線形計画問題として扱うことができる．

以上の理由により，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．

2.1　概要

日本製鋼所では電気炉製鋼法を採用しており，複数のスクラップを配合することで製鋼を行う．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 種類に分類される．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．

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

Hikaru Sato[†], Shinya Watanabe[†],
Kazuki Takahashi[‡], Takashi Ubukata[‡],
† Muroran Institute of Technology
‡ Japan Steel Works M&E, Inc. Muroran Plant

2.2　定式化

2.2.1　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．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．日本製鋼所で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用いる．

2.2.2　目的関数

コスト (材料コスト)，エネルギー，品質の 3 種類の項目を目的関数として用いた．紙面の都合上，品質に関する評価関数のみ詳細を示す．

コスト $F^c(\boldsymbol{x})$

エネルギー $F^e(\boldsymbol{x})$

品質 $F^q(\boldsymbol{x})$

各元素の上限値を超えることはあってはならないが，下限値を下回る場合は，スクラップを溶解した後の精錬工程で成分調整を行うことができるため許容される．また，元素は不純物か否かで扱いが異なる．それぞれの場合のペナルティ値を以下に示す．

元素は不純物か否かで扱いが異なる．それぞれの場合のペナルティ値を以下に示す．

- 不純物以外の元素の場合（Ni,Cr,Mo）

$$T(\boldsymbol{x}) = \sum_{k=1}^{N} q'_k(\boldsymbol{x}) \tag{1}$$

$$q'_k(\boldsymbol{x}) = w\frac{l_k M - S_k(\boldsymbol{x}) + |l_k M - S_k(\boldsymbol{x})|}{2u_k M} \tag{2}$$

$$S_k(\boldsymbol{x}) = \sum_{i=1}^{79} x_i r_{ik} \tag{3}$$

N : 使用する元素の種類数
q'_k : 不純物以外の各元素 k におけるペナルティ量
S_k : 各元素 k の全体における割合
w : 非不純物元素に与える重み
l_k : 各元素 k の下限値
u_k : 各元素 k の上限値
r_{nk} : n 番目のスクラップの k 番目の元素の含有量

- 不純物元素の場合（Cu,As,Sn,Sb）

$$I(\boldsymbol{x}) = \sum_{k=1}^{N} q''_k(\boldsymbol{x}) \tag{4}$$

$$q''_k(\boldsymbol{x}) = \frac{S_k(\boldsymbol{x})}{u_k M} \tag{5}$$

$$S_k(\boldsymbol{x}) = \sum_{i=1}^{79} x_i r_{ik} \tag{6}$$

N : 使用する元素の種類数

q''_k : 各不純物元素 k におけるペナルティ量

S_k : 各元素 k の全体における割合

l_k : 各元素 k の下限値

u_k : 各元素 k の上限値

r_{nk} : n 番目のスクラップの k 番目の元素の含有量

したがって，品質の評価関数の式 F_q は次のように (1) 式と (4) 式の和で表される．

$$F^q(\boldsymbol{x}) = T(\boldsymbol{x}) + I(\boldsymbol{x}) \tag{7}$$

2.2.3 制約条件

制約条件としては，以下に示す 6 つを用いた．紙面の都合上，最小配合量制約についてのみ詳細を示す．

1. 在庫量制約
2. 総重量制約
3. 分類ごとの使用量制約
4. 品質上限制約
5. 購入屑制約
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．

$$x_i = 0 \text{ または } x_i \geq 1 \tag{8}$$

3 具体的な解法

スクラップ配合問題は，設計変数が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 種類があり，3 つの線形な目的関数が存在する．したがって，この問題は多目的混合整数計画問題である．

この 3 目的問題を解くために，MOEA/D(Multi-Objective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition)[1] 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するアプローチを提案する．MOEA/D はスカラー化関数を用いる非常に高い探索能力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 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．

$$\begin{aligned} \text{minimize} \quad & \lambda_c F_s^c(\boldsymbol{x}) + \lambda_e F_s^e(\boldsymbol{x}) + \lambda_q F_s^q(\boldsymbol{x}) \quad (9) \\ & \lambda_c + \lambda_e + \lambda_q = 1, \\ & \lambda_c, \lambda_e, \lambda_q = \frac{1}{100}, \ldots, \frac{98}{100} \end{aligned}$$

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．

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としての定式化を活かすことができる．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．

4 数値実験

テスト計算のための例題として，NiCrMoV 鋼の製造実績をもとに実験を行った．実際の製造実績との比較を行い，評価を行う．

4.1 実験設定

入力によって与えられる定数がいくつか存在する．製鋼する鋼の種類によってこれらは異なる．今回は NiCrMoV 鋼の製造実績を参考に入力定数の値を設定した．

4.2 実験結果

今回の実験では 2 つの観点から解の評価を行う．1 つは端点とバランス解との比較であり，結果として端点の性質を引き継ぐようなバランス解が得られたといえる．紙面の都合上，コスト・品質のバランス解のみ結果を載せる．

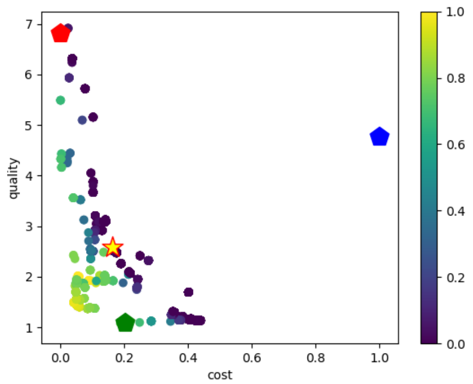

Fig.1 コスト・エネルギーのバランス解と端点との比較

また，もう 1 つの観点として，製造実績との比較も行った．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ところ，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ことがわかった．

5 結論

本研究では，スクラップ配合問題を定式化し，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．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] Q. Zhang and H. Li. Moea/d: A multi-objective evolutionary algorithm based on decomposition. IEEE Trans on Evolutionary Computation, pp. 712–731, 2007.