列生成法による鋳型設置場所割当問題の解法

01405144　住友金属工業(株)　* 西田 大　NISHIDA Hajime
01704074　〃　山田 賢太郎　YAMADA Kentaro
01011084　〃　今井 太一　IMAI Taichi
01108154　〃　熊本 和浩　KUMAMOTO Kazuhiro
〃　清家 光重　SEIKE Mitsusige
(株)日本総合研究所　神谷 陽子　KAMIYA Yoko
住友金属システム開発(株)　中村 美智穂　NAKAMURA Michiho

1. はじめに

近年，組合せ最適化問題に対し、列生成法が注目され，様々な分野に応用されている．弊社でも列生成法を材料取合せ問題に適用し，効果を上げている[1]．今回，大規模問題への適用性と，制約条件変更への対応容易性の観点から，弊社関西製造所製鋼工場の造塊工程の鋳型設置場所割当問題に対し，列生成法による解法を案出し，鋳型設置場所割当システムを開発したので報告する．

2. 問題の概要

(1)造塊工程概要

造塊工程は，溶鋼を鍋（以下，鍋一杯の単位をチャージと呼ぶ）から定盤上に設置した鋳型に注ぎ（鋳込），凝固させ，鋼塊の搬出までを行う工程である．

全 15 種の造塊作業のうち，代表的な作業（鋳型の準備作業・鋳込・凝固・鋳型の片付作業）を図 1 に示す．全ての作業はチャージ単位に，鋳込台車上で実施される．また各作業は，鋳込台車（以下台車と呼ぶ）を工場内の専用設備のある場所に移動させて行う．

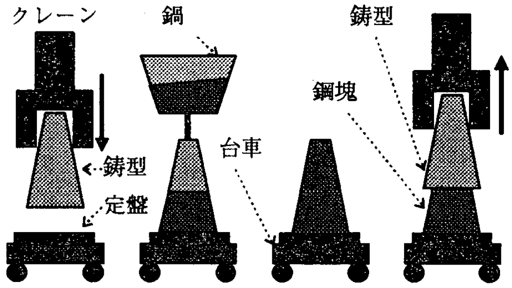

図 1: 造塊工程での作業流れ

(2)造塊工程レイアウト（図 2）

鋳込設備に対して直角方向に A～C の 3 ラインがあり，各ラインに 2 台ずつ計 6 台の台車がある．各台車上には定盤を設置することができる場所（定盤位置）が各 3 ヶ所，合計 18 ヶ所（図 2 の A1～C6）ある．

通常，鋳型の大きさや個数により，1 チャージ当り 1～3 ヶ所の定盤位置を占有して造塊作業を行う．各チャージの作業を行う定盤位置は，操業前に決定する．

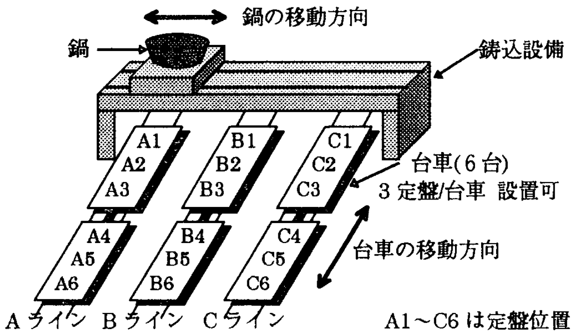

図 2: 造塊工程レイアウト

(3)問題の定義

本問題は，1 日分の製造予定チャージ（約 10 チャージ）を，以下に示す制約条件のもとで，定盤位置に割当てる問題である．すなわち，各チャージの造塊作業を，A1～C6 のうち，どの定盤位置で行うかを決定する問題である．

<厳守すべき制約条件>

・2 ないし 3 個の定盤で造塊作業を行うチャージは，同一ラインの隣り合った定盤位置に割当てる
（例：2 定盤のチャージを A1,A3 には割当不可）

・各台車には必ず 1 チャージ以上割当てる
（6 チャージ／日 以上の場合）

<緩やかな制約条件>

・特定ラインへの割当が望ましいチャージが存在

・2 ないし 3 個の定盤で造塊作業を行うチャージは，同一台車への割当が望ましい
（例：2 定盤のチャージを A3,A4 へ割当てるより A2,A3 へ割当てる方がよい）

3．問題の特徴

(1)大規模問題である

1日分の製造予定チャージ数に対し階乗オーダーの割当が存在するため，チャージ数が増加すると組合せ爆発が発生する（10チャージで100万通り以上）．

(2)制約が多種多様である

制約条件の数が多く，各条件の重要度や考慮する単位（チャージ・ライン・台車等）が異なり，人手では全ての条件に基づいて割当を決定することが難しい．また，将来の生産量の変動に伴う台車数の追加・減少等，制約変更発生の可能性が高い．

4．解法の概要

今回，組合せ爆発防止，制約変更への柔軟対応を狙い，列生成法による部分解候補の列挙，集合分割問題求解の2ステップからなる解法を開発した．

本解法では，厳守すべき制約条件をステップ1のみで考慮する．また，緩やかな制約条件をステップ1でペナルティ表現し，ステップ2で目的関数化し最小化することとした．以下，ステップ毎に詳説する．

(1)ステップ1：列生成法による部分解候補の列挙

列生成法を用いてライン毎に割当可能なチャージの並び（部分解候補）D^Lを，厳守すべき制約条件を満足するように生成する．この際，緩やかな制約条件に基づき，各部分解候補にペナルティP^Lを与える．これら制約条件の変更は，このステップのみで考慮できる．

$$D^L=\begin{pmatrix} d_{11}^L & d_{12}^L & \cdots & d_{1N^L}^L \\ d_{21}^L & d_{22}^L & \cdots & d_{2N^L}^L \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{M2}^L & d_{M2}^L & \cdots & d_{MN^L}^L \end{pmatrix} \tag{1}$$

$$P^L=\begin{pmatrix} p_1^L & p_2^L & \cdots & p_{N^L}^L \end{pmatrix} \tag{2}$$

但し

$D^L=\{d_{ij}^L\}$: ラインLの部分解候補データ

$$d_{ij}^L=\begin{cases} 1+\dfrac{t}{S^L} & \text{ラインLの部分解候補 } j \text{ にチャージ } i \text{ を定盤位置 } Lt \text{ から割当てるとき} \\ 0 & \text{部分解候補 } j \text{ にチャージ } i \text{ を割当てないとき} \end{cases}$$

S^L: ラインLの定盤位置総数

Lt: ラインLのt番目の定盤位置

$P^L=\{p_j^L\}$: ラインLの部分解候補のペナルティ

N^L: D^Lの列数（部分解候補の数）

M: チャージ数

(2)ステップ2：集合分割問題の求解

ステップ1で生成した部分解候補D^Lを用い，全てのチャージをちょうど1ラインのみに割当てるという制約のもとで，各ライン毎に選んだ部分解候補のペナルティ合計値を最小化するような集合分割問題を定式化する．

$$\text{Minimize} \quad \sum_{L\in\{A,B,C\}} \sum_{j=1}^{N^L} p_j^L x_j^L \tag{3}$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{j=1}^{N^L} x_j^L = 1 \quad \text{for } \forall L \in \{A,B,C\} \tag{4}$$

$$1 < \sum_{L\in\{A,B,C\}} \sum_{j=1}^{N^L} d_{ij}^L x_j^L \le 2 \tag{5}$$

$$\text{where } x_j^L=\begin{cases} 0 & \text{ラインLの部分解候補 } j \text{ を採用しない} \\ 1 & \text{ラインLの部分解候補 } j \text{ を採用する} \end{cases}$$

式(4)は，ライン毎にただ1つの部分解候補を選ぶことを表わし，式(5)は全てのチャージをちょうど1ラインにのみ割当てることを表わす．

実際のシステムでは，式(3)～(5)に定式化した集合分割問題を0-1整数計画問題とみなし，汎用数理計画パッケージソフトを用いて求解した．

5．おわりに

本解法に基づき開発した鋳型設置場所割当システムは1日分のデータを数秒程度（EWS4800/320EX）で高速求解可能（従来は人手で約15分程度）である．また，これまで人手では考慮できなかった条件も同時に満たした求解結果が得られている．本システムは当社関西製造所の製鋼工場計画系システムに組込まれ，今春より稼働中である．

今後も，列生成法を種々の事例に適用して効果を上げるとともに，効率的な求解手法の開発に取り組んでいきたい．

参考文献

[1] N. Konishi, Y. Nakagawa, H. Nishida, N. Sakai, "A MIP-Based Approach to the Cutting Stock Problem for Roll and Long Strip Materials with Minimum Production Amount Constraint", International Conference on Advances in Production Management Systems, Nov 1996.（投稿中）