

# 原料払出し作業のスケジューリング

田村繁彦・松本順一・植田敏博

## 1. はじめに

製鉄所におけるプロセスの中で原料処理工程はシステム化の最も遅れている分野であり、従来から人手による操業と管理が続けられていた。しかし、近年、使用する原料銘柄の多様化や消費量の増大と、次工程からの原料品質に対する厳しい要求に応えるため、原料処理工程での操業の成績向上と管理の強化が強く求められるようになった。

このような背景から、当社加古川製鉄所では原料ヤードにおける操業の安定と輸送コストの低減を目的として、計算機制御システムを開発し成果をあげている[1][2]。本システムでは鉱石の陸揚げ、積付け、破碎整粒、ブレンディング、原料槽への払出しなどに関する作業計画を計算機により適正かつ迅速に自動作成し、オペレータがガイダンスを行なっている。

本稿では、上記諸計画のうち、原料ヤードから次工程の工場原料槽へ鉱石を払出す、払出し作業計画の作成方法について紹介する。

## 2. 原料処理工程の概要

原料ヤードでの鉱石の流れは、おおむね以下のようなものである。鉱石船で運ばれてきた鉱石はアンローダで陸揚げされる。陸揚げされた鉱石はスタッカにより粗鉱ヤードに銘柄別に積付けられる。粗

たむら しげひこ 神戸製鋼所 浅田研究所システム制御研究室、まつもと じゅんいち 同加古川製鉄所 原料課、うえだ としひろ 同加古川製鉄所 システム室

鉱ヤードに積付けられた鉱石(込鉱)はリクレーマで切出され破碎設備で破碎整粒されたあと、粉・塊鉱別に精鉱ヤードに積付けられる。購入粉鉱や整粒鉱の一部は成分が均一になるようブレンディングヤードに何層にも積付けられる。各ヤードの鉱石はリクレーマで切出され、複数のベルトコンベアで運搬され、焼結工場・ペレット工場や高炉などの原料槽へ在庫切れが生じないよう払出される。上述の鉱石の流れをまとめて表現すると図1のようになる。

加古川製鉄所の場合、総面積約30万㎡の原料ヤードの中に粗鉱、精鉱ヤードがそれぞれ5面、ブレンディングヤードが1面ある。これらのヤードに常時約40銘柄、総重量約160万トンの鉱石が積付けられている。また、鉱石の輸送に使われるベルトコンベアは約400本あり、ネットワークを形成している。

このように広大な敷地で膨大かつ多種類の鉱石を取扱っているので、原料ヤードでの各種操業計画を計算機により適正かつ迅速に作成することは操業の安定と処理コストの低減に不可欠である。

## 3. 払出し作業

払出し作業とは高炉や焼結工場などの原料槽に在庫を適正に保つようヤードから鉱石を輸送する作業である。この1回の作業は、ヤードに積付けである鉱石をリクレーマで切出し、ヤードと各工場原料槽を連結しているベルトコンベアで輸送しトリップと呼ばれるコンベアで原料槽に装入して

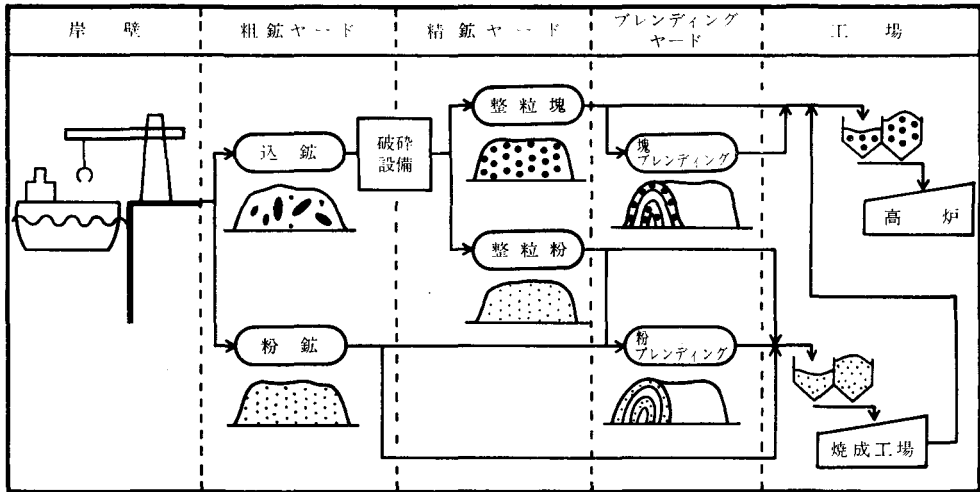


図1 原料ヤードにおける鉱石の流れ

完了する。作業そのものは単純であるが、数多い原料槽で在庫切れを防止しつつ払出す必要があるため、熟練した者でも8時間分の計画を作成するのに2時間程度かかっていた。その主な理由には以下のようなことが挙げられる。

すなわち、約40銘柄の鉱石が容積の異なる100余の原料槽に貯蔵されているうちに、各原料槽から鉱石を切出す速度は千差万別なので、満杯から空の状態になる時間が数時間のものから十数時間のものまで混在している。したがって8時間分の計画を作成しようとする、計画期間内に2度払出しの必要な槽もある。またヤードから原料槽に至るコンベア群はネットワークを形成しており、輸送径路は約3000通りもある。しかもコンベアの稼動状況は時間の経過とともに変化していく。

このように膨大な対象項目と状態量を把握して人手で計画を作成するには限界がある。さらに、設備の修理が行なわれる場合などは、修理期間中に在庫切れの生じる恐れがある原料槽に対して、あらかじめ払出しをする必要があるため、払出を行なうべき対象槽の数が修理前には増加する。これなどはベルトコンベアの取合いを一層助長するので計画作成に時間がかかる要因になっている。

次に払出し作業の操業方針について説明する。

第1に、原料槽の在庫切れ防止である。当然の

ことながら、在庫切れは次工程の操業を不安定にする。これを回避するためには、長期間の計画を適正に作成し、将来における各原料槽の在庫状況を予測しておくことが不可欠である。

第2に、鉱石の大ロット払出しが望ましいということである。その理由は、小ロットの払出しだと一定期間内に複数回払出しせねばならず、リクレーマの移動やベルトコンベアの切替えによる無駄時間が増加し、設備の稼動効率が悪化するからである。また、ベルトコンベアの起動時に膨大な電力を消費するので省電力の観点からも得策でないといえる。

計算機制御システムの機能に対しては、以上のような条件を勘案し、払出し作業計画を作成することが要求される。

## 4. モデル

### 4.1 払出し作業計画問題

払出し作業計画における決定項目は、

- a. 払出しを行なうべき原料槽
- b. ヤードから原料槽に至る払出し径路
- c. 払出しを行なう時間 (払出す鉱石の量)

の3つである。原料槽や払出し径路の決定は組合せ論的問題であり、払出し時間の決定は連続量の配分問題であるといえる。この種の複合問題を数

理計画問題として定式化しようとすれば、対象項目の数が多いため大規模な混合整数計画問題となる。

#### 4.2 モデル化

大規模な混合整数計画問題を解くオンラインスケジューリング方法は、計算時間がかかるので実用的でない。そこで整数性をもつ決定項目と連続性をもつ決定項目とをそれぞれ別個に解くモデルを構成した。すなわち、全計画期間を同一径路で2回の払出しを行なえる程度の小期間（以下これをサンプリング期間と呼ぶ）に分割する。サンプリング期間ごとに原料槽の払出し待ち行列をつくる。設備の稼動状況や予約状況を考慮して、待ちの優先順に払出し径路を選択し決定する。払出し径路を確保できた原料槽のみが当該サンプリング期間で払出しできる。この時点で払出しを行なう原料槽とその径路が求まったことになる。払出しを行なう期間は設備の稼動時間制約や原料槽の在庫量制約を線形計画問題に定式化し、これを解くことによって求められる。このようにして作成される各サンプリング期間の計画を作業の連続性を考慮してつなぎ合わせると全体の計画ができる。以下に各項目について説明する。

##### a. 払出し待ち行列の作成

原料槽ごとに持ち時間（原料槽に在庫している鉱石が補給なしで消費されていく場合、その供給可能な時間の長さ）を計算する。その大きさと払出し実行中の鉱石銘柄を考慮して優先度を3段階に層別し、原料槽の払出し待ち行列を作成する。優先度の高い順に記述すると以下の通りである。

優先度 1：在庫切れ防止のため設定した値（ $TABS$ ）より持ち時間が小さく、他の原料槽への払出し作業を中断しても優先的に払出しを行なう必要がある原料槽

優先度 2：大ロット払出しを目的に設定したもので、払出し実行中の鉱石と同じ銘柄鉱石を貯蔵している原料槽

優先度 3：持ち時間は設定値（ $TABS$ ）より大きい、払出しをしたほうが良い原料槽

##### b. 払出し径路の決定

前サンプリング期間から払出しを継続している原料槽が満杯になるまでの所要時間を計算し、これを対応する設備の使用予定時間（ $WT_j$ ,  $j$ : 設備番号）とする。この時間とサンプリング期間の長さ（ $SP$ ）および、小ロット払出しの防止や払出し能力の小さい鉱石を貯蔵している原料槽を救うために設定した値（ $TH$ , ただし、 $TH < SP$ ）とを比較し、リクレーマ、ベルトコンベア、トリッパなど設備ごとの稼動状態を表現するベクトル  $K$  を作成する。ベクトル  $K$  の要素は設備  $j$  のサンプリング期間始点における使用予定時間により 0 ~ 3 の値をとる。その作成方法を図 2 に示す。

一方、設備間の連結を表わす 2 値行列、すなわち、設備  $j$  から設備  $k$  へ鉱石を輸送できる場合は要素  $(k, j)$  が 1, そうでない場合は 0 という行列をあらかじめ作成しておく。また、原料槽  $i$  と各設備  $k$  との連結も 2 値行列として作成しておく。これらの 2 値行列は設備レイアウトが決まれば一意的に作成されるものである。2 値行列から作ら

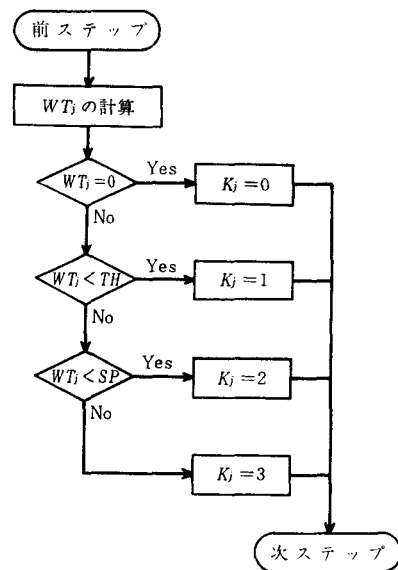


図 2 ベクトル  $K$  の作成方法

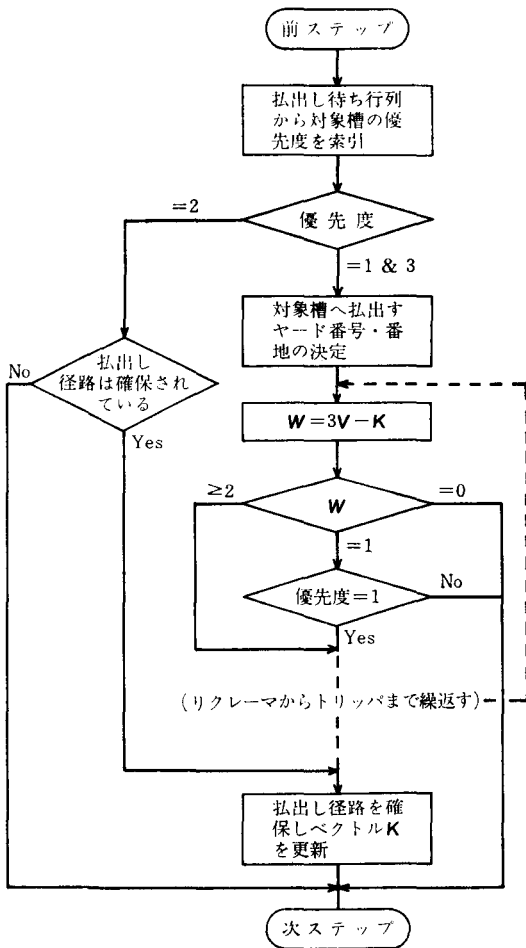


図3 払出し径路の決定方法

れる連結ベクトル  $V$  と前述のベクトル  $K$  を用いて  $W=3V-K$

により  $W$  の値を計算する。  $W$  の要素の値が正であれば対応する設備の系列化は可能である。この操作をリクレーマ、ベルトコンベア、トリッパと逐次行ない、原料槽に至れば払出し径路を確保できたことになる。このアルゴリズムを図3に示す。

### c. 払出し時間、払出し量の決定

前サンプリング期間から継続している払出しと、今回新たに始める払出しの2つの作業に対して設備の取合いや在庫量制約を考慮しつつヤードから原料槽への総払出し量が最大になるように、線形計画法を用いてそれぞれの払出し時間を求める。

第  $j$  系統ベルトコンベアを使用しての前サンプリング期間から継続して払出す時間を  $x_j$  (min), 第  $j$  系統ベルトコンベアを使用して新規に払出す時間を  $y_j$  (min) とする変数を導入すると、この問題は以下のように定式化できる。

$$\text{minimize } \sum_j (A_{ij} x_j + A_{lj} y_j) \quad (1)$$

subject to

$$x_j + y_j \leq SP - LOSS_j \quad (2)$$

$$x_j + y_k \leq SP - \text{MAX}(LOSS_j, LOSS_k) \quad (j \neq k) \quad (3)$$

$$B_i \cdot VOL_i - STK_i \leq (A_{ij} - CONS_i) \cdot x_j \leq VOL_i - STK_i \quad (4)$$

$$A_{lj} \cdot y_j \leq VOL_l - STK_l + CONS_l \cdot SP \quad (5)$$

$$x_j \geq 0, y_j \geq 0$$

ここに、

$A_{ij}$  : 第  $i$  原料槽に入っている鉱石を第  $j$  系統ベルトコンベアを使って払出すときの輸送能力 (ton/min)

$CONS_i$  : 第  $i$  原料槽からの鉱石切出し速度 (ton/min)

$STK_i$  : 第  $i$  原料槽のサンプリング期間始点での在庫量 (ton)

$VOL_i$  : 第  $i$  原料槽の最大容量 (ton)

$B_i$  : 第  $i$  原料槽の払出し最小ロットを保証する設定値

$LOSS_j$  : 第  $j$  系統ベルトコンベアを使用した払出し作業を切替えるとき生じる無駄時間 (min)

$SP$  : サンプリング期間の長さ (min)

$i, l$  : 添字, 原料槽番号

$j, k$  : 添字, 系統ベルトコンベア番号

(2)式は系統ベルトコンベアの稼動時間にかかわる制約式であり、(3)式は他の設備 (リクレーマ、ベルトコンベア、トリッパ) の稼動時間にかかわる制約式である。(4)、(5)式は原料槽の在庫量にかかわる制約式である。

本モデルは変数が40、制約式が60程度なので短時間で解  $x_j, y_j$  を求められる。当該サンプリン

グ期間の始点を  $T_n$ , 終点を  $T_{n+1}$  とすると, 解  $x_j, y_j$  による払出し時間の割当ては,  $i, l$  原料槽に対しそれぞれ  $[T_n, T_n + x_j], [T_{n+1} - y_j, T_{n+1}]$  となる。

以上で計画作成に必要な項目はすべて求められたので, これを適当な回数繰返すことにより任意の長さの計画を作成できる。全体の払出し作業計画作成フローを図4に示す。

なお, パラメータ  $TABS, TH, SP, B_i$  などは操作条件や設備仕様に依存するものなので, 事前のケーススタディにより適切な値を決めている。

### 5. 実施例

前述した基本的モデルに操作ノウハウを織り込んだ払出し作業計画作成プログラムは, 加古川製鉄所の原料ヤード計算機制御システムに組み込まれている。このシステムは優先的に払出しを行なう原料槽の指定や設備の修理期間の指定など, オペレータの判断が介入できるマンマシンシステムを構成している。本方法は計画期間の大小にかかわらず計算時間, 計算容量とも少なくすむのできわめて実用的である。本方法により作成された払出し作業計画のCRT表示例を写真1に示す。

この払出し作業計画作成システムの開発によ

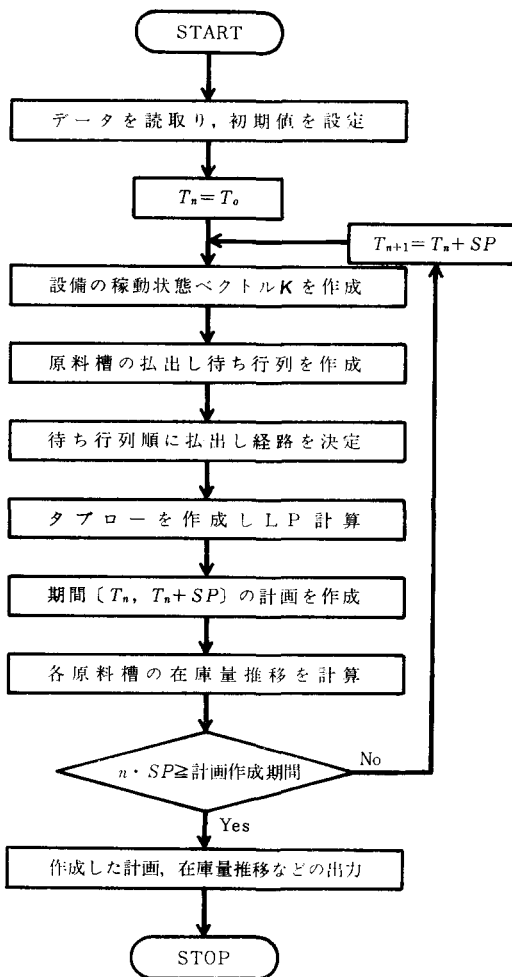


図4 払出し作業計画作成フロー

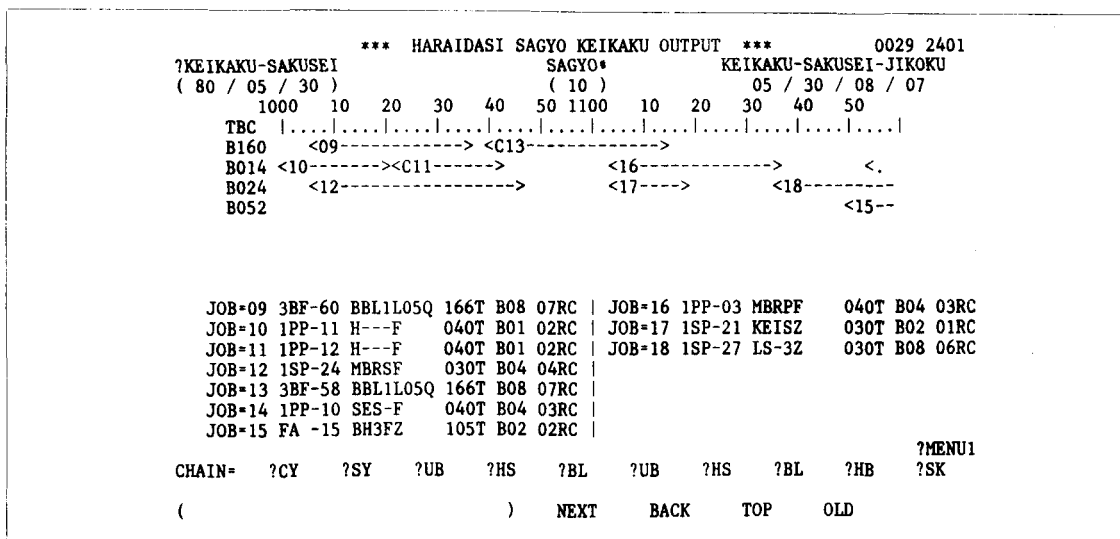


写真1 払出し作業計画表示例

り,

- a. 払出し作業計画の精度向上
- b. 原料槽の在庫切れ解消
- c. コンベア系統の整理
- d. 省力
- e. 電力コストの低減

など多大な効果をあげることができた。

## 6. おわりに

原料の払出し作業計画作成方法について紹介した。ヒューリスティック・ルールと最適化手法を組合せた本方法は、計算時間、計算容量とも少なくすみ、きわめて実用的である。また、本方法は設備レイアウトの2値行列やパラメータ (TABS, TH, SPなど) を対象プロセスの特徴を生かすよう変更することにより、鉱石ヤードだけでなく、石炭ヤードのような、ばら荷ヤードに対しても、その操業計画の作成や設備計画の検討に容易に活用できると思われる。

本稿が物流システムのスケジューリング問題へ取り組んでいる方に参考になれば幸いである。

## 参 考 文 献

- [1] Morita, T., Tanaka, E., Konishi, M. and Tamura, S.: Computer Aided Scheduling for Ore Transfer. IFAC Automation in Mining, Mineral and Metal Processing(ed. J. O'Shea and M. Polis), 1980, 53-63
- [2] 喜多島, 田中, 平井, 植田, 森田, 田村: 原料ヤードの計算機制御. 神戸製鋼技報, Vol. 30, No. 4, (1980), 3-8