



入門講座

システム技術編-4

製鉄所物流制御におけるシステム技術

小西正躬
Masami Konishi

(株)神戸製鋼所 生産技術研究所 研究首席

System Engineering Technologies for Mass Transfer Scheduling in Steel Works

1 はじめに

鉄鋼業では計算機の本格導入から30年以上が経過している。当初、計算機の導入はプロセスの自動制御を目的としていたが、順次、工程の進捗管理にも適用され各種システム技術の応用が本格化した。現在では製鉄所の生産計画や物流計画の立案は全面的に計算機を用いて行われ、システム技術が種々の形で活用されている。本稿では、システム技術に関する入門講座の最終回として、製鉄所物流におけるシステム技術の応用を取り上げる。すなわち、システム最適化、シミュレーション技術の具体的課題解決への応用という観点である。課題の対象は製鉄所の原料ヤード、製鉄・製鋼、鋼片加工とした。システム最適化については、近年メタ戦略¹⁾と呼ばれる新手法が開拓され適用が進められているが、本稿では線形計画法やネットワークモデルなどの従来からの手法に焦点を合わせた。本稿がこれらシステム技術の理解に役立てば幸いである。

2 原料ヤード鉱石払出し作業計画²⁾

鉱石ヤードには数十種の銘柄鉱石が蓄積されていて、焼結、高炉、転炉、コークス炉等の工程に鉱石を払出している。しかし、鉱石を連続的に払出すのではなく、必要な銘柄と量の鉱石を要請に応じて遅滞なく払出すのである。原料ヤードには数千本のコンベヤがあり、数個に区分けされたヤードを巡り、各工程の貯鉱槽に繋がっている。原料払出しに際しては、各工程からの要請に応じヤードの特定箇所³⁾に積み付けられている所望の銘柄鉱石について、搬送コンベヤをどのように組み合わせて要請工程に搬送するか、搬送経路を決める必要がある。とくに、ヤードの近隣箇所⁴⁾で別銘柄鉱石が払出し中であつたり、コンベヤ故障がある場合には経路の決定だけでなく、その経路による搬

送開始と終了の時刻を決定しなければならない。

2.1 原料払出し計画の概要

原料払出し計画においては鉱石積み付け位置から要求工程の貯鉱槽までの搬送経路の割り当てと、その使用時間帯を決定する。前者の割り当ては組み合わせ問題であり整数変数を扱い、後者の搬送の時間決定では時刻に対応する実数変数を扱うことになる。理論的には混合整数計画問題として定式化すればよいことになるが、任意に発生する搬送要求に対応するためにはある程度の実時間性が必要であり、要求の都度混合整数計画問題を解くことは現実的ではない。したがって、割り当て問題については経路の占有状態を勘案し経路の候補を与えておき、時刻決定部分で経路と時間を決める形が取られている。以下では時刻決定問題の数学モデルについて説明する。

2.2 原料払出し時刻決定の数学モデル

ここで紹介する製鉄所では、計画対象となる貯鉱槽が約100、コンベヤ系統は約3000存在する。この規模の問題を解くため、以下の3つのステップで計画作業が行われる。

ステップ1：どの貯鉱槽に供給すべきかの決定である。供給槽については優先順に並べられた待ち行列の中から抽出するが、優先順に関しては、①貯鉱槽の残量をプラントの鉱石消費量を考慮した槽切れまでの猶予時間で評価し、時間の小さいものは優先順を上げる、②次の供給作業で同一のコンベヤ系統を使用できれば優先順を上げる、③その系統が継続使用された場合に、将来槽切れを起こす恐れがないかチェックし可能性のある貯鉱槽は優先度を上げる、などとしている。

ステップ2：どの鉱石ヤードと、どのコンベヤ系統を使用するか⁵⁾の決定である。鉱石ヤードからプラントの貯鉱槽への搬送可能ルートは、鉱石ヤード、鉱石掻き出し用装置(リ

クレイマ)、鉱石払出し用装置(トリッパ)、貯鉱槽間等、各種設備の接続関係を表す2値行列の積として計算される。機械故障・修理・占有等の情報もこの行列の中に反映されている。

ステップ3:搬送量と搬送時刻(開始・終了)の決定である。この部分は後述の線形計画法を用いて決定する。

以上の3ステップを進めるに際して、実時間性を高めるために全計画時間(勤単位)を数個の時間区間に分割している。この時間区間(SP)の長さはちょうど2つの鉱石搬送行為に必要な程度を選定している。このことにより、実時間性を高めるとともに、搬送システムの組み合わせ問題と時間割り当てを分離して扱っても、実用性をそこなわない計画作成が可能となる。各時間区間での搬送量と搬送時間は、以下の線形計画問題の解として得られる。

線形計画モデル:

1) 評価関数

時間区間内での総搬送量(次式のJ)を最大にする時間変数 X_j と Y_j を求める。

$$J(i, i') = \sum_j (A_{ij} \cdot X_j + A_{i'j} \cdot Y_j) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここでjはj番目の搬送系統、iとi'はそれぞれ異なる貯鉱槽を示し、特定の鉱石銘柄に対応する。また、XとYはその時間区間内でのi銘柄とi'銘柄の搬送時間、Aはそれぞれの系統が各銘柄銘柄を搬送する際の搬送効率(ton/hr)である。

(時間区間内のX、Yの割り当ては、図1参照)

2) 制約条件

各搬送時間XとYに関しては、以下のような制約条件がある。

2-1) 時間の上限

各搬送系jでの前時間区間からの継続 X_j と当該時間区間での新規搬送時間 Y_j の和には上限がある。

$$X_j + Y_j < SP - L_j \quad \dots\dots\dots (2)$$

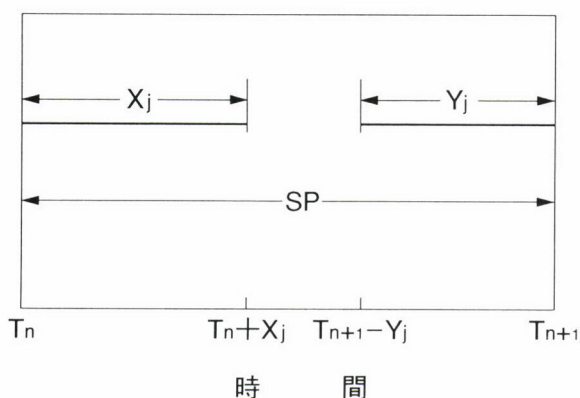


図1 第j系統の時間区間内での変数定義

ここで、 L_j は作業の切り替え時間である。また、同一銘柄の搬送経路が前後の時間区間で異なる場合も、同様にその和に上限がある。

$$X_j + Y_k < SP - \max(L_j, L_k) \quad \dots\dots\dots (3)$$

2-2) 貯鉱槽のレベルの上下限

鉱石の搬送により貯鉱槽のレベルが上限を越さぬこと、また搬送遅れで下限を切らぬことが必要である。すなわち、

$$V_0 + S_1 < (A_{ij} - C_i) X_j < V_1 - S_1 \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$A_{i'j} \cdot Y_j < V_{1'} - S_{1'} - C_{i'} \cdot SP \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 V_0 は槽の下限レベル、 V_1 、 $V_{1'}$ は槽の上限レベル、 S は計画区間の初期時刻での槽内貯鉱レベルである。また、 C はプラントでの鉱石消費率である。この問題は40変数、40制約条件程度の規模となり、実用的な時間で求解が可能である。

2.3 原料払出し計画システムの構成と適用

以上の方法で解 X_j と Y_j が求まると、搬送装置は時間区間、 $[T_n, T_n + X_j]$ と $[T_{n+1} - Y_j, T_{n+1}]$ に割付けられる。ここで、 T_n と T_{n+1} はそれぞれ計画対象の時間区間の開始および、終了の時刻である。当該時間区間での計算結果に基づいて、貯鉱槽レベル、鉱石ヤードの残量、搬送設備の稼働占有状況が計算される。この結果、時間区間の最終時刻における各種状態量が計算され、次の時間区間での計画の初期データとされる。この操作を繰り返し、全計画期間での搬送計画を完成させることができる。このようにして作成した操業計画の一例を図2に示している。

3 溶銑・溶鋼物流スケジューリング³⁾

製鉄所内では高炉から転炉への溶銑搬送、転炉から連铸への溶鋼搬送が行われている。これらは高温状態での搬送であるため、搬送ロス(温度低下)をもたらしてエネルギーロスになる。このため、その物流問題は重要課題とされてきた。以下では、製鉄所の溶銑・溶鋼物流スケジューリング技術について紹介する。

3.1 溶鋼工程の物流計画モデル

対象とする溶鋼工程では、転炉から出鋼した溶鋼は各種の溶鋼処理を経た後に、2基の連铸機もしくは造塊工程で铸造される。途中の搬送はクレーンや台車で行われる。これらの物流の概要を図3に示す。物流の基準になる製鋼操業計画は以下のようにして作成される。すなわち、操業部門から、①設備の休止予定、②一日分の生産量、③各連铸機における铸造順、④造塊での铸造順が与えられる。これ

*** HARAIDASI SAGYO KEIKAKU LIST-UP ***

	SOU MEIGARA	START	END	TR	TBC	YBC	RC	YARD	N - S	RYO	MOTI	MAE(MIN)	%	ATO	TOTAL-RYO	T/H
	ISP 05 SBL2S	06:28 -> 06:55	030T E001 E01 01BR 12Y 330-620	470	2.7	46	->	95								
	04	06:55 -> 07:25		530	2.5	44	->	98								
	06	07:25 -> 07:50		440	3.3	53	->	98								
	03	07:50 -> 08:15		440	3.5	54	->	98								
	02	08:15 -> 08:24		160	4.6	66	->	99								
	04	08:24 -> 08:30		110	6.9	88	->	99								
	05	08:30 -> 08:35		90	7.0	90	->	99								
	06 SBL2S	12:28 -> 12:52	030T E01 01BR 12Y 330-620	420	3.2	52	->	95							2240	1050
	02	12:52 -> 13:04		210	3.4	53	->	96								
	03	13:04 -> 13:30		460	3.2	52	->	98								
	05	13:30 -> 14:10		390	4.0	59	->	99								
	07	13:52 -> 14:10		320	3.7	56	->	89								
	22 MN--F	08:56 -> 09:12	030T B024 B02 02RC 01Y 245-325	240	4.6	43	->	101							1800	1050
	24 RD-SF	10:10 -> 10:56	030T B04 04RC 02Y 040-160	610	4.5	40	->	100							240	900
	07 LS-SZ	11:14 -> 11:42	030T B08 07RC 07Y 505-630	330	1.5	46	->	99							610	800
	27	11:42 -> 12:06		280	2.6	53	->	99								
	1PP 01 SMRPF	07:10 -> 07:39	040T B014 B01 02RC 01Y 550-670	340	6.0	48	->	100							340	700
	04 TASF	12:10 -> 12:35	040T B04 04RC 02Y 435-510	290	7.9	40	->	79							290	700
	14 YAMPS	12:53 -> 13:25	040T B07 07RC 08Y 090-160	480	12.2	35	->	98								
	13	13:25 -> 13:56		470	13.7	38	->	99							950	900
	2PP 11 H--F	06:10 -> 06:14	085T B083 B03 04RC 03Y 550-670	70	82.1	89	->	99								
	09	06:14 -> 06:32		300	22.9	53	->	98								
	15	06:32 -> 06:36		70	24.5	88	->	98								
	10	06:36 -> 06:40		70	78.7	88	->	98								
	08 MN--F	10:10 -> 10:10	089T B01 02RC 01Y 245-325	470	15.7	33	->	98							510	1000
	02 BFD5Z	13:10 -> 13:38	089T B03 04RC 02Y 665-695	470	17.1	33	->	98							940	1000
	02 BFD5Z	13:10 -> 13:22	089T B03 03RC 02Y 665-695	120	6.1	52	->	101							120	600
	02	06:58 -> 07:28	089T B087 B03 03RC 02Y 665-695	250	0.0	01301	->	100							250	500
	* 1BF 03 P-A-L	06:10 -> 06:47	060T B063 B09 117G 11Y 600-700	490	8.6	39(40)	->	98								
	05	06:47 -> 07:22		470	9.5	44	->	99								
	07	07:22 -> 07:51		390	11.3	53	->	99								
	09	07:51 -> 08:18		360	12.1	57	->	99								
	03	08:18 -> 08:23		70	19.7	91	->	99							1780	800
	3BF 58 GW--L	06:10 -> 06:48	166T B160 B02 01RC 06Y 235-290	630	11.8	41	->	98								
	43	06:48 -> 07:26		630	12.7	43	->	100								
	50	08:10 -> 08:44	166T 120 115G 11Y 600-700	570	12.0	46	->	99							1260	1000
	52	08:44 -> 09:18		570	12.0	47	->	99								
	46	09:18 -> 09:51		550	12.7	48	->	99								
	46	09:51 -> 10:24		550	12.6	49	->	99								
	44	10:24 -> 10:54		500	13.8	53	->	99								
	50	10:54 -> 11:00		100	23.6	90	->	100							2840	1000

図2 払出し作業計画の出力画面

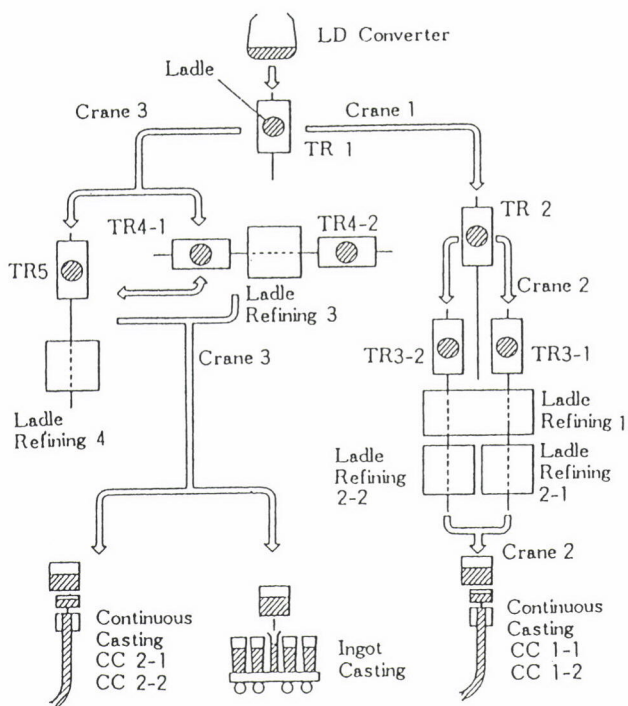


図3 製鋼地区の物流概要

らの条件をもとに製鋼工程の作業計画が作成される。

3.1.1 処理順の決定法

各連铸機での処理順と生産量から、連铸機向けの各チャージについて転炉での出鋼要求時刻を設定する。その要求に基づいて、転炉での出鋼順を決定する。出鋼順を想定すると、図4のような概略の作業を予測することができ

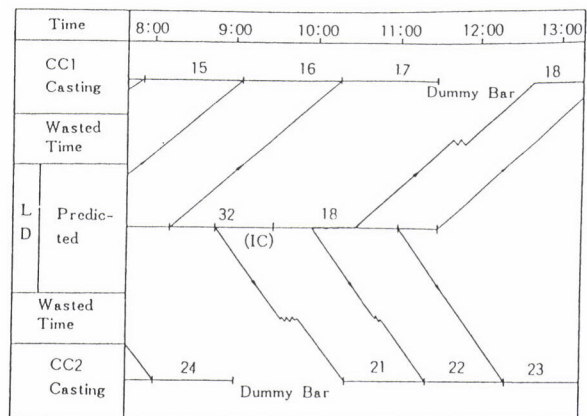


図4 製鋼工程作業予測の例

る。図中の番号はその番号であらわされる溶鋼が、その時刻に、たとえば転炉 (LD) や連铸機 (CC) などの工程に滞在していることを示し、これが短かければ溶鋼の温度低下が少ない適正な作業である。そこで、連铸機サイドの要求を極力満たしながら、かつ溶鋼滞留が最小になると予想される出鋼順を選択する。転炉の出鋼順が決定されれば、概略の作業計画を作成することができる。この時点で複数のラインのある設備についても、各チャージをどのラインで処理するかが決定されている。しかし、まだ一つの設備が同時に複数の溶鋼で占有されているなどの不具合が残っている。

3.1.2 数理計画法による計画の適正化

前節で決定された概略計画を適正化するためには、処理

順序が与えられた各チャージの処理時刻を調節する必要がある。操業計画の決定は、以下に示すように数理計画法の適用によりおこなわれる。

評価関数：

1) 溶鋼滞留による熱損失

$$J_1 = \sum_i \sum_j G_{ij} \{X_{ij} - (X_{ij-1} + T_{ij-1})\} \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 G_{ij} は第 i チャージの第 j 工程の前の滞留による熱損失のコスト指数である。

2) 連続鋳造切れによる製造機会の損失

$$J_2 = \sum_{\omega} H \{X_{kj} - (X_{ij} + C_j)\} \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 $\sum_{\omega}$ は連続鋳造でつながる第 i チャージと第 k チャージの組み合わせのみに関する和を表し、

X_{ij} は第 i チャージの第 j 工程での処理時間である。

また、 H は連続鋳造切れによる機会損失のコスト指数、 T_{ij} は段取り替え時間、 C_j は第 j チャージの鋳造時間である。

制約条件：

3) 工程所用時間の制約

各工程について、前チャージの処理が終わってからはじめて現チャージが処理できるとの制約である。

$$X_{ij+1} > X_{ij} + T_{ij} \dots\dots\dots (8)$$

4) 設備占有時間の制約

現在の処理が終わっても段取り換えの準備が終了してからでないとな次の処理ができないとの制約である。

$$X_{kj} - R_{kjm} > X_{ij} + T_{ij} + Q_{ijm} \dots\dots\dots (9)$$

以上に述べた制約条件 3)、4) の下で、評価関数 J_1 と J_2 の和が最小となる解 X_{ij} を求めると各チャージ i の第 j 工程での操業開始時刻が求まる。このようにして決定した操業計画の例を図 5 に示す。

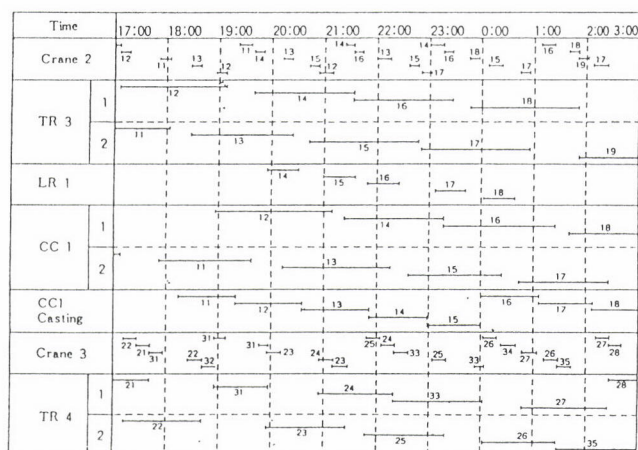


図5 数理計画法の適用による計画例

3.2 溶銑工程の物流計画モデル

図 6 に製鉄所の溶銑地区を示す。溶銑工程の物流計画では、各溶銑鍋が通過する工程ルートおよび、各溶銑鍋の搬送のタイムスケジュールを決定する。上に述べた溶鋼工程の操業計画が求まった後で、溶銑工程の操業・物流計画が作成される。溶銑工程において各溶銑は①溶銑予備処理炉において、脱硫および脱磷処理を施された後に転炉へ搬送、②溶銑予備処理炉において脱硫または脱磷処理の片方を施され後に転炉へ搬送、③取鍋脱硫設備において脱硫処理された後に転炉へ搬送、④溶銑予備処理はおこなわず直接転炉へ搬送、のいずれかの工程ルートを経る。各チャージには各処理ルートを通った場合のコストが鋼種に応じて設定されている。溶銑工程の物流計画では、転炉への溶銑供給期限や設備の稼働率を考慮しつつ、各溶銑鍋が通過する工程ルートおよび、各溶銑鍋のタイムスケジュールを決定する。以下ではネットワーク計画法の最小費用流問題による計画作成を説明する。

3.2.1 ネットワーク計画モデル

溶銑の物流は、図 7 のようなネットワーク上での流れで表現できる。ネットワーク上で右方向の流れは時間の経過を表し、下方向への動きは工程の進行を表す。したがって、右方向へ向かう枝は溶銑の滞留に対応し、右下方向へ向かう枝は特定の所用時間を要する処理や搬送に対応する。

3.2.2 最小費用流探索による物流計画の作成

ネットワークの各枝にはその枝を通った時に発生するコストを設定しておく。これは、滞留によって発生する温度低下の損失コストや、溶銑処理コストに対応する。ここでは、操業の各種制約を満たしつつこれらのコストの総和が最小になるようなネットワーク流を以下のステップで探索

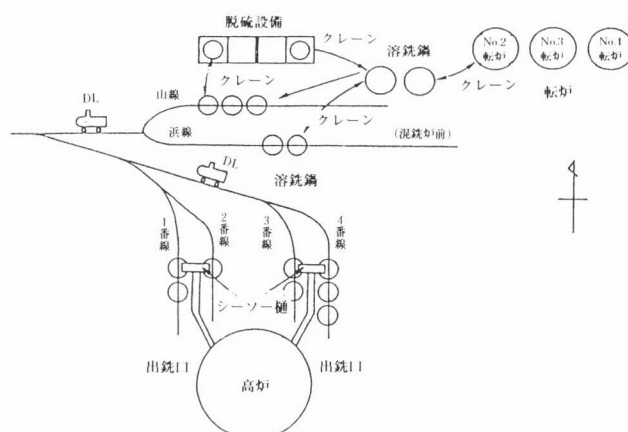


図6 製鉄所の溶銑地区

する。

- 1) 各溶銑チャージについて、適当なネットワーク上の初期流を設定する。
- 2) コストが改善されるようなネットワーク流の修正方法を探索し、修正する。
- 3) 修正方法が見つからなくなるまで2)項を繰り返す。
- 4) 最終のネットワーク流を解とする。

このスケジューリング方法で作成した計画の一例を図8に示す。

4 鋼片加工精整工程の物流制御⁵⁾

従来加工工場における物流制御は、シーケンス制御により行われてきた。この方式は、大量生産を前提とすれば問題が少ないが、多品種小ロット生産となり設備能力を最大限に発揮するには、状況に応じた搬送設備の運用により最適な物流制御をおこなう必要が出てきた。加工工場の物流制御では実時間性が要求され、計算機による判断を早く行う必要がある。以下では、エキスパートシステムによる鋼片加工工場の物流制御技術を紹介する。

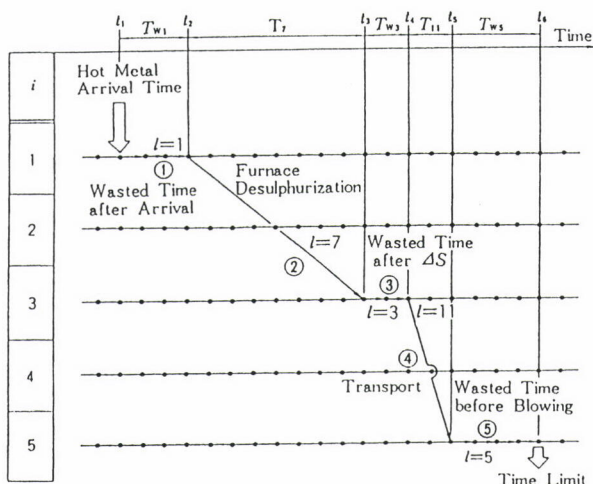


図7 ネットワークによる溶銑物流モデル

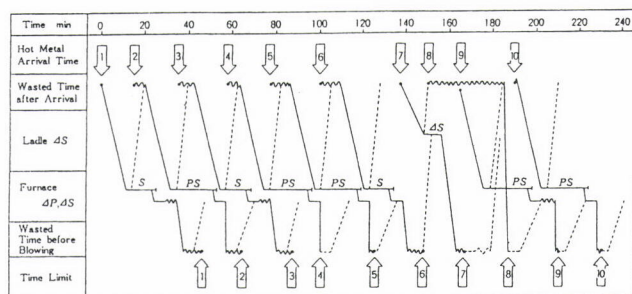


図8 溶銑工程の物流計画例

4.1 鋼片精整ラインの物流制御

物流制御の対象とした鋼片精整ラインを図9に示す。鋼片精整ラインでは連続鋳造や分塊工場で製造された半成品の鋼片に対し、表面検査をした後、分岐点で3台の疵取機に振り分け、表面疵除去作業を行う。表面疵除去が終わると、鋼片は各疵取機で除去作業を受けた同一ロットの鋼片と合流し、再検査ラインを経て次工程の圧延工程へ運ばれる。このラインに投入される鋼片ロットは2、3本程度の小ロットから30本程度の大ロットまでさまざまなサイズのものがある。各ロットの合流に関しては、異なるロットの鋼片が他のロットに混在してはならないとの制約がある。

4.2 物流シミュレータ⁶⁾

コンピュータの中に鋼片精整工場の作業と物流を再現する物流シミュレータがあれば、現在の工場内物流を再現してその問題点の検討や作業改善、設備増強等の効果を事前評価することができる。シミュレータは工場内設備の稼働状態を表現するプロセスモデルと、物流制御を行うための制御モデルから構成されている。(図10参照)

プロセスモデルは離散値系の問題を表現するのに便利なペトリネット⁴⁾で表現されている。ペトリネットによる操業の表現を簡単な例で説明する。ここでは図11に示すクレーン搬送を考える。図にあるように、台車Aに乗ってい

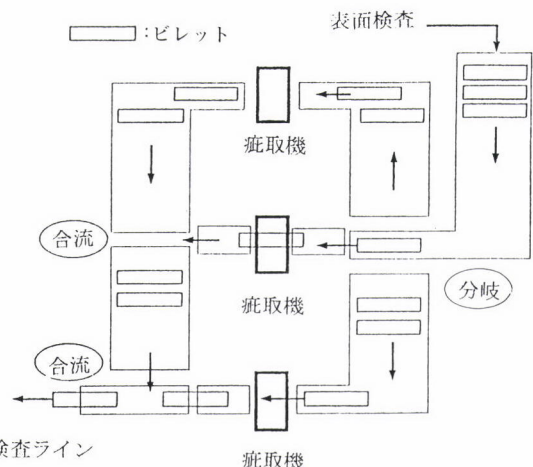


図9 鋼片精整ライン

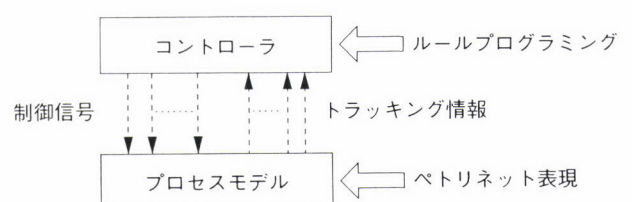


図10 シミュレータの構成

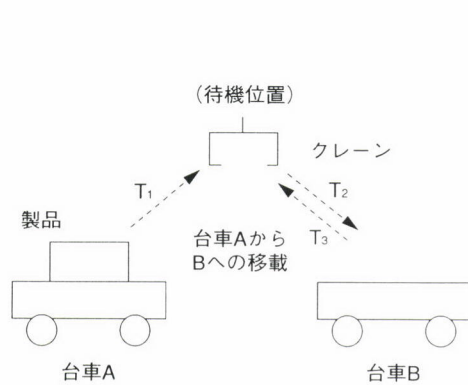


図11 クレーン搬送の例

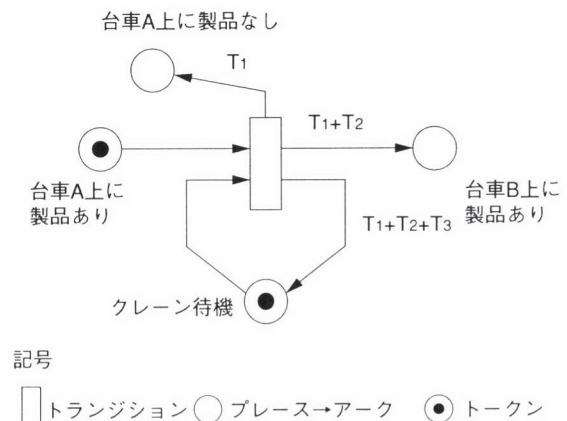


図12 クレーン搬送のペトリネット表現

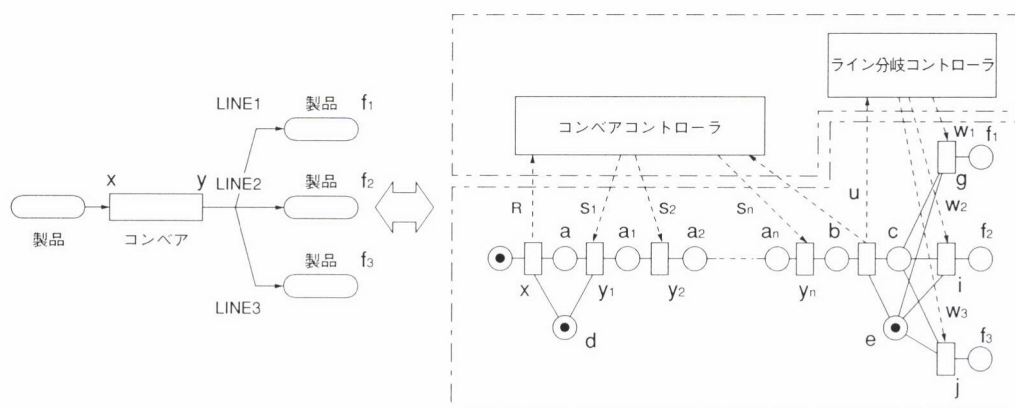


図13 鋼片分岐部のペトリネット表現

る製品をクレーンが台車B上に搬送する系である。クレーンは初期位置から時間 T_1 後に台車Aに到着、製品を釣って時間 T_2 後に台車Bに到着し、製品を降ろす。その後クレーンは時間 T_3 後に待機位置に戻る。この一連の動作をペトリネットで表現すると図12となる。

このようにして加工工場全体をペトリネットモデルで表現した。部分的であるが、鋼片の分岐部をペトリネットで表現したものを図13に示す。

4.3 加工工場の物流制御システム

物流制御システムは、図14に示すようなプロセスモデルとコントロール部分から構成されている。コントロール部はエキスパートシステムとしルールベースプログラミングにより記述されている。物流制御ルールは、前述の物流シミュレータを用いて事前に抽出整理したものと、必要に応じて操業者の知識を追加する形となっている。また、ル

ルベースでは一つの解候補を出力するのではなく、複数の解候補を提示するだけで、最終的な決定はそれらをシミュレータで評価した上で操業上もっともよいものを採用する形としている。これによりエキスパートシステムの欠点である定量性の欠如を補い、全体として所期の性能を発揮することができる。エキスパートシステムに用いられている知識ベースは、上位知識ベースと下位知識ベースとから構成されている。上位知識ベースとは物流の大きな方針を定める経験則であり“大ロットであればすべてのラインを用いて加工する”とか“疵除去作業時間の長い鋼片は同一ラインで続けて処理しない”などのルールが表現されている。上位のルールでは細かい規定はせず大きい方針のみを規定する。一方、下位の知識ベースには上位で定めた方針の実現方法が記述されている。たとえば、“全ラインを使う”との制約下では、加工時間やラインの空き状態を参考にしながら一つ一つの製品をどのラインで製造するかが記述され

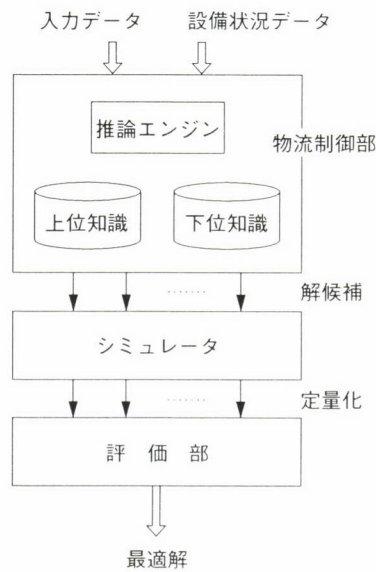


図14 物流制御システム

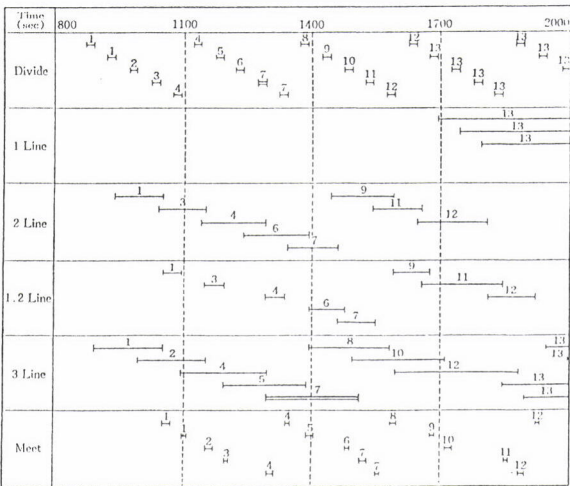


図15 鋼片加工の物流計画例

ている。本システムを用いた物流制御の結果の一例を図15のガントチャートに示す。

5 おわりに

本稿では、弊社での3事例により製鉄所における物流制御へのシステム技術の応用について紹介した。システム技術の代表選手はシステム最適化技術とシミュレーション技術であるが、これらの技術を適用するためにはまず解決すべき課題のモデル化が必要である。問題解決の方法は、それぞれの環境に応じ選択すべきもので、本稿での取扱いが唯一ではない。現在、日本鉄鋼協会では学会部門が設置され、計測・制御・システム工学部会でシステム技術に関してもフォーラム活動が展開され、物流スケジューリングや生産計画に関する種々の話題が議論されている。本講座を通じてシステム技術について関心を持っていた読者会員のフォーラムへの参加をお待ちしています。

参考文献：

- 1) 玉置久：計測制御システム工学部会シンポジウム資料，(1997) 1月，1.
- 2) S. Tamura et. al: Computer Control System for Ore Yard, Proc. 9th Triennial World Congress of IFAC, (1984) July.
- 3) 高橋哲也ほか：計測自動制御学会論文集，29(1993)5, 596.
- 4) J. L. ヒータースン：ペトリネット入門，共立出版，(1981)
- 5) 大村佳也子ほか：オペレーションズリサーチ，37 (1992) 2, 59.
- 6) K. Omura et. al: Petri Net Simulator with External Logic Controller and its Application to Production Line Control, Third Int. Workshop on Petri Nets and Performance Models, (1989) Dec.

(1998年1月6日受付)