シミュレーションおよび最適化手法の工業プラントへの応用

尾崎 賢二，庵原 滋，宮本 裕一

工業プラント分野においては，生産の効率化を図るため，フレキシブルな生産システムの能力を最大限発揮させるような設計および操業が望まれる．このために，設計時でのシミュレーションによる機器配置，機器台数の最適化，また操業時における搬送スケジュールの最適化等の問題への対処が技術上必須となる．ここでは，空港設備・製鉄プラントへのこれら最適化の応用例を述べる．

1．事例1：空港手荷物搬送システムの能力評価

(a) モデル化

関西空港の手荷物搬送システム（Baggage Handling System）の概観を図1に示す．国際線，国内線ともに出発，到着ラインがあるが，最も設備が複雑であり要求性能の高い国際線の出発ラインを対象として稼動前に設備能力評価のためのシミュレーションを行った．

この設備はピーク日10,000人の手荷物を処理するシステムである．手荷物を持った乗客は4階の国際線チェックインアイランド（8箇所）に到着し空いているチェックインカウンター（20箇所／アイランド）で受付けを行う．手荷物は秤量コンベヤ上に乗せられ，入力された手荷物情報をもとに，仕分装置を中心とした各種の搬送装置間を合流・分岐して，フライトに対応した1階の積付コンベヤまで自動搬送される．

モデルは「到着モデル」と「設備モデル」の2つに分けて作成した．

到着モデルでは設計条件であるフライトテーブル，過去の実績をもとに作成した各フライトの乗客到着時間分布と各乗客の手荷物数分布を入力として，各チェックインアイランドに到着する乗客の到着時刻と携帯手荷物の到着過程を模擬する．

設備モデルではシステムを構成する各装置の制御ロジックを用いて手荷物の搬送メカニズムを詳細にモデル化しており，到着モデルで求めた乗客到着時刻と携帯手荷物数を入力として1日分のシミュレーションを行っている．

(b) シミュレーション結果

本システムでは各手荷物搬送時間の制約（チェックインから積付コンベヤまでの搬送時間が11.5分以内）が要求性能である．結果として得られた手荷物搬送時間ヒストグラム（図2）より繁忙期でも最大の搬送時間が11.5分以下であり要求性能を満足することを確認できた．

また，シミュレーション実施当初は緊急シュートへの手荷物排出数の値が予想外に大きかったが，シミュレーション結果（待ちの発生状態等）を参考にして装

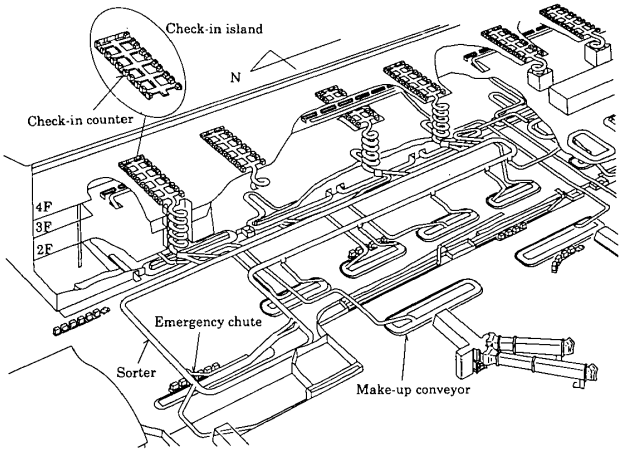

図1　手荷物搬送システム概観

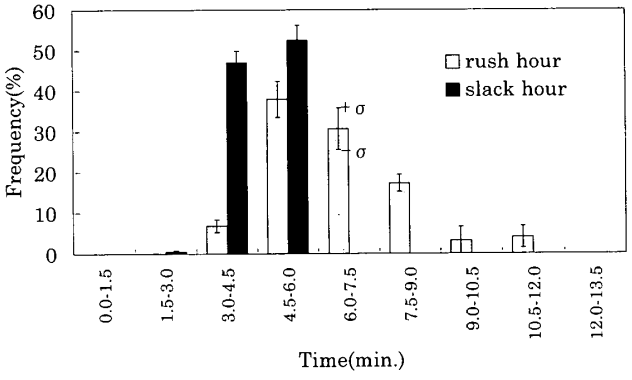

図2　手荷物搬送時間ヒストグラム

おざき　けんじ，いはら　しげる，みやもと　ゆういち
川崎重工業㈱　〒650-91 神戸市中央区東川崎町

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．

置の制御ロジックを改善することができた．このように設備レイアウトや制御ロジックの有効性・問題点を事前に検証できた．

2．事例2：大規模AGVシステムの台車数決定問題

(a) モデル化

ここで取り上げるのは，空港のバラ貨物保管用立体倉庫と貨物ターミナル内の各部とを結ぶバラ貨物搬送用の有軌道AGVシステムである．このシステムの最大の特徴は，バラ貨物の入った通箱を1時間に最大320個搬送するために，40～70台という多数の台車の投入が必要となっていることである．**図3**に搬送ルートの概念図を示す．

多くの台車が，限られた搬送ルートを共用するため，貨物の荷積み・荷下ろしを行う台車が，他の台車の走行を妨げないように，すべての作業ステーションを，本線とは別の支線上に設定している．荷積みステーションは18カ所，荷下ろしステーションも18カ所ある．この結果，搬送ルートは，数多くの分岐点・合流点を持つこととなる．

ところが，ルートには，合流部や分岐部にポイント切替区間，一定距離毎に閉塞区間が定められており，単一区間内には1台の台車のみが進入できる．ポイント切替区間の方がその他の閉塞区間より長いこと，合流部直前でいったん停止する可能性が高いことなどから，直線状の本線と比べると合流部の通過容量は少なく，ボトルネックになる可能性が高い．また一般に，通行容量の限界が無視できる場合には，システムの搬送能力は台車数に比例するが，台車数が多くなりすぎると，台車同士の干渉が増え，かえってシステムの搬送能力が小さくする結果になってしまう．つまり，搬送能力を最大にする台車数が存在するのである．

(b) 結　果

シミュレーションにより搬送能力と台車数の関連を調べた結果を**図4**に示す．図4は，図3中のL1において，台車に積み込まれるのを待っている通箱数，すなわち搬送要求の待ち行列長さの時間平均を求めたものである．L1は，本システムにおいて最も負荷の集中するステーションの1つであり，本システムの処理能力を表わす指標としてこの場所の待ち行列長さを選んだ．この結果から，最適な台車数は約60台であると推定され，これ以上増やすとかえって搬送能力が低下することがわかる．このような台車数の最適値が，搬送システムのレイアウトや機器の性能に大きく依存していることは想像に難くない．一方で，確率的シミュレーションにより信頼できる最適値を求めるためには多数の試行回数が必要であり，人員と時間がかかることになる．

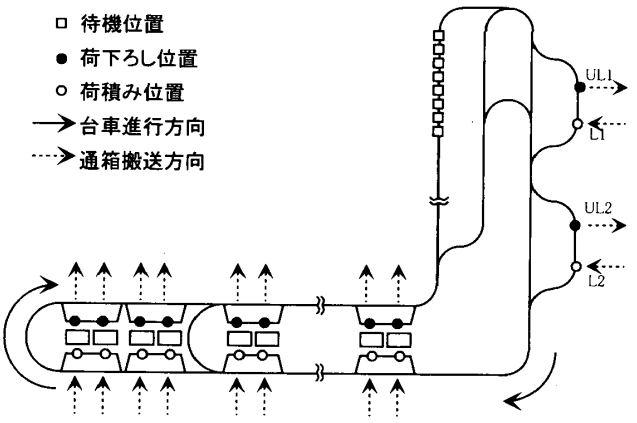

図3　大規模AGVシステム例

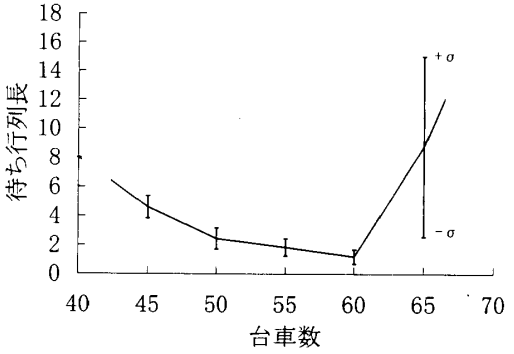

図4　台車数に対するL1での搬送要求待ち行列長さ

そこで，AGVシステムのレイアウトや機器の性能を，台車間の相互干渉距離や，合流部における通行容量の視点からパラメータ化し，最適な台車数N_{opt}を次のように考える．

$$N_{opt}=\frac{L_{main}}{L_{inter}}+N_{wait}$$

ここでL_{main}は本線の周回距離，L_{inter}は合流後の台車間距離，N_{wait}は，積み込みステーションで待機してる台車数である(積み込みステーション数と同じとは限らない)．

この本事例においては$N_{opt}\fallingdotseq 60$であり，シミュレーションの結果とよく一致している．第1次近似として今後の設計に利用可能なガイドラインと考えている．なお，本例では台車数の検討だけでなく図3のレイアウトそのものも，シミュレーション結果を考慮して決定した．

3．事例3：ループ台車の搬送車割り当て問題

(a) モデル化

物流搬送の基本的な目的は，ワークや部品，工具などを搬送ネットワーク上のある地点(From点)から他の地点(To点)へ搬送する搬送要求に対し，搬送要求を利用可能な搬送車に割り当て(割り当て問題)，走行時間や搬送コストによる目的関数によって最適な経路と走行スケジュールを決定する（運行経路決定問題）

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．

ことであり，組合せ離散最適化問題として扱われる．

本事例対象は，製鉄プラントにおける高速コイル搬送システムであり，図5のようなネットワークで構成され，以下の条件により運転される．

i)アークは，工場内に設置された搬送車の走行可能経路を表わし，一方通行とする．ノードはロード／アンロードステーション，閉塞分離点を表わす．

ii)同一ノード・同一アークに，2台以上の搬送車が存在することはできない．

上記条件下では，ある搬送車がほかの搬送車のために，あるノード／アークに進入しようとして進入できず，その前方のアーク／ノードに停止しようと減速または停止する（ブロッキング）ような搬送車間の干渉が起こる可能性がある．

筆者らは，組合せ離散最適化問題の近似解法として，制約充足問題を解決する知識処理システムを使用した．知識処理システムは，制約をルール形式で記述でき，ルールに書かれた制約条件の集合を組み込まれた制約評価系で評価することにより最適解の探索を行う．言い換えると，本解法は干渉等の設備上の制約を積極的に制約ルールとして取り込み，最適解の探索範囲を狭めることにより，組合せ爆発を防止しつつ，最適近似解を得ることを特徴としている．

割り当て問題で発生する干渉問題を図6の例を用い，2搬送車間の問題として説明する．搬送車A，Bは割り当て可能な状態で，BがAより前方にいる．この時点で搬送要求1，2が発生したとき，割り当ての組合せは2通りある．

(1) Aが1，Bが2に割り当てられた場合

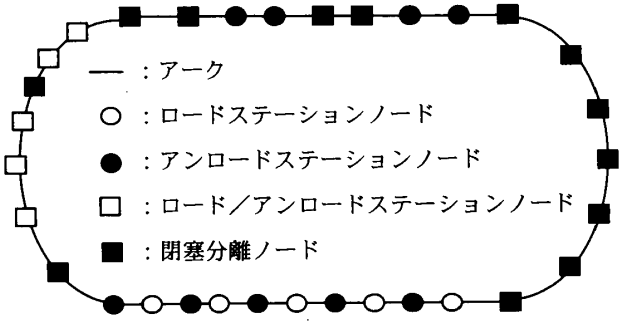

図5　コイル搬送システム

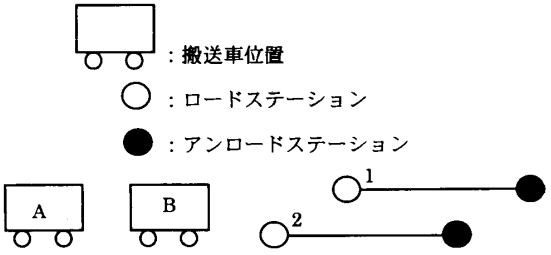

図6　割り当て問題の制約

Bが2をローディング中AはBにブロッキングされ前に進めず，搬送車間に干渉が発生する．

(2) Aが2，Bが1に割り当てられた場合

搬送車間に干渉は発生しない．

すなわち，(2)で示したように，A，Bそれぞれのローディングステーションまでの経路が一方のローディングステーションまでの経路に包含されなければ良いことになる．この制約は知的処理システムの論理プログラミング言語（Prolog）に変換可能であり，搬送車の割り当て問題の近似解の導出が可能となる．

(b) 結　果

従来からよく用いられている搬送要求が発生した順に，搬送要求のFrom点に最も近くに位置する利用可能な搬送車に割り付けていくFIFO（First In First Out）手法と本手法とのシミュレーションによる比較の結果を図7に示す．搬送能力（単位時間当たり搬送を完了した搬送物の総数）から見ると，本手法は搬送車1台分少なくても，FIFO手法と同等以上の搬送力を持つ．また，単位時間あたり60個の搬送要求を発生させているが，本手法は，搬送要求の90％を単位時間以内に搬送車5台で処理できるのに対して，FIFO手法では搬送車8台必要である．

4．事例4：形鋼切断・搬送スケジューリング

(a) 設備概要とモデル化

H形鋼，溝形鋼などを生産する形鋼圧延設備では，圧延後の長尺製品を複数本数まとめた後，切断設備へ搬送し，このまとめられた長尺製品を与えられた切断指示で指定された長さに切断する．切断機は，複数台設置され同時に複数種類の長さの製品の切断が可能である．また，切断後の製品の搬送先（検査床）は複数設置され，切断された製品はまとめられた本数ごとに指定された検査床へ搬送される．

形鋼生産では，多品種・少量生産，また多種類の長さの製品を切断する場合が多く，切断，切断後の製品の検査床取込みは複雑になっている．渋滞による操業停止を避け，切断・製品搬送のより効率的な操業を実施するためには，どの切断機を使用し，どのような順

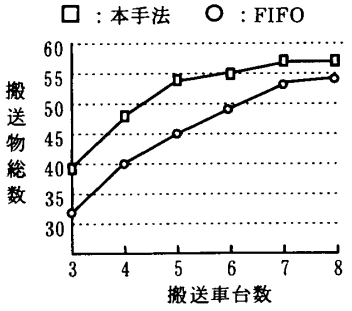

図7　搬送能力

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．

序で指示された長さの製品の切断を行うか，また，切断後の各製品をどの検査床に取り込むべきかを決定するためのスケジューリング処理が必要となる．

このスケジューリング処理は，切断パターンの生成，切断後の製品の搬送先の割り当て問題として組合せ最適化問題として扱われるが，切断パターン，製品搬送先の組合せは膨大な数となり最適解を求めることは難しい．筆者らは，＜事例３＞と同様な知識処理システムを使用し，実機に応用した．

本事例対象は図８に示す設備構成となっており，以下の制約条件のもとで運転される．

設備上の制約

① 各切断機，ストッパゲージの移動可能範囲から決まる各切断機で切断可能な長さの制約（図８のS1，S2，S3の制約）

② 取得製品の長さ範囲６ｍ～24ｍ

③ 切断機同士の干渉防止のための間隔

④ 検査床幅による取込み可能製品の長さの制約

人間の判断・経験による制約

⑤ CS1は必ず使用し，SG～CS2，SG～CS3での切断は行わない．

⑥ 複数の長さを同時に切断する場合，検査床に近いCSで切断する製品を長さの長いものにする．

⑦ 同一長さの製品を複数の検査床へ取り込む場合，同一長さの製品は隣接する検査床へ取り込む．

これらの制約条件のもとで切断・製品搬送時間を最小とする切断パターン，製品搬送先の割当てを求める．

(b) 結　果

従来のスケジューリング処理は，設備上の制約条件，人間の判断・経験による制約条件などの条件をリストアップし，この条件のもとで場合分けを行い，各場合ごとに処理を決定する方式であった．

従来手法と本手法とのシミュレーションによる比較の結果を図９に示す．操業上の処理時間は約３％削減された．本シミュレーションでは，切断指示は各テストケースで同一として行ったが，実際の操業では切断指示は頻繁に変わるため，さらなる効率アップが期待できる．また，本手法では制約を記述するルール，評価関数の記述のみで対応できるため，ソフトウェアのコンパクト化をはかれ，リアルタイムで処理できるとともに開発期間の大幅な削減，保守が容易になるという利点を持っている．

参考文献

[1] Ozaki, Igakura, and Miki : Simulation Studies of Physical Distribution systems for Airports, *Postprint of IFAC - Workshop on MIM* '97 (to be published).

[2] 宮本，黒崎，尾崎ほか：物流搬送システムにおける干渉を伴う組合せ離散最適化問題の近似解法；計測自動制御学会論文集，Vol. 31, No. 5 (1995).

[3] Miyamoto, Hayashi, Ihara, Takase, et.al. : Application of a Constraint - Oriented Knowledge Processing System to a Section Mill Finishing Facility Line Scheduling System, *the 35th SICE Annual Conference.*

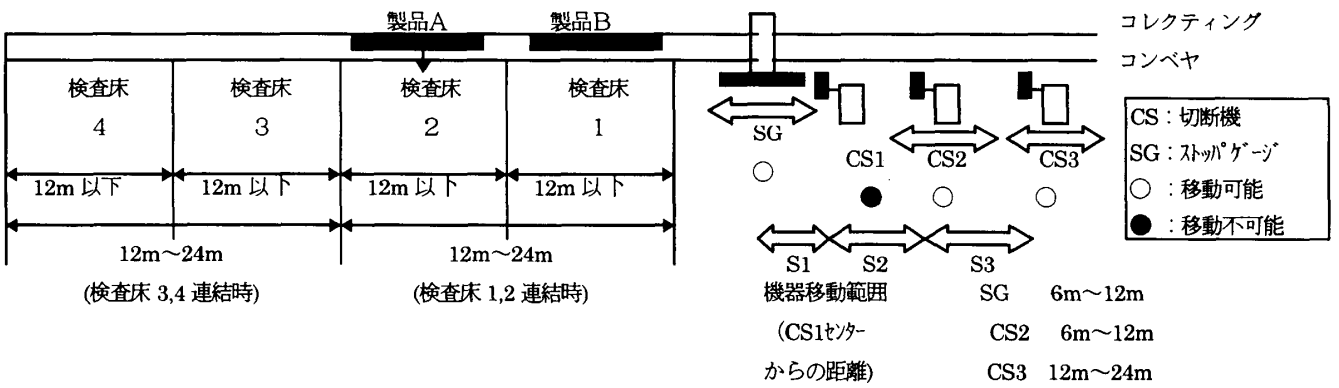

図８　切断機，検査床の構成

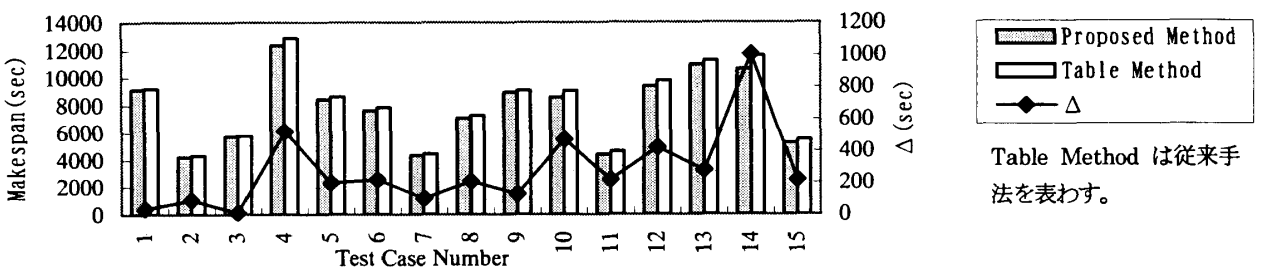

図９　従来手法との比較（シミュレーション結果）

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．