

出荷作業計画最適化アルゴリズムの開発

New Scheduling Algorithm for Shipping Operation in Steel Works

富山 伸司 TOMIYAMA Shinji JFE スチール スチール研究所 サイバーフィジカルシステム研究開発部 主任研究員 (副部長)

要旨

製鉄所内では、天井クレーン、専用運搬車両、フォークリフト、岸壁クレーン等多種の設備を用いて、大重量の製品荷役を行っている。これらの荷役設備は連携して使用されるため、各設備がお互いの作業に影響を与え合う複雑な操業となっており、作業スケジュールの作成が難しくなっている。本開発で著者らは、これら複数設備が実行する薄板製品出荷作業のスケジューリングアルゴリズムを新たに構築した。本アルゴリズムは、短時間での高効率なスケジュール生成を目指して、2段階のステップで処理する構成となっている。1つ目のステップは、スケジューリング対象時間を複数の時間帯に分割して各時間帯での設備負荷が平準化する粗いスケジュールを生成し、2つ目のステップは、作業ひとつひとつの実行可能な詳細スケジュールを立案する。提案アルゴリズムを計算機上で実績データに適用したところ、その結果から実操業より大幅に出荷効率が向上することが確認された。

Abstract:

In steel works, products are carried by various kinds of machines, for example, overhead cranes, vehicles, forklifts and quay cranes. The operations of these machines affect each other and the situation makes the scheduling quite complicated. We have developed a new scheduling algorithm for shipping operations. The proposed algorithm is composed of two main steps to obtain efficient schedules and achieve short computation time. In the first step, shipping jobs are assigned to time windows which are created by dividing the scheduling horizon, and then the workload of machines is leveled. In the next step, the order and operating time of jobs are determined and a feasible schedule is developed. The scheduling algorithm was applied to practical data and compared with real operations. The result shows the high performance of the new algorithm.

1. はじめに

鉄鋼業では扱う製品重量が大きいため、製鉄所内の荷役作業においては重量物専用の装置や運搬車両が用いられる。これらの専用設備は重量物を扱うため特殊な構造になっているため、汎用的な物流最適化問題の解法を鉄鋼業の物流現場に適用することは困難である。

製鉄所の製品出荷作業は、倉庫クレーン、フォークリフト、船積クレーン、バース、運搬船といった様々な設備を使って実行される。製品出荷作業の効率を向上させるため、現在までに多くのスケジューリングアルゴリズムが開発されている。まずバース計画に関しては今井ら^{1,2)}や Buhkralら³⁾によって最適化アルゴリズムが提案され、倉庫については Rouwenhorst ら⁴⁾の文献に多くの操業計画や制御技術が紹介されており、特に鉄鋼コイルを扱った倉庫については Xie ら⁵⁾によるクレーンスケジュール技術が開発されている。しかし、これらの技術はいずれも出荷設備のうち一部を対象としたものであり、出荷設備全体の効率を向上させるためには、個々の技術だけでは不十分であると考えられる。

本稿では、製鉄所内の物流設備全体に対してスケジュールを生成するアルゴリズムを提案し、スケジュール結果と実績を比較した結果を示す。

2. 製鉄所における出荷作業

出荷作業の形態は、製造プロセスや工場レイアウトによって様々である^{6,7)}が、本章では製鉄所における出荷作業の一般的な例について紹介する(図1)。製鉄所では大重量の製品を荷役するために、倉庫クレーン、フォークリフト、船積クレーン、運搬車両が使用される。工場で梱包が完了した製品は、複数個まとめてパレットに積載されて専用運搬車両で倉庫まで運搬される。製品倉庫には天井クレーンが設置されており、これによってパレット上の製品は倉庫内に搬入される。出荷が近づいた製品は倉庫内から仮置場に搬出され、その後で船積みするために岸壁までフォークリフトで運ばれる。製品を保管する倉庫と出荷する岸壁が遠い場合は運搬作業に専用運搬車両が用いられる。岸壁に搬送された製品は船積クレーンにより船内に積み込まれる。

各製品が工場から船へと運搬される際には様々な設備が用いられ、同種の荷役設備によって並行して作業が行われ

2022 年 9 月 12 日受付

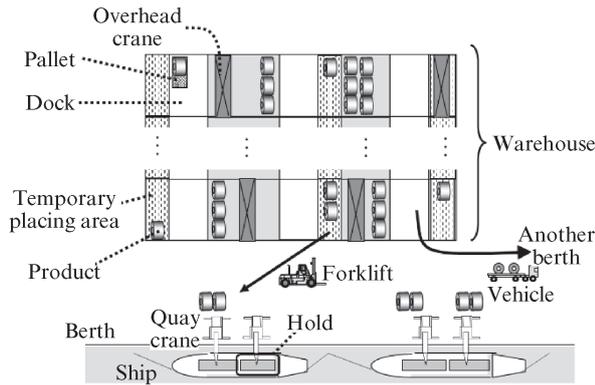


図1 出荷設備概要

Fig. 1 Outline of shipping operation in steel works

る。作業負荷が一部の設備に集中してその設備の能力を一時的に超えてしまった場合、作業遅れが発生する。

本研究は、作業負荷の偏りを低減して作業遅れの発生を抑制する作業スケジュールを開発することが目的である。なお、出荷作業全体の効率を評価する最重要指標は船積クレーンの待ち時間とする。

本開発で対象とする倉庫は1棟で複数のクレーンを装備するため、作業スケジュールは1棟にある複数クレーンに作業を分散させ、多くの制約条件の下でクレーン毎の負荷を平準化したものでなければならない。このような設備特性もスケジューリングを難しくする要素の一つである。

3. 出荷作業スケジューリングモデル

計算機でスケジューリングを行うには、出荷設備および作業をモデル化して計算機で取り扱えるようにする必要がある。本章では、そのスケジューリングモデルの構成について説明する。提案するスケジューリングモデルでは下記をジョブとし、これらジョブの処理順および処理時刻について制約条件を満たした上で、船積クレーン待ち時間を最小化するように出荷スケジュールを決定する。

- [J1] 倉庫クレーン作業
- [J2] 船積クレーン作業
- [J3] パレット間口占有
- [J4] フォークリフト搬送作業

[J1], [J2] はクレーンによる荷役作業、[J3] はパレットが倉庫の搬入出間口を占有する時間帯、[J4] はフォークリフトによる仮置場から岸壁への運搬作業である。これら作業のスケジュールは複数の制約条件を満たす必要がある。代表的な制約条件を下に示す。

- (C1) パレット積下し時刻とパレット間口占有時間の制約

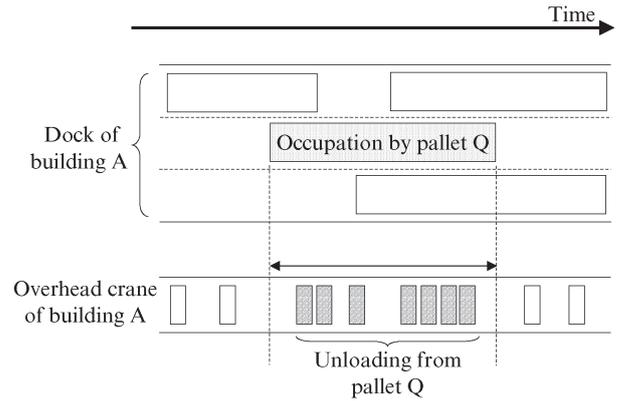


図2 間口占有とクレーン作業の制約条件

Fig. 2 Constraint on pallet and crane

- (C2) 出荷製品毎の荷役作業先行制約
- (C3) 間口配置可能パレット数制約
- (C4) 倉庫、仮置場、岸壁の配置製品数制約

(C3), (C4) はそれぞれ置場におけるパレット枚数および製品数の容量に関する制約である。また (C1) は、ジョブ [J1] と [J3] の先行後続関係に関する制約で、例えば [J3] で間口に置かれたパレット上の製品の入庫（下し）作業については、下記制約を満たす必要がある（図2）。出庫の場合も同様の制約条件を満たすことが要求される。

- ・ [J3] 開始時刻 < 製品入庫作業 [J1] の最早開始時刻
- ・ [J3] 終了時刻 > 製品入庫作業 [J1] の最遅終了時刻

次に、制約 (C2) の例を示す。ある出荷製品 A について製品倉庫への搬入、岸壁への搬出、船積み作業を行う場合、製品 A に関して各設備が実行するジョブは、下記に示す通り複数個必要となる。

- ・ 倉庫への搬入 ([J1])
- ・ 倉庫から仮置場への搬出 ([J1])
- ・ 仮置場から岸壁への運搬 ([J4])
- ・ 船積み ([J2])

上記ジョブは上から順に実行されるため、先行順序関係を守って割り付ける必要がある。図3に、上記ジョブリストのうち2~4番目のジョブについて作成したスケジュールの例を示す。作成するスケジュールはこれらの制約をすべて満たしたものである必要がある。

4. スケジューリングアルゴリズムと計算結果

出荷作業は生産変更や悪天候による船積中断等、各種外乱の影響を受けやすいため、そのスケジュールは変化した

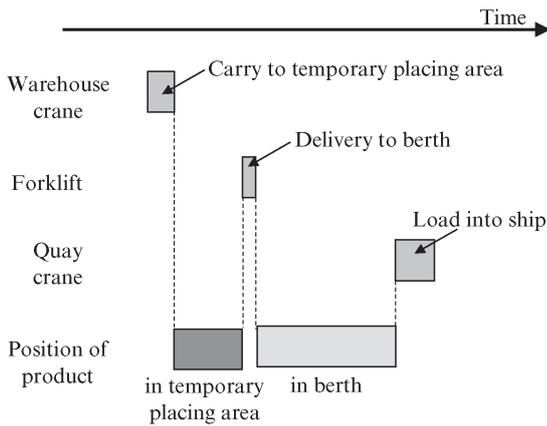


図3 製品の各種作業の先行関係

Fig. 3 Relation between jobs of one product

操業状況・条件に対応して何度も変更する必要がある。本研究では、頻繁なスケジュール変更ができるように、高速でスケジュールを生成できるアルゴリズムを構築した。以下、スケジューリングアルゴリズムの詳細について説明する。

本スケジューリングの際に事前に与えられる代表的な情報は下記になる。

- (I1) 車両搬入出製品情報
- (I2) バース計画情報
- (I3) 出荷製品情報
- (I4) 現在在庫情報

(I1) は、工場と倉庫の間もしくは倉庫間の車両運搬作業情報であり、車両到着時刻や運搬製品情報等が含まれる。バース計画 (I2) は船積関連情報であり、運搬船の荷役時間帯、使用船積クレーン等の情報で構成され、船積製品の個々の情報は (I3) に属する。すなわち (I1) は出荷設備の上流側、(I2)、(I3) は出荷設備の下流側の情報に相当する。(I4) は現在時点で出荷設備内に保管される製品の在庫情報である。これらの情報に基づいてスケジュール対象となるジョブや制約条件の情報が生成される。

図4に提案アルゴリズムの処理フロー概要を示す。アルゴリズムは2段階のステップで構成され、最初のステップでは負荷平準化を目的としてスケジュールを大まかに作成し、2つめのステップでより詳細にスケジュールを決定する。

STEP1では、スケジュール対象期間を複数の時間帯に分割し、各時間帯で設備の負荷が平準化するように割り当てる。ただし各作業が実行される時刻についてはまだ決定されず、それらの作業を実行する時間帯のみが決められる。具体的には、待ちが発生しない理想的な船積スケジュールを最初に作成した後、船積スケジュールに遅れないように、倉庫クレーンやフォークリフトの作業実行時間帯を決定するように処理が行われる。

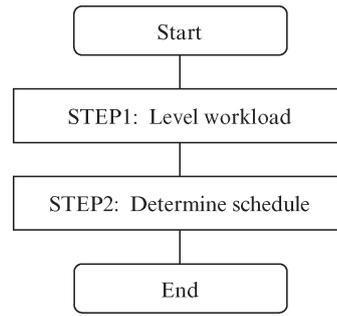


図4 提案アルゴリズム処理フロー
Fig. 4 Two main steps of proposed algorithm

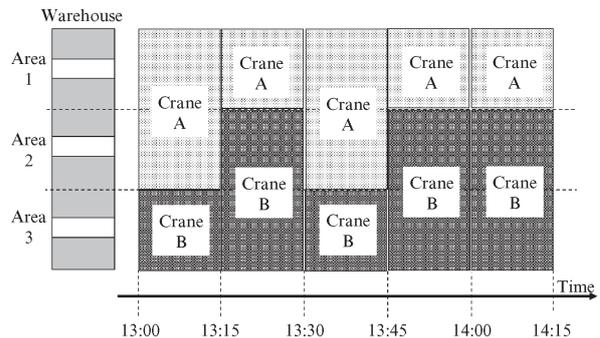


図5 倉庫クレーンのエリア割付例

Fig. 5 Assignment of two cranes to areas

なお、本開発で対象とする倉庫には、1つの棟に複数のクレーンが設置されている場合がある。同じ棟の複数クレーンが衝突しないように荷役作業を行うため、提案アルゴリズムは下記ルールでクレーンの作業スケジュールを生成する。

- ・倉庫内をエリア分割し、クレーン担当エリアを限定する
- ・クレーンの担当エリアは、設定時間帯毎に更新される

図5は1棟に天井クレーン2基が備え付けられた倉庫で、15分毎に2基のクレーンA、Bが担当する3つのエリアの割当てが更新される例を示している。作業エリアを限定することによって衝突を回避でき、担当エリアを更新することで作業負荷変化への対応が可能になる。

STEP2では、STEP1で各時間帯に割り付けられた作業について具体的な作業順、時刻を決定することにより、前章で示した制約条件を満たすスケジュールを生成する。このステップの処理は早い時間帯から順に、制約の厳しい作業を優先して処理する。本アルゴリズムでは、STEP1で各ジョブの実行時間範囲を限定して、アルゴリズムが調べる組み合わせの数を減らすことにより、計算時間を短くできる。

提案アルゴリズムを操業の実データに適用し、数値計算により船積クレーン待ち時間の短縮効果について検証した。スケジューリング対象とした設備は、天井クレーン5基を装備した3棟の倉庫、船積クレーン6基で構成され、スケ

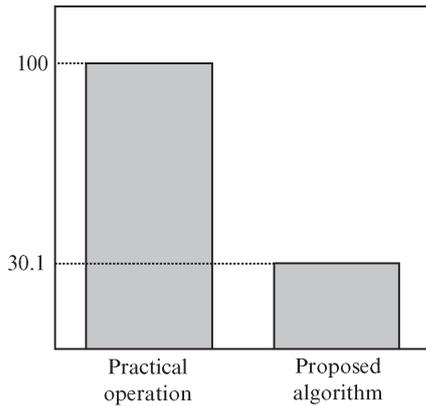


図6 船積クレーン待ち時間計算結果

Fig. 6 Waiting time of quay cranes

ジューリング対象時間帯は40時間とした。

図6は、倉庫からの荷搬出遅れにより発生した船積クレーン待ち時間合計値を示したものである。なお、待ち時間は実績値と提案アルゴリズムのスケジューリング結果から得られる値の2種類を表示した。このグラフより、提案アルゴリズムによって船積クレーン待ち時間が約70%削減されたことが分かる。また本アルゴリズム開発では、外乱に対応して何度もスケジュール計算を行うことを想定し、スケジュールを短時間で生成できることを目標としていた。標準的なオフィス向けPCにより40時間分の実績データを使ったスケジュール作成処理を実行したところ、全処理が1分以内に完了した。この処理時間は、短期間に操業状況が変化しても再スケジューリングすることにより十分変化へ対応できることを示している。

本技術により船積クレーンの待ち時間が低減され、運搬船の待機時間が短縮されることによる物流サイクルタイム短縮および出荷能力向上が期待できる。また、船積作業にかかる時間が事前に正確に予測できるため、出荷後の製品輸送における物流効率向上にもつながる可能性がある。今後は、本アルゴリズムの実機化に向けてシステム仕様等の検討を進めていく予定である。

5. おわりに

本稿の内容について以下にまとめる。

- 出荷作業全体を最適化するスケジューリングアルゴリズムを開発した
- アルゴリズムは2段階の処理ステップで構成され、出荷作業モデルの制約条件を満たすスケジュールを生成する
- 最適化アルゴリズムを用いた数値計算により、船積クレーン待ち時間が約70%削減されることを確認した
- 40時間の出荷作業スケジュール生成に必要な計算時間は1分未満である

本稿は、国際会議予稿⁸⁾を転載、要約して作成されたものであり、元文献の著作権はIFAC (International Federation of Automatic Control) に帰属する。元文献は以下URLよりアクセス可能である。

<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.11.067>

参考文献

- 1) Imai, A.; Nishimura, E.; Papadimitriou, S. The dynamic berth allocation problem for a container port. *Transportation Research Part B*. 2001, vol. 35, p. 401-417.
- 2) Imai, A.; Chen, H.; C., Nishimura, E.; Papadimitriou, S. The simultaneous berth and quay crane allocation problem. *Transportation Research Part E*. 2008, vol. 44, p. 900-920.
- 3) Buhkal, K.; Zuglian, S.; Ropke, S.; Larsen, J.; Lusby, R. Models for the discrete berth allocation problem: A computational comparison. *Transportation Research Part E*. 2011, vol. 47, p. 461-473.
- 4) Rouwenhorst, B.; Reuter, B.; Stockrahm, V.; Houtum, G. J.; Mantel, R. J.; Zijm, W. H. M. Models for the discrete berth allocation problem: A computational comparison. *European Journal of Operational Research*. 2000, vol. 122, issue 3, p. 515-533.
- 5) Xie, X.; Zheng, Y.; Li, Y. Multi-crane scheduling in steel coil warehouse. *Expert Systems with Applications*. 2014, vol. 41, p. 2874-2885.
- 6) Ackerman, K. B. *Practical Handbook of Warehousing*. Springer-Verlag, 1997, 572p.
- 7) Alderton, P. M. *Port Management and Operations*. Informa, 2008, 205p.
- 8) Tomiyama, S.; Takahara, T.; Matsunaga, T. New scheduling algorithm for shipping operation in steel works. *Proceedings of the 16th IFAC workshop on control applications of optimization*. 2015, vol. 28, issue 25, p. 103-107.