

生産計画・物流計画への最適化およびシミュレーション技術の応用

Applications of Optimization and Simulation Technologies to Scheduling Systems in Steel Manufacturing and Logistics

山口 収 YAMAGUCHI Osamu JFE スチール スチール研究所 計測制御研究部 主任研究員 (課長)
吉成 有介 YOSHINARI Yusuke JFE スチール スチール研究所 計測制御研究部 主任研究員 (課長)
富山 伸司 TOMIYAMA Shinji JFE スチール スチール研究所 計測制御研究部 主任研究員 (課長)

要旨

近年、計算機能力の飛躍的向上にともない、生産計画・物流計画の策定において最適化・シミュレーション技術の適用が広がっている。本稿では、これらの技術の適用により、短時間でより良い計画を策定した事例 3 件を紹介する。1 例目は、薄板製品の素材設計・製造を扱う生産管理システムに適用した素材設計シミュレータと対話型スケジューラであり、運用・システム開発の方向性を示唆する重要な役割を果たした。2 例目は、複数物流拠点を一元管理した構外薄板配車計画に関する課題に対し、最適化アルゴリズムの適用により、4.9%の配送効率向上および、3.2%の CO₂ 削減を達成した。3 例目は、荷役と運搬作業を複数アルゴリズムで同時に解く構内荷役運搬計画システムにより、非運搬時間 40%短縮を実現した。

Abstract:

Recently, optimization and simulation technologies are commonly applied in scheduling of manufacturing and logistics planning with a contribution of significantly advanced computers. In this paper, three applications for actual scheduling problems are presented. The first application clearly shows directions of the development in slab design and scheduler design issues, the second one accomplishes delivery efficiency improvement of 4.9% and 3.2% reduction of CO₂ emission, and the last one increases efficiency of the transportation by decreasing no-transportation time 40%.

1. はじめに

近年、鉄鋼製品は、お客様ニーズに合わせ高級化、多品種化し、その製造工程はより複雑化してきている。また、納期短縮のニーズも高くなっているため、生産計画・物流計画の策定は、従来にもまして困難になっている。これは、鉄鋼の生産が、受注生産をベースとしているため、納期、リードタイム、直行率などを評価しながら、注文をプロセスごとにロット集約し、その処理順を決定する必要があるからである。また、これらの評価項目は、トレードオフの関係にあり、操業環境に合わせてその重要性が随時変化することも、問題の複雑さを増大させる要因である。

一方、昨今の計算機能力の飛躍的向上にともない、生産計画・物流計画策定において最適化技術の適用が広く試みられてきている¹⁾。とくに、日々の計画は、月次計画や期計画の能力や負荷の検証を目的とした計画とは異なり、操業を実行管制する基盤となるもので操業実績に合わせたの修

正や再計画も多いため、短時間で、精度の高い計画を生成することが必要である。また、シミュレーションにより、短時間で開発・運用の方向性を決定することも非常に重要である。

本稿では、生産・物流計画において、実課題に応用した最適化・シミュレーション技術の事例を 3 件報告する。

2. 薄板生産管理システムへの適用

西日本製鉄所福山地区における薄板系生産管理再構築プロジェクトにより、

- (1) プロセス間同期比率向上
 - (2) プロセス間リードタイムの半減
- を実現した²⁾。本プロジェクトにおいて、シミュレーション・最適化技術を適用しプロトタイプ開発から実運用・実機システム化に至った 2 例を以下に説明する。

2.1 素材設計シミュレータ

鉄鋼業における素材設計とは、お客様からの注文に対し

て、最終製品の要求する機械的、およびその他の特性を満足できるようにスラブという母材を設計することをいう。素材設計には大きく分けて、鋼の特性を決定付ける成分（C, Mn, Si, Al, P, S など）と、生産能率、直行率を決定付けるスラブサイズがある。本シミュレータにおいては、成分決定の後の、スラブサイズ設計を検証対象としている。

スラブサイズは、下記に示すように、いくつかの目的と方法に基づいて決定される。(1) や (3) の直接効果として示している製鉄所内での生産能率やハンドリング効率向上は、ピーク生産能力を増大させることにより、リードタイムの短縮に寄与し、お客様への迅速なデリバリーを実現する。

- (1) スラブサイズ最大化 ⇒ 製鋼・熱間圧延能率向上
- (2) 製品サイズ最大化 ⇒ お客様満足度向上
- (3) コイルサイズ最大化 ⇒ ハンドリング性向上

環境変化が著しい昨今、多様な設計方針から最良のものを導き出す必要があり、素材設計シミュレータの構築と戦略検討を行った。開発したシミュレータでは、過去の受注情報を複数の戦略で素材設計し、さらに最小設計サイズに満たない端数スラブを他の品種と組み合わせた結果のスラブの直行率を比較することにより、戦略の良否を判定できる。

図1に、可能性のあるすべての分割パターンを示す。HOT（熱間圧延）コイル以降、TCM（タンデム冷間圧延）後コイル分割、CAL（連続焼鈍）コイル分割、CGL（溶融亜鉛めっき）後コイル分割などの可能性がある。分割前提で組み合わせる際には、異なる製品厚・製品幅、異なる鍍金厚など可能性のあるパターンをすべて網羅したシミュレーションが可能である。

表1にシミュレーション結果を示す。冷間圧延材(COLD)の異属性組み合わせによる歩留まり向上効果が最も顕著であり、積極的に進めていくべきであることが分かった。

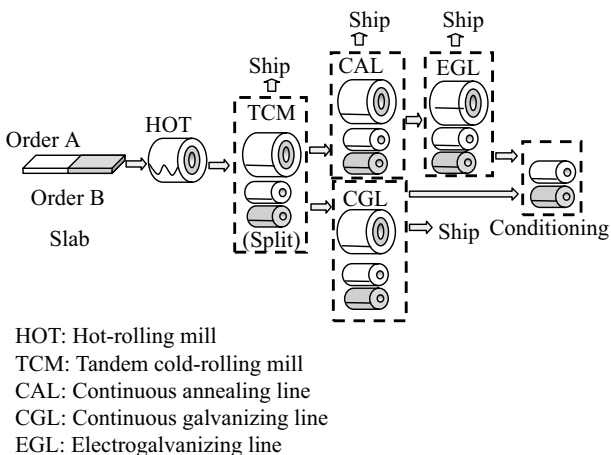


図1 分割パターンとしてありうるケース
Fig. 1 Possible split cases in the steel sheet

表1 各種素材設計結果比較表

Table 1 Results of the slab design simulation

Category of product	Combination in the same specification	Improvement of yield rate (%)					
		Combination in the different specification			Process (Split)		
		Thick-ness	Width	Thick-ness of Plating	TCM	CGL	CAL
Hot dip galvanized product	1.99	0.00	0.29	0.10	0.00	0.00	0.00
Electro-galvanized product	0.56	0.78	0.45	0.34	0.06	0.00	0.03
Cold rolled product	0.48	1.09	0.76	0.00	0.11	0.00	2.02

TCM: Tandem cold-rolling mill
CGL: Continuous galvanizing line
CAL: Continuous annealing line

2.2 対話型スケジューラプロトタイプ

プロセス間の同期化推進、属人性排除による計画の品質向上のため、対話型で誰でも短時間でスケジューリング可能なシステムが必要とされている。環境変化に対応するためには人間の判断力とコンピュータの高速性をうまく活用する必要があり、本プロジェクトにおいては、視認性・操作性の良い対話型スケジューラを構築することとした。

アルゴリズムの骨組みは、図2に示すような「制約条件緩和による仮順序決め+対象限定による深さ優先探索」というシンプルな構成とし、自動による過度な探索を排除した。

図3にスケジューラのプロトタイプを示す。左半分は、実コイル情報と操作ボタン、右半分は各種制約に関連する諸元のコイル単位の推移グラフとなっている。グラフ中のスパイクが制約違反箇所を示している。制約違反の箇所を含む再スケジュールすべきコイル群の選択と、制約違反解消ボタンの押下を繰り返すことで、全体の制約違反を解消し、装入指示可能なスケジュールを作成することができる。

スケジューラプロトタイプとオペレータによる計画案との比較結果は下記のとおりである。

- (1) 制約違反・最適化指標に関してはオペレータと同等

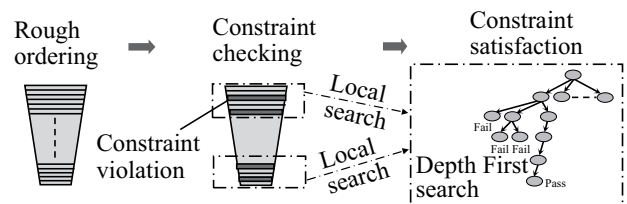


図2 対話型スケジューラ探索アルゴリズム
Fig. 2 Algorithm for the interactive scheduler

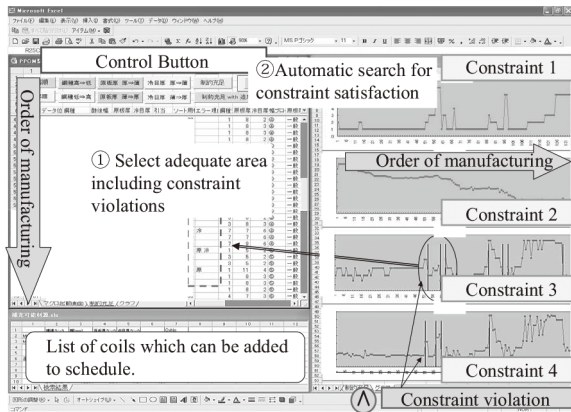


図3 対話型スケジューラ画面

Fig. 3 Interface of the interactive scheduler

(2) 総作業時間については10倍以上の大幅高速化
視認性の良さ、スケジュール立案のしやすさから、本スケジューラは、酸洗-TCMライン、CALのプロセスのスケジューリングシステムとして実機化された。

3. 東日本製鉄所薄板一元配車システム

東日本製鉄所の物流3拠点（千葉地区，京浜地区，東京物流センター）より出荷される薄板製品の配車計画を一括して作成し，配送ルートを最適化する薄板一元配車システムを開発した。以下，本システムへの最適化手法の適用事例について説明する。

3.1 薄板配車計画の一元化による改善

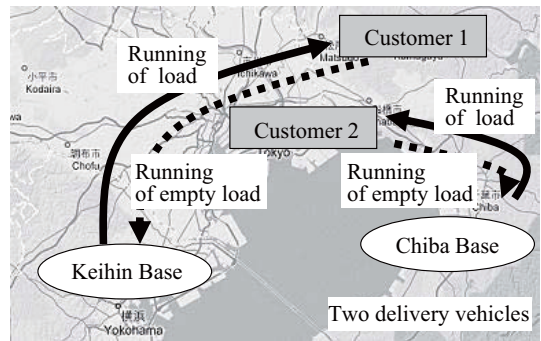
東日本製鉄所は首都圏に隣接しており，物流拠点から約300 km 圏内に配送先であるお客様が集中している。このため薄板製品の配送にはセミトレーラ，トラックによる陸上輸送が中心である。東日本製鉄所では日々約10 000 tの製品を約300 台の配送車両によって，約100ヶ所のお客様に薄板製品を配送している。

従来は図4 (a) に示すように，物流3拠点個別に配送車両の管理，製品配送の配車計画を行っていたため，実車と空車の重複が発生し，配送効率が悪いという課題があった。

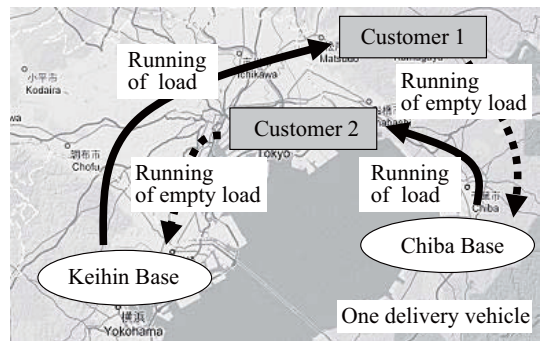
以上の課題に対して，物流3拠点の出荷材源，配送車両の情報を一元管理し，製品配送の配車計画を一括して作成することで，図4 (b) に示すように帰り便に積み荷を割り当て，空車走行を削減し，配送の効率化を図る。

3.2 一元配車エンジン

一元配車エンジンは薄板一元配車システムにおいて中核を成す技術であり，最適化手法を適用したアルゴリズムにより，最大効率となる配車計画を作成する。一元配車エンジンの開発は京浜地区で薄板配車計画作成^{3,4)}に利用されていたアルゴリズムをベースに行い，より大規模な配車計画



(a) Previous operation



(b) After improvement

図4 薄板配送一元化による配送ルートの改善

Fig. 4 Improvement of delivery pattern

問題を高速に解くことができるよう拡張した。

3.2.1 最適化アルゴリズムの概要

一元配車エンジンのアルゴリズムの概要を図5に示す。基本となる最適化手法にはメタヒューリスティック法の1つである反復局所探索法⁵⁾を適用した。

最適化アルゴリズムは以下の手順で実行される。

- (1) ランダム要素を加味した適当な初期解を N 個作成する。
- (2) N 個の初期解に対して，それぞれに探索処理を繰り返す，評価関数（車両台数，走行距離，作業時間時間）

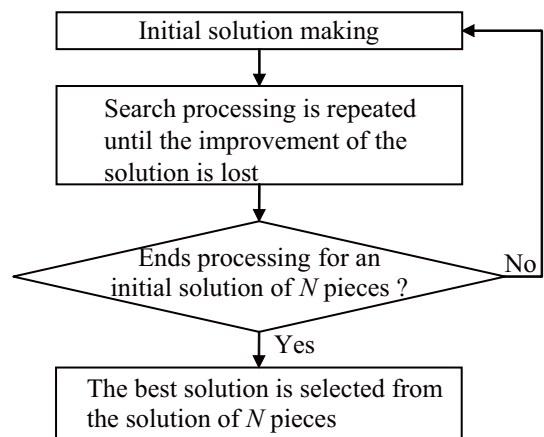


図5 最適化アルゴリズム

Fig. 5 Proposed algorithm for vehicle routing schedule of coil products

が最小となるよう、解を改善する。以上の探索処理は解の改善がなくなるまで繰り返す。

(3) 探索の結果得られる N 個の最善解の中で最も評価関数の良いものを最終的に最適解として出力する。

一元配車エンジンでは以上のアルゴリズムに対して、探索効率、計算速度の向上を図るため、異なる単位での探索を戦略的に行うことによる探索処理の効率化、 N 個の初期解に対する探索処理を複数の CPU (central processing unit) に対して独立に計算させるなどの工夫を施した。

3.2.2 探索処理の効率化

一元配車エンジンへ施した、異なる単位での探索を戦略的に行うことによる探索処理の効率化に関して説明する。

一般的な配車計画問題である宅配便、コンビニエンス・ストアへの商品配送計画などでは、配送用車両に対して、荷物の重量・サイズが非常に小さいため、効率的な配送ルートを選択を行うことが、配送ロットを作成することとほぼ等しくなる。一方、本システムで扱う薄板製品は配送車両に対して、積み荷の重量・サイズがともに大きく、かつその幅(コイル重量 0.5 から 20 t 前後)も広いため、配送ロットの作成を考慮に入れる必要がある。一元配車エンジンの探索処理を **図 6** に示す。車両間の積み荷入れ替えの試行による配送ロット作成、お客様の納入指定時刻制約下での配送ルートを選択という二つの処理を交互に繰り返しながら解の改善を行う仕組みとなっている。

また、3ヶ所の物流拠点の出荷材源、配送用車両を一括して扱う、1回転目以降配送の積み荷を積み込む物流拠点の選択肢が3倍以上になるなど、拡大した探索空間を効率的に探索する必要がある。

以上の課題に対して、異なる単位での探索を **図 7** に示すように戦略的に行うことで、探索効率の向上を図った。

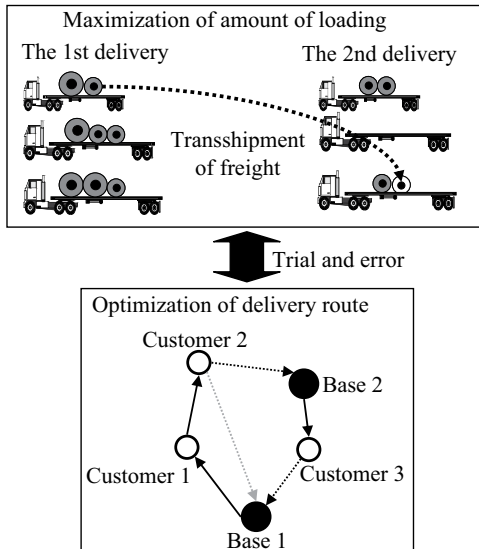


図 6 探索処理概要

Fig. 6 Search processing of proposed algorithm

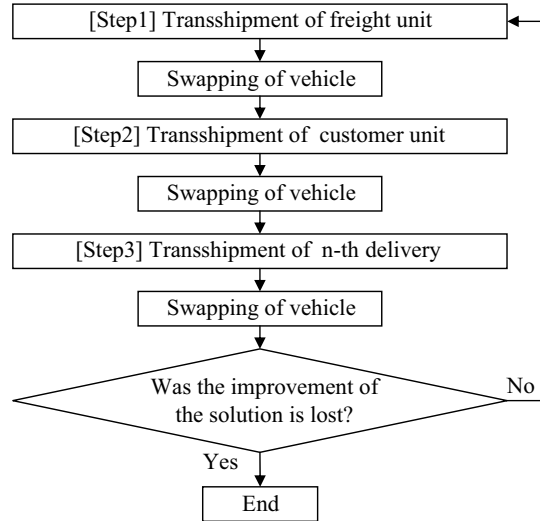


図 7 異なる単位による戦略的探索アルゴリズム

Fig. 7 Algorithm that changes unit of search

Step 1 から Step 3 までの異なる単位での実行し、各 Step 間に配送車両の入れ替えを行うことで、探索範囲を広げ局所最適解に陥らないようにしている。以下、それぞれの Step に関して効果を説明する。

Step 1: 積み荷単位での探索

最も基本的な単位での探索で、積み荷を同一お客様に集約する効果が見込める。また、積み荷という最小単位での探索を行うことで、車両の積載重量の細かな調整を行う効果も見込める。

Step 2: お客様単位での探索

配送用車両に積まれた積み荷を同一お客様単位に集約して探索を行う。Step 1 での積み荷単位での入れ替えより大きな単位での、同一お客様への集約効果が見込める。

Step 3: 配送回数単位での探索

配送車両の配送回数単位での探索を行う。これにより、他の物流拠点からの積み荷を配車しやすくなり、空車走行の削減効果が見込める。

3.3 一元配車シミュレーション

従来の個別配車と配車一元化による効果を検証するため、実データによる比較シミュレーションを行った結果を **図 8**

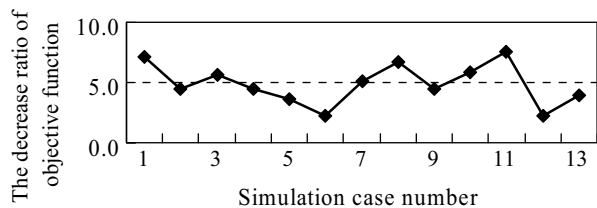


図 8 シミュレーション結果

Fig. 8 Simulation result

に示す。従来の個別配車と比較して平均 4.9%の配送効率向上が可能であることを検証した。計算時間も 1 計画の作成が最長 5 分以内と実用上十分な性能であることが確認できた。また、配送パターンの最適化が図れたことにより、配送車両の走行距離も削減され 3.2%の CO₂ 削減も可能である。

以上のシミュレーション結果に基づき、日々の配車計画作成業務に十分堪え得るものと評価され、2009 年度より配車計画作成業務への適用を開始した。

4. 製鉄所内運搬計画アルゴリズムの開発

4.1 所内運搬作業の特徴

製鉄所内では、複数の重量物を一度に運搬できる特殊車両を用いて、工場、倉庫、バース間の製品および半製品の運搬作業を行っている。図 9 は運搬車両経路の例を示した概略図である。運搬車両の経路が多数あることにより、運搬作業および計画業務が複雑化している。製鉄所内で使用される運搬車両を図 10 に示す。荷物積載部（パレット）と牽引部が分離可能な構造となっており、パレットに製品を積み下ろししている間に牽引部は他のパレットの運搬作業を行うことがで

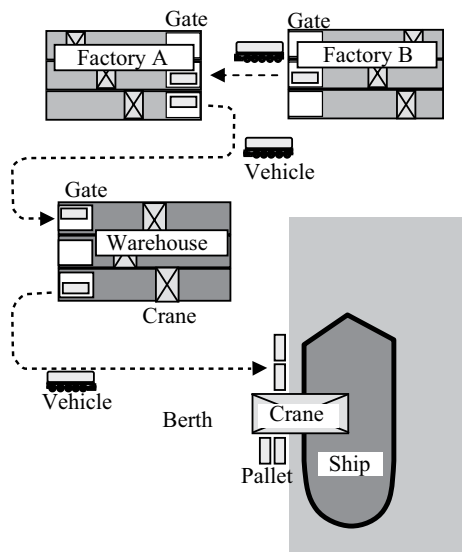


図 9 製鉄所内の車両運搬経路概略図

Fig. 9 Delivery routes in steel works

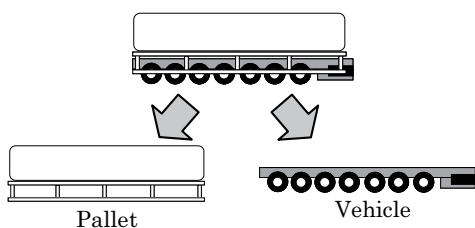


図 10 運搬車両の構造

Fig. 10 Structure of vehicle for delivery

きる。この構造により、少数の牽引部で多くの運搬作業を処理することが可能になる。

図 10 の運搬車両で一度に運搬できる製品・半製品数は所外運搬のトラックの数倍～10 倍程度であるため、1 パレット分の荷役作業時間は長い。逆に車両の移動範囲が製鉄所内に限られているため、車両走行時間は短い。所外運搬では車両走行時間が荷役時間に比べて長いいため、車両走行時間を中心に考えて最適計画を作成するアプローチが取られる。これに対し、所内運搬の場合には、車両走行時間と荷役時間の両方を考慮して作業計画を立てることが必要である。

考慮すべき操業上の制約としては、1 パレットに積載可能な重量の制約および荷役を行うエリアに置けるパレット枚数の制限等がある。

4.2 計画アルゴリズム

製鉄所内の運搬作業効率化のため開発した計画アルゴリズムの構成を図 11 に示す。事前に搬送元および搬送先が同じ製品・半製品をパレット単位にまとめた情報を作成し、これを入力とする。計画アルゴリズムはパレット単位での運搬作業を計画する。

提案するアルゴリズムは、3つのステップで構成される。まず、STEP 1 の処理について説明する。図 12 は 1 パレット分の製品・半製品を運搬するために必要な作業を示した図である。これらの作業には先行後続関係があり、各作業を行うために、運搬車、クレーン、パレット置場などの設備が必要である。STEP 1 では、これらの設備を資源として扱うことにより、運搬作業計画問題を資源制約付きプロジェクトスケジューリング問題 (RCPSP: resource constrained project scheduling problem) に帰着させて、全作業完了時刻が最早になるような各作業の開始・終了時刻を計算する。ただし、このステップでは運搬作業をどの車両に割り付けるかは決定せず、「同時に実行する運搬作業数が稼働可能車両台数を超えない」という緩和された制約条件を満たすように運搬作業時刻を決定する。上記 RCPSP の最適化計算には

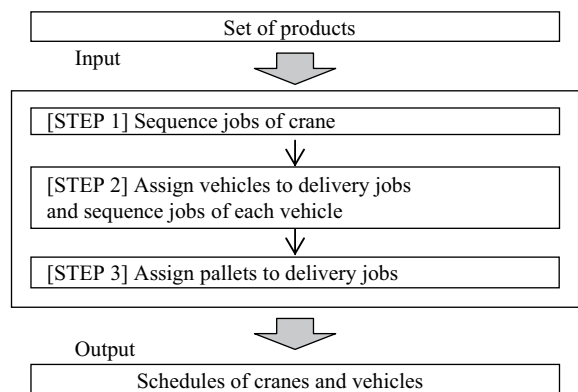


図 11 アルゴリズムのフローチャート

Fig. 11 Flow chart of proposed algorithm

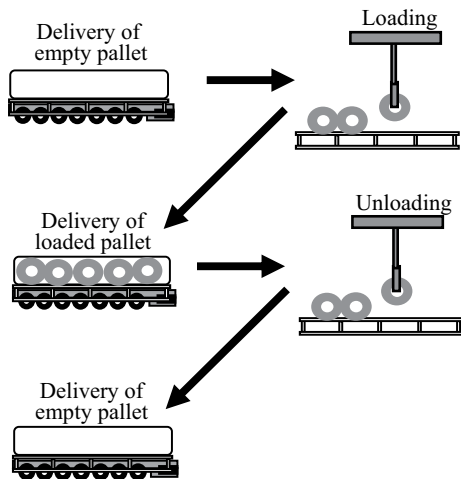


図 12 1パレット分の運搬作業構成

Fig. 12 Sequence of jobs to deliver a pallet of products

京都大学で開発されたソルバ⁶⁾を使用した。

次に、STEP 2では、運搬作業の車両への割付けおよび各車両での作業順の決定を行う。STEP 1で計算した運搬作業の開始・終了時刻は計画が実行可能になるように適宜変更する。このステップでは、配送計画問題（VRP：vehicle routing problem）を解くことによって割当車両および作業順を決定するが、問題の形式が一般のVRPとは異なるため、問題をVRPの形式に合わせるための事前処理を行っている。VRPの最適化計算には京都大学開発のソルバ⁷⁾を使用した。

最後に、STEP 3では、各運搬作業、荷役作業で使用するパレットの決定を行う。このステップでは、ルールに基づいたアルゴリズムを用いて運搬車の走行距離を短くするパレットを選択する。

4.3 数値計算結果

本アルゴリズムを24時間の運搬計画作成に適用した結果について以下に説明する。図13は、車両の待ち時間および車両がパレットを積載せずに走行している時間の合計値を、

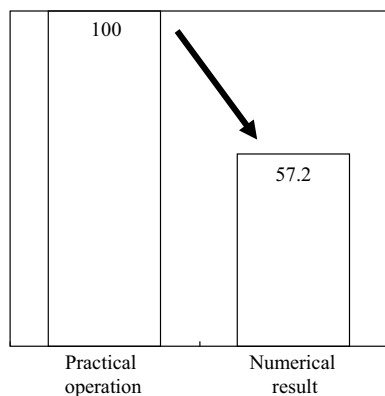


図 13 パレットを運搬しない時間の比較

Fig. 13 Duration in operation without movement of pallet

提案アルゴリズムと操業実績で比較したものである（操業実績を100と換算）。これはパレットを運搬していない時間を意味しており、極力短くすることが望まれる。計算結果では前記時間を40%以上短縮しており、新アルゴリズムによる運搬車両のスループット向上が可能である。

実際の操業では前記に加えて詳細な制約条件がある。今後は、実操業対応のための改造を行い、シミュレーションによる能力検証実施、実機化に移行する予定である。

5. おわりに

鉄鋼製品の製造、荷役、配送に関連する下記3つのスケジューリング事例を紹介した。

- (1) 薄板系の計画システム再構築プロジェクト
 - ・シミュレーションを活用した開発の高速化
 - ・スラブ設計の方向性の示唆
 - ・対話型スケジューラによる作業効率化
- (2) 東日本製鉄所薄板一元配車システム
 - ・物流3拠点を一元的に管理
 - ・配送効率を4.9%向上
 - ・CO₂を3.2%削減
- (3) 製鉄所内運搬計画
 - ・資源制約つきプロジェクトスケジューリング問題および配送計画問題に帰着
 - ・車両の非運搬時間を40%低減

参考文献

- 1) 木村亮介. 鉄鋼物流における最適化およびシミュレーション技術の活用. オペレーションズ・リサーチ. 2006, vol. 51, no. 3, p. 9-14.
- 2) JFE Steel News Release. 2009-10-22.
- 3) 吉成有介, 外岡英治, 安永伸一郎, 島村健児. 京浜地区薄板自動配車計画システムの開発. CAMP-ISIJ. 2006, vol. 19, p. 313.
- 4) 藤井聡, 北條成人, 吉成有介. 生産計画・物流計画への最適化技術の応用. JFE 技報. 2007, no. 14, p. 49.
- 5) 柳浦睦憲, 茨木俊秀. 組み合わせ最適化 メタ戦略を中心として. 2001, 朝倉書店.
- 6) Nonobe, Koji; Ibaraki, Toshihide. "Formulation and tabu search algorithm for resource constrained project scheduling problem." Essays and Surveys in Metaheuristics (MIC '99). Rebeiro Celso C.; Hansen Pierre eds. Boston, Kluwer Academic Publishers, p. 557-588.
- 7) Ibaraki, Toshihide; Imahori, Shinji; Kubo, Mikio; Masuda, Tomoyasu; Uno, Takeaki; Yagiura, Mutsunori. Effective local search algorithms for routing and scheduling problems with general time window constraints. Transportation Science. 2005, vol. 39, no. 2, p. 206-232.



山口 収



吉成 有介



富山 伸司