

製鉄所における鉄鋼製品の輸送計画法

—車両割当て・運行計画問題と解決へのアプローチ—

中川 義之, 石塚 美奈子, 磯貝 宏*, 畑野 博*

1. はじめに

近年、多品種・小ロット・短納期化にみられるような需要家ニーズの多様化に対応して、鉄鋼生産・物流プロセスも複雑化の一途をたどってきた。これに伴い、生産・物流コストダウンを狙い、鉄鋼業では製造・物流の両面からさまざまな対策を講じてきた。

本稿では、生産・物流コスト削減問題のうち、製鉄所内の製品輸送における運搬車両割当て・運行計画問題を取り上げ、解決へのアプローチ法等について紹介する。

なかがわ よしゆき, いしずか みなこ, いそがい ひろし, はたの ひろし
住友金属工業㈱ システムエンジニアリング事業本部
情報通信研究開発部 数理技術室
〒540 大阪市中央区北浜東2-16 日刊工業新聞社ビル
*同社鹿島製鉄所

2. 車両割当て・運行計画問題

鉄鋼業においては、本社・各製鉄所（製造所）・流通基地およびそれらをつなぐ輸送／情報手段を有機的に結合して一大計画・管理システムを構成し、需要家への対応を行なっている（図1参照）。

ここで取り扱うのは、このうち製鉄所内での製品の輸送にかかわる問題である。

2.1 車両割当て・運行計画問題の概要

鉄鋼製品は、多段の製造工程を経て最終製品に造り上げられたのちいったん製鉄所内の倉庫に保管され、出荷日時調整のあと海上船舶（または陸上トラックなど）を用いて客先へ送られる。

ここでは、製鉄所内の倉庫～海上輸送用岸壁までの輸送問題を取り上げる（図2参照）。すなわち、製鉄所内に複数個（約40）の倉庫が分散配置され、出荷用岸壁（バース）も複数個（約10）ある。また、1つの出

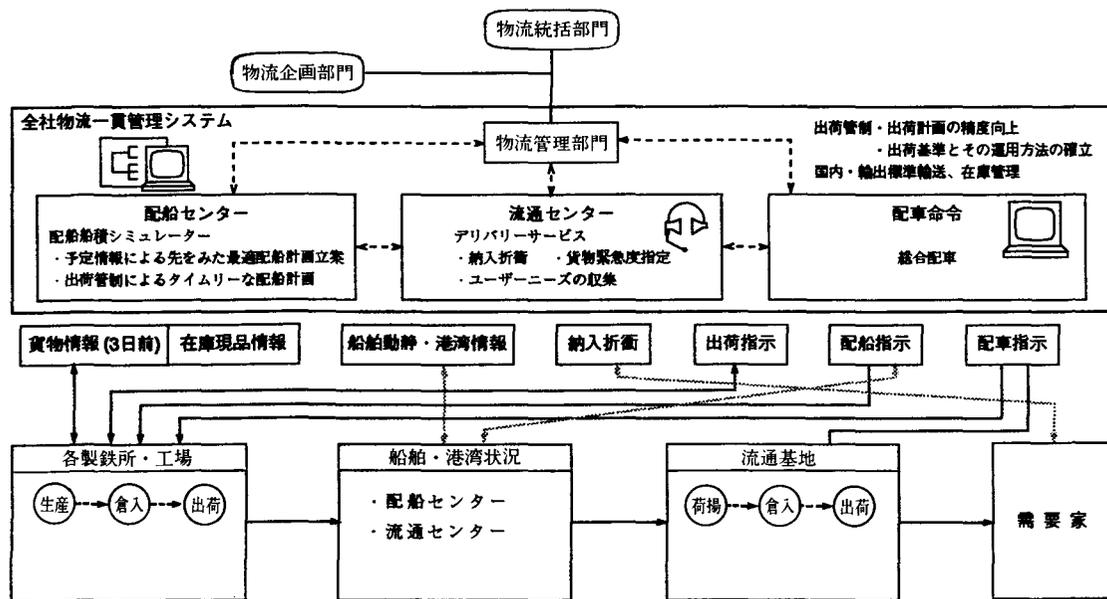


図1 全社物流計画・管理システムの構成

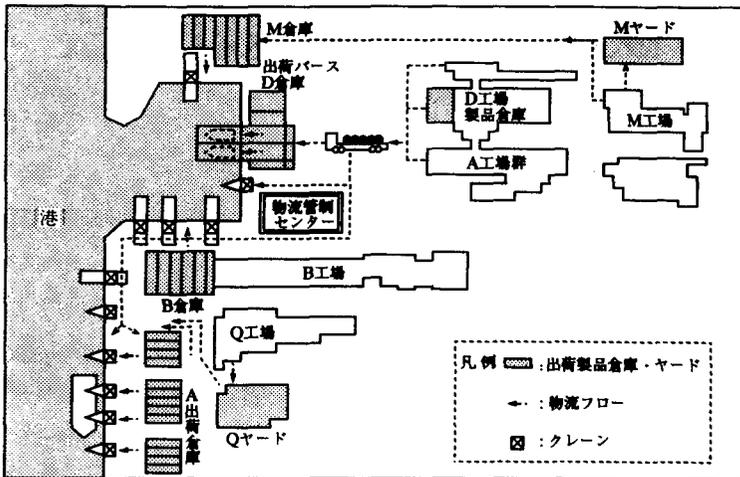


図2 対象物流範囲

荷用バスには通常1~3基の荷役用クレーンが装備されている。倉庫から出荷用バスまでの搬送にはフル・トレーラーと呼ばれる重量物運搬用特別車両が使われている。これは、運転席のある部分(=ヘッド)と、荷台に相当する部分(=台車)とが自由に脱着(切り離し/連結)できるようになっており、これにより倉庫において台車に製品を積み込んでいる間に、ヘッドが他の台車を牽引して製品輸送を行ない、輸送の効率化を図ることができる。

さて、車両割当て・運行計画問題とは、各倉庫からの時々刻々の製品搬送作業要求に対し、輸送効率を最大化するように搬送作業に台車を割り当てる問題である。ここで、1つの製品搬送作業要求とは、たとえば品種a(850トン)を12:00~20:00の時間帯に、倉庫Aから岸壁(バス)Bまで運搬せよというものである(図3参照)。

〈目的関数〉

1. 使用台車数→Min
2. 台車移動距離→Min
3. 作業-台車適正度→Max
4. 同一台車での運搬品種数→Min

ここで、各目標関数の意味づけを行なっておく。

まず1.は、1台車の牽引に1台のヘッド(すなわち1人の運転手)が必要なため、1作業当りの台車数を減らせば必要なヘッド数(=運転手)も減らすことができ、輸送コストが

ウンになるというものである。2.は、バスで1つの作業を終えた台車を次にどの倉庫に移動させるかによって、空走行(製品の無積載走行)時間が変動し輸送効率に変化するため、台車移動距離を最小化し、輸送効率アップを狙うものである。3.は、積載品種と台車との相性の問題である。すなわち、台車には荷台形状に応じてどの品種(板状、棒状、コイル状)が積載しやすいかが決まっており、相性の悪い台車への積載時には余分な付帯作業(器具の取り付けなど)をほどこす必要があり輸送効率を落とすため、この回避

を狙うものである。4.は3.とも関連するが、1つの台車に繰り返して多種類の品種を積載するとそのたびに付帯作業が伴い、全体の輸送効率を下げるためこの回避を狙うものである。

〈制約条件〉

1. 搬送適正品種条件
荷台形状をもとに、台車ごとに品種の積載適正度条件(=付帯作業の軽重の点数付)が与えられる
2. 適正台車数決定条件
積載品種、車種、積地/卸地間の距離に応じて、使用可能台車数の範囲が与えられる
3. 台車運行時間帯条件
同一時間帯においては、1台の台車を複数個の作業へ同時に割り当てられない

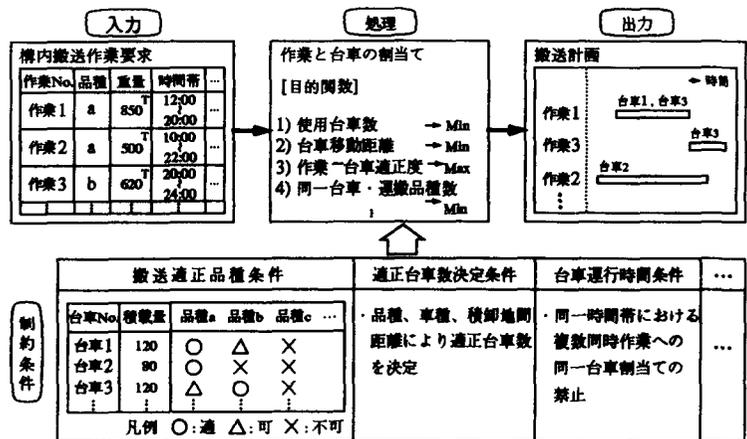


図3 車両割当て運行計画の概要

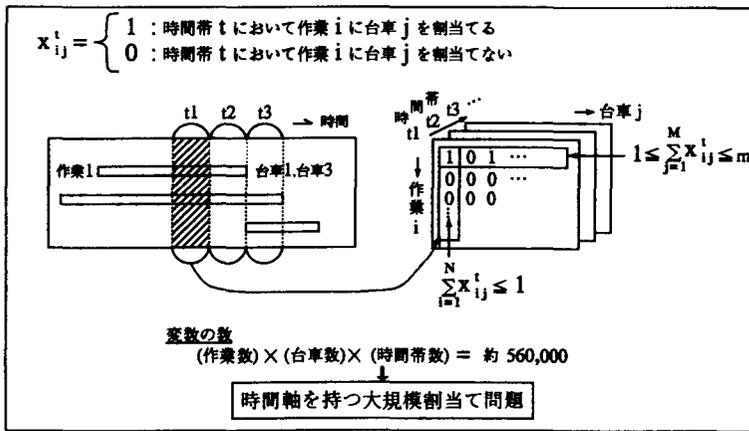


図4 時間軸を持つ割当て問題のイメージ

を満たす範囲内で割当てを最適に
 するような0-1変数 x を求める
 ことになる。ここで式(1)は、各搬
 送作業要求 i は必ず1台以上の台
 車が割り当てられねばならないこ
 とを示し、式(2)は、各台車は同一
 時間帯 t で2つ以上の搬送作業に
 は割り当てられないことを示して
 いる。

以上より、本問題は時間軸をも
 つ大規模割当て問題ということが
 できる。

3. 問題解決法

3.1 問題解決へのアプローチ

このような時間軸をもつ大規模割当て問題を実用的
 時間で解くために、厳密解ではなく近似解を求める
 ヒューリスティック解法を考案した。

〈解法の基本的な考え方〉(図5参照)

本車両割当て・運行計画問題は、大規模組合せ問題
 (56万個の0-1変数をもつ)であり、しかも実運用
 上、短時間(10~20分程度)で求解する必要がある。
 したがって、膨大な組合せの数の中から、早く、効率
 的に、良好な解(最適解でなくてもよい)を見つける
 必要がある。そのために、次のような方針にて解法が
 構成されている。

1. 分枝限定法をベースとした木探索を基本探索法とする。
2. 分枝の段階では、限定操作(含下界値を計算)に工夫をほどこし、解候補(枝)の列挙を制限する。
3. 早く実行可能解に到着するために、極力バックトラックを減らす工夫をほどこし、かつ深さ優先探索を基本戦略とする。
4. 同一深さのレベルで列挙された解候補の中から枝を選択する際には、巾優先探索を組み込み、その中で最も有効な解候補を選択する。
5. 4. は一種のGreedy法であるが、本方法の採用理由は、探索木の下部は割当て自由度が大きく、下部の探索時にバックトラックが発生する可能性が少ないと判断したことによる。

本方針下での主要工夫点を次に示す。

1. 問題を小規模ブロックに分割し、台車の割当て

などがある。

2.2 問題の特徴(時間軸をもつ大規模割当て問題)

本問題は、次の特徴をもつ。

1. 1つの搬送作業要求に対し、1台以上の台車を割り当てる問題である。(なお、1台車は、通常複数回の倉庫-岸壁間往復搬送にて1作業要求を完遂する)
2. 各搬送作業要求には、製品搬送のための許容時間帯があらかじめ設定される。これは、あらかじめ与えられる出荷用船舶の入・出港予定時間内に、出荷用の全製品の台車搬送を終了させるためである。
3. 作業と台車の割当てが時間的にダイナミックに変わる。(時間軸をもつ割当て問題)
4. 大規模問題である。すなわち、計画立案時に考慮すべき搬送作業要求数を40、台車数を94、割当て時間メッシュを150(例:15分単位で1.5日間だと144メッシュ)とすると、作業と台車の割当ての場合の数は、 $2^{40 \times 94 \times 150} = 2^{564,000}$ 通りになる。

これをもう少し詳しく説明すると、以下のようになる(図4参照)。

次のような0-1割り当て変数

$$X_{ij}^t = \begin{cases} 1: \text{時間帯 } t \text{ で作業 } i \text{ に台車 } j \text{ を割り当てる} \\ 0: \text{時間帯 } t \text{ で作業 } i \text{ に台車 } j \text{ を割り当てない} \end{cases}$$

を導入すると、各時間帯(t_1, t_2, \dots)において

$$1 \leq \sum_{j=1}^m X_{ij}^t \leq m \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^N X_{ij}^t \leq 1 \quad (2)$$

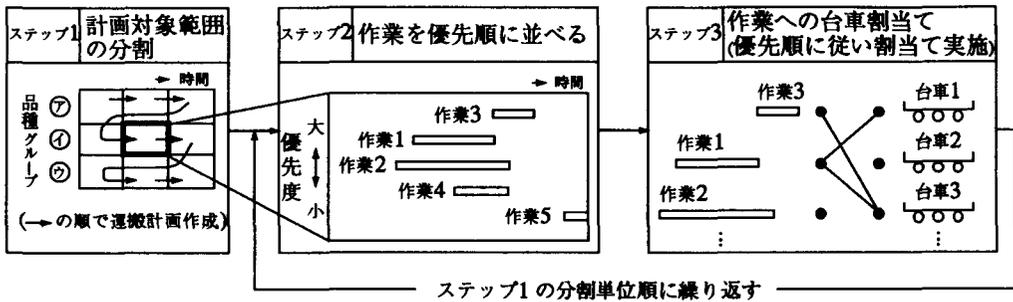


図 5 解法の手順

- 1. 自由度の小さいブロック順に探索を開始する。
- 2. 小規模ブロックの中で、同じく台車の割当て自由度の小さい作業から順次割当てる。(例：ネック時間帯からの割当てなど)
- 3. 1つの作業への台車割当て時には（巾優先探索にて）下界値計算を行ない、必要最低限の台車の

組を列挙し、当該作業と台車の割当てにおいて、一番優先度の高い（相性のよい）ものから割り当てる。

3.2 解法の手順

下記3ステップからなる車両割当・運行計画問題の解法を考案した（図6参照）。

〈アルゴリズム〉

[Step1] 計画対象範囲の分割

本大規模割当て問題を効率的に解くために、9個の小ブロック問題（3期間×3品種）に分割し、さらに解探索の効率性の（バックトラック回数を極力減らす）ために、小ブロック問題を品種毎・小期間順に解いていく。なお、ここでは台車の割当て自由度が低い品種（すなわち、搬送適正品種条件より使用可能な台車が厳しく限定される品種）から優先割当てを実施し、バックトラック回数を減らすようにした。

[Step2] 搬送作業要求の優先度付け
ここでは下記項目に従い、当該小ブロック内の搬送作業要求を並べ替える。

[優先項目]

1. ボトルネック時間帯の作業優先（ネック度大→小の順）
2. 使用可能台車数小の作業優先（使用可能台車数小→大の順）
3. 作業時間長の作業優先（作業時間大→小の順）ここで、ボトルネック時間帯とは、各倉庫から出される搬送作業要求が集中する時間帯を意味する。

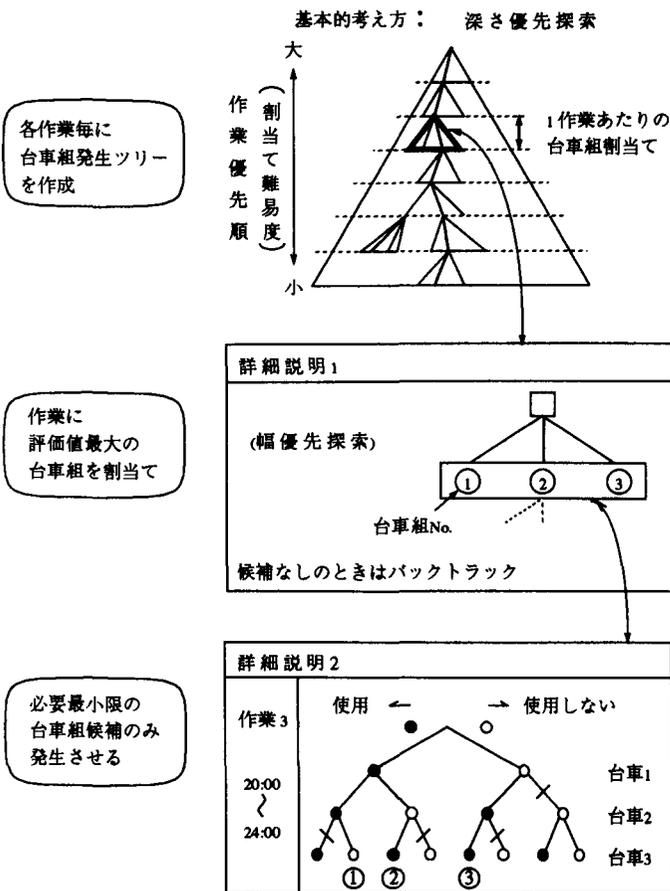


図 6 分枝限定法による台車割当てイメージ

[Step3] 搬送作業要求と台車の割当て

ここでは下記1～3の手順を繰り返して、台車への割当てを行なう。

- Step2で求めた作業優先順に従い、割当て処理を行なうべき作業*i*を1つ選び、各種制約条件を満たす台車群の集合*J*より割当て可能な台車候補（または台車の組候補）を列挙する。
1. で抽出された台車（または台車の組）候補*j*に対し、下記評価式にて評価値*P_j*を決定する。

[台車選択評価式]

$$P_j = a_1 \times f_1 \{ \text{台車 (または台車の組) } j \text{ の移動距離} \} + a_2 \times f_2 \{ \text{台車 (または台車の組) } j \text{ の適正品種割当度} \} + a_3 \times f_3 \{ \text{台車 (または台車の組) } j \text{ の積載効率} \} + a_4 \times f_4 \{ \text{台車 (または台車の組) } j \text{ の同一品種運搬度} \} \quad (3)$$

a_1, \dots, a_4 はスカラー化の重み係数

ここで f_1, \dots, f_4 は線形変換式である。

f_1 は、積地/卸地間距離を考慮して、同一台車は極力同一地域での搬送作業に割り当てる、 f_2 は台車と品種の相性をよくする、 f_3 は1台当りの製品積載重量を上げる、 f_4 は1台の台車が同一の品種を積載・搬送する比率を高めるためのものである。

- 評価値最大の台車（または台車の組）を選ぶ。

4. 結 果

図7にシステム導入後の結果を示した。

各作業に対し、適正タイミングでの適正台車の割当てにより、トータルとして車両積載効率がアップし、また運搬作業時間ロスも減少していることがわかる。

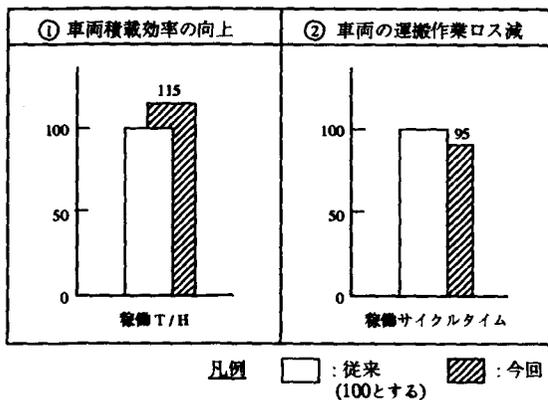


図7 システム導入の効果

ここで、

$$\text{稼働 } T/H = \sum_i W_i / \sum_i \sum_j \sum_k T_{ijk}$$

i : 搬送作業要求No

j : 台車No

W_i : 搬送すべき作業*i*の重量

T_{ijk} : 台車*j*が作業*i*の搬送を行なう際の1往復時間である、稼働サイクルタイムと同義

k : 台車搬送時の倉庫～岸壁間の搬送往復回数

である。

なお、本解法は当社鹿島製鉄所内の物流統合作業管制システムの中に組み入れられ、日々活用されており、求解時間は5～15分（使用機種NEC ACOS-2000）である。

最後に、本システムの導入にあたり、積卸地間距離の実測、実車両による運搬時間の計測、運搬能力の検証、台車一品種の適正度づけ（数値化）など、システム化に必要なデータを意味のある情報に仕立て上げる地道な情報化活動が、本OR実践活動の底流にあったことを付記しておきたい。

謝辞 本稿執筆の機会を与えていただきました筑波大学鈴木久敏先生に深甚の謝意を表します。

また、本研究にあたり御指導・御支援を賜りました住友金属工業(株)常務取締役美坂佳助博士、システムエンジニアリング事業本部徳山博于博士、上野信行博士に厚く御礼申し上げますとともに、当社関係各位に深く感謝いたします。

参考文献

- [1] Aho, A. V., Hopcroft, J. E. and Ullman, J. D.: The Design and Analysis of Computer Algorithms, Addison-Wesley, Reading, Mass., 1974 (野崎昭弘・野下浩平: アルゴリズムの設計と解析 I, IIサイエンス社, 1977)
- [2] 茨木俊秀: 組合せ最適化: 分枝限定法を中心として, 講座・数理計画法 8, 産業図書, 1986
- [3] 茨木俊秀: アルゴリズムとデータ構造, 昭晃堂, 1989
- [4] 金田数正: ORによる輸送・運搬計画, 内田老鶴圃新社, 1977
- [5] 上野・中川・石塚ほか: 鉄鋼製品の構内輸送における車両運行計画問題の効率的解法—時間軸を持つ割り当問題の実用的解法, 日本オペレーションズ・リサーチ学会秋季研究発表会アブストラクト集, No. 2-B-1, 170-171, 1991