

最適輸配送計画問題への数理計画法の適用

西田 大, 中川 賀津也, 相田 剛, 熊本 和浩, 小西 伸之

1. はじめに

主要製造業における物流コストは、2000年度の調査で売上高の約7.8%である。また、主要製造業物流コストの機能別構成比率（輸送費・保管費・その他）において、輸送費は約6割を占めている[1]。すなわち、主要製造業の売上高のうち、5%弱は輸送費である。これを製造業の経常利益率平均の2.3%[2]と比較すると、仮に輸送費を10%削減できれば、経常利益が20%以上増えるという計算になる。このように、輸配送コストは企業の総コストに占める割合が高いため、その削減による企業業績への貢献度は高い。また、生産分野と比較して効率化・最適化の余地が大きい。

加えて、近年の国際社会からのCO₂削減をはじめとした環境問題に対する要請は厳しくなる一方である。それに伴い、各企業の環境問題に対する取組み姿勢は、その企業イメージを左右するほど重要性を増している。一方、物流・交通等を含む輸送分野のCO₂排出量は、日本の全排出量の約2割を占めるといわれており、積載率向上・走行距離短縮などの輸配送効率化に伴うCO₂排出量削減効果は少なくない。この点からも、物流効率化の面からの環境問題への取組みは、企業にとって極めて重要であるといえる。

サントリー(株)及びサントリーロジスティクス(株)では、社内及びグループ会社の工場や物流拠点、サプライヤ各社等の相互間の物流に対して、1997年に統合配車®システムを運用開始した。従前の運送会社毎の輸配送計画の個別最適化から、全運送会社の輸配送計画の全

体最適化へと移行することにより、物流コストとCO₂排出量の大幅な削減を実現した（統合配車®はサントリー(株)の登録商標）。

(株)住友金属システムソリューションズ数理技術室は、この統合配車®システムの中核をなす拠点間の最適輸配送計画問題の解法を、数理計画法を活用して新たに開発した。数理技術室では、これまで住友金属グループを中心として、多種多様な形態の生産・物流に対して、OR理論を活用し最適化を図ってきた。特に、数理計画法を活用した事例としては、製鋼工場における最適作業位置決定[3]や、歩留最大化のための材料取合せ計画[4]などがある。

本稿では、まず統合配車®システムについてそのビジネスモデルを中心に概説したのち、最適輸配送計画問題の概要と解法開発の背景を述べ、その解法を詳説する。

2. 統合配車®システムの概要

サントリー(株)及びサントリーロジスティクス(株)における統合配車®システムは、配車センターでの一元管理と、最適輸配送計画を特徴とした、サントリーグループの拠点間輸送の効率化システムである。現在では、稼働当初のサントリーグループに加え、Web上での求貨求車システムによる多数の参加企業を得て、効率的な共同輸配送システムへと進化・発展している。

本システムでは、拠点間の荷物（輸送依頼）を、従来の運送会社別への分配・配車計画・車両確保・輸送という業務フローから、配車センターにおける一括配車（最適輸配送計画）と各社での車両確保・輸送という新たなビジネスモデルへの転換を図っている（図1, <http://www.suntorylogistics.co.jp/>より引用）[5]。

これにより得られる効果を例示する。“→”は荷物を積載した実車移動，“…”は空車移動を示すとす。いま、飲料工場Aとビール工場Bの相互間に荷物がある場合、従来は、その2つの荷物が異なる物流会社に輸送依頼された場合は、2台の車両がそれぞれを輸

にしだ はじめ, くまもと かずひろ, こにし のぶゆき
(株)住友金属システムソリューションズ 数理技術室
〒660-0856 兵庫県尼崎市東向島西之町1
なかがわ かづや
サントリー(株)ロジスティクス推進部
〒107-0051 東京都港区元赤坂1-2-3
あいだ つよし
千代田興業(株)
〒554-0023 大阪市此花区春日出南1-4-8

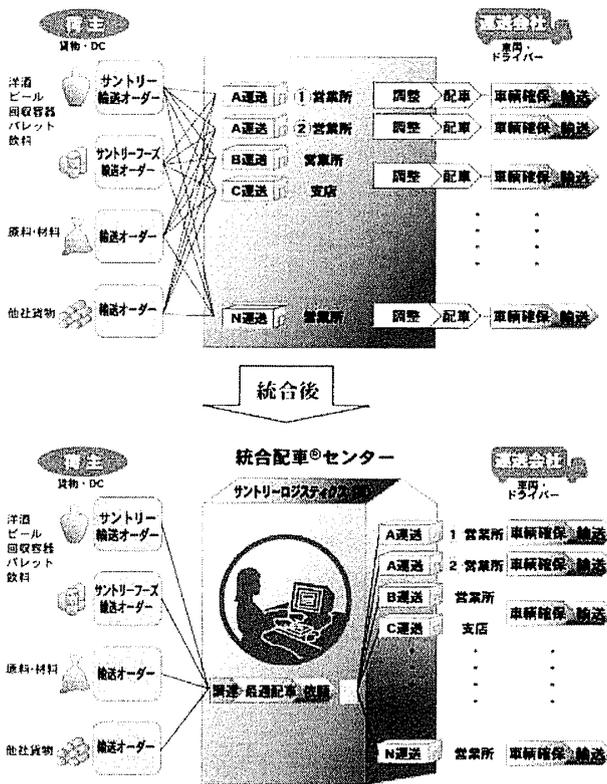


図1 統合配車®の概念

送したのち、各々空移動で発倉庫に戻るといった輸送を行っていた。すなわち、 $A \rightarrow B \dots A$ 及び $B \rightarrow A \dots B$ であった。しかし、統合配車 R により 1 台の車両で往復、すなわち $A \rightarrow B \rightarrow A$ という輸送が可能となる。このように、全運送会社の荷物という広い探索空間の中で、往復ルートや三角ルートを積極的に採用することにより、拠点間輸送の効率化を進めるのが統合配車®の基本思想である。

3. 最適輸配送計画問題

3.1 VRP の分類と最適輸配送計画問題

統合配車®における拠点間の最適輸配送計画問題は、Vehicle Routing Problem (VRP) の一つと捉えることができる。VRP の分類方法については、いくつかの文献で提唱されているが、ここでは M. Desrochers の方法 [6] に従って、この問題の特徴 (拠点間輸送) を整理する。

文献 [6] では VRP を 4 つの観点から分類している。すなわち addresses (配送先とデポを含む拠点)、vehicle (車両)、problem characteristics (制約条件など)、objectives (目的関数) である。特に今回の問題の特徴づけるのは addressees と problem characteristics に関する項目である。

本問題は、文献 [6] の方法に従うと、

表1 最適輸配送計画問題の分類記法の意味

l	デポの個数が複数
EDGE	顧客(要求)が EDGE に与えられる
tw_j	タイムウィンドウ制約有り
m	使用可能車両台数が動的に変化
cap_i	車両積載可能容量が車両毎に異なる
tw_i	車両毎に稼働時間帯が異なる
dur_i	ルートの可能時間帯が異なる
dir	ネットワークが有向グラフである
/	オーダ分割が可能
$\geq 1D/R$	1 車両複数回転可能
DA	複数デポを経由するルートが可能
AV	受入車種制限有り
$\sum C_i$	目的関数に車両コストを含む(台数)
$\sum P_i(dur_i)$	目的関数にルート時間を含む

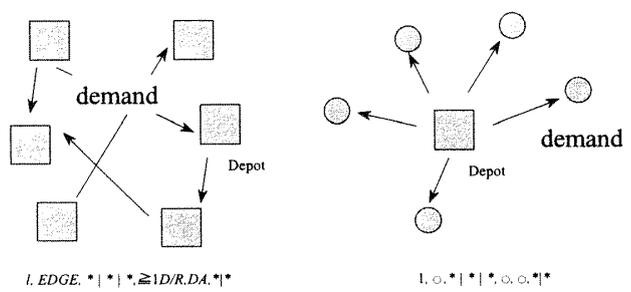


図2 拠点間最適輸配送計画問題と VRP

$l, \text{EDGE}, tw_j | m, cap_i, tw_i, dur_i | dir, /, \geq 1D/R, DA, AV | \sum C_i, \sum P_i(dur_i)$

と記述できる。表 1 に各項目の意味を記述する。

このうち、本問題の特徴づける要素は、

- l : 複数デポ
- EDGE: オーダが区間で与えられる
- $\geq 1D/R$: 複数回転
- DA: 複数デポ経由ルート可能

である。これらは、本問題が拠点間の FTL (Full Truckload) 型のタイプであることを表現している。図 2 にこのタイプと、一般的な VRP 問題の概念図を比較した。

このタイプに対する研究論文は極めて少なく、文献 [6] で示された 14 個の分類事例にも該当するものは存在しない。同タイプに対する研究は、中国上海地区における、運送会社の港湾・駅・工場等拠点間の最適輸配送計画 [7] が挙げられる程度である。

3.2 最適輸配送計画問題の概要

日々の拠点間輸送依頼データ (出庫日・積卸地・重量・容積・品目・各種制約条件値など) に対し、品目・物流拠点・車両・車庫・車種・距離 (時間・速度) などの各マスターデータを参照し、制約条件を遵

守した上で、最適化要件（車両台数最小）が最適となるように、車両へ積載する品目・量の明細（各区間毎）と、当該車両の運行ルートを決する（図3）。

以下、最適化要件、制約条件、運行ルート、積載品目明細の順に解説する。

最適化要件は、第1レベルとして車両台数最小化、第2レベルとして空移動時間や乗務員の残業時間等の重み付け線形和として与える。同じ台数であれば、できるだけ第2レベルの線形和で表現された目的関数が小さくなるようにする。

制約条件は、荷物（輸送依頼）に関するもの、物流拠点に関するもの、車両に関するもの、車庫に関するものなど多種多様であり、主なものを表2にまとめた。運行ルートは、個々の車両について、1箇所の積地

から1箇所の卸地までの区間を走行し、全ての荷物を卸す。そして次の積地までの空移動を繰り返すという複数回転が基本である。なお、車番毎の割当ではなく、まずは車両台数最小の計画を立案する。

また、各車両・各区間の積載品目明細は、輸送依頼データを分割あるいは組合せて、積載率を条件内で最大化としたものである。

4. 最適輸配送計画問題の解法

4.1 解法開発の背景

一般的なVRPに対する解法の研究は極めて盛んで、線形計画法・整数計画法・動的計画法等の厳密解法や、Saving, Tabu Search, Nearest Neighbor等の近似解法に関する研究論文が多数ある[8]。

一方、拠点間の最適輸配送計画問題に関する研究は極めて少ないことは前述の通りである。文献[7]では、上海全体でオーダー数6,000~7,000、車両数3,400台の問題規模に対して、拠点毎（典型的な例で100オーダー、55台）の計画に縮退した上で、朝・夕2シフトの計画を立案している。解法としては以下2つの方法が提案されている。

(1) ヒューリスティクス手法ベースのアプローチ

原問題を車両の需要供給の輸送問題に近似する。すなわち、積が多い拠点には車両の供給が必要であり、卸が多い拠点からは車両が供給される。この輸送問題を求解することにより、複数のサイクル状のルートを得る。ただし、このサイクル状のルートは、稼働時間などの制約条件を満たすことが保証されていないため、Greedyアルゴリズム等により、ルートを分割・組み合わせる必要がある。

(2) 最適化手法ベースのアプローチ

車番毎に、いくつかの候補ルートを列挙し、整数計画問題に定式化・求解する。候補ルート数は、十分小さな数でなければならず、最適性とのトレードオフにはなるが、空移動率の高いルートや、ありえないルートなどを削除しておく必要がある。

本稿の拠点間最適輸配送計画問題と、文献[7]の計画問題の相違点は、問題規模・複数オーダーの積合せの有無、車番毎の計画か否か、など多数存在する。本問題は積合せを実施し、車番の枠を取り払った計画のため組合せ数が増大する懸念がある上、問題規模は文献[7]の数倍以上である。したがって、解法の開発は、組合せ爆発の防止と解の十分な準最適性の確保などに注意しながら、高い実用性を備えることを重視して進

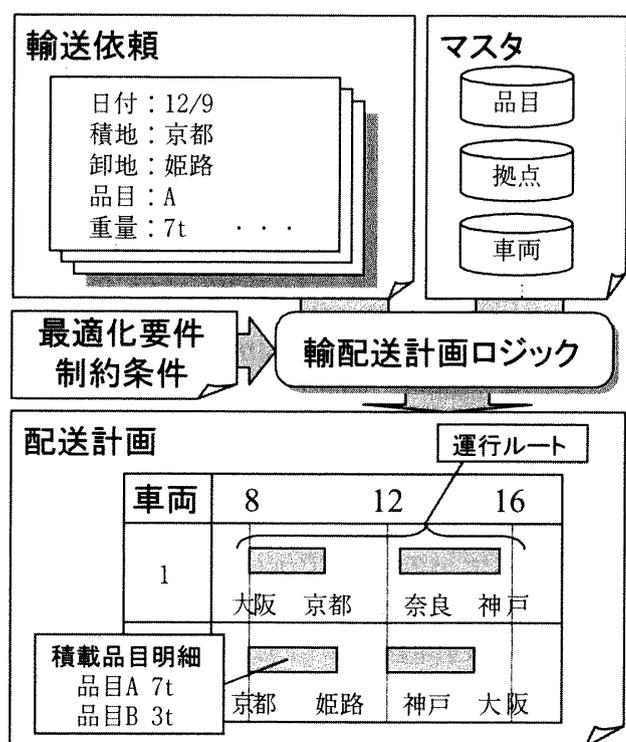


図3 最適輸配送計画問題の概要

表2 最適輸配送計画問題の主な制約条件

荷物	着庫時間指定
	出庫時間指定
物流拠点	倉庫稼働時間
	受入車種の制限
	単位時間当たりの入出庫台数
車両	許容運行時間
	許容空移動時間
	車両移動時間
車庫	許容出庫時間
	許容帰庫時間

めた。

4.2 解法の概要

今回開発した解法は、組合せ爆発の回避と、制約変更への柔軟な対応を可能とする、セット作成とルート生成・選択からなる2段階の解法である。特に、区間毎の積載品目明細を決定するセット作成を独立させることにより、最適性を大きく損なうことなく、組合せ数を大幅に低減することが可能となる。

以下、セット作成とルート生成・選択に分けて、それぞれ詳説する。

4.2.1 セット作成

1車両に積載可能な品目の集まりをセットと定義する。セット作成では、個々の輸送依頼に基づいて、所与の車両に積載可能となるように、各品目を組合せ、あるいは分割する。この際、できるだけ重量および容積の両積載率が高くなるような組合せを求めることにより、必要となる車両台数を削減できる。本解法では、ビンパッキング問題の解法である Best Fit Decrease 法を応用したヒューリスティクス解法を構築した。

4.2.2 ルート生成・選択

前ステップで生成したセットを、1ないしは複数個を必要に応じて空移動を挟みながら直列に連結したものをルートと定義する。セットを連結することにより、ルートの候補を生成し（ルート生成）、生成されたルート候補群から、輸送依頼を全て満足（セットを漏れなく選択）した上で台数が最小となるルート候補の組合せを決定する（ルート選択）。この考え方は、文献[6]における最適化手法ベースのアプローチと基本部分では同様であるが、規模や各種制約条件などの問題特性上、そのままの適用は不可能であるため、様々な改良を加えている。以下、ルート生成とルート選択につき、本解法の優位性を中心に述べる。

(1) ルート生成

ルート生成では、車両や拠点に関する制約条件を考慮し、運行可能なルートのみを生成し、同時にそのルートの効率（空移動時間など）に基づき評価値を設定する。

この際、辞書式順列生成などの方法で運行可能なルートを全て生成すると、ルート数が莫大となり、ルート選択における整数計画問題の求解に時間がかかる、あるいはルート生成自体が終了しない恐れがある。

そこで、ルート生成の際に、セット作成で生成したセットを区間毎・制約条件毎にまとめることにより、生成ルート数を大幅に低減することが可能である。こ

れにより、本問題は極めて大規模な0-1整数計画問題から、中・大規模の一般整数計画問題へ近似することが可能である。セットのまとめ方を工夫すれば、十分実用的な近似が可能である。

さらに、組合せ爆発を避ける方策の一つとして、地理的に近いセットを、優先的に個数を限定して連結することにより、できるだけ有望なルート（最適解に含まれる可能性の高いルート）に絞り込んでルートを生成することが考えられる。この方法によれば、ルート数を、

$$(\text{セット数}) \times (\text{指定個数}) \quad (\text{1日の最大回車数})$$

を上限として生成することができ、システムの実用的な運用が可能となる。

生成したルート i は、ルートに含まれる同区間のセット j の個数 a_{ij} をセット数分だけ並べたベクトルで表現する。いま、区間セット種類数を N 、生成されたルート候補数を M としたとき、 $N \times M$ 行列としてルート候補群行列 A を表現可能であり、 M 次元ベクトルとして評価値 C を表現できる。

(2) ルート選択

ルート選択では、ルート生成の結果得られたルート候補 i に対し、その選択台数 x_i を変数する。選択の結果、各区間 j のセット数 b_j を満たすような制約条件のもとで、目的関数 Cx が最小となるように x を決定する。目的関数としては、台数最小のみで良い場合は、 $c_i=1$ for $\forall i$ とし、それ以外の要素も考慮する場合は適当な重み付けによる線形和とする。

$$\text{Minimize } \sum_{i=1}^M c_i x_i \quad (1)$$

$$\text{Subject to } \sum_{i=1}^M a_{ij} x_i = b_j \text{ for } \forall j \quad (2)$$

$$x_i : \text{integer} \quad (3)$$

(1)~(3)式のモデルは、整数計画問題であり、例えば、まずLP緩和問題を求解し、LP緩和解から Branch & Bound 法や近傍探索法などで、整数最適解または準最適解を求める。この問題の求解には市販の数値計画パッケージソフトウェアを利用することも実際的には有用である。

5. おわりに

本解法は、サントリーロジスティクス(株)において1997年から、統合配車®システムの心臓部として本番稼働している。新ビジネスモデル及び本解法の相乗効果により、必要車両台数は14%減となり、輸送コス

ト削減は十数億円にも達した。また、車両の運行距離短縮による燃料消費量の削減で、CO₂ 排出量の削減と省エネルギーを実現している。

㈱住友金属システムソリューションズ数理技術室では、1962年の住友金属工業㈱中央技術研究所における発足以来、約40年にわたって、数理計画法を中心とした各種のOR理論を、主として鉄鋼分野における生産・物流計画に適用し、コスト削減と環境問題への対応に取り組んできた。1990年代半ばより、それまでに蓄積してきたOR適用技術を活用し、多種多様な業種を対象としてORコンサルティング活動を展開してきている。本事例は、サントリーグループと住友金属グループのコラボレーションによる成功事例であると言えよう。

本事例は、OR理論により企業の物流コスト削減・環境問題への取組みを進めたという点で、極めて意義深いといえる。今後も、このような事例を積み重ね、OR分野の発展に寄与していきたい。

参考文献

[1] 「2000年度業種別物流コスト実態調査報告書」, 日本ロジスティクスシステム協会, 2001.1.

[2] 「法人企業統計年報(平成9年度)」, 大蔵省.

[3] 西田, 山田ほか, 「列生成法による鋳型設置場所割当問題の解法」, 日本OR学会秋季研究発表会アブストラクト集, pp.112-113, 1996.

[4] N. Konishi, Y. Nakagawa, H. Nishida, N. Sakai, "A MIP-Based Approach to the Cutting Stock Problem for Roll and Long Strip Materials with Minimum Production Amount Constraint", International Conference on Advances in Production Management Systems, Nov 1996.

[5] T. Aida, "IT in a Distribution Business", Logistics Systems, Vol. 10, No. 4, 2001.

[6] M. Desrochers, J. K. Lenstra, M. W. P. Savelsbergh, "A Classification Scheme for Vehicle Routing and Scheduling Problems", EJOR 46, pp. 322-332, 1990.

[7] Marshall L. Fisher, Huang Jiegang, Tang Bao-Xing, "Scheduling Bulk-Pickup-Delivery Vehicles in Shanghai", INTERFACES Vol. 16, No. 2, pp. 18-23, 1986.

[8] M. A. Al-Fawzan, K. S. Al-Sultan, "The Vehicle Routing Problem: Survey", Proceedings of 5th Industrial Engineering Research Conference, pp. 269-274, 1996.