

京都大学工学部 学生員 ○今井 悠介
 京都大学大学院工学研究科 フェロー 谷口 栄一
 京都大学大学院工学研究科 正会員 山田 忠史
 京都大学大学院工学研究科 正会員 中村 有克

1. 研究の背景と目的

近年の消費者のニーズの多様化に伴い、貨物の集配送需要が高度化してきている。そのため、物流業者には多頻度・小口集配送など高度なサービスが要求されている。一方で、貨物集配送は、交通渋滞、大気汚染などの環境負荷の一因となっている。

これらの課題や問題に対処するために運搬経路問題 (Vehicle Routing Problem, 以下 VRP) の研究がなされている。一般に、VRP には、一つの顧客への訪問回数は一度だけであるという制約が課されている。顧客に対して二度以上の訪問を許可することで、配送費用やトラック台数の減少を図るモデルである分割運搬経路問題 (Split Delivery Vehicle Routing Problem, 以下 SDVRP) は、より实际的であり、近年研究が盛んに行われている。数百程度の顧客を有する問題に対しても厳密解が算出されている VRP に対し、SDVRP においては、厳密解の算出は顧客数 50 より大きい問題に対しては進んでおらず、SDVRP の研究は未だ発展段階にあるといえる。

そこで本研究では、SDVRP に対する効率的な近似解法の構築を目指す。その基礎段階として、タブーサーチを用いて SDVRP に対する解法を提案し、その精度を検証する。

2. 分割運搬経路問題

本研究では、貨物の配送を対象とする。物流業者にとって最適な運搬経路計画とは、配送に要する総費用を最小化するものとする。以下に SDVRP の定式化を行う。

Minimize

$$z = \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{k \in K} c_{ij} x_{ijk} \quad (1)$$

Subject to

$$\sum_{i \in V} \sum_{k \in K} x_{ijk} \geq 1 \quad \forall j \in V, \quad (2)$$

$$\sum_{j \in S} x_{0jk} = 1 \quad S \subseteq V - \{0\}, \forall k \in K, \quad (3)$$

$$\sum_{i \in V} x_{ihk} - \sum_{j \in V} x_{hjk} = 0 \quad \forall h \in V, \forall k \in K, \quad (4)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S} x_{ijk} \leq |S| - 1 \quad \forall k \in K, \quad (5)$$

$$y_{ik} \leq d_i \sum_{j \in V} x_{ijk} \quad \forall i \in S, \forall k \in K, \quad (6)$$

$$\sum_{k \in K} y_{ik} = d_i \quad \forall i \in S, \quad (7)$$

$$\sum_{i \in S} y_{ik} \leq q \quad \forall k \in K, \quad (8)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in S, \forall k \in K, \quad (9)$$

$$y_{ik} \geq 0 \quad \forall i \in V, \forall k \in K, \quad (10)$$

ただし、

z : 総配送費用 K : 車両集合
 k : 車両番号 i, j, h : 顧客番号
 0 : デポ S : 顧客集合

V : デポと顧客の集合

c_{ij} : 顧客 $i-j$ 間の距離 (費用に代用する)

x_{ijk} : 車両 k が顧客 $i-j$ を配送するときには 1 それ以外のときは 0 をとる整数変数

y_{ik} : 車両 k の顧客 i に対する配送量

d_i : 顧客 i における需要量

q : 車両積載容量

なお x_{ijk}, y_{ik}, d_i, q は整数値をとるものとする。

式(1)は目的関数、式(2)~(6)は顧客における車両フローの制約条件、式(7)は顧客の需要制約条件、式(8)は車両積載量制約条件、式(9)は x_{ijk} が 2 値変数で、式(10)は y_{ik} が非負であることを表している。

3. 解法

本研究では、近似解法に分割配送を考慮したタブーサーチを適用する。近傍解の生成には、交換ムーブと分割配送を考慮した挿入ムーブを選択し、タブーリストには遷移の属性を記憶させる。願望水準は目的関数による大域的願望を採用する。挿入ムーブと交換ムーブにはともに、解の多様化を図るための長期記憶要素を組み込む。

初期解の生成には貪欲法を用いる。なお、この貪欲法では、各ルートの最初に訪問する顧客のみランダムに選択する。初期解の生成後、挿入ムーブ、交換ムーブの順に近傍解を生成する。長期記憶要素を組み込みながら既定の回数だけこの操作を繰り返す。

挿入ムーブでは、各顧客に対する配送を各トラックの配送順序に対して挿入することを考える。通常の挿入ムーブでは、積載量制約に反する挿入は実行不可能となる。一方、分割配送を考慮する場合、その挿入が実行可能となる。具体的には挿入先のトラックの残存容量が0でない場合に限り、その残存容量に等しい配送量を挿入し、顧客への配送を分割することで近傍解を生成できる。挿入ムーブにおいて、分割配送を考慮した近傍解を生成することで、通常のVRPに比べて実行可能領域が広がる。

また、長期記憶要素においては、一定の回数操作を行って、解が更新されない場合に、遷移の頻度の低い挿入や交換を行うように設定する。

4. 仮想的な問題への適用

本研究では、Christofides *et al.*¹⁾, Augerat *et al.*²⁾のベンチマーク問題を採用し、上述のタブーサーチの性能検証を行い、分割配送の有効性を示す。まず、Christofides *et al.*によるSDVRPのベンチマーク問題のうち顧客数50の問題(以下問題0とする)を選択し、性能を検証する。つぎに、Augerat *et al.*によるVRPのベンチマーク問題の中で、顧客数が33~44の4つの問題(以下問題1~4とする)を選択し、分割配送の有効性を示す。各問題について50通りの初期解を生成し、それらを用いて計算を行った。

問題0について、本研究で提案する手法で得られた最良解、最適解、タブーサーチを用いた既存の解法SPLIT-TABU³⁾による最良解を表1に示す。なお、最良解とは、得られた目的関数値の中で最小のものを表している。結果から、最適解に対する本解法で得られた最良の近似解の誤差は約0.04%であり、性能が良好であることが示された。

表1 性能検証結果

	最良解	最適解	SPLIT-TABU
目的関数値	524.81	524.61	535.55

つぎに、問題1から問題4に対して、本解法を適用した。得られた結果を表2に示す。結果から、問題1では分割配送は見られず、本解法により得られ

た最良解は問題1の最適解と一致した。しかし問題2,3,4では分割配送が確認され、それぞれのVRPの最適解よりも目的関数値の小さい配送経路が得られた。問題2,3,4の結果から、分割配送を考慮することで、より効率的な配送経路が得られることが示された。また、問題1の結果から、分割配送でも配送効率が上昇しない問題の存在も確認された。

表2 VRPへの適用結果

問題	最適解	平均値	最良解	分割の有無
1	833.20	835.62	833.20	なし
2	1147.20	1156.84	1146.91	あり
3	791.24	786.37	784.85	あり
4	680.44	688.83	675.19	あり

5. 結論

本研究では、タブーサーチを用いてSDVRPに対する解法を構築し、SDVRPのベンチマーク問題に適用した。その結果、顧客数50の問題に対しては、近似解法として、本解法の性能が良好であることが確認された。さらに、VRPのベンチマーク問題に適用した結果、分割配送を考慮することにより、配送が効率化される可能性があることが確認された。

今後の課題としては、問題0に対して最適解と同等の解を算出している近似解法が存在するため、今回扱った問題の他にもSDVRPのベンチマーク問題に対して本解法を適用し、解法の有効性をさらに検証する必要がある。また、現実のネットワークに適用し、分割配送の効果を实际的に検証していきたい。

参考文献

- 1) N. Christofides, S. Eilon: An algorithm for the vehicle dispatching problem, *Operations Research Quarterly*, Vol. 20, No. 3, 309-318, 1969
- 2) P. Augerat, J. M. Belenguer, E. Benavent, A. Corberán, D. Naddef, and G. Rinaldi: Computational Results with a Branch and Cut Code for the Capacitated Vehicle Routing Problem, *Research Report 949-M*, Université Joseph Fourier, Grenoble, France, 1995.
- 3) C. Archetti, M. G. Speranza, and A. Hertz: A Tabu Search Algorithm for the Split Delivery Vehicle Routing Problem, *Transportation Science*, Vol. 40, No. 1, 64-73, 2006