

分割運搬経路問題に対する タブーサーチを用いた近似解法についての研究

今井 悠介¹・谷口 栄一²・山田 忠史³

¹学生会員 京都大学大学院修士課程 工学研究科都市社会工学専攻

(〒615-8530 京都市西京区京都大学桂)

E-mail: imai@kiban.kuciv.kyoto-u.ac.jp

²フェロー 京都大学大学院教授 工学研究科都市社会工学専攻

(同上)

E-mail: taniguchi@kiban.kuciv.kyoto-u.ac.jp

³正会員 京都大学大学院准教授 工学研究科都市社会工学専攻

(同上)

E-mail: t.yamada@kiban.kuciv.kyoto-u.ac.jp

「物流事業者がデポ（配送拠点）と複数の車両（主にトラック）を有するとき、配送費用が最少となるように複数の配送先の各顧客の需要を満たすような顧客への配送経路を決定する組み合わせ最適化問題」である運搬経路問題の研究は、都市内物流の合理化に大きく貢献することが知られている。このうち、顧客への複数回の配送を許可する問題は分割運搬経路問題と呼ばれ、より総配送費用の削減に貢献する可能性が高まる一方で、制約緩和により厳密解の算出が非常に困難であることが既往の研究によって示されている。

そこで本研究では、タブーサーチを用いて分割運搬経路問題に対する効率的な近似解法を構築することを目指した。構築した解法をベンチマーク問題に適用して既往の近似解法と総配送費用の比較を行った結果、本解法が有効である可能性が示された。

Key Words : *vehicle routing problem, split delivery, meta heuristics, tabu search*

1. 研究の背景と目的

近年、インターネットの発展や消費者のニーズの多様化に伴い、貨物の集配送需要はますます高度化している。そのため、物流事業者には多頻度・小口集配送など高度なサービスが要求されている。また、物流事業者は競争激化に伴い配送にかかる経費の削減を求められている。一方で、我が国の国内輸送の大部分を担う、トラックによる貨物集配送は、都市内における交通渋滞や、二酸化炭素など環境汚染物質排出を始めとした環境負荷などの社会的問題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。VRP とは、「物流事業者がデポ（配送拠点）と車両（主にトラック）を有するとき、配送費用が最少となるように複数の配送先の各顧客の需要を満たすような顧客への配送経路を決定する組み合わせ最適化問題」である。VRP の都市内ロジスティクスに対する適用は配

送費用削減による経済活性化に貢献するとともに、走行距離減少により環境負荷の軽減など社会問題の解決にも寄与すると考えられており、VRP を研究することの社会的意義は非常に大きい。具体的な VRP の適用例としては、小売店の配送経路やスクールバスの巡回経路決定、郵便や新聞の配達経路の決定などがある。さらに現実に即した計画の提案を実現するため、時間枠制約や積載量制約など様々な制約を加味した VRP の研究がなされている¹⁾。

従来研究されてきた様々な VRP に対しては、顧客への訪問回数が一度だけであるという制約が課されていた。これに対して、顧客に対して二度以上の訪問を許可することで、配送費用の削減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。^{5) 6)} 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、顧客数 50 より大きい問題に対して

厳密解の算出は成功しておらず、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。具体的には、タブーサーチを用いたSDVRPに対する解法を提案し、その精度を他の近似解法と比較することで有効性を検証する。

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。物流事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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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 (走行費用に代用する)		
x_{ijk}	: 車両 k が顧客 i - j を配送する場合に1, それ以外の場合には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		

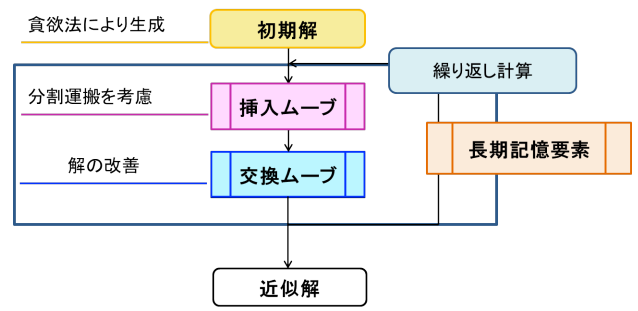


図-1 本解法のフローチャート

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0-1変数であること、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、SDVRPに対する近似解法構築のために分割運搬を考慮したタブーサーチを適用する。本解法におけるタブーサーチでは交換ムーブと、分割運搬を考慮した挿入ムーブを選択した。また、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。

初期解の生成には貪欲法を用いる。なお、本解法で用いるタブーサーチ、貪欲法共にランダム性が含まれていないため、本解法における貪欲法では、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ものとした。

初期解の生成後の近似解の生成のフローとしては、挿入ムーブと交換ムーブを繰り返し実行することで近傍解を生成し、一定の繰り返し計算を行っても最良解が更新されない場合に、長期記憶要素を組み込んだ。この操作を設定した回数だけ繰り返し、最も目的関数値の小さい解を本解法による近似解とした。また挿入ムーブと交換ムーブそれぞれにおいても長期記憶要素を組み込んだ。なお本解法のフローチャートを図-1に示す。

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。VRP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、分割運搬を考慮する場合、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、分割運搬を考慮した近傍解を生成することで、VRPに比べて実行可能領域が広がる。

交換ムーブでは、各トラックの顧客に対する運搬経路

に対して、積載容量制約を満たしながら2つの顧客に対する配送を交換することで近傍解を生成する。具体的には、ある特定のトラックが配送を担当する2顧客の配送順序を入れ替えるような交換と、ある2台のトラックが配送を担当する顧客を入れ替えるような交換を考える。交換ムーブにおいては分割運搬を考慮しておらず、運搬経路の変更による解の改善を目的としている。

本解法における長期記憶要素は、一定の繰り返し回数だけ操作を行っても最良解が更新されない場合に、遷移の頻度の低い挿入を組み込むことで局所解への収束を防ぎ解の多様化を図るための操作である。なお、本解法の特徴として、長期記憶要素を挿入ムーブ、交換ムーブそれぞれに対しても導入することで、より解の探索範囲を拡張させた。具体的には、挿入ムーブと交換ムーブの組み合わせで解が改善されない場合に長期記憶要素を組み込むだけでなく、挿入ムーブ交換ムーブそれぞれにおいて解の改善が一定の繰り返し回数確認されない場合にもそれぞれ遷移の頻度が低い挿入、交換を随時組み合わせることで、より解の多様化を図った。

4. 性能検証

本研究では二段階に分けて性能検証を行った。具体的にはまず、タブーサーチを用いた SDVRP の近似解法に対する本解法の優位性を示すために、Christofides *et al.*²⁾による積載量制約付き運搬経路問題 (Capacitated Vehicle routing problem 以下, CVRP) におけるベンチマーク問題に対して、各近似解の目的関数値の大きさを比較した。次に、SDVRP における本解法の近似解法としての有効性を示すために、Dror *et al.*³⁾による SDVRP のベンチマーク問題に対して、各近似解の目的関数値の大きさを比較した。

なお、本研究における目的関数値とは、総配送距離を意味するものとする。

まず、CVRP におけるベンチマーク問題を用いた性能検証では、ベンチマーク問題のうち顧客数 50, 75, 100 を選択して、得られる近似解の目的関数値の大きさを比較した。ここで、本解法と性能を比較した SDVRP の近似解法は C. Archetti *et al.*⁴⁾によるタブーサーチを用いた SPLIT-TABU と、D. Gulczynski *et al.*⁵⁾による混合整数計画問題を援用した EMIP-MDA + ERTR の二つである。なお、SDVRP の近似解法の有効性を CVRP におけるベンチマーク問題に適用して確認した理由は、SDVRP は CVRP の制約を緩和した問題であり、SDVRP に対する解法は CVRP に対しても有効であると考えられるためである。

得られた各近似解の目的関数値を表-1 に示す。取り扱った三つの問題全てにおいて、本解法が SPLIT-TABU に

表-1 CVRP に対する性能検証結果

顧客数	本解法	SPLIT-TABU (近似解法0)	EMIP-MDA + ERTR (近似解法1)	Best-known (既存の最良解)
50	524.81	535.55	524.61*	524.61*
75	835.89	849.54	839.77	835.26
100	831.72	835.62	819.56	819.56

(*は厳密解と一致することを示す)

表-2 SDVRP に対する性能検証結果

問題	本解法	EMIP-MDA + ERTR (近似解法1)	CGA (近似解法2)	CP (近似解法3)
S51D2	714.07	717.35	723.37	726
S51D3	959.16	969.18	968.85	972
S51D4	1667.18	1580.79	1657.61	1677
S76D2	1115.01	1105.19	1185.72	1147
S76D3	1450.04	1442.61	1504.94	1474
S76D4	2165.04	2104.87	2219.07	2257

対してより優れた近似解を算出していることが確認できた。この結果により、本解法が SPLIT-TABU に対してより有効な近似解法である可能性が十分にあることを示すことが出来た。また、EMIP-MDA + ERTR による近似解との比較から本解法の近似解法としての精度は良好であることも同時に確認できた。

次に、本解法の有効性を示すために、Dror *et al.*³⁾の SDVRP におけるベンチマーク問題を用いて、本解法の性能検証を行った。これらのベンチマーク問題は Christofides *et al.*²⁾の VRP におけるベンチマーク問題における各顧客の需要量を上下限值内に収まるように新たに設定した SDVRP に対する問題である。具体的には、各顧客の需要量 d_i が $d_i \in [\alpha Q, \beta Q]$ (ただし車両の積載量を Q と表す) を満たすように需要量分布 (α, β) を設定されている問題である。本研究で行った性能検証では、顧客数を 50, 75 の二通りとし、需要量分布 (α, β) の組み合わせとしては、D2=(0.1, 0.3), D3=(0.1, 0.5), D4=(0.1, 0.9)の三通りを選択した。これら SDVRP に対するベンチマーク問題に対して厳密解は未だ算出されていないため、今回本解法の精度を検証するために、既往の近似解法と本解法とで得られた近似解の目的関数値の大きさを比較した。性能を比較した近似解法は、上述の D. Gulczynski *et al.*⁵⁾による EMIP-MDA + ERTR と、列生成法を用いた Jin *et al.*⁶⁾による Column generation algorithm (CGA), そして切除平面法に局所探索法を組み込んだ Belenguer *et al.*⁷⁾による Cutting plane algorithm (CP)の三つである。現在の SDVRP

に対する近似解法においては、多くのベンチマーク問題に対して EMIP – MDA + ERTR の有効性が確認されていることと、一部の問題で CGA, CP の精度の高さが確認されている。この事実から、本研究の性能検証では上述の3つの近似解法を比較対象に選択した。

本解法と各近似解法により得られた近似解それぞれの目的関数値を表-2 に示す。表-2 より問題 S51D2, 問題 S51D3 では本解法によって得られた近似解の目的関数値が最小であることが確認でき、本解法の有効性は示唆された。しかし、残り 4 つの問題に対しては、EMIP – MDA - ERTR で得られる近似解の目的関数値が本解法で得られた値に比べ、より小さいことが確認できる。この結果は本解法の汎用性が十分ではないことを示唆しており、本研究の今後の課題であると言える。

5. 結論

本研究では、タブーサーチを用いた SDVRP に対する近似解法を構築し、CVRP, SDVRP におけるベンチマーク問題に適用することで解法の性能を検証した。まず、CVRP におけるベンチマーク問題を用いた性能検証の結果から、タブーサーチを用いた近似解法としては、本解法が SPLIT-TABU に対して優位であることが確認された。次に SDVRP におけるベンチマーク問題を用いた性能検証の結果、本解法の有効性が示唆された。

しかし、有効である近似解の算出が一部の問題に留まっていることから本解法の汎用性を示すには至らなかった。そのため今後はその原因を究明することで本解法を改良し、さらに精度の高い有効な近似解法を構築していきたい。

参考文献

- 1) 久保幹雄, 田村明久, 松井知己. 応用数理計画ハンドブック, 株式会社朝倉書店, (ISBN 4-254-27004-6 C 3500).
- 2) Christofides, N., Mingozzi, A., Toth, P., 1979. The vehicle routing problem. In: Christofides, N., Mingozzi, A., Toth, P., Sandi, C. (Eds.), *Combinatorial Optimization*. John Wiley, Chichester, UK, 315-338.
- 3) Dror, M., Trudeau, P., 1989. Savings by split delivery routing. *Transportation Science* 23 (2), 141-145.
- 4) Archetti, c., Speranza, M., Hertz, A., 2006b. A tabu search algorithm for the split delivery vehicle routing problem. *Transportation Science* 40 (1), 64-73.
- 5) Gulczynski, D., Golden, B., Wasil, E., 2010. The split delivery vehicle routing problem with minimum delivery amounts. *Transportation Research Part E* 46, 612-126.
- 6) Jin, M., Liu, K., Eksioglu, B., 2008. A column generation approach for the split delivery vehicle routing problem. *Operation Research Letters* 36 (2), 265-270.
- 7) Belenguer, J., Martinez, M., Mota, E., 2000. A lower bound for the split delivery vehicle routing problem. *Operations Research* 48 (5), 801-810.

(?????????)