

複数配送経路問題における経路比較指標の局所探索への影響の一検討

松井 俊浩^{†1,a)} 米口 達也^{†1}

概要：配送計画問題は通信販売による宅配の普及などにより近年においても研究されている。一般の問題では運搬車の積載容量の制約等のもとで、全経路の総経路長を最小化することが目的である。その一方で、各経路長の平準化を考慮する指標の適用は、車両間の負担を是正する経路の分析等の面から検討の余地があると考えられる。このような指標は基本的な発見的解法における局所探索に影響すると考えられる。そこで初期の検討として、従来の総経路長とは異なる指標である最大経路長を最小化することを意図して、発見的的手法にもとづく局所探索法に最大経路長の閾値を導入し拡張した場合の、探索と解への影響を実験的に検証する。

A Study of Influence of Criteria to Local Search for Multiple Vehicle Routing Problems

1. はじめに

配送計画問題 [6] は通信販売による宅配の普及などにより近年においても研究されている。配送計画問題は行商人問題の拡張であり、一般に複数の運搬車がある制約条件のもとで顧客を巡回する複数の経路や運搬車の数を最適化することを目的とする。容量制約付き配送計画問題は、各運搬車両に積載容量の制限があり、各車両の容量を超えない範囲である容量の荷物と関連する顧客を巡回する最適な複数の経路を求める問題である。

一般に、行商人問題やその拡張である容量制約付き配送計画問題は NP 困難な組み合わせ最適化問題であることから、局所探索に基づく発見的な解法が検討されている [5]。このような解法では、先ず初期解を挿入法 [2] やセービング法 [1] などの発見的な手法により生成し、局所探索法により解を段階的に改善する。得られた近傍解の経路長が現在の最良解より小さいとき、得られた解を新たな基準解として、さらに近傍解を探索する。

基本的な局所探索手法に 2-opt 法 [4] と Or-opt 法 [3] がある。2-opt 法は、同一経路上の顧客を入れ替え、その経路長を改善をする。Or-opt 法はある 2 つの経路間において、

一方の経路上の顧客を他方の経路上の顧客に挿入することにより総経路長を削減し、その結果、経路の数すなわち運搬車の数も削減しうる。また、2-opt 法と Or-opt 法を統合した手法が提案されている [6]。しかし、このような手法は、一方の経路を他方の経路に挿入する際に、双方の経路長の差を考慮しなければ、各経路長に比較的顕著な偏りが生じうる。

一般の問題では運搬車の積載容量の制約等のもとで、全経路の総経路長を最小化することが目的である。その一方で、各経路長の平準化を考慮する指標の適用は、車両間の負担を是正する経路の分析等の面から検討の余地があると考えられる。このような指標は基本的な発見的解法における局所探索に影響すると考えられる。そこで本研究では初期の検討として、このような偏りが発生する条件や偏りの程度と、従来と異なる指標の影響を実験的に検証する。すなわち、容量制約付き配送経路計画問題を各車両の経路の削減を目的とする多目的最適化問題として捉え、その解法について検討する。そのために従来手法を拡張し、Or-opt 法による部分経路の移動の際に、各運搬車の移動距離に閾値を設定して、その値を越えないように経路の交換を制限し、各運搬車の移動距離の均衡化を図る。また運搬車の台数の削減も考慮し、閾値を段階的に制御する方法についても検討する。そして、トレードオフの関係である最大経路

^{†1} 現在、名古屋工業大学
Presently with Nagoya Instituted of Technology
^{a)} matsui.t@nitech.ac.jp

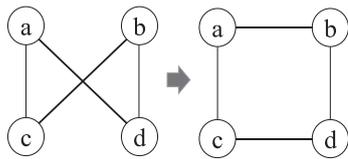


図 1 2-opt 法

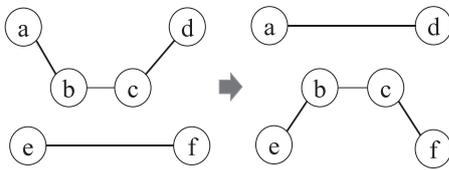


図 2 Or-opt 法

長と総経路長について考察する。また、使用車両台数を固定し、移動距離の均衡化を考慮する場合の問題設定において、使用台数に対する移動距離の変化について考察する。

2. 研究背景

2.1 容量制約付き配送計画問題

配送計画問題は行商人問題の拡張であり、ある制約条件のもとで、複数の運搬車が顧客を巡回する複数の経路を最適化することを目的とする。容量制約付き配送計画問題は、運搬車の積載容量に制限があり、その運搬車が巡回する顧客が要する容量の総和が積載容量の制限を超えないことを制約条件とする。本研究では、先行研究 [6] と同様に、単一のデポを出発点とし、複数の運搬車の複数の経路を最適化する容量制約付き配送計画問題に注目する。

2.2 2opt-法と Or-opt 法を組み合わせた既存手法

先行研究 [6] では、2-opt 法 [4] と Or-opt [3] を併用する容量制約付き配送計画問題の解法を提案している。

2-opt 法は、ある経路上の顧客の訪問順を入れ替え、運搬車の移動距離を削減する局所探索手法である。図 1 のように、経路 a, d, b, c から 2 つの顧客 (d と b) を適当に選び、これらを入れ替えれば経路長が減るとき新たな経路 a, b, d, c を生成する。このような操作を繰り返し、経路長を削減する。

Or-opt 法は、ある 2 つの経路間において、一方の経路上に他方の経路上の顧客を挿入し運搬車の総移動距離と使用台数を削減する局所探索手法である。図 2 のように経路 a, b, c, d と e, f について、ある部分経路 (b, c) を他方に挿入すれば運搬車の容量を超えず総経路長が減るとき新たな経路 a, d と e, b, c, f を生成する。このような操作を繰り返し、総経路長を削減し、ある経路からすべての顧客が無くなれば運搬車が削減される。

従来手法では、2-opt 法により各運搬車の経路長を削減し、Or-opt 法により総経路長と経路数 (運搬車数) を削減する。解法の流れを図 3 に示す。従来手法の構成は次のよ

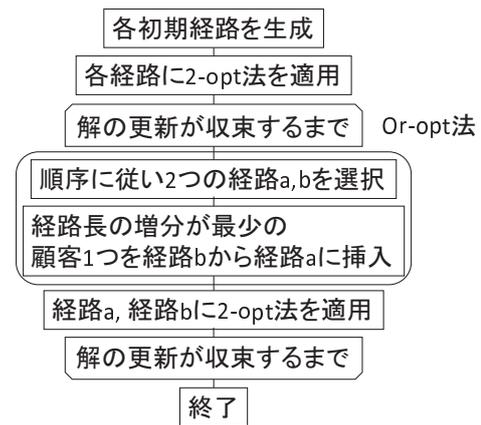


図 3 2-opt 法と Or-opt 法を組み合わせた局所探索手法の流れ

うである。

- (1) 初期経路を生成する。
- (2) 各経路に 2-opt 法を適用する。
- (3) ある経路順に従って 2 つの経路 a, b を選ぶ。
- (4) 経路 b の顧客を 1 つ選択し、経路 a の全顧客間に挿入した際の移動距離を算出する。
- (5) 経路長の増加が最も少ない顧客を経路 b から経路 a へ挿入する。
- (6) 経路 a, b に 2-opt 法を適用する。
- (7) 経路の更新がなくなるまで (3) からの操作を繰り返す。

2.3 経路長の不均衡

上記の従来手法では、各運搬車間の移動距離の間に偏りが生じる可能性がある。この手法では 2 つの経路を選択し、一方の経路の顧客を、他方の経路に挿入する操作を繰り返す。また、経路の挿入後に 2-opt 法で各経路長を削減する。このような操作では、経路の状況や選択の順序によって生じる経路間の偏りが抑制されない場合があると予想される。この状況は、実際の配送においては、従業員ごとに異なる長さの経路が割り当てが行われることに相当し、労働の配分として好ましくないといえる。

3. 提案手法

従来手法では各運搬車の経路に偏りが生じることが問題点として挙げられる。本研究では、最大移動距離の閾値を用いて、各運搬車の移動距離の均衡化を考慮するように手法を拡張し、その効果と局所探索への影響について検討する。また、局所探索による局所解への収束と、公平性と効率性のトレードオフとの関係の様子を分析するために、経路数すなわち配送に用いる運搬車数を固定した場合についても評価する。

3.1 経路長の平準化

経路長の平準化を考慮する最適化の指標として最大コスト最小化を導入する。例として、経路の集合 2 つに含まれ

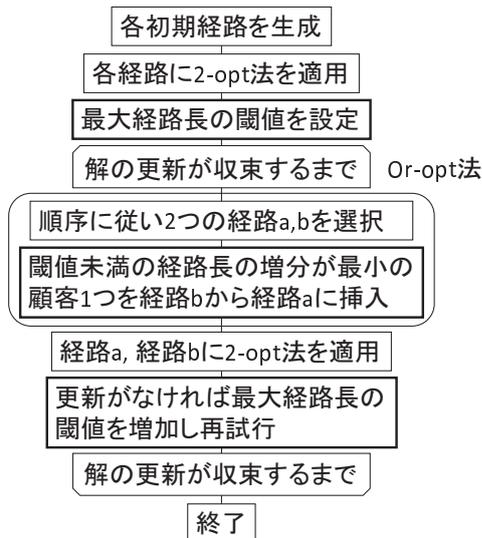


図 4 提案手法の流れ

各経路長の集合 $A = \{5, 1, 3, 10\}$ と、 $B = \{6, 4, 3, 7\}$ を考える。従来の総経路長は、 A では 19, B では 20 であることから、これらの経路集合間で総経路長に基づくコストは $A < B$ と評価される。最大経路長は、 A では 10, B では 7 であり、最大経路長に基づくコストは $A > B$ と評価される。このような最大経路長を最小化することが目的である。これは、複数の行商人が訪問を分担し、最大経路長を削減する minimax multiple TSP[7] と同様の問題設定である。最大経路長を削減するために、長い経路への顧客の挿入を制限し、経路長の均衡化を図る。ここでは従来手法のような局所探索における最大経路長抑制の効果と影響に注目する。

3.2 閾値による部分経路の交換の抑制

2-opt 法と Or-opt 法を組み合わせた従来手法、最大経路長の閾値を導入した解法について検討する。提案手法の流れを図 4 に示す。基本的には従来解法に閾値の処理を加えたごく簡単な拡張であり、変更点は次のようである。

- (1) 最大経路長の閾値を設け、初期値を設定する。最大経路長の初期値は各初期経路より大きいある程度の余裕を持つ値とする。本検討では予備実験により比較的良好な値を設定した。
- (2) 2つの経路間で部分経路を移動する際に、結果の各経路長がいずれも最大経路長の閾値以下であることを制約条件とする。
- (3) 経路の変更が無いときは、最大経路長の閾値を徐々に増加する。本検討では予備実験により比較的良好な増分を設定したが、経路の変更が発生するまで閾値を 1 増加しつづけた場合と大きな違いは生じなかった。

3.3 経路数を固定した場合の検討

上記の最大経路長の閾値を段階的に削減する局所探索で

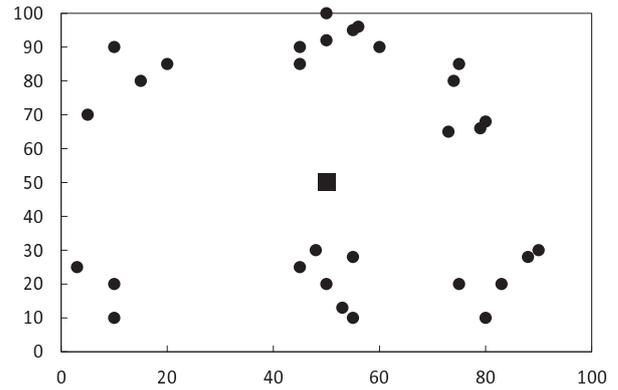


図 5 複数の地域ごとに固まった顧客の例

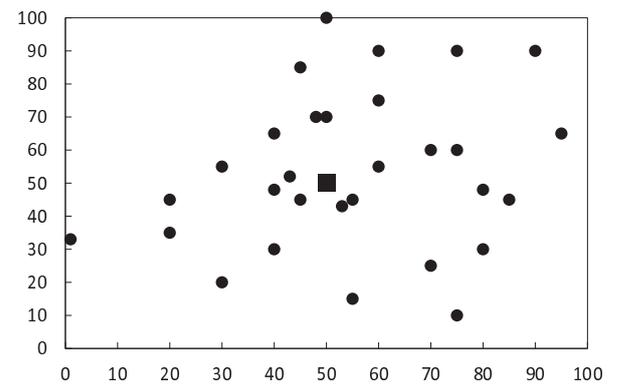


図 6 分散した顧客の例

は、従来解法が総経路長の削減を目的とすることから、最大経路長と総経路長の削減にある程度の折衷が得られると考えられる。その一方で、一般に効率性と公平性にはトレードオフがあり、最大経路長を抑制する限り総経路長が増加することは避けられない。また、本検討で扱う解法は局所探索に基づくものであることから、段階的な閾値の削減が Or-opt 法の局所解への収束を早める可能性があると考えられる。

そこで、最大経路長の閾値を用いる手法で、経路数(運搬車数)を予め固定する場合について検討する。従来手法で経路数を固定する場合との違いは、閾値により段階的な配分が行われることである。初期の検討として、ある範囲の経路数についての結果を調査する。

4. 実験と評価

4.1 設定

提案手法を実験により評価した。初期検討として次のような比較的小規模の例題を用いた。

- デポ数: 1
- 顧客数: 30
- 各運搬車の積載容量:100
- 各顧客が要する容量: $[1, 20]$ の乱数値

また、顧客の配置の影響を調べるために次の顧客の配置について評価した。

表 1 複数の地域ごとに固まった顧客での比較

最大移動距離		総移動距離		タイル尺度	
従来手法	提案手法	従来手法	提案手法	従来手法	提案手法
231.7	162.2	543.6	625.4	0.0196	0.0005

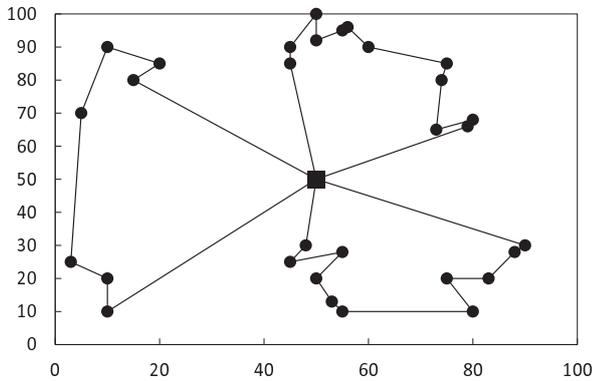


図 7 複数の地域ごとに固まった顧客での従来手法を用いた経路割り当ての例: 従来手法

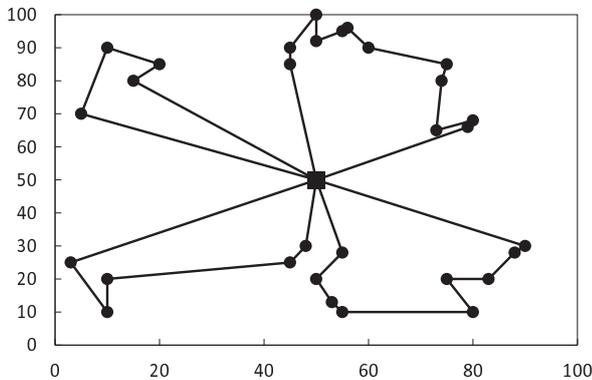


図 8 複数の地域ごとに固まった顧客での提案手法を用いた経路割り当ての例: 提案手法

- 複数の地域ごとに固まった顧客 (図 5).
 - 比較的一様に分散した顧客 (図 6).
- 次の手法を比較した.
- 2-opt 法と Or-opt 法を併用する従来解法.
 - 最大経路長の閾値に基づく拡張を加えた提案手法.

各解法により得られた経路を、総経路長、最大経路長、タイル尺度により比較した。タイル尺度はエントロピーに基づく不平等性の指標であり、 $i = 1 \dots n$ である n 個の d_i を比較するとき次のように表される。

$$T = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\bar{d}} \log \frac{d_i}{\bar{d}} \quad (1)$$

ただし、 \bar{d} は d_i の平均値である。タイル尺度は $[0, \log n]$ の値を取り、全ての経路長が等しければ 0 となる。

4.2 結果

4.3 経路数を段階的に削減する場合

経路数を段階的に削減する解法を用いた場合について評価した。複数の地域ごとに固まった顧客の配置における結

表 2 分散した顧客での比較

最大移動距離		総移動距離		タイル尺度	
従来手法	提案手法	従来手法	提案手法	従来手法	提案手法
176.1	150.3	562.7	570.9	0.0204	0.0009

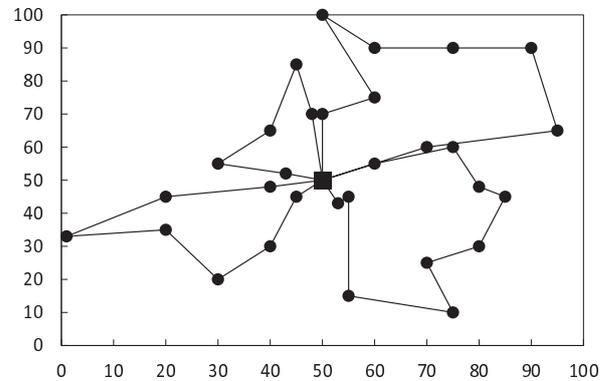


図 9 分散した顧客での従来手法を用いた経路割り当ての例: 従来手法

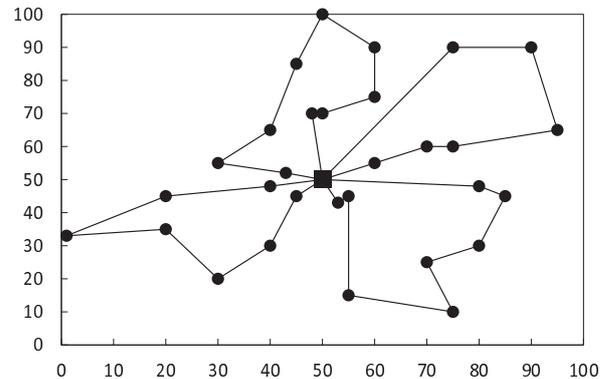


図 10 分散した顧客での提案手法を用いた経路割り当ての例: 提案手法

果を表 1 を示す。結果は 10 例の平均である。また、このときに得られた経路の例を図 7 と 8 に示す。従来手法と比較して、提案手法は最大経路長を削減し、不平等の尺度であるタイル尺度を削減した。その一方で総経路長は比較的顕著に増加した。従来手法と提案手法の経路の例を比較すると、経路数は従来手法が 3、提案手法が 4 であることが総経路長の差を大きくしている。総経路長の増加の原因には、効率性と公平性のトレードオフに加えて、局所探索による局所解への収束が影響している可能性が考えられる。

分散した顧客の配置における結果を表 2 を示す。また、このときに得られた経路の例を図 9 と 10 に示す。複数の地域ごとに固まった顧客の配置の結果と比較すると、提案手法は従来手法よりも最大経路長を削減し、タイル尺度を削減した。その一方で総経路長の増加は比較的抑制された。この原因には、効率性と公平性の両立が比較的容易であったことと、局所探索の際に、経路間での顧客の融通の自由度が高かったことが考えられる。

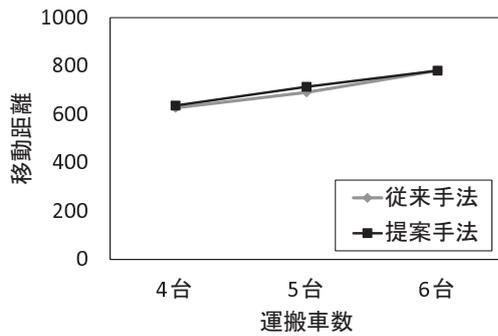


図 11 複数の地域ごとに固まった顧客での総移動距離

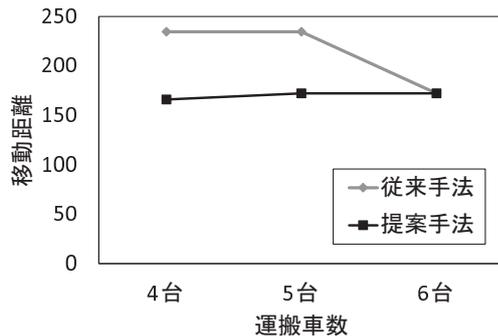


図 12 複数の地域ごとに固まった顧客での最大移動距離

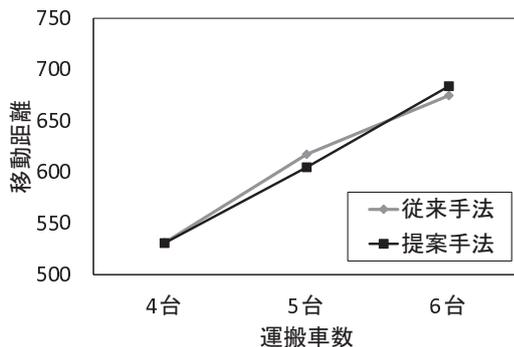


図 13 分散した顧客での総移動距離

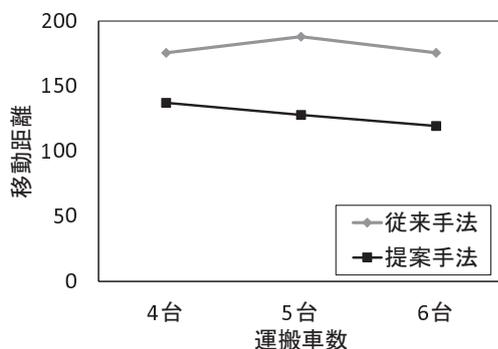


図 14 分散した顧客での最大移動距離

4.4 経路数を固定した場合

経路数を固定して各解法を適用した場合の結果を図 11～14 に示す。最大経路長と総経路長のトレードオフの関係がみられる場合もあるが、これらの結果では、前述の経路数

を段階的に削減する場合よりもそれらの影響が比較的小さい。このことは、前述の最大経路長の閾値を段階的に変更する局所探索の過程では、経路数を削減する際に、最大経路長を抑制したために、総経路長が比較的大きい局所解に収束する状況が起きたことを示唆していると考えられる。すなわち、問題によっては適切な経路数を選択できれば、経路数についての局所解が改善される余地があると考えられる。

5. まとめ

本検討では、容量制約付き配送経路計画問題において最大経路長を削減する場合に注目し、2-opt 法と Or-opt にもとづく局所探索を用いる従来解法において、最大経路長を削減するために最大移動距離の上限である閾値を導入する場合の影響について検討した。すなわち既存手法の Or-opt 法における経路間の顧客の移動において、特定の経路が閾値を超えることを制限した。また、閾値を段階的に増加した。これらにより移動距離の均衡化と総経路長の削減の両立を図った。

実験による初期検討の結果からは、最大移動距離が削減され、公平性が改善される効果が見られた。その一方で、総移動距離が増加するトレードオフの傾向もあった。また、経路数すなわち運搬車数を固定した場合の、使用台数に対する各経路の解品質についても実験的に評価した。この結果からは、適切な経路数を選択することにより、経路数の局所解を改善する余地があることが示唆された。山登り法の局所解を回避しつつ総経路長を抑制できるように、適切な経路数を探索する手法の検討がさらに必要であると考えられる。

今後の展望は以下のようなものである。まず、顧客の数や配置に応じて局所解を回避しつつ適切な使用運搬車数を最適化する手法の導入が挙げられる。また、運搬車の積載容量が異なる場合や、再配達が生じる場合などの現実的な問題についての検討や、運搬車間での非集中型の調整を用いる最適化の検討も今後の課題である。

謝辞 本研究の一部は科研費基盤 (C) JP16K00301 による。

参考文献

- [1] Clarke, G. and Wright, J. W.: Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points., *Operational Research* (1964).
- [2] E. Taillard, P. Badeau, M. G. F. G. and Potvin, J. Y.: A parallel tabu search heuristic for the vehicle routing problem with time windows, *Trans. Science* (1997).
- [3] I. Or, P. D. t.: Traveling Salesman-type combinatorial problems and their relations to the logistics of regional blood banking, *Integer Programming and Related Areas A Classified Bibliography 1976-1978* (1976).
- [4] M. Hasegawa, T. I. and K. Aihara, P. R. L.: Combination

- of Chaotic Neurodynamics with the 2-opt Algorithm to Solve Traveling Salesman Problems, *PhysRevLett* (1997).
- [5] T. Vidal, T. G. Crainic, M. G. and Prins, C.: Heuristics for Multi-Attribute Vehicle Routing Problems, *European Journal of Operational Research*, Vol. 231 (2013).
- [6] 船山郁馬: 容量制約付き配送計画問題に対する 2-opt 法と Or-opt 法を用いた解法, *Report of Researches, Nippon Institute of Technology*, Vol.45, No.1 (2015).
- [7] 原恒介: minmax 型 m 人巡回セールスマン問題の解法に関する研究, 公益社団法人日本都市計画学会都市計画論文集 (2017).