

MaaS普及下における複数モードの乗継ぎが 最適バス路線計画に与える影響分析

山木 聡一郎¹・杉浦 聡志²

¹学生会員 北海道大学大学院 工学院北方圏環境政策工学専攻 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8)

E-mail: so_yamaki127@eis.hokudai.ac.jp

²正会員 北海道大学大学院准教授 工学研究院 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8)

E-mail: sugiura@eng.hokudai.ac.jp

人口減少下の地方都市における持続可能なバスサービス実現のためには、運行コストを抑え、かつ乗客にとって高いサービス水準を提供できる路線網構築が求められる。一方、近年注目されるMaaSではタクシーやシェアリングサービスなどの個別型モードとの融合により効率化が期待される。そこで、MaaS普及下においてシステム全体として効率化させるためのバスの役割に着目する。本研究では、バスと個別型モード間の乗換が容易になった状況における路線網の概形に着目する。具体的には、OD需要を入力とし、地域全体の乗客費用を最小化するネットワークデザイン問題を構築し、挙動を確認したうえでMaaSの影響について簡単な分析を行う。

Key Words : public transport, transit network design, metaheuristics, MaaS

1. はじめに

近年、我が国の多くの地方都市では、路線バスの輸送人員が減少しており、これに運転手不足等の要因も加わって、バス路線網の持続的な運営が困難な状況となっている。この状況の改善のためには、運行費用を抑え、かつ乗客にとって高いサービス水準を提供できるような路線網構築が重要となる。一方で近年、多様な交通モード間をシームレスに連携し、移動を1つのサービスとして実現するMaaS (Mobility as a Service) の概念が注目されている。この中にはタクシー、デマンド型交通、シェアリングサービスなどの「個別型モード」が含まれるが、輸送効率や道路容量、その他社会的費用の制約から、都市内におけるすべての移動が個別型モードに置き換わることは現実的でない。そこで、MaaS普及下における路線バス等のマストランジットの役割に着目する必要がある。

従来、バスを中心とした公共交通ネットワークに関する研究は、モード間・モード内の乗換抵抗が大きいとの前提のもとで、乗客を単一モードの直行便で輸送するようなものが多かった。しかし、バスを含むマルチモーダルな乗換検索の普及や各種施策によって乗換抵抗が小さくなり得るため、MaaS普及時にはこれまでとは大きく異なる前提での議論が求められる¹⁾。

本研究では、小さな乗換抵抗を前提とした際の地域全

体のネットワークデザイン問題を取り扱う。具体的には、バス路線網を操作変数として、乗客の総旅行時間が最小となる路線網を導出する。このとき、バス路線網のほか、個別型モードが存在する公共交通網を想定し、MaaS導入状況に応じた複数のシナリオに対して数値実験を行う。入力するOD需要はMany-to-Manyとし、モード間およびバスどうしの乗換を想定する。Ibarra-Rojas et al.²⁾によれば、バス路線網計画は様々な因子が関係する複雑な問題であり、中長期的な路線網の概略設計に関する問題と、短期的でより詳細な運転手・車両のスケジューリング問題や時刻表問題に大別される。本研究では中長期的な路線網の概略設計に着目し、交差点の右左折等の詳細経路や運転手・車両のスケジューリングは考慮しない。

本研究で扱う問題は組合せ最適化問題であり、決定変数の組合せは無数に存在する。そのため、ネットワークにおいて厳密な大域的最適解を探索することは、非現実的な制約を設けない限り困難である³⁾。本研究では、予め検討する路線候補を作成することで探索範囲を制限し、そのうえで現実的な計算時間内で実行可能な近似解を求める方針をとる。求解にはメタヒューリスティクスの一環であるBee Colony Optimization (以下、BCO) を用いる。乗客の行動原理は、乗換抵抗が小さいとの仮定の下で期待所要時間が最小となる経路を選択するcommon lines problem⁴⁾の考え方を援用する。計算負荷軽減のため、道

路混雑による所要時間変化は考慮しない。

本研究の目的は、構築した公共交通路線網デザイン問題の求解をとおして、MaaS 普及後の小さな乗換抵抗やモード間の乗換を考慮したときの公共共通ネットワーク全体の概形や特徴について考察することである。それに付随する第二の目的は、上記の状況を考慮したうえで、現実の中長期的な路線再編計画の一助となるような、拡張性の高い公共交通路線網デザイン問題を提供することである。提案手法は様々な形状の都市に適用可能であり、鉄道など速度の異なるモードとの相互乗換にも対応している。路線候補には現行路線やプランナーの意思による路線など様々な形態を含めることができる。

2. 既往研究の整理と本研究の位置づけ

(1) MaaS普及後の公共交通ネットワーク

MaaS 普及後の公共交通ネットワークについては、マストランジットと個別型モードの棲み分けや運賃制度など多様な観点からの研究が近年盛んに行われている。富岡ら⁹⁾は、路線バスとライドシェアの組合せについて、総デマンド化、階層化の計2つのサービス形態のシナリオと人口分布のシナリオを設定したシミュレーションを行い、運行費用と乗客の旅行時間の観点から比較を行っている。ただし、バス路線網は予め設定されたものが用いられている。長谷川・鈴木¹⁰⁾は、市町村域内の Many-to-Many の需要を想定し、バスとデマンド型交通について、前者の総路線長を増減させたときの後者の台数や総走行距離、両者合計の運行経費やCO₂排出量の増減を分析している。乗客はOD間バスで結ばれた時にバスを利用し、結ばれない場合はデマンド型交通を利用するとの仮定が置かれている。バス路線網は総路線長制約や迂回率制約の中で乗客の捕捉率を最大にするように設計される。ただし、旅行時間に基づく路線設計や評価は行われておらず、乗換も考慮されていない。須ヶ間・奥村¹¹⁾は、大都市圏郊外の駅勢圏を想定し、個別型モードを私的交通として運営する場合と、運営資金も含めてバスと一体的な公共交通として運営する場合の比較を行っている。地域の社会的総余剰最大化を目的関数とする混合整数二次錐計画問題の定式化が行われ、各ケースの最適解について、バス型モードの路線形状、バス型モードと個別型モードとの間の需要分担状況、社会的総余剰の地点間格差などの分析がなされた。ただし、バス型モードは1路線のみとされたうえ、モード内・モード間を問わず乗換が考慮されていないなど、路線網や乗客行動に強い仮定がおかれている。上原ら¹²⁾は、地方都市およびその郊外地域を想定し、デマンドバスの Dial-a-Ride 問題の計算コスト軽減を目的とした階層型システムを提案してい

る。これは、デマンドバスによって乗客をデポに集約したうえで、デポ間に協調バスを走らせるもので、ADARTW と呼ばれるアルゴリズムによって経路設計・スケジューリングが行われている。実ネットワークでのシミュレーションの結果、実際に運行されていた固定路線バスと比較して乗客の旅行時間を削減できる一方、必要な車両台数が大幅に増大することが示唆された。倉内ら¹³⁾は、バスの運賃体系に着目し、乗換毎に均一料金が発生するケースと、ゾーン固定運賃制度が導入され、乗換時に新たな料金が発生しないケースの比較を行っている。所与の路線網において、ケース毎に common lines problem に基づく乗客配分を行い、後者のケースのほうが期待所要時間が小さくなることが示唆された。

従来の研究は、予め路線網を与えたものに関しては、複数路線が並行する現実的な路線網、乗換を考慮した現実的な乗客行動といった要素を考慮した分析がされる一方、路線網形状そのものを操作変数に含めたものに関しては、現実的な路線網や乗客行動が十分に考慮されるとは言い難い。以上より本研究は、次項で述べるネットワークデザイン問題のアプローチにより、MaaS普及後の公共交通ネットワークデザインにおいて路線網形状を操作変数に含み、かつ現実的な路線網や乗客行動を考慮した分析を行う点に新規性を有する。

(2) NDPを用いたバス路線計画

公共交通ネットワークにおいて、路線網の概形など中長期的な運行戦略を設計するネットワークデザイン問題は TRNDP (Transit Route Network Design Problem) と呼ばれ、多くの研究者によってモデルが提案されてきた。Ibarra-Rojas et al.¹⁴⁾は、連続的アプローチと離散的アプローチに分類のうえ、広範なレビューを与えている。

宮城ら¹⁰⁾、Farahani et al.¹¹⁾によれば、TRNDP は多くの場合、leader-follower 問題と呼ばれる bi-level 最適化問題として定式化できる。これは、上位問題において計画者の政策決定を、下位問題において乗客の行動をそれぞれ表現したものである。上位問題で計画者の視点から路線網を構築し、その路線網に従って下位問題で乗客が自らにとって最適な経路を選択する。この問題の概念図を図-1に示した。上位問題の目的関数は、乗客の総旅行時間または一般化費用の最小化¹²⁾、乗客費用と運行費用の重みつき和の最小化¹³⁾¹⁴⁾¹⁵⁾¹⁶⁾¹⁷⁾、乗換回数¹⁸⁾の最小化¹⁹⁾などが提案されている。Iliopoulou et al.¹⁹⁾によれば、運行費用は総路線長や総所要バス台数によって評価される場合が多く、一部の研究では乗客費用との間のパレート解の形で求められている。

下位問題において運行頻度に基づく待ち時間を考慮して乗客配分を行った TRNDP の研究としては、単一の最短経路を選択すると仮定したもの¹³⁾、複数の魅力的な経

路を含む経路集合の中から確率的に選択すると仮定したものに大別できる。後者はさらに、乗換回数のできるだけ少ない経路のうち旅行時間が閾値以下となるものによって経路集合を構成する **frequency share rule** を用いたもの¹²⁾¹⁴⁾²⁰⁾、乗換回数を問わず期待旅行時間を最小化する経路の組み合わせによって経路集合を構成する **common lines problem** を用いたもの¹⁵⁾¹⁶⁾¹⁷⁾¹⁸⁾に分類できる。

本研究では、乗換を前提とした路線網の評価を行うため、乗換回数最小化を目的関数とするのは適当でない。よって乗客の費用最小化を目的関数とする問題を構築し、乗客配分においては乗換回数の異なる複数経路を同時選択可能な **common lines problem** の考え方を援用する。上位問題および下位問題の目的関数が同様であるため、問題は **bi-level** ではなく **single-level** となるが、将来的に上位問題の目的関数を拡張し **bi-level** 問題として記述できるような構造および解法を用いる。乗客の費用最小化または乗客費用と運行費用の重みつき和の最小化を目的関数とし、かつ乗客配分で **common lines problem** を考慮した研究は、Shimamoto et al.¹⁵⁾、Cipriani et al.¹⁶⁾ および Huang et al.¹⁷⁾ がある。

TRNDP の解法は、Kepaptsoglou and Karlaftis²¹⁾によれば、予め路線候補を生成したうえでそれらの組合せを検討する方針と、路線そのものの修正を重ねる方針に大別できる。例として、Arbex and Cunha¹⁴⁾、Cipriani et al.¹⁶⁾ および Huang et al.¹⁷⁾ は前者の方針を、Buba and Lee¹²⁾、間島ら¹³⁾、Shimamoto et al.¹⁵⁾、Szeto and Jiang¹⁸⁾ および Nikolic and Teodorovic²⁰⁾ は後者の方針をそれぞれ採用している。なお、Shimamoto et al.¹⁵⁾ および Szeto and Jiang¹⁸⁾ は、起終点が一方向に定められた特殊なネットワークへの適用にとどまっている。本研究では将来的に現行路線やプランナーの意思による路線を評価対象に組み込めるような拡張性の高いモデルとするため、前者の方針を採用する。TRNDP の解法としてメタヒューリスティクスを用いたモデルに

ついては、Iliopoulou et al.¹⁹⁾によってレビューが与えられ、手法間での比較が行われている。

3. モデルの構築

(1) 最適バス路線計画問題の定義および仮定

本研究では、バスと個別型モードの2種類の交通モードが存在するネットワークにおいて、Many-to-ManyのOD需要、リンク旅行時間、総バス台数、車両定員および各モードに特有の費用（運賃等）が与えられた際に、総旅行時間を含む乗客費用が最小となるバス路線網を最適として定義する。

本研究では、需要は停留所を表すノード単位で発生するものとし、面的な需要分布やそれに伴うアクセス・イグレスは考慮しない。需要が安定的となる時間帯を対象として、計画時間幅当たりの需要とバスの運行本数を考える。また、交通モードとしてバスおよび個別型モードのみが存在するとし、その他のモードとの間の分担は考慮しない。すなわち、公共交通を利用するOD需要は既知とする。また、すべてのOD需要が満たされるものとする。リンク旅行時間は道路混雑によらず一定とする。バスおよび個別型モードのサービスは以下の仮定に従う。

- ・ バスは時刻表ベースではなく頻度ベースで運行される。
- ・ バス路線は必ず往路の逆向き経路を復路で通過する。バスの車両は路線毎に専属であり、十分に短い折返し時間のもとで往復を繰り返す。
- ・ 計画時間幅当たりのバス運行本数は整数とする。
- ・ 個別型モードはネットワーク中の全ノードペア間にリンクを持つ完全グラフ状のサービスを提供し、ノードペア間に張られたリンクに持たせるリンク旅行時間の値は道路網上の最短経路の所要時間とする（図-2）。
- ・ 各モードとも、ノードすなわち停留所での停車時間は考慮しない。

また、総旅行時間を含む乗客費用の導出には乗客が実際に利用する経路の導出、すなわち乗客配分（transit assignment）が必要となる。それに関して以下の仮定をおく。

- ・ OD間に複数経路が存在する場合、乗客はそれらの所要時間を含む費用を認知しており、それに基づく行動を行う（(2)節で詳説）。
- ・ 乗客行動において、個人間の選択特性の異質性は考慮しない。すなわち、MaaS普及下において、サブスクリプションの加入者・非加入者が混在するような状況は想定しない。
- ・ 運行頻度には余裕があり、積残しは発生しない。

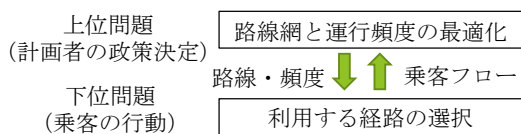


図-1 TRNDPにおける leader-follower 問題の概念図

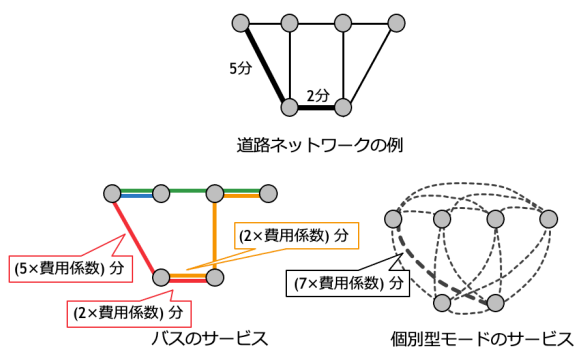


図-2 想定するバスおよび個別型モードのサービス

(2) 乗客配分

頻度ベースで運行される公共交通ネットワークにおいて乗客配分を行う場合、配分先として複数経路を選択可能とするほうが単一経路のみ選択する場合よりも早く目的地に到達できる場合があるという特性が指摘されている²⁾。例えばある OD 間において、本数の少ない直行路線を用いる経路と本数が多いが乗換を要する路線を用いる経路があった場合、片方の経路だけを利用するという行動戦略よりも、先に停留所に到着したものを利用するとした行動戦略をとる方が期待待ち時間が小さいため、OD 間の期待所要時間が小さくなる可能性がある。本研究では、この「先に停留所に到着した車両に乗る」という行動を仮定して、目的地への期待所要時間が最小となる戦略を求める common lines problem の考え方を援用する。この問題の定式化を提案した研究はいくつかある。Spiess and Florian²⁾は、フロー保存を用いた線形計画問題による定式化を提案している。Kurauchi et al.²³⁾は、容量制約を考慮した定式化を行い、マルコフ配分による解法を提案している。本研究では NDP への適用を行うことから、計算負荷を考慮し、線形計画問題として求解可能な Spiess and Florian²⁾の定式化を援用する。Spiess and Florian²⁾によれば、頻度を十分に大きな値 M とすることで徒歩など頻度を持たない交通モードも考慮可能であり、本研究ではこの考え方を援用して個別型モードを考慮する。

乗客配分は、元の道路網を図-3のような路線別のリンクを持つ静的ネットワークに変換し、この上でのフロー保存により求解する。停留所ノードは道路網のノードに相当する。バスに関するリンクは、路線が存在する場合に設ける。一方で個別型モードに関するリンクは、乗車リンク・路線リンク・降車リンクのまとまりがすべての停留所ノードを接続するように設ける。各リンクには表-1のようにコスト c_a および運行頻度 f_a の属性を与える。ただし、モード間の差別化を考慮したシナリオ設定のため、リンクに与える費用係数や初乗り運賃相当のコストにはモード別に差異を設ける。乗換リンクは、乗換回数の評価や乗換ペナルティ設定のために設けたものである。アクセス/イグレスリンクは、実装を容易にするために便宜上設けたものであり、本研究ではそれらのコストは 0 とした。すなわち、需要は面的に発生せず停留所単位で発生するという仮定に従う。計算負荷が許すのであれば、アクセス/イグレスリンクを所要時間等を調査したデータのもとで拡張することは容易に可能である。

(3) 定式化

以下に、定式化に用いる記号を示す。

- I : 乗客配分用ネットワークのノード集合。
- I' : 停留所ノードのうち乗車リンクに接続しているものの集合。 $I' \subset I$

表-1 各リンクに設定される属性値

リンクの種類別	コスト c_a	運行頻度 f_a
路線リンク	リンク旅行時間 ×費用係数	0
乗車リンク	初乗り運賃相当 のコスト（単位： [分]）	バス：運行頻度設定 で得られた値 個別：Big M
降車リンク	0	0
乗換リンク	乗換ペナルティ	0
アクセス/イグレスリンク	0	0

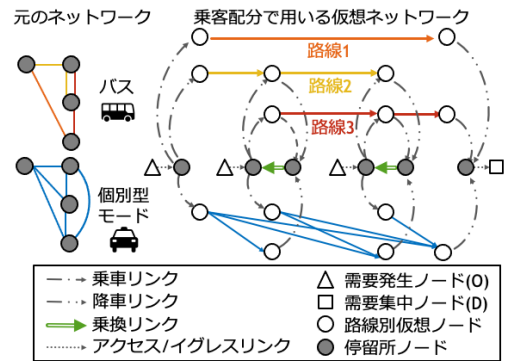


図-3 乗客配分で用いる静的ネットワーク表現

- A : 乗客配分用ネットワークのリンク集合
- A_i^+, A_i^- : ノード i を起点、終点とするリンクの集合。 $A_i^+, A_i^- \subset A$
- A^l : バス路線 l に属するリンク集合。 $A^l \subset A$
- A^{taxi} : 個別型モードに属するリンク集合。 $A^{taxi} \subset A$
- A^{line} : 路線リンクの集合。 $A^{line} \subset A$
- A^{board} : 乗車リンクの集合。 $A^{board} \subset A$
- G : 道路ネットワークのノード集合。
- v_a^e : リンク $a \in A$ を通る乗客フローのうち目的地 $e \in G$ に向かうもの
- ω_i^e : ノード $i \in I'$ における目的地 $e \in G$ に向かう乗客の総待ち時間（ノードを通過する人数および待ち時間の積）
- c_a : リンク $a \in A$ に設定された費用
- f_a : リンク $a \in A$ に設定された運行頻度
- d_i^e : ODペア (i, e) の需要（所与の定数）
- L : バス路線 l の集合。集合に含まれる路線候補は(5)節の方法で特定する。
- r : 解候補となる路線 l の集合。 $r \subseteq L$ である。
- R_{max} : バス路線網に配置する路線最大数
- f_l : バス路線 l の運行頻度、すなわち単位時間幅 \hat{t} あたりの運行本数（整数）
- $v_{a_{max}}^l$: バス路線 l の最大リンクフロー
- ϕ_{max} : バスの乗車率 ϕ の上限値（所与の定数）
- k_{cap} : バス車両定員（所与の定数）
- λ_l : バス路線 l に割り当てる台数
- T_l : バス路線 l の片道運行時間
- T_{max}, T_{min} : T_l の上限および下限（所与の定数）
- \hat{t} : 計画の対象時間幅（所与の定数）

Λ_{max} : 総バス台数 Λ の上限値 (所与の定数)

問題の定式化を式(1)-式(10)に示す. 式(1)は目的関数であり, r および f を操作変数とし, 総旅行時間を含む乗客費用の総和最小化を表す. 乗客費用は式(1)-式(6)に示した乗客配分 (Spiess and Florian²²⁾の線形計画問題)によって得られる. 乗客配分の操作変数は v および ω である. 式(2)はフロー保存制約を, 式(3)は, 停留所にいる乗客が, 戦略に含まれる路線のうち最初に到着したものに乗り, すなわち停留所ノードの乗客が, 運行頻度に比例して各路線リンクに配分されることをそれぞれ表現している. 本研究では乗客のポアソン到着を仮定しているため, 式(3)の表現を Spiess and Florian²²⁾から改変し, 期待待ち時間は運行頻度の逆数を2で割ったものとする. 乗客配分を目的地毎に解くことで, 路線別のリンクに配分された乗客フローと, OD間の期待所要時間が求められる. 式(7)-(9)は乗車率に応じて運行頻度を内生的に決定するための制約であり, この詳細は(7)節で述べる. 式(11)の制約は個々のバス路線の路線長 T_l に上限値と下限値が設けられていることを表す.

$$\min_{r,v,f,\omega} \sum_{a \in A} c_a v_a^e + \sum_{i \in I'} \sum_{e \in G} \omega_i^e \quad (1)$$

subject to

$$\sum_{a \in A_i^+} v_a^e = \sum_{a \in A_i^-} v_a^e + d_i^e, \quad \forall i \in I, \quad e \in G \quad (2)$$

$$v_a^e \leq \frac{2f_a \omega_i^e}{\hat{t}}, \quad \forall a \in A_i^+, \quad i \in I', \quad e \in G \quad (3)$$

$$v_a^e \geq 0, \quad \forall a \in A, \quad e \in G \quad (4)$$

$$\omega_i^e \geq 0, \quad \forall i \in I', \quad e \in G \quad (5)$$

$$f_a = \begin{cases} f_l & \text{if } a \in A^l \cap A^{board}, \quad \forall l \in r \\ M & \text{if } a \in A^{taxi} \cap A^{board} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

$$\frac{\sum_{e \in G} v_a^e}{f_l k_{cap}} \leq \phi_{max}, \quad \forall a \in A^l \cap A^{line}, \quad l \in r \quad (7)$$

$$\lambda_l \geq \frac{2f_l T_l}{\hat{t}}, \quad \forall l \in r \quad (8)$$

$$\sum_{l \in r} \lambda_l = \Lambda_{max} \quad (9)$$

$$|r| \leq R_{max} \quad (10)$$

$$T_{min} \leq T_l \leq T_{max}, \quad \forall l \in L \quad (11)$$

(4) 全体アルゴリズム

求解は図-4に示した手順で行われ, 大きく二段階に分けられる. 第一段階では, バス路線の候補を大量に生成し, 候補路線の集合を作成する. この集合をストレージと呼ぶ. 第二段階では, ストレージから幾つか路線を選んで路線網を構築し, 構築した路線網において乗客配分と運行頻度設定を繰り返すことで目的関数の評価値を得る. 得られた評価値を用いてBCOが新たな路線網の構築を行うことで, 解の探索が進む. 乗客配分用の静的ネッ

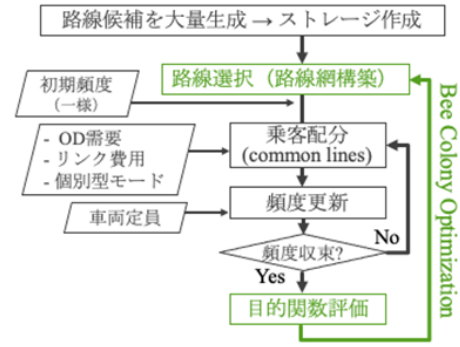


図-4 求解フロー

トワーク (図-3) は, BCOにより路線網が改変されるたびに新たなものが生成される (リンク集合 A やノード集合 I , それらに付随する変数が再定義される). 各プロセスの詳細は次節以降で述べる.

(5) 路線候補の生成

路線候補は, Yenのアルゴリズム²⁴⁾によって, 各ノードペア間において k 番目までの最短経路を列挙することで生成する. k の値は式(12)のようにノードペア (i, j) 間の最短経路の経路長 h_{ij} に応じて内生的に与える. ここで, h_{max} は h_{ij} の最大値を, γ および ϵ は外生的に与えるパラメータをそれぞれ表す.

$$k_{ij} = \left\lceil \gamma \left(\frac{h_{ij}}{h_{max}} \right)^\epsilon \right\rceil \quad (12)$$

生成された路線群は式(11)の路線長制約の条件を満たさないものや重複を除去したうえで路線候補の集合 (ストレージ) に追加され, 各路線にIDを付与する.

(6) BCOアルゴリズム

Bee colony optimization (BCO)あるいは Artificial bee colony (ABC)とは, メタヒューリスティクスのうち群知能と呼ばれる最適化アルゴリズムのひとつである. ミツバチの採餌行動を模したもので, 他手法と比較して制御パラメータ数が少ないという特徴を持つ. 元々は連続関数の最適化向けに開発されたものであるが, 離散問題に適用するため, 何通りかの手法が提案されており, TRNDPの分野では, 近傍探索と解の取捨選択, およびすべての解の初期化を所与の回数だけ繰り返すものを Nikolic and Teodorovic²⁰⁾が, 3種の蜂 (雇用蜂, 見物蜂, 偵察蜂)の働きによって解の探索を進めるものを Huang et al.¹⁷⁾, Szeto and Jiang¹⁸⁾がそれぞれ援用している. 本研究では, ストレージからの路線抽出過程で後者のタイプを援用する. なお, Nikolic and Teodorovic²⁰⁾および Szeto and Jiang¹⁸⁾は, 路線そのものの改変に BCO を用いた点で本研究と異なる.

BCOの実行に際し, まず図-5のようにランダムな路線IDを要素とし, 最大路線数 R_{max} を次元数とするベクトル $x_i = [x_{ij}]$ を N_s 個生成する. N_s の値は予め設定する.

$i \in \{1, 2, \dots, N_s\}, j \in \{1, 2, \dots, R_{max}\}$ であり、 x_i は路線網すなわち解を表す。次に、 N_s 匹の雇用蜂と N_s 匹の見物蜂が、1匹につき1回の近傍探索を行う。ここで近傍探索とは、ある解 x_i を対象とし、近傍解 $x_{i,new}$ を生成して目的関数値 $obj(x_{i,new})$ の評価を行い、 $obj(x_{i,new}) < obj(x_i)$ の場合に x_i を $x_{i,new}$ に更新する処理を指す。雇用蜂は N_s 個の解に1匹ずつ配備されるのに対し、見物蜂は、雇用蜂によって得られた評価値を用いたルーレット選択により、高い評価の解に多く集まる。なお、各解には目的関数が更新されなかった回数 $trial_i$ という属性が与えられている。近傍探索によって解が更新された場合は0とされ、されなかった場合はその都度+1される。最後に、偵察蜂によって $trial_i$ の確認が行われ、予め定めた閾値 $limit$ を超えていた場合、 x_i のすべての要素 x_{ij} を全く新しい路線IDに置き換える処理が行われる。このような雇用蜂、見物蜂、偵察蜂の一連の過程を1回の反復とし、これを予め定めた反復回数 N_{MC} に達するまで行う。

本研究では、富樫ら²⁵⁾によって提案された離散問題向けの近傍探索手法を援用し、近傍解 $x_{i,new}$ は、ランダムな値 $k \in \{1, 2, \dots, N_s\}, m \in \{1, 2, \dots, R_{max}\}$ を用いて図-6のように、 x_{im} を x_{km} の値に置き換えることで生成する。

(7) 運行頻度設定

既往研究ではルートと運行頻度の同時最適化を行ったものもあり、Shimamoto et al.¹⁵⁾, Huang et al.¹⁷⁾およびNikolic and Teodorovic²⁰⁾は運行頻度（または各路線に割り当てる台数）を組み込んだ決定変数のベクトルをGAまたはBCOに与えている。また、Szeto and Wu²⁶⁾は、各路線網に対し、割当台数を路線間で1台のみ増減させた複数パターンを生成して評価関数を算出している。しかし解空間の広さと計算負荷はトレードオフであり、起終点固定等の制約のないネットワークでは現実的な時間内に十分な収束が期待できない可能性がある。そこで、本研究では同時最適化は行わず、乗車率等の制約条件を満たす運行頻度の組合せを各路線網に対して内生的に決定する。

運行頻度設定には、Baaj and Mahmassani²⁷⁾によって提案され、Cipriani et al.¹⁶⁾などが援用している反復法を用いる。まず路線網に対し、一様に与えた運行頻度の初期値を用いて乗客配分を行い、路線別リンクフローを得る。次に、路線毎に最も混雑する区間の乗車率 ϕ （式(7)左辺から得られる）が均等になるように、総バス台数制約のもとで各路線に台数を割り当て、式(8)により運行頻度を更新する（図-7）。その後、更新した頻度を用いて再び乗客配分を行い、更新前と更新後の運行頻度が一定となるか、一定の反復回数に達するまで反復を続ける。なお、最終的に得られた乗車率 ϕ_l が許容値 ϕ_{max} を超えた場合は実行不能とし、目的関数値を99999とする。

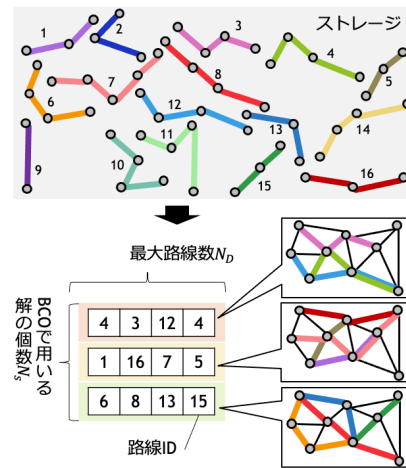


図-5 BCOにおける解の表現方法

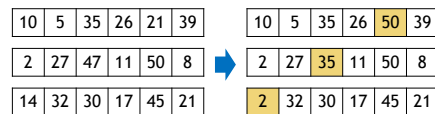


図-6 本研究のBCOにおける近傍探索（要素は路線ID）

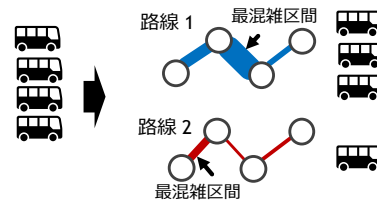


図-7 運行頻度更新の例（総バス台数 $\Lambda_{max} = 4$ の場合）

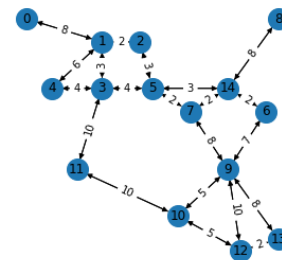


図-8 Mandl ネットワーク²⁸⁾
(リンクに付与されたラベル：リンク旅行時間)

4. 数値計算

構築したNDPを、15ノード・21リンクからなるMandlネットワーク²⁸⁾（図-8）に適用する。これはTRNDPの研究においてベンチマーク問題として広く用いられており、15,570トリップのOD需要が与えられている。計算条件はBuba and Lee¹²⁾に倣い、乗換ペナルティ（乗換リンクのコスト）5分/回、乗車率の上限値 $\phi_{max} = 1.25$ 、バスの定員 $k_{cap} = 40$ 、運行頻度の下限値1本/hとする。路線候補はパラメタ $\gamma = 13$ および $\epsilon = 1.5$ を用いて409路線生成し、運行頻度設定の最大反復回数（更新回数）は6回、初期頻度は5本/時、個別型モードの乗車リンクに与える頻度（Big M）は12とする。BCOで用いるパラ

メタは解の個数 $N_s = 20$ ，偵察蜂が行動開始する未更新回数の閾値 $limit = 10$ ，反復回数 $N_{MC} = 150$ とする。なお，メタヒューリスティクスの特性上，実行毎に異なる解が出力されるため，BCO全体を5回繰り返し実行する。プログラムはPython 3.8で実行し，乗客配分の線形計画問題の求解にはGurobiを用いる。

(1) ベンチマーク問題における試算（バスのみを想定）

本節では，提案手法の解探索方法が適当であるか確認するため，バスのみの路線網構築によってベンチマーク問題の既往研究 Buba and Lee¹²⁾および Nikolic and Teodorovic²⁰⁾との比較実験を行い，得られる解を検証する。バスのみを考慮するため，各モードに与えるパラメタは表-2のシナリオ0とする。評価指標は，乗客の総旅行時間TTT（乗換ペナルティ込），総バス台数（必要バス台数） Λ ，乗換0回・1回でそれぞれ移動できる乗客の割合 d_0 ， d_1 ，乗換2回以上で移動できる乗客の割合 d_2 とする。

Buba and Lee¹²⁾は，乗客総旅行時間および乗換2回以上の乗客数の加重和の最小化を目的関数とする一方，Nikolic and Teodorovic²⁰⁾は，乗客総旅行時間，乗換3回以上の乗客数および必要バス台数の加重和の最小化を目的関数としている。両研究とも，乗客配分には乗換回数のできるだけ少ない経路を戦略に含める frequency share ruleを用いており，本研究と異なるため，単純比較は困難である。そこで，common lines problemによる解の再評価（B., C.およびD.）を含む4通りを比較対象とする。

- A. 論文記載の結果（評価指標を含む）を引用。
- B. 論文記載の路線網および割当台数の結果を用い，乗客配分（common lines problem）に入力することで評価値を得る。
- C. 論文記載の路線網に，総バス台数 $\Lambda_{max} = 99$ として3章(7)節の運行頻度設定手法を適用。初期頻度は5本/時とする。
- D. 論文記載の路線網に，総バス台数を各路線の許容乗車率制約が満たされる最低限の台数として，3章(7)節の運行頻度設定手法を適用。初期頻度は5本/時。

一方，提案手法の実行に際しては，割当手法は，C.およびD.に準ずるものとする。

$R_{max} = 4$ のときのBCOの解の更新状況を図-9に示す。反復回数 $N_{MC} = 150$ に達するまでの計算時間はWindows 10 Home, AMD Ryzen 5600X, DDR4-2666 32GBの環境において平均488秒（標準偏差4.94）であった。

次に，5回繰り返し実行したうちの最良解と既往研究との比較を行った結果を表-3にまとめた。赤字で示したものは総バス台数が上限値 Λ_{max} を超えているか，乗車率が上限値 ϕ_{max} を超えており，実行不可能となった解である。また，最適解となった路線網の一部を路線図形式で図-10に示した。色分けされたリンクはバス路線を

表-2 各モードに与えるパラメタ（個別：個別型モード）

	路線リンクの費用		乗車リンクのコスト	
	係数		ト	
	バス	個別	バス	個別
シナリオ0	1	100	0分	100分
シナリオ1	1	3	0分	10分
シナリオ2	1	1	0分	10分
シナリオ3	1	1	0分	30分

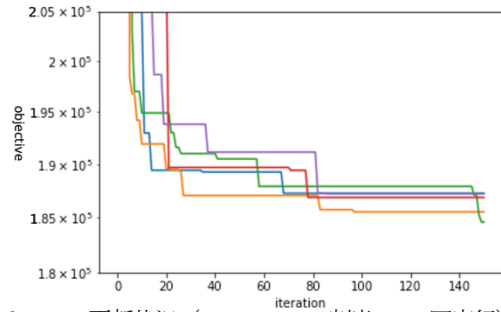


図-9 BCO更新状況（ $R_{max} = 4$ ，割当C，5回実行）

表-3 ベンチマークとの比較結果（バスのみ）

R_{max}	路線網	評価	TTT	Λ	d_0	d_1	d_2
4	提案手法 (BCO)	C	184,591	99	93.34	6.08	0.01
		D	186,707	98	90.69	9.31	0
	Buba and Lee	A	199,880	95	93.38	6.62	0
		B	189,130	95	92.00	7.67	0.00
		C	189,965	99	92.08	7.60	0.00
		D	189,218	100	92.08	7.60	0.00
	Nikolic and Teodorovic (TTT重視)	A	186,368	94	95.05	4.95	0
		B	184,211	94	93.70	5.60	0.01
		C	182,658	99	93.67	5.63	0.01
		D	183,404	96	93.68	5.62	0.01
	Nikolic and Teodorovic (Λ 重視)	A	197,624	67	90.69	9.31	0
		B	195,873	67	90.27	9.03	0.01
C		186,655	99	90.26	9.03	0.01	
D		193,046	71	90.26	9.03	0.01	
6	提案手法 (BCO)	C	180,756	99	95.34	4.66	0
		D	183,763	94	93.61	6.12	0.00
	Buba and Lee	A	191,035	92	96.92	3.08	0
		B	188,996	92	93.94	5.54	0.01
	Nikolic and Teodorovic (TTT重視)	A	185,224	99	94.34	5.65	0
		B	183,630	99	93.66	5.83	0.01
	Nikolic and Teodorovic (Λ 重視)	A	201,066	74	89.98	10.02	0
		B	196,386	74	89.49	9.96	0.01

表し，その太さおよびラベルはリンクを通る乗客数を表す。ノード中の数字はノード番号を表す。

既往研究と比較して概ね同等の目的関数値を持つ結果が得られた。したがって，提案手法の解は既往手法と比べても妥当なものだと考える。また，最適バス路線計画問題に関して，frequency share ruleによる乗客配分や路線そのものの修正を重ねるアプローチを採用した既往研究と比較して，本研究の手法は多数の路線が並行する路線網が構築されやすいことが伺える。これは，common lines problemの持つ，異なる乗換回数の経路を同時に戦略に含められるという特性が影響したと考えられる。また，

同じ路線網・運行頻度でも、common lines problem により評価を行う場合、より小さな総旅行時間となる傾向があり、これは乗客の戦略の探索空間の広さによるものと考えられる。ただし、一部の結果においては common lines problem による評価のほうが大きな総旅行時間となっており、この原因は既往研究と本研究の間で整数への切捨て・切上げなど細かな実装方法の相違点が考えられる。また、 $R_{max} = 4$ の Buba and Lee¹²⁾ のように、同じ路線網において、本研究の運行頻度設定手法による台数割当結果よりも優れた評価値を持つ台数割当が存在する。これは、提案手法は台数割当（すなわち運行頻度）の最適化はせず、実行可能な割当を内生的に決定したものであることによると考えられる。

(2) 個別型モードを考慮した試算

本節では、個別型モードの費用が異なる複数のシナリオを想定し、バスと個別型モードが存在するネットワークについて分析を行う。表-2 のシナリオ 1・2・3 を想定し、OD 需要はベンチマークを 5 で割ったもの (3,114 トリップ) とする。その他の計算条件は前節と同様とする。制約条件として用いる総バス台数は $A_{max} = 15, 20, 25$ の 3 通りとし、各パターンでの数値計算を行う。

各シナリオに対して提案手法を適用した結果のうち $A_{max} = 15$ のときのものを図-11 にまとめた。図中の実線はバス路線、破線は個別型モードをそれぞれ表す。また、リンク交通量と道路網のリンク旅行時間（費用係数を乗ずる前の図-8 の値）を乗ずることでバス、個別型モードそれぞれの総輸送距離（単位は [分・人]）である

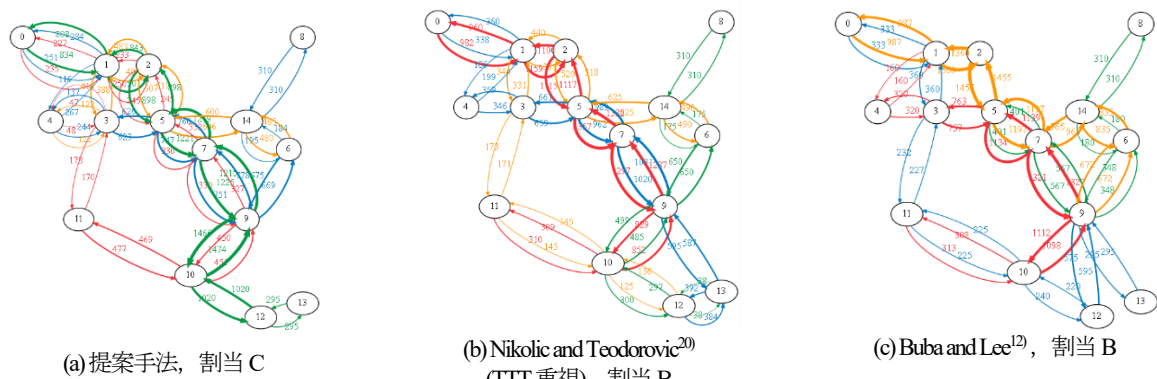


図-10 既往研究との比較結果（バスのみ）

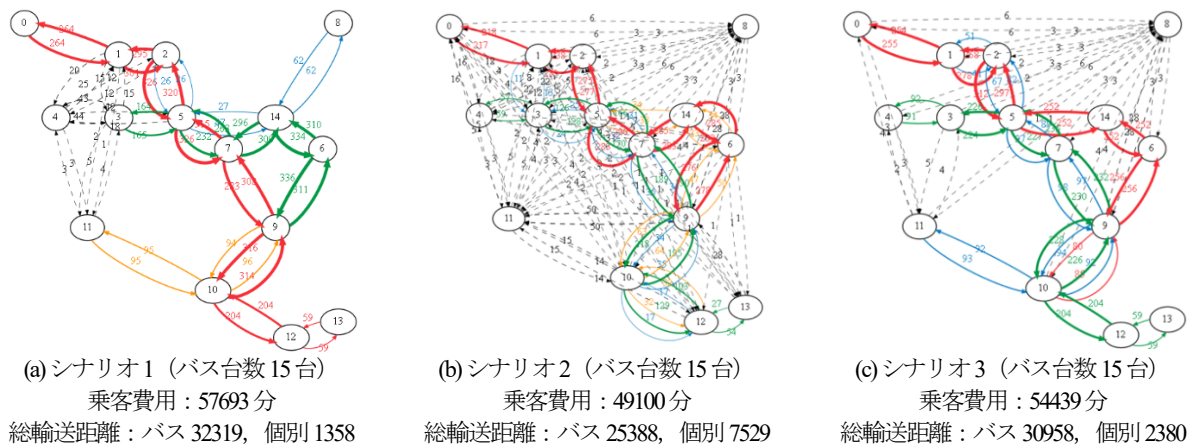


図-11 各シナリオにおける最適解

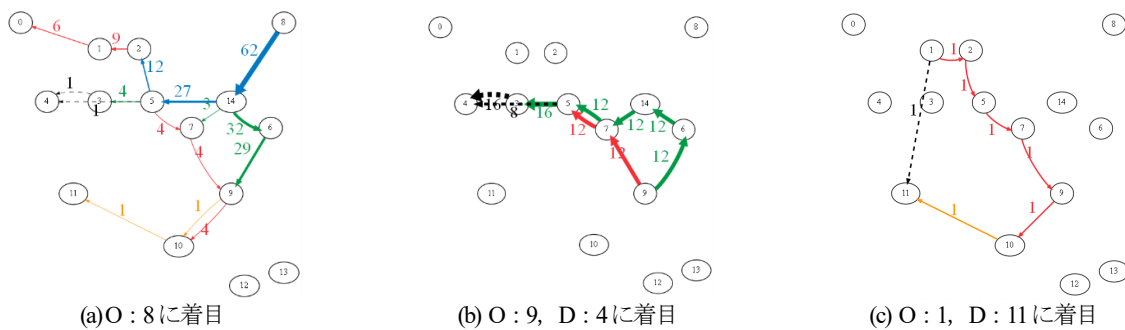


図-12 シナリオ 1 の最適解における乗客配分状況

が、距離に相当するものとみなす)を算出した。個別型モードの費用が距離に応じて著しく増大する状況を想定したシナリオ 1 では、個別型モードは短距離かつ単位の小さな輸送に特化し、その他はバスが担うような路線網となった。一方、バスは運賃不要で乗り放題、個別型モードは乗車毎に距離に比例しない固定料金を支払うというサブスクリプション制のような状況を想定し、なおかつ固定料金が小さいシナリオ 2 では、バスは需要の大きなノード間を接続するリンクやネットワークの地理的な中心近くのリンクに張られ、ネットワークの周縁部の大部分は個別型モードが担うような路線網となった。これはすなわち、需要量が少ない、あるいは対象ネットワークの端部に発生集中点をもつ需要については個別モードでの輸送に対応できれば、多くの需要が見込める幹線的な経路のみにバスの資源を集中させたとしても乗客のコストは最小化が可能であることを示す。これはサブスクリプションのような運賃制度が普及した環境において、戦略的にバスサービスが検討されれば利用者、バス事業者双方の利益につながることを示唆する。ただし、得られた解で確認できるように個別型モードが担う輸送量が大きくなるため、実際には車両数増加による道路混雑や、そのための運営費用など本モデルで表現できない部分の影響は大きくなる。この対応のためには本モデルの別に検討を要する。

また、シナリオ 1 の解の乗客配分状況を OD 別に分けて図-12 に示した。(a)はノード 8 で発生する需要に着目したものであり、モード間の乗換を含む経路が確認できる。(b)および(c)は個別の OD ペアに着目したもので、いずれも複数の経路が戦略に含まれているほか、(b)では乗換 1 回の経路と乗換 2 回の経路が同時に戦略に含まれている。赤路線と緑路線の運行頻度が等しいため、ノード 9 の乗客は両路線に等しく配分された。以上より、モード間の乗換を含む経路や複数経路を含む戦略を考慮した乗客配分を表現できていることが確認できる。また、バス台数と乗客費用 [分]、各モードの総輸送距離の関係を整理したものを図-13 に示した。いずれもシナリオの優位性を示したものではないが、運賃施策と運行戦略によって乗客の負担や行動が変化する状況が表現された。また、同じ乗客費用であっても、大きく異なる運行戦略をとれることが示唆された。

5. おわりに

本研究では、個別型モードの存在が最適バス路線網に与える影響について、ネットワークデザイン問題の観点から分析を行った。

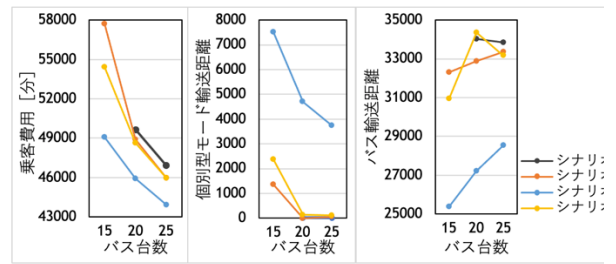


図-13 総バス台数を変化させた場合の挙動

(1) 本研究により得られた知見・成果

本研究では、小さな乗換抵抗を前提とした最適公共交通路線網デザイン問題のモデルを構築することで、政策立案者や運行事業者が長期的な計画を行う際に有用な分析ツールを構築した。各種パラメタ設定や入力データの工夫により、バスと個別型モードを想定した公共交通網に関する様々な分析を可能とした。構築したモデルは実ネットワークへの適用を見据えた設計とした。

また、分析結果からは、個別型モードの存在を想定した場合、バス単独の場合とはバス路線網の性質が大きく変化する可能性が示唆された。特に、地理的なネットワーク周縁部の輸送ほど個別型モードが適する可能性が示唆された。また、限られたバス車両という資源を適切に配置し、適切な運賃施策を行うことで乗客費用を抑えつつ運営効率を高められる可能性が示唆された。

(2) 今後の課題

本研究では、MaaSの影響分析に関し、各モードの違いを費用係数および初乗り運賃相当のコスト(時間相当)として目的関数に組み込んだ。しかしこれらはごく単純な設定値であり、各モードの特徴を十分に表現できているとは言い難い。現実的な金銭価値に基づいた値とはなっていない。目的関数値は本来の意味での一般化費用ではなく単純な諸費用と旅行時間の加重和となっている。より詳細なシナリオ設定や、複数の経済主体を考慮した社会的費用の指標を用いた分析には一般化費用に基づく議論が必要であるため、乗客配分の求解用ネットワーク中の各リンクに与えるコストの調整や、目的関数の待ち時間項に時間価値を考慮した新たな係数を与えることを検討したい。加えて、本研究では、運行頻度は各路線の最大乗車率を平準化するように設定しており、必ずしも最適な状態とはなっていない。運行頻度の解空間を広げるため、BCOで用いるベクトル、すなわち解に運行頻度を組み込むなどの改良が必要だと考えられる。加えて、本研究における乗客配分は車内混雑による不効用を考慮していないものの、実際にはバスと個別型モードの相違点として混雑の影響が大きいと考えられる。より現実的な分析のためには車内混雑を考慮した乗客配分手法を導入する必要があると考えられる。

また、実規模ネットワークへの適用を検討したい。本節の改良案のうち、運行頻度探索や車内混雑の考慮は、計算負荷の大幅な増大を伴うことが考えられるため、その対処が大きな課題と考えられる。これについては、ストレージ生成手法の改良や、BCO のパラメータ調整および近傍探索手法の改良が考えられる。ストレージ生成は、Cipriani et al.¹⁶⁾のように複数手法の援用を検討したい。

謝辞：本研究は、JSPS 科研費 21H01446 によって実施されました。

参考文献

- 1) O.J. Ibarra-Rojas, F. Delgado, R. Giesen, J.C. Munoz: Planning, operation, and control of bus transport systems: A literature review, *Transportation Research Part B*, Vol.77, pp.38-75, 2015.
- 2) 秋岡路暉, 杉浦聡志, 倉内文孝: 社会的費用を最小化する二段階バスネットワークデザインモデル, 土木計画学研究・講演集, Vol.61, CD-ROM, 2020.
- 3) Chiriqui C., Robillard P.: Common bus lines, *Transportation Science*, Vol.9, pp.115-121, 1975.
- 4) 須ヶ間淳, 奥村誠: 都市圏郊外部における多モード公共交通の空間構成最適化モデル, 土木計画学研究・講演集, Vol.60, CD-ROM, 2019.
- 5) 富岡秀虎, 村上僚祐, 高山宇宙, 森本章倫: MaaS の普及を想定した公共交通と人口分布に関する研究, 土木計画学研究・講演集, Vol.61, CD-ROM, 2020.
- 6) 長谷川大輔, 鈴木勉: 路線網形状を考慮したバス・デマンド型交通併用効果の分析, GIS-理論と応用, Vol.27, No.1, pp.1-11, 2019.
- 7) 須ヶ間淳, 奥村誠: 個別型交通の包含が地域公共交通システムに与える影響, 土木計画学研究・講演集, Vol.64, CD-ROM, 2021.
- 8) 上原和樹, 赤嶺有平, 當間愛晃, 根路銘もえ子, 遠藤聡志: 中規模都市圏を対象としたデマンドバスを用いる階層型協調交通システムの提案, 情報処理学会論文誌, Vol.57, No.1, pp.89-99, 2016.
- 9) 倉内文孝, 嶋本寛, 王萍, 飯田恭敬: 最小費用 Hyperpath 探索アルゴリズムを用いたバスサービス評価に関する研究, 土木計画学研究・論文集, Vol.23, pp.755-761, 2006.
- 10) 宮城俊彦, 赤松隆, 朝倉康夫, 秋山孝正, 鈴木崇児, 溝上章志: 均衡制約付き最適化問題の土木計画への応用可能性, 土木計画学研究・講演集, Vol.20, No.1, pp.507-512, 1997.
- 11) R.Z. Farahani, E. Miandoabchi, W.Y. Szeto, H. Rashidi: A review of urban transportation network design problems, *European Journal of Operational Research*, Vol.229, pp.281-302, 2013.
- 12) A.T. Buba, L.S. Lee: A differential evolution for simultaneous transit network design and frequency setting problem, *Expert Systems with Applications*, Vol.106, pp.277-289, 2018.
- 13) 間島隆博, 高玉圭樹, 渡部大輔, 勝原光治郎: ネットワーク成長, 修正モデルによる公共交通機関の路線網構築法, 情報処理学会論文誌 数理モデル化と応用, Vol.2, No.2, pp.92-102, 2009.
- 14) R.O. Arbex, C.B. da Cunha: Efficient transit network design and frequencies setting multi-objective optimization by alternating objective genetic algorithm, *Transportation Research Part B*, 2015.
- 15) H. Shimamoto, J.D. Schmöcker, F. Kurauchi: Optimisation of a Bus Network Configuration and Frequency Considering the Common Lines Problem, *Journal of Transportation Technologies*, 2012.
- 16) E. Cipriani, S. Gori, M. Petrelli: Transit network design: A procedure and an application to a large urban area, *Transportation Research Part C*, Vol.20, pp.3-14, 2012.
- 17) D. Huang, Z. Liu, X. Fu, P.T. Blythe: Multimodal Transit Network Design in a Hub-and-Spoke Network Framework, *Transportmetrica A Transport Science*, Vol.14, pp.706-735, 2018.
- 18) W.Y. Szeto, Y. Jiang: Transit route and frequency design: Bi-level modeling and hybrid artificial bee colony algorithm approach, *Transportation Research Part B*, Vol.67, pp.235-263, 2014.
- 19) C. Iliopoulou, K. Kepaptsoglou, E. Vlahogianni: Metaheuristics for the transit route network design problem - a review and comparative analysis, *Public Transport*, Vol.11, pp.487-521, 2019.
- 20) M. Nikolic, D. Teodorovic: A simultaneous transit network design and frequency setting: Computing with bees, *Expert Systems with Applications*, Vol.41, pp.7200-7209, 2014.
- 21) K. Kepaptsoglou, M. Karlaftis: Transit Route Network Design Problem: Review, *Journal of Transportation Engineering*, Vol.135, No.8, pp.491-505, 2009.
- 22) Spiess H., Florian M.: Optimal strategies: A new assignment model for transit networks, *Transportation Research Part B*, Vol.23, No.2, pp.83-102, 1989.
- 23) F. Kurauchi, M. Bell, J.D. Schmöcker: Capacity Constrained Transit Assignment with Common Lines, *Journal of Mathematical Modelling and Algorithms*, Vol.2, pp.309-327, 2003.
- 24) Jin Y. Yen: Finding the k shortest loopless paths in a network, *Management Science*, Vol.17, No.11, pp.712-716, 1971.
- 25) 富樫勇哉, アランニャ・クラウス, 狩野均: Artificial Bee Colony 法を用いたグラフ色塗り問題の解法, 情報処理学会第 79 回全国大会, 1R-05, 2017.
- 26) W.Y. Szeto, Yongzhong Wu: A simultaneous bus route design and frequency setting problem for Tin Shui Wai, Hong Kong, *European Journal of Operational Research*, Vol.209, pp.141-155, 2011.
- 27) M.H. Baaj, H.S. Mahmassani: TRUST: A LISP Program for the Analysis of Transit Route Configurations, *Transportation Research Record*, Vol.1283, pp.125-135, 1990.
- 28) Mandl C.E.: Evaluation and optimization of urban public transportation networks, *European Journal of Operational Research*, Vol.5, No.6, pp.396-404, 1980.

AN ANALYSIS OF THE IMPACT OF MULTI-MODE TRANSIT IN MAAS SERVICES ON OPTIMAL BUS NETWORK PLANNING

Soichiro YAMAKI, Satoshi SUGIURA