

# サービス供給エリアを内生化した公共交通路線網最適化手法の提案

折部 雄太<sup>1</sup>・力石 真<sup>2</sup>・嶋本 寛<sup>3</sup>・藤原 章正<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 西日本高速道路株式会社 (〒530-0003 大阪市北区堂島 1-6-20 堂島アバンザ)  
E-mail:1029yuta1029@gmail.com

<sup>2</sup>正会員 広島大学大学院 国際協力研究科 (〒739-8529 広島県東広島市鏡山 1-5-1)  
E-mail:chikaraishim@hiroshima-u.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 宮崎大学 社会環境システム工学科 (〒889-219 宮崎県宮崎市学園木花台西 1 丁目 1 番地)  
E-mail:shimamoto@cc.miyazaki-u.ac.jp

<sup>4</sup>正会員 広島大学大学院 国際協力研究科 (〒739-8529 広島県東広島市鏡山 1-5-1)  
E-mail:afujiw@hiroshima-u.ac.jp

近年、バスをはじめとする公共交通の利用者は、マイカー依存や赤字路線の廃線による利便性の低下などにより減少を続けている。路線網再編においては適切な路線網の決定と評価が必要不可欠であるが、既存手法では、路線形状に関しては起終点固定等の制約を置いているものが多く、サービス提供エリアを事前に決定する必要があった。そこで本研究では、路線形状の起点を固定しない公共交通路線網最適化手法を提案し、サービス提供範囲を内生的に決定する路線決定モデルを構築する。本研究では、まず仮想ネットワークを用いた数値計算例を示し、その後、実ネットワークでの適用に向けた課題を整理する。

**Key Words:** Bus network design, service area, loop line, numerical analysis

## 1. はじめに

人口減少、マイカー依存などにより路線バスの利用者は減少を続けている。加えて、平成 14 年に需要調整規制の廃止等を含む改正道路運送法等が施行されたことにより、バス事業への参入は需給調整規制を前提とした免許制から輸送の安全等に関する資格要件をチェックする認可制へと移行した。これに伴いバスサービスは需要の多い中心部に集中し、バス路線の重複などに配慮した効率的なネットワークが達成できているとは言い難い状況にある。

一方で、バス路線の再編で利用者の増加に成功した都市もある。バルセロナでは 2012 年から始まったバス路線網再編において、バス路線をネット状に再編することで利用率の増加に成功した<sup>1)</sup>。また、ソウルでは 2004 年のバス改革で需要に応じたバス路線の設定、乗り継ぎの無料化を行うことで利用者が約 17%増加した。広島市においてもバス路線網再編の必要性が認識されており、2018 年 5 月 13 日(日)より広島市都心循環バス「エキまちループ」の運行が開始される。一方、こういったバス路線網再編がバス運行事業者やバス利用者にとってどの程度望ましいのかといった詳細な検証を行わずに路線網の

再編が進むことが多く、実用に耐えうる適切なバス路線網の決定・評価手法の構築が求められる。以上を踏まえ、本研究では、既存の公共交通路線網決定モデルを拡張し、サービス供給エリアを内生化した公共交通路線網最適化手法を提案する。モデル拡張に伴い、サービス供給エリアの内生化だけでなく、循環型バス路線の導入効果が評価できることを示す。ここでサービス供給エリアとは、バスサービスが提供される実空間上のエリアを指し、バス路線の起終点及びその路線形状に依存する。既存の起終点固定型の路線網決定モデルでは、サービス供給エリアを予め想定した上で起終点を設定する必要があったが、例えば収益が低い郊外部においてバスサービスを提供すべきかどうかといった意思決定がバス事業者にとって重要であることを鑑みれば、サービス供給エリアを内生的に扱うモデル拡張の意義は大きいと考えられる。

## 2. 既往研究のレビュー

バス路線網再編においてはバス路線、運行頻度、乗務員のスケジューリングをはじめ、決定すべき項目や評価指標が多数存在する。

枝山ら<sup>2)</sup>は乗客の総旅行時間の最小化を目的関数とした最適化問題としてバス路線と運行回数を同時決定するモデルを定式化している。高山ら<sup>3)</sup>は運行可能バス台数と所要時間（距離）を制約条件として輸送人員が最大化となるような組み合わせ最適化問題を定式化している。高山らの研究では乗客のバスの乗り換えを考慮していない一方、路線網とバスダイヤの同時決定を可能としている。これまでのバス路線網再編問題の定式化は需要固定型による策定が一般的であったが、高山らはサービスレベルの変化に伴うバスODの変化を内生的に扱うことにより、より現実に近い状況を反映した最適バス路線網計画策定システムを提案した。この研究では乗客は乗り換え行動が一回のみ許容されている。

以上にみた研究においては、乗客の乗り換え行動等の乗客行動の取り扱いに課題が残る。Shimamoto et al.<sup>4)5)</sup>は、乗り換え行動を考慮したKurauchi et al.<sup>6)</sup>の乗客配分モデルを用いて、バス路線網決定モデルを構築し、広島市のバスネットワークの評価を行っている。彼らはモデル化にあたり事業者と乗客の2者の利害関係を考え、事業者のコストとして総走行時間、乗客のコストとして総移動コストを定義し多目的最小化問題として定式化している。

上述したようにバス路線網と頻度を同時決定する研究は多くある。しかしながら、バス路線の形状に関してはバス路線の起終点は固定という制約を置いた研究が多い（表1）。そこで本研究では、バス路線の起点を固定せずに決定するバス路線網決定モデルを提案する。また、環状路線の有無による運行・移動コストの比較を通じて、環状路線導入の影響を数値計算により確認する。

### 3. サービスエリアを内生化した公共交通最適路線網決定モデル

本研究において提案する手法は、Shimamoto et al.<sup>4)</sup>に簡便な改良を加えたものである。主要な変更点は、出発地ダミーノードを加えてバス路線の起点を固定しない形に拡張した点にある。コスト関数の定義についても若干の違いがあるが（容量制約条件ではなく、BPR関数型の関数により混雑を表現）、この変更は、モデルの改良というよりはむしろ、容量制約の導入に伴うネットワーク規模の拡大を避け、計算負荷を抑制することが目的である。

モデルの構築に当たっては、Shimamoto et al.<sup>4)</sup>と同様に、トレードオフの関係にあるバス運行事業者、バス利用者の二種類の利害関係を考慮する。具体的には、両者ともに運行あるいは移動に伴うコストを最小化すると仮定する。このとき、バス運行事業者が自身の運行コストを最小化しようとする、乗客の移動コストは高くなるというトレードオフの関係が成り立つ。本研究では、このよ

うな状況を多目的最適化問題として定式化する。具体的には、バス路線の形状と頻度を決定変数とした多目的最適化問題を以下のとおり定式化する。

$$\min_{\mathbf{r}, \mathbf{f}} \psi_m(\mathbf{y}, \mathbf{r}, \mathbf{f}), \quad m = 1, 2 \quad (1)$$

$$\text{subject to } \sum_{l=1}^L f_l C_l(\mathbf{r}_l) \leq N \quad (2)$$

$$\mathbf{y} \in S(\mathbf{r}, \mathbf{f}) \quad (3)$$

ここで、

- $\mathbf{y}$  : 経路別利用者数
- $L$  : 路線数（所与）
- $C_l(\mathbf{r}_l)$  : 路線 $l$ の起終点間の所要時間
- $N$  : 保有するバス台数
- $S(\mathbf{r}, \mathbf{f})$  : 各路線の運行頻度及び経路に対応する下位モデル（乗客配分モデル）の解集合

である。制約条件に乗客配分モデルの均衡解が含まれることから、均衡制約付最適化問題（MPEC: Mathematical Programming with Equilibrium Constraints）となる。以下、バス路線の形状と頻度を定める上位問題と、これらの決定変数に応じた均衡フローを求める下位問題（乗客配分）を定式化する。なお、定式化に当たって以下の仮定を置く。

- ✓ バスの運行は頻度ベースで行うものとする。また、バスの到着はポアソン到着を仮定する。
- ✓ 道路混雑による所要時間の変化は考慮しない。即ちリンク所要時間は一定である。
- ✓ 路線数は所与とする。
- ✓ 各バス路線の終点は固定とする。

#### 3.1. 上位問題

多目的最適問題の目的関数として、事業者のコスト（総走行時間） $\psi_1$ 、乗客のコスト（総移動コスト） $\psi_2$ を以下のとおり定義する。

表1 幾つかの既存手法の比較

著者	操作変数	バス路線網算出方法	制約条件	目的関数
枝村・森津・松田・土井 <sup>2)</sup> (1980)	運行回数 路線網	制約条件下で組み合わせツリーにより算出	路線数 路線長 バス台数 乗り換え回数 路線の起終点	総所要時間 最小
高山・宮崎 <sup>3)</sup> (1996)	路線網 運行ダイヤ	最短経路探索による列挙	路線長 バス台数 路線の起終点	輸送人員最大化
嶋本・倉内・Schmöcker・村山 <sup>4)5)</sup> (2010)	運行頻度 路線網	GAを用いた経路算出	路線数 路線の起終点 バス台数	総移動コスト最小化 総走行時間最小化

$$\psi_1(\mathbf{r}, \mathbf{f}) = \sum_{l=1}^L f_l C_l(\mathbf{r}_l)^2 \quad (4)$$

$$\psi_2(\mathbf{r}, \mathbf{f}, \mathbf{y}) = \sum_{rs \in W} \sum_{p \in h_{rs}^*} y_p \cdot g_p(\mathbf{y}) \quad (5)$$

ただし、

$W$  : ODペアの集合

$h_{rs}^*$  : ODペア  $rs$  における hyperpath 集合

なお、式(4)において路線  $l$  の車両台数を  $f_l C_l(\mathbf{r}_l)$  と近似しているため、路線  $l$  の総走行時間を  $f_l C_l(\mathbf{r}_l)^2$  と定義している。

### 3.2. 下位問題

本研究では、common lines problem 及び公共交通の混雑の双方を考慮した乗客配分モデルを使用する。ここで common lines problem とは、「同一目的地に乗り場を共有している複数の路線を利用して到達することが可能な場合、それらの路線の中から魅力的な経路集合を選択する問題」を指す。本研究では、Shimamoto et al.<sup>4)</sup>と同様に hyperpath コストを定義して common lines problem を扱う。混雑を表現する方法については、大別して、容量制約を明示的に導入し乗客が乗り損ねる状況を直接モデル化する方策<sup>8)</sup>と、乗客数の増加に伴い移動コストが単調増加する関数 (BPR 関数アプローチ) を用いた方策とが考えられる。前者は乗客の行動を現実に沿ってモデル化している点において優れている一方、ネットワーク構造が複雑となり、計算負荷が増大する。従って本研究では、後者の BPR 関数アプローチを採用する。

hyperpath コストを期待所要時間と期待待ち時間の和として次のように定義する。

$$g_p = \sum_{a \in A_p} \alpha_{ap} c_a + \sum_{k \in S_p} \frac{\beta_{kp}}{F'_{kp}} \quad (6)$$

ここに、

$$F'_{ip} = \sum_{a \in OUT_p(i)} f'_{l(a)} \quad (7)$$

ただし、

$\alpha_{ap}$  : hyperpath  $p$  がリンク  $a$  を通過する確率

$\beta_{kp}$  : hyperpath  $p$  がノード  $i$  を通過する確率

$A_p$  : hyperpath  $p$  に含まれるリンク集合

$S_p$  : hyperpath  $p$  に含まれる停留所ノードの集合

$c_a$  : リンク  $a$  の移動コスト

$OUT_p(i)$  : hyperpath  $p$  に含まれるノード  $i$  から流出するリンク集合

$f'_{l(a)}$  : リンク  $a$  が属する路線  $l$  の有効頻度

$F'_{ip}$  : ノード  $i$  から目的地までの hyperpath  $p$  に含まれる路線群の有効頻度

ここで式(6)の第一項は乗客の期待乗車時間、第二項は期待待ち時間を表している。加えて本研究ではバス交通における乗客混雑による影響を有効頻度により表現す

る<sup>9)</sup>。有効頻度はその路線が混雑すれば実際の頻度よりも低下し、結果として期待所要時間の増加を表現している。ノード  $i$  から流出するリンク  $a$  が属する路線  $l$  の有効頻度  $f'_{l(a)}$  は以下のように定義される。

$$\omega_{il} = \frac{1}{f_l} + \alpha \left( \frac{\tilde{v}_{il} + v_{il}}{f_l k_l} \right)^n \quad (8)$$

$$f'_{l(a)} = \frac{1}{\omega_{il}} \quad (9)$$

ここに

$v_{il}$  : ノード  $i$  からバス路線  $l$  に乗車する乗客数

$\tilde{v}_{il}$  : ノード  $i$  におけるバス路線  $l$  の既乗客数

$k_l$  : 路線  $l$  の車両容量

$\omega_{il}$  : ノード  $i$  における路線  $l$  の期待待ち時間

$\alpha, n$  : パラメータ

もし既乗客数と乗客数がゼロであれば、有効頻度は運行頻度と一致する。また、到着するバス停より前のバス停から利用している既乗客数が多ければ停留所での待ち行列が発生するため、有効頻度は減少する。

下位問題では、以上に定義した hyperpath コストに基づき、Kurauchi et al.<sup>8)</sup>と同様にマルコフ配分を行う。ただし、有効運行頻度  $f'_{l(a)}$  は乗客数の関数であるため、逐次平均法を用いて均衡計算を行う。

### 3.3. サービス供給エリアの内生化

Shimamoto et al.<sup>4)</sup>をはじめとした既存のモデルでは、各路線の起終点が固定されているため、サービス供給エリアをあらかじめ分析者が想定しておく必要がある。一方、バス事業者の視点からは、一般に収益の低いとされる郊外部においてバスサービスを提供するかどうかといった、サービス供給エリアの意思決定が重要である。そこで本研究では、図1に示すように出発地ダミーノードを追加することによって、起点の決定を内生化したバス路線網決定モデルに拡張する(図1ではノード9が終点)。さらに、出発地ダミーノードと終点ノード9をつなぐダミーリンクを置くかどうかで循環路線を許容するモデルと許容しないモデルの作成が可能となる。両ネットワークの比較を通じて、循環路線の効果を評価することができる。なお、同様に、到着地ダミーノードを置くことにより、終点制約を置かないモデルにも拡張できる。

### 3.4. モデルの解法

本研究において定義した上位問題は事業者側、乗客側、双方の利益を最大化する多目的最適化問題として定式化される。多目的最適化問題において各目的関数がトレードオフの関係にある場合、単一の解を得ることは困難でありパレート最適解の概念が導入される。本研究では、

Shimamoto et al.<sup>4)</sup>に倣い、進化系アルゴリズムの一種であり多目的最適化問題に対するアプローチとして Ded<sup>7)</sup>らによって開発された NSGA II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithms- II)を用いる。

オ下における数値計算を行った。

表 2. シナリオ設定

路線 \ OD 需要設定	1) 中心部流入ケース	2) 中心部内移動ケース	3) 中心部内移動集中ケース
a) 非環状路線 2 本 (Line I, Line II)	シナリオ a1	シナリオ a2	シナリオ a3
b) 非環状路線 2 本 (Line I, Line II)+環状路線 1 本 (Line III)	シナリオ b1	シナリオ b2	シナリオ b3

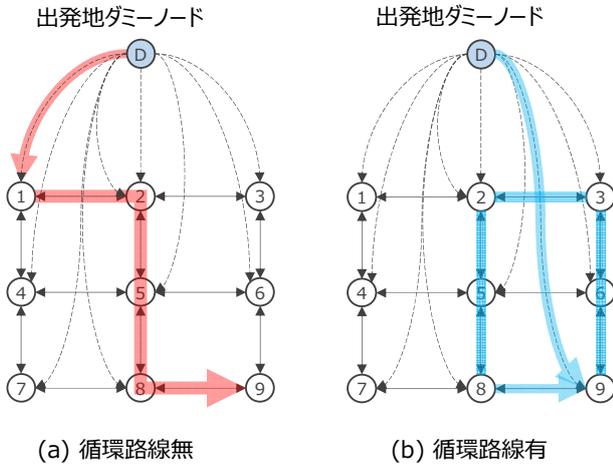


図 1 本研究のネットワーク表現

OD 需要表

起点ノード	終点ノード	OD 需要 (人/分)		
		中心部流入ケース	中心部内移動ケース	中心部内移動集中ケース
4	7	50	50	50
4	6	50	50	50
4	10	20	20	20
13	7	50	50	50
13	6	40	40	40
13	10	20	20	20
6	7		30	60
6	10		10	30
7	10		10	30
7	6		30	60
10	6		30	60
10	7		30	60

4. 数値計算の設定

上記で構築した路線網決定モデルを用いて仮想ネットワークでの計算例を示す。ここでは以下の 2 点の考察を目的とする。

- 1) 環状構造の有無による運行・移動コストの比較
- 2) サービス供給エリア内生化による運行・移動コストの増減

簡単のために、図 2 に示す仮想ネットワーク上の各ノードにバス停が存在するとし、各リンクの所要時間を徒歩 30 分、バス 3 分とする。また、バス停停車時間 0.5 分とし、停車時間、移動時間は一定と仮定する。本数値計算では、循環路線がないケースを想定したバス路線が 2 本あるとし、それぞれの終点をノード 7 とノード 10 とする。以下、ノード 7 を終点とするバス路線を Line I、ノード 10 を終点とするバス路線を Line II と呼称する。また、循環構造バス路線数は 1 本とし、起終点の制約を緩和した定式化とする（起点、終点ともにダミーノードを設定し、起点=終点となるように制約を追加）。循環構造バス路線を Line III と呼称する。また、バス 1 車両当たりの乗車定員を 80 人とし、各バス路線の頻度を 1/5 から 1/180(本/分)の範囲の中から決定するものとする。バス台数は 1 時間に 240 台までのバスが運行可能であるとする。OD 需要パターンは図 2 に示すとおりである。また、NSGA-II の適用に当たっては、個体数 50、世代数 100、交叉率 0.9、突然変異率 0.1 として計算を実施した。

以上の設定のもと、表 2 に示す計 6 パターンのシナリ

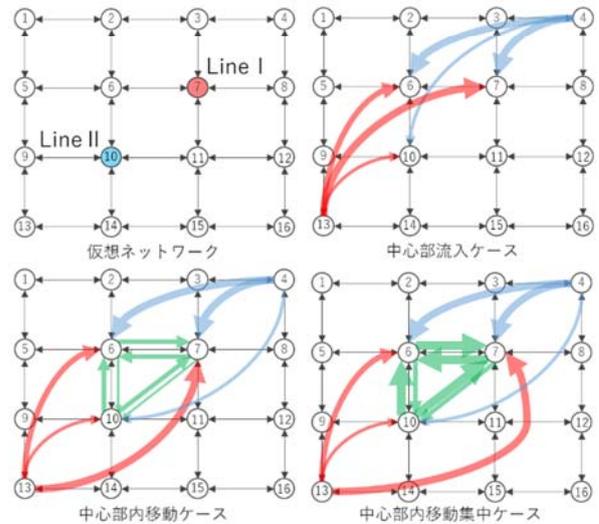


図 2. 下層ネットワークと OD 需要パターン

5. 数値計算結果

図 3 にシナリオ a およびシナリオ b 下におけるパレート解を 3 つのケースごとに比較した結果を示す。図より、ノード 6-7-10 の中心部を行き来する需要が高い場合、特に乗客の移動コストが低い領域において循環路線の導入によるパレート改善が確認できる。一方、運行コストの最小化（乗客の移動コストは増大）を基準に路線網を決定する場合、循環線を導入することにより反ってパレート改善が生じる可能性があることが示唆された。これ

は、サービス水準が著しく悪い状況下での循環路線の導入は、サービス水準をほとんど向上させることなく運行コストを増大させることに起因していると考えられる。なお、環状線を導入した場合の最適な路線は OD 需要パターンによって異なる。具体的には、シナリオ 1 (中心部流入ケース) の需要パターン下においては、ノード 3-4-8-7-3 で構成される環状路線が最も頻度高く表れた最適路線であった。一方、シナリオ 3 (中心部内移動集中ケース) の需要パターン下においては、ノード 11-10-6-7-11 で構成された環状路線が頻度の高い最適解であった。

次に、シナリオ 3 (中心部内移動集中ケース) を例に、パレート解の構成を詳細に考察する。解集合を Line I, Line II の起点ペア毎に類型化した結果を図 4, 5 に示す。結果より、パレートフロント上の解は同一の起点で構成されているわけではなく、起点自体が運行コスト/移動コストのバランスに応じてシフトすることが確認された。既存の起点固定型路線網決定モデルは、ここで示した複数存在する起点ペアのうち一つの起点ペアに対するパレートフロントのみに着目した分析と解釈でき、本結果は起点制約を緩和することの重要性を示唆している。なお、需要パターンから容易に想像できるように、最も頻度高く表れた最適路線網の起終点パターンは図 6 に示すとおりである。

また、提案モデルを用いることによって、起点の制約を緩和することによってサービス供給エリアを変更することに伴う運行/移動コストの変化についても考察が可能である。具体的には、図 4, 5 より、乗客の移動コストが低い (事業者の運行コストが高い) 領域においてはノード 4 やノード 13 といった対象エリアの端を起点とする路線 (すなわちサービス供給エリアが広い) が最適路線となっているものの、事業者の運行コストが低い (乗客の移動コストが高い) 領域においては路線長の短い (すなわちサービス供給エリアが狭い) 路線が形成されていることが確認できる。

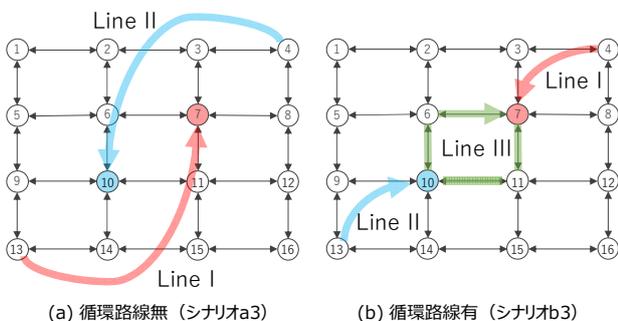


図 6. 主要な最適路線網パターン

## 6. おわりに

本研究では、路線形状の起点を固定しない公共交通路線網決定手法を提案し、サービス提供範囲を内生的に決定する路線決定モデルを構築した。数値実験を通じて得られた主要な知見は以下のとおりである。

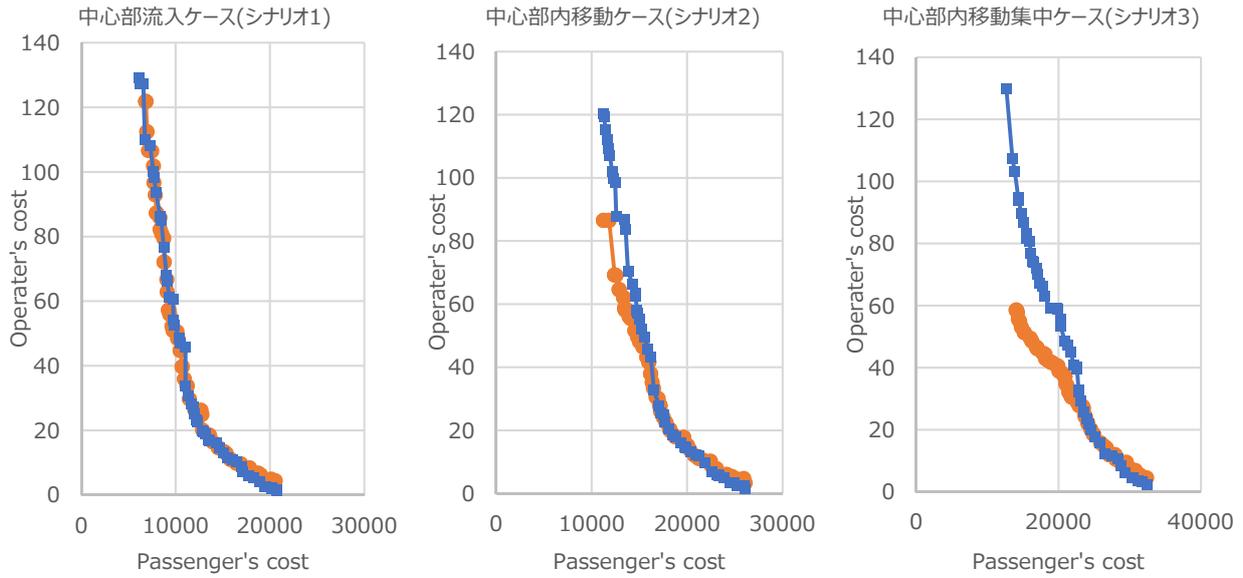
- 1) 環状路線の導入は多くの場合、(環状路線の形成を許容しない最適解に比べて) パレート改善をもたらす。ただし、需要パターンや運行コスト/移動コストのバランスによってはパレート改悪をもたらす可能性がある。
- 2) パレートフロント上の解の起点は、運行コスト/移動コストのバランスに応じてシフトする。既存研究で見られる起点固定型モデルにより得られた最適解は、起点制約を緩和することでパレート改善が生じる可能性が高い。

今後、本論文において提案した最適路線網モデルを実際に使用するためには、以下の改善が必要である。第一に、計算負荷が高く、現時点では大規模ネットワークの計算負荷に耐えられない。この点は非効率なプログラミングコードに起因するところが多く、今後、改善するとともに大規模ネットワークへの適用を図る。第二に、本研究では運行コストを目的関数としたが、実務的にはコスト制約下において最適路線網を決定するケースが多いと考えられ、今後、運行コストを制約条件としたときの計算負荷の軽減等について理解を深める必要がある。

## 参考文献

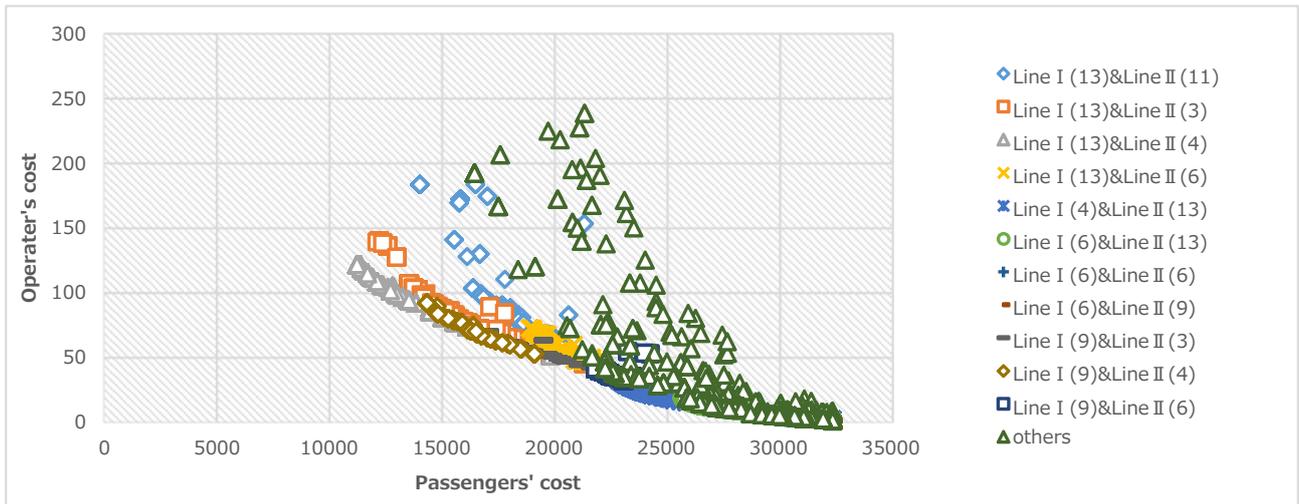
- 1) Badia, H., Argote-Cabanero, J., Daganzo, C.F.: How network structure can boost and shape the demand for bus transit, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol. 103, pp. 83-94, 2017.
- 2) 枝村俊郎, 森津秀夫, 松田宏, 土井元治: 最適バス路線網構成システム, *土木学会論文報告集* 第 300 号, pp. 95-107, 1980.
- 3) 高山純一, 宮崎耕輔: バスダイヤを考慮した最適バス路線編計画策定に関する研究, *土木計画学研究論文集*, No. 13, pp. 827-836, 1996.
- 4) Shimamoto, H., Schmöcker, J., Kurauchi, F.: Optimisation of a Bus Network Configuration and Frequency Considering the Common Lines Problem, *Journal of Transportation Technologies*, Vol.2, pp.220-229, 2012.
- 5) Shimamoto, H, Murayama, N., Fujiwara, A., and Zhang, J.: Evaluation of an existing bus network using a transit network optimisation model: a case study of the Hiroshima City Bus network, *Transportation*, Vol. 37, No. 5, pp. 801-823, 2010.
- 6) De Cea, J., xcd, Fem, xc, Ndez, E.: Transit Assignment for Congested Public Transport Systems: An Equilibrium Model. *Transportation Science* Vol.27, No.2, pp.133-147, 1993.
- 7) Deb, K.: *Multi-objective optimization using evolutionary algorithms*, Wiley, 2001.
- 8) Kurauchi, F., Bell, M.G.H., and Schmöcker, J.D.: Capacity constrained transit assignment with common lines, *Journal of Mathematical Modelling and Algorithms*, Vol. 2, No.4, pp.309-327, 2003.

(2018.4.27.受付)



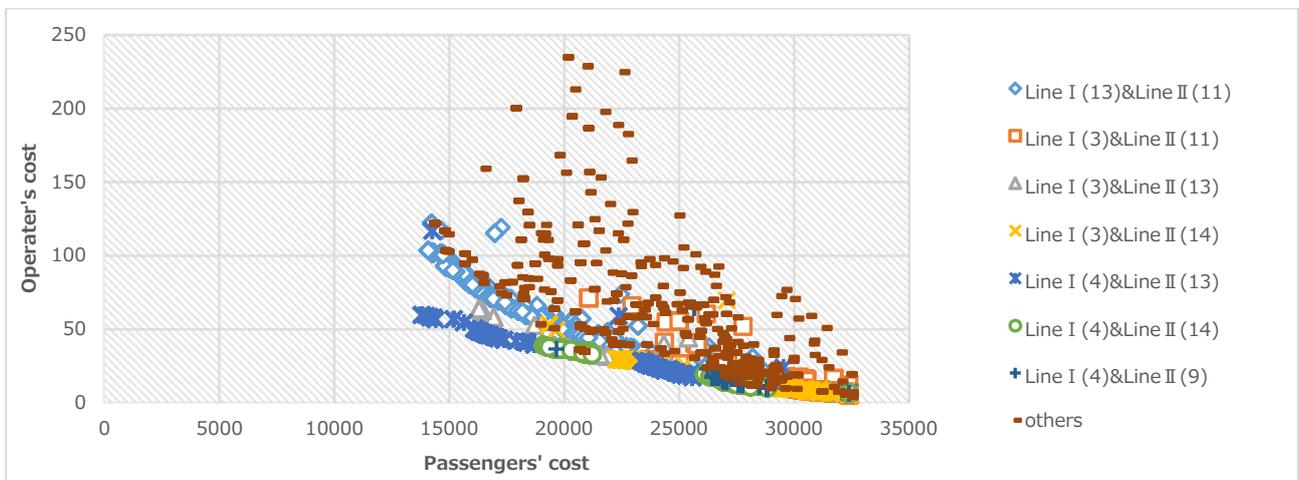
注：■:シナリオ a, ●:シナリオ b

図3. シナリオ a—シナリオ b の解集合の比較



注：括弧内は各路線の起点ノード (Line I, Line II の起点ペア毎に類型化)

図4. シナリオ a3 における解集合



注：括弧内は各路線の起点ノード (Line I, Line II の起点ペア毎に類型化)

図5. シナリオ b3 における解集合