

# 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

秋岡 路暉<sup>1</sup>・杉浦 聡志<sup>2</sup>・倉内 文孝<sup>3</sup>

<sup>1</sup>学生会員 北海道大学大学院 (〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8)

E-mail: michiki-star@eis.hokudai.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 北海道大学大学院准教授 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8)

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

<sup>3</sup>正会員 岐阜大学工学部教授 (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)

E-mail: kurauchi@gifu-u.ac.jp

近年、社会の中での地域公共交通の役割の重要性が叫ばれる中で、路線バスは輸送人員の減少から路線網を維持することが困難となっている。そこで、バス路線網を持続的に維持するため、社会全体の効率性を考慮した路線再編計画の重要性が高まると見込まれる。バス路線網維持のための課題は多岐にわたるが、本研究では路線とその経路計画に着目する。バス運行に関する社会的費用を最小化する効率の良いバスネットワークデザインのためのモデルを構築する。実道路網上を通過するバス路線の経路の組み合わせは無数に存在しうることから、バスネットワークデザインの問題は一般的に計算負荷が大きい。そこで本研究ではネットワークの概形が全域木状となる制約を設け、問題の簡約化を行うことで、路線の経路と頻度を最適化する新たな手法を提案した。提案したモデルを仮想ネットワークに適用し試算することで、モデルの挙動を確認した。

**Key Words :** Bus network, Transit Network Design, Spanning tree, Social cost

## 1. はじめに

我が国の乗合バス（以下、路線バス）の輸送人員は、昭和45年前後の100億人台より減少を続け、近年では都市部においては微増傾向から横ばいとなっているものの、平成29年度には約43億人と半減している<sup>1)</sup>。特に地方部においては、自家用車の普及と少子高齢化に伴う人口減少を受け輸送人員が大幅に減少し、バス路線網を維持することが困難となっている<sup>2)</sup>。このように、路線バスを取り巻く状況の厳しさが増している中で、国土交通省は平成30年12月に「地域公共交通網形成計画及び地域公共交通再編実施計画作成のための手引き（第4版）」<sup>3)</sup>を公表した。これは、地域公共交通の維持・改善が交通分野にとどまらない様々な分野の課題解決に大きな効果をもつとして、地方公共団体が中心となり社会全体で連携し、持続可能な公共交通ネットワークの形成、あるいは地域公共交通再編実施計画の策定を行っていく方針が示されたものである。持続的にバス輸送サービスを提供するためには、社会全体にとって効率的であり、かつ充実した輸送体系を組み立てることが重要となる。そこで、今後増加すると考えられるバス路線再編計画立案の際に、社

会的費用を最小化するバスネットワークデザインモデルを構築することで、計画決定の一助とすることが本研究の目的である。このモデルでは、所与の確定的需要の下で、利用者の総走行距離が最小となるようにバスが通行できる道路を制限する問題と、そのなかでバスが通行する路線をデザインするような二段階で最適化問題を構築する。これにより大規模ネットワークにも対応可能な手法論を提供することを目指す。

## 2. 既往研究の整理と最適化問題の簡約化

### (1) 既往研究の整理

Ibarra-Rojas et al.<sup>4)</sup>によると、バス路線に関する最適化問題は、路線の経路設計に関する問題のほか、運行頻度を決定する問題、バスの最適な発着時刻を決定する問題、車両と運転手の運用を最適化する問題など多岐にわたり、非常に複雑であるため、そのすべてを検討することは難しい。そこで本研究では、路線の経路設計とその運行頻度を最適化する問題について検討する。この問題は、TND (Transit Network Design) として定式化され、乗客・運

行コストやその採算性、または目的地へ直行できる乗客数等に注目した研究など、多く提案されている<sup>4)</sup>。

ところでバス路線経路の選び方は、ネットワーク内の全停留所から順番をもって経由する停留所を選ぶ組み合わせであり、その候補は、同じ停留所を複数回訪問することも許容すれば無数に存在するため、すべて列挙することはできない。ゆえに、経路設計の最適化問題の定式化にあたっては、何らかの制約を設けることでその候補を限定する必要がある。また、路線の経路設計とその運行頻度を一度に最適化することも同様に困難であり、これを避けるため二段階の解法により最適化する手法が提案されている。たとえば高山・宮崎<sup>5)</sup>は、ある路線の起終点となるターミナルをいくつか設け、上位問題において各ターミナル間を結ぶ経路の候補に対し、乗換を考慮せずに輸送できる乗客数が最大となる場合を最適な経路とした。さらに下位問題において、全体の車両台数制約の元、輸送できる総乗客数を最大化する運行頻度の組み合わせを遺伝的アルゴリズムにより近似的に算出した。

Szeto and Jiang<sup>6)</sup>は、ネットワーク形状の制約の元、上位問題でネットワーク全体の乗換回数の総和が最小化される路線経路と運行頻度を決定し、下位問題において乗客を路線への配分を行うモデルを提案した。上位問題はKaraboga<sup>7)</sup>により提案されたABC (Artificial Bee Colony) アルゴリズムにより近似的に求解している。また吉野・羽藤<sup>8)</sup>は、Szeto and Jiangの提案したモデルから派生し、Rubinstein<sup>9)</sup>により提案されたCE (Cross Entropy) 法により近似的に求解している。このように路線の経路設計と運行頻度を最適化する問題は、まずバスネットワークの形状を限定し、路線の運行経路の候補を限定することで問題を簡約化し、その後それぞれの路線の運行頻度を検討する二段階の解法が多くみられる。

## (2) 全域木制約と二段階最適化による問題の簡約化

Bell et al.<sup>10)</sup>はフェリー航路を例に、ネットワークが全域木状となる制約を課し、解の探索範囲を限定する手法を提案した。全域木とは、閉路を持たずに全てのノードが接続されたネットワークのことである。本研究ではこの手法を応用し、バスネットワークの概形が全域木状となるように制約する。すなわち、あらかじめバスが通過するリンクを限定することで問題の簡約化を行う。ところで陸上を走行するバスは、海上を運航するフェリーと違い、その運行経路を考える必要があり、その経路は道路ネットワークの形状に縛られることを勘案する必要がある。また、木の閉路を持たない特徴から、全域木ネットワーク上ではどのODペアに対してもその経路がただ一つに限定される。ゆえに、元の道路ネットワーク上では複数の経路が存在する場合であっても、全域木上では経路探索が不要となる利点がある。ただし、全域木である

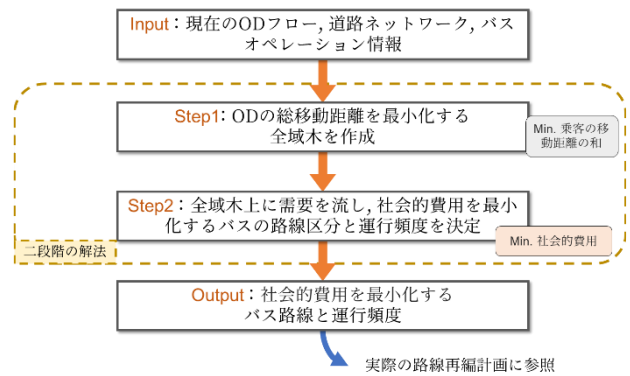


図-1 二段階最適化問題の計算フロー

ことを制約するため、より多くのリンクを利用可能としたときと比べて総走行時間はせいぜい等しいか大きい。

このように本モデルでは、まずバスが走行する全域木状のリンク集合を特定し、次に木上での最適な運行戦略（路線設計と運行頻度）を検討する二段階の計算フローをとる（図-1）。インプットとしては、路線再編前のODフロー、バスを運行する道路ネットワーク、そしてバスオペレーションに関する細かな情報（バスのキャパシティや運行コスト、運行時間に関する制約など）が必要となる。以上のステップを経て、社会的費用を最小化するバス路線の経路とその運行頻度を得る。

## 3. 総走行距離最小化全域木の作成

まず、乗客の総走行距離を最小化する全域木を総走行距離最小化全域木として提案する。第一段階において総走行距離最小化全域木を考えることにより、全域木制約のもと乗客の移動経路を最適化するバスの通過道路を指定し、第二段階において乗客にとって最適な路線戦略を検討する。

総走行距離最小化全域木作成のための目的関数は、OD $w$ のフローを $D_w$ 、OD $w$ の移動距離を $L_w$ とすると、以下式(1)のとおりである。

$$\text{Min.} \sum_w D_w L_w \quad (1)$$

総走行距離最小全域木の構成には、一般的に知られたアルゴリズムがないため、本稿ではタブーサーチを用いた手法を導入した。まず初期値として任意の全域木を与え、木上で最短経路検索を行い、目的関数値を計算する。全域木の性質上、木からリンクを一本除去すると、全域木は二つの独立したネットワークに分断される。ネットワーク同士を再接続するように、新たに一本のリンクを挿入すると、そのリンクの選び方により、初期解とは異なった近傍解の集合が得られる。この近傍解群を初期の

タブーリストとする。さらに得られた近傍解群とタブーリストを照会し、既にタブーリスト内に存在しない解のうち目的関数値を最も小さくする解を、次世代の解を作成するための全域木とする。このサイクルを一定回数繰り返すことで、総走行距離最小化全域木の近似解を得る。

#### 4. 路線運行戦略決定モデルの構築

##### (1) 記号と仮定

以下に、路線設計および頻度検討の定式化に用いる記号を示す。

$x_l$	:	路線 $l$ の運行台数
$y_{al}$	:	路線 $l$ がリンク $a$ を経由する場合 1 をとるダミー変数
$p_{als}$	:	路線 $l$ のリンク $a$ について、目的地 $s$ へ向かう乗客数
$z_{nl}$	:	路線 $l$ がノード $n$ を経由する場合 1 をとるダミー変数
$N$	:	ノード $n$ の集合
$L$	:	路線 $l$ の集合
$A$	:	有向リンク $a$ の集合
$K_l$	:	ある路線の通過する有向リンク $a$ を無向リンクにまとめたセクション $k$ の数
$A_l$	:	路線 $l$ のリンク数 (仮想リンク含む)
$R$	:	仮想ネットワーク上のリンク $a$ のうち、ノーマルリンクの集合
$B$	:	仮想ネットワーク上のリンク $a$ のうち、バス乗車仮想リンクの集合
$\Phi (= \phi_{ka})$	:	リンク $a$ がセクション $k$ の順方向リンクなら 1, 逆方向なら -1, それ以外なら 0 をとる変数 $\phi_{ka}$ の行列
$t_a$	:	リンク $a$ のバス所要時間
$\underline{t}, \bar{t}$	:	路線往復運行時間の上下限
$\hat{t}$	:	運用上の路線一往復所要時間
$In(n)$	:	ノード $n$ へ流入するリンクの集合
$\Psi (= \psi_{na})$	:	乗客ネットワークのノードリンク接続行列
$l_a$	:	リンク $a$ に対応する路線
$o_{rs}$	:	ノード $r$ から $s$ へ向かう OD フロー

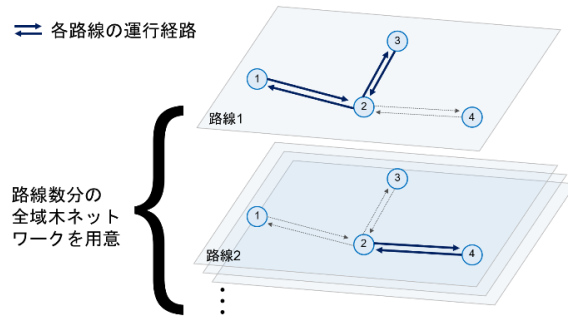


図-2 バス仮想ネットワーク

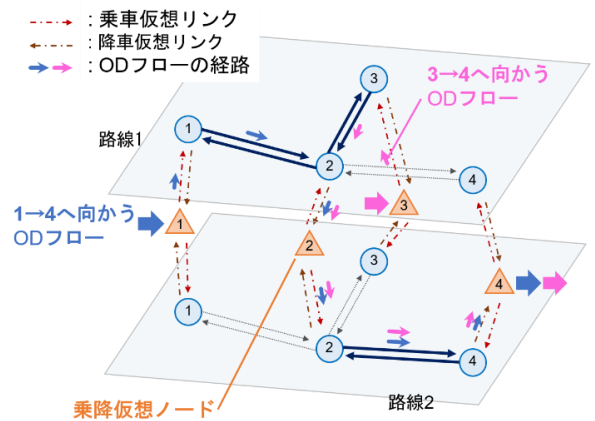


図-3 乗客仮想ネットワーク (目的地がノード4である場合)

$\alpha$	:	運行者費用と利用者費用の重み係数
$\lambda$	:	利用者の時間価値
$\kappa$	:	運行にかかる台数当たりのコスト
$\eta_l$	:	バス停での路線 $l$ のバス待ち時間
$\gamma$	:	バスのキャパシティ
$\tau$	:	運行時間幅

以下に、本モデルの計算にあたって設けた仮定を示す。バス路線は必ず往路で通過した経路を復路でも運行する。バス路線のOD需要は確定的であると、路線再編による需要変動は考慮しない。バスはすべてのOD需要を満足するように運行されなければならない。また、利用者の混雑による不効用を考慮しない。乗客の路線乗換時の待ち時間は、バス乗車時にバス停での待ち時間を課すことで表現する。この待ち時間は路線の頻度によらず一定であるとする。乗客はバス停での待ち時間を含めた所要時間を最小化する経路選択をする。一往復運行時間は上限値 $\bar{t}$ と下限値 $\underline{t}$ を設け、その範囲内をとるものとする。

## (2) 定式化

バス路線の路線設計と運行頻度を表現するため、本モデルでは各路線の通過するリンク、路線に投入するバス台数を未知変数として扱う。これを検討するにあたり、**図-2**のようなバス仮想ネットワークを導入する。路線につき一つの全域木ネットワークを用意し、各路線が通過するリンクを表現する。ただし、ネットワーク内のリンクはすべて双方向で対となる有向リンクで考える。

乗客の流動を表現するため、本モデルでは乗客の通過するリンクとフローを目的地別に集計することとして、目的地別リンクフローを未知変数として扱う。これを検討するにあたり、**図-3**のような乗客仮想ネットワークを目的地数分用意する。このネットワークは、バス仮想ネットワークの各ノードに乗降仮想ノードを連結した形状をしている。ある乗客は出発地の乗降仮想ノードを出発し、乗車仮想リンクを通りバス路線（全域木ネットワーク上）を移動する。目的地に到着すると、降車仮想リンクを通じ乗降仮想ノードへ戻る。路線を乗り換える場合は、乗降仮想ノードを通過し、別の路線へ移動するものとして考える。例えば、**図-3**は目的地をノード4とするODペアがノード1→4と3→4の二組存在する場合の乗客仮想ネットワークを示している。この例では、まず乗客はそれぞれの出発地から路線1に乗車し、ノード2で路線2へ乗換え、目的地ノード4へ向かっている。乗客の総乗換回数、乗車仮想リンクを通過したフロー量を集計することで計数することが可能である。また乗車仮想リンクに、乗車する路線の待ち時間を所要時間として課すことで、路線の頻度の差による乗客の路線選択行動を表現することができるが、本稿では計算の都合上待ち時間を路線の頻度によらず一定と仮定している。

以上の要件を踏まえ、路線設計および頻度を決定する路線運行戦略決定モデルを以下の混合整数線形計画問題(Mixed Integer Linear Problem)で定式化する。

$$\begin{aligned} \text{Min}_{x,y,z,p} \quad & \alpha \kappa \sum_l x_l + (1 \\ & - \alpha) \lambda \sum_s \sum_l \left( \sum_{a \in R} p_{als} t_a \right. \\ & \left. + \sum_{a \in B_l} p_{als} \eta_l \right) \end{aligned} \quad (2)$$

subject to

$$\sum_a \phi_{ka} y_{al} = 0, \quad \forall l \in L \quad (3)$$

$$\underline{t} \leq \sum_a t_a y_{al} \leq \bar{t}, \quad \forall l \in L \quad (4)$$

$$\sum_{a \in I_n(n)} y_{al} - K_l z_{nl} \leq 0, \quad \forall n \in N, l \in L \quad (5)$$

$$\sum_N z_{nl} - \sum_{A_l} y_{al} = 1, \quad \forall l \in L \quad (6)$$

$$\sum_a \psi_{na} p_{als} = \begin{cases} -o_{rs} & \text{if } j = r \\ o_{rs} & \text{if } j = s \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

$$t_a = \begin{cases} t_a & \text{if } a \in R \\ \frac{\sum_a t_a y_{al}}{x_l} & \text{if } a \in B_l \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

$$t_a = \begin{cases} t_a & \text{if } a \in R \\ \eta_l & \text{if } a \in B_l \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

$$\sum_s p_{als} \leq \begin{cases} \gamma \cdot 1 \cdot \frac{\tau x_l}{\hat{t}} \\ \tau b \\ \gamma y_{al} \frac{\tau}{\hat{t}} \end{cases}, \quad \forall a \in R \quad (10)$$

定式化の解説を加える。式(2)は社会的費用を示す目的関数である。社会的費用はバスの運行費用と乗客の利用者費用を重み付き和として計算する。バスの運行費用はその運行台数に支配的であると見え、第一項に示す表現とした。利用者費用は乗客の所要時間(バス乗車時間とバス停での待ち時間の和)と時間価値の積であり、第二項によって表わされる。バス停での待ち時間を乗車仮想リンクに課すことで、乗客の乗換を考慮している。利用者費用、運行者費用ともに貨幣単位で定義されるため、社会的費用最小化を考える場合は $\alpha = 0.5$ を設定するが、パラメータ $\alpha$ を変化させることでそれ以外の場合も考慮することが可能である。利用者費用のみを考慮する場合は $\alpha = 0$ 、運行者費用のみを考慮する場合は $\alpha = 1$ を設定すればよい。

式(3)から式(8)まではバス運行に関する制約条件である。式(3)は路線が往復で同じ経路を経由することをセクションごとに表現した双方向運行制約である。式(4)は路線運行時間制約である。路線 $l$ の一往復運行時間は $\sum_a t_a y_{al}$ と書けるが、仮定のように各路線には一定程度の長さがあることが望ましいため、このように制約している。式(5)(6)はsub-tourの除去、すなわち路線の経路が一筆書きとなるための制約である。式(5)は路線 $l$ が通過するノード $n$ を特定するための制約である。もし路線 $l$ がノード $n$ を経由するときには $z_{nl} = 1$ となる。グラフ上で一筆書きが成立するのは経路するリンク数よりノード数が1つ多いときのみに限られるため、式(6)で路線が経路するリンク数とノード数の差が1となることを制約する。式(7)から(10)は乗客のネットワークに関する制約条件である。式(7)はノードに関する乗客のフロー保存である。フロー保存は前述の目的地別に集計した乗客ネットワーク上で、バス路線上のノードではODフローの入りが等しく、乗降仮想ノードではそこで乗降したODフローに等しいとして制約する。式(8)は各リンクに課せられる所要時間を示す。路線上のリンクにはバスの所

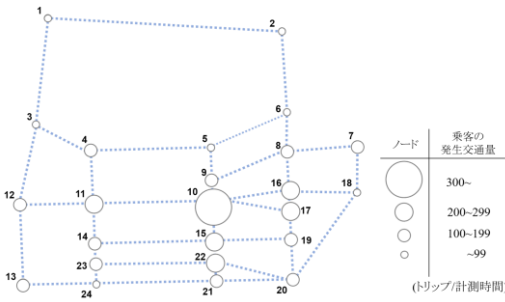


図-4 Sioux Falls ネットワークと乗客の発生交通量

表-1 既存のバス路線のOD表

着	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	sum
1	1	1	5	2	3	5	8	5	13	5	2	5	3	5	5	4	1	3	3	1	4	3	1	88	
2	1	1	2	1	4	2	4	2	6	2	1	3	1	1	4	2	0	1	1	0	1	0	0	40	
3	1	1	2	1	3	1	2	1	3	3	2	1	1	1	2	1	0	0	0	1	1	0	28		
4	5	2	2	5	4	4	7	7	12	14	6	6	5	5	8	5	1	2	3	2	4	5	2	116	
5	2	1	1	5	2	2	5	8	10	5	2	2	1	2	5	2	0	1	1	1	2	1	0	61	
6	3	4	3	4	2	4	8	4	8	4	2	2	1	2	9	5	1	2	3	1	2	1	1	76	
7	5	2	1	4	2	4	10	6	19	5	7	4	2	5	14	10	2	4	5	2	5	2	1	121	
8	8	4	2	7	5	8	10	8	16	8	6	6	4	6	22	14	3	7	9	4	5	3	2	167	
9	5	2	1	7	8	4	6	8	28	14	6	6	6	9	14	9	2	4	6	3	7	5	2	162	
10	13	6	3	12	10	8	19	16	28	40	20	19	21	40	44	39	7	18	25	12	26	18	8	452	
11	5	2	3	15	5	4	5	8	14	39	14	10	16	14	14	10	1	4	6	4	11	13	6	223	
12	2	1	2	6	2	2	7	6	6	20	14	13	7	7	7	6	2	3	4	3	7	7	5	139	
13	5	3	1	6	2	2	4	6	6	19	10	13	6	7	6	5	1	3	6	6	13	8	8	146	
14	3	1	1	5	1	1	2	4	6	21	16	7	6	13	7	7	1	3	5	4	12	11	4	141	
15	5	1	1	5	2	2	5	6	10	40	14	7	7	13	12	15	2	8	11	8	26	10	4	214	
16	5	4	2	8	5	9	14	22	14	44	14	7	6	7	12	28	5	13	16	6	12	5	3	261	
17	4	2	1	5	2	5	10	14	9	39	10	6	5	7	15	28	6	17	17	6	17	6	3	234	
18	1	0	0	1	0	1	2	3	2	7	2	2	1	1	2	5	6	3	4	1	3	1	0	48	
19	3	1	0	2	1	2	4	7	4	18	4	3	3	3	8	13	17	3	12	4	12	3	1	128	
20	3	1	0	3	1	3	5	9	6	25	6	5	6	5	11	16	17	4	12	12	24	7	4	185	
21	1	0	0	2	1	1	2	4	3	12	4	3	6	4	8	6	1	4	12	18	7	5	110		
22	4	1	1	4	2	2	5	7	26	11	7	13	12	26	12	17	3	12	24	18	21	11	244		
23	3	0	1	5	1	1	2	3	5	18	13	7	8	11	10	5	6	1	3	7	21	7	7	145	
24	1	0	0	2	0	1	1	2	2	8	6	5	7	4	4	3	0	1	4	5	11	7	7	77	
sum	88	40	28	117	61	76	121	167	163	451	224	140	145	141	213	261	234	47	128	184	110	244	145	78	3606

要時間  $t_a$ , バス乗車リンクには乗車する路線の平均待ち時間を課す。路線  $l$  の一往復運行時間は  $\sum_a t_a y_{al}$  であるから、営業時間  $\tau$  内の運行可能な回数は、

$$\frac{\tau x_l}{\sum_a t_a y_{al}}$$

であり、乗客の平均待ち時間は、

$$\frac{\sum_a t_a y_{al}}{x_l}$$

と表現できる。ところで、路線の一往復運用時間が  $\hat{t}$  となると仮定すると、営業時間  $\tau$  内の運行可能な回数は、

$$\frac{\tau x_l}{\hat{t}}$$

バス停での平均待ち時間は、

$$\frac{\hat{t}}{x_l}$$

と表される。ただし、本研究では計算の簡約化のため平均待ち時間を一定とし、

$$\frac{\hat{t}}{x_l} = \eta_l$$

として計算する。よって各リンクに課す所要時間は式(9)のようである。また式(10)は各路線の各リンクにおいてバス容量が乗客フローを満たすことを示す制約である。ただし、非線形制約となることを避けるため二式に分けて表現している。

平均待ち時間を一定と仮定したことにより、この問題は  $x_l, y_{al}, p_{als}, z_{nl}$  を変数とした MILP として考えることができ、汎用のソルバーを利用することで求解可能である。

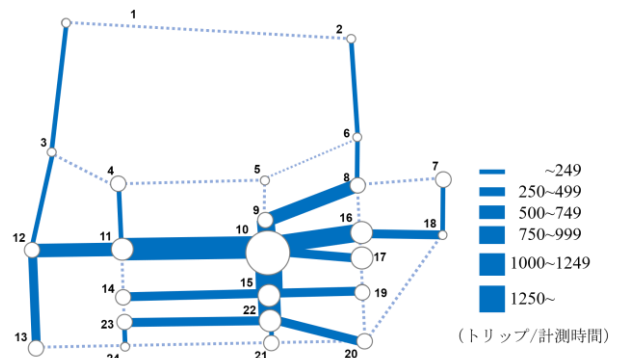


図-5 総走行距離最小化全域木の作成例とリンクフロー

## 5. ネットワークにおける試算例

### (1) 試算条件

Leblanc et al.<sup>10)</sup> に示される Sioux Falls ネットワーク(図-4)を例に、総走行距離最小化全域木を作成し路線戦略決定モデルの試算を行う。試算ではモデルより得られる解の妥当性を確認するとともに、パラメータの違いによる最適解の挙動を分析する。

ネットワーク内のノード数は24、リンク数は無向リンクで38、ただし全域木上に残るリンク数は23である。本試算ではリンクはネットワーク内に存在する道路を示し、その所要時間は各リンクの自由走行時間に従うものとした。仮想的に設定したOD表は表-1のように示され、その総数は3606トリップである。おける以上のようなネットワーク上で、乗客需要を満たす最適な路線運行戦略を試算する。OD表からこのネットワークにおける需要は、ノード10を中心としたエリアに需要が集中している様子がわかる。試算ではこの需要が大きいエリアでの挙動を中心に考察する。

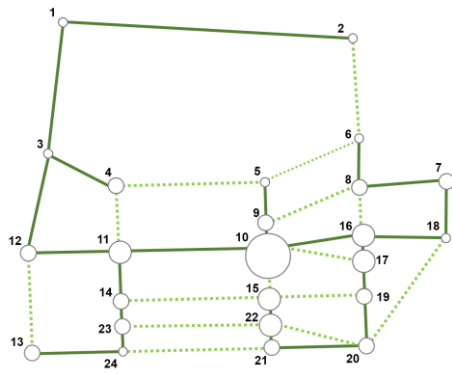


図-6 リンク長最小化全域木の作成例

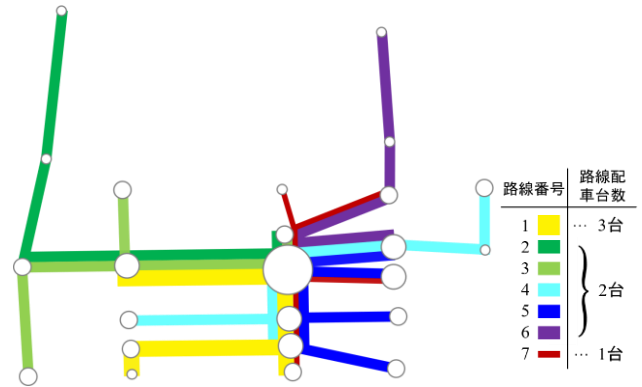


図-7 路線数7の場合の路線図の試算例

(2) 総走行距離最小化全域木の作成例

構築したタブーサーチアルゴリズムにより、Sioux Falls ネットワークの総走行距離最小化全域木を作成すると、図-5のように示され、乗客の総移動距離は7370kmと試算された。図中の実線が木として選定されたリンクであり、破線は木に含まれないリンクである。木では任意の2点間の経路は一意であるため、各リンクに対して通過するODが容易に特定できる。それを集計することで、各リンクを通過する乗客フローは算出することが可能である。図-5ではリンクの太さにより通過フロー（トリップ量）を表現している。比較のため、リンク長の和が最小となる一般的な最小全域木を作成すると図-6のように示され、総移動距離は9290kmと試算された。この場合では、総走行距離最小化全域木により総走行距離最小化全域木は最小全域木と比べ乗客の移動距離を約21%減少させられた。

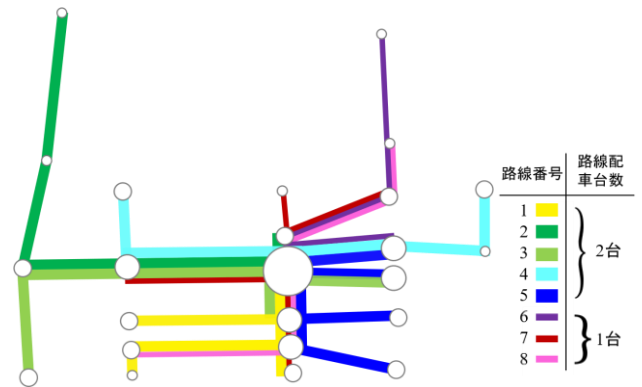


図-8 路線数8の場合の路線図の試算例

(3) 最適な路線運行戦略の試算例

構築した路線運行戦略決定モデルを使い、前節で得られた総走行距離最小化全域木上での最適な路線経路と運行頻度を試算した。筆者の環境（CPU：AMD Ryzen threadripper 1950X, RAM:DDR4-2666 64GB）では、計算負荷が膨大であることから厳密解を得ることが困難であった。そのため、本稿では計算時間制約を与えて、その時点で発見されている目的関数が最小の解を示す。求解には汎用プログラミング言語MatlabからソルバーにはGurobiを呼び出して利用した。

路線数を7, 8, 9と設定し、求解を試みた。なお、それぞれのケースで演算を打ち切ったときにおける最適解の上限値と下限値の差を示すGap値は12.6%, 11.9%, 10.9%である。図-7, 8, 9は得られた解を路線図として示したものである。図中では路線を色で区別し、その頻度は凡例を参照されたい。得られた路線運行戦略からは、図-5に示したリンクごとの乗客需要を満たしつつ、かつ

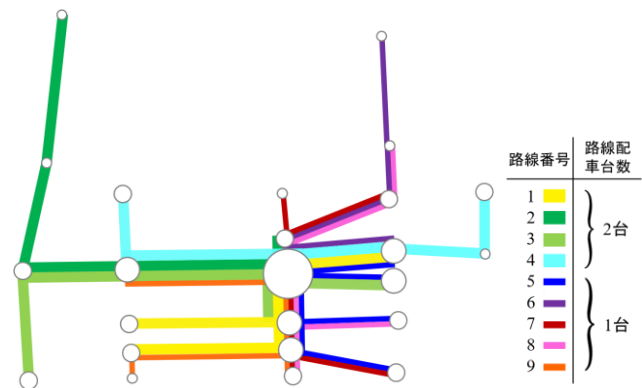


図-9 路線数9の場合の路線図の試算例

表-2 路線数変化による社会的費用の比較

路線数	社会的費用 (万円)
7	266.82
8	265.35
9	265.01

効率的にバス容量を各リンクに供給していることが確認できる。また、表-1にあるように、ノード10を中心としたエリアに需要が集中しているが、得られた3つの試算結果では、すべての路線がノード10を経由している。したがって、需要が集中するノードを中心に路線デザインすることで最適な解が得られていることがわかる。

また、路線数を変化させた場合の社会的費用は表-2のように得られた。ただし、この時の社会的費用の変動は1%未満であり、ほとんど変化しなかった。ゆえに、今後他のケースでの試算によるモデルの挙動確認が必要である。

## 6. おわりに

本研究では、効率性の高いバス路線再編計画決定の一助とするために、社会的費用を最小化するバスネットワークデザインモデルを構築した。バスネットワークデザインモデルは、使用する道路を総走行距離が最小になるような全域木に限定する最適化問題と、乗客需要を満たす制約の下、社会的費用を最小化する路線経路と運行頻度を求める路線運行戦略決定モデルによる2段階の最適化問題として定式化した。ネットワークから全域木を抽出する手法を導入したことにより、無数に存在するバス路線経路の選び方を限定することができ、任意のバス路線に対し最適なバス路線を提案するモデルを構築することができた。提案したモデルを、Sioux Fallsネットワークに適用し社会的費用を最小化する路線戦略を試算し、その挙動を確認した。得られた解はいずれの路線も需要の大きなエリアを経由する計画となり、妥当な結果が得られたと考える。

今後の課題を4点、以下に整理する。

まず、路線運行戦略決定モデルはMILPとして定式化しており厳密解の求解が可能であるが、計算が非常に複雑になっていることから演算に膨大な時間を要しており、大規模なネットワークにおいて厳密解を求解することが困難である。より計算負荷の軽い定式化が求められる。

次に本モデルでは、目的関数内に非線形項を設けることを防ぐため、路線ごとの待ち時間をその運行頻度によらず一定であると仮定している。しかし現実的には待ち時間は運行頻度に依存するため、この対応が必要である。方法としては、得られた解に基づいて運行頻度、待ち時間を定数として与え、その条件で再度求解する。この繰り返しにより、最適な運行頻度、待ち時間が得られるこ

とが期待できる。

また、目的地までの所要時間の変化によらず、路線再編前後で乗客需要が不変であるものと仮定しているが、実際にはその需要変動について考慮する必要がある。

本研究では、最適化問題の簡約化のため、ネットワークが全域木となる制約を課している。しかしながら、全域木の制約が著しく乗客の移動距離を増大させてしまうケースも考えられる。そこで、ネットワークが全域木状態でない緩和状態で路線運行戦略決定モデルの解の挙動について調べる必要があるだろう。

## 参考文献

- 1) 国土交通省HP：バスの車両数、輸送人員及び走行キロ。  
[<http://www.mlit.go.jp/statistics/details/content/001323146.pdf>]，（最終閲覧日：2020年2月29日）
- 2) （社）日本バス協会：日本のバス事業，2018。  
[[http://www.bus.or.jp/about/pdf/h30\\_busjigyo.pdf](http://www.bus.or.jp/about/pdf/h30_busjigyo.pdf)]，（最終閲覧日：2020年2月29日）
- 3) 国土交通省：地域公共交通網形成計画及び地域公共交通再編実施計画作成のための手引き（第4版），平成30年12月。  
[<https://www.mlit.go.jp/common/001267992.pdf>]，（最終閲覧日：2020年2月29日）
- 4) O.J. Ibarra-Rojas F. Delgado R. Giesen J.C. Muñoz: Planning, operation, and control of bus transport systems: A literature review, *Transport Research Part B*, Vol.77, pp.38-75, 2015.
- 5) 高山純一，宮崎耕輔：バスダイヤを考慮した最適バス路線網再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.
- 6) Szeto, Y.W. and Jiang, Y.: Transit route and frequency design: Bi-level modeling and hybrid artificial bee colony algorithm approach, *Transportation research Part B*, Vol.67, pp235-263, 2014.
- 7) Karaboga, D.: An idea based on honey bee swarm for numerical optimization, *Technical Report TR06*, Computer Engineering Department, Erciyes University, Turkey. 2005.
- 8) 吉野大介，羽藤英二：公共交通計画のための計算アルゴリズムの提案と低密度分散化する被災地におけるバス路線再編への適用，土木計画学研究・講演集，Vol.51, CD-ROM, 2015.
- 9) Rubinstein, R.Y.: The cross-entropy method for combinatorial and continuous optimization, *Methodology and Computing in Applied Probability*, Vol.1, pp. 127-190, 1999.
- 10) Michael G.H. Bell, Jing-Jing Pan, Collins Teye, Kam-Fung Cheung, Supun Perera.: An entropy maximizing approach to the ferry network design problem, *Transportation research Part B*, Vol.132, pp15-28, 2020.
- 11) Leblanc, L.J., Morlok, E.K. and Pierskalla, W.P.: An efficient approach to solving the road network equilibrium traffic assignment problem, *Transportation Research*, Vol.9, pp309-318, 1975

(???? ??. ?? 受付)

## A TWO-STAGE BUS NETWORK DESIGN PROBLEM AIM FOR MINIMIZING SOCIAL COST

Michiki AKIOKA, Satoshi SUGIURA and Fumitaka KURAUCHI