

# 地方バス路線における路線最適化モデル

丹羽 拓也<sup>1</sup>・大窪 和明<sup>2</sup>・坂本 邦宏<sup>3</sup>・谷島 賢<sup>4</sup>・久保田 尚<sup>5</sup>

<sup>1</sup>非会員 東海旅客鉄道株式会社 (〒457-0823 愛知県名古屋市南区元塩町5-1-1)

E-mail: niwa@dp.civil.saitama-u.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 埼玉大学大学院理工学研究科 助教 (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保255)

E-mail: okubo@dp.civil.saitama-u.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 イーグルバス (株) 顧問 (〒350-0042 埼玉県川越市中原町2-7-8Y&Leeビル3F)

E-mail: sakamoto@new-wing.co.jp

<sup>4</sup>正会員 イーグルバス (株) 代表取締役社長 (〒350-0042 埼玉県川越市中原町2-7-8Y&Leeビル3F)

E-mail: myajima@new-wing.co.jp

<sup>5</sup>正会員 埼玉大学大学院理工学研究科 教授 (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保255)

E-mail: hisashi@dp.civil.saitama-u.ac.jp

本研究では、人口の減少している地方部において有効な路線であると考えられる「ハブアンドスポーク」路線について、どのような条件の時にこの形状の路線が最適となりえるのかの定量的な評価・分析を行った。最適なバス路線を探るために、モデルを用いて予測を行った。用いたモデルは、バスの運行頻度や通行可能な経路、旅客の移動可能な人数や移動経路を制約条件として設定したうえで、バス会社がバスをネットワーク内で運行させる際に必要な運行コストを最小化することを目的としたモデルである。ときがわ町のネットワークにモデルを適用したところ、バス需要が増えるほど、ノードとノードを直接結ぶような形状のバス路線が最適になるという傾向が見られ、バス需要が減るほど、ハブアンドスポークの形状のバス路線が最適になるという傾向が見られた。

**Key Words :** bus route optimization, Hub and spoke, rural transportation

## 1. はじめに

### (1) 研究の背景と目的

人口減少や高齢化が進展するわが国の地方部において、バス事業者を取り巻く環境は年々変化しており、バス利用者の減少が懸念される。さらに、2002年には乗合バスに関する需給調整規制が廃止され、採算性の低い路線からはバス会社が撤退し、地域住民の生活の足が消失してしまうといった問題も起こり得る。地域住民のためのモビリティを守るには路線の維持が不可欠であり、そのためにはバスサービスの最適化が必要であると考えられるが、実際の道路ネットワークについて考えた際に、膨大な路線の組み合わせから最も効率的な組み合わせを見つけ出すことは難しい。

そこで本研究では、実在のバス路線を対象として重回帰分析を行い、バス利用者の数に影響を与える要因の把握を行うこと、また、そこで得られた要因を基にバス路線の最適化モデルを提案し、そのモデルを実際のネットワ

ークに適用することでバス事業者にとって最適な路線の組み合わせを解明することを目的とする。ここで、本研究では地方部における最適なバス路線として、短距離路線をハブで結ぶようなハブアンドスポーク型のバス路線について考える。

### (2) 既存研究の整理

バス路線の最適化に関する研究は様々行われている。例えば、高山らは、鉄道とバスの円滑な乗り継ぎを確保できるようなダイヤの設定を最適化モデルを用いることで提案し、実際の時刻表に適用することで乗換時間が改善されたことを確認している。

ハブアンドスポーク型の路線最適化に関する研究は様々な分野において成されてきた。Hansenらは、アメリカの航空産業のハブシステムをモデルを用いることで評価を行い、Wangらは、港運においてハブを経由することで物流コストの減少が可能であることの確認を行った。

しかし、バス路線にハブアンドスポーク型の路線を適

用した例としてはYajimaらの論文を見ることができ、バス路線についてハブアンドスポーク型の路線構造をモデルを用いることで評価している研究は見つけることができなかった。

### (3) 対象地域の紹介

本研究では、人口減少・高齢化が進展する地方部として埼玉県のとしがわ町と東秩父村を対象とする。

としがわ町は埼玉県の中部に位置する町であり、人口は年々減少傾向にあり、高齢化率も平成27年には30%を超えている。この町で運行されているバス路線であるが、2010年の10月に「せせらぎバスセンター」といった施設をハブとした、ハブアンドスポーク型の路線構造が採用され、ハブを起点として町外の3つの鉄道駅と町内西部の地域とを結んでいる（図1参照）。この町では、ハブアンドスポーク型の路線への再編後からバスの利用者数が増加し、その後も緩やかに増加傾向がみられるなど成果を挙げている（図2参照）。

東秩父村は埼玉県の西部に位置する村であり、としがわ町同様にこの村でも人口減少と高齢化が進展している。この村では現在、村外の小川町駅から村の中部・西部を結ぶ民営のバス路線と村外の寄居駅から村内の和紙の里までを結ぶ村営のバス路線とが混在している（図3参照）。村では平成28年度にこの「和紙の里」をハブとした両路線の統合・再編が計画されているが、としがわ町同様にこの再編が成功するかどうかはわからない。



図1.としがわ町のバス路線

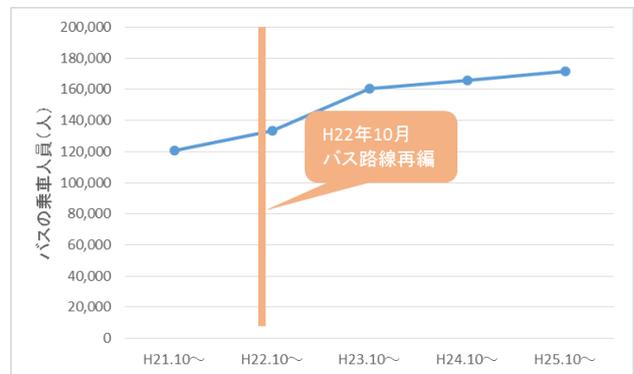


図2.としがわ町バス乗車人員の推移

## 2. バスの乗車人員に影響を与える要因の把握

### (1) 分析の概要

バスの運行本数が増加するほどバスの乗車人員も増加する、バスの運行間隔が短くなるほどバスの乗車人員も増加する、などバスの乗車人員に影響を与える要因は複数考えられる。そこで、どのような要因がバスの乗車人員に影響を与えるのかを探るために重回帰分析を行う。分析対象としては、としがわ町、東秩父村のバス路線の各系統とする。

### (2) 使用変数

分析にあたって、被説明変数にバスの各系統当たりの年間の乗車人員（人/年）、説明変数に各系統の端点から端点までの移動時間（分）、各系統の端点において次のバスが来るまでの時間の平均値としての運行間隔（分）、各系統の1日当たりの運行便数（本/日）、各系統に駅を含むか否かの駅ダミー変数を用いた。



図3.東秩父村のバス路線

### (3) 分析結果

分析結果を以下に示す。得られた重回帰モデルは以下の通りで、分析結果の概要は表1に示す。

分析結果を見ると、重決定係数 $R^2$ の値は約 0.81 と高く、このモデルの当てはまりの良さはかなり良いとわかる。次に分析結果の $t$ 値と $P$ 値を見ると、「運行便数」と「駅ダミー」のものは有意といえるが、「所要時間」、「運行間隔」のものは有意とは言えない。各変数の係数の符号を見てみると、「運行間隔」のもののみ負となっており、「所要時間」、「運行便数」、「駅ダミー」のものは正となっていた。これは、運行間隔が長くなるほどバスの乗車人員は減り、所要時間や運行便数が増えるほど、また、系統に駅を含めばバスの乗車人員が増加するということを表している。

ここで、運行便数の係数に着目してみると、+1879.59となっていることから、運行便数が1日1便増えるとバスの乗車人数は年間で約1880人、つまり1日約5人増えることがわかる。

$$\begin{aligned} (\text{年間乗車人員}) &= -15619 + 290.57 \times (\text{所要時間}) \\ &\quad + 1879.59 \times (\text{運行便数}) \\ &\quad - 5.32 \times (\text{運行間隔}) \\ &\quad + 13065.31 \times (\text{駅ダミー}) \end{aligned}$$

## 3. 最適化モデルの提案

### (1) モデルの前提条件

重回帰分析の結果より、運行便数の変数が有意であり、運行本数の増減がバスの乗車人員の増減に影響を与えていると分かる。これを考慮するには、バス運行の路線や経路を最適化する必要がある。そこで本研究では、数ノード間をリンクが結んでいて、そのリンク上を複数のバスが運行しているときに、バス会社の運営にかかるコストを最小化するような路線や運行頻度の設定を考える。その際に、地方部において路線バスが通れるような道路は限られているものとして、路線バスの運行ルートは所与である。道路の混雑や事故によるバスの遅延の影響は考えず、各ノード間の移動にかかる所要時間は一定である。バスの発車位置や運行台数は自由に設定できる、ことなどを前提条件として考える。

表1.重回帰モデルの分析結果

変数	係数	$t$ 値	$P$ 値
切片	-15619	-2.32	0.037
所要時間	290.57	1.60	0.134
運行便数	1879.59	5.16	0.0001
運行間隔	-5.32	-0.47	0.645
駅ダミー	13065.31	3.18	0.007
重決定係数 $R^2$	0.81		

### (2) モデルの定式化

$$\min \sum_{i,j,m} c_k^m f_k^m \quad (1)$$

s.t.

$$0 \leq f_k^m \leq y_k^m \cdot f_{k,max}^m \quad \forall k, m \quad (2)$$

$$\sum_{k \in K_m} y_k^m = 1 \quad \forall m \quad (3)$$

$$x_{ij} \leq \text{cap} \cdot \sum_m \delta_{k,ij}^m \cdot f_k^m \quad \forall i, j, k, m \quad (4)$$

$$x_{ij} = \sum \delta_{ij,k}^0 \cdot r_k^{OD} \quad (5)$$

$$y_k^m \in \{0,1\}, \delta_{k,ij}^m \in \{0,1\} \quad \forall i, j, k, m \quad (6)$$

ここで、

$i$  : バスの出発ノード

$j$  : バスの到着ノード

$O$  : 旅客の出発ノード

$D$  : 旅客の到着ノード

$k$  : バスが通る経路

$m$  : ノード $ij$ 間を移動するバス

$c_k^m$  : バス会社が経路 $k$ をバス $m$ で運行させるのに必要なコスト

$f_k^m$  : バス $m$ が経路 $k$ を運行する頻度

$y_k^m$  : 経路 $k$ を通るバス $m$ が存在するか否かの $\{0,1\}$ 変数

$\text{cap}$  : バス1台当たりの容量

$\delta_{k,ij}^m$  : バス $m$ が通る経路 $k$ にノード $i$ からノード $j$ へ向かう経路を含むか否かの $\{0,1\}$ 変数

$x_{ij}$  : ノード $i$ からノード $j$ への移動人数

$r_k^{OD}$  : 経路 $k$ を通り、ノード $O$ からノード $D$ へ向かう路線

であり、式(1)は本モデルの目的関数である。バス $m$ が経路 $k$ を運行する頻度に、その際に必要な費用をかけることでバス会社の運行コストを表しており、それを最小化することを目的としている。式(2)はバスの運行頻度を表す制約条件である。経路 $k$ におけるバス $m$ の運行頻度は経路 $k$ を通るバス $m$ が存在する場合は、最大でも経路 $k$ におけるバス $m$ の運行頻度の最大値以下となり、経路 $k$ を通るバス $m$ が存在しない場合は、0本となる。式(3)はバスの運行に関する制約条件である。経路 $k$ を通るバス $m$ は1台しか存在しないということを表している。

式(4)はノード間の旅客の移動人数を表す制約条件であ

る。ノード*ij*間の移動人数はノード*i*からノード*j*へ向かう経路が存在する場合は、ノード*ij*間におけるバス*m*の運行頻度にバスの容量を掛けた値以下であるとする。

式(5)はノード間の旅客の移動人数と OD 間の旅客の移動人数との関係を表す制約条件である。ノード*ij*間の移動人数は、経路にノード*ij*間を含む路線*OD*間の移動人数を経路*k*分足し合わせた人数に等しいとする。

#### 4. 最適バス路線の提案

##### (1) ネットワークの定義

モデル適用にあたって、ときがわ町と東秩父村のネットワークをモデルで適用しやすい形に定義する。ときがわ町のネットワークを地図上に記したものが図4で、それをモデル適用の際に定義したものが図5。それらの対応関係を表2に示す。また、東秩父村についても同様に、ネットワークを地図上に記したものを図6、モデル適用の際に定義したものを図7、それらの対応関係を表3に示す。

表2. 図4と図5の対応表

図 4	図 5
小川町駅	ノード 1
武蔵嵐山駅	ノード 2
越生駅	ノード 3
日向根	ノード 4
竹の谷	ノード 5
せせらぎバスセンター	ノード 6
明覚駅	ノード 7
日影	ノード 8
交差点 A	ノード 9
交差点 B	ノード 10
交差点 C	ノード 11



図4.ときがわ町のネットワーク

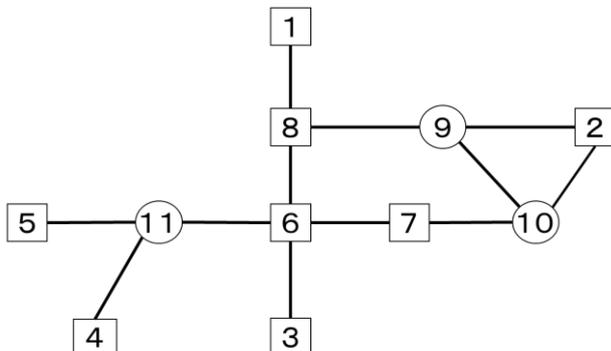


図5.モデル適用の際のときがわ町のネットワーク



図6. 東秩父村のネットワーク

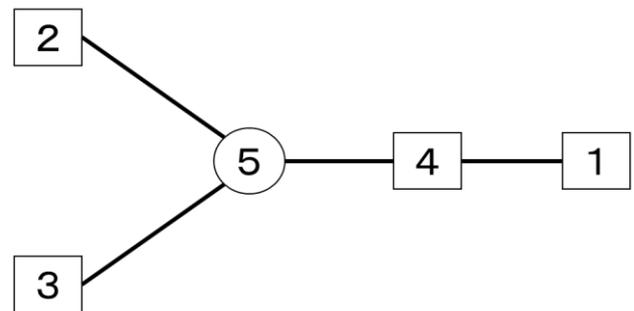


図7. モデル適用の際の東秩父村のネットワーク

表3. 図6と図7の対応表

図 3-16	図 3-17
小川町駅	ノード 1
寄居駅	ノード 2
白石車庫	ノード 3
和紙の里	ノード 4
交差点 A	ノード 5

(2) ときがわ町への適用結果

ときがわ町のネットワークに,提案した最適化モデルを適用して分析を行った.その結果,最適なバス路線の形状は図に示すような,ノード間を直接結ぶような路線構造とハブアンドスポーク型の路線構造を混ぜ合わせたような形状であると分かった.

加えて,人口の増減などによる最適バス路線の変化を探るため,現在の OD 需要を増減させて感度分析も行った.その結果,OD 需要が増えるほどノード間を直接結ぶような路線が最適になり,OD 需要が減るほどハブアンドスポーク型の路線が最適になるという傾向が見られた (図参照).さらに,OD 間需要が増えるほど旅客 1 人当たりの運行コストが減少するという傾向も判明した (図参照)

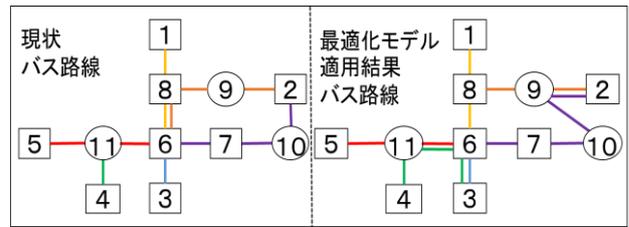


図 8.ときがわ町の現状バス路線と最適バス路線

(3) 東秩父村への適用結果

また,東秩父村のネットワークを対象として同様の分析も行った.その結果,再編が行われていない現在の形状のバス路線が最適という結果になった (図参照).OD 需要を増減させた感度分析の結果,ときがわ町のケースと違い,最適路線形状に規則的な変化は見られなかった.これは,現状東秩父村のバス路線でハブとなる予定のノード 4 (和紙の里) の需要が小さいためであると考えられ,ノード 4 の需要を増やすことで路線形状がハブアンドスポーク型に近づいた (図参照).

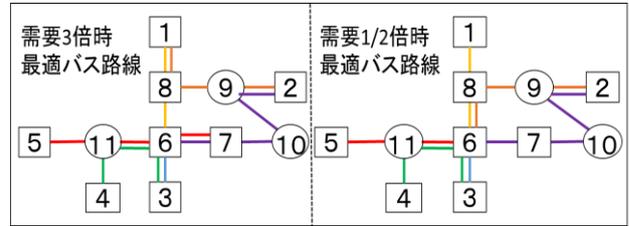


図 9. 需要増減時のときがわ町の最適バス路線

5. 結論

(1) まとめ

本研究では,人口の減少している地方部において有効な路線であると考えられる「ハブアンドスポーク」路線について,どのような条件の時にこの形状の路線が最適となりえるのかの定量的な評価・分析を行った.

対象地域としては,埼玉県の中西部に位置する人口減少地域であるときがわ町と東秩父村を採用する.ときがわ町では「ハブアンドスポーク」形状のバス路線がすでに採用されており,本当に今の路線形状が最適であるか定量的な評価を行う.東秩父村では将来的に「ハブアンドスポーク」形状のバス路線を採用する路線再編計画がもたれており,そのような路線が最適なのかの予測を行う.

予測に先立って,重回帰分析を行うことで利用者数が多いのはどのようなバス路線であるかの分析を行った.それによると,運行頻度が多く,運行間隔が短く,乗車時間が長くなるようなバス路線ほど,バスの乗車人員が多くなる傾向が見られた.

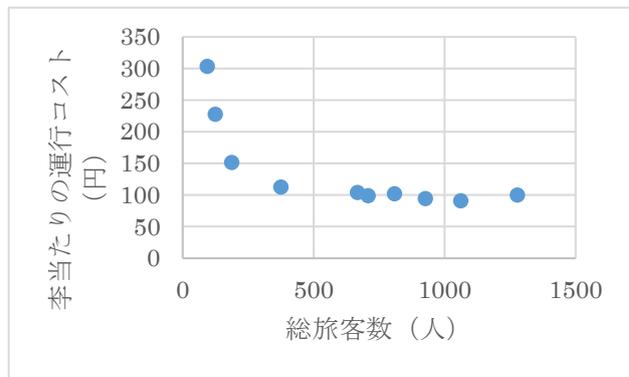


図 10.旅客者数と 1 人あたりの運行コストの関係

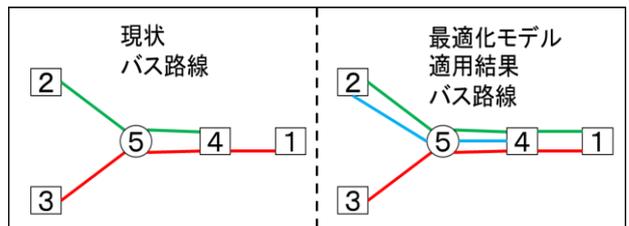


図 11.東秩父村の現状バス路線と最適バス路線

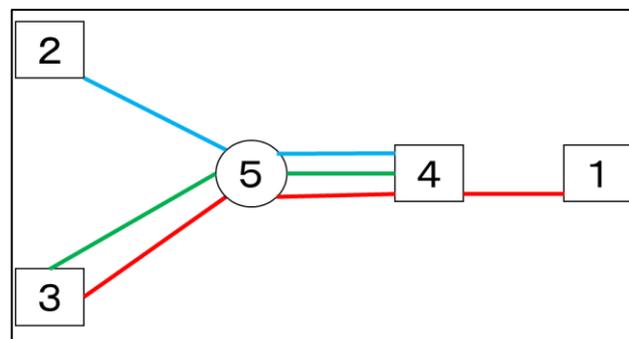


図 12.ハブノードの需要増加時の東秩父村の最適バス路線

最適なバス路線を探るために、モデルを用いて予測を行った。用いたモデルは、バスの運行頻度や通行可能な経路、旅客の移動可能な人数や移動経路を制約条件として設定したうえで、バス会社がバスをネットワーク内で運行させる際に必要な運行コストを最小化することを目的としたモデルである。

モデル適用の結果、ときがわ町では再編が行われた後である現在の「ハブアンドスポーク」形状のバス路線と再編が行われる前の、ノードとノードを直接結ぶような形状のバス路線が最適であり、東秩父村では、再編が行われる前の現在の、ノードとノードを直接結ぶような形状のバス路線が最適であるという結果が得られた。また、ときがわ町のネットワークでは、バス需要が増えるほど、ノードとノードを直接結ぶような形状のバス路線が最適になるという傾向が見られ、バス需要が減るほど、ハブアンドスポークの形状のバス路線が最適になるという傾向が見られた。東秩父村のネットワークではそのような傾向が見られなかったが、これは東秩父村においてバスの運行可能なネットワークは極端に限られているためである

と考えられる。

## (2) 今後の課題

本研究において、バス会社にとって最適な路線は判明したが、バス利用者にとって最適な路線はどのような路線であるかは判明していない。「ハブアンドスポーク」形状の路線にただでは、バス利用者にとっては乗り換えの手間が増えるだけとなり、むしろ非最適な路線となるだけかもしれない。これを回避するための方策としては、ハブノードでバスを一斉に離発着させるようなダイヤの設定などが考えられるため、今後の課題としては、路線形状と併せてダイヤの設定も最適化の対象として考えるということを挙げられる。

また、本研究では2つの地域を対象地域として選定し、モデルを適用して最適バス路線の発見を行ったが、それぞれの地域で異なるような結果も見られた。モデルの適用地域を増やすことで、ネットワークの特性別の最適バス路線の提案もできるかもしれない。

## ROUTE OPTIMIZATION MODEL AT RURAL BUS ROUTE

Takuya NIWA, Kazuaki OKUBO, Kunihiro SAKAMOTO, Masaru YAJIMA,  
Hisashi KUBOTA