

バス停までのアクセシビリティを考慮した 路線最適化モデルの適用

丹羽 拓也¹・大窪 和明²・坂本 邦宏³・谷島 賢⁴・久保田 尚⁵

¹非会員 埼玉大学大学院理工学研究科 (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保255)
E-mail:niwa@dp.civil.saitama-u.ac.jp

²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

³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

⁴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

⁵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、少子高齢化の進む埼玉県日高市を対象としたアンケート調査および交通手段選択分析から、自宅からバス停までの距離がバスの利用を妨げる主要な要因となっていることを明らかにした。また、住民のバス停までの距離に応じたバス停利用の選択問題を制約条件として、総費用が最小となるような路線とバス停配置を決める路線最適化モデルを提案した。その結果、現状の設定では、現在と同様の路線が最適であることが確認された。さらに、将来の利用意向に関するアンケート調査結果を基に将来シナリオを作成し、提案モデルを適用した結果、現在とは別の路線が最適な路線となった。この路線では、現在の路線よりも運賃収入が増加しているだけでなく、バス停数も増加しており、住民の交通利便性が向上していることが確認された。

Key Words : bus route optimization, logit model, rural transportation

1. はじめに

(1) 研究の背景と目的

人口減少・高齢化が進むわが国の地方部において、住民の交通利便性を確保するために、バス路線の採算性を確保する必要がある。公共交通の中でも、軌道が必要なため導入コストが高くなる鉄道やLRT、高い運賃が必要とされるタクシーなどとは違い、軌道を必要とせず、運賃も抑えられる乗合バスは、多くの地域で取り入れやすい交通手段だと考えることができる。

2002年に乗合バスに関する需給調整規制が廃止されたことにより、既存路線への他社の新規参入や新路線の開発が自由になったが、それと同時に、採算性の低い地域ではバス路線が廃止となってしまうこともありえる。

バスなどの公共交通は、相応の乗車人員を確保できなければ経営が成り立たず、バス路線を廃止せざるを得な

い、路線維持のためには、運行ルートやバス停設置などの基本的な見直しが最低限必要であると考えられる。

そこで本研究では、対象地域へアンケートを行うことにより、地域住民の交通需要構造を把握し、それらの結果を基に、バス事業者が収入を見込め、なおかつ地域の住民のバス停へのアクセシビリティも考慮したモデルの適用、検討を行うことを目的とする。

対象事例として、高齢化の進展する埼玉県日高市において、イーグルバスが運行している日高飯能路線について、より多い乗車人員が見込め、かつバス運行にかかるコストを最小化するようなバス路線最適化モデルを適用し、新規バスルートを導入した場合の効果について検討することとする。

(2) 既存研究の整理

バスの路線の最適化について、さまざまな研究が行われている。

例えば、船戸ら¹⁾は、事業者にとってバス運行の最適化を図ることが路線の乗車人員を増加させ、経営の改善、地域住民の足の確保につながるとの考えから、居住人口、バスサービスレベルなどのデータを用いて重回帰モデルを作成し、路線の最適化を行っている。特徴としては、アンケート調査によらず、人口データや乗降データなどの既存の情報から予測を行っていること、GISを用いていること、境界域を分析するため、マイクロメッシュを使用していることなどがあげられる。この研究では、バス路線を迂回させ、新たなバス停を置くことで、乗車人数がどれ位変わるかといった視点からバス路線の最適化を行っているが、どこにバス停を置くべきか、また置くべきでないかを考えることや、バス停までの徒歩での移動を考慮することで、より最適な答えを出すことができたかもしれない。

また、高山ら²⁾は、バス交通活性化のために、利用者から見た最適バス路線網計画策定システムの提案を行い、ケーススタディを通してその有効性の検討を行っている。この研究の成果としては、乗り換え需要を考慮してより現実的なバスダイヤの作成を可能とした、利用者と事業者のバランスを考慮したシステムの構築を行った、構築されたモデルの計算結果と実際のバス会社の案との整合性を検証した、ことなどがあげられる。

これまでの既存研究をうけ、バス停までのアクセシビリティがバスの利用に与える影響や、具体的なバス運行コストの算出がなされていないことがわかる。これより、本論文では、利用者のバス停までのアクセシビリティを考慮して、バス停の選択という複雑な問題を、大規模な範囲にも拡大可能な路線最適化モデルを提案し適用していく。最適化モデルは、Wangら³⁾の研究のものを参考にした。

(3) 本研究の流れ

本研究の流れは次のとおりである。まず最初にアンケート調査を実施して、交通需要構造の把握とデータの取得を行う。次に、そのデータを基にロジットモデルで統計分析を行う。そして最後に路線最適化モデルを適用して分析を行う。

3. 対象地域・対象路線の紹介

(1) 対象地域の紹介

本研究ではケーススタディとして、高齢化の進む埼玉県内の地域として埼玉県日高市を取り上げる。埼玉県日高市は県の南西部に位置し、首都40キロ圏内に位置する。日高市は、日高団地・高麗川団地という2つの大きな団地

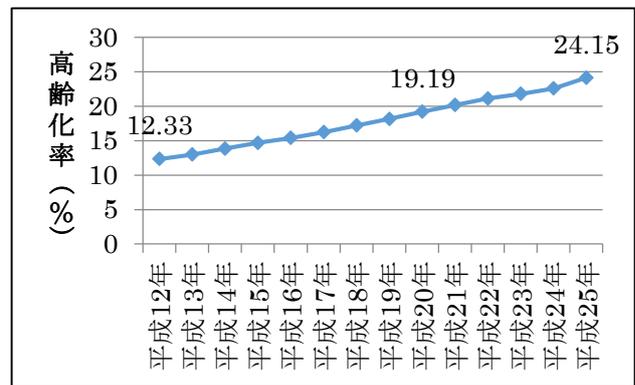


図1.日高市の高齢化率の推移

を抱えている。日高市全体の人口分布をみると60代が最も高くなっている。また高齢化率も年々増加しており、平成25年には24.15%となっており、高齢化率が21%を超えていることから、この地域は超高齢社会であるといえる。(図1参照)

(2) 対象路線の紹介

本研究で対象とする路線について説明する。本研究で対象とする、イーグルバス株式会社が運行する日高飯能路線は、日高市東部にある日高団地、高麗川団地とJR武蔵高萩駅、飯能市の西武飯能路線をつなぐ路線である。また、1日の便数は少ないが、JR高麗川駅や埼玉医科大学国際医療センター方面にも運行している。

高齢化する地域において、これらの施設への住民の足を担っているこの路線は地域住民のためにも必要不可欠と考えられる。

4. アンケート調査

(1) 調査目的と調査対象

調査目的は、バス利用可能性のあるイーグルバス日高飯能路線の沿線住民、およびバス利用者の利用状況（普段バスをどの程度利用しているか）などの把握を行うことと、バス路線最適化のためのモデル作成に当たって必要なデータ（年齢などの個人属性、車の保有状況、バス停までの移動時間や距離、将来のバス利用の予測など）を取得することである。

また、調査対象はイーグルバス日高飯能路線沿線の住民、およびバスの利用者とする。バス利用の理由は、鉄道駅の理由がほとんどだろうという判断から、鉄道駅周辺には配布を行っていない。

(2) 調査方法

路線沿線の各世帯へランダムでポスティングを行った。その際、回答者の居住地を把握して、居住地からバス停ま

表1.アンケートの配布,回収状況

	高麗川団地 周辺	高麗川団地 周辺以外	合計
配布数	2,520	4,650	7,220
回収数	162	281	443
回収率	6.00%	6.20%	6.20%

での傾斜を算出するため、高麗川団地周辺の地域においてはアンケート返信用封筒にナンバリングをすることで、回答者の居住区を分かるようにした。

(3) 回収状況

アンケートの配布数,回収数,回収率を上に記載する。(表1参照)

(4) アンケート結果

地域住民へ配布したアンケートについて、主な結果を紹介していく。

a) バスの利用状況について

普段から利用していると回答している人が30.2%、利用していないと回答した人が63.5%と、普段バスをあまり利用していない人が多かった。(図2参照)

b) バスの利用状況とバス停までの距離との関係について

普段のバス利用状況とバス停までの距離の調査について、クロス集計を行った。バス停までの距離が50m未満の人の割合はバスの利用者で16.4%、バスの非利用者で8.0%と利用者の方の割合が2倍近く高くなっていた。また、バス停までの距離が300m以上の人の割合はバスの利用者で9.8%、バスの非利用者で20.0%と、こちらでは非利用者のほうの割合が2倍近く高くなっていた。このことから、バス停までの距離はバスの利用に影響があると考えられる。(図3参照)

c) バスの利用状況とバス停までの時間との関係について

普段のバスの利用状況とバス停までの徒歩時間との調査について、クロス集計を行った。1分未満,1-2分でバスの利用者の割合が非利用者の割合を上回り,2-3分,3-5分で非利用者の割合が利用者の割合を上回ったが,5-10分で再びバスの利用者の割合が非利用者の割合を上回るなど、バス停までの徒歩時間はバスの利用にあまり影響は出ないと考えられる。(図4参照)

d) バスの利用状況と車の保有との関係について

普段のバスの利用状況と各世帯で自家用車を保有状況の調査について、クロス集計を行った。車を保有していない回答者で、バスの利用者の割合が37.7%に対して非利用者の割合が6.6%、保有しているが送迎してもらえないという回答者で、バスの利用者が15.9%、バスの非利用者が

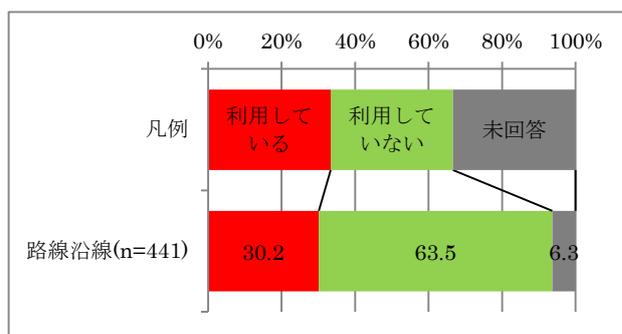


図2.バスの利用状況

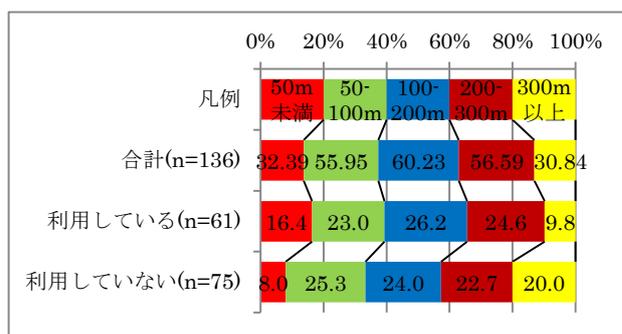


図3.バスの利用状況とバス停までの距離との関係

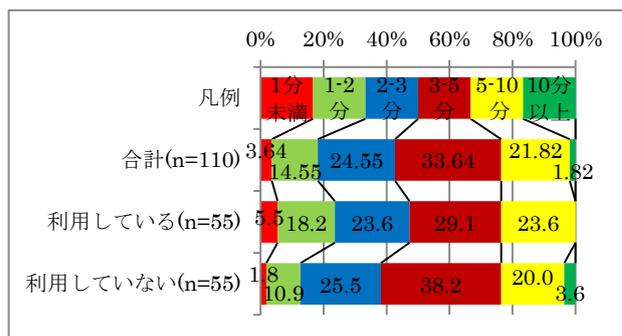


図4.バスの利用状況とバス停までの時間との関係

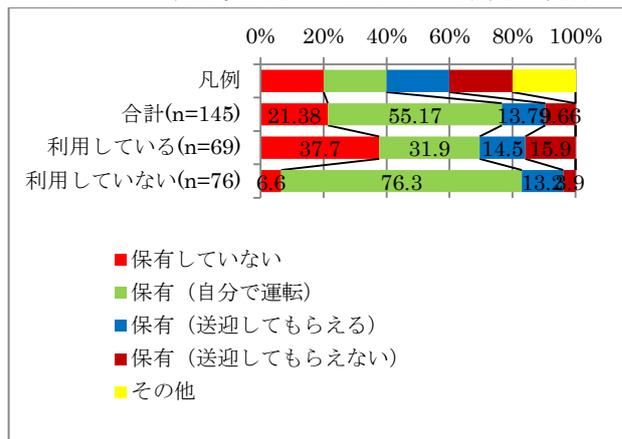


図5.バスの利用状況と車の保有との関係

3.9%,それに対して車を保有しており自分で運転できる回答者で、バスの利用者の割合が31.9%、バスの非利用者の割合が76.3%と、車の保有の有無はバスの利用に大きな影響があると考えられる。(図5参照)

e) 将来のバス利用の予測について

5年後（平成30年）のバス利用状況はどうなっているかという調査結果についての結果を図に示す。利用が増えると回答している人が28.5%おり、対象地域において今後バス利用の需要はもっと増加していくものと推測できる。（図6参照）

また、65歳以上の解答者から、「バスの利用が増える」と想定した回答者が増えていたため、この地域で高齢化が進んでいくことで、バスの需要がさらに高まっていくことが予想できる。（図7参照）

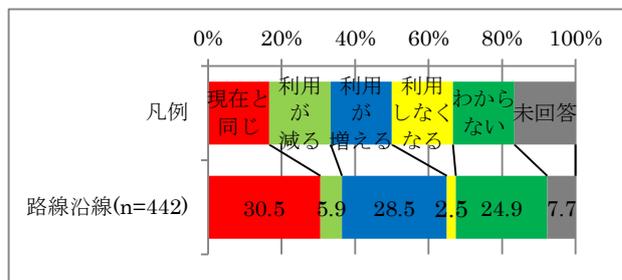


図6.将来のバス利用の予測

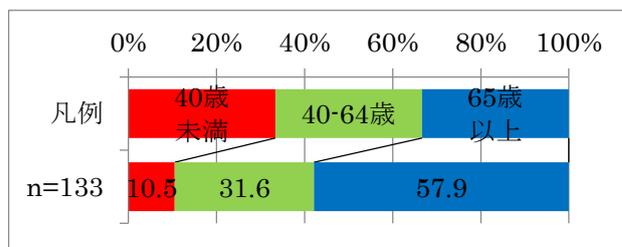


図7.バスの利用が増えると回答した人の年齢区分

5. 統計分析

(1) 使用データとその取得方法

本研究では、バス利用に影響を与える事柄を分析するために、非集計の2項ロジットモデルを用いた。

本モデルで使用するデータとその入手方法について説明を行う。

「年齢」、「車の保有状況」、「家からバス停までの距離」、「家からバス停までの時間」は、アンケートから入手したデータを用いる。

「家から目的地（ここでは武蔵高萩駅と仮定する）までの移動時間」と「家から目的地までの移動距離」も説明変数に加える。移動時間と移動距離の算出には、アンケートから得られた居住地をもとに、Google map から算出する。

日高飯能路線の運行する高麗川団地周辺は坂道が多いことから坂道による傾斜もバス利用に影響があるかもしれないと考える。そこで、「家からバス停までの最大傾斜」と「家からバス停までの傾斜がある区間の割合」も説明変数に加えることとする。傾斜の算出には Google の地図情報のデータを基に、2点間の最大傾斜、傾斜がある区間の割合を算出し、グラフで表示してくれる Athlete Maps(<http://y-ich.github.io/maps/athlete-maps.html>)というサイトを用いた。

バス停から目的地までの運賃や走行距離についても検討を行った。バス利用の目的地を駅だと仮定し、イーグルバス日高飯能路線が結んでいる武蔵高萩駅、高麗川駅、飯能駅のうち、最も運行本数の多い武蔵高萩駅までの「最寄りバス停からの運賃」と「最寄りバス停からの距離」をイーグルバスホームページから入手した。

(2) 推計結果

以上のように得られたデータを変数に使用してロジットモデルの推計を行った。推計に当たってはフリーの統計ソフトである R を使用する

表2.ロジットモデルの使用変数とそのt値

変数	変数の説明	t値
y	バスの選択可能性	
切片		-2.950
x ₁	年齢 (高齢者か否かのダミー変数)	-0.692
x ₂	車の保有状況 (車を持っているか否かのダミー変数)	-1.702
x ₃	家からバス停までの時間	-3.244
x ₄	家からバス停までの距離	-0.135
x ₅	家からバス停までの最大傾斜	0.925
x ₆	家から目的地までの距離	-1.657
x ₇	家から目的地までの時間	5.297

バスと車の選択を次のような非集計ロジットモデルとして定式化する。

$$P_{bus} = \frac{\exp(V_{bus})}{\exp(V_{bus}) + \exp(V_{car})} \quad (1)$$

「年齢」、「車の保有状況」、「家からバス停までの時間」、「家からバス停までの距離」、「家からバス停までの最大傾斜」、「家から目的地までの距離」、「家から目的地までの時間」を変数に入れたモデル式を推計する。その結果を以下に示す。

$$V_{bus} = -8.563 - 0.404x_1 - 1.017x_2 - 0.816x_3 - 0.0005x_4 + 0.214x_5 - 0.0009x_6 + 1.223x_7 \quad (2)$$

また、数式2の変数の意味とt値を表2に示す。それぞれの変数についてt検定を行うと、サンプル数が多いため、自

由度が無限大として、「家から武蔵高萩駅までの時間」, 「家からバス停までの時間」, の変数のt値が,それぞれ 5.297,-3.244であり,絶対値が1.960より大きいため,95%の信頼度で有意だといえる。

6. バス路線最適化の検討

(1) 路線最適化検討の流れ

バス路線最適化の検討は次のような流れで行うものとする。

まず,アンケートなどによってデータを取得する.次にそのデータを用いてロジットモデルの推計を行う.そして,バスルートを仮定して,最適化モデルに当てはめ,バス路線変更の検討を行う.なお,バス利用者の推定にはロジットモデルの結果を使用する。

(2) バスルートの仮定とバス利用者の推定

アンケートの結果やロジットモデルの推計結果から,新たなバスルートの選定を行う.なお,本研究では計算の簡略化のため,大きな団地が立地し,利用者の増加も見込めるであろう高麗川団地周辺のバス路線についての計算を行う。

アンケートの集計結果やロジットモデルの推計結果から,車の保有状況やバス停までのアクセス性がバス利用に影響を与えると考えられる.そこで,車を保有していなかったり,バス停までのアクセス性が悪い回答者の居住地の近くで,なおかつバスが通れるであろう大きな道を検討バスルートとして設定する。(図8参照)

また,作成したロジットモデルを使用してバス利用者の推定を行う.計算の簡略化のために,対象の地域をいくつかのエリアに区切り,その区切られたエリア内の回答者のデータを使い算出したエリアの分割に当たっては,右上から左に順に,居住地1,2,と設定していく.バスの利用確率をそのエリア内の概算人口に掛け合わせることで,バスの利用人数の算出を行った。(図9参照)

(3) バス路線最適化の計算

a) 変数・パラメータの計算

バス路線沿線の住民の居住地を*i*,バス停の設置場所を*j*,*k*と表す.これらを用いて操作変数を次のように設定する.バスがルートを走るときに,バス停*j*に本当にバス停を置く必要があるのか,また,バス停を置いた際に停車時間はどの程度になるのかについてを考える必要がある.そ



図8.現状ルートと検討ルート



図9.エリア分割の概形

ここで,操作変数として,バス停にバスが停車する時間を s_j (分) で表し,ノードにバス停を設置するかどうかを変数 $z_j \in \{0,1\}$ で表す.また,バス停*j*からバス停*k*までバスで移動する人を x_{jk} (人) で表す。

b) 目的関数

以上のような説明変数を用いて,バス停の置く個数,バス停に停まる時間を最小化し,バス利用者の増加を図ることを,このモデルでの目的とする.最終的にはコストの最小化を目的とするため, s_j, z_j と x_{jk} の単位を変換するため,それぞれの項に係数*c* (円/分) と*f* (人/分) をかけた。

$$\min \left(c \sum_j s_j z_j \right) - f \sum_{jk} x_{jk} \quad (3)$$

c) 制約条件

制約条件として,まず,バスの移動者に関する条件を設定する.バス停*k*からバス停*k+1*へ移動する人は,バス停*j*からバス停*k*まで移動してきた人と,居住地*i*からバス停*j*まで移動してきた人 v_{ij} の合計以下であるとする。

$$x_{k,k+1} \leq \sum_i \sum_{j \in \{1, \dots, k\}} v_{ij} \quad (4)$$

また,バス停が存在するとき, v_{ij} も存在することを,十分に大きな正の数*M*を用いて以下のように表す。

$$v_{ij} \leq M z_j \quad (5)$$

x_{jk} と v_{ij} は非負であるとする.

$$x_{jk} \geq 0 \quad (6)$$

$$v_{ij} \geq 0 \quad (7)$$

バスの利用者は、居住地から目的地までの移動時間が最も短いバス停を選択する.このことを、 i から j までの移動時間を t_{ij} (分) , i から j までの到達時間のうち最小のものを t_i^* (分) として、以下の式で表す.

$$v_{ij}(t_{ij} - t_i^*) = 0 \quad (8)$$

$$\begin{cases} t_{ij} = t_i^*; v_{ij} > 0 \\ t_{ij} \geq t_i^*; v_{ij} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

ここで、 t_{ij} については、 i から j までの徒歩時間を w_{ij} として、以下の式で定義する.

$$t_{ij} = \left(w_{ij} + s_j + \sum_{k \in \delta(j)} z_k \right) \cdot z_j + (1 - z_j) \cdot M \quad (10)$$

また、制約条件③については、このままでは非線形の形のため解くことができない.そこで、線形の形に変形させることで、解くことを可能にした.なお、ここで L は十分小さな負の数、 U は十分大きな正の数、 ε は小さな数とする.また、 0 か 1 かをとる操作変数 σ_{ij} を用いて、式(8),(9)の等価な制約条件は次のように書くこととする.

$$\begin{cases} L(1 - \sigma_{ij}) \leq t_{ij} - t_i^* \leq U(1 - \sigma_{ij}) \\ L(1 - \sigma_{ij}) + \varepsilon \leq v_{ij} \leq U\sigma_{ij} \end{cases} \quad (11)$$

v_{ij} は、 i から j へ行き得る全人口 P_{ij} よりも少ないとする.また x_{ij} は、 0 人以上とする.

$$0 \leq v_{ij} \leq P_{ij} \quad (12)$$

$$0 \leq x_{ij} \quad (13)$$

ここで、 P_{ij} は、移動時間と i の人口との散布図による近似曲線の切片 a_{0i} と傾き a_{1i} から、以下のように定義できる.(図10参照)

$$P_{ij} = a_{0i} - a_{1i}t_{ij} \quad (12)$$

(4) モデル適用の結果

最適化モデルは、CPLEX を使用して計算した.モデル適用の結果、現在は、現状ルート、検討ルートともに、設置バス停は「中鹿山」のみが適切ということになった.また、乗車人数、目的地までの所要時間、総コストは、表3のようになり、利益面以外では現状ルートの方が優れているという結果になった.

ここで、将来バス利用が増えるという予測から、バスの需要が1.5倍になったという仮定のもとで同じような計算を行った.その結果、設置バス停は、現状ルートでは、「中鹿山」のみ、検討ルートでは「中鹿山」に加えて、「検討バス停①」、「②」、「③」が適切という結果になった.(図8参照)乗車人数、目的地までの所要時間、総コストは、表4のようになり、所要時間は、ルートを迂回する分検討ルートの方が長くなるが、それ以外の乗車人数と利益面では検討ルートの方が最適

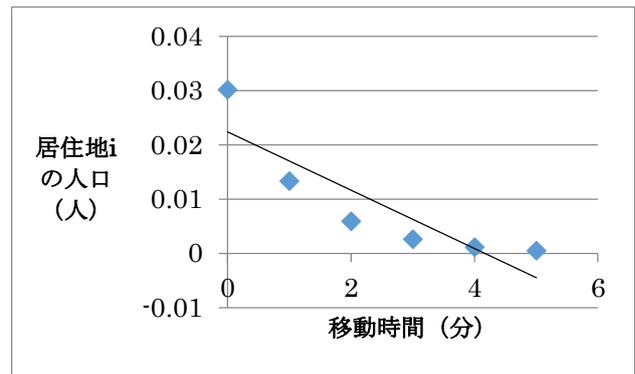


図10.散布図の概形

表3.現在の適用結果

		現状ルート	検討ルート
乗車人数		0.62人	0.59人
所要時間	居住地1	9分	11分
	居住地3	15分	17分
総コスト		-77.3円	-129.7円

表4.将来予測の適用結果

		現状ルート	検討ルート
乗車人数		0.93人	2.00人
所要時間	居住地1	9分	14分
	居住地3	15分	16分
総コスト		-114.6円	-320.7円

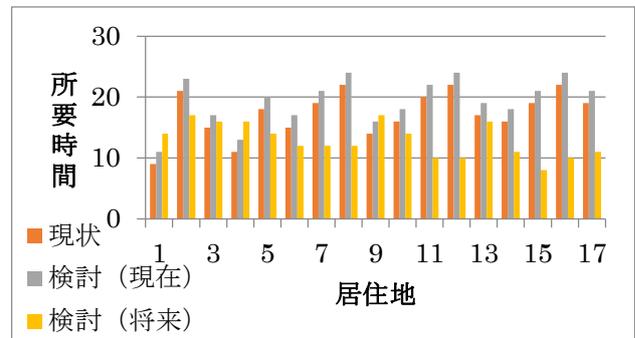


図11.適用結果のまとめ

という結果になった.

また、各居住地から目的地までの所要時間を、現状ルート、現在と将来の検討ルートと比較したところ、将来の検討ルートで、バス停が増えたことにより、アクセシビリティが向上し、ほとんどの居住地から短縮されるという結果になった.(図11参照)

7. まとめ

本研究では、アンケートによって、「距離」や「時間」などの個人データを取得し、最適なバス停配置を検討するために、バス路線最適化モデルの作成を行った.最適な

バス路線の配置を行うことは、事業者の側から見れば、支出を削減することで利益の増加が見込め、利用者の側から見れば、バス移動の利便性が増すことでモビリティの確保に貢献しうると考えられる。

今回は、事例分析として、埼玉県日高市において運行されているイーグルバス日高飯能路線を対象としてモデルの作成を行った。対象とする日高市は、市内に日高団地と高麗川団地という2つの大きな団地を抱えており、また、高齢化も進んでいることから、将来バス需要が増えると予測される。

モデルの作成にあたっては、アンケートから個人データを収集し、ロジットモデルを作成することで、バス選択の確率を計算し、それをモデルでも利用するという手法をとった。最適化モデルは、バス停の設置の有無や所要時間が最小であることなどの制約条件をかけつつ、設置バス停の最小化とバス利用者の確保によるコストの増加を目的として計算を行った。結果としては、現在では現行ルートと検討ルートのどちらでも、バス停を1つ配置することが最適であるという結果になったが、バス需要が増えると思われる将来についても計算を行ったところ、検討ルートで、バス停を新しく3つ設置したほうが、「乗車人数」「目的地までの時間」、「コスト」ともに効果が得られることを確認できた。

また、検討ルートで、現在と将来の目的地までの所要時間の比較を行ったが、バス需要が増えた将来のほうが、設置すべきバス停も増え、その結果、バス停にアクセスしやすくなることで、バス移動の所要時間も改善されるだろうという結果を得られた。

ただ、既存ルートを取り止めて、検討ルートに移設することは、交通安全上の問題や、法律の関係などから、実務上は非常に困難である。しかし、イーグルバスでは、本研究で考えた検討ルートに、サポート便を走らせるという付加的な運行を2014年4月から行っている。今後の課題としては、それらの付加的な運行も考えた最適路線を検討していきたい。

すくなることで、バス移動の所要時間も改善されるだろうという結果を得られた。

参考文献

- (1) 船戸諒子,坂本邦宏,谷島賢,山岸純一,久保田尚: GISを用いたバス停乗車人員予測モデルに関する研究 高齢化する集合住宅地域の事例分析,土木学会,第40回土木計画学研究発表会 CD-ROM 2009.11
- (2) 高山純一,中山晶一朗,加藤隆章,原口友心: 主要施設の移転に伴うバス路線網再編システムの構築,2002年土木計画学論文集 Vol.26
- (3) David Z.W. Wang, Hong K. LO: Global optimum of the linearized network design problem with equilibrium flows, Transportation Research Part B: Methodological Volume 44, Issue 4, May 2010, Pages 482-492
- (4) (社)交通工学研究会: やさしい非集計分析,丸善株式会社
- (5) Athlete Maps(<http://y-ich.github.io/maps/athlete-maps.html>)

THE APPLICATION OF THE ROUTE OPTIMIZATION MODEL CONSIDERING THE ACCESSIBILITY TO THE BUS STOP

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

Recently, number of bus user fails to rise, in our country. It is important to optimize the bus route to secure the profitability, because a bus route is abolished in the low area of the profitability, and local mobility is lost.

We performed questionnaire survey for the traffic actual situation gasp of vicinity of bus route inhabitants, after that, we understood that there were many bus users near the bus stop. In addition, the forecast that bus demand would increase to in the future was provided. Based on those results, we applied a route optimization model to the present conditions, the examination route. In the application of the model, we used logit model for the guess of the bus user. We can't look the deference bos routes now. But in the future when bus demand increased, the bus stop which gained numbers improved the accessibility to the bus stop pf the user by an examination route, and the result that the profit of the company went up was provided.