

乗客流配分モデルを用いた路線バスサービスの設計に関する研究*

Design Method of Route Bus Service Using Transit Assignment Model*

倉内 文孝[†]・原尾 彰[‡]・嶋本 寛[§]

By Fumitaka KURAUCHI[†]・Akira HARAO[‡]・Hiroshi SHIMAMOTO[§]

1. はじめに

自家用車の普及が人々の利便性を大きく向上させたことは事実であるが、その一方で大量輸送を前提とした従来型の公共交通事業が困難となっているのが現状である。自動車が普及しても、自動車を利用できない人々の移動の自由を確保する社会的な側面から、地球温暖化などの環境の側面からも公共交通を存続させる必要がある。すなわち、路線ごとの採算性を前提とする公共交通整備は立ちゆかなくなってきたおり、地域全体としてどのような公共交通サービスを構築していくのかを考えていかなければならない。一方で、公共交通サービスをネットワークレベルで検討するような手法論が確立されていないことも事実である。以上のような背景の元、筆者らは公共交通ネットワーク上の乗客流を表現するモデルを構築¹⁾している。本稿では、乗客流配分モデルの適用例として鉄道新駅の設置に際するバス路線計画において提案している乗客流配分モデルを活用することにより乗客誘導の可能性について論じる。運行頻度をパラメータとし、それを適宜変更することで利用者の利便性を低下させることなく路線バスの既存駅の過度な集中を緩和可能であることを示すとともに、バス接近情報に関する効果について検討する。乗客流配分モデルを活用することで複数路線の分担率を制御でき、それによりネットワークレベルで公共交通設計が可能であることを示すことが本研究のねらいである。

2. 乗客流配分モデル¹⁾

本研究では乗客の誘導ならびに公共交通ネットワークのサービス水準評価に際して、頻度ベースの公共交通サービスを前提とした乗客流配分モデルを活用する。Common Lines Problem と接近情報の提供下の乗客の経路選択行動を考慮しており、以下のように定式化される。

(1) Common Lines Problem

ここで、公共交通サービスは頻度ベースで運行されており、乗客はいつ車両が到着するのかわからないとしよう。このとき、乗客は駅で待ち時間が発生することにな

るが、その際、駅において今到着した車両に乗車するのか、あるいはその車両には乗らず他の路線の車両の到着を待つのか、といった選択を迫られることになる。つまり「目的地までたどり着くことができる路線群のうちどの路線集合を選択するか」ということを乗客は決定する必要がある、この問題が「Common Lines Problem」と定義されている²⁾。出発地から目的地にむかって、 n 本の路線があるとし、それら路線の集合を A とする。また、それぞれの路線の乗車時間は t_l 、運行頻度は f_l とする。乗客は路線集合 A に含まれる Common Lines S のサブ経路集合を選択し、その経路集合のうち最初に出発地に到着する列車を利用すると仮定した。その結果、列車の到着をボワソン到着と仮定すれば、 S の目的地までの平均所要時間 $T_{S, \text{Expect}}$ は以下のように与えられる。

$$T_{S, \text{Expect}} = \frac{1 + \sum_{l \in S} t_l f_l}{\sum_{l \in S} f_l} \dots\dots\dots (1)$$

第1項は期待待ち時間を、第2項は期待乗車時間をあらわす。また、Common Lines S 内の路線 l への経路分岐確率 q_l は以下ようになる。

$$q_l = f_l / \sum_{k \in S} f_k \dots\dots\dots (2)$$

頻度ベースの公共交通ネットワークでは、先にきた列車に乗車する方法が最適となる可能性があり、個々の単一経路ではなくその組み合わせについても考慮しなければなくなるため、検討すべき選択肢が増大する。

(2) 接近情報の取り扱い

前節では、車両がランダムに到着し乗客は列車の到着について情報を持ち合わせていないことを前提として定式化を行った。一方、我が国のバス輸送は時刻表ベースで運行されており、近年の情報技術の進歩によりバスの接近情報を提供している地域も多い。車両が遅延なく時刻表通り運行されていれば、あるいは適切な情報が提供されていれば、出発時刻ごとに最適な経路が一意に決定されることになり、出発時刻ごとの最適経路を計算することで経路分担率を算定可能である。筆者ら³⁾は各路線の到着までの待ち時間が既知であるという条件のもと、目的地までの所要時間を最小にするように行動すると仮定し、経路分岐確率と期待所要時間を定式化し解析解を算出している。本研究においても同様の方法を適用する。

(3) 期待所要時間の定義

本研究では、既存の乗客配分モデル¹⁾と同様乗客は各

* Keywords: バス路線設計, 乗客流配分

[†] 正会員, 博(工) 京都大学大学院工学研究科 〒606-8501 京都市左京区吉田本町, TEL 075-753-5126, FAX 075-753-5907)

[‡] 学生員, 京都大学大学院工学研究科

[§] 学生員, 修(工), 京都大学大学院工学研究科

路線集合の期待所要時間を基準に経路選択を行うとし、最短所要時間経路探索結果を用いて分析を進める。駅 i において n 本の路線が利用可能な場合、サブ経路集合 S 内の経路 l を利用する確率 q_{il} および目的地までの平均所要時間 $T_{S, \text{Expect}}$ は次のように計算できる。

$$T_{S, \text{Expect}} = \sum_{l \in S} \int_0^{\infty} \text{Pr}_i(l|x) \cdot g_{il}(x) \cdot (t_l + x) dx \quad \dots (3)$$

$$q_{il} = \int_0^{\infty} \text{Pr}_i(l|x) \cdot g_{il}(x) dx \quad \dots (4)$$

ただし、

$g_{il}(w_l)$: 駅 i にて路線 l の待ち時間が w_l である確率密度関数

$\text{Pr}_i(l|w_l)$: 駅 i にて w_l である場合に路線 l を利用する確率

w_l : 路線 l の待ち時間

である。 $\text{Pr}_i(l|w_l)$ は接近情報の有無で異なる計算法となる。

a) 接近情報の提供が行われていない場合

$$\text{Pr}_i(l|w_l) = \text{Pr}_i(w_l < w_j \ (j \neq l) | w_l)$$

$$= \prod_{j \neq l} \int_{w_l}^{\infty} g_{ij}(x) dx = \exp \left\{ - \left(\sum_{j \neq l} f_j \right) w_l \right\} \quad \dots (5)$$

これを式(3)、(4)に代入して計算を行うと式(1)、(2)と一致する。

b) 接近情報の提供が行われている場合

$$\begin{aligned} \text{Pr}_i(l|w_l) &= \text{Pr}(t_l + w_l < t_j + w_j \ (j \neq l) | w_l) \\ &= \text{Pr}(w_j > t_l - t_j + w_l) \quad \dots (6) \\ &= \prod_{j \neq l} \int_{\max\{0, t_l - t_j + w_l\}}^{\infty} g_j(x) dx \end{aligned}$$

以上より、最短期待所要時間経路探索問題は、式(3)を最小化するような路線集合を求める問題として定式化可能となる。式(6)を解析的に解くことは非常に複雑となるため、数値積分を行う手法を採用することより経路分岐確率や期待所要時間を求めることとした¹⁾。本来の定式化¹⁾においては、乗客集中による混雑効果を平均待ち時間の増加で表現し、期待所要時間が相対的に増加することで利用者均衡状態を相補性問題としている。しかしながら、待ち時間関数のパラメータ設定などの課題も残っていることから、ここでは混雑を考慮せずゼロフロー時の最短期待所要時間を用いて検討を進めることとした。

3. 長岡京市におけるケーススタディ

(1) 検討背景

長岡京市では、長岡天神駅の駅前広場を整備するスペースがなく、片側1車線の府道に多数のバスが流入している。そのため、朝のラッシュアワーではバスを追い抜くことができない車両がバスの後ろで降車終了を待つことから深刻な渋滞が発生している。阪急京都線大山崎駅 - 長岡天神駅間は駅間距離が長く、新駅の設定効果が見込まれることもあり、長岡京市と阪急電鉄株式会社は新

駅設置および新駅周辺における都市基盤整備の検討を進めていくことについて合意した。新駅付近は、周辺道路との接続性が高く駅前ターミナルを整備する余地があることから、路線バスのサービス頻度を適宜変化させることで乗客のサービスレベルを低下させることなくバス利用者を新駅へ誘導することが可能かどうかを検討する。図1に検討対象地域の略図を示す。

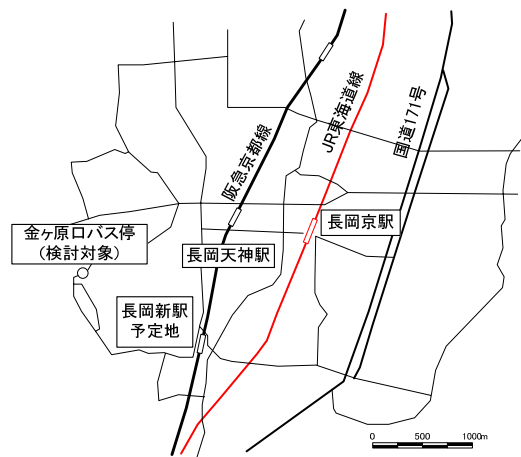


図1 検討対象地域略図

(2) 計算条件

長岡天神駅へのバス利用の多くが金ヶ原周辺からであることをふまえ、簡単のため金ヶ原口バス停からの移動を分析対象とする。現状の運行頻度を保持しつつ新駅が設置された場合の計算対象ネットワークを図2に示す。従来のバス路線でも新駅設置予定位置を経由するバス路線があるため、新駅を利用する場合にはその経路を利用するものとした。阪急京都線は高槻市駅にて緩急接続が行われるため、以下では高槻市・梅田から自宅へ向かう方向を下り、逆に自宅から高槻市・梅田へ向かう方向を上りと表現し、分析を進める。また、ピーク時においては運行頻度が変化するため、それも考慮した分析を進める。上り（梅田方向）については出勤ピーク時のデータを、下り（金ヶ原口方向）については帰宅ピーク時のデータを活用する。まずは新駅設置後にバスの頻度を变化させた場合を分析し、次に新駅設置に加えて均一料金制度を導入下で頻度を变化させた場合、最後に接近情報を提供した場合、について検討を加える。

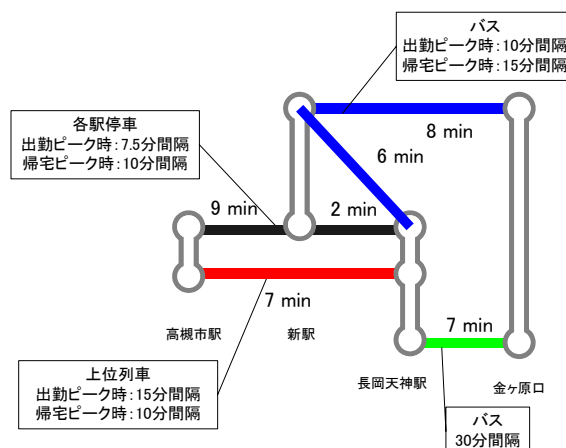


図2 分析対象ネットワーク

(3) 計算結果の考察

a) 新駅へのバス頻度を变化させたケース

基本ケースとして、新駅設置による期待所要時間の变化について考察を加える。ここでの計算においては、乗客は長岡天神経由あるいは新駅経由のいずれかの経路を事前に決定しておかなければならない、としている。つまり、一般的な通勤定期券などで事前に利用経路が固定されているケースと解釈できる。新駅設置後に新駅へのバス運行頻度を变化させたとき、新駅を利用した経路のサービスレベルをグラフにしたものが図3, 4である。横軸に新駅へのバス運行頻度、縦軸に新駅を経由した場合の高槻市駅～金ヶ原口バス停間の平均所要時間をとっている。なお、目安として既存駅を経由した場合の平均所要時間をグラフに示している。この図より、下りピーク時では5%削減（15.8分間隔の運行）、上りピーク時では35%削減（15.4分間隔の運行）してもなお現状のサービスレベルを維持しながら乗客を移行することができることがわかる。

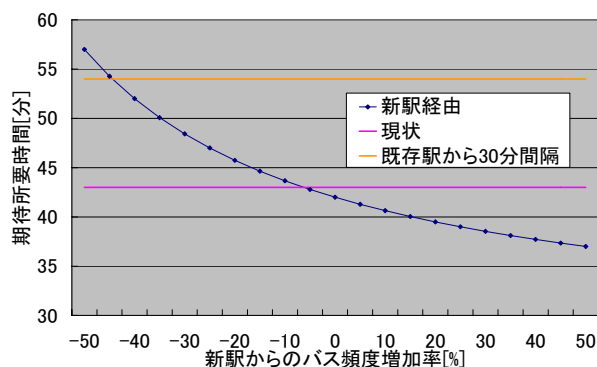


図3 バス頻度の調整によるサービスレベルの変化（下りピーク時）

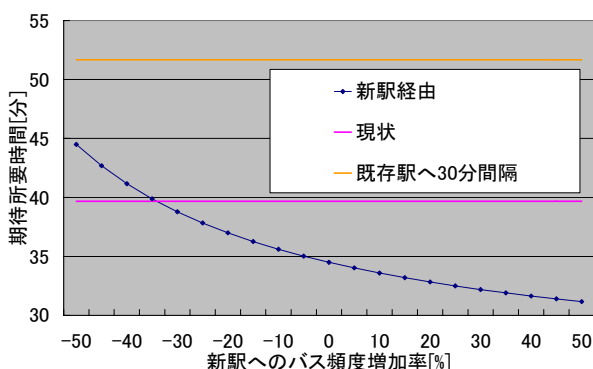


図4 バス頻度の調整によるサービスレベルの変化（上りピーク時）

b) 2way 定期券サービスの導入による効果

次に 2way 定期券サービスの導入と組み合わせた効果を考察する。2way 定期券とは1つの定期券で長岡天神経由のバス路線と新駅経由のバス路線の2経路利用できるものとした。すなわち、乗客はその時々々の運行状況に合わせて列車やバスの路線を自由に選択できるため、長岡天神駅あるいは新駅方面行きのどちらか先に到着したバスを利用することが可能となる。ピーク時における上り

方面の分析結果が図5である。図5は横軸に新駅からのバス頻度、縦軸に長岡天神駅からのバス頻度をとり、サービスレベルが同じ点を結んだ等高線グラフとなっている。図より現状のサービスレベルを維持するのに必要な2路線の運行頻度は既存駅へは75分間隔、新駅へは20分間隔程度となり運行頻度をそれぞれ50%, 60%削減することができる。これは2way 定期券の導入によりバス停での待ち時間が大きく減少するためである。しかし新駅への乗客の誘導を考慮すると、むやみに2路線のバス頻度を下げるのではなく、新駅へのバス頻度の削減は控え、旧駅へのバス頻度を多めに削減するべきである。表1は2way 定期券サービスを導入した場合に上り方面における新駅経由の経路利用率を表したものである。横軸に新駅へのバス運行頻度、縦軸に既存駅へのそれをとったものである。新駅へのバス運行頻度を増加させることでサービスレベルを維持しつつ長岡天神駅へのバス運行を減少させ、さらに新駅への分担率を増加可能であることが確認できる例えば、新駅へのバス頻度削減率を40%におさえると、現状のサービスレベルを保ちつつ、旧駅へのバス頻度を80%削減することができるが、このとき新駅の利用率は90.0%に達する。50%, 60%の削減の場合には新駅の利用率が78.9%であったからバス頻度設計の重要性がうかがえる。

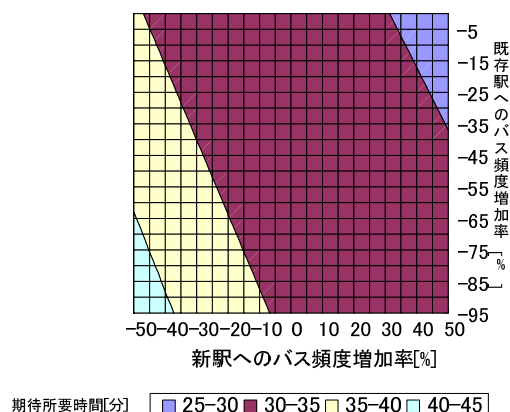


図5 2way 定期券導入時のサービスレベル（上りピーク時）

下りの場合にはバス頻度の操作により乗客を誘導することができない。なぜなら、新駅には上位列車が停車しないため、下りの場合の経路選択は高槻市でおこなうことになり、新駅利用率は阪急線の運行頻度によって影響をうけることになるからである。

c) 接近情報の提供による効果

最後に、接近情報が提供されているケースにおける効果について考察する。下りの場合には、接近情報の提供により誘導がスムーズに行える。図6は2way 定期券サービスと接近情報の提供を行った際にバス路線の頻度を变化させたときのサービスレベルの変化をグラフにしたものである。また、表2はそのときの新駅の利用率をあらわしたものである。表からわかるように非常に高い分担率で新駅へ誘導することができることがわかる。この

表1 2way 定期券サービス導入時の乗客の新駅利用率（上りピーク時）

単位: %		新駅へのバス頻度増加率[%]																					
		-50	-45	-40	-35	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	
運行間隔[分]		20.0	18.2	16.7	15.4	14.3	13.3	12.5	11.8	11.1	10.5	10.0	9.5	9.1	8.7	8.3	8.0	7.7	7.4	7.1	6.9	6.7	
既存駅へのバス頻度増加率「[%]」	0	30.0	60.0	62.3	64.3	66.1	67.7	69.2	70.6	71.8	73.0	74.0	75.0	75.9	76.7	77.5	78.3	78.9	79.6	80.2	80.8	81.3	81.8
	-5	31.5	61.2	63.5	65.5	67.2	68.9	70.3	71.6	72.9	74.0	75.0	75.9	76.8	77.6	78.4	79.1	79.8	80.4	81.0	81.6	82.1	82.6
	-10	33.3	62.5	64.7	66.7	68.4	70.0	71.4	72.7	73.9	75.0	76.0	76.9	77.8	78.6	79.3	80.0	80.6	81.2	81.8	82.4	82.9	83.3
	-15	35.3	63.8	66.0	67.9	69.6	71.2	72.6	73.8	75.0	76.1	77.0	77.9	78.7	79.5	80.2	80.9	81.5	82.1	82.7	83.2	83.7	84.1
	-20	37.5	65.2	67.3	69.2	70.9	72.4	73.8	75.0	76.1	77.1	78.1	78.9	79.7	80.5	81.2	81.8	82.4	83.0	83.5	84.0	84.5	84.9
	-25	40.0	66.7	68.7	70.6	72.2	73.7	75.0	76.2	77.3	78.3	79.2	80.0	80.8	81.5	82.1	82.8	83.3	83.9	84.4	84.8	85.3	85.7
	-30	43.0	68.2	70.2	72.0	73.6	75.0	76.3	77.4	78.5	79.4	80.3	81.1	81.8	82.5	83.1	83.7	84.3	84.8	85.3	85.7	86.1	86.5
	-35	46.0	69.8	71.7	73.5	75.0	76.4	77.6	78.7	79.7	80.6	81.4	82.2	82.9	83.5	84.1	84.7	85.2	85.7	86.2	86.6	87.0	87.4
	-40	50.0	71.4	73.3	75.0	76.5	77.8	78.9	80.0	81.0	81.8	82.6	83.3	84.0	84.6	85.2	85.7	86.2	86.7	87.1	87.5	87.9	88.2
	-45	54.5	73.2	75.0	76.6	78.0	79.2	80.4	81.4	82.3	83.1	83.8	84.5	85.1	85.7	86.2	86.7	87.2	87.6	88.0	88.4	88.8	89.1
	-50	60.0	75.0	76.7	78.3	79.6	80.8	81.8	82.8	83.6	84.4	85.1	85.7	86.3	86.8	87.3	87.8	88.2	88.6	89.0	89.4	89.7	90.0
	-55	67.0	77.0	78.7	80.1	81.3	82.4	83.4	84.3	85.1	85.8	86.4	87.0	87.6	88.1	88.5	88.9	89.3	89.7	90.0	90.4	90.7	91.0
	-60	75.0	78.9	80.5	81.8	83.0	84.0	84.9	85.7	86.4	87.1	87.7	88.2	88.7	89.2	89.6	90.0	90.4	90.7	91.0	91.3	91.6	91.8
	-65	85.7	81.1	82.5	83.7	84.8	85.7	86.5	87.3	87.9	88.5	89.1	89.6	90.0	90.4	90.8	91.1	91.5	91.8	92.0	92.3	92.6	92.8
	-70	100.0	83.3	84.6	85.7	86.7	87.5	88.2	88.9	89.5	90.0	90.5	90.9	91.3	91.7	92.0	92.3	92.6	92.9	93.1	93.3	93.5	93.8
	-75	120.0	85.7	86.8	87.8	88.6	89.4	90.0	90.6	91.1	91.5	91.9	92.3	92.6	93.0	93.2	93.5	93.8	94.0	94.2	94.4	94.6	94.7
	-80	150.0	88.2	89.2	90.0	90.7	91.3	91.8	92.3	92.7	93.1	93.4	93.8	94.0	94.3	94.5	94.7	94.9	95.1	95.3	95.5	95.6	95.7
-85	200.0	90.9	91.7	92.3	92.9	93.3	93.8	94.1	94.4	94.7	95.0	95.2	95.5	95.7	95.8	96.0	96.2	96.3	96.4	96.6	96.7	96.8	
-90	300.0	93.8	94.3	94.7	95.1	95.5	95.7	96.0	96.2	96.4	96.6	96.8	96.9	97.1	97.2	97.3	97.4	97.5	97.6	97.7	97.8	97.8	
-95	600.0	96.8	97.1	97.3	97.5	97.7	97.8	98.0	98.1	98.2	98.3	98.4	98.4	98.5	98.6	98.6	98.7	98.7	98.8	98.8	98.9	98.9	

表2 接近情報の提供を行った場合の乗客の新駅利用率（下りピーク時）

単位: %		新駅からのバス頻度増加率[%]																					
		-50	-45	-40	-35	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	
運行間隔[分]		30.0	27.3	25.0	23.1	21.4	20.0	18.8	17.6	16.7	15.8	15.0	14.3	13.6	13.0	12.5	12.0	11.5	11.1	10.7	10.3	10.0	
バス頻度増加率「%」	既存駅からの	0	30.0	37.5	65.9	79.1	85.9	90.5	92.9	94.8	96.1	96.8	97.4	97.9	98.3	98.4	98.6	98.8	98.9	99.0	99.1	99.2	99.3
		-5	31.5	50.0	74.6	84.4	89.5	92.9	94.8	96.1	97.1	97.6	98.1	98.4	98.7	98.8	98.9	99.1	99.2	99.3	99.4	99.4	99.5
		-10	33.3	65.9	82.8	89.5	92.9	95.3	96.5	97.4	98.1	98.4	98.7	98.9	99.1	99.2	99.3	99.4	99.5	99.5	99.6	99.6	99.6
		-15	35.3	79.1	89.5	93.6	95.7	97.1	97.9	98.4	98.8	99.0	99.2	99.4	99.5	99.5	99.6	99.6	99.7	99.7	99.7	99.8	99.8
		-20	37.5	87.2	93.6	96.1	97.4	98.3	98.7	99.0	99.3	99.4	99.5	99.6	99.7	99.7	99.7	99.8	99.8	99.8	99.8	99.9	99.9
		-25	40.0	92.9	96.5	97.9	98.6	99.0	99.3	99.5	99.6	99.7	99.7	99.8	99.8	99.8	99.9	99.9	99.9	99.9	99.9	99.9	99.9
		-30	43.0	96.1	98.1	98.8	99.2	99.5	99.6	99.7	99.8	99.8	99.9	99.9	99.9	99.9	99.9	99.9	99.9	100.0	100.0	100.0	100.0
		-35	46.0	98.3	99.1	99.5	99.6	99.8	99.8	99.9	99.9	99.9	99.9	99.9	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
		-40	50.0	99.3	99.6	99.8	99.9	99.9	99.9	99.9	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
		-45	54.5	99.7	99.9	99.9	99.9	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
		-50	60.0	99.9	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

ため図からも確認できるように、情報提供下では既存駅からのバスの運行頻度の増減によるサービスレベルの変化を小さくできる。

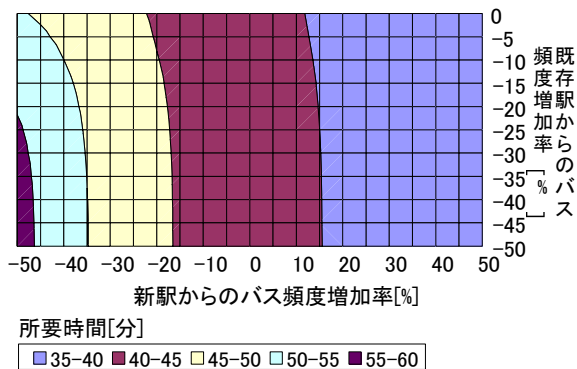


図6 接近情報の提供時にバス頻度を变化させた場合のサービスレベル（下りピーク時）

4. おわりに

本研究では、ネットワークモデルを用いたバス路線設計方法の適用例として、既存駅周辺の交通渋滞を解消すべく、郊外に設置する新駅へバス乗客の誘導に関して検討を加えたものである。その結果、適切にバス頻度を設計することで乗客のサービスレベルを低下させることなく新駅の利用を促すことが可能であることを示した。本研究で検討を加えた長岡京市の例でいえば、上りの場合には定期券の均一料金制度である 2way 定期券サービスを導入することで、下りの場合には 2way 定期券サービスに加えて接近情報の提供を行うことで、事業者ハード面での増強を強いることなく誘導することができる。

本研究においては 1OD に限定するなど非常に簡略したネットワークで検討を加えたが、実際の路線設計の際にはより現実に即したネットワークを用い、なおかつ乗客需要量も加味して分析を進める必要があることはいまでもないが、ここで提案した手法を活用することで面的な路線設計が可能といえる。

【謝辞】

本研究は、新都市社会技術融合創造研究会、「ITS を活用したまちづくりのための交通マネジメントに関する研究：スマートターミナル研究グループ（代表者：北村隆一京都大学教授）」の一部として遂行されたものである。記して関係者の方々に深謝いたします。なお 本研究は、あくまで研究レベルで検討されたものであり、長岡京市の新駅設置計画あるいは実際の路線計画とは関連がないことを付記いたします。

【参考文献】

- 1) 倉内, 杉本, 嶋本, 飯田: “所要時間信頼性に着目した公共交通ネットワークのサービス評価に関する研究” 土木計画学研究発表会・講演集, Vol. 32, CD-ROM, 2005
- 2) Chriqui, C. and Robillard, P.: “Common bus lines”, Transportation Science, 9, pp.115-121, 1975
- 3) Shimamoto, H., Kurauchi, F. and Iida, Y.: “Evaluation on Effect of Arrival Time Information Provision Using Transit Assignment Model”, International Journal of ITS Research, Vol. 3, No. 1, pp. 11-18, 2005.