

ピーク率制御が鉄道駅からのフィーダー交通維持に与える影響

○ [土] 須ヶ間 淳 [土] 奥村 誠 (東北大学)

Impact of Peak Rate on Maintaining Feeder Transit Service from Railway Stations

○Atsushi Sugama, Makoto Okumura, (Tohoku University)

Congestion was a problem in the period when traffic demand was increasing. In recent years, however, the traffic demand has begun to decrease significantly. Therefore, it is important to know how to restructure sustainable transportation services. In this study, we take as an example a feeder transit service (route bus) from a railway stations in outskirts. We developed the service supply cost minimization model to analyze the impact of the peak rate on the optimal network shape and optimal frequency, and its impact on the cost of providing the service, depending on the level of demand and location of residence. Although it has been said that lower peak rates are better, we show that higher rates may be better in situations where service maintenance is important.

キーワード：都市公共交通, TDM, 市場規模, 最小運行頻度

Key Words: Urban Public Transit, Transport Demand Management, Market Size, Minimum Frequency

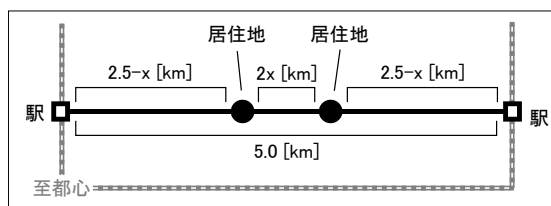


図-1 仮想空間の概要

1. はじめに

都市の利便性を実現する上で、公共交通サービスの供給は重要な役割を持つ。人口が増加し移動需要が増大し続けていた時代には、混雑緩和が課題とされ、交通インフラの増強や交通需要マネジメント (TDM) による時間的な分散¹⁾によるストックの効率的な利用策が検討されてきた。

近年、人口は既に減少に転じ、通学・労働年齢の人口比率の低下やテレワーク等の普及も踏まえれば、都市圏内の交通需要は今後大きく減少すると予想される。これに対応して、TDMによる需要喚起策の検討²⁾も見られるが、その多くは既存の公共交通網を前提に、その維持を目的としたものであり、公共交通の特性を生かした持続可能なサービスをどのように再構築するのかという視点はない。

本研究では、今後、公共交通サービスの再構築が不可避となる一つの例として、大都市圏の鉄道沿線地域の鉄道駅からのフィーダー路線バスを取り上げる。

サービス供給費用最小化モデルを構築して、需要の多寡や居住形態 (居住地の位置) ごとに、ピーク率が交通網の最適形状と最適運行頻度に与える影響、及びそれを供給するのに必要な費用への影響を分析する。その結果、混雑緩和

が重要な状況では高いことが問題視されたピーク率が、今後サービス維持のための需要を確保するという状況では低いことが望ましいとは限らないことを示す。

2. 本研究のアプローチ

本研究では、大都市郊外部の平行する鉄道路線の対応する駅から、中間の地域に運行されるフィーダー交通サービス (路線バス) を考え (図-1)、リンクごとのサービス有無と運行頻度を変数とするサービス供給費用最小化モデルを開発した。その特徴は以下の通りである。

- ・図-1のような仮想空間を考える。2つの幹線鉄道上の駅を結ぶ5.0kmの線分上に2つの居住地があり、それらで区分された3つのリンクを設定する。2つの居住地から都心への移動需要を外生的に与える。通勤・通学などの価格弾力性が低い需要が主であり、全量がフィーダー交通サービスと駅を利用して都心へ向かうこととする。居住地の位置は図-1中に示す x で表現し、 x を0.0kmから2.5kmまで動かすことで空間分布の違いを表現する。3つのリンクごとにフィーダー交通サービスの有無と運行頻度を設定でき、それに応じて輸送容量が決まる。
- ・最低限の需要を空間的・時間的に集中させる必要を表現できる。フィーダー交通サービスが選択されるために最低運行頻度を設定し、平均待ち時間を制約した。
- ・路線形状の空間的な変化を表現できる。対象地域で、1方の駅に向かう路線として運行するか、2方の駅に向かうように運行するかを選択できるように定式化を行った。
- ・需要のピーク率が異なる場合を分析できる。時間帯別に

表 - 1 操作変数一覧

操作変数名	変数	種類	単位
リンク別時間帯別の 1時間当たり交通量	$x^{l,t} \quad \forall l \in L, t \in T$	連続	人/h
駅別時間帯別の 鉄道への乗り換え量	$g^{n,t} \quad \forall n \in G, t \in T$	連続	人/h
リンク別時間帯別の 交通サービスの有無	$z^{l,t} \quad \forall l \in L, t \in T$	0-1	
リンク別時間帯別の 運行頻度	$f^{l,t} \quad \forall l \in L, t \in T$	連続	便/h
ネットワーク全体で 必要な保有車両数	v	連続	台
リンク別時間帯別の 必要な稼働車両数	$w^{l,t} \quad \forall l \in L, t \in T$	連続	台

表 - 2 パラメータ一覧

パラメータ名	パラメータ	単位
各時間帯 t の長さ	$U^t \quad \forall t \in T$	h
保有車両数に比例する 1日当たりの単位固定費用	V	円/台/日
稼働車両数に比例する 1時間当たりの単位可変費用	W	円/台/km
居住地ノード n 別時間帯 t 別の 1時間当たりの移動需要	$Q^{n,t} \quad \forall t \in T, n \in R$	人/h
運行頻度の最低限度	F	便/h
1便当たりの輸送容量	H	人/便
リンク l 別のリンク距離	$D^l \quad \forall n \in L$	km
表定速度	S	km/h
十分に大きな数	C	

リンクごとのサービス有無と運行頻度を設定できるようにした一方で、車両や運転者は双方の時間帯を両方カバーできるように用意する必要があることに注意して、後者にかかる固定費用への影響を考慮した。

本研究では、上記のモデルを用い、ピークのない状態を仮定して、需要の多寡や居住形態に応じて路線網の最適形状と運行頻度、及びそれに伴った供給費用がどのように変化するかを基礎的な分析を行った (4.1, 4.2)。さらに、ピーク時とオフピーク時の需要規模が異なる場合に、ピーク率の大小が与える影響を分析した (4.3)。

3. モデルの定式化

3.1 集合・変数・パラメータの定義

操作変数、パラメータをそれぞれ表-1、表-2のように定義する。パラメータ値は現実に即して設定した。

3.2 目的関数と制約条件

以下に本モデルの目的関数と制約条件を示す。

$$\min_{x,g,z,f,v,w} v \cdot V + \sum_{l \in L} \sum_{t \in T} (w^{l,t} \cdot U^t \cdot S \cdot W) \quad (1)$$

$$Q^{n,t} + \sum_{l \in L_n^{out}} x^{l,t} = \sum_{l \in L_n^{in}} x^{l,t} \quad \forall n \in \{N | n \notin G\}, t \in T \quad (2)$$

$$\sum_{l \in L_n^{out}} x^{l,t} = g^{n,t} + \sum_{l \in L_n^{in}} x^{l,t} \quad \forall n \in \{N | n \in G\}, t \in T \quad (3)$$

$$\sum_{n \in G} g^{n,t} = \sum_{n \in N} Q^{n,t} \quad \forall t \in T \quad (4)$$

$$f^{l,t} \leq z^{l,t} \cdot C \quad \forall l \in L, t \in T \quad (5)$$

$$F \cdot z^{l,t} \leq f^{l,t} \quad \forall l \in L, t \in T \quad (6)$$

$$x^{l,t} \leq f^{l,t} \cdot H \quad \forall l \in L, t \in T \quad (7)$$

$$f^{l,t} = f^{l',t} \quad \forall l, l' \in \{L | l \& l' \text{ are pair}\} \quad (8)$$

$$f^{l,t} \cdot D^l / S = w^{l,t} \quad \forall l \in L, t \in T \quad (9)$$

$$\sum_{l \in L} w^{l,t} \leq v \quad \forall t \in T \quad (10)$$

$$x^{l,t}, f^{l,t}, w^{l,t} \geq 0 \quad \forall l \in L, t \in T \quad (11)$$

$$v \geq 0 \quad (12)$$

$$g^{n,t} \geq 0 \quad \forall n \in G, t \in T \quad (13)$$

$$z^{l,t} \in \{0,1\} \quad \forall l \in L, t \in T \quad (14)$$

式(1)はサービスの供給費用である。第1項は車両の保有台数に応じた固定費用を、第2項は稼働台数（運行頻度）に応じた可変費用を表す。式(2)-(14)の制約下で最小化する。式(2)は居住地ノードにおける交通量保存則を、式(3)は駅ノードにおける交通量保存則を表す。式(4)は移動需要がいずれかの駅を経由して満たされることを表す。式(5)はリンクに交通サービスが存在しない場合に運行頻度がゼロであること、式(6)はリンクに交通サービスが設定されている場合にその運行頻度が最低運行頻度以上であることを表す。式(7)はリンクの輸送容量が、リンク交通量以上であることを表す。式(8)は、リンクごとの運行頻度が双方向で等しいことを表す。式(9)は、リンク別時間帯別に、運行頻度とその頻度を維持するために必要な稼働車両数の関係を表している。リンク距離が大きいほど必要な車両数は大きくなる。式(10)は、保有車両数が、交通システム全体に必要な稼働車両数の最大値以上であることを表す。式(11)-(14)は各変数の定義域である。本モデルは混合整数線型計画問題として定式化されており、数値最適化ソルバーGurobi8.1.0 (Win64)を用いて計算を行った。

4. フィーダー交通に与える影響の考察

4.1 需要の多寡がフィーダー交通に与える影響

はじめに、ピークが存在しない場合（ピーク率=4/17）を考える。居住地間リンク距離を1.0kmに固定し、居住地ごとに設定する1時間あたりの需要規模を100人/hから900人/hまで20人/h刻みで動かして需要規模ごとの交通サービスの供給費用を計算した。居住地当たり1時間当たりの日平均需要規模と供給費用の関係を図-2に示す。需要規模に応じて供給費用が変化しないフェーズ①、フェーズ③と、需要規模の増加に応じて供給費用が増加するフェーズ②、フェーズ④の4つに分けられる。また4つのフェーズの運行形態を図-3にまとめた。

交通サービスの供給費用を小さくするため、リンクごとに、利用者数と輸送容量がなるべく等しくなるように運行頻度が調整される。そのため、基本的には供給費用は需要規模に比例する（フェーズ②④）。しかし、各リンクの利用者数が最小運行頻度での輸送容量を下回る場合には、需要規模に依らず最小運行頻度となり、供給費用は一定となる（フェーズ①③）。

フェーズ①②とフェーズ③④ではネットワーク形状が異なっている。フェーズ①②では全ての需要がいずれか一方

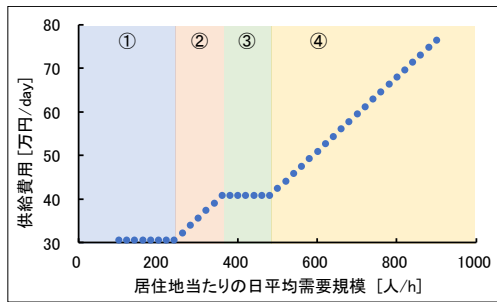


図-2 ピークが存在しない場合の
需要規模と供給費用の関係

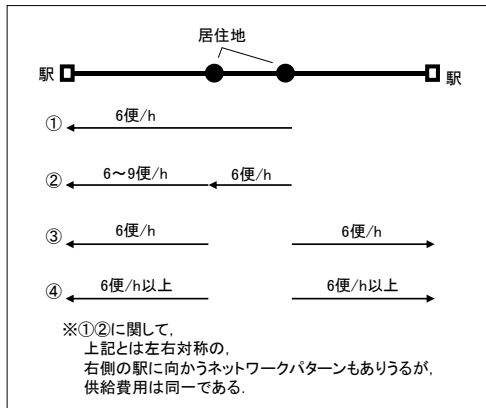


図 3 ピークが存在しない場合の
需要規模による最適な運行形態

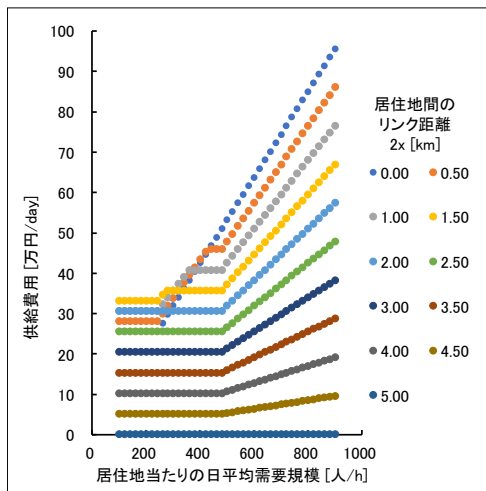


図-4 ピークが存在しない場合の
リンク距離による供給費用の違い

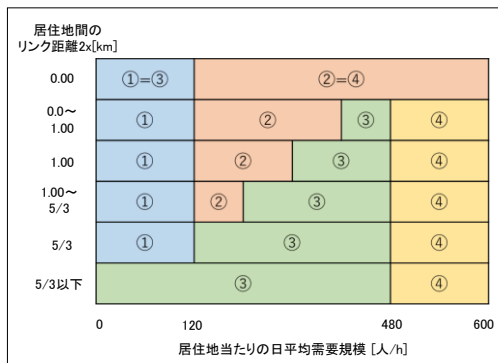


図-5 ピークが存在しない場合の
リンク距離によるフェーズ構成の違い

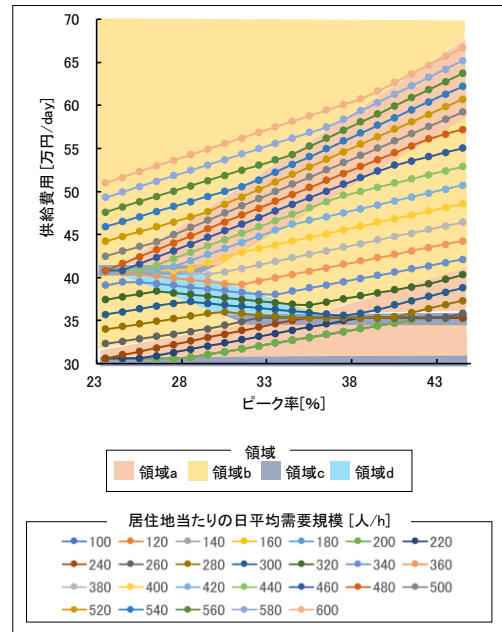


図-7 ピーク率と供給費用の関係の場合分け

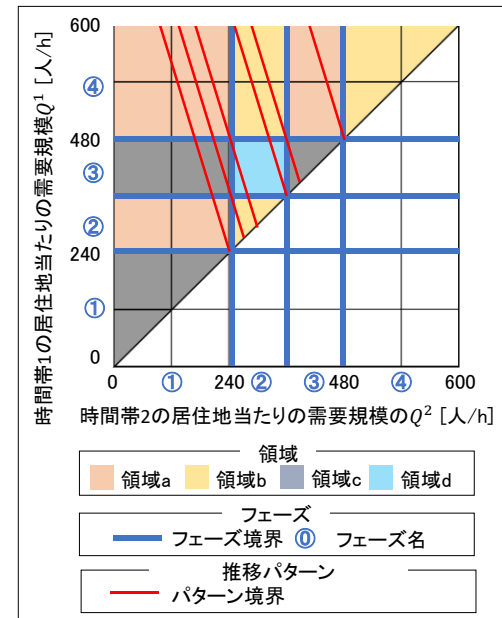


図-8 時間帯別のフェーズと推移パターンの関係

の駅を利用するようにサービスが設定される一方、フェーズ③④では居住地ごとに近い駅に向かってサービスが設定されている。フェーズ①②のネットワークはフェーズ③④のネットワークと比べて 1 人当たりの輸送距離が長いいため、その分だけ稼働車両数が増え、供給費用も大きくなる。しかし需要規模が小さい場合は最低運行頻度に固定されるため、輸送距離が伸びたとしても、サービスを設定するリンクが少ないネットワーク（フェーズ①②）の方が、稼働車両数を小さくでき供給費用は小さくなる。

4.2 居住地間リンク距離がフィーダー交通に与える影響

ピーク率を 4/17 に固定したまま、居住地間リンク距離 $2x$ を 0.0km から 5.0km まで 0.5km 刻みで動かしつつ、4.1 と同様に、居住地当たりの 1 時間当たりの日平均需要規模と供給費用の関係を計算した（図-4）。居住地間リンク

距離が 0.5km から 1.5km の間は 4.1 と同様なフェーズ構成になっている一方、0.0km と 2.0km 以上では 2 フェーズしか確認できない。また、0.5km から 1.5km の間においても、フェーズ②とフェーズ③の境界（以下、②③境界と称す）の位置が変化している。

これは、図-5 に示すように、居住地間リンク距離の大小に応じてフェーズ②とフェーズ③の境界（以下、②③境界と称す）が移動するためである。リンク距離が小さい場合には②③境界は需要規模が大きい方へ移動し③④境界に近づく。居住地間リンク距離 0.0km で②③境界と③④境界は重なるが、同時に 2 つの居住地も 1 つに重なるため、フェーズ①とフェーズ③、フェーズ②とフェーズ③の区別がなくなる。反対に、リンク距離が大きい場合には、居住地間リンク距離 5/3km で②③境界は①②境界と重なる。それ以上居住地間リンク距離が大きくなると、フェーズ①②のネットワーク形状よりもフェーズ③④のネットワーク形状のほうが供給費用は小さくなり、フェーズ①②は現れない。

4.3 ピーク率の大小がフィーダー交通に与える影響

ピーク率を、ピークが存在しないことを示す 4/17 から 0.01 ポイント刻みで 4/17+0.44 まで動かしながら、居住地 1 時間当たりの需要規模を 100 人/h から 600 人/h まで 20 人/h 刻みで動かして、供給費用が最小となる交通サービスの形態を求めた。リンク距離は 1.0km に固定した。図-6 はその結果について、ピーク率と供給費用の関係の傾きが大きい領域 a、傾きがやや大きい領域 b、傾きがゼロの領域 c、傾きが負の領域 d の 4 領域に塗り分けて示したものである。なお、需要規模が大きいほどピーク率当たりの時間帯別需要規模の変化が大きいため、同じ領域内では需要規模が大きいほど傾きが大きくなっている。図-6 より、需要規模によって通過する領域が異なること分かる。これを推移パターンと呼ぶことにする。

図-7 は、時間帯別のフェーズ①～④と領域 a～d、推移パターンの関係を表したものである。縦軸・横軸がそれぞれ、時間帯 1(ピーク時)・時間帯 2(オフピーク時)の 1 時間当たりの需要規模を表している。(1)に示したように時間帯ごとに需要規模に応じてフェーズが決まるため、青線は各フェーズの境界を示す。また、図-6 で塗り分けた領域を図-7 にも同様に記入した。すると、領域の境界はフェーズの境界と一致し、各領域は各時間帯のフェーズの組み合わせによって定まることが明白である。

ピーク率が大きくなると、時間帯 1(ピーク時)の需要規模が増加し、時間帯 2(オフピーク時)の需要規模は減少する。また、時間帯ごとの 1 時間当たり需要規模の変化とフェーズの関係は 4.1 と同様である。フェーズ②④の需要規模と供給費用の関係の傾きが同一であること、フェーズ①③は需要規模によらず供給費用が一定であること、そして保有台数に応じた固定費用がかかることに注意すると、図-7 に示されたフェーズと領域の関係は明らかである。

図-7 における原点を通る 45 度線は、ピーク率=4/17、すなわちピークが無い場合を示す。そして、45 度線上の任意

の需要規模を示す点から、傾き 13/4 (時間帯の長さの比率) で左上に引いた線は、同じ日平均需要規模であることを示す。どの領域を通るかが推移パターンを決定付けており、その境界を図-7 中に赤線で示した。

すでに 4.2 に示したように、居住地間リンク距離に応じて、時間帯別にフェーズ②③の境界の移動が起きる。これを図-7 上で考えると、リンク間距離が小さくなると②③境界は③④境界に近づくことにより、領域 ab が広がり領域 cd が狭まる。一方で、リンク間距離が大きくなると②③境界は①②境界に近づくことにより、領域 c が広がり領域 abd が狭まる。それに応じてパターンも変化する。

5. ピーク率が運行費用に及ぼす影響

都市郊外部のフィーダー交通サービスでは、利便性の観点から需要規模が小さくても一定以上の運行頻度を維持し平均待ち時間を抑える必要がある。本研究では、そのことが、サービスの供給費用における規模の経済性を発揮させることに着目した。最小頻度制約を満たす運行方法の中で、総費用を最小化する運行形態を求める費用最小化モデルを作成し、需要規模やピーク率、需要が与えられる位置を動かしながら計算・考察を行った。

本研究ではまず、需要規模・需要が与えられる位置ごとに一括／分割という 2 つのサービス形態の効率性を比較し、需要規模が小さい時・需要が与えられる点が近い場合には一括の形態が採られやすいことを明らかにした。

次に、ピーク時とオフピーク時の需要規模が異なる場合において、両時間帯を合わせた総運行費用を最小とするサービス形態を計算し、需要規模とピーク率の影響を分析した。その結果、需要規模が小さい場合には、ピーク率の増加に応じて供給費用が低減する領域があることを示した。すなわち、今後の人口縮小期に最低運行頻度を保ちつつ効率的な交通サービス供給を行おうと考える場合、ピーク率の低減は必ずしも効果的とは言えず、むしろピーク率の維持がサービスの供給費用を低減させる可能性もあることを示した。

ただし、本研究は所要時間や一人当たりの運賃などの一般化費用を考慮していない。また時差出勤に伴う経済への悪影響を考慮する必要もある。さらに、COVID-19 問題が今後の交通に関する課題に大きな影響を与える可能性は否定できない。今後は、供給費用のみに留まらずに様々な条件との関係を考慮できるようにモデルを拡張し、引き続き研究を深める必要がある。

参 考 文 献

- 1) 小林潔司, 奥村誠, 永野光三: 鉄道通勤交通における出発時刻分布に関する研究, 土木計画学研究・論文集, 14 巻, pp. 895-906, 1997. など
- 2) 溝上章志, 橋本淳也, 末成浩嗣(2010)利用実態調査による利用促進を目的とした MM 施策の有効性評価, 66 巻 2 号, pp. 147-159, 2010. など