日内需要変動が大都市圏郊外部の路線バスサービス最適化に与える影響

須ヶ間　淳[1]・奥村　誠[2]

[1]学生会員　東北大学大学院　工学研究科（〒980-0845 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1 S-502）
E-mail: atushi1741@dc.tohoku.ac.jp (Corresponding Author)

[2]正会員　東北大学教授　災害科学国際研究所（〒980-0845 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1 S-502）
E-mail: mailto:makoto.okumura.b6@tohoku.ac.jp

わが国の大都市圏郊外部では朝晩の都心部への通勤・通学需要が卓越しており，顕著な日内需要変動が生じている．そのような地域の公共交通には，モビリティを適切に保つべく，日内需要変動に対応してサービスを提供することが期待される．ただしその際，運行に必要な車輌や，運営の収支など，全時間帯を通して共有されるものは多い．そのため公共交通サービスを設計する際には，時間帯ごとに独立に最適化するのではなく，全時間帯を同時に考慮して最適化することが有用である．本研究では，大都市圏郊外部の駅勢圏における路線バスサービスのネットワーク形状、およびそのときの経路選択と支払う一般化費用について，ピーク時・オフピーク時の両時間帯を考慮した同時最適化を取り上げる．数理モデルを用いた分析を行い，日内需要変動が与える影響を明らかにする．

Key Words: *network design, optimization model, peak/offpeak demand*

1. はじめに

わが国の公共交通を取り巻く環境は非常に厳しい．コロナ禍を経ての行動変容により需要が縮小する一方で，人手不足や燃料費高騰など供給面でも大きな課題を抱える．中でも近年，路線バスは地方圏のみならず大都市圏郊外部においても廃止や減便を余儀なくされている．それゆえモビリティを適切な水準に保つべく，路線バスのサービス（ネットワークや運賃など）を適切に設計し直す機運が高まっている．我が国の特に大都市圏郊外部は，一般にピーク時・オフピーク時の需要規模の差が非常に大きい．そのため最適な路線バスサービスも 2 つの時間帯で大きく異なる可能性が高い．ただし車輌や地上設備，また管理部署等は両時間帯で共同利用するはずであるから，両時間帯の路線バスサービスの同時最適化が望ましく，そのための方法論開発と知見蓄積が期待される．

交通経済学では Steiner [1]に端を発するピークロードプライシング理論が明らかにされており，例えば基本的なモデルにおいては，ピーク時・オフピーク時の価格をそれぞれ長期限界費用・短期限界費用に等しくなるよう設定すべきであることや，それにより両時間帯の最適供給量を決定できることなどが知られている．しかし空間的な要素は捨象しているため，両時間帯にどのような NW を形づくるべきかや，各 OD の経路と運賃をどのように設定すべきかは明らかにしていない．

一方で土木計画学においては，路線バスサービスの設計に関する方法論的研究が古くより行われており，枝村ら [2]や天野ら [3]は数理的な求解に着目した研究の萌芽である．また最初期の研究では非弾力的な需要を与件としていたが，柳沢・高山 [4]は弾力的な需要設定の下でバスシステムの社会的便益評価を試みている．そして須ヶ間・奥村 [5]は，弾力的な需要設定の下でネットワーク（以下，NW）・運賃・OD 経路を同時に最適化するモデルを提案している．しかしこれら路線バスサービスの設計に関する既往研究[2-5)etc]は 1 つの時間帯のみを考慮したものがほとんどであり，需要規模の異なる複数時間帯を考慮した研究はわずかに中村ら [6]のみである．また中村ら [6]の着眼は運行頻度・車輌サイズ・バスバース運用の設計にあり，NW や運賃は与件としている．そのため需要規模の異なる複数時間帯を対象に，NW や運賃の同時最適化を試みた研究は見当たらない．

他方，都市間交通分野においては，藤田ら [7]が需要の季節変動が複数の都市間交通モードの効率的組合せに与える影響を分析している．また吉田・奥村 [8]は NW・運

表-1　集合とその意味

記号	意味
$\boldsymbol{N}$	ノード集合
$\boldsymbol{L}$	有向リンク集合
$\boldsymbol{T}$	時間帯集合
$\boldsymbol{L}_n^{dep}$	ノードn から発する有向リンク集合
$\boldsymbol{L}_n^{arv}$	ノードn に着する有向リンク集合
$\boldsymbol{L}_l^{pair}$	リンクl 別の双方向有向リンク集合

表-2　外生パラメータとその意味，および設定値

記号	意味
$C_{t,o,d}$	時間帯t 別のOD別の最大一般化支払い額
$Q_{t,o,d}$	時間帯t 別のOD別の最大需要量
$A_{t,o,d}$	時間帯t 別のOD別の逆需要関数の傾き
F_t^{max}	時間帯t 別のバスモードの上限運行本数
F_t^{min}	時間帯t 別のバスモードの下限運行本数
H	バスモードの車輌容量
R_l	バスモードのリンクl 所要時間の時間価値
$S_{i,j}$	徒歩モードの ノードi,j 間所要時間の時間価値
W	バスモードの待ち時間
$V_{t,l}$	バスモードの全時間帯にまたがる共通運営費用の，運行本数に対する原単位 ※共通運営費用：維持すべき車輌数に応じて発生する費用
$U_{t,l}$	バスモードの時間帯別運営費用の，運行本数に対する原単位 ※時間帯別運営費用：実車走行距離に応じて発生する費用
M	十分に大きな数

表-3　操作変数とその意味

記号	意味（記載なければ非負連続変数）
$cs_{t,o,d}$	時間帯t 別のOD別消費者余剰
$c_{t,o,d}$	時間帯t 別のOD別一般化支払額
$q_{t,o,d}$	時間帯t 別のOD交通量
$b_{t,o,d,l}$	リンクl のバスサービスを利用する時間帯t 別OD別の交通量
$a_{t,o,d,n}$	起点ノードo からノードn へ徒歩移動する時間帯t 別OD別のアクセス交通量
$e_{t,o,d,n}$	ノードn から終点ノードd へ徒歩移動する時間帯t 別OD別のイグレス交通量
$z_{t,l}$	リンクlにおけるバスサービスの有無 0-1変数（1：有り，0：無し）
$x_{t,o,d,n}$	時間帯t 別OD別の交通が起点ノードo からノードn へ徒歩移動するか否か 0-1変数（1：移動する，0：移動しない）
$y_{t,o,d,n}$	時間帯t 別OD別の交通がノードn から終点ノードd へ徒歩移動するか否か 0-1変数（1：移動する，0：移動しない）
$f_{t,l}$	時間帯t 別リンクl 別のバスモードの運行本数 ※サービスが存在しない場合はゼロ
v	バスモードの全時間帯にまたがる共通運営費用 ※共通運営費用：維持すべき車輌数に応じて発生する費用
$p_{t,o,d}$	バスサービス利用に伴う運賃支払額の時間帯t 別OD別小計
h	公共交通事業者の利益

行頻度・運賃の同時最適化モデルを都市間鉄道網に適用し，需要の季節変動が最適な NW・運行頻度・運賃に与える影響を分析している．これらの成果は路線バスをはじめとする都市内交通分野にも有用な示唆を与えるうる．ただし分析に当たっての前提や仮定は都市間交通と都市内交通では異なるため，そのまま都市内の路線サービスに適用することは困難である．

以上より路線バスサービスを取り巻く環境は厳しく，大都市圏郊外部においてもNWや運賃の改変を含む抜本的な再設計が期待される一方で，需要規模の異なる複数時間帯の NW・運賃・OD 経路を同時最適化する方法論や知見は不足している．そこで本研究では，須ヶ間・奥村[5]のモデルをベースに，ピーク時・オフピーク時双方の NW・運賃・OD 経路を同時最適化するモデルを開発する．そしてモデルを大都市圏郊外部を模した仮想地域に適用し，日内需要変動の存在が最適な路線バスサービス（NW・運賃）とその最適な使い方（OD 経路）に与える影響を明らかにする．

本論文の構成は以下の通りである．第 1 章では本研究の背景と目的を述べた．第 2 章で本研究のアプローチを説明し，モデルの構築を行う．第 3 章では日内需要変動が路線バスサービスとその使い方に与える影響を分析する．第 4 章では，本研究のまとめと課題を述べる．

2. 本研究のアプローチ

本研究では，地域の社会的総余剰を最大化するように NW・運賃・OD経路を同時最適化する須ヶ間・奥村[5] モデルの拡張モデルを用いる．両モデルの基本的な特徴は共通であるから詳細な説明は須ヶ間・奥村[5]に譲り，本稿では相違点と定式化に絞って記載する．

(1) 須ヶ間・奥村[5] モデルとの相違点

須ヶ間・奥村[5] モデルと本研究のモデル（以下，本モデル）の主な相違点は以下の通りである．

- 須ヶ間・奥村[5] モデルでは1日を1つの時間帯で表していた．本モデルでは鉄道駅に到着するODの需要規模が異なるピーク時とオフピーク時の2 時間帯を設定し，両時間帯のNW・運賃・OD経路を同時に最適化する．
- 須ヶ間・奥村[5] モデルでは，大小2種類のバスモードを考慮していた．本モデルでは，須ヶ間・奥村[5] モデルの大型バスモードに相当する路線バスモードと，徒歩モードの2種類を考慮する．
- 須ヶ間・奥村[5] モデルでは，バスの運行費用を実車走行距離に応じた費用に代表させていた．本モデルではそれに加え，両時間帯共通の費用として維持車輌数に応じた費用も考慮する．
- 須ヶ間・奥村[5]モデルでは路線系統を考慮し，バスはその系統に沿って一定頻度で運行される状況を考えていた．本モデルでは，第3 章の仮想地域への適用において求解時間が極端に長くなることを防ぐため，路線系統の考慮を捨象した．そのため，リンクごとに異なるバス運行本数を設定できる．

(2) モデルの定式化

a) 集合・パラメータ・変数の定義

本モデルで用いる集合，外生パラメータ，操作変数をそれぞれ**表-1**，**表-2**，**表-3** に示す．

b) 目的関数

時間帯t 別，OD 別の消費者余剰$cs_{t,o,d}$の総和と交通事業者利益 h を足し合わせた社会的総余剰を最大化する（式(1)）．

$$\max_{\boldsymbol{cs,c,q,b,a,e,z,x,y,f,v,p,h}} \sum_{t\in\boldsymbol{T}}\sum_{o\in\boldsymbol{N}}\sum_{d\in\boldsymbol{N}}\left(cs_{t,o,d}\right)+h \tag{1}$$

消費者余剰$cs_{t,o,d}$ は線形需要関数に基づき算出する（式(2),(3)）．

$$c_{t,o,d}=C_{t,o,d}-A_{t,o,d}\cdot q_{t,o,d} \quad \forall\, t\in\boldsymbol{T},o,d\in\boldsymbol{N} \tag{2}$$

$$cs_{t,o,d}=\frac{1}{2}\left(C_{t,o,d}-c_{t,o,d}\right)\cdot q_{t,o,d} \quad \forall\, t\in\boldsymbol{T},o,d\in\boldsymbol{N} \tag{3}$$

c) 交通量保存則

式(4)-(8)は，起点ノードから終点ノードまでの交通量保存則を表す．起点を出発した交通は，徒歩モードのみの利用で終点モードに直接到着するか，もしくは徒歩モードとバスモードを組み合わせて終点へ向かう．バスモードはバス停が在るノードで乗降できる（バス停有無はノードを発着するリンクへのバスサービス設定有無に依る，後述の式(12),(13)参照）．バスモードを利用する場合はバス停が在るノードまで徒歩で移動し，バス利用後は降車バス停から終点ノードまで再度徒歩移動を行う．起点ノードや終点ノードにバス停が在る場合も同一ノード内で徒歩移動を行っていると考える．なお本モデルではバス運賃が乗車区間の差異以外に依って価格差別されることを防ぐため（後述の式(19)-(21)参照），移動時の利用モードパターンを，ア) 徒歩のみ，イ) 徒歩→バス→徒歩，に限定している．すなわちバス降車後に別バス停まで徒歩移動し再度バスに乗車することは許さない．一方で本モデルでは須ヶ間・奥村[5]と異なりバスの路線系統を考慮しないため，結果的に同一バス停でのバスモード間乗り継ぎを許容している．またその際の乗り継ぎ抵抗は考えない．上記の仮定は，実社会において，同一バス停内乗継（たとえば幹線バス・フィーダーバス間の乗り継ぎ）の実現例がある一方で，バス停間の徒歩移動を伴う乗り継ぎが非現実的であることと整合的である．

$$q_{t,o,d}=\sum_{n\in\boldsymbol{N}}a_{t,o,d,n} \quad \forall\, t\in\boldsymbol{T},o,d\in\boldsymbol{N} \tag{4}$$

$$a_{t,o,d,n}=\sum_{l\in\boldsymbol{L}_n^{dep}}b_{t,o,d,l} \quad \forall\, t\in\boldsymbol{T},o,d\in\boldsymbol{N},n\in\{\boldsymbol{N}|n=o\} \tag{5}$$

$$\sum_{l\in\boldsymbol{L}_n^{arv}}x_{t,o,d,l}+a_{t,o,d,n}=\sum_{l\in\boldsymbol{L}_n^{dep}}b_{t,o,d,l}+e_{t,o,d,n} \quad \forall\, t\in\boldsymbol{T},o,d\in\boldsymbol{N},n\in\{\boldsymbol{N}|n\neq o,d\} \tag{6}$$

$$\sum_{l\in\boldsymbol{L}_n^{arv}}b_{t,o,d,l}=e_{t,o,d,n} \quad \forall\, t\in\boldsymbol{T},o,d\in\boldsymbol{N},n\in\{\boldsymbol{N}|n=d\} \tag{7}$$

$$\sum_{n'\in\boldsymbol{N}}e_{t,o,d,n'}+a_{t,o,d,n}=q_{t,o,d} \quad \forall\, t\in\boldsymbol{T},o,d\in\boldsymbol{N} \tag{8}$$

式(9), (10)は起点ノードへの到着や終点ノードからの出発という不合理な交通が存在しないことを表している．

$$\sum_{l\in\boldsymbol{L}_n^{arv}}b_{t,o,d,l}=0 \quad \forall\, t\in\boldsymbol{T},o,d\in\boldsymbol{N},n\in\{\boldsymbol{N}|n=o\} \tag{9}$$

$$\sum_{l\in\boldsymbol{L}_n^{dep}}b_{t,o,d,l}=0 \quad \forall\, t\in\boldsymbol{T},o,d\in\boldsymbol{N},n\in\{\boldsymbol{N}|n=d\} \tag{10}$$

$a_{t,o,d,n}\ \forall\, t\in\boldsymbol{T},o,d\in\boldsymbol{N},n\in\{\boldsymbol{N}|n=d\}$ と$e_{t,o,d,n}\ \forall\, t\in\boldsymbol{T},o,d\in\boldsymbol{N},n\in\{\boldsymbol{N}|n=o\}$は，どちらも起点ノードから終点ノードまで徒歩モードのみで利用する場合の交通量を表しており，同じ意味の変数が重複してしまっている．式(11)により後者の$e_{t,o,d,n}$ をゼロに固定する．

$$e_{t,o,d,n}=0 \quad \forall\, t\in\boldsymbol{T},o,d\in\boldsymbol{N},n\in\{\boldsymbol{N}|n=o\} \tag{11}$$

e) バス型モードの運行本数に関する制約

式(12), (13)は，リンクにバスサービスが設定される場合（$z_{t,l}=1$）にのみ上限運行本数F^{max}と下限運行本数F_t^{min}を満たすリンク別運行本数$f_{t,l}$ が設定され，利用客を輸送できることを表す．

$$F_t^{min}-F_t^{max}\left(1-z_{t,l}\right)\leq f_{t,l} \quad \forall\, t\in\boldsymbol{T},l\in\boldsymbol{L} \tag{12}$$

$$f_{t,l}\leq F_t^{max}\cdot z_{t,l} \quad \forall\, t\in\boldsymbol{T},l\in\boldsymbol{L} \tag{13}$$

本モデルでは車輌容量 H を超えて乗車することはできない．そのため輸送可能な交通量は運行本数$f_{t,l}$ に依存する（式(14)）．なお上限運行本数 F_t^{max} は需要に対して十分に大きいと仮定し，リンクにバスサービスが設定される限りは経路選択に影響を与えない．

$$\sum_{o\in\boldsymbol{N}}\sum_{d\in\boldsymbol{N}}b_{t,o,d,l}\leq f_{t,l}\cdot H \quad \forall\, t\in\boldsymbol{T},l\in\boldsymbol{L} \tag{14}$$

式(15)は運行本数が双方向で等しいことを示す.

$$f_{t,i} = f_{t,j} \quad \forall t \in \boldsymbol{T}, l \in \boldsymbol{L}, i,j \in \left(\boldsymbol{L} | i,j \in \boldsymbol{L}_l^{pair}\right) \quad (15)$$

f) 費用の利用者負担に関する制約

式(16)-(19)は利用者の一般化支払い額の地域全体の総和から公共交通事業者の利益 h を差し引いた額によって，バスモードの運営に必要な費用と，所要時間とバス待ち時間の時間価値の地域全体の総和を賄うという条件を示している．ただし集めた収入は，交通事業者の利益に充てるより交通サービスの運営に充てたほうが社会的総余剰は大きくなる．そのため最適解において利益hは原則としてゼロとなる（目的関数の社会的余剰（式(1)）は，結局，消費者余剰のみで構成されることとなる）．

バスモードの運営に必要な費用は，両時間帯にまたがる共通運営費用（維持車輌数に応じてかかる費用）と時間帯ごとに係る時間帯別運営費用（実車走行距離に応じてかかる費用）で構成される．維持車輌数は時間帯別に得られる必要車輌数の最大値として，必要な車輌数と実車走行距離はそれぞれ運行本数に単純に比例するものとして算出する（式(17), (18)）．起点から終点まで徒歩のみで移動するOD交通にバス運賃を支払わせることは不合理であるから，そのような OD の運賃支払額小計 $p_{t,o,d}$ はゼロとする（式(19)）．

$$c_{t,o,d} \cdot q_{t,o,d} = p_{t,o,d} + \sum_{n \in \boldsymbol{N}} \left(S_{o,n} + W\right) \cdot a_{t,o,d,n} + \sum_{l \in \boldsymbol{L}} R_l \cdot b_{t,o,d,l} + \sum_{n' \in \boldsymbol{N}} S_{n',d} \cdot e_{t,o,d,n'} \quad \forall t \in \boldsymbol{T}, o,d \in \boldsymbol{N} \quad (16)$$

$$\sum_{t \in \boldsymbol{T}} \sum_{o \in \boldsymbol{N}} \sum_{d \in \boldsymbol{N}} p_{t,o,d} - h = v + \sum_{t \in \boldsymbol{T}} \sum_{l \in \boldsymbol{L}} U_l \cdot f_{t,l} \quad (17)$$

$$v \geq \sum_{l \in \boldsymbol{L}} V_l \cdot f_{t,l} \quad \forall t \in \boldsymbol{T} \quad (18)$$

$$p_{t,o,d} \leq M \cdot \left(1 - x_{t,o,d,n}\right) \quad \forall t \in \boldsymbol{T}, o,d \in \boldsymbol{N}, n \in \{\boldsymbol{N} | n = d\} \quad (19)$$

本モデルでは各OD間移動に必要な一般化費用$c_{t,o,d}$を最適解として得ることができるが，これは最適解として得られた経路（リンク交通量$b_{t,o,d,l}$より解釈できる）を利用した場合の一般化費用であり，他経路を利用した場合の一般化費用は明示的には得られない．しかし，①各地点間の徒歩による所要時間の時間価値$S_{i,j}$を最短経路に基づいて設定し，②最適解においてどの OD 交通にも利用されない経路のバス運賃は十分に大きいと仮定すると，式(20)は，本モデルの最適解として得られる一般化費用$c_{t,o,d}$が Wardrop の第 1 原則（OD 毎に，利用される経路の一般化費用は皆等しく，利用されない経路の一般化費用よりも小さいか，せいぜい等しい）を満たすことを表す.

$$c_{t,o,d} \leq S_{o,n} + c_{t,n,n'} + S_{n',o} \quad \forall t \in \boldsymbol{T}, o,d,n,n' \in \boldsymbol{N} \quad (20)$$

起点ノードから乗車バス停まで徒歩移動する交通がある場合は$x_{t,o,d,n}, = 1$，降車バス停から終点ノードまで徒歩移動する交通がある場合は$y_{t,o,d,n}, = 1$となる（式(20), (21)）．起終点ノード以外のバス停でバス乗降する場合，その OD 交通の一般化支払額は，乗降バス停をそれぞれ起点・終点とする OD 交通の一般化支払額に，起点・乗車バス停間の徒歩所要時間，降車バス停・終点間の徒歩所要時間の時間価値を加えた値と一致する（式(19)-(22)）．これは乗車区間以外によるバス運賃の価格差別を許さないことを表す.

$$a_{t,o,d,n} \leq Q_{t,o,d} \cdot x_{t,o,d,n} \quad \forall t \in \boldsymbol{T}, o,d,n \in \boldsymbol{N} \quad (21)$$

$$e_{t,o,d,n} \leq Q_{t,o,d} \cdot y_{t,o,d,n} \quad \forall t \in \boldsymbol{T}, o,d,n \in \boldsymbol{N} \quad (22)$$

$$S_{o,n} \cdot x_{t,o,d,n} + c_{t,n,n'} + S_{n',o} \cdot y_{t,o,d,n'} \leq c_{t,o,d} + M \cdot \left(2 - x_{t,o,d,n} - y_{t,o,d,n'}\right) \quad \forall t \in \boldsymbol{T}, o,d,n,n' \in \boldsymbol{N} \quad (23)$$

g) 各操作変数の定義域

$$z_{t,l}, x_{t,o,d,n}, y_{t,o,d,n} \in \{0,1\}, \quad cs_{t,o,d}, c_{t,o,d}, q_{t,o,d}, b_{t,o,d,l}, a_{t,o,d,n}, e_{t,o,d,n}, f_{t,l}, v, p_{t,o,d}, h \geq 0 \quad \forall t \in \boldsymbol{T}, o,d,n \in \boldsymbol{N}, l \in \boldsymbol{L} \quad (24)$$

h) 定式化のまとめと求解方法

本研究で用いるモデルは式(1)を目的関数，式(2) - (24)を制約条件とする数理計画モデルとして定式化される．モデルには非線形制約を含むが，須ヶ間・奥村 [5]と同様に線形制約および二次錐制約に置き換えられ，0-1変数を含む混合整数二次錐計画問題に帰着できる．そのため本モデルは商用最適化ソルバーによる求解が可能である．実際の計算に当たっては，計算時間短縮のため，さらにいくつかの変形を行ったうえで，Gurobi Optimizer 9.5.2 を用いた.

3. 日内需要変動が路線バスサービス最適化に与える影響

(1) 適用地域とパラメータ設定

本研究では，モデルに**図-1** に示す大都市圏郊外部の鉄道駅周辺を模した仮想地域を与え，そこでの1 日の交通

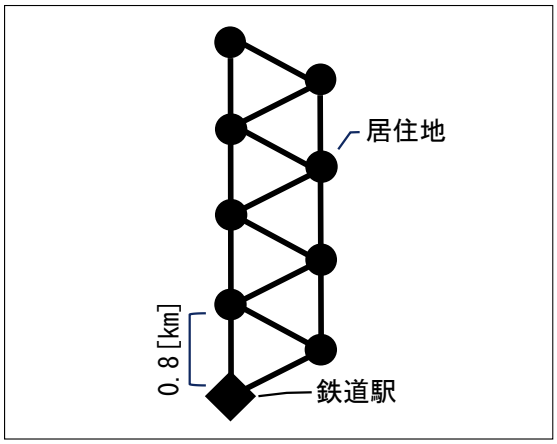


図-1 モデルを適用する仮想地域

について考える．**図-1** 中のリンクは主要道路ネットワークを示している．各リンク延長は0.8 km であり，駅から3.2 km までの地域を表している．左下のひし形ノードは都心に至るための駅を，それ以外のノードは居住地を示している．

各外生パラメータは実社会を参考に以下のように設定した．路線バスの1 日の営業時間はピーク時6 時間とオフピーク時10 時間の2 時間帯で構成されると仮定する．ピーク時・オフピーク時それぞれにおいて，駅・居住地を問わず全てのノード間にOD交通に関する線形需要関数を設定する．時間帯別OD 別最大一般化支払い額$C_{t,o,d}$は，駅に到着するOD（ピーク時）にのみ8000 [円] を，その他のODには2000 [円]を与えた．また時間帯別OD 別の最大需要量$Q_{t,o,d}$は，駅に到着するOD（ピーク時）に360 [トリップ/ ノード/ 6時間]，その他のOD（ピーク時）に6 [トリップ/ ノード/ 6時間]，駅に到着するOD（オフピーク時）に100 [トリップ/ ノード/ 10時間]，その他のOD（オフピーク時）に10 [トリップ/ ノード/ 10時間] を与えた．逆需要関数の傾き$A_{t,o,d}$は，$C_{t,o,d}$ を$Q_{t,o,d}$ で除した値を与えた．

上記の設定は，駅に到着するODはその他のODよりも最大需要量が大きいこと，駅に到着するOD（ピーク時）は駅に到着するOD（オフピーク時）よりも最大支払額と最大需要量が大きいことを表している．なおこのときピーク時とオフピーク時では後者のほうが時間帯が長いため，駅に到着するOD以外のODは，本質的には両時間帯で最大需要量に差異が無いことに注意されたい．また駅に到着するOD（ピーク時）の需要関数は，通勤・通学など必需的な交通需要の性格が強いと考えられるため，他時間帯や他ODよりも需要の価格弾力性が小さくなるよう注意して設定した（駅に到着するOD（ピーク時）の価格弾力性が最適解において他時間帯のODやピーク時の他ODより小さいことは確認済みである）．

バスモードの上限運行本数F_t^{max} はピーク時に360 [便/ 6 時間] を，オフピーク時に600 [便/ 10 時間] を与えた．いずれも1 分間に1 便出発するという十分に大きな値である．なお実際の計算において運行本数がこの値に達することはなかった．F_t^{mix} はバス型モードの下限運行本数であり，20分間に1便の間隔で出発する状況としてピーク時に18 [便/ 6 時間] を，オフピーク時に30 [便/ 10 時間] を与えた． バスモードの車輌容量H は，定員80 [人/便] の車輌に乗車率50%で乗車すること考えて，40 [人/便]を与えた．

バスモードのリンク別所要時間価値を表すR_l は，リンク距離を0.8 [km]，表定速度を20 [km/h]，時間価値を1200 [円/h] と仮定し，48 [円/リンク]を与えた．またノードi,j 間の徒歩モードでの所要時間価値を表す$S_{i,j}$ は，**図-1**の道路ネットワーク上の最短距離を表定速度4 [km/h] で進むと仮定して同様に計算し，240-960 [円] の範囲でそれぞれ与えた．バス停での待機時間W は下限運行本数（20分間に1便）より期待待ち時間を考え，200 [円] を与えた．

大都市圏郊外部におけるバスサービスの実車走行距離当たりの運営費用は 500 [円/km] 程度[注1)]である．本研究では，この運営費用を全時間帯にまたがる共通運営費用（維持車輌数に係る費用）と，時間帯別運営費用（実車走行距離に係る費用）に区分できると仮定し，その割合を時間帯別運営費用率φ で表す．時間帯別の実車走行距離は各リンクの時間帯別運行本数とリンク距離 0.8 [km] より算出できること，およびピーク時とオフピーク時の営業時間に注意して，共通運営費用の運行本数に対する原単位$V_{t,l}$ はピーク時において$500(1-\varphi)\times 0.8\times 16/6$，オフピーク時において$500(1-\varphi)\times 0.8\times 16/10$ を与えた（維持車輌数は実車走行距離に単純に比例すると仮定する）．また時間帯別運営費用の運行本数に対する原単位$U_{t,l}$ はピーク時において$500\varphi\times 0.8$，オフピーク時において$500\varphi\times 0.8$を与えた．なお，日内需要変動が路線バスサービスに与える影響は費用構造に応じて異なると考えられる．そこで時間帯別運営費用率φ には0.1，0.5，0.9 の 3 種類の値を与え，それぞれのケースについて計算を行った．

(2) 最適NWの特徴

図-2 は，時間帯別運営費用率φ の大きさごとに，ピーク時（左列）とオフピーク時（右列）それぞれの最適NW を示している．

駅に到着するOD（ピーク時）の最大支払額$C_{t,o,d}$ と最大需要量$Q_{t,o,d}$は他 OD に卓越するように設定しており，目的関数（社会的総余剰値）に大きな影響を与える．そのため駅への到達しやすさ，すなわち駅に到着する OD の一般化費用を小さくすることが優先される．一般化費用を小さくするには多くの場合で徒歩よりもバス利用が有用であるから，いずれの費用構造においても駅付近を凹部とするU字型NWが最適となった．また駅付近のリンクは駅に着する交通の利用が集中するため，それらのリンクではバスサービスが下限運行本数を超えて運行されている．

一方でオフピーク時は駅に到着する OD 需要の卓越度合いが弱い．それゆえより多様な OD が小さな一般化費用で移動できるよう，線対称や点対称に近しいNWが最適となった．ただし具体的な形状は費用構造に応じて大きく異なる．時間帯別運営費用率φ が小さいほど，すなわち時間帯別費用が共通費用に対して相対的に小さいほど，より多くのリンクにバスサービスが設定されている．その結果，**図-2** より，$\varphi=0.1$においてはピーク時よりもオフピーク時のほうがより多くのリンクにバスサービ

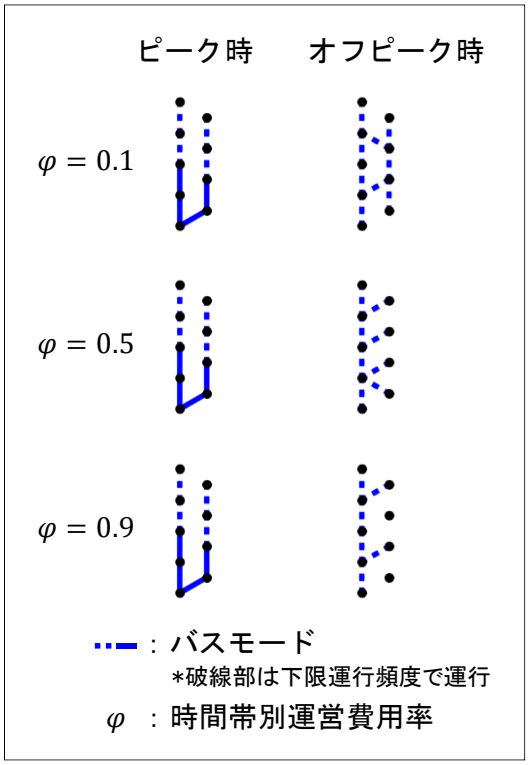


図-2 需要変動を考慮した最適NW

スが設定される一方，$\varphi = 0.9$ではオフピーク時のほうがバスサービスの設定リンク数が少なく，バスサービスが到達していないモードも在った．

(3) 最適な一般化支払額の特徴

本研究における一般化支払額とは，徒歩やバス利用による所要時間の時間価値，バスの待ち時間の時間価値，バス運賃の和である．交通経済学における標準的なピークロードプライシング理論では，①消費者のオフピーク時の支払額は短期限界費用と一致すること，②ピーク時の支払額は長期限界費用と一致すること，また③それらに合わせて供給量も調整されることが知られている．本研究の一般化支払額にこの理論を当てはめると，短期限界費用は時間帯別限界費用および所要時間・バス待ち時間の時間価値の和に相当し，長期限界費用はこの短期限界費用にさらに両時間帯をまたぐ共通限界費用を加えたものに相当する．すなわち，オフピーク時のバス運賃は時間帯別限界費用に一致し，ピーク時のバス運賃は時間帯別限界費用にさらに共通限界費用を加えたものと一致することが導かれる．ただし，本モデルでは下限運行本数の条件，リンクの双方向の運行本数が等しい条件，収支条件，徒歩のみで移動する交通はバス運賃を支払わないといった条件が存在するため，上記の標準的なピークロードプライシング理論が単純には成立しない．

下限運行本数の条件より，下限運行本数で運行されるリンクの輸送力に余裕がある場合，共通限界費用・時間帯別限界費用はゼロである．またリンクの双方向の運行

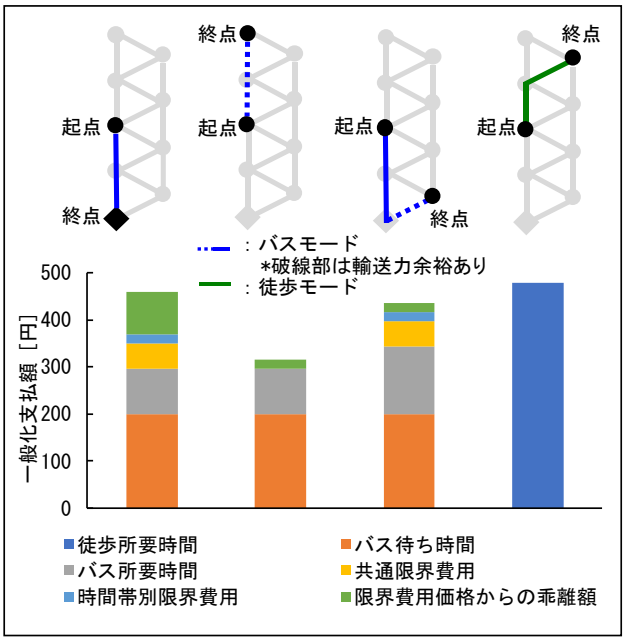


図-3 OD 別一般化支払額の内訳　$\varphi = 0.5$/ピーク時

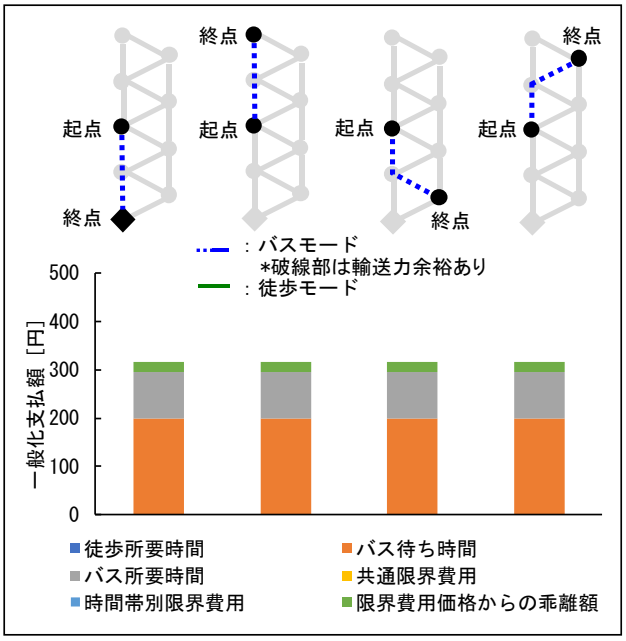


図-4 OD 別一般化支払額の内　$\varphi = 0.5$/オフピーク時

本数が等しい条件より，下限運行本数を超えて運行されるリンクであっても，輸送力に余裕があるリンクと無いリンクがある．輸送力に余裕があるリンクの共通限界費用・時間帯別限界費用はゼロであり，一方で輸送力に余裕が無いリンク（かつ対方向リンクの輸送力に余裕がある場合）の共通限界費用・時間帯別限界費用は双方向分であることに注意する．

さらにバスの運営費用・所要時間・バス待ち時間の総和を利用者が全て負担するという収支条件を仮定しているため，各 OD の一般化支払額は限界費用に一致させず，次善価格に設定する必要がある．すなわち，バスを利用する全 OD に，限界費用価格から一定程度上乗せ方向に

乖離させた次善価格を賦課し，その乖離分によって交通量に依存しない固定的な費用，すなわち，下限運行本数を超えるリンクの時間帯別費用を除くすべての運営費用を賄う必要がある．

図-3，4 は時間帯別運営費用率$\varphi = 0.5$ のケースの OD 別の一般化支払額とその内訳の例を，ピーク時・オフピーク時別に示している．**図-3，4** の結果は上記議論と整合的である．徒歩モードのみで移動する OD 交通の一般化支払額は，所要時間の時間価値のみで構成される．一方でバス型モードを利用する OD 交通の一般化支払額は，所要時間の時間価値のほか，バス待ち時間の時間価値とバス運賃で構成される．ピーク時の運賃は共通限界費用，時間帯別限界費用，限界費用価格からの乖離額で構成される．ただしピーク時においても，下限運行本数を超え，かつ定員が充足しているリンクは駅付近における駅方向のリンクのみである．それらリンクを通過しない OD には共通限界費用・時間帯別限界費用は賦課されない．また，駅付近であっても駅から遠ざかる方向のリンクは定員充足しないため，時間帯別限界費用はゼロであり運賃に賦課されない．オフピーク時の運賃は時間帯別限界費用，限界費用価格からの乖離額で構成される．ただし，オフピーク時に下限運行本数を超えるリンクは存在しないため，実質的にオフピーク時の運賃は限界費用価格からの乖離額のみで構成されている．

なお収支条件がある場合における限界費用価格からの乖離額は，一般に，需要の価格弾力性に反比例することが知られている（ラムゼイルール）．本研究では，駅に到着する OD（ピーク時）について，最大支払額を大きく設定することで，需要の価格弾力性を小さく設定した．乗車区間以外によるバス運賃の価格差別を許さない定式化を行っているため，複数 OD が同一区間を利用する場合にラムゼイルールが単純には成り立たない場合があることに注意が必要だが，限界費用価格からの乖離額は駅に到着する OD（ピーク時）が最も大きい結果となった．

まとめると，共通限界費用・時間帯別限界費用がゼロのリンクが多いことから，多くの OD において一般化支払額の大部分は所要時間とバス待ち時間の時間価値である．限界費用価格からの乖離額は時間帯を問わずバスを利用する全 OD に賦課されるため，オフピーク時においても運賃の支払いが必要だが，その金額は小さい．一方で運賃が大きい OD は，駅付近の駅に向かうリンクを利用する OD（ピーク時）と駅に到着する OD（ピーク時）であり，その収入によって全時間帯のバスサービスの大部分を支えている．

(4) 最適なOD経路選択の特徴

0.8km 以下の OD の交通は，パラメータの設定上，バス待ち時間＋バスの所要時間の時間価値よりも，徒歩での所要時間の時間価値のほうが小さい．そのため必ず徒歩で移動する．それ以外の OD についてはモードの選択余地がある．基本的にはバスを利用したほうが所要時間を短くできるため，有利である．ただしバス路線が目的地に対して大きく迂回している場合には，徒歩により直接目的地まで移動する方が有利となる場合がある．ピーク時は駅への需要を優先したU字型NWを採っているため，駅から遠いノード相互の OD は徒歩での移動が行われる（**図-3**）．一方でオフピーク時に迂回の必要が少ないNWが採用されている．時間帯別費用が共通費用に比して相対的に大きい場合にはバスサービスが設定されないノードが現れるが，それを除けば 0.8km を超える移動であれば，バスが利用されている．

4. まとめ

本研究では，日内需要変動が大きい大都市圏郊外部の路線バスサービスに着目し，ピーク時・オフピーク時の NW・運賃・OD 経路を同時最適化するモデルを開発した．また大都市圏郊外部を模した仮想地域をモデルに適用し，ピーク時・オフピーク時の NW・運賃・OD 経路それぞれの特徴を分析した．

オフピーク時にバスサービスをどれだけのリンクに設定すべきかは費用構造に大きく依存することが明らかになった．時間帯別費用が共通費用に比して大きい場合には，オフピーク時に一部のノードにバスサービスが設定されない可能性がある．ただし今回の計算範囲においては，オフピークのバスサービスを全廃するような極端な結果は得られなかった．また時間帯別費用が共通費用に比して小さい場合には，むしろピーク時よりも多くのリンクにバスサービスを設定すべきという結果が得られた．さらに，ピーク時には駅から遠いノード同士にて徒歩移動が多く発生する一方で，オフピーク時にはむしろ発生しにくい傾向がみられた．これらの結果は，どちらかというと切り捨てられがちなオフピーク時のバスサービスについて，安易に減便・廃止すべきではないことを示唆しており，興味深い．ただし各 OD の最大支払額や最大需要量，また供給側の費用構造によって異なる結果が得られる可能性もあるため，さらなる分析が期待される．

NOTES

注1) 日本バス協会：2022 年度版日本のバス事業，2023, https://www.bus.or.jp/cms/wp-content/themes/bus/images/about/publication/2022_busjigyo.pdf, (2023.10.13 参照).

REFERENCES

1) Steiner, P, O.: Peak loads and efficient pricing, *The Quarterly Journal of Economics*, Vol. 71, No. 4, pp. 585-610, 1957.
2) 枝村 俊郎，森津秀夫，松田宏，土井元治：最適バス路線網構成システム，土木学会論文報告集，1980 巻 300 号，pp. 95-107，1980. [Edamura, T., Moritsu, H,. Matsuda, H. and Doi, M.: A System for Optimal Design of a Bus Transportation Network, *Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers*, Vol. 1980, Issue 300, pp. 95-107, 1980.]
3) 天野光三，銭谷善信，近東信明：都市街路網におけるバス系統の設定計画モデルに関する研究，土木学会論文報告集，1982 巻 325 号，pp. 143-154，1982. [Amano, K., Zenitani, Y. and Konto, N.: A Study on Bus Route Planning Model for Urban Road Network, *Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers*, Vol. 1982, Issue 325, pp. 95-107, 1982.]
4) 柳沢吉保，高山純一：運行サービスレベルによる需要変動を考慮した中心市街地循環バスの社会的便益評価，都市計画論文集，37 巻，pp. 205-210，2002. [Yanagisawa, Y., Takayama, J.: The Social Welfare Evaluation of Circular Route Bus System with the Elasticity of Demnad, *Journal of the City Planning Institute of Japan,* Vol. 37, pp.205-210, 2002.]
5) 須ヶ間淳，奥村誠：都市郊外部公共交通の持続可能な路線再編 - 路線構成，交通量，運賃の同時最適化，都市計画論文集，56 巻 3 号，pp.865-872，2021. [Sugama, A. and Okumura M.: Sustainable Network Redesign of Transit Service in Urban Outskirts - Simultaneous Optimization of Routes Structure, OD Traffic and Fare, *Journal of the City Planning Institute of Japan,* Vol.56, No.3, pp.865-872, 2021.]
6) 中村文彦，太田勝敏，新谷洋二：時間帯需要変動を考慮した鉄道端末バス輸送計画の検討，都市計画論文集，23 巻，pp. 379-384，1988. [Nakamura, F., Ohta, K. and Niitani, Y.: A Study on a Planning of Feeder Bus Routes Considering the Variation of the Demand, *Journal of the City Planning Institute of Japan,* Vol.23, pp.379-384, 1988.]
7) 藤田雄介，山口裕通，中山晶一朗：旅行需要の季節変動と最適な長距離交通モードの組み合わせの関係，土木学会論文集 D3 (土木計画学)，77 巻，5 号，pp. I_127-I_136, 2022. [Fujita, Y., Yamaguchi, H. and Nakayama, S.: The Effect of Seasonal Variation of Travel Demand on Optimal Inercity Travel Network, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. D3 (Infrastructure Planning and Management)*, Vol.76, No.5, pp.I_967-I_776, 2021.]
8) 吉田智貴，奥村誠：季節変動を受ける都市間鉄道のネットワーク構造・運行量・運賃の同時最適化，土木学会論文集 D3 (土木計画学)，78 巻，5 号，pp. I_605-I_612.，2023.[Yoshida, T., Okumura, M.: Simultaneous Optimization of Network Structure, Operating Volume, and Fares for Intercity Railway with Seasonally Variational Demand, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. D3 (Infrastructure Planning and Management)*, Vol.78, No.5, pp.I_605-I_612 2023.]

(Received October 13, 2023)
(Accepted ?? ??, 2023)

THE IMPACT OF INTRADAY DEMAND FLUCTUATIONS ON OPTIMAL BUS SERVICE IN A SUBURBAN STATION AREA

Atsushi SUGAMA and Makoto OKUMURA

In suburban station areas in Japan, morning and evening demand for commuting to and from the city center dominates, making significant diurnal demand fluctuations. Public transportation in such areas is expected to provide services that respond to the diurnal demand fluctuations to maintain appropriate mobility. However, many things, such as the vehicles and the balance of revenue and expenditure on the operation, are shared throughout the entire period. Therefore, when designing a public transportation service, optimizing them by considering all periods simultaneously is useful. This study addresses the simultaneous optimization of a bus network and the route choice and generalized cost, considering both peak and off-peak hours by using a mathematical model.