シビルミニマムの担保が大都市圏郊外部の最適公共交通システムに与える影響

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

[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:mokmr@tohoku.ac.jp (Corresponding Author)

モビリティは一般的にシビルミニマムの一つと見なされ，その維持が重要視されている．一方で，わが国では営利事業としての公共交通運営が基本であり，人口減少やオンライン化，新しい生活様式の普及による移動需要の減少が，モビリティ維持への強い逆風となっている．たとえ需要の大きな大都市圏であっても，特に郊外部では，いかにモビリティを維持するかが課題となりつつある．その際，どこにどのような交通モードを設定し，どの利用者からいくら徴収するべきかを計画することが重要である．本研究では，上記を計算するためのモデルを混合整数二次錐計画問題として定式化する．既存研究では社会全体の総和の効率性に着目していたが，その場合，ある特定の個人に負担が集中してしまう可能性があった．そこで，本研究では最低限のモビリティ担保を制約式として表現し，その制約が交通網の構成や支払額の設定に与える影響を分析する．

Key Words : *civil minimum, public transportation, network design, optimization model*

1. はじめに

近年，我が国の交通需要は縮小傾向にある．すでに三大都市圏の最新パーソントリップ調査 [1)2)3)]にて総トリップ数は初の減少に転じていたが，その後の COVID-19 蔓延に伴う外出自粛は交通量をさらに激減させた．その後，外出自粛は緩和されつつあるが，リモートワークの普及などオンライン化の進展は著しく，交通需要の完全な回復は望めないとの見方が一般的である．そのため公共交通機関はますます厳しい経営を強いられている [4)]．

モビリティ維持の観点でこれまで注目を集めてきたのは主に中山間地等の過疎地域である．かねて内部補助を前提とした経営が行われてきた公共交通だが，交通量縮小が収支を悪化させており，モビリティ維持に暗い影を落としている．その一方で，一般にモビリティは社会生活に必要不可欠なインフラとされており，交通権やシビルミニマム，ユニバーサルサービスなどをキーワードに盛んな議論が交わされてきた [5)6)7)8)]．社会生活の維持に不可欠な水準，すなわちシビルミニマムの水準を定め，自治体行政からの外部補助や地域住民同士の共助等を念頭に，如何にして実現・維持するかが考えられてきた．

一方で大都市圏におけるモビリティ維持は，旺盛な交通需要を背景にこれまであまり注目されてこなかった．しかし今後は大都市圏といえども人口減少やオンライン化，COVID-19 蔓延に伴う外出自粛，そして運転士不足など様々な要因によって公共交通の経営が悪化し，モビリティ維持が徐々に困難になると考えられる．そのため，大都市圏においてもモビリティのシビルミニマム水準を設定し，それを満たすような交通計画・交通経営を行うことが求められるようになるだろう．ただし厳しい経営状況といえども，過疎地域と比べれば需要規模ははるかに大きく，また求められるサービスレベルも高いはずである．それゆえ公共交通網構成（以下，NW 構成と呼ぶ）や支払額設定（以下，費用分担と呼ぶ）には比較的自由度があり，工夫の余地が残されていると考えられる．そこで本研究は，補助金等の外部補助に頼らなくとも工夫次第で必要なモビリティを維持できる可能性に着目する．NW 構成や費用分担を操作変数に，交通サービスの運営費用はすべて利用者が負担するという前提の下で，シビルミニマムを担保しつつ社会的総余剰を最大化する比較的簡単な数理モデルを開発し，それを大都市圏郊外部を模した仮想地域に適用して計算を行う．そして，シビル

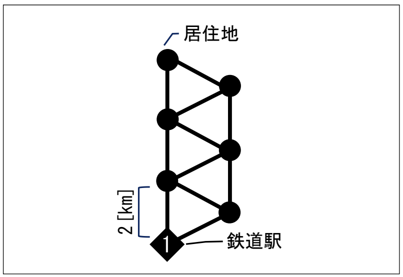

図-1 モデルを適用する仮想地域

ミニマムの水準に応じたNW構成のあり方・費用分担構造のあり方を考察する．

なお喜多[9]は，社会的総余剰最大化モデルを功利主義的，総和主義的計画法であると批判しており，最も不遇な者の活動機会の最大化を図る計画を提案している．確かに喜多[9]が対象としているような中山間地や地方都市では最低限度のサービス水準確保が最重要課題であり，社会的総余剰最大化はそぐわない可能性が高い．しかしながら，本研究の対象地域は大都市圏郊外部である．中山間地等に比べればはるかに大きな需要が存在していると考えられ，最低限度のサービス水準維持が危ぶまれる地区がある一方で，地域全体としては利便性の向上が求められよう．そこで，地域全体の利便性を社会的総余剰で表しそれを最大化しつつ，シビルミニマムを担保する制約を導入するという方法を採用した．

また従来，シビルミニマム水準は活動機会や最低運行頻度で与えられることが多かった[9)10)]．しかし本研究では，大都市圏では移動可否だけでなく移動に伴う利便性が重視されるという想定から，シビルミニマム水準を支払上限額の大小で与えた．支払上限額とはOD間を移動するにあたって支払う一般化費用（所要時間を金銭換算した額と運賃の和）の上限値であり，OD間移動について最低限の利便性を保障しようとするものである．

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章ではアプローチの説明を行い，第3章でモデルの構築を行う．第4章ではモデルの解析的求解を通して支払額の価格設定について明らかにする．第5章ではシビルミニマム水準に応じたNW構成や費用分担のあり方について考察する．第6章では，本研究のまとめと今後の展望について述べる．

2. 本研究のアプローチ

本研究では，須ヶ間・奥村[11)]の「個別型モードが公共交通に包含される場合のモデル」に，シビルミニマムを担保する制約を追加したモデルを開発した．須ヶ間・奥村[11)]のモデルと共通部分が大きいが，読者の便を考え，本稿ではモデル全体について説明する．

本研究では，大都市圏郊外部の鉄道駅周辺を模した仮想地域（図-1）における1日の交通を考える．左下のひし形ノードは都心に至るための鉄道駅を，それ以外のノードは居住地を示す．図-1の各リンクの長さは2.0 kmであり，駅から6.0 kmまでの地域を表している．

交通モードは，バス型モードと個別型モードの2種類を考える．本研究では，移動の際にバス等の公共交通機関を多く使用する地域事情を想定している．全てのOD交通はどちらかの交通モードを利用して移動することとし，他の交通モードや徒歩等は考えない．バス型モードとは固定路線型の中量輸送機関のことであり，いわゆる乗合バスを想定している．仮想地域に設定される路線系統を一定の運行頻度で運行する．なお，路線系統の経路は社会的総余剰を最大化するように内生的に決定されるが，計算負荷の問題から地域内に設定できる路線系統は1つのみとした．他方，個別型モードとは非路線型の小型輸送機関のことであり，自家用車や小型車両によるデマンド型交通を想定している．1人乗車を仮定し，相乗りは考えない．なお，いずれのモードも図-1中のリンク上を走行すると仮定した．また計算負荷の問題から，同モード間・異モード間を問わず乗り継ぎは認めないこととした．

各ODには予め需要関数を設定する．本研究では地域内の移動需要に比べて駅を経て都心へ向かう移動需要が大きい地域を考えている．そのため駅・居住地を問わず全てのノード間に需要関数を設定したが，その際，駅を発着するODの最大需要量は居住地間を結ぶODの最大需要量よりも大きく設定した．移動時に支払うOD別一般化支払額，OD交通量は，需要関数上で内生的に決まる．またその際，バス型モード・個別型モードを問わず全ての利用者の一般化支払額の総和によって，地域で必要な一般化費用（交通モードの運営費用と所要時間の和）のすべてを賄うという費用負担制約を考える．

なお本モデルでは，各利用者が完全情報の下で一般化支払額の最も小さな移動経路・利用モードを確定的に選択する状況を仮定している．モデルで算出されるOD別一般化支払額は実際に移動が行われるOD経路に対する支払額であり，選ばれなかった経路の支払額は明示されない．しかし本研究では「選ばれた経路の支払額は，選ばれなかった経路よりも小さな支払額が設定されている」と考える．

3. モデルの定式化

(1) 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．

表-1 集合とその意味

集合	意味
$\boldsymbol{N}$	居住地(起点ノード)集合
$\boldsymbol{L}$	有向リンク集合
$\boldsymbol{L}_n^{out}$	ノードnから発する有向リンク集合
$\boldsymbol{L}_n^{in}$	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

パラメータ	意味
$C_{o,d}$	OD別の最大支払い意思額
$C_{o,d}^{limit}$	シビルミニマム水準として設定したOD別上限支払い額
$Q_{o,d}$	OD別の最大需要量
$A_{o,d}$	OD別の逆需要関数の傾き
M	地域全体のノード数
F^{max}	バス型モードの最大運行頻度
F^{min}	バス型モードの最低運行頻度
G	バス型モードの車両容量
T_l	バス型モードのリンクl乗車時間の時間価値
$R_{o,d}$	個別型モードのOD間乗車時間の時間価値
V_l	バス型モードの運営に必要な可変費用の車輌走行距離に対する比例係数
$U_{o,d}$	個別型モードの運営に必要な可変費用の車輌走行距離に対する比例係数

(2) 目的関数

OD 別消費者余剰$cs_{o,d}$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．

$$c_{o,d} = C_{o,d} - A_{o,d} \cdot q_{o,d} \qquad \forall\, o,d \in N \tag{1}$$

(OD 別の線形逆需要関数)

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

(OD別の消費者余剰)

$$\max_{\substack{\boldsymbol{cs,c,q,b,a,s,x,w,z,y,}\\ \boldsymbol{g,f,p,h,v,d,t}}} \sum_{o \in \boldsymbol{N}} \sum_{d \in \boldsymbol{N}} \left(cs_{o,d}\right) + h \tag{3}$$

(社会的総余剰の最大化)

(3) 交通量保存則

式(4)-(6)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．バス型モードは1 路線系統しか設定を許しておらず，また異モード間の乗り継ぎも許していないため，起点ノード出発時に選択した交通モードに終点ノードまで乗り続ける．式(7), (8) は，バス型モードと個別型モードの間で，二者択一的な交通手段選択がなされることを表す．式(9) は，起点ノードへUターンするという不合理な交通が存在しないことを表している．

表-3 操作変数とその意味

変数	意味（特段の記載がない変数は非負の連続変数）
$cs_{o,d}$	OD別消費者余剰
$c_{o,d}$	OD別一般化支払い額
$q_{o,d}$	OD別需要量
$b_{o,d}$	バス型モードを利用するOD別交通量
$a_{o,d}$	個別型モードを利用するOD別交通量
$s_{o,d}$	出発交通手段の選択を表す0-1変数（1：バス型モード，0：個別型モード）
$x_{o,l}$	バス型モードの起点o別のリンクl交通量
z_l	リンクlにおける バス型モードのサービス有無を示す0-1変数（1：有り，0：無し）
y_n	バス型モードがノードnを経由するか否かを示す0-1変数（1：経由，0：不経由）
g	バス型モードの運行頻度
f_l	リンクlにおけるバス型モードの運行頻度（路線系統が経由しない場合はゼロ）
$p_{o,d}$	公共交通利用時のOD別一般化支払い額
h	公共交通事業者の利益
v_n	バス型モードのルート設定に必要な0-1変数（ダミーリンクの有無　1：有り，0：無し）
d_n	バス型モードのルート設定に必要な変数（ダミーリンクを流れるトークンの量を表す）
t_l	バス型モードのルート設定に必要な変数（リンクlを流れるトークンの量を表す）
$q_{o,d}^{sq.}$	二次錐計画問題への変換に必要な変数（OD別の需要量$q_{o,d}$の2乗を表す）

$$\sum_{d \in \boldsymbol{N}} q_{o,d} = \sum_{l \in \boldsymbol{L}_o^{out}} x_{o,l} + \sum_{d \in \boldsymbol{N}} a_{o,d} \qquad \forall\, o \in \boldsymbol{N} \tag{4}$$

(起点ノードにおける出発交通の保存則)

$$\sum_{l \in \boldsymbol{L}_n^{in}} x_{o,l} = b_{o,n} + \sum_{l \in \boldsymbol{L}_n^{out}} x_{o,l} \qquad \forall\, o \in \boldsymbol{N}, n \in \{\boldsymbol{N} | n \neq o\} \tag{5}$$

(起点以外のノードにおける
バス型モード利用者の交通量保存則)

$$b_{o,d} + a_{o,d} = q_{o,d} \qquad \forall\, o,d \in \boldsymbol{N} \tag{6}$$

(終点ノードにおける到着交通の保存則)

$$b_{o,d} \leq s_{o,d} \cdot Q_{o,d} \qquad \forall\, o,d \in \boldsymbol{N} \tag{7}$$

(二者択一的な交通手段選択)

$$a_{o,d} \leq \left(1 - s_{o,d}\right) \cdot Q_{o,d} \qquad \forall\, o,d \in \boldsymbol{N} \tag{8}$$

(二者択一的な交通手段選択)

$$\sum_{l \in \boldsymbol{L}_o^{in}} x_{o,l} = 0 \qquad \forall\, o \in \boldsymbol{N} \tag{9}$$

(起点ノードへのUターンの禁止)

(4) バス型モードの路線系統の設定に必要な制約

本研究では，バス型モードについて分岐のない路線系統を明示的に表現するため，巡回セールスマン問題の単

一品種フロー定式化を応用した．単一品種フロー定式化とは「起点ノードから全ノード数より1少ない量のトークンを流し，ノードを経由するごとにトークンを1つずつ消費していき，かつ全トークンをあますことなく消費させる」という制約の下で，トークンの流れに沿ってノード間を移動した場合のコストの総和を最小化する方法である．全ノード数より1少ない量のトークンを各ノードで1つずつ消費させることは，結果的に全ノードを経由しなければならないことを意味しており，その条件の下で目的関数に基づく最小移動コストのハミルトン路を求めている．ただし本研究では任意のノードのみ重複なく経由するような経路を，社会的総余剰を最大化するように内生的に求めたい．すなわち通常の巡回セールス問題とは異なり，必ずしも全てのノードを巡回するわけではなく，また起点・終点ノード，経由ノードも内性的にも求める必要がある．そこでNWにダミー起点，およびダミー起点とNW上の他ノードをつなぐダミーリンクを加え，ダミー起点から経由ノード数（＝内生変数）分のトークンを流すという定式化を行った．

式 (10), (11) は，トークンが流れるリンクにのみバス型モードサービスが設定されることを表す．式(12) - (14) はダミーリンクに関する制約式である．式(12) はダミーリンクが存在する場合にのみダミーリンクにトークンが流れること，式 (13) はダミーリンクがNW内に最大でも1つしか存在しないこと，式 (14) はダミー起点から流すトークン量が路線系統の経由ノード数と等しいことを表す．式 (15) はトークンのフロー保存則を表す．y_n はノードn におけるトークンの消費量を表す．リンクl もしくはダミーリンクを経てノードn に到着したトークンは，y_n だけ消費されて出発する．

式 (16), (17) は，バス型モードの路線系統がノードn を経由する場合に $y_n = 1$ となることを表す．式 (18) は到着リンク数（ダミーリンクを含む）と出発リンク数が等しいか，出発リンク数のほうが少ないことを表す．不等号であるのは終点を表すためである．閉路の場合，起点（ダミー起点ではなくNW上の起点）にはダミーリンクと最終リンクが到着し，出発リンクは1つのみとなるため不等号が現れる．開路ならば，終点では到着リンクのみ存在するため，やはり不等号が現れる．

$$t_l \le M \cdot z_l \quad \forall\, l \in \boldsymbol{L} \tag{10}$$

$$z_l \le t_l \quad \forall\, l \in \boldsymbol{L} \tag{11}$$

$$d_n \le M \cdot v_n \quad \forall\, n \in \boldsymbol{N} \tag{12}$$

$$\sum_{n \in \boldsymbol{N}} v_n \le 1 \tag{13}$$

$$\sum_{n \in \boldsymbol{N}} d_n = \sum_{n \in \boldsymbol{N}} y_n \tag{14}$$

$$\sum_{l \in \boldsymbol{L}_n^{in}} t_l + d_n = y_n + \sum_{l \in \boldsymbol{L}_n^{out}} t_l \quad \forall\, n \in \boldsymbol{N} \tag{15}$$

$$\sum_{l \in \boldsymbol{L}_n^{in}} z_l \le y_n \quad \forall\, n \in \boldsymbol{N} \tag{16}$$

$$\sum_{l \in \boldsymbol{L}_n^{out}} z_l \le y_n \quad \forall\, n \in \boldsymbol{N} \tag{17}$$

$$\sum_{l \in \boldsymbol{L}_n^{in}} z_l + v_n \ge \sum_{l \in \boldsymbol{L}_n^{out}} z_l \quad \forall\, n \in \boldsymbol{N} \tag{18}$$

(5) 運行頻度に関する制約

式 (19), (20) はバス型モードの運行頻度に関する制約である．路線系統内の区間運転を許さず，全ての車両が起終点間を往復することを表す．路線系統が設定されるのであれば，経路上のリンクの運行頻度は $f_l = g$，経路外のリンクの運行頻度はゼロとなる．式 (21), (22) は，リンクにサービスが設定される場合にのみ運行頻度が ゼロより大きくなり，利用客を輸送できることを表す．なお最大運行頻度 F^{max} は需要に対して十分に大きいと仮定し，リンクに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．また本モデルでは車両容量 G を超えて乗車することはできないこととした．式(23) は最低運行頻度 F^{min} を表す．式(24) は運行頻度がリンクの双方向で等しいことを示す．

$$g - F^{max}\left(1 - \textstyle\sum_{l' \in \boldsymbol{L}_l^{pair}} z_{l'}\right) \le f_l \quad \forall, l \in \boldsymbol{L} \tag{19}$$

（路線系統上の運行頻度の同一性）

$$f_l \le g \quad \forall\ l \in \boldsymbol{L} \tag{20}$$

（路線系統上の運行頻度の同一性）

$$f_l \le F^{max} \cdot \sum_{l' \in \boldsymbol{L}_l^{pair}} z_{l'} \quad \forall\, l \in \boldsymbol{L} \tag{21}$$

（利用者数の容量制約）

$$\sum_{o \in \boldsymbol{O}} x_{o,l} \le G \cdot f_l \quad \forall\, l \in \boldsymbol{L} \tag{22}$$

（利用者数の容量制約）

$$F^{min} \le g \quad \forall\ l \in \boldsymbol{L} \tag{23}$$

（最低運行頻度の制約）

$$f_l = f_{l'} \quad \forall\, l \in \boldsymbol{L}, l' \in \boldsymbol{L}_l^{pair} \tag{24}$$

（運行頻度の双方向の同一性）

(6) 運営費用の利用者負担に関する制約

交通サービスの運営には車両走行距離に応じた運営費用が必要となる．また移動に際しては移動時間も発生する．本モデルではそれらすべてを利用者が負担すると考える． 式(25) (26)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，バス型モード・個別型モードの運営に必要な費用，所要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．ただし集めた収入を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

的総余剰が大きくなるため，交通事業者利益 h は原則としゼロとなる．

$$\sum_{o\in\boldsymbol{N}}\sum_{d\in\boldsymbol{N}}p_{o,d}-h=\sum_{l\in\boldsymbol{L}}V_l\cdot f_l+\sum_{o\in\boldsymbol{N}}\sum_{l\in\boldsymbol{L}}T_l\cdot x_{o,l}+\sum_{o\in\boldsymbol{N}}\sum_{d\in\boldsymbol{N}}U_{o,d}\cdot a_{o,d}+\sum_{o\in\boldsymbol{N}}\sum_{d\in\boldsymbol{N}}R_{o,d}\cdot a_{o,d} \tag{25}$$

（両モードを含む公共交通全体の経済的収支）

$$c_{o,d}\cdot q_{o,d}=p_{o,d}\quad \forall\, o,d\in\boldsymbol{N} \tag{26}$$

（ODごとの一般化支払い額）

(7) シビルミニマム担保のための制約

式(27) はシビルミニマムを担保するための制約であり，OD 別に一般化支払い額$c_{o,d}$の上限額（＝シビルミニマム水準）を定めている．

$$c_{o,d}\le C_{o,d}^{limit}\quad \forall\, o,d\in\boldsymbol{N} \tag{27}$$

（シビルミニマム担保のための制約）

(8) 各操作変数の定義域

$$\begin{gathered} s_{o,d},z_l,y_n,v_n\in\{0,1\},\\ cs_{o,d},c_{o,d},q_{o,d},b_{o,d},a_{o,d},x_{o,l},\\ g,f_l,p_{o,d},h,d_n,t_l\ge 0\\ \forall\, o,d,n\in\boldsymbol{N},l\in\boldsymbol{L}\end{gathered} \tag{28}$$

(9) 二次錐計画問題への変形

定式化に含まれる非線形制約（式(2), (26)）を，線形制約または凸二次錐制約に変形し，二次錐計画問題に帰着させる．まず新たな変数$q_{o,d}^{sq.}$を定義（式(29)）する．そそいて式(2), (26) に式(1) を代入し，$(q_{o,d})^2$を$q_{o,d}^{sq.}$に置き換える．すると式(2), (26) は線形式(30), (31)に置き換えられる．なお式(29) は不等式だが本モデルでは常に等式が成立するため（付録参照），上記置き換えは計算結果に影響を与えない．

$$q_{o,d}^{sq.}\ge\left(q_{o,d}\right)^2\quad \forall\, o,d\in\boldsymbol{N} \tag{29}$$

$$cs_{o,d}=\frac{1}{2}A_{o,d}\cdot q_{o,d}^{sq.}\quad \forall\, o,d\in N \tag{30}$$

$$C_{o,d}\cdot q_{o,d}-A_{o,d}\cdot q_{o,d}^{sq.}=p_{o,d}\quad \forall\, o,d\in\boldsymbol{N} \tag{31}$$

$$\begin{gathered} s_{o,d},z_l,y_n,v_n\in\{0,1\},\\ cs_{o,d},q_{o,d},q_{o,d}^{sq.},b_{o,d},a_{o,d},x_{o,l},\\ g,f_l,p_{o,d},h,d_n,t_l\ge 0\\ \forall\, o,d,n\in\boldsymbol{N},l\in\boldsymbol{L}\end{gathered} \tag{32}$$

(10) 定式化のまとめ

式(3) を目的関数， 式(1), (4) - (25), (27), (29) - (32) を制約条件とする数理計画モデルとして定式化される．本モデルは 0-1 変数を含む二次錐計画問題であり，商用最適化ソルバーによる求解が可能である． Gurobi Optimizer 9.1.1 を用いて計算を行った.

(11) 外生パラメータの設定

適用地域は，第2章で述べた通り，大都市圏郊外部の鉄道駅周辺を模した**図-1**の仮想地域である．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． $C_{o,d}$ は，OD 別利用者の一般化費用に関する最大支払い意思額であり，全OD に一律1600 円を与えた．シビルミニマム水準として設定したOD支払上限制$C_{o,d}^{limit}$ は，各ODを個別型モードで移動した場合の限界費用を基準に，その 50 [%] から400 [%]まで10 ポイント刻みで値を設定してそれぞれ計算を行った．OD 別の最大需要規模$Q_{o,d}$ は，駅を発着するOD，駅以外のノード同士を発着するODにそれぞれ一律の値を与えた．駅を発着するODの最大需要規模は120 [トリップ/ノード/日] から210[トリップ/ノード/日]まで10 [トリップ/ノード/日] 刻みで値を設定してそれぞれ計算を行った．駅以外のノード同士を発着するOD には常に15 [トリップ/ノード/日]を設定した． $A_{o,d}$ は逆需要関数の傾きであり，$C_{o,d}$ を$Q_{o,d}$ で除した値を与えた. F^{max} はバス型モードの最大運行頻度であり，960 [便/日] を与えた．本研究では交通サービスの営業時間を16 [時間/日] と想定しており， 1分に1便出発するという十分に大きな値である． F^{min} はバス型モードの最低運行頻度であり，20分に1便の間隔で出発する状況として48[便/日]を与えた．なお実際の計算では，運行頻度は常に最低運行頻度であった.

G はバス型モードの車両容量であり，定員 80 [人/便]の車両に乗車率 50%で乗車すること考えて，40 [人/便]を与えた．なお，個別型モードの車両容量は定員 1 [人/便]である．バス型モードのリンク別所要時間価値を表すT_l は，リンク距離を 2 [km]，表定速度を 20 [km/h]，時間価値を 1200 [円/h] と仮定し，120 [円/リンク]を与えた．個別型モードの OD 別所要時間価値を表す $R_{o,d}$ は，リンク上を最短距離で移動した場合の OD 間道のりを用いて同様に計算し， 120-360 [円/リンク]を与えた.

V_lはバス型モードの車輛走行距離に応じてかかるサービス運営費用の原単位であり，500 [円/km/便]を与えた．同様に$U_{o,d}$は個別型モードの車輛走行距離に応じてかかるサービス運営費用の原単位であり，200 [円/km/便] を与えた.

4. 支払額の設定基準

本章では，前章で定式化したモデルの計算結果を用いて最適な費用分担を明らかにする準備として，OD 別一般化支払額$c_{o,d}$を解析的に求め，支払額の価格設定の性

質を明らかにする．ただし本モデルは先に述べたように 0-1 変数を含んでおり，このままでの解析的求解は困難である．そこで計算結果に影響を与えないよう注意しながら，0-1 整数を含まない純粋な二次錐計画問題をくくりだし，それを解析的に解くことにする．なお本章で説明するモデルの変形は，あくまで解析的分析の見通しをよくするためのものであり，実際の数値計算での利用は想定していない．また計算の都合上，OD 別一般化支払額$c_{o,d}$を直接的に求めるのではなく，OD 交通量$q_{o,d}$を求めてから$c_{o,d}$を求めた．

(1)解析的求解のための変形

前章で定式化したモデルの求解とは，「式(3) を目的関数に， 式(1), (25), (27), (29)- (32)を制約条件とする二次錐計画問題」に，制約式(4)- (24) を満たすようなバス型モードの NW 形状（0-1 変数 z_l, y_n, v_n，連続変数d_n, t_l）・運行頻度（連続変数 g, f_l）及び各 OD 移動者のモード選択（0-1 変数$s_{o,d}$）・経路選択を外生的に総当たり的に与えてそれぞれ計算させ，目的関数が最大となるものを選ぶことと同義である．このとき「式(3) を目的関数に，式(1), (25), (27), (29)- (32)を制約条件とする二次錐計画問題」は整数を含まない純粋な二次錐計画問題であり，以下ではこの二次錐計画問題の求解を考える．

ここでまず，移動に要する可変費用を表す関数$Var(q_{o,d}|o,d\in\boldsymbol{N})$を定義する（式(33)）．モード選択・経路選択が外生的に設定されていることから，OD 交通量$q_{o,d}$が定まるとバス型モード利用のリンク交通量$x_{o,l}$やバス型モード利用の OD 交通量$b_{o,d}$，個別型モード利用の OD 交通量 $a_{o,d}$ が一意に定まる．そのため式(33)の右辺には複数の内生変数が含まれるものの，$Var(q_{o,d}|o,d\in\boldsymbol{N})$は OD 交通量$q_{o,d}$のみに応じて定まる関数として扱うことができる．次にバス型モードの固定費用を表す定数Fixを定義する（式(34)）．ここではバス型モードの運行頻度が外生的に与えられると考えているため，運行頻度に応じた可変費用は固定的な費用として扱われる．なお，運行頻度に関する変数g, f_lは連続変数であるが，今回の計算の範囲内では，最低運行頻度F^{min}以外の値を採らないこと，また仮にF^{min}以外の値を考慮する OD 交通量$q_{o,d}$同士が運行頻度設定を介して直接影響しあうこととなり取り扱いが煩雑になることから，外生的に与える状況を考えた．上記を踏まえると，式(33)(34) より式(25) は式(35) に置き換えられる．

目的関数式(3) は式(30)(31)(35) を用いて整理すると式(36) に変形できる．なお，式(30)より変数$cs_{o,d}$が非負条件式(32) を満足することは自明であるから，変数$cs_{o,d}$と式(30) は消去する．また式(35) は式(31)(32) を用いて整理すると式(37) に，式(31) は式(32) より式(38)に置き換えられ，変数$p_{o,d}, h$は消去できる．式(32) の変数 $c_{o,d}$ の非負条件は，式(1) を代入し，$C_{o,d}/Q_{o,d}=A_{o,d}$に注意して変形すると，式(39) に置き換えられる．ここで OD 別支払上限額$C_{o,d}^{limit}$に対応する OD 別下限交通量$Q_{o,d}^{limit}$を定義すると（式(40)），式(27)は式(1)(40)を用いて式(41)に置き換えられ，変数 $c_{o,d}$ と式(1) は消去できる．未消去の変数は$q_{o,d}, q_{o,d}^{sq.}$のみだが，式(29)(41) より両変数の非負性は自明であるため，非負条件式(32)を削除する．最後に，これまで行った変数の消去を目的関数に反映させるため式(36)を式(42)に置き換える．すると「式(3) を目的関数に， 式(1), (25), (27), (29)- (32)を制約条件とする二次錐計画問題」は「式(42) を目的関数に， 式(29) , (37)- (39), (41), (42) を制約条件とする二次錐計画問題」に置き換えられる．

$$Fix=\sum_{l\in\boldsymbol{L}}V_l\cdot f_l \tag{33}$$

$$\begin{aligned}\sum_{o\in\boldsymbol{N}}\sum_{d\in\boldsymbol{N}}Var_{o,d}(q_{o,d})&=\sum_{o\in\boldsymbol{N}}\sum_{l\in\boldsymbol{L}}T_l\cdot x_{o,l}\\&+\sum_{o\in\boldsymbol{N}}\sum_{d\in\boldsymbol{N}}U_{o,d}\cdot a_{o,d}+\sum_{o\in\boldsymbol{N}}\sum_{d\in\boldsymbol{N}}R_{o,d}\cdot a_{o,d}\\&\forall\, o,d\in\boldsymbol{N}\end{aligned} \tag{34}$$

$$\sum_{o\in\boldsymbol{N}}\sum_{d\in\boldsymbol{N}}p_{o,d}-h=Fix+Var(q_{o,d}|o,d\in\boldsymbol{N}) \tag{35}$$

$$\begin{aligned}\max_{c,q,q^{sq.},p,h}\sum_{o\in\boldsymbol{N}}\sum_{d\in\boldsymbol{N}}\left(C_{o,d}\cdot q_{o,d}-\frac{1}{2}A_{o,d}\cdot q_{o,d}^{sq.}\right)\\-Fix-Var(q_{o,d}|o,d\in\boldsymbol{N})\end{aligned} \tag{36}$$

$$\begin{aligned}\sum_{o\in\boldsymbol{N}}\sum_{d\in\boldsymbol{N}}(C_{o,d}\cdot q_{o,d}-A_{o,d}\cdot q_{o,d}^{sq.})-Fix\\-Var(q_{o,d}|o,d\in\boldsymbol{N})\geq 0\end{aligned} \tag{37}$$

$$C_{o,d}\cdot q_{o,d}-A_{o,d}\cdot q_{o,d}^{sq.}\geq 0\quad\forall\, o,d\in\boldsymbol{N} \tag{38}$$

$$q_{o,d}\leq Q_{o,d}\qquad\forall\, o,d\in\boldsymbol{N} \tag{39}$$

$$Q_{o,d}^{limit}=Q_{o,d}\left(1-\frac{C_{o,d}^{limit}}{C_{o,d}}\right)\quad\forall\, o,d\in\boldsymbol{N} \tag{40}$$

$$q_{o,d}\geq Q_{o,d}^{limit}\quad\forall\, o,d\in\boldsymbol{N} \tag{41}$$

$$\begin{aligned}\max_{q,q^{sq.}}\sum_{o\in\boldsymbol{N}}\sum_{d\in\boldsymbol{N}}\left(C_{o,d}\cdot q_{o,d}-\frac{1}{2}A_{o,d}\cdot q_{o,d}^{sq.}\right)-Fix\\-Var(q_{o,d}|o,d\in\boldsymbol{N})\end{aligned} \tag{42}$$

(2)解析的求解

本節では，「式(42)を目的関数に， 式(29) , (37)- (39), (41), (42)を制約条件とする二次錐計画問題」をラグランジュの未定乗数法により求解する．ラグランジュ関数Lは式(43) に示すとおりである．ここで， NW 構成・モード選択・経路選択を変更しない範囲での限界費用（以下，単に限界費用と呼ぶ）を OD ごとに$MV_{o,d}$と定義する．$q_{o,d}$，$q_{o,d}^{sq.}$は一次独立であり，またバス型モード利用のリンク交通量$x_{o,l}$や個別型モード利用の OD 交通量$a_{o,d}$は$q_{o,d}$の一次従属な変数であるため，式(34) より，$Var(q_{o,d}|o,d\in\boldsymbol{N})$の$q_{o,d}$による偏微分は$MV_{o,d}$である

表-4 4種類の解析解

	解の成立条件	解析解	備考
A	式(47)(49)(50)(51)：第2式が等号成立 式(48)：第3式が等号成立	$c_{o,d} = MV_{o,d}$	限界費用価格
B	式(49)(50)(51)：第2式が等号成立 式(47)(48)：第3式が等号成立	$c_{o,d} = \frac{1}{1+k} V_{o,d} + \frac{k}{1+k} C_{o,d}$	ラムゼイ価格
C	式(49)(50)：第2式が等号成立 式(48)(51)：第3式が等号成立	$c_{o,d} = C_{o,d}^{limit.}$	支払上限価格 （ミニマム水準）
D	式(48)(49)：第3式が等号成立 または 式(48)(50)：第3式が等号成立	$c_{o,d} = 0$	
	それ以外	—	不成立

（式(44)）．そのことに注意すると，式(43)の 1 階条件は式(45)(46)，KKT 条件は式(47)-(51)となる．KKT 条件の第 2 式等号成立と第 3 式等号成立が二律背反であることに注意して，場合分けしながら解いていくと，4 種類の解析解$c_{o,d}$が得られた．結果を表-4 に示す．なお，ここで直接求まる変数は$q_{o,d}$と$q_{o,d}^{sq.}$だが，本研究で着目したいのは支払額$c_{o,d}$であるため，式(1) を用いて$c_{o,d}$に変換している．なお解析解の詳細な導出方法については付録を参照されたい．

$$\begin{aligned} L = &\sum_{o\in N}\sum_{d\in N}\left(C_{o,d}\cdot q_{o,d} - \frac{1}{2}A_{o,d}\cdot q_{o,d}^{sq.}\right) - Fix \\ &- Var\left(q_{o,d}\middle|o,d\in \boldsymbol{N}\right) \\ &+\lambda\left\{-\sum_{o\in N}\sum_{d\in N}\left(C_{o,d}\cdot q_{o,d} - A_{o,d}\cdot q_{o,d}^{sq.}\right) + Fix + Var\left(q_{o,d}\middle|o,d\in \boldsymbol{N}\right)\right\} \\ &+\sum_{o\in N}\sum_{d\in N}\xi_{o,d}\cdot\left(\left(q_{o,d}\right)^2 - q_{o,d}^{sq.}\right) \\ &+\sum_{o\in N}\sum_{d\in N}\sigma_{o,d}\cdot\left(-C_{o,d}\cdot q_{o,d} + A_{o,d}\cdot q_{o,d}^{sq.}\right) \\ &+\sum_{o\in N}\sum_{d\in N}\tau_{o,d}\cdot\left(q_{o,d} - Q_{o,d}\right) \\ &+\sum_{o\in N}\sum_{d\in N}\varphi_{o,d}\cdot\left(-q_{o,d} + Q_{o,d}^{limit}\right) \end{aligned} \tag{43}$$

$$\frac{\partial Var\left(q_{o,d}\middle|o,d\in \boldsymbol{N}\right)}{\partial q_{o,d}} = MV_{o,d} \quad \forall\, o,d\in \boldsymbol{N} \tag{44}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial q_{o,d}} &= C_{o,d} - MV_{o,d} \\ &+\lambda\cdot\left\{-C_{o,d} + MV_{o,d}\right\} + \xi_{o,d}\cdot 2q_{o,d} \\ &+\sigma_{o,d}\cdot\left(-C_{o,d}\right) + \tau_{o,d} - \varphi_{o,d} = 0 \\ &\forall\, o,d\in \boldsymbol{N} \end{aligned} \tag{45}$$

$$\begin{aligned} &\lambda\left\{-\sum_{o\in N}\sum_{d\in N}\left(C_{o,d}\cdot q_{o,d} - A_{o,d}\cdot q_{o,d}^{sq.}\right) + Fix + Var\left(q_{o,d}\middle|o,d\in \boldsymbol{N}\right)\right\} = 0 \\ &\lambda \le 0 \\ &-\sum_{o\in N}\sum_{d\in N}\left(C_{o,d}\cdot q_{o,d} - A_{o,d}\cdot q_{o,d}^{sq.}\right) + Fix + Var\left(q_{o,d}\middle|o,d\in \boldsymbol{N}\right) \le 0 \end{aligned} \tag{47}$$

$$\begin{aligned} &\xi_{o,d}\cdot\left(\left(q_{o,d}\right)^2 - q_{o,d}^{sq.}\right) = 0 \\ &\xi_{o,d} \le 0 \\ &\left(q_{o,d}\right)^2 - q_{o,d}^{sq.} \le 0 \\ &\forall\, o,d\in \boldsymbol{N} \end{aligned} \tag{48}$$

$$\begin{aligned} &\sigma_{o,d}\cdot\left(-C_{o,d}\cdot q_{o,d} + A_{o,d}\cdot q_{o,d}^{sq.}\right) = 0 \\ &\sigma_{o,d} \le 0 \\ &-C_{o,d}\cdot q_{o,d} + A_{o,d}\cdot q_{o,d}^{sq.} \le 0 \\ &\forall\, o,d\in \boldsymbol{N} \end{aligned} \tag{49}$$

$$\begin{aligned} &\tau_{o,d}\cdot\left(q_{o,d} - Q_{o,d}\right) = 0 \\ &\tau_{o,d} \le 0 \\ &q_{o,d} - Q_{o,d} \le 0 \\ &\forall\, o,d\in \boldsymbol{N} \end{aligned} \tag{50}$$

$$\begin{aligned} &\xi_{o,d}\cdot\left(-q_{o,d} + Q_{o,d}^{limit}\right) = 0 \\ &\varphi_{o,d} \le 0 \\ &-q_{o,d} + Q_{o,d}^{limit} \le 0 \\ &\forall\, o,d\in \boldsymbol{N} \end{aligned} \tag{51}$$

(3) 4種類の価格設定

導出された 4 種類の解析解（OD 別一般化支払額の価格設定）について概説する．価格設定Aは限界費用価格形成原理に基づく限界費用価格である．一般に資源効率の観点で最善とされる価格設定だが，限界費用部分のみを対象とした収支均衡が前提であり，固定費用部分が賄われない点に限界がある．価格設定Bはラムゼイルールに基づくラムゼイ価格である．なお，k はラムゼイ数と呼ばれる0以上1以下の値をとる内生変数であり，式(52)で定義される．ラムゼイルールは，固定費用部分も含めて収支均衡を考えた次善の価格設定である．価格設定Cは支払上限制約に基づく支払上限価格である．価格設定Dは一般化支払い額がゼロの場合を示している．

$$k = \frac{-\lambda}{1-\lambda} \tag{52}$$

5. シビルミニマム担保が NW に与える影響

3 章で定式化したシビルミニマム担保制約付き社会的総余剰最大化モデルについて計算を行った．そして，その結果を以下の 3 つの図で示すとともに，シビルミニマム水準（支払上限額の大きさ）が最適 NW 構成や最適な費用分担に与える影響を考察する．

図-2 は，駅発着 OD の最大需要規模，およびシビルミニマム水準（支払上限額の大きさ）に応じた最適 NW 構成を示している．図-2 のバス型モードのリンクは内生的に設定された路線系統の経路を示している．一方で個別型モードの経路はＯＤごとに図-1 で示した道路リンク上を最短経路で結ぶことがあらかじめ外生的に定められている．そのため，図-2 中の個別型モードのリンクは，表示の都合上ＯＤ間を直接結ぶように描かれているが，実際には隣接ノードを結ぶリンクを伝って走行している．なお，需要規模・シビルミニマム水準の設定によっては実行可能解が存在しないケースがあり，その場合は NW が成立しないと判断し，図-2，および以降の図-3，図-4 中では空白とした．

図-3 は，OD ごとに一般化支払額と，5 章で解析的に導出した 4 種類の価格設定（表-4）を比較し，各 OD 別一般化支払額がどのような基準に基づいて設定されたものであるかを示したものである．なお，表-4 の価格設定 D のように一般化支払額がゼロとなる OD は存在しなかった．

図-4 は，各 OD の一般化支払額のうち限界費用を超える負担額を示したものである．一般化支払い額$c_{o,d}$から限界費用を差し引いて算出しており，一般化支払額のほうが小さい場合は負の値を採る．なお，第 5 章にも記載したが，本稿での限界費用とは，NW 構成・モード選択・経路選択を変更しない範囲での限界費用であることに注意されたい．

(1) シビルミニマム水準に応じた最適 NW 構成

図-2 より，支払上限額が十分に大きく需要規模が大きい場合はバス型モードと個別型モードの双方を設定することが最適となる一方で，支払上限額が小さい場合や需要規模が小さい場合は個別型モードのみの設定が最適となる．支払上限価格を小さくすると，需要が少ない場合を中心に個別型モードの設定が増える．しかし支払上限価格が個別型利用時の限界費用価格を下回れば（シビルミニマム水準 100[%]未満の場合），個別型モードのみで構成される NW は成立しない．一方で一定の需要規模が見込まれるのであれば，バス型モードを中心とした NW を構成することで，より小さな支払上限価格でも NW を維持することができる．すなわち，より厳しいシビルミニマム水準を担保できる．以下では，シビルミニマム水準に応じた最適費用分担について考察を進める．

(2) OD 別一般化支払額の価格設定

第 5 章及び図-3 を参考に，各 OD の一般化支払額がどのような基準で設定されているのかを示す．個別型モードのみ設定されている場合は固定費用部分が存在しないため，限界費用価格形成原理に基づき全 OD に限界費用価格が設定される．なお支払上限価格は個別型利用時の限界費用に係数を掛けて設定しているため，係数が 1 を下回ると，限界費用価格は支払上限制約に抵触する．ただし，そのとき個別型モードのみの設定では収支均衡を満たせないため，NW 自体が成立しない．

一方でバス型モードが存在する場合は最低運行頻度分の運営費用が路線延長に応じた固定費用として発生する．本モデルでは固定費用部分についても利用者が負担する状況を考えているため，原則としてすべての OD にラムゼイ価格が課される．ただしラムゼイ価格が支払上限制約に抵触する場合はこの限りではない．ラムゼイ価格が支払上限価格より大きければ，その OD の支払額には支払上限価格が適用される．

(3) 支払上限価格が設定される条件

(2)より，支払上限価格が設定される可能性があるのはバス型モードが存在する場合のみであり，着目すべきはラムゼイ価格が支払上限制約に抵触するか否かであることが判明した．(3)では具体的にどのような場合に支払上限価格が適用されやすいか考察する．

ラムゼイ価格は表-4 に示す式で表されるが，式(53)のように変形できる．つまりラムゼイ価格とは，限界費用価格に限界費用価格と最大支払意思額の差額の何割かを上乗せしたものであり，ラムゼイ数kが大きいほど上乗せの割合は大きくなる．上乗せ分の総和によって地域全体の固定費用を賄っていることから，固定費用が大きい場合や需要規模が小さい場合にラムゼイ数が大きく設定され，ラムゼイ価格もまた大きくなる．すると，支払上限額制約に抵触しやすくなり，より多くの OD に上限支払価格が適用される（図-3）．なお当然ながら支払上限価格が小さく設定されている場合も，支払上限制約に抵触しやすいため，より多くの OD に上限支払価格が適用される（図-3）．

$$c_{o,d} = V_{o,d} + \frac{k}{1+k}\left(C_{o,d} - V_{o,d}\right) \quad \forall\, o,d \in \boldsymbol{N} \tag{53}$$

では，地域の OD のち，ラムゼイ価格が支払上限制約に抵触しやすいのはどのような OD だろうか．支払上限

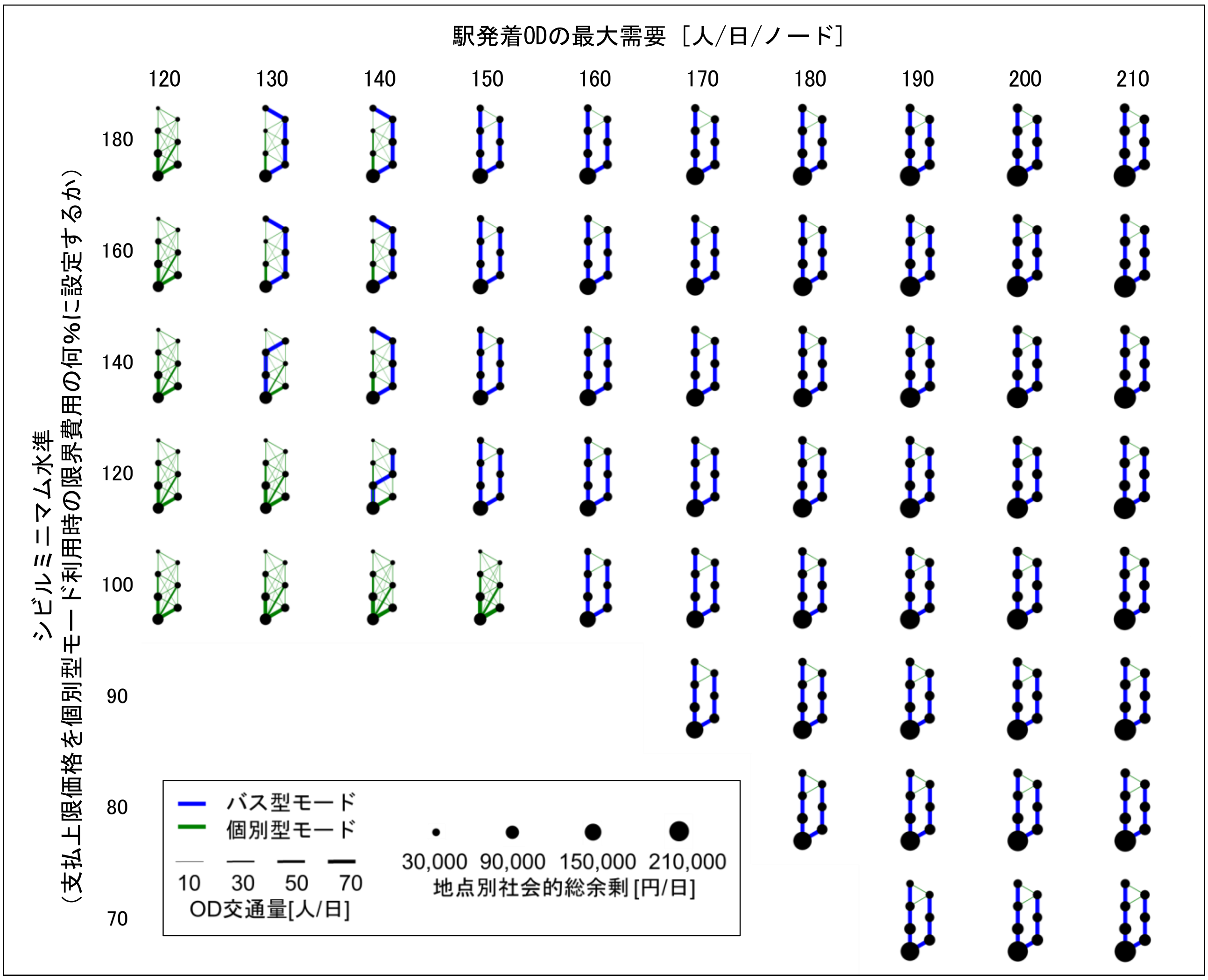

図-2 シビルミニマム水準と需要規模に応じた最適 NW 構成

価格に対してラムゼイ価格が相対的に大きくなりやすい状況について考える．

限界費用価格が小さいほど限界費用価格と最大支払意思額の差が大きくなることに注意すると，式(53)より，同じラムゼイ数であっても限界費用価格が小さいほど限界費用価格への上乗せ額が大きいことがわかる．すなわち，限界費用価格が経路長に比例して大きくなるように設定されるのに対し，ラムゼイ価格は（経路長に比例はするものの）経路長に依らない均一的な価格設定に近づくのである．一方で支払上限制約は OD 間を最短ルートで結んだ場合の経路長（以下，単に最短経路長と呼ぶ）に比例した支払上限額を設定している．そのため，上乗せ額の大きな OD，すなわち経路長の短い OD ほど，支払上限制約に抵触しやすいといえる．

また，利用モードによっても支払上限制約への抵触のしやすさは異なる．個別型モード利用時の限界費用には個別型モード 1 台分の運行費用と所要時間の時間価値が含まれる．一方で本研究の計算範囲では，バス型モードは常に最低運行頻度での運行であり定員に余裕がある状態である．そのためバス型モード利用時の限界費用は所要時間に対する時間価値のみであり，個別型利用時と比べてはるかに小さい．支払上限価格は個別型利用時の限界費用を基準としていることを踏まえると，バス型利用の OD に比べ，個別型 利用の OD は支払上限制約に抵触しやすい．なお仮にバス型モードが最低運行頻度を超えて運行される場合であっても，バス型と個別型では 1 台の定員が異なり，やはりバス型のほうが限界費用は小さくなるため上記の性質は変わらないはずである．

他方，限界費用価格が実際の経路長に基づいて決定されるのに対し，支払上限価格が最短経路長に基づいて決定されることにも留意する必要がある．例えばバス型モードを利用する場合に遠回りな経路が採られる場合があるが，実際の経路長が最短経路長に比して顕著に大きくなることで限界費用価格が支払上限制約に抵触しやすくなる．

まとめると，個別型を利用する OD，最短経路長に比べて遠回りな経路を採る OD，経路長が短い OD が支払上限制約に抵触しやすいといえる．

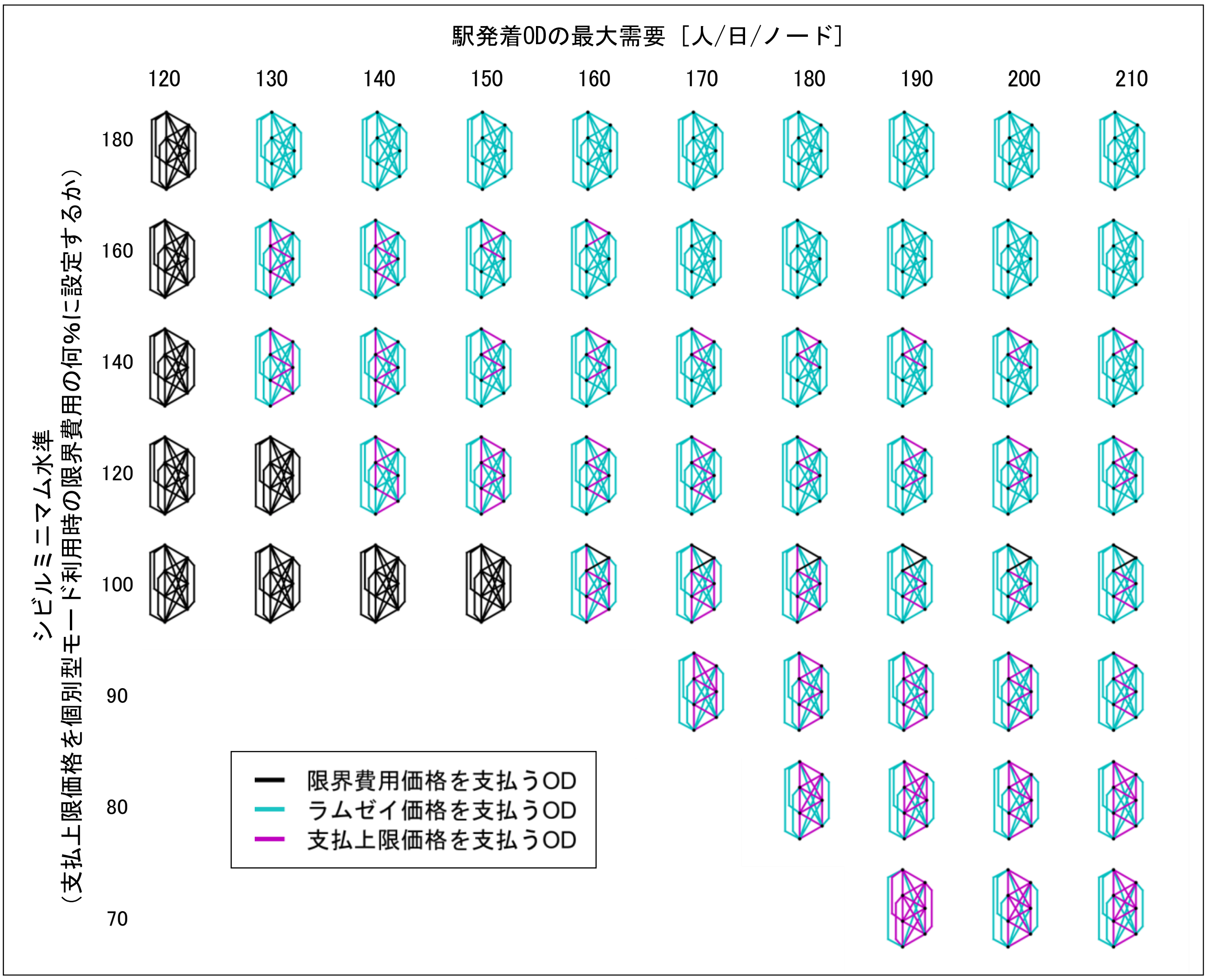

図-3　ODごとの価格設定

(4) 価格設定が費用負担に与える影響

これまでの考察と図-4 を参考に，それぞれの価格設定が費用分担に与える影響を改めて整理する．個別型モードのみ設定される場合，一般化支払額は限界費用価格であり，それぞれ自らの移動に必要な費用のみを負担している．一方でバス型モードが設定される場合は，固定費用が存在するため，どの OD にどれだけ負担させるべきかが問題となる．

固定費用が大きい場合や需要規模が小さい場合はラムゼイ数が大きくなり，ラムゼイ価格は経路長に依らない均一的な価格設定に近づく．一方で限界費用は経路長に基づいて定まることから，経路長が短い OD ほどラムゼイ価格と限界費用価格の乖離が大きい．それゆえ，ラムゼイ価格が設定される場合，経路長の短い OD ほど大きな費用を負担する．また需要規模が小さい場合や固定費用が大きい NW を構成している場合はその傾向が強まる．

他方，支払上限価格は最短経路長に基づいて設定されることから，経路長が短い OD ほど支払上限価格と限界費用価格の乖離は小さい．それゆえ支払上限価格が設定される場合，経路長と最短経路長の差によって状況は異なるものの，おおむね最短経路長が短いほど負担額は小さくなる．また支払上限価格が小さいほどその傾向は強まる．なお支払上限価格が設定されやすい OD は，個別型を利用する OD，最短経路長に比べて遠回りな経路を採る OD，経路長が短い OD であり，支払上限価格が小さく設定されている場合や需要規模が小さい場合，固定費用が大きい NW を構成している場合はより多くの OD に支払上限価格が適用される．

(5) シビルミニマム水準に応じた最適な費用分担

(4)までの考察を踏まえ，シビルミニマム水準担保が費用分担に与える影響を整理する．支払上限価格が大きい場合（例えばシビルミニマム水準 140 [%]以上の場合），支払上限価格が適用されても負担額が小さくなりにくいこと，またそもそもほとんどの OD でラムゼイ価格が適用されることから，経路長・最短経路長が共に短いバス型利用の OD が最も大きな費用を負担する．一方

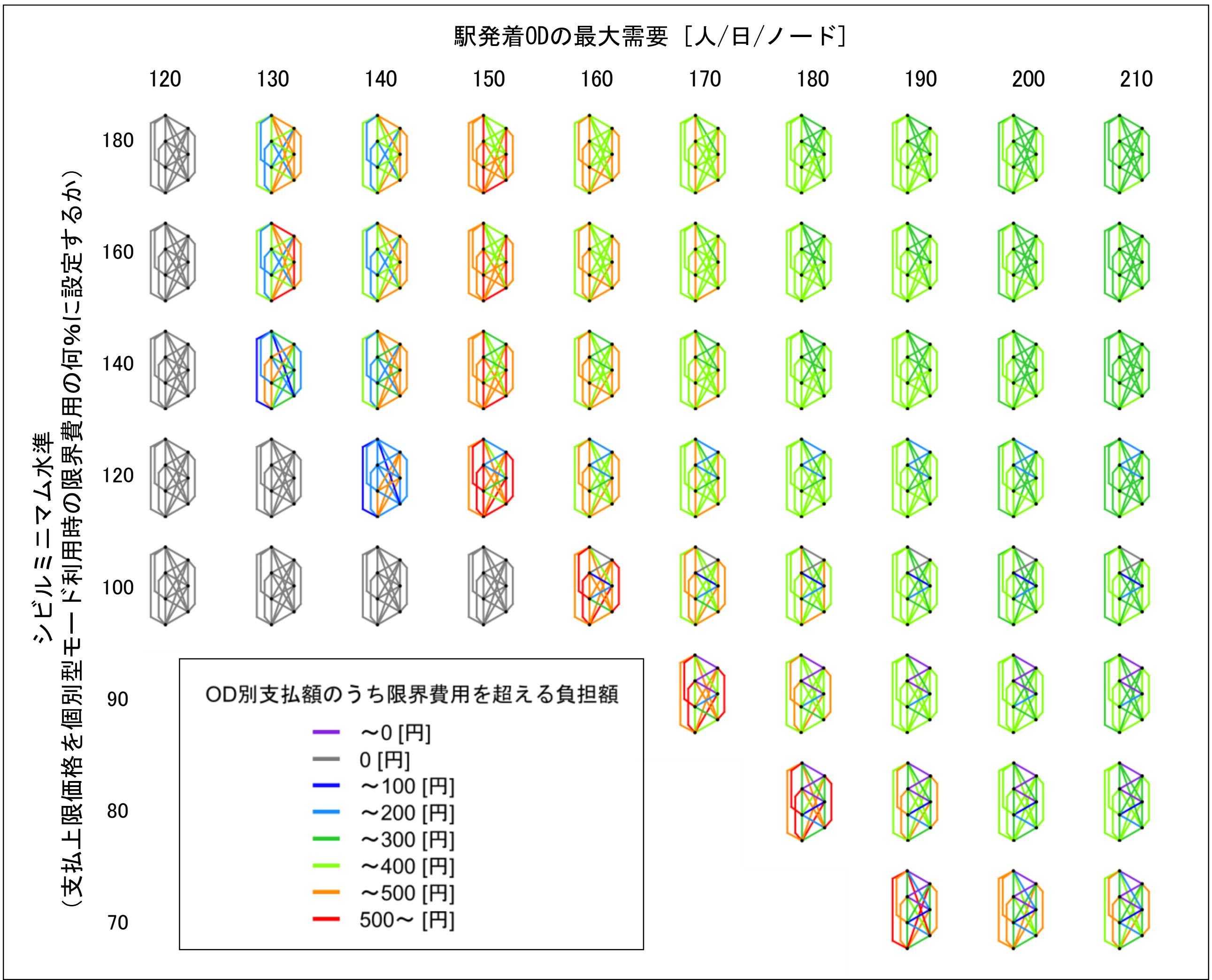

図-4　OD別支払額のうち限界費用を超える負担額の大きさ

で，個別型利用の OD や経路長の長い OD の負担は小さい．ただし固定費用はすべてバス型モードの運行費用であることから，負担額は小さいものの，個別型利用者がバス型利用者を内部補助していると言える．

一方で支払上限価格が小さい場合（例えばシビルミニマム水準 90 [%]以下の場合），支払上限価格の適用により負担できる額が小さくなること，経路長が短い OD ほど支払上限制約に抵触しやすいことから，より経路長の長い OD が費用を大きく負担するようになる．またバス型利用 OD のうち一部の遠回り経路 OD については，支払上限価格が限界費用価格を下回るにも関わらず交通が成立する場合がある．このとき，他のバス型利用者は遠回り経路の利用者を内部補助しているといえる．バス型モードの限界費用とは時間費用そのものであるから，利用者は移動に際して金銭を支払うのではなく，むしろ受け取っていることになる．これは，大きく迂回することで時間費用が大幅に増加することに対する補償と捉えることができる．仮に遠回り経路 OD に対して個別型交通を設定した場合は時間費用を小さくできるはずだが，補償を行ってでもバス型モードを利用してもらうことでバス型モードの乗合効果を発揮させ，地域全体としての交通サービスの運営費用圧縮を図っているのである．ただし，過度な遠回りになる場合には補償額が膨大になるためその限りではなく，個別型モードが設定される．

6.　まとめ

モビリティは一般的にシビルミニマムの一つと見なされその維持が重要視されている．一方で，人口減少やオンライン化，新しい生活様式の普及等による移動需要の減少が，モビリティ維持への強い逆風となっている．たとえ需要の大きな大都市圏であっても，特に郊外部においてはいかにモビリティを維持するかが課題となりつつある．その際，どこにどのような交通モードを設定し，どの利用者からいくら徴収するべきかを計画することが重要である．

そこで本研究では，NW 構成や費用分担を操作変数とする下で社会的総余剰を最大化するモデルに，シビルミニマムを担保する制約を導入し，大都市圏郊外部を模し

た仮想地域に適用して計算を行った．そして，シビルミニマム水準が最適 NW や最適費用負担に与える影響について分析を行い，以下の特徴を明らかにした．

- シビルミニマム水準が低い時には，個別型モード利用者がバス型モード利用者を内部補助することが最適となる．一方でシビルミニマム水準が著しく高い時には，バス型モード利用者が個別型モード利用者を内部補助することが最適となる．
- シビルミニマム水準が低い時には，バス型利用者のうち短距離を移動する者ほど多く費用を負担する．一方でシビルミニマム水準が高い時には，バス型モード利用者のうち中程度の距離を移動する者が費用を多く負担する．
- シビルミニマム水準が高く，需要規模が小さい場合には，個別型モードのみの NW が最適となる．ただしシビルミニマム水準が著しく高くなると（支払上限額が個別型利用時の限界費用を下回ると）NW が成立しない．一方で，シビルミニマム水準が高く，需要規模が大きい場合には，バス型モードと個別型モードの混合 NW が最適となる．シビルミニマム水準が著しく高くなっても費用分担を変更し，内部補助も駆使することで NW が維持されやすい．

一方で，本研究ではシビルミニマム水準の指標として支払上限額を，その設定基準として個別型モード利用時の限界費用を用いたが，これは一つの設定例にすぎない．他の指標・ほかの設定基準を用いた場合に最適NW構成や最適費用分担にどのような影響を与えるのかは別途分析する必要があるだろう．また本研究の成果と比較することで，シビルミニマム水準設定のあり方についての知見が得られる可能性もある．これらは今後の課題としたい．

付録

第 5 章では「式(42)を目的関数に，式(29),(37)-(39),(41),(42)を制約条件とする二次錐計画問題」が OD 別一般化支払額$c_{o,d}$について 4 種類の解析解を持つことを示したが，本付録ではその導出方法を示す．以下，KKT 条件の等号成立・不成立に基づいて 5 つに場合分けし，存在しうる解を列挙していくことで，解析解が 4 種類のみ存在することを示す．なお一般に KKT 条件は，第 3 式が等号成立しない場合は第 2 式の等号が，第 2 式が等号成立しない場合は第 3 式の等号が成立することに注意する．

(1) 式(48)第 2 式が等号成立の場合

1 階条件式(46)より$\sigma_{o,d} = 1/2 - \lambda$である．このとき式(47)の第 2 式より$\lambda \leq 0$のため，常に$\sigma_{o,d} \geq 1/2$となるが，式(49)の第 2 式を満たしておらず不適である．よって式(48)の第 3 式は常に等号が成立する．なおこのことは，第 4 章の二次錐計画問題への変形が，計算結果に何ら影響を及ぼさないことを意味している．以降は式(48)の第 3 式が等号成立している場合について検討を続ける．

(2) 式(48)(49)第 3 式が等号成立の場合

式(49)第 3 式が等号成立する場合，式(49)の第 3 式は式(付 1)のように変形できる． $C_{o,d}/Q_{o,d} = A_{o,d}$であること，また$q_{o,d} = 0$は式(51)の第 3 式に抵触していることに注意すると，式(付 1)より$q_{o,d} = Q_{o,d}$であり，すなわち解析解は式(1)より$c_{o,d} = 0$である（表-4 パターン D）． なおこのとき式(50)第 3 式も等号が成立していることに注意する．以降は式(49)(50)第 2 式と式(48)第 3 式が等号成立している場合について検討を続ける．

$$q_{o,d} \cdot \left(-C_{o,d} + A_{o,d} \cdot q_{o,d}\right) = 0 \quad \forall\, o,d \in \boldsymbol{N} \qquad (付1)$$

(3) 式(49)(50)第 2 式と式(48)(51)第 3 式が等号成立の場合

式(51)第 3 式が等号成立する場合$q_{o,d} = Q_{o,d}^{limit}$であり，このとき式(1)(40)より解析解は$c_{o,d} = C_{o,d}^{limit}$，つまり支払上限価格となる（表-4 パターン C）．以降は式(49)-(51)第 2 式と式(48)第 3 式が等号成立している場合について検討を続ける．

(4) 式(49)-(51)第 2 式と式(47)(48)第 3 式が等号成立の場合

式(49)-(51)第 2 式の等号が成立していること，$C_{o,d}/Q_{o,d} = A_{o,d}$であること，式(1)，1 階条件式(46)に注意して 1 階条件式(45)を整理すると，式(付 2)が得られる．ラムゼイ数kと価格弾力性$e_{o,d}$を定義し（式(付 3)(付 4)），式(付 2)に代入すると，式(付 3)が得られる．これは標準的なラムゼイルールの式である． (付 5)を$c_{o,d}$について整理するとラムゼイ価格（式(6)）が現れる（表-4 パターン B）．以降は式(47)(49)-(51)第 2 式と式(48)第 3 式が等号成立している場合について検討を続ける．

$$\frac{c_{o,d} - MV_{o,d}}{c_{o,d}} = \frac{-\lambda}{1-\lambda} \cdot A_{o,d} \cdot \frac{q_{o,d}}{c_{o,d}} \quad \forall\, o,d \in \boldsymbol{N} \qquad (付2)$$

$$k = \frac{-\lambda}{1-\lambda} \qquad (付3)$$

$$e_{o,d} = -\frac{\partial q_{o,d}}{\partial c_{o,d}} \cdot \frac{c_{o,d}}{q_{o,d}} = \frac{1}{A_{o,d}} \cdot \frac{c_{o,d}}{q_{o,d}} \quad \forall\, o,d \in \boldsymbol{N} \qquad (付4)$$

$$\frac{c_{o,d} - MV_{o,d}}{c_{o,d}} = \frac{k}{e} \quad \forall\, o,d \in \boldsymbol{N} \qquad (付5)$$

$$c_{o,d} = \frac{1}{1+k} V_{o,d} + \frac{k}{1+k} C_{o,d} \quad \forall\, o,d \in \boldsymbol{N} \qquad (付6)$$

(5) 式(47)(49)-(51)第 2 式と式(48)第 3 式が等号成立の場合

式(47)(49)-(51)第 2 式の等号が成立していること，$C_{o,d}/Q_{o,d} = A_{o,d}$ であること，式(1)，1 階条件式(46)に注意して 1 階条件式(45)を整理すると $c_{o,d} = MC_{o,d}$，つまり限界費用価格が現れる（表-4 パターン A）．

参考文献

1) 東京都市圏交通計画協議会：第 6 回東京都市圏パーソントリップ調査 - 新たなライフスタイルを実現する人中心のモビリティネットワーと生活圏 - 転換点を迎えた東京都市圏の都市交通戦略, 2021.
2) 中京都市圏総合都市交通計画協議会：第 5 回中京都市圏パーソントリップ調査結果の概要, 2014.
3) 京阪神都市圏交通計画協議会：平成 22 年の京阪神都市圏における人の動き – 第 5 回近畿圏パーソントリップ調査結果から, 2012.
4) 神田佑亮：コロナ禍と公共交通 - 公共交通への影響と復活の方向性, 国際交通安全学会誌, 46 巻, 1 号, pp.40-48, 2021.
5) 谷本 圭志, 森山 昌幸：公共交通サービスのミニマム水準の検討のための一考察 - 生活環境への認知的な適応に着目した導出手法, 運輸政策研究 Vol.12, No.1, pp.2-10, 2009.
6) 田邉勝巳：地域交通におけるミニマム基準の考え方 - 選択型コンジョイント分析によるアプローチ, 運輸政策研究 Vol.7, No.4, pp.27-35, 2005.
7) 下村仁士：ユニバーサルサービス概念からの交通権思想へのアプローチ, 交通権, 2016 巻, 32 号, pp. 55-68, 2016.
8) 下村仁士：ユニバーサルサービスにかんする制度設計が交通権を侵害する可能性, 交通権, 2019 巻, 35 号, pp. 56-69, 2019.
9) 喜多秀行：社会的共通資本としての地域公共交通サービスの計画方法論, 第 65 回土木計画学研究発表会・講演集, CD-ROM, 2022.
10) (財)国際交通安全学会：地域でつくる公共交通計画日本版 LTP のすすめ，(財)国際交通安全学会, 2010.
11) 須ヶ間淳，奥村誠：個別型交通の包含が地域公共交通システムに与える影響, 第 64 回土木計画学研究発表会・講演集, CD-ROM, 2021.

(2022. 9. 30 受付)

THE IMPACT OF MAINTAINING CIVIL MINIMUMS ON OPTIMAL PUBLIC TRANSPORTATION SYSTEMS IN A SUBURBAN STATION AREA

Atsushi SUGAMA and Makoto OKUMURA

Mobility is generally regarded as one of the civil minimums, and its maintenance is considered important. In Japan, however, public transportation is basically operated as a for-profit business, and the declining demand for mobility due to population decline, the shift to online society, and the spread of new lifestyles are strong headwinds for maintaining mobility. Even in large metropolitan areas with high demand, how to maintain mobility in suburban areas is the challenge. It is important to plan where and what kind of transportation modes should be set up and how much should be collected from which users. In this study, a model for calculating the above is formulated as a mixed integer quadratic cone programming problem. Existing studies have focused on the total efficiency of society as a whole, but in such cases, there is a possibility that the burden will be concentrated on certain individuals. Therefore, this study expresses policies that guarantee minimum mobility as constraint formulas and analyzes the impact of each constraint on the composition of the transportation network and the setting of payment amounts.