

需要拡大期の都市間旅客交通 ネットワーク計画のための最適化モデル

細 正隆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:hosomasataka@gmail.com

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:makoto.okumura.b6@tohoku.ac.jp

アジアやアフリカを始めとした発展途上国では人口が急増しており、都市間交通ネットワークも発展段階にある。このような国々では将来的には需要の拡大が見込まれるものの、政府に十分な財政力が無いためPFI方式によりネットワークを構築することになる。本研究では、このような需要拡大期のネットワーク計画を想定した最適化モデルを提案する。類似の研究ではOD需要や運賃を固定的に与えたものが多いが、提案モデルでは先行研究をベースとして、これらを内生的に導出できるようにする。本モデルは0-1変数を含む二次錐計画問題として定式化されるため、比較的容易に求解出来るという長所もある。続いて、本モデルの性質を確認するため、仮想ネットワークに対して本モデルを適用し、得られる最適ネットワーク形状について分析を行った。

Key Words : *intercity transportation, PFI, multi-modal, network planning, optimization model*

1. はじめに

日本では都市間交通需要の縮小期に突入しているが、世界全体を見れば都市間交通需要は拡大期にある。特に、アジアやアフリカを始めとした発展途上国では人口が急増しており、都市間交通ネットワークも発展段階にある。都市間交通の整備は国の発展に直結するため、このような国々では、今後どのようにしてネットワークを構築していくのが問題となる。

都市間交通には、都市内交通と比べてサービスを整備・維持していくための固定的な費用が大きいという特徴がある。特に鉄道サービスではこれが顕著であり、長期的に需要の見込める部分にしかサービスを整備することが出来ず、後追いの整備になりやすい。また、サービスの整備後にもなるべくたくさんのODペアに利用してもらうように旅客を誘導する必要がある。このとき、高速バスをフィーダーとして用いること、あるいは高速鉄道を空港と直結することによって、鉄道に旅客を誘導することが考えられる。

固定費用が大きいという特徴から、規模の経済性も顕著となる。すなわち、人口増加による需要規模の拡大により利用者数が増加することで、平均費用(運賃)の低下、あるいは新規サービス設定などのサービスレベルの

向上が可能となり、さらにサービス利用者数の増加をもたらす。政府などのネットワーク計画者は、需要規模の拡大により平均費用が低下するという「量的な効果」と、新規サービスの設定という「質的な効果」の両方を考慮した上でネットワーク計画を立てる必要がある。

ネットワーク計画は長期的な政策となるため、社会情勢の変化により、途中で政策の変更を迫られる可能性がある。このとき、どの程度の変化なら現在の計画が有効なのか、あるいは計画を見直す必要が有るのかを把握するため、感度分析が重要となる。この感度分析を行うためのツールとして、最適化モデルが有用である。

本研究では、需要拡大期のネットワーク計画を想定したネットワーク最適化モデルを提案する。このような最適化モデルはこれまでも数多く提案されてきたが、OD需要や運賃を固定的に与えたものが多い。本研究で提案する最適化モデルは、先述した「量的な効果」と「質的な効果」の両方を明示的に考慮するため、OD需要を内生化し、さらにリンクの運賃も平均費用として内生的に求められるようにする。また、本モデルは0-1変数を含む二次錐計画問題となっているため、比較的容易に解くことが出来るという長所もある。

本論文は以下のように構成される。第2章では、都市間交通ネットワークの評価・最適化に関する既往研究と、

本モデルの適用場面について述べる。第3章はモデルの定式化を行い、0-1変数を含む二次錐計画問題として定式化出来ることを示す。第4章では、仮想ネットワークに対して本モデルを適用し、最適ネットワーク形状に関して考察を行う。第5章は結論である。

2. 既往研究と本モデルの適用場面

(1) 既往研究

一般的には競合関係にあるとされる航空と鉄道について、それぞれの立場から連携に関する研究が進んでいる。航空側からの研究としてJiang and Zhang¹⁾やTakebayashi^{2,3)}があり、鉄道との連携により一部の空港への需要の集中を軽減し、混雑の解消により社会厚生の上昇につながることを示している。一方、鉄道側からの研究として村上ら⁴⁾、渡邊ら⁵⁾があり、空港までのアクセスなど近中距離帯のサービスを充実させることで鉄道利用者数の増加につながる可能性を示している。実際に、ヨーロッパでは短距離の航空フィーダー路線を高速鉄道で代替している例があり、Adler et al.⁶⁾などでその有効性が示されている。また、鉄道が利用できない都市間の移動では、高速バスが主要なサービスになると考えられる⁷⁾。

ネットワーク最適化に関する研究も数多くなされており、例えば、波床・中川^{8,9)}やOkumura et al.¹⁰⁾などがある。波床・中川では、期待一般化費用(EVGC)、あるいは期待所要時間(EVTT)を評価指標として、遺伝的アルゴリズム(GA)を用いた分析がなされている。GAにより得られる解には大域的最適解となる保証がないものの、日本全国を対象とするような大規模ネットワークでの計算が可能となるため、波床・中川^{8,9)}だけでなく、村上ら⁴⁾、渡邊ら⁵⁾でも利用されている。一方、Okumura et al.¹⁰⁾は複数モード間の乗継交通を考慮したMulti-modal Network Planning (MNP) モデルを提案している。MNPモデルは混合整数計画問題として定式化されるため、既存のパッケージを用いて容易に分析が可能であるという長所を持つ。また、紀伊ら¹¹⁾はシミュレーションではあるが、利用者コストの観点に基づいたネットワーク再編の方法を示し、アフリカの航空ネットワークを対象に効率改善可能性を分析している。なお、これらのネットワーク最適化・シミュレーションに関する研究ではOD需要を固定的に与えている。実際には、サービスレベルの変化によりOD需要が変動する可能性があるが、これに対しては別途でサービスレベル変化後のOD需要を推計し、これを与件として計算を行う必要がある。

ネットワーク評価・最適化に関する研究では、サービスレベルの変化に伴う旅客の経路の変化をどのように考慮するかという問題が共通して存在する。サービスが縮

小される状況では、第K経路探索による事前列挙法が有効であり、村上ら⁴⁾、渡邊ら⁵⁾で利用されている。ただし、複数モード間の乗り継ぎを認める場合、事前列挙された数多くの経路の中から少数の経路だけが利用されることになり、計算上の無駄が大きくなってしまう可能性がある。村上ら⁴⁾、渡邊ら⁵⁾では、複数経路の重複率などを計算して経路を少数に絞る工夫を行っている。一方、Okumura et al.¹¹⁾で提案されたMNPモデルは経路の列挙を内生化し、最適ネットワーク上で最も一般化費用が小さくなる経路にOD交通量を割り当てるため、このような問題を回避することができる。この考え方は、将来的にサービスが整備され、OD間で候補となる経路が増加する需要拡大期のネットワーク計画で特に有用である。本研究でも、このMNPモデルの考え方を応用する。

Okumura et al.でMNPモデルが提案されて以来、複数の拡張モデルが考案され^{12,13)}、需要変動を扱ったものとして先行研究の細・奥村¹⁴⁾がある。本研究も細・奥村¹⁴⁾をベースとして最適化モデルを構築する。ただし、先行研究では政府が固定費用を負担すると考えたが、本研究で対象とする発展途上国では政府に十分な財政力が無いと考えられるため、この仮定を適用しづらい。そのため本研究では、サービスの利用者が固定費用を負担すると考える最適化モデルを構築する。

(2) 本モデルの適用場面

先述したように、本モデルの活用場面として発展途上国を始めとした需要拡大期のネットワーク計画が挙げられる。これらの国々では、将来的には高速鉄道ネットワークの導入が考えられるが、空港を整備すれば比較的容易に運航できる航空と比べ、鉄道は整備に莫大な費用と時間を要するため、どこから建設するべきかを慎重に考える必要がある。さらに、サービス提供後にもなるべくたくさんのODペアに利用してもらうような誘導策が必要となる。このとき、高速鉄道の空港との直結、あるいは高速バスをフィーダーとして用いることで、鉄道に旅客を誘導するなどの方法が考えられる。

ただし、これらの国々では将来的には需要の拡大が見込まれるものの、政府には安価にサービスを提供できるほどの財政力は無い。そのためPFI (Private Finance Initiative) 手法、特に民間事業者がサービスを整備(Build)、管理(Operate)し、将来的にそのサービスの所有権を政府に移管(Transfer)するBOT方式によりネットワークを構築することになる。このとき、政府はサービスの運営に要する費用と、ネットワーク構築のための資金をサービス利用者から運賃として得ることが必要となる。本モデルは、このような計画の検討に有用であると考えられる。

表-1 操作変数, パラメータとその意味

変数	意味
N	ノードの集合
K	起点ノードの集合, $K \subset N$
M	モードの集合
Z_{ij}^m	リンク ij でのモード m の有無を示す $\{0,1\}$ 変数
X_{ij}^{km}	リンク ij でモード m を利用する起点ノード k 別のリンク交通量
$Y_n^{kmm'}$	ノード n でモード m からモード m' に乗り継ぐ起点ノード k 別の乗継交通量
A_l^{km}	終点ノード l にモード m で到着する起点ノード k 別の集中交通量
B_k^m	起点ノード k , モード m 別の発生交通量
P_{ij}^m	リンク ij でモード m を利用するための運賃
Q_{kl}	OD(k, l) の交通量
C_{kl}	OD(k, l) での一般化費用の平均値
CS_{kl}	OD(k, l) での消費者余剰
d_{ij}^m	リンク ij でモード m を運営するための固定費用
e_{ij}^m	リンク ij でモード m を運営するためのリンクの利用者数に比例する可変費用
g_{ij}^m	リンク ij でのモード m の輸送容量
t_{ij}^m	リンク ij でのモード m の所要時間
$\tau_n^{mm'}$	ノード n でのモード m からモード m' への乗継時間
q_{kl}^{\max}	OD(k, l) での上限交通量
c_{kl}^{\max}	OD(k, l) の旅客の支払意思額の最大値
β_{kl}	OD(k, l) での逆需要関数の傾き
v	時間価値
γ	十分に大きな正の定数

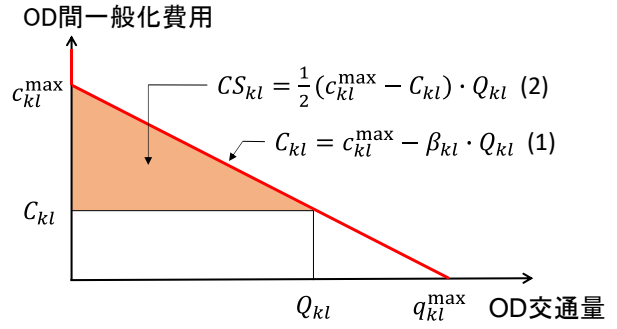
3. モデルの定式化

(1) モデルの基本構成

本研究ではOD間の需要が弾力的であると仮定する。移動利便性の指標として消費者余剰を取り上げ、それを最大とするようなネットワーク形状を導出する。

本モデルは先行研究¹⁴⁾で提案した需要内生型のMNPモデルを基本としている。モード間の乗り継ぎを明示的に考慮するため、各都市ノードをモード別の着ノードと発ノードに区分し、その間に乗継リンクを設定する。また、リンク運賃を意味する操作変数を新たに追加する。本モデルは式変形を行うことで0-1変数を含む二次錐計画問題として定式化され、一般的な最適化ソルバーを用いて求解が可能である。本モデルで用いる操作変数、パラメータとそれらの意味については表-1の通りとする。

なお、本研究では最適ネットワーク形状の把握に重点を置くため、個々の利用者の経路選択行動は考慮しないものとする。

図-1 OD(k, l)の逆需要関数

(2) 定式化

a) 逆需要関数

本研究では、図-1で示すようにOD(k, l)に対して線形の逆需要関数を定義する。逆需要関数を式(1)のように線形式として与えることで、移動利便性の指標となる消費者余剰 CS_{kl} を式(2)のように二次式として定式化することが出来る。

$$C_{kl} = c_{kl}^{\max} - \beta_{kl} \cdot Q_{kl} \quad \forall k \in K, l \in N \quad (1)$$

$$CS_{kl} = \frac{1}{2} (c_{kl}^{\max} - C_{kl}) \cdot Q_{kl} \quad \forall k \in K, l \in N \quad (2)$$

本研究では式(3)のように、式(2)の消費者余剰 CS_{kl} を全てのODペアについて足し合わせた総消費者余剰を目的関数として、最大化する。

$$\max_{X, Y, A, B, P, Q, C, CS} \sum_{k \in K} \sum_{l \in N} CS_{kl} \quad (3)$$

b) 交通量保存則

交通量保存則は、Okumura et al.¹¹⁾や先行研究¹⁴⁾と同様のものとする。式(4)、式(5)が発ノードに関する制約、式(6)、式(7)が着ノードに関する制約である。

$$\sum_{i \in N} X_{in}^{km} = A_n^{km} + \sum_{m' \in M} Y_n^{kmm'} \quad \forall k \in K, n \in N, m \in M \quad (4)$$

$$\sum_{m \in M} A_n^{km} = Q_{kn} \quad \forall k \in K, n \in N \quad (5)$$

$$B_n^m + \sum_{m' \in M} Y_n^{kmm'} = \sum_{j \in N} X_{nj}^{km} \quad \forall k \in K, n \in N, m \in M \quad (6)$$

$$\sum_{l \in N} Q_{nl} = \sum_{m \in M} B_n^m \quad \forall n \in K \quad (7)$$

c) リンクサービス設定のための制約

リンクサービスは双方向同時に運営されると考え、式(8)を設定する。また、リンクの輸送容量に関して、式(9)を設定する。

$$Z_{ij}^m = Z_{ji}^m \quad \forall i \in N, j \in N, m \in M \quad (8)$$

$$\sum_{k \in K} X_{ij}^{km} \leq g_{ij}^m \cdot Z_{ij}^m \quad (9)$$

$$\forall i \in N, j \in N, m \in M$$

運賃に関して、式(10)、式(11)を設定する。式(10)はリンクサービス維持のためには、そのサービスの固定費用と可変費用の和を上回る利用者からの運賃収入が必要であることを示している。式(11)は、リンクサービスが存在する部分でのみ運賃を考えるための制約式であり、 γ は十分に大きな正の定数とする。

$$P_{ij}^m \cdot \sum_{k \in K} X_{ij}^{km} \geq d_{ij}^m \cdot Z_{ij}^m + e_{ij}^m \cdot \sum_{k \in K} X_{ij}^{km} \quad (10)$$

$$P_{ij}^m \leq \gamma \cdot Z_{ij}^m \quad (11)$$

$$\forall i \in N, j \in N, m \in M$$

旅客の経路やOD交通量はOD間の一般化費用で決まる一方、その旅客が支払う運賃や時間費用は経路上のリンクごとに与えられるため、OD間の一般化費用とリンクの一般化費用を関連付ける制約が必要となる。本モデルでは、この関係を式(12)のように定式化する。

$$\begin{aligned} \sum_{l \in N} C_{kl} \cdot Q_{kl} \geq & \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{m \in M} P_{ij}^m \cdot X_{ij}^{km} \\ & + v \cdot \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{m \in M} t_{ij}^m \cdot X_{ij}^{km} \\ & + v \cdot \sum_{n \in N} \sum_{m \in M} \sum_{m' \in M} \tau_n^{mmm'} \cdot Y_n^{kmm'} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\forall k \in K$$

式(12)は左辺がOD間の一般化費用、右辺は順に運賃、所要時間、乗継時間を意味している。なお、時間を金銭換算するため、所要時間と乗継時間に対しては時間価値 v を乗じている。また、本モデルではリンク交通量 X_{ij}^{km} と乗継交通量 $Y_n^{kmm'}$ を起点別に定義しているため、式(12)も起点別の定式化となる。そのため、起点が同じ旅客どうしの負担の調整を認める定式化となっている。

d) 非負制約

各操作変数の定義域を式(13)のように定める。

$$\begin{aligned} Z_{ij}^m & \in \{0,1\}, \\ X_{ij}^{km}, Y_n^{kmm'}, A_i^{km}, B_k^{km}, P_{ij}^m, Q_{kl}, C_{kl}, CS_{kl} & \geq 0 \end{aligned} \quad (13)$$

$$\forall n, i, j, l \in N, k \in K, m, m' \in M$$

(3) 二次錐制約としての定式化

前節での定式化に存在する非線形制約（式(2)、式(10)、式(12)）を二次錐制約として置きなおす。この式変形において、新たに定義する変数を表-2にまとめる。なお、ここでは式変形の方法の違いから、a) 式(2)と式(12)の左辺、b) 式(10)、c) 式(12)の右辺の3種類に分けて述べる。

a) 式(2)と式(12)の左辺： $C_{kl} \cdot Q_{kl}$ の計算

まず、式(2)に逆需要関数である式(1)を代入して、式(14)のように変形する。結果として、消費者余剰はOD交通量の二乗に比例する値となることがわかる。

表-2 新たに定義する変数とその意味

変数	意味
QQ_{kl}	$QQ_{kl} \geq (Q_{kl})^2$ として定義する操作変数
FP_{ij}^m	リンク ij でモード m を利用するための運賃の固定費用分
VP_{ij}^m	リンク ij でモード m を利用するための運賃の可変費用分
R_{ij}^{km}	$R_{ij}^{km} = P_{ij}^m + X_{ij}^{km}$ として定義する操作変数
RR_{ij}^{km}	$RR_{ij}^{km} \geq \frac{1}{2}(R_{ij}^{km})^2$ として定義する操作変数
SS_{ij}^{km}	$SS_{ij}^{km} \geq \frac{1}{2}\{(P_{ij}^m)^2 + (X_{ij}^{km})^2\}$ として定義する操作変数
ε	十分に小さな正の定数

$$CS_{kl} = \frac{1}{2}(c_{kl}^{\max} - c_{kl}) \cdot Q_{kl} = \frac{1}{2}\beta_{kl} \cdot (Q_{kl})^2 \quad (14)$$

$$\forall k \in K, l \in N$$

同様に、式(1)を式(12)の左辺にも代入し、式(15)のように変形する。

$$\begin{aligned} \sum_{l \in N} C_{kl} \cdot Q_{kl} = & \sum_{l \in N} \{c_{kl}^{\max} \cdot Q_{kl} - \beta_{kl} \cdot (Q_{kl})^2\} \geq (\text{式(12)右辺}) \end{aligned} \quad (15)$$

$$\forall k \in K$$

さらに、式(16)のように変数 QQ_{kl} を定義し、式(14)と式(15)の $(Q_{kl})^2$ をそれぞれ式(17)、式(18)のように置き換える。なお、式(16)は凸二次制約となっている。また、この式変形により、消費者余剰を線形式として表現できる。

$$QQ_{kl} \geq (Q_{kl})^2 \quad (16)$$

$$\forall k \in K, l \in N$$

$$CS_{kl} = \frac{1}{2}\beta_{kl} \cdot QQ_{kl} \quad (17)$$

$$\forall k \in K, l \in N$$

$$\sum_{l \in N} \{c_{kl}^{\max} \cdot Q_{kl} - \beta_{kl} \cdot QQ_{kl}\} \geq (\text{式(12)右辺}) \quad (18)$$

$$\forall k \in K$$

ここでは、式(16)を不等式として定式化しているが、式(18)より変数 QQ_{kl} は変数 Q_{kl} に対して下限だけでなく上限も持つことがわかる。そのため、式(16)は実際には等式として成立することになる。

b) 式(10)： $P_{ij}^m \cdot \sum_{k \in K} X_{ij}^{km}$ の計算

本研究では運賃を式(20)のように、固定費用分 FP_{ij}^m と可変費用分 VP_{ij}^m に分けて考える。固定費用分、可変費用分についてはそれぞれ式(21)、式(22)が成立する。

$$P_{ij}^m = FP_{ij}^m + VP_{ij}^m \quad (20)$$

$$\forall i \in N, j \in N, m \in M$$

$$FP_{ij}^m \cdot \sum_{k \in K} X_{ij}^{km} \geq d_{ij}^m \cdot Z_{ij}^m \quad (21)$$

$$\forall i \in N, j \in N, m \in M$$

$$VP_{ij}^m \cdot \sum_{k \in K} X_{ij}^{km} \geq e_{ij}^m \cdot \sum_{k \in K} X_{ij}^{km} \quad (22)$$

$$\Leftrightarrow VP_{ij}^m \geq e_{ij}^m \cdot Z_{ij}^m$$

$$\forall i \in N, j \in N, m \in M$$

式(21)が二次式となっているが、リンクの有無を示す0-1変数 Z_{ij}^m が二乗しても値が変わらないことに着目し、式(23)のように定式化しなおす。式(23)は回転付き二次錐制約¹⁵⁾と呼ばれるもので、さらなる式変形により標準的な二次錐制約に置き換えることが出来る。

$$FP_{ij}^m \cdot \sum_{k \in K} X_{ij}^{km} \geq d_{ij}^m \cdot (Z_{ij}^m)^2 \quad (23)$$

$$\forall i \in N, j \in N, m \in M$$

c) 式(12)の右辺： $P_{ij}^m \cdot X_{ij}^{km}$ の計算

まず、式(24)のように変数 R_{ij}^{km} を定義する。このとき、 $P_{ij}^m \cdot X_{ij}^{km}$ は式(25)のように式変形できる。

$$R_{ij}^{km} = P_{ij}^m + X_{ij}^{km} \quad (24)$$

$$\forall k \in K, i \in N, j \in N, m \in M$$

$$P_{ij}^m \cdot X_{ij}^{km} = \frac{1}{2} (R_{ij}^{km})^2 - \frac{1}{2} \{ (P_{ij}^m)^2 + (X_{ij}^{km})^2 \} \quad (25)$$

$$\forall k \in K, i \in N, j \in N, m \in M$$

さらに、式(26)、式(27)のように変数 $RR_{ij}^{km}, SS_{ij}^{km}$ を定義し、凸二次制約として置く。これらの式(26)、式(27)を用いることで、式(25)を式(28)のような線形式に置き換えることを考える。

$$RR_{ij}^{km} \geq \frac{1}{2} (R_{ij}^{km})^2 \quad (26)$$

$$\forall k \in K, i \in N, j \in N, m \in M$$

$$SS_{ij}^{km} \geq \frac{1}{2} \{ (P_{ij}^m)^2 + (X_{ij}^{km})^2 \} \quad (27)$$

$$\forall k \in K, i \in N, j \in N, m \in M$$

$$P_{ij}^m \cdot X_{ij}^{km} = RR_{ij}^{km} - SS_{ij}^{km} \quad (28)$$

$$\forall k \in K, i \in N, j \in N, m \in M$$

ただし、式(26)、式(27)が不等式のため、実際には式(28)のような等式として成立しない。そのため、後述する方法により疑似的に等式として成立させる。

なお、式(16)と式(28)を用いることで、式(18)を式(29)のような線形制約として表現し直すことができる。

$$\begin{aligned} & \sum_{l \in N} (c_{kl}^{\max} \cdot Q_{kl} - \beta_{kl} \cdot QQ_{kl}) \\ & \geq \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{m \in M} (RR_{ij}^{km} - SS_{ij}^{km}) \\ & \quad + v \cdot \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{m \in M} t_{ij}^m \cdot X_{ij}^{km} \\ & \quad + v \cdot \sum_{n \in N} \sum_{m \in M} \sum_{m' \in M} \tau_n^{mm'} \cdot Y_n^{kmm'} \end{aligned} \quad (29)$$

$$\forall k \in K$$

変数 SS_{ij}^{km} について、式(27)と式(29)には上限となる制約が存在せず、際限なく値を大きくすることができてしまう。ただし、式(10)と式(28)より式(30)が成立するため、変数 SS_{ij}^{km} の上限となる制約を定式化できる。

$$\sum_{k \in K} (RR_{ij}^{km} - SS_{ij}^{km}) \geq d_{ij}^m \cdot Z_{ij}^m + e_{ij}^m \cdot \sum_{k \in K} X_{ij}^{km} \quad (30)$$

$$\forall i \in N, j \in N, m \in M$$

また、式(26)が等式として成立して式(28)が成立するようにするため、目的関数である式(3)を式(31)のように置き

なおす。 ε は十分に小さな正の定数とする。

$$\sum_{k \in K} \sum_{l \in N} CS_{kl} - \varepsilon \cdot \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{m \in M} \sum_{k \in K} RR_{ij}^{km} \quad (31)$$

$$\rightarrow \text{maximize}$$

このように変形することで、式(26)、式(27)、式(30)が実質的に等式として成立するようになり、結果として式(28)が疑似的に成立する。

(5) 定式化のまとめ

最終的に本モデルは、式(31)を目的関数として、式(1)、式(4)～式(9)、式(11)、式(13)、式(16)、式(17)、式(20)、式(22)～式(24)、式(26)、式(27)、式(29)、式(30)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として定式化されるため、一般的な最適化ソルバーを用いて求解が可能である。実際の計算ではGurobi Optimizer 8.1を用いた。

4. 最適ネットワーク形状の導出と分析

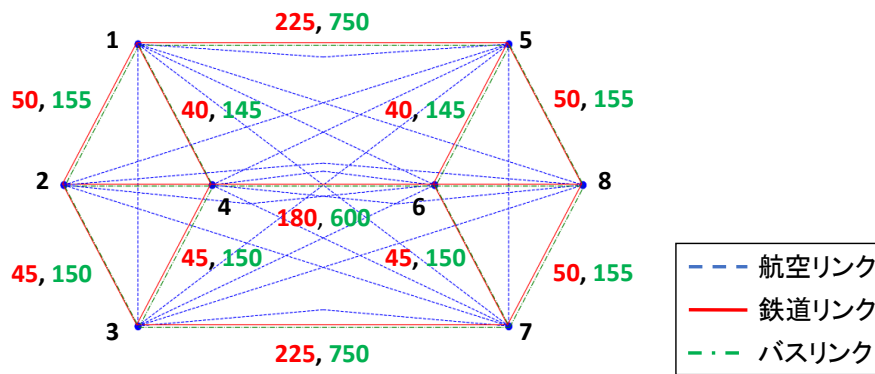
(1) 仮想ネットワークとパラメータの設定

本モデルを仮想ネットワークに適用して、得られる最適ネットワーク形状を分析する。本研究では、複数の需要規模を設定して最適化計算を行い、得られる最適ネットワーク形状を比較する。

図-2で示したような仮想ネットワークを考える。このネットワークでは、図に示した2ノード間に航空リンク、鉄道リンク、バスリンクを設定可能とする。図-2に示した各値は、それぞれ鉄道リンクとバスリンクの所要時間(分)であり、航空リンクの所要時間は表-3で与える。

各モードの特徴を踏まえ、表-4のように固定費用、可変費用、輸送容量を与える。各パラメータはリンクごとに異なる値を設定可能だが、本研究では簡単化のためリンクの場所や距離によらず等しい値を与える。なお、輸送容量は十分に大きな値としており、混雑や積み残し発生しないものとする。また、モード間の乗継時間 $\tau_n^{mm'}$ を表-5のように、ノードの場所によらず等しい値を与える。

上限交通量 q_{kl}^{\max} と支払意思額の最大値 c_{kl}^{\max} をそれぞれ表-6、表-7のように与える。表-6の値は各ODペアの需要規模を表しており、距離に対してほぼ一定の値を与える。なお、表-7の支払意思額の最大値については、複数の最適ネットワーク形状のパターンが同一の目的関数値を持ち、計算アルゴリズムが複数の最適解を巡回して計算が終了しない状況を回避するため、少しずつ異なる値を置いている。また、旅客の時間価値 v は一律に50(円/分)、式(11)のパラメータ γ は50,000(円/人)、目的関数である式(31)のパラメータ ε は 10^{-8} とする。以上の設定



※図中の値は鉄道リンク、バスリンクの所要時間（分）

図-2 仮想ネットワーク

表-3 航空リンクの所要時間

リンク	所要時間 (分)	リンク	所要時間 (分)
1 3	100	3 5	155
1 5	150	3 6	145
1 6	145	3 7	150
1 7	155	3 8	160
1 8	160	4 5	145
2 5	160	4 6	135
2 6	150	4 7	145
2 7	160	4 8	150
2 8	165	5 7	100

表-4 各モードの固定費用、可変費用、輸送容量

モード	固定費用 (円/day)	可変費用 (円/人)	輸送容量 (人/day)
航空	1,500,000	12,000	15,000
鉄道	12,000,000	3,000	15,000
バス	100,000	2,000	15,000

表-5 モード間の乗継時間（分）

	航空	鉄道	バス
航空	30	60	60
鉄道	60	0	15
バス	60	15	0

表-6 上限交通量（人/day）

OD	1	2	3	4	5	6	7	8	合計
1	0	1,920	960	1,920	384	384	320	320	6,208
2	1,920	0	1,920	1,920	320	384	320	320	7,104
3	960	1,920	0	1,920	320	384	320	320	6,208
4	1,920	1,920	1,920	0	384	480	384	384	7,392
5	384	320	320	384	0	1,920	960	1,920	6,208
6	384	384	384	480	1,920	0	1,920	1,920	7,392
7	320	320	384	384	960	1,920	0	1,920	6,208
8	320	320	320	384	1,920	1,920	1,920	0	7,104
合計	6,208	7,104	6,208	7,392	6,208	7,392	6,208	7,104	53,824

表-7 支払意思額の最大値（円/day）

OD	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	15,600	30,500	15,400	75,300	75,200	90,100	90,000
2	15,600	0	15,500	15,400	90,300	75,200	90,100	90,000
3	30,500	15,500	0	15,400	90,300	75,200	75,100	90,000
4	15,400	15,400	15,400	0	75,300	60,200	75,100	75,000
5	75,300	90,300	90,300	75,300	0	15,200	30,100	15,000
6	75,200	75,200	75,200	60,200	15,200	0	15,100	15,000
7	90,100	90,100	75,100	75,100	30,100	15,100	0	15,000
8	90,000	90,000	90,000	75,000	15,000	15,000	15,000	0

を初期設定として、以後、分析内容に応じて値を変えていくこととする。

本研究では、図-3に示すように上限交通量 q_{kl}^{\max} の値を比例的に変化（ α 倍）させ、複数の需要規模での最適ネ

ットワーク形状を導出する。ただし、需要規模を変える場合には、支払意思額の最大値 c_{kl}^{\max} は固定し、全てのODペアについて一様に α 倍するものとする。 α は1, 1.2, ..., 3.8, 4の16通りとする。

(2) 複数の需要規模での最適ネットワーク形状

複数の需要規模で最適ネットワーク形状を導出した結果、図-4(a)～図-4(h)で示した8種類のネットワーク形状が現れた。本研究では鉄道リンクの構成の違いに着目して、最適ネットワーク形状を4種類に分類する。

a) 図-4(a) : $\alpha = 1 \sim 1.6$

需要規模が小さく、最適ネットワーク形状は航空リンクとバスリンクにより構成される。図-4(a)では、全ての2ノード間に航空リンクまたはバスリンクが設定されており、ポイントtoポイント型のネットワークになっている。これは、航空リンクとバスリンクの固定費用が小さ

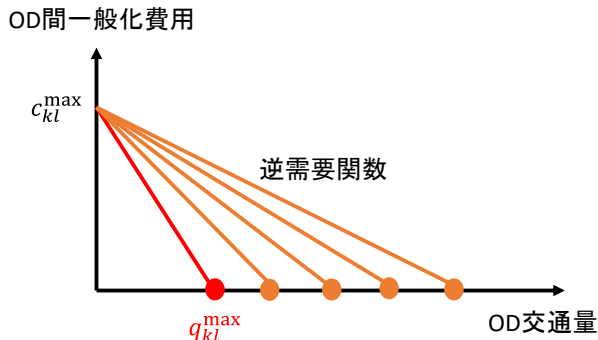


図-3 複数の需要規模の表現

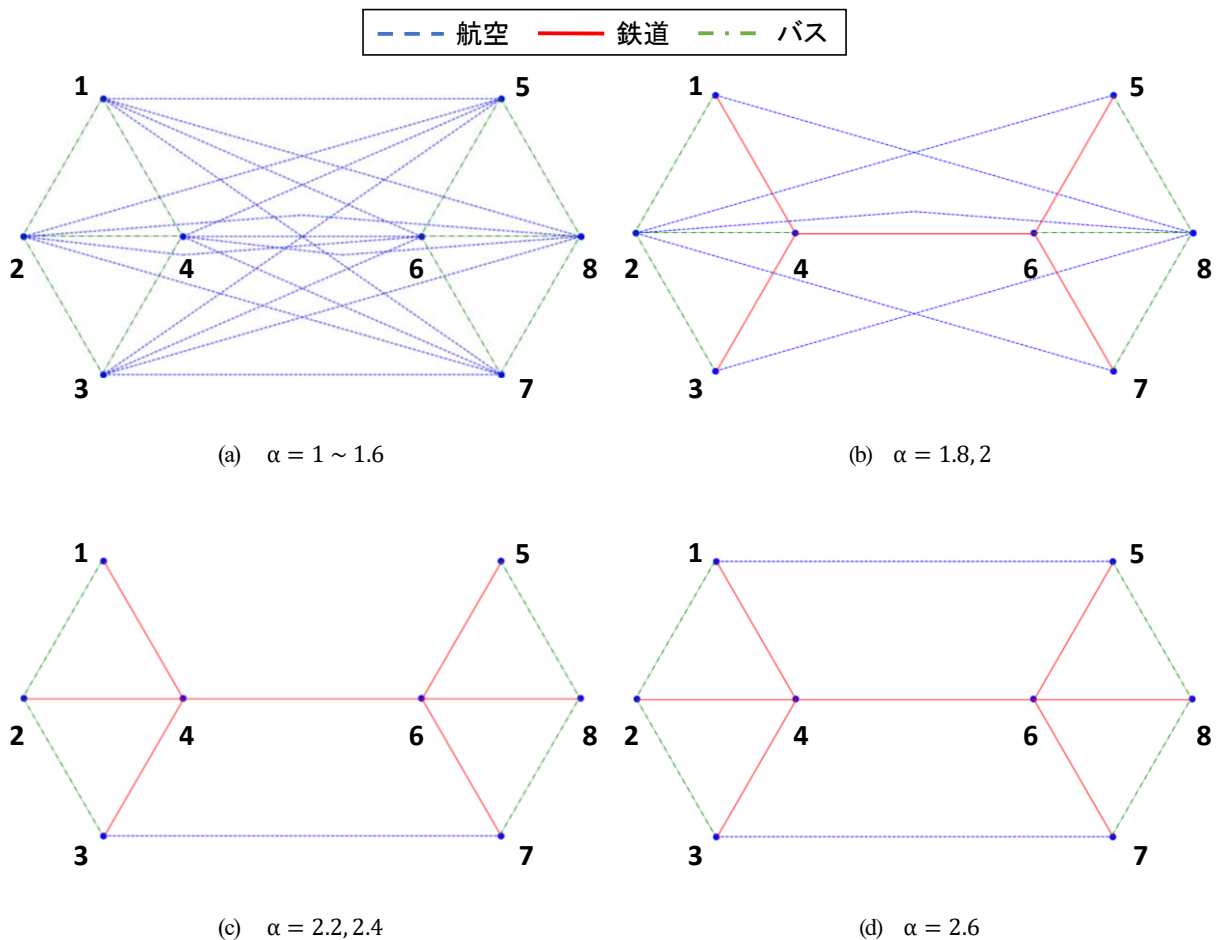
いため、一部のリンクサービスに旅客を集めて運賃を抑えるよりも、直行便を作った方が効率的になるためだと考えられる。

b) 図-4(b) : $\alpha = 1.8, 2$

最適ネットワーク形状は航空リンク、鉄道リンク、バスリンクが混在したものとなっている。鉄道リンクはネットワークの中央に位置するリンク(4,6)と、そこにつながるリンク(1,4), (3,4), (5,6), (7,6)が設定されており、鉄道によるハブ&スポーク型のネットワークが構築されている。バスリンクはネットワークの端部に位置するリンク(1,3), (2,4), (5,8), (7,8)が設定されている。また、リンク(2,4), (6,8)もバスリンクとして設定されており、一部のODペアではノード4, 6で鉄道とバスによる乗り継ぎがなされる。鉄道リンクは固定費用が大きいため、なるべくたくさんのODペアに利用してもらい運賃を抑える必要があるが、バスリンク(2,4), (6,8)が鉄道のフィーダーとしての役割を担っていると考えることが出来る。航空リンクは、鉄道とバスによる乗り継ぎ経路で3リンクを要するノード間で設定されている。

c) 図-4(c), 図-4(d), 図-4(e) : $\alpha = 2.2 \sim 3$

b)と同様に、最適ネットワーク形状は航空リンク、鉄道リンク、バスリンクにより構成される。鉄道リンクは



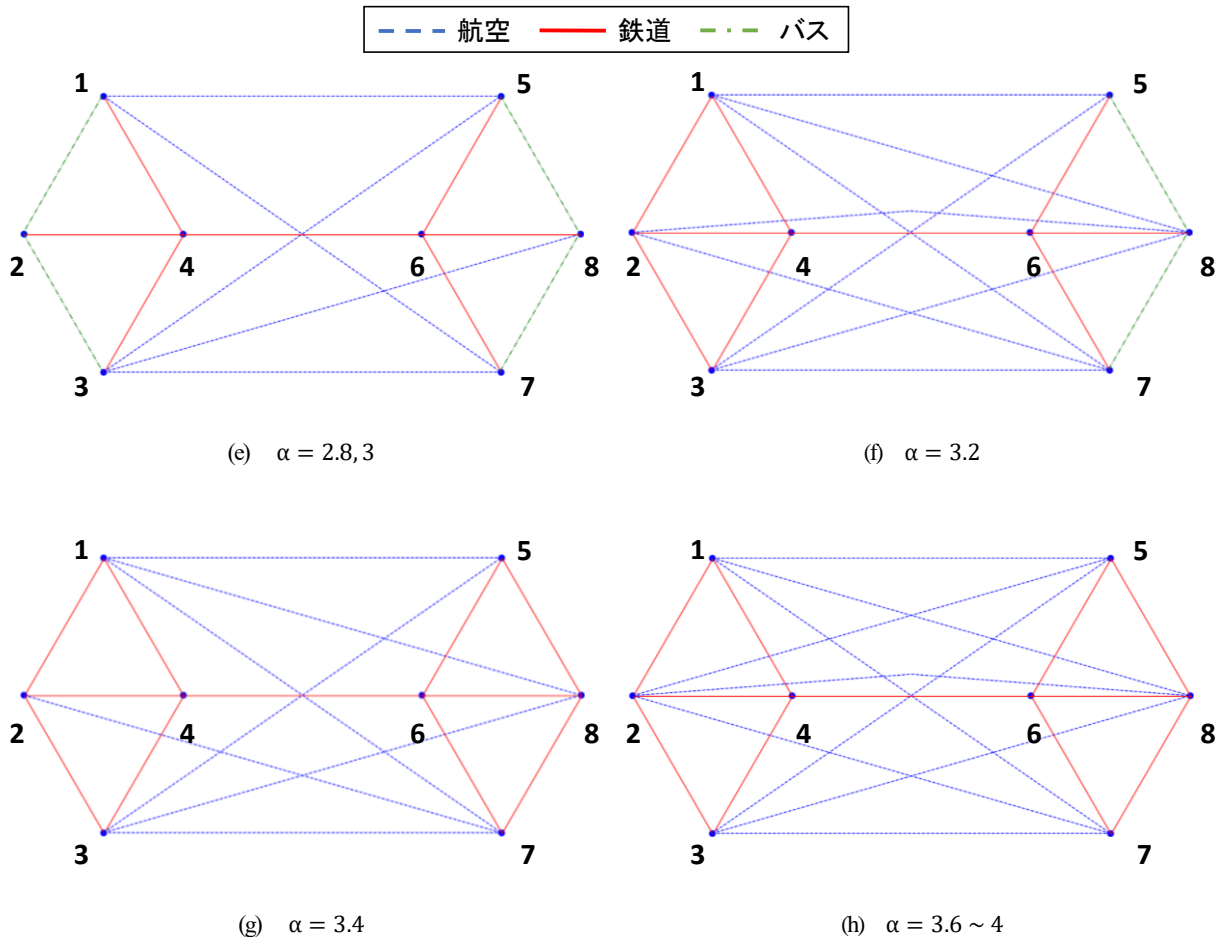


図4 得られた最適ネットワーク形状

b)に加えてリンク(2,4), (6,8)も加わる. 航空リンクはリンク(3,7)が設定され, 需要規模を大きくするとその他の区間でも設定される. 図-4(c), 図-4(d)では航空リンクの数がa), b)と比較して少ないが, これは, a), b)で航空リンクを利用していた旅客を鉄道経路へと誘導していると考えることが出来る.

d) 図-4(f), 図-4(g), 図-4(h) : $\alpha = 3.2 \sim 4$

図-4(f)ではリンク(1,2), (2,3)にも鉄道リンクが設定され, 図-4(g), 図-4(h)ではさらにリンク(5,8), (7,8)も鉄道リンクとなる. これらのネットワークの端部に位置するリンクは, 単一のODペアにのみしか利用されないが, 需要規模が大きい場合に限り鉄道リンクを設定可能となることがわかる. また, 航空リンクは鉄道経路では3リンクを要する区間のみ設定される. 特に図-4(h)では, 鉄道経路で3リンク以上を要する長距離のノード間には必ず航空リンクが設定されており, 航空と鉄道の距離帯による役割分担が明確になっている.

(3) リンク運賃の推移

図-5は, リンク(1,4)での交通量と運賃の推移を示している. リンク(1,4)は $\alpha = 1 \sim 1.6$ ではバスリンク, $\alpha =$

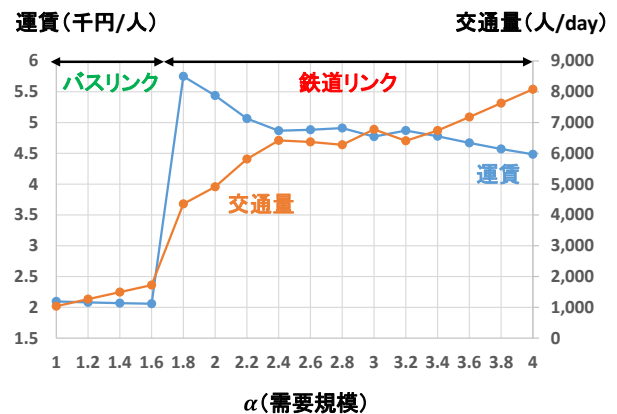


図5 リンク(1,4)での交通量と運賃の推移

1.8 ~ 4では鉄道リンクとして設定され, モードの変わる $\alpha = 1.6 \sim 1.8$ で運賃, 交通量ともに大きく変化していることがわかる. また, 運賃はリンクサービスの固定費用と可変費用をリンク交通量で割った平均費用であるため, 同一モードの範囲で見ると, リンク交通量が増加(減少)すれば, 運賃は値下げ(値上げ)されるという妥当な解が得られている.

鉄道リンクの範囲を見ると, 需要規模が大きくなることで運賃は概ね値下げされるが, $\alpha = 3 \sim 3.2$ の範囲で

はわずかに値上げされることが読み取れる。図-4を見ると、この範囲で最適ネットワーク形状が図-4(e)から図-4(f)に変化していることがわかる。ここでは、新たに航空リンク(1,8)が設定され、対応する一部のODペアの需要がそちらに移るため、リンク交通量が減少し運賃が値上げされることによる。このように、リンクの運賃は需要規模だけでなく、ネットワーク形状にも応じて値が決定することがわかる。

(4) 総消費者余剰の推移

図-6は、目的関数である総消費者余剰の推移を示している。また、図-6の灰色の線は、 $\alpha = 1$ の場合の総消費者余剰を基準として需要規模の拡大率を乗じた値、つまり、総消費者余剰のうち需要規模に比例する部分を示している。

$\alpha = 1$ の場合の総消費者余剰は約2.6(億円/day)だが、 $\alpha = 4$ の場合には約14(億円/day)となる。したがって、需要規模を4倍に拡大することで、総消費者余剰は約5.4倍に増加することになる。需要規模が大きいほど総消費者余剰の値も大きくなるが、その値は需要規模には比例しない。これは、需要規模が大きくなることで、ネットワーク全体としてサービス利用者数が増加することで旅客1人あたりの平均費用が小さくなるという量的な効果と、固定費用は大きいものの利便性の高いサービスを設定可能になるという質的な効果によるものと考えられる。また、この量的な効果と質的な効果は規模の経済性に起因する効果であると考えることが出来る。

5. おわりに

本研究では、発展途上国を始めとした需要拡大期のネットワーク計画のための最適化モデルを提案した。発展途上国では政府に十分な財政力が無いため、PFI方式によりネットワーク構築を進めるとともに、その資金をサービス利用者から運賃として回収することになる。本研究で提案した最適化モデルは、先行研究をベースとしつつ、リンクサービス運営のための可変費用分と固定費用分をリンク利用者が運賃として負担すると考える定式化となっている。また、本モデルは0-1変数を含む二次錐計画問題として定式化されるため、比較的容易に求解出来る。

続いて、提案した最適化モデルを仮想ネットワークに適用し、得られた最適ネットワークに関して分析を行った。具体的には、複数の需要規模を設定して最適化計算を行い、需要規模に応じた最適ネットワーク形状の比較をした。結果として、需要規模が小さい場合には航空とバスによるネットワーク、需要規模が大きくなると航空

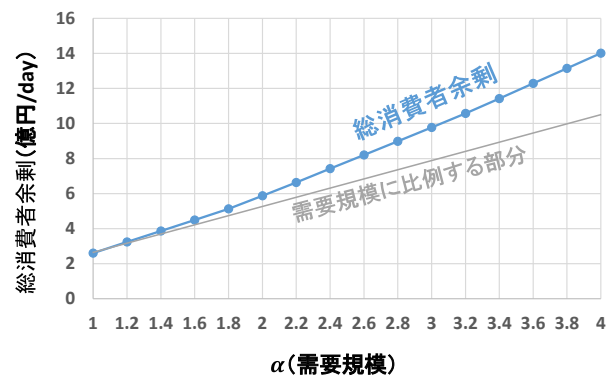


図-6 総消費者余剰の推移

と鉄道、バスの混在したネットワーク、さらに需要規模が大きい場合には航空と鉄道によるネットワークが導出された。また、リンクサービスでの運賃の推移を確認すると、その値は需要規模だけでなく、ネットワーク形状にも応じて決定されることが示された。さらに、総消費者余剰の推移を見ると、その推移は需要規模に比例しないことがわかった。これは、需要規模の拡大により、ネットワーク全体として見ると旅客の平均費用が低下するという量的な効果と、固定費用は大きいものの利便性の高いサービスを設定可能になるという質的な効果によるものと考えることが出来る。

今後の課題として、最適化計算に関することと、サービス戦略に関することの2つが挙げられる。本研究では、先述したような方法で複数の需要規模を設定して最適化計算を行っているものの、より細かい刻みで需要規模を設定しなければ現れないネットワーク形状が存在する可能性がある。ただし、本研究での小規模な仮想ネットワークにおいても最適化計算に時間を要するため、アルゴリズムについてのさらなる検討が必要となっている。

また、航空リンクでは一旦設定された後、需要規模の拡大により他のサービスに置き換えられるものの、さらに需要規模が拡大することで再び設定されるという状況が存在している。これは、最適ネットワーク形状の変化に対してどのように対応するのかという点で問題となる。この点についてもさらに検討が必要となる。

参考文献

- 1) Jiang, C. and Zhang, A.: Effects of high-speed rail and airline cooperation under hub airport capacity constraint. *Transportation Research Part B*, Vol.60, pp.33-49, 2014.
- 2) Takebayashi, M.: Multiple hub network and high-speed railway: Connectivity, gateway, and airport leakage, *Transportation Research Part A*, Vol.79, pp.55-64, 2015.
- 3) Takebayashi, M.: How could the collaboration between airport

- and high speed rail affect the market? , *Transportation Research Part A*, Vol.92, pp.277-286, 2016.
- 4) 村上直樹, 竹内太郎, 奥村誠, 塚井誠人: 航空との補完的サービスを考慮した最適鉄道運行計画, 土木計画学研究・論文集, No.23, pp.629-634, 2006.
 - 5) 渡邊拓也, 柴田宗典, 鈴木崇正: 多目的最適化に基づく都市間交通ネットワークの評価方法に関する研究, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.72, No.5, pp.I_903-I_916, 2016.
 - 6) Adler, N., Pels, E. and Nash, C.: High-speed rail and air transport competition: Game engineering as tool for cost-benefit analysis, *Transportation Research Part B*, Vol.44, pp.812-833, 2010.
 - 7) 下原祥平, 長谷部知行, 金子雄一郎, 島崎敏一: 高速バスを考慮した都市間交通ネットワークの利用者便益の推計, 土木計画学研究・論文集, Vol.27, No.2, pp.409-415, 2010.
 - 8) 波床正敏, 中川大: 幹線鉄道網の最適化基準が路線網形成に与える影響の比較分析, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.67, No.5, pp.I_957-I_966, 2011.
 - 9) 波床正敏, 中川大: 整備スキーム改善による幹線鉄道網における地域間交流活性化に関する定量的研究, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.71, No.5, pp.I_725-I_736, 2015.
 - 10) Okumura, M., Tirtom, H. and Yamaguchi, H.: Planning model of optimal modal-mix in intercity passenger transportation, *Proceedings of International Conference on Low-carbon Transportation and Logistics, and Green Buildings (LTLGB2012)*, pp. 309-314, 2012.
 - 11) 紀伊雅敦, 永野雄貴, 中村一樹, 清水裕康: 効率的航空ネットワーク推計方法の開発とアフリカ発着ネットワークへの適用, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.72, No.5, pp.I_821-I_832, 2016.
 - 12) Tirtom, H., 山口裕通, 奥村誠, 金進英: 低炭素化政策が都市間旅客交通ネットワークの構造に与える影響, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.70, No.5, pp.I_819-I_827, 2014.
 - 13) Tirtom, H. Okumura, M. Yamaguchi, H. and Das R.: Network Fortification Model for Intercity Passenger Transportation, *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol.11, pp.75-89, 2015.
 - 14) 細正隆, 奥村誠: 最適な都市間交通ネットワーク形状を分析するための需要内生型モデル, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.74, No.5, pp.I_779-I_786, 2018.
 - 15) 久保幹雄, ジョア ペドロ ペドロソ, 村松正和, アブドゥール レイス: 「新しい数理最適化 Python 言語と Gurobi で解く」, 近代科学社, 2012.

(2019.?? 受付)

An optimization model for intercity passenger transportation network planning during demand expansion period

Masataka HOSO and Makoto OKUMURA and John SMITH

In developing countries such as Asia and Africa, the population is rapidly increasing, and the intercity transportation network is in the development stage. In such countries, demand is expected to expand in the future, but since the government has insufficient financial power, it will build a network by the PFI method. In this research, we propose an optimization model assuming a network planning of such demand expansion period. Similar studies often give OD demand and fare fixedly, but in the proposed model, based on previous research, we will be able to derive them endogenously. Since this model is formulated as a second-order cone programming problem including 0-1 variables, there is also an advantage that it can be solved comparatively easily. Subsequently, in order to confirm the nature of this model, we analyzed the optimum network shape obtained by applying this model to a hypothetical network.