## 環境制約下の都市間旅客交通網の最適化

# — 複数の交通モードの役割に着目して —

## Optimization of Intercity Passenger Transportation Network Under Environmental Constraints – Focusing on the Role of Multiple Transportation Modes –

元木 智\*

### Satoshi MOTOKI

\*地域計画学・レジリエンス計画研究室(指導教員:奥村 誠 教授)

将来における都市間旅客交通網のあり方は,環境負荷と利便性の双方を考慮して検討する必要があ る.本研究では,需要内生型ネットワーク最適化モデルを用いて,環境制約と利便性の間のトレード オフ構造や航空・鉄道各モードの役割を分析した.その結果,超電導リニアや新幹線が環境制約下で の利便性維持において他のモードでは代替不可能な役割を持つことがわかった.

Key Words: 都市間交通,マルチモーダル,最適ネットワーク,二酸化炭素,超電導リニア

#### 1. はじめに

航空は,長距離の都市間を直行かつ高速で結ぶこと が可能であるが,1人当たりの運行費用や二酸化炭素排 出量が極めて大きい.他方,新幹線や在来線といった鉄 道は,より小さな1人当たりの運行費用や二酸化炭素 排出量で,近距離の都市間を輸送することが可能であ るが,路線を設置するための固定費用が大きい.さらに, 現在開発・建設中の超電導リニアは,航空と鉄道の中間 的な特徴を持つ.

国内の都市間交通需要を効率的に満足するためには, 航空・超電導リニア・新幹線・在来線特急を適切に組み 合わせたネットワークを構築することが必要となる.

本研究では、図-1 に示す日本国内を模した簡略なネ ットワークに対して、先行研究<sup>1),2)</sup>で開発した需要内生 型ネットワーク最適化モデルを用いて、複数のレベル の二酸化炭素排出量制約に対する最適ネットワークの 構造や利便性を求め、環境制約下における各モードの 役割を分析する.

#### 2. 需要内生型ネットワーク最適化モデル

(1) モデルの基本的な考え方

本モデルは,各リンクにおいて設定可能なモードから実際に設定するものを選び,旅客数をちょうど運び 切るだけの運行本数を設定する.旅客は設定されたリ ンク上のモードを順次乗り継いで OD 間を移動し,所 要時間費用と乗継時間費用,運賃を支払う.これらの和 である一般化費用の値に対応して需要量が変動する. 旅客が支払った運賃の総額によって,リンクの固定費 用と可変費用が賄われる.

本モデルでは, OD 別に線形の逆需要関数を与え, 消 費者余剰を求める. これを全 OD ペアについて足し合 わせた総消費者余剰を最大化する.

(2) 定式化

操作変数は表-1, パラメータは表-2, 目的関数や各種 制約式, および各操作変数の定義域は表-3 に示すよう に定める.

数値的に最適解を求めるため、操作変数同士の積を



図-1 簡略ネットワークと基本ケースでの設定可能リンク

変形し 0-1 変数を含む凸二次錐計画問題に変換した上で, 商用最適化ソルバーを用いて計算を行う.

# ネットワーク構造と各モードの役割の分析 (1)分析方法

環境制約下のネットワーク構造や利便性の違いを分 析するため、図-1 に示す全てのリンクが設定できる**基** 本ケースにおいて、まず二酸化炭素排出量制約を設け ずに(以降,制約 Lv.100 と表す)、最適ネットワーク構 造を導出し、その時の二酸化炭素総排出量を求める.次 にそれを 90%、80%…と 10%ずつ減じる制約を与え(以 降,制約 Lv.90、制約 Lv.80 のように表す)、対応する 最適ネットワーク構造を導出する.次に、環境制約下で の各モードの役割を分析するため、任意の 1 モードを 除いたケース(以降,図-1 に記載のケース名で呼ぶ) で同様に計算する.

(2)計算結果と考察

基本ケースにおける各排出量制約レベルでの最適ネットワークでの総消費者余剰値と提供座席キロのモード別比率を図-2に示す.ケース a)から c)における各排出量制約レベルでの最適ネットワークでの総消費者余剰値も図-2 に併せて示す.

$Q_{kl}$	OD 交通量	C <sub>kl</sub>	OD 間一般化 費用	CS <sub>kl</sub>	OD 別消費者 余剰			
$Y_n^{kmm'}$	乗継交通量	$B_k^m$	発生交通量	$A_l^{km}$	集中交通量			
$Z_{ij}^m$	リンクの設定 の有無を表す 0-1 変数	$F_{ij}^m$	運行本数	$R_{ij}^m$	必要車両 (機体)数			
$X_{ij}^{km}$	起点 <i>k</i> 別 リンク交通量	$V_{ij}^{km}$	費用負担総額					
<b>= 0 パニック</b>								

表-1 操作変数

		表-2	パ	ラメー	タ		
$q_{kl}^{\max}$	OD 間 上限交通量	$\beta_{kl}$	逆 傾	需要関数 き	Ø	$C_{kl}^{\max}$	OD 間一般化 費用の最大 支払意思額
$d_{ij}^m$	固定費用	$e_{ij}^m$	運	行費用		$g_{ij}^m$	最小運行本数
$h_{ij}^m$	最大運行本数	$S_{ij}^m$	座席数			$t_{ij}^m$	所要時間
$\tau_n^{mm'}$	乗継時間	$tb_{ij}^m$	折返し時間			$sta_{ij}^m$	駅数
co <sub>ij</sub>	運行時の 二酸化炭素 排出量	ст <sup>т</sup> <sub>ij</sub>	車両(機体)の 製造・維持管 理・廃棄時の 排出量		ct <sup>m</sup>	駅運用時の 排出量	
γ	十分大きな任意の定数			v	時	間価値	





また,**基本**ケース/制約 Lv.**100** における最適ネット ワークでの各リンクでの運行本数を図-3 に示す.

基本ケースにおいて,総消費者余剰値は制約 Lv.100 からしばらく大きく減少することはない.しかし,制約 Lv.50 付近を境に,急激に減少が加速する.

排出量制約が厳しくなると、1人当たりの排出量が最 も大きい航空の座席キロ比率は減少し、制約 Lv.30 付 近で設定不能となる. 超電導リニアの座席キロ比率は、 制約 Lv.50 まで増加するがその後減少し、制約 Lv.20 から制約 Lv.10 付近になると超電導リニアも設定不能 となり、新幹線と在来線特急のみが設定される.

モードの有無が異なる各ケースのグラフの上下間隔 に着目すると、制約 Lv.40 付近までは、超電導リニアの 有無によりケース b)と基本ケースのグラフの間隔が大 きく開く. さらに排出量制約が厳しくなると、新幹線の 有無によりケース c)と基本ケースのグラフの間隔が大 きく開く. したがって、ある程度の排出量制約下では超 電導リニアが設定できること、さらに厳しい制約下で





※代表交通機関とそれに次ぐ交通機関を、利用する順に着色. 鹿 完 長崎 博多 高松 広島 岡山 松江 大阪 名古屋 静岡 金沢 新潟 東京 秋田 仙台 青森 函館 札幌 4.4 2.1 22.1 8.4 2.2 2.1 2.2 71.0 4.4 2.7 8.7 札幌 3.4 函館 🕕 9.4 青森 3.2 5.2 4.7 仙台 3.9 2.3 34.5 **秋田** œ 32.5 16.3 89.9 34.5 11.3 東京 2.7 10.8 新潟 0 金沢 12.8 5.8 3.6 19.0 9.9 11.0 大阪 2.3 松江 37 長崎 鹿児島 93 Ē

図-3 **基本**ケース/制約 Lv.**100** の場合の最適ネットワーク (左上は航空,数字は便数)

は新幹線が設定できることが、利便性維持に対して大 きく貢献していることがわかる.環境制約下での利便 性維持において、この2モードが他のモードでは代替 不可能な役割を持つことを示している.

## 4. おわりに

本研究では、複数の異なる環境制約に対して、最適ネ ットワーク構造や利便性にどのような違いが現れるか を確認し、それぞれのモードが各環境制約下で果たす 利便性維持の役割について分析した。

今後は, 需要規模や人口分布の変化, または新規設定 路線の建設, 技術の進展等による排出量の削減を考慮 した分析が必要であると考える.

#### 参考文献

- 細正隆,奥村誠: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、土木計画学研究・講演集(CD-ROM), Vol.59, No.162, 2019.
- 吉田智貴,奥村誠:費用負担スキームを考慮した都市間旅客交通 ネットワークの最適構造,土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.76, No.5, pp.I\_977-I\_986, 2021.

(2024年2月6日提出)