

# 複数経路を考慮した鉄道・航空ネットワークの評価\*

## Evaluation of Rail/Air Network Considering Alternate Paths\*

杵元 淳平\*\*・塚井 誠人\*\*\*・奥村 誠\*\*\*\*

Jumpei HAZEMOTO\*\*・Makoto TSUKAI\*\*\*・Makoto OKUMURA\*\*\*\*

### 1. はじめに

わが国の鉄道・航空網は、長年のインフラ整備により稠密なネットワークを形成しており、都道府県間には最短経路に近いサービス水準の高い経路が多く存在するようになった。列車の高速化や料金値下げによってネットワーク上のある区間のサービス水準が改善された場合、その区間を最短経路に含む OD ペアだけでなく、次善の経路として含む OD ペアのサービス水準も改善される。しかし従来はこの効果は考慮されず、最短経路のサービス水準のみに基づいて評価がなされている。

本研究では、最短経路のみならず次善以下の複数の経路のサービス水準を考慮して、鉄道・航空ネットワークを定量的に評価する方法を提案し、政策分析を行う。計算の手順を以下に示す。

まず、第 K 経路探索法によって生成した経路群に対する経路選択モデルを、交通機関分担率のデータに基づいて推定する。さらに経路選択モデルから得られたトリップ効用値を用いて、都道府県間交通量モデルを推定し、それらのパラメータを用いてネットワークの評価関数を定式化し、評価を行う。

### 2. 経路群情報の生成

#### (1) ネットワークデータ

全国 JR 路線のうち、主要駅をノード、新幹線・特急路線をリンクとする鉄道ネットワーク、さらに主要空港をノード、主要航空路線をリンクとして加えた鉄道+航空ネットワークを設定した。新幹線のうち速度の速い「のぞみ」は普通新幹線と区別する

ため別リンク（スーパーリンク）を設けた。各リンクのサービス水準（所要時間、運行頻度、距離）は 1995 年の JR 時刻表から得た。

#### (2) 第 K 経路探索法<sup>1)</sup>

ここで都道府県間の複数経路を効率的に列挙するために用いる第 K 経路探索アルゴリズムについて説明する。このアルゴリズムは、最短経路探索、次善経路探索、第 K 経路探索の 3 つのサブルーチンからなっている。

最短経路探索

最短経路はダイクストラ法を用いて探索する。

次善経路探索

次善経路は、最短経路から分岐し、最短経路上にないノードを 1 点以上経由するような経路である。全ての分岐先候補点から目的点までの最短経路をダイクストラ法によって列挙し、その中で最短の経路を第 2 経路として採用する。

第 K 経路探索

第 3 経路について説明する。最短経路、第 2 経路から分岐して第 3 経路になり得る経路は、分岐点の特徴に着目すると 3 パターンしかない（図 - 1 参照）。3 パターンそれぞれの経路について、探索に必要な始点から分岐点までのノード、リンクを探索対象グラフから除いたサブグラフについて、次善経路探索を繰り返す。このうちで最短の経路が第 3 経路となり、その他の経路情報は、K 番目以降の最短経路の候補としてストックしておく。

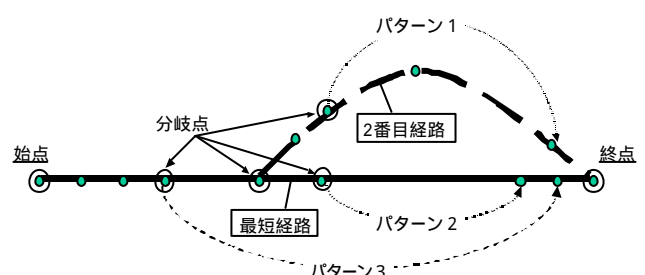


図 - 1 第 3 経路候補のパターン

\*Key words: 国土計画、整備効果計測法、経路選択

\*\* 学生員、広島大学大学院工学研究科

\*\*\* 正会員、修（工）、広島大学大学院工学研究科助手

\*\*\*\* 正会員、博（工）、広島大学大学院工学研究科助教授

(〒739-8527 東広島市鏡山 1-4-1、TEL&FAX 0824-24-7849)

以下、第 3 経路から分岐するような経路について、次善経路探索を繰り返し適用して新しい経路の情報を追加していき、それ以前にストックしておいた経路を含む全経路中で最も短い経路が、第 K 経路となる。

### (3) 複数経路の列挙

所要時間を基準に探索した第 K 経路の情報を用いて県庁所在都市間を OD とするような複数の経路を列挙する。探索の上限として 1 OD につき 21 番目以上の経路、最短経路の 1.5 倍以上の所要時間の経路は除外した。ただし航空の所要時間は、空港での搭乗手続きや乗換え時間を考慮するため 1 乗換えあたりの所要時間に一律 40 分を加えた。

### (4) 経路の分類

第 K 経路探索法で列挙した経路にはほとんど重複している経路組も多く含まれているが、利用者はそれらを別個の経路として認知していると考えにくい。そのため、本研究では重複率の高い経路をグループ化して、利用者の経路認知を表現する。以下、グループ化された経路を経路群と呼ぶ。

まず、各 OD で生成した経路間について、式 (1) の類似度を求める。

$$S_{lm}^{OD} = \frac{L_{lm}^{OD}}{\sqrt{L_l^{OD} \times L_m^{OD}}} \quad (1)$$

ここで、 $S_{lm}^{OD}$  は OD 間に存在する経路組  $l, m$  の類似度、 $L_{lm}^{OD}$  は経路組  $l, m$  の重複距離、 $L_l^{OD}, L_m^{OD}$  は経路  $l, m$  それぞれの距離を表す。

次に求めた類似度情報を用いて、以下のようなアルゴリズムによって経路をグループ化する。

#### (グループ化アルゴリズム)

- 1) 初期基準経路を最短経路とする。
- 2) 基準経路と他の全経路の類似度をチェックする。類似度が基準値（本研究では 0.7 とした）以上であれば、それらは基準経路と同じグループに加える。
- 3) 類似度が基準値以下の経路のうち最も所要時間の短い経路を基準として 2) を繰り返す。
- 4) 全経路を分類し終わったら終了する。

各経路群の中で最短所要時間の経路の持つサービス水準（所要時間、運賃、最小運行頻度）をその経路群全体のサービス水準とする。

鉄道経路の運賃（特急料金を含む）は、各経路の平均速度を算出し、平均速度のレベルに応じて異なる運賃算定式を用いて算出した。頻度は、最も利便性の低いリンクに合わせて利用者がスケジュールを立てると考えて、経路上の全リンクの運行頻度のうち最小の値をその経路のサービス水準とする。

以上の経路探索を鉄道ネットワーク上、および鉄道 + 航空ネットワーク上でそれぞれ行い、鉄道・航空を代表交通機関とする経路群を、それぞれについて最大第 5 経路群まで求めた。

## 3. モデルの定式化

### (1) 経路群選択モデル

利用者は、ロジットモデルに従う経路群の選択を行うと仮定する。

$$P^{mk} = \frac{\exp(V_{mk})}{\sum_m \sum_k \exp(V_{mk})} \quad (2)$$

$$V_{mk} = b^t T_{mk} + b^c C_{mk} + b^f F_{mk} \quad (3)$$

ここで、 $V_{mk}$  は機関  $m$  の第  $k$  経路群の効用、 $T_{mk}, C_{mk}, F_{mk}$  は、それぞれ機関  $m$  の第  $k$  経路群の所要時間、運賃、最小運行頻度を表す。 $b^t, b^c, b^f$  は各サービス水準のパラメータである。ただし、最小運行頻度のパラメータは、鉄道と航空の間の頻度の差が大きいため、機関ごとに異なるパラメータとした。

しかし、モデル推計の観測データとして、OD 別経路別の経路選択率は利用できず、鉄道・航空の代表機関選択率のみが利用できる。そこで、代表機関ごとに経路をまとめると、機関分担率は次のようなロジットモデルで表わされる。

$$P^m = \frac{\exp(V_m)}{\sum_m \exp(V_m)} \quad (4)$$

$$V_m = I_m \log\left(\sum_k d_{mk} \exp(V_{mk})\right) \quad (5)$$

ここで、 $P^m$  は機関  $m$  の選択確率、 $V_m$  は式 (5) で表わされる機関  $m$  の logsum 効用、 $I_m$  は機関  $m$  のログサムパラメータである。また、OD ごとに生成される経路群数が異なるため、経路群の有無を表すダミー変数として  $d_{mk}$  を用いた。

式(5)は経路群数および経路群のサービス水準に関する増加関数であり、サービス水準が高い経路群が多く含まれているほど、その機関の効用が高くなることを表している。以上のモデルを推定し、パラメータ  $b^i, b^c, b^f$ 、および  $I_m$  を得る。

## (2) 都道府県間交通量モデル

都道府県間の鉄道・航空を合計した総交通量  $T_{OD}$  は、以下の重力モデルにより表わされるとする。

$$T_{OD} = \Lambda P_O^a P_D^b d_{OD}^g (S_{OD})^d \quad (6)$$

ここで、 $P_O, P_D$  は OD それぞれの就業人口、 $d_{OD}$  は OD 間の直線距離、 $a, b, g, d, \Lambda$  はパラメータである。 $S_{OD}$  は OD 間の全経路のサービス水準の合成値であり、式(5)から得られる経路群選択モデルの効用値に基づいて、式(7)のように表わされる。

$$S_{OD} = \sum_m \exp(V_m) \quad (7)$$

式(6)の推定より、パラメータ  $a, b, g, d, \Lambda$  を得る。

## 4. ネットワークの評価関数の定式化

本研究では、リンク改良前後の交通ネットワークの評価を消費者余剰によって計測する。

リンク改良前後のサービス水準の金銭価値  $C_{OD}$  をそれぞれ  $C_0, C_1$  とすると、消費者余剰の変化は次のように表される。

$$E_{OD} = \int_{C_0}^{C_1} T_{OD} dC_{OD} \quad (8)$$

これに  $T_{OD}$  を代入すると、

$$\begin{aligned} E_{OD} &= \int_{C_0}^{C_1} \Lambda P_O^a P_D^b d_{OD}^g (S_{OD})^d dC_{OD} \\ &= \int_{C_0}^{C_1} \Lambda P_O^a P_D^b d_{OD}^g e^{I \log(S_{OD})} dC_{OD} \end{aligned} \quad (8)'$$

ここで、 $\log(S_{OD}) = X_{OD}$  とおく。 $X_{OD}$  は全経路群のサービス水準を表わす  $\logsum$  効用である。効用を金銭価値に換算するには  $C_{OD}$  で偏微分する必要がある。

$$\frac{\partial X_{OD}}{\partial C_{OD}} = \frac{dX_{OD}}{dC_{OD}} = b^c \quad (9)$$

結局、余剰は

$$E_{OD} = \frac{1}{b^c} \int_{X_0}^{X_1} T_{OD} dX_{OD} \quad (10)$$

となる。

ネットワーク上のあるリンクの改良は、そのリンクを通る全ての経路のサービス水準を改善するため、この事業によって得られる便益は全国に及ぶ。したがって、交通ネットワーク全体では、全ODで発生する消費者余剰の総和により、事業の効果を計測することができる。これを全国評価値  $H$  として、次のように表す。

$$H = \sum_{OD} H_{OD} \quad (11)$$

以上の評価関数を用いて、いくつかのシナリオの下での消費者余剰の増分を求める。

## 5. 経路群選択・交通量モデルの推定結果

都道府県間交通流動のデータとして、1995年の「幹線旅客純流動調査」から業務目的のトリップを用いる。本来、47都道府県間全ての流動に関してモデルを推定するのが好ましいが、データおよび計算の都合上、3大都市圏内々および鉄道・航空ともに流動が0のODを除く1006ODについてモデルの推定を行った。なお、推定にあたって鉄道のログサムパラメータ  $I_r = 1$  と基準化した。

### (1) 経路群選択モデルの推定結果

表 - 1 に経路群選択モデルの推定結果を示す。

表 - 1 経路群選択モデルの推定結果

パラメータ	推定値	t値
時間 (100分)	-1.120	** -9.08
運賃 (万円)	-1.008	** -3.32
鉄道 頻度 (本/日)	0.033	** 2.98
航空 頻度 (本/日)	0.080	** 2.99
航空ログサム	0.975	** 7.93
定数項	0.160	0.35
初期尤度	-697.3	
最終尤度	-403.1	
尤度比	0.422	
自由度調整済み尤度比	0.419	
サンプル数	1006	

\* : 5% 有意 \*\* : 1% 有意

自由度調整済み尤度比は0.419となり、適合度は高い。パラメータの符号に矛盾は見られず、また全て有意な値となった。よって、本研究で構築したモデルは妥当なモデルであるといえる。モデルパラメータより、利用者の時間価値は約5400円となった。

選択肢固有変数である鉄道と航空の頻度の推定値より、航空の運行頻度は鉄道よりも効用に対して大きな影響を及ぼしていることがわかる。

(2) 都道府県間交通量モデルの推定結果

表 - 2 に都道府県間交通量モデルの推定結果を示す。

表 - 2 都道府県間交通量モデルの推定結果

パラメータ	推定値	t 値
出発地就業人口(100人)	1.40	** 36.84
目的地就業人口(100人)	1.21	** 29.78
OD間距離 (Km)	-0.45	** -6.56
サービス水準	0.22	** 7.30
定数項	4.22	** 3.23
決定係数	0.788	
修正済決定係数	0.787	
サンプル数	1006	

\* ; 5%有意 \*\* ; 1%有意

経路群選択モデルと同様に、都道府県間交通量モデルの適合度は高い。全てのパラメータの符号に矛盾は見られず、有意な値となった。

6 . 交通ネットワークの評価

本章では、以上の手順で複数経路を考慮したネットワークの評価を行う。ここでは、2種類のネットワーク改良シナリオについて計算を行った。

(シナリオ1) : 東海道新幹線東京～大阪間における所要時間が現在の2/3になった場合

(シナリオ2) : 主要都市の空港(千歳、仙台、羽田、名古屋、関空、広島、高松、福岡)間の航空便の本数が3割増便された場合

それぞれのシナリオに基づいて、各地域間で発生する便益の集計結果を表 - 3、表 - 4 に示す。

新幹線が高速化された場合(表 - 3)、サービス水準が向上したリンクを含む最短経路以下の全ての経路の所要時間が広範囲にわたって短縮するため、その効果は全国に及び、年間1100億円の便益が発生する。しかし、中部 - 近畿間では負の便益が発生する結果となっている。これは複数経路を生成する際に、最短経路の1.5倍以上の所要時間の経路を除外

表 - 3 東京～大阪間新幹線高速化の便益

	北海	東北	関東	北陸	中部	近畿	中国	四国	九州
北海	0	0	0	0	18	2	0	0	0
東北	0	0	1	1	6	15	4	1	1
関東	0	1	0	11	213	133	68	21	19
北陸	0	1	11	0	7	8	1	0	0
中部	18	6	213	7	4	-15	14	4	13
近畿	2	15	133	8	-15	0	0	1	1
中国	0	4	68	1	14	0	0	0	0
四国	0	1	21	0	4	1	0	0	0
九州	0	1	19	0	13	1	0	0	0
全国計 : 1100	(億円 / 年)								

表 - 4 航空便増便の便益

	北海	東北	関東	北陸	中部	近畿	中国	四国	九州
北海	0	3	121	0	7	8	0	0	0
東北	3	0	0	0	0	1	0	0	2
関東	121	0	0	0	0	24	9	2	76
北陸	0	0	0	0	0	0	0	0	0
中部	7	0	0	0	0	0	0	0	2
近畿	8	1	24	0	0	0	0	0	3
中国	0	0	9	0	0	0	0	0	0
四国	0	0	2	0	0	0	0	0	0
九州	0	2	76	0	2	3	0	0	0
全国計 : 519	(億円 / 年)								

するルールを設けているため、最短経路の所要時間が大きく短縮された場合、結果的に生成される経路数が減少するためである。

航空便が増便された場合(表 - 4)は、本研究の手順では所要時間に影響は無く、増便があったリンクを利用する経路を含む都道府県間のみ影響が及ぶため、負の便益は発生しない。年間では519億円の便益が発生する。

7 . おわりに

本研究では、鉄道・航空ネットワーク上で利用することができる複数経路を明示的に考慮したネットワーク評価手法を提案し、評価を行った。しかし、計算手順に依存して負の便益が発生する地域間が見られるなど、手法に改良の余地が残されていることが明らかとなった。

参考文献 :

1) 加藤直樹、茨木俊英、三根久 : 無向グラフの第K最短単純路を求めるO(Kn)アルゴリズム、電気通信学会論文集、Vol.J-61A,N0.12,1978.