

**投稿論文(和文)**

**PAPERS**

# 複合交通手段を考慮した交通ネットワーク 均衡モデルに関する研究

宮城俊彦<sup>1</sup>・水口晴男<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 岐阜大学教授 工学部土木工学科 (〒501-11 岐阜県岐阜市柳戸1-1)

<sup>2</sup>正会員 (榎長大)

交通計画を策定するうえで重要な役割を担う需要予測モデルの一つとして、乗り換えを生ずる異種交通手段の利用を考慮した端末交通手段を含む機関分担・配分統合モデルを提案する。利用者の手段選択過程を、端末交通手段選択、ターミナル選択、複合モード選択のネスティッドロジットモデルで表現し、複合交通手段選択と均衡配分を同時に予測するモデルを最適解として持つネットワーク均衡モデルのもとで構築し、計算手法を提案している。また、例題計算をとおして提案モデルの有効性と適用性を考察した。

*Key Words* : mixed mode, network equilibrium, nested logit model, travel behaviour analysis

## 1. はじめに

近年、モータリゼーションの伸展とライフスタイルの変化に伴い自動車利用に対するニーズは、生活の豊かさの中で多様化してきている。このため、都市郊外における住宅地のスプロール化により都市近郊地域では自動車の保有率が増加する傾向にある。これに伴って、駅までのアクセス手段としての徒歩の割合が減少し、また、公共交通手段のサービスレベルが自動車に比べて相対的に低水準であることから、自動車をアクセス手段として利用するトリップが増加してきている(表-1参照)。鉄道駅付近における駐車場が不足している現状を考えると、このような自動車アクセスの増加はパークアンドライド(P&R)やキッスアンドライド(K&R)の利用が増加していることを物語っていると見ることができよう。このような各種の交通手段間の乗り換えが発生する交通結節点は交通計画を策定していく上で考慮すべき重要な計画要素であり、代表交通手段を前提とした従来型の交通需要予測モデルでなく、端末交通を含めた2つ以上の交通手段を利用するトリップを分析できる交通需要予測モデルが必要である。

本研究では、個人の交通手段選択において端末交通手段を含む利用交通機関を複合モードと呼び、単一モードと区別する。こうした複合モードを含む交通手段選択において重要となるのが、どの地点で乗り換えを行うかという鉄道駅やバス停留所(ターミナルと総括する)の選択問題とそこまでのアクセス交通の選択問題である。ネスティッド・ロジットを用いた駅・アクセス手段同時選

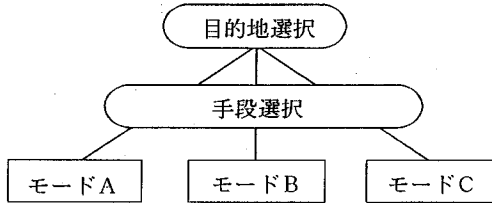
択については原田・太田<sup>1)</sup>による実証分析があり、また、複合モードの選択問題全般について、Ortuzar<sup>2)</sup>は既存研究のレビューを含めて紹介している。しかし、これらはいずれも手段選択問題のみを論じたものであり、ネットワーク均衡問題との関連には言及していない。最近、Fernandezら<sup>3)</sup>は複合モード選択ネットワーク均衡問題を統合した同時モデルを提案している。ただし、端末交通手段は自動車アクセスのみに限定している。本研究は、乗り換えを生ずる異種交通機関を利用するトリップに対し、ネスティッド構造を反映した端末交通手段選択・ターミナル選択そして自動車との競合をも考慮した交通ネットワーク均衡モデルを提案し、その解法を示すことを目的とする。このモデルはFernandezらの(モデル3)を特殊ケースとして含むより一般性のある複合交通手段選択・配分同時決定モデルである。

以下では、まず2.で、複合モードを考慮したときのモーダル・スプリットの基本的な考え方について示す。本研究ではモーダル・スプリットの考え方として端末手段選択を下位選択肢とし、複合モード選択を上位選択肢とするネスティッド構造のモデルを採用する。3.では、自動車との競合を反映するため機関分担・配分同時モデルに対する基本的アプローチを検討する。ここでのモデル化の基本的視点は、複合モードを含む交通機関選択問題を交通ネットワーク上の経路選択問題として扱うか、あるいはターミナル固有の魅力度を反映するために機関選択・配分統合モデルとして扱うかという点である。この視点より4つのモデル化の方向が可能であることを示す。4.では、ターミナル固有の魅力度を反映させるため

表-1 中京圏の鉄道端末交通手段の利用状況

		徒 歩	二 輪 車	自 動 車	バ ス
居住地 から 初乗駅 まで	昭55年	391.068 (47.9)	193.887 (23.8)	56.131 ( 6.9)	175.106 (21.4)
	昭60年	351.575 (43.8)	270.192 (33.7)	55.796 ( 7.0)	124.425 (15.5)
	平2年	343.834 (37.9)	333.783 (36.8)	93.858 (10.4)	135.072 (14.9)

上段：利用人員（人/日・片道） 下段：分担率（%）



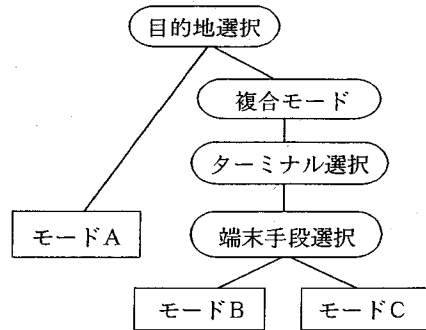
a) 個別モード選択

の統合モデルとしての定式化を示す。すなわち、ネスティッド構造を反映した端末交通手段選択・ターミナル選択そして自動車との競合をも考慮した交通ネットワーク均衡モデルの定式化を示し、その計算手法を提案する。5.では、簡単な数値計算例を通して、提案するモデルと計算手法の有用性を検討する。

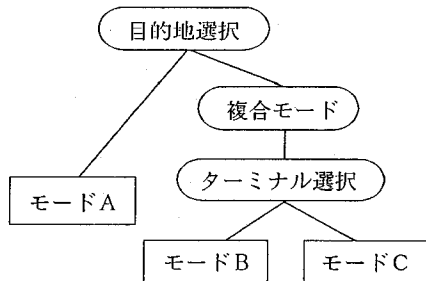
## 2. モーダル・スプリットの考え方

複合モードを含む場合のモーダル・スプリットのモデル化は、基本的に次の2つのアプローチに分類できよう。すなわち、a) 個別モード選択、b) ネスティッド選択の各々のアプローチである。

a) は、通常の代表交通手段選択モデルと同じ考え方で複合モードも1つの個別選択肢として取り扱うものである。このアプローチでは端末交通手段及びターミナルの選択はあらかじめ与えられていることが前提となり、トリップ行為者の選択構造が完全に反映できないため政策感応型のモデルとはならない。b-1) は、選択樹を仮定したネスティッド構造をもっており、下位選択肢に端末交通手段を含み、複合モードの合成費用と単一モードの費用との比較によって交通手段選択が決定されるというものである。この場合、ターミナル選択をどのように含ませるかはいくつかのバリエーションがある。b-2) は、b-1)の変種で、アクセスモードは与えられており、ターミナル選択を含めた複合モード選択として定式化される。後者は特にK&RとかP&Rのような特殊なトリップ形態に有効と思われる。本研究ではb-1)のモデルを採用する。



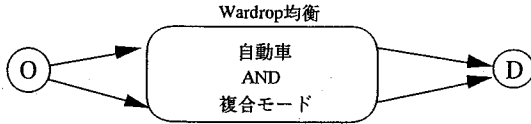
b-1) ネスティッド選択



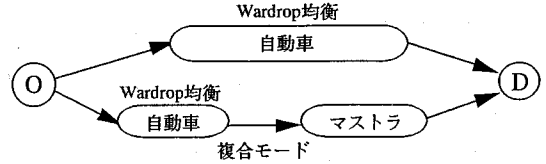
b-2) ネスティッド選択

## 3. 複合モードを含む交通ネットワーク均衡モデルの4つのアプローチ

交通機関選択を含むネットワーク均衡モデルは、機関分担・配分統合モデル (Joint Modal Split/Assignment Model: 以下JMSAモデルと略称する) と呼ばれている<sup>9)</sup>。JMSAは代表交通機関選択を対象にしており、端末手段選択を扱うためには分析者が適当にアクセスネットワークを付加して処理することが必要になる。ネットワーク問題の拡張問題として端末手段を取り扱うためには、選択要因がリンク抵抗として表現可能な変数に限定されるため乗り換え地点の選択に伴うターミナルの魅力度 (ターミナルでの利用可能な交通機関数や運行頻度などの利用可能交通機関のサービス特性、乗り換えの容易さ、駐車場面積、P&RやK&Rの利便性等)をどのようにモデルに組み込むかが問題になる。本研究では、この問題を解決するためJMSAとネスティッドロジットモデルを組み合わせた手法を提案している。以下では、拡張ネットワークの思想に基づく2つのネットワーク分析のアプローチと2つのネスティッドアプローチについて、複合モード選択を含むネットワークモデルという観点から検討する。



図一 拡張ネットワークを適用した概略図



図二 ターミナル転換を考慮した概略図

### (1) Wardrop 均衡モデルの応用

図一に示すように、自動車ネットワークと複合モード利用を考慮したネットワークを作成し、そのネットワーク上でWardrop均衡が成立するようにODフローを配分して、自動車リンク、マストラリンクのフローを求めようとするアプローチである。したがって、単一モード利用、複合モード利用のすべてにおいてODペア間の所要時間(コスト)は等しくなる。このアプローチでは機関分担モデルは必要なく、1つの経路選択問題としてマストラモードが選択される。機関分担モデルにWardropの等時間原則を導入した実証分析がMorison<sup>9)</sup>によって行われているが、配分との同時予測とはなっていない。複合モード選択という視点からみると、このアプローチは最小コストのモードが選択されるという意味でマストラの利用者数を過小推定する可能性がある。乗り換えを含むマストラ利用は自動車利用に比べ所要時間がかかり、最小費用経路とはならないケースが多いためである。また、ターミナル選択におけるターミナルの魅力度が考慮できない、ネットワーク作成が複雑になる、などの欠点をもつ。

### (2) 確率均衡配分モデルの応用

このアプローチは、拡張ネットワーク上での経路選択問題として複合モード選択を扱う点は(1)のアプローチと同様であるが、確率配分手法を用いる点でマストラを過小推定する危険性は少なくなる。リンク尤度関数として指数タイプのものを用いれば、機関選択モデルをロジット型、配分としては確率配分を実行すると同様の効果をもつと予想される。ただ、ネットワーク作成に手間がかかること、また、経路選択問題として考えているので、あるターミナルから乗車した人が目的地近くのターミナルではなく、それよりも手前のターミナルで降り、目的地までは道路ネットワークを利用するケースが生じ、交通機関選択問題としては不合理な行動となる。また、アクセス、イグレスの交通手段が何で行われているかが分からない。徒歩アクセスは別として、バスアクセスなどは道路網とリンクを共有するので、異なるリンクとしてバス網を表現するならば、ネットワーク作成にかなりの労力を要することになる。これらの問題はアプローチ(1)にも同様に当てはまることである。

### (3) 機関分担・配分同時モデル

JMSAには、マストラの所要時間を固定し、自動車ネットワークとは独立に考えるモデルとマストラの走行時間の混雑遅れを考慮できるモデルの2つのタイプがある<sup>9)</sup>。いずれのモデルも複合モードを扱っていないが、自動車アクセスという単一の端末交通機関のみを考慮すれば複合モード選択・配分同時モデルとして拡張できる(図二参照)。この種の複合モードモデルはFernandezら<sup>9)</sup>によって提案されており、複合モード利用におけるターミナル魅力度を考慮したターミナル選択と機関分担のネステッド構造が実現されており、本研究の意図するアプローチに最も近いといえる。ただし、Fernandezらのモデルでは端末交通手段は自動車のみに限定されており、また、具体的な計算手法は提示されていない。

### (4) 端末交通手段選択を含む複合モード選択モデル

端末交通手段選択、ターミナル選択そして複合モード選択という3段階の選択行動をネステッド構造として捉えこれを機関選択モデルとしてモデル化する。そして複合モードと自動車が競合するように交通ネットワーク均衡モデルのフレーム中でこれを数学的に定式化しようとする試みである。ネステッド・ロジットの共役関数はエントロピーの和で表現されることが宮城<sup>10)</sup>によって示されており、したがって、適当なエントロピー関数とWardrop均衡の目的関数を組み合わせることによって数理モデルを得ることができよう。この考え方に基づくモデルについては次節に詳説する。このモデルは手段選択の行動論側面からみても合理的であるし、また、複雑な拡張ネットワークを作成する労力が(1)、(2)に比べてはるかに少ないというメリットを持つ。

## 4. 端末交通手段選択を含む機関分担・配分統合モデル

### (1) 前提条件

3.(4)で述べた考え方に沿ったモデルを行うにあたって次の前提をおく。

- ① 端末交通手段は自動車とバスのみを考慮する(無論、3手段以上にも拡張可能であるが式を簡単にするため2モードに限定した定式化を示す)。

- ②代表手段は自動車と鉄道のみを対象とする。
- ③鉄道の所要時間の混雑遅れはないものとする（代表手段としてバスを対象とした場合はこの仮定は不適切であるが、混雑遅れが考慮できるように拡張することは容易である）。
- ④バスアクセス時間は与件で固定されている（自動車交通との混合に伴う遅れを考慮することは可能である）。
- ⑤モード個々の属性、ターミナル属性はある尺度で与えられるものとし、各々パラメータ  $\alpha_{rs}$ ,  $\pi_t$  として与える（ただし、実際の運用に当たってはこれらの尺度はいくつかの説明変数を含む回帰モデルとして設定される）。
- ⑥鉄道利用のイグレス手段は考慮しない（モデル定式化上は考慮していないが、実用上はターミナルを起点する端末交通手段として処理できる）。

## (2) モデルの定式化

今、OD ペア  $rs$  間のトリップ  $\bar{q}_{rs}$  が与えられているものとする。このとき、ターミナル別端末交通手段、ターミナル選択そして複合モードと自動車の競合を考慮したネットワーク均衡問題は以下に示すような数理最適化問題として定式化できる。

[P]

$$\begin{aligned} \min Z = & \sum_{a \in A} \int_0^{x_a} t_a(\omega) d\omega + \sum_{a \in M} t_a^m x_a^m \\ & + \sum_{rs} \int_0^{\bar{q}_{rs}} \left( \frac{1}{\theta_1} \ln \frac{\omega}{\bar{q}_{rs} - \omega} + \alpha_{rs} \right) d\omega \\ & + \sum_{rs} \sum_{t \in T_{rs}} \int_0^{\bar{q}_{rs,t}} \left( \frac{1}{\theta_2} \ln \frac{\omega}{\bar{q}_{rs,t} - \omega} \right. \\ & \left. + \pi_t + \hat{u}_{rs,t}^b \right) d\omega \\ & - \frac{1}{\theta_3} \sum_{rs} \bar{q}_{rs,t} \ln(\bar{q}_{rs,t} - 1) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{k \in p_{rs}^a} f_k^{rs} = \bar{q}_{rs} - \bar{q}_{rs} \quad (\lambda_{rs}) \quad (2a)$$

$$\frac{1}{\gamma_1} \sum_{rs} \sum_{k \in p_{rs}^a} \delta_{ak}^{rs} f_k^{rs} + \frac{1}{\gamma_2} \sum_{rs} \sum_{k \in p_{rs}^m} \delta_{ak}^{rs} f_k^{rs} = x_a \quad (\varepsilon_a) \quad (2b)$$

$$\sum_{rs} \sum_{k \in p_{rs}^m} \hat{\delta}_{ak}^{rs} \hat{f}_k^{rs} = x_a^m \quad (\varepsilon_a^m) \quad (2c)$$

$$\sum_{k \in p_{rs}^a} f_k^{rs} + \sum_s \bar{q}_{rs,t}^b = \bar{q}_{r,t} \quad (\omega_{r,t}) \quad (2d)$$

$$\sum_{k \in p_{rs}^a} \hat{f}_k^{rs} + \sum_t \hat{q}_{rs,t}^b = \hat{q}_{t,s} \quad (\omega_{t,s}) \quad (2e)$$

$$\sum_s \bar{q}_{rs,t} = \bar{q}_{r,t} \quad (\varphi_{r,t}) \quad (2f)$$

$$\sum_r \bar{q}_{rs,t} = \bar{q}_{t,s} \quad (\varphi_{t,s}) \quad (2g)$$

$$\sum_{t \in T_{rs}} \bar{q}_{rs,t} = \bar{q}_{rs} \quad (\phi_{rs}) \quad (2h)$$

制約条件に対応した Lagrange 未定乗数は ( ) 内のギリシャ文字で示す。目的関数の第 2 項～4 項に見るように、トリップのネステッド構造は上位、下位の変数のエン

トロピー和で表現でき、それらの変数は制約条件で結びつけられるような構造を持つ。問題 [P] において、原則として「 $\wedge$ 」は複合モードに関係した変数を表す。なお、自動車利用トリップについては、駅アクセトリップは、利用経路集合  $P_{rs,t}^a$  によって、また、代表交通手段としての自動車トリップは利用経路集合  $P_{rs}$  によって識別されている。式における記号の説明は以下の通りである。

$t_a(\cdot)$ : 道路網リンク  $a(\in A)$  の走行時間関数

$t_a^m$ : 鉄道網リンク  $a(\in M)$  の走行時間

$x_a$ : リンク  $a(\in A)$  の交通量

$x_a^m$ : リンク  $a(\in M)$  の交通量 (乗客数)

$\bar{q}_{rs}$ : OD ペア  $rs$  の複合モードトリップ

$\bar{q}_{rs}$ : OD ペア  $rs$  のトリップ数 (固定)

$\bar{q}_{rs,t}$ : OD ペア  $rs$  でターミナル  $t$  を利用する総トリップ数

$\bar{q}_{rs,t}^b$ : OD ペア  $rs$  でターミナル  $t$  を利用する端末バストリップ数

$\gamma_1$ : 端末手段としての自動車利用のときのロードファクター

$\gamma_2$ : 代表交通手段としての自動車利用のときのロードファクター

$f_k^{rs}$ : OD ペア  $rs$  の端末利用を含むすべての自動車トリップのうち経路  $k$  を選択するトリップ数

$\hat{f}_k^{rs}$ : OD ペア  $rs$  の鉄道トリップのうち経路  $k$  を選択するトリップ数

$\delta_{ak}^{rs} = \begin{cases} 1: & \text{道路網のリンク } a \text{ が経路 } k \text{ 上に存在するとき} \\ 0: & \text{そうでないとき} \end{cases}$

$\hat{\delta}_{ak}^{rs} = \begin{cases} 1: & \text{鉄道網のリンク } a \text{ が経路 } k \text{ 上に存在するとき} \\ 0: & \text{そうでないとき} \end{cases}$

$\bar{q}_{r,t}$ : 起点を  $r$  とする複合モード利用トリップでターミナル  $t$  を利用するトリップ数

$\hat{q}_{t,s}$ : 目的地  $s$  をもつ複合モード利用トリップでターミナル  $t$  を利用するトリップ数

$P_{rs}^a$ : 道路網における OD ペア  $rs$  での利用可能経路集合

$P_{r,t}^a$ : 道路網における起点  $r$  からターミナル  $t$  への利用可能経路集合

$P_{t,s}^m$ : 鉄道網ターミナル  $t$  から目的地  $s$  への利用可能経路集合

$T_{rs}$ : OD ペア  $rs$  において鉄道を利用する場合の利用可能ターミナル集合

上述の数理最適化問題を解くことによって以下の関係式を得ることができる。

### ① アクセス交通手段選択

OD ペア  $rs$  において、ターミナル  $t$  を選択する場合のバストリップ数  $\bar{q}_{rs,t}^b$  は次式で与えられる。

$$\bar{q}_{rs,t}^b = \bar{q}_{rs,t} \frac{\exp(-\theta_2 \bar{u}_{rs,t}^b)}{\exp[-\theta_2(\bar{u}_{rs,t}^a + \pi_t)] + \exp(-\theta_2 \bar{u}_{rs,t}^b)} \quad (3)$$

自動車アクセストリップ数は  $\bar{q}_{rs,t}^a = \bar{q}_{rs,t} - \bar{q}_{rs,t}^b$  で与えられる。ここで、 $\bar{u}_{rs,t}^a$ 、 $\bar{u}_{rs,t}^b$  は各々、アクセスモードとして自動車及びバスを利用してターミナル  $t$  を経由する場合の OD ペア  $rs$  間の所要時間で  $\bar{u}_{rs,t}^i = \bar{u}_{rs,t}^i + \bar{u}_{rs,t}^o$  ( $i = a, b$ ) と与えられる。すなわち、乗り換え後の鉄道による時間はアクセス手段によらず同じ値になるので手段別アクセストリップ数はターミナル  $t$  へのアクセス時間  $\bar{u}_{rs,t}^i$  ( $i = a, b$ ) のみで表現されることに注意する。したがって、式(3)は次のように簡略化できる。

$$\bar{q}_{rs,t}^b = \bar{q}_{rs,t} \frac{\exp(-\theta_2 \bar{u}_{rs,t}^b)}{\exp[-\theta_2(\bar{u}_{rs,t}^a + \pi_t)] + \exp(-\theta_2 \bar{u}_{rs,t}^b)} \quad (3')$$

このとき、 $\bar{u}_{rs,t}^i$  は混雑遅れを含み、起点  $r$  からターミナル  $t$  の自動車交通に対しては Wardrop 均衡が成立する。また、端末交通手段が3個以上存在するとき、(3')は通常多項ロジットモデルとなり、後に示す駅  $t$  までの合成費用を表す式(5)は、それに対応した log-sum 関数となる。

## ② ターミナル選択

ターミナル  $t$  を利用する複合モードトリップ数  $\bar{q}_{rs,t}$  は、次のロジット型で表される。

$$\bar{q}_{rs,t} = \bar{q}_{rs} \frac{\exp(-\beta \bar{u}_{rs,t})}{\sum_{t \in T_{rs}} \exp(-\beta \bar{u}_{rs,t})} \quad (4)$$

ただし、ターミナル  $t$  を経由する OD ペア  $rs$  の複合モード所要時間  $\bar{u}_{rs,t}$  はアクセス手段ごとに異なるが、その代表値は次の log-sum 関数で与えられる。

$$\bar{u}_{rs,t} = \pi_t - \frac{1}{\theta_2} \ln[\exp\{-\theta_2(\bar{u}_{rs,t}^a - \pi_t)\} + \exp(-\theta_2 \bar{u}_{rs,t}^b)] \quad (5)$$

## ③ 複合モード選択

OD ペア  $rs$  の複合モードトリップ数  $\bar{q}_{rs}$  は、次のロジット型で表される。

$$\bar{q}_{rs} = \bar{q}_{rs} \frac{\exp(-\theta_1 \bar{\phi}_{rs})}{\exp[-\theta_1(u_{rs} - a_{rs})] + \exp(-\theta_1 \bar{\phi}_{rs})} \quad (6)$$

ここで、 $u_{rs}$  は自動車による OD ペア  $rs$  間所要時間で Wardrop 均衡を満足するように定められる値である。また、OD ペア  $rs$  間の複合モード所要時間  $\bar{\phi}_{rs}$  は、ターミナル  $t$  を経由する複合モード所要時間の合成を含む形で、次の log-sum 関数で表される。

$$\bar{\phi}_{rs} = \frac{1}{\beta} \ln \bar{q}_{rs} - \frac{1}{\beta} \ln \sum_{t \in T_{rs}} \exp(-\beta \bar{u}_{rs,t}) \quad (7)$$

式(7)で示されるように、本モデルの均衡体系ではすべての変数を陽的に表現することはできない。したがって、「(4)計算手法」で示すように、 $\bar{q}_{rs}$  を仮定し、反復計算によって諸変量の値を決めていく必要がある。

## ④ ネットワーク均衡

自動車ネットワーク上の交通流は Wardrop 均衡を満

足する。また、ターミナル  $t$  までの自動車アクセスについても Wardrop 均衡が成立する。すなわち、

$$\begin{aligned} \text{if } f_k^{rs} > 0, \text{ then } u_k^{rs} &= u^{rs}, k \in P_{rs}^a \\ \text{if } f_k^{rs} > 0, \text{ then } \bar{u}_k^{rs,t} &= \bar{u}_{rs,t}^a, k \in P_{rs,t}^a \end{aligned}$$

が成立する。

上述の最適化問題 [P] において、マストラの所要時間を混雑遅れの影響を加味するように定式化するためには、目的関数の第2項を

$$\sum_{a \in M} \int_0^{x_a^*} t_a^m(\omega) d\omega$$

とおけばよい。また、Fernandez ら<sup>3)</sup>の(モデル3)は本モデルの端末選択数を1モードに限定したとき、すなわち  $\bar{q}_{rs,t} = \bar{q}_{rs,t}^a$  といった場合に等しい。

## (3) 解の一意性

最適化問題 [P] が実行可能な範囲で唯一解を持つことを証明するためには、実行可能な範囲で目的関数  $Z$  が厳密に凸であることを示せば十分である。つまり、目的関数のヘシアンが正値定符号行列であることを証明すれば良い。目的関数のそれぞれの項に含まれる決定変数によって、目的関数は分離可能である。したがって、ヘシアンの構造は  $m \times m$  の行列のブロックで構成されるブロック対角行列となる。ここで、 $m$  は決定変数の次元を示す。ヘシアン  $H$  の構造は次のようになる。

$$H = \begin{bmatrix} H_{\bar{q}_{rs}} & & & 0 \\ & H_{\bar{q}_{rs,t}^b} & & \\ & & H_{\bar{q}_{rs,t}^a} & \\ 0 & & & H_{\pi_t} \end{bmatrix}$$

ここで、それぞれの決定変数のヘシアンは対角要素以外はすべてゼロであり、対角要素はすべて目的関数の2次導関数である。目的関数のそれぞれの項のヘシアンは以下のようになる。

$$\begin{aligned} H_{\bar{q}_{rs}} &= \frac{1}{\theta_1} \frac{\bar{q}_{rs}}{\bar{q}_{rs}(\bar{q}_{rs} - \bar{q}_{rs})} \\ H_{\bar{q}_{rs,t}^b} &= \frac{(\theta_3 - \theta_2) \bar{q}_{rs,t} + \theta_2 \bar{q}_{rs,t}^b}{\theta_2 \theta_3 \bar{q}_{rs,t} (\bar{q}_{rs,t} - \bar{q}_{rs,t}^b)} \\ H_{\bar{q}_{rs,t}^a} &= \frac{1}{\theta_2} \frac{\bar{q}_{rs}}{\bar{q}_{rs}^b (\bar{q}_{rs} - \bar{q}_{rs}^b)} \end{aligned}$$

これらはパラメータ  $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $\theta_3$  が全て正値ならば正値となるので、ヘッセ行列の2次形式は正値をとり、目的関数が厳密な凸関数となることが分かる。

## (4) 計算手法

[P] によって表現される均衡問題の解を求めるための計算方法を述べる。このモデルでは、ゾーン間分布交通量  $\bar{q}_{rs}$  は固定されているが、モード別の分布交通量は各モードの相対的な交通サービス水準に応じて変化する。したがって、この問題は一種の需要変動型交通均衡問題といえる。本研究のモデルは、複合モードトリップ  $\bar{q}_{rs}$

が決定されれば、ターミナル別の複合モードトリップ、アクセストリップ、複合モード所要時間は一意に得られるので、均衡配分問題の代表的な解法である Frank-Wolfe 法のアルゴリズムを適用して解くことが可能である。すなわち、本モデルの計算アルゴリズムは以下のようなになる。

- Step 1: 複合モードトリップ  $\{\bar{q}_{rs}\}$  を仮定する。  
 Step 2:  $\{q_{rs} = \bar{q}_{rs} - \bar{q}_{rs}\}$  より自動車利用トリップを求め、ゼロフロー時の最短経路に配分を行う。  
 Step 3: 自動車利用における OD 所要時間  $\{u_{rs}\}$  を求める。  
 Step 4: 複合モード利用での各ターミナル  $t$  を利用する場合のアクセス手段別の OD 所要時間  $\{\bar{u}_{rs,t}^a, \bar{u}_{rs,t}^b\}$  を求め、式(5)より複合モード利用のターミナル  $t$  を経由する合成所要時間  $\{\bar{u}_{rs,t}\}$  を求める。  
 Step 5: 式(7)を用いて複合モード利用の OD 間合成所要時間  $\{\bar{\phi}_{rs}\}$  を求める。  
 Step 6: 式(6)を用いて、複合モード利用 OD トリップ  $\{\bar{q}_{rs}\}$  を求める。  
 Step 7: 式(4)よりターミナル  $t$  を経由する複合モード利用トリップ  $\{\bar{q}_{rs,t}\}$  を求め、式(3)を利用してターミナル  $t$  を利用するアクセストリップ  $\{\bar{q}_{rs,t}^a, \bar{q}_{rs,t}^b\}$  を求める。  
 Step 8: リンク交通量配分を行い  $\{x_a, \bar{x}_a\}$  を求める。  
 Step 9: あらかじめ設定した  $\epsilon_1$  に対して、  

$$\sum_{rs} |\bar{q}_{rs}^{(n+1)} - \bar{q}_{rs}^{(n)} / \bar{q}_{rs}^{(n)}| \leq \epsilon_1$$
 を満足すれば終了する。  
 Step 10: 1次元探索によって目的関数  $z$  を最小にする結合パラメータ  $\alpha$  を求め、手段別 OD 交通量、リンク交通量の修正を行う。

Step 11:  $n = n + 1$  とおいて Step 3へ戻る。  
 以上の計算を通して、以下のような変数が求められる。

$$\{q_{rs}, \bar{q}_{rs}, \bar{q}_{rs,t}, \bar{q}_{rs,t}^a, \bar{q}_{rs,t}^b, x_a, \bar{x}_a\}$$

## 5. 数値計算例と考察

計算アルゴリズムは、各反復計算時点で求められる複合トリップの値が収束するかどうか、しかも一意的な解に収束するかどうか問題になる。ここでの数値計算の主要な目的はこの点を確認することにある。

### (1) 前提条件

数値計算に用いたネットワークを図-3に示す。ネットワークは、4つの都市間を道路ネットワーク、3路線からなるバスネットワークそして鉄道で結んでいる。代表交通手段に自動車と鉄道、末端交通手段に自動車、バス、徒歩が利用され、利用交通手段としては {自動車、

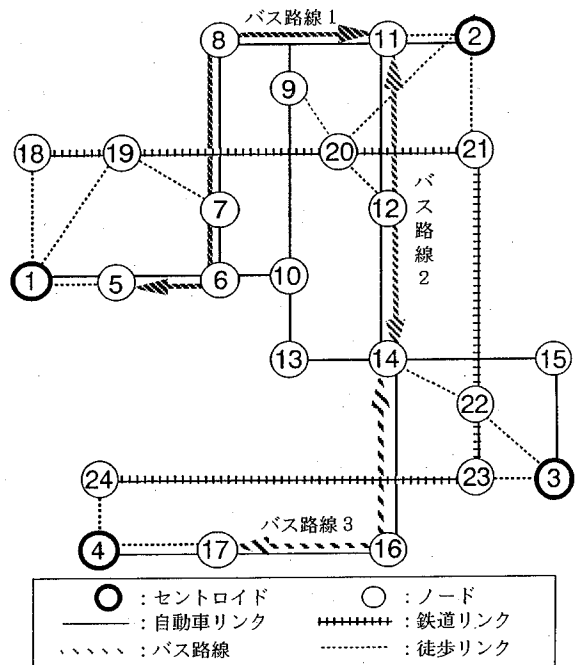


図-3 ネットワーク図

表-2 ゾーン間分布交通量

	都市 1	都市 2	都市 3	都市 4
都市 1	—	1000	2000	1500
都市 2	1000	—	2500	1000
都市 3	2000	2500	—	1500
都市 4	1500	1000	1500	—

徒歩+鉄道、自動車+徒歩+鉄道、バス+徒歩+鉄道)の4種類を想定した。自動車-鉄道、バス-鉄道において駐車場・バス停からの歩行の抵抗を表現できるように徒歩リンクを介在させている。また、駐車場を持たない都心部にあるターミナル (18, 21, 23, 24) と駐車場のある郊外のターミナル (19, 20, 22) を設定し、都心部のターミナルへの末端交通手段は徒歩のみとする。自動車ネットワーク上のリンクパフォーマンス関数には混雑影響を考慮できる BPR 関数を使用し、マストラや徒歩の所要時間は一定とする。表-2にゾーン間分布交通量を示す。また、計算に必要なパラメータは以下のように設定した。

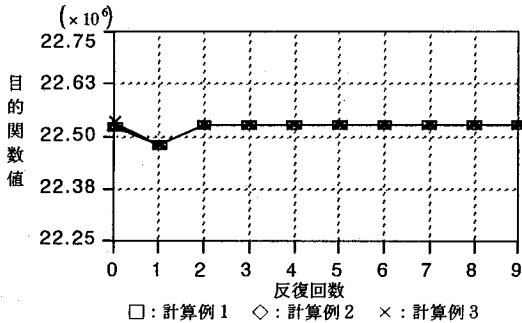
$$\theta_1 = 0.005, \theta_2 = 0.12, \theta_3 = 0.12146, \beta = 0.1$$

なお、上記パラメータについては問題 [P] の最適化条件を導く過程において下の関係が成立することが分かっており、この条件を満足するように定めている。

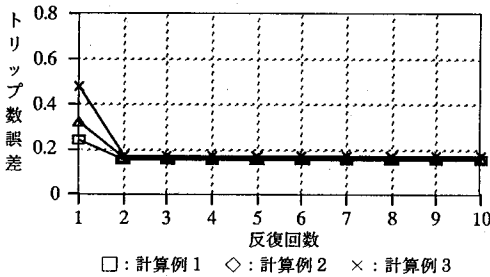
$$\beta = \frac{\theta_3 - \theta_2}{\theta_2 \theta_3}, \text{ただし, } \theta_3 > \theta_2$$

表一 初期設定比率  $r$  (%)

	計算例 1	計算例 2	計算例 3
初期設定比率 ( $r$ )	0.25	0.50	0.75



図一 目的関数の収束状況



図二 複合モードトリップ誤差

また、目的関数  $z$  に含まれるモード特定化定数  $a_{rs}$  はすべての OD ペアで  $a_{rs}=0.50$  と設定している。

(2) 計算結果と考察

① 解の収束性

異なる初期解を与えたときに、最終的に得られる均衡解の差異について調べる。表一は複合モードトリップの初期設定比率  $r$  を示したもので、3つの異なる初期解からのトータルトリップに対する均衡解の収束状況を検証した。図一に目的関数の収束状況、図二に複合モードトリップ誤差(計算アルゴリズムの Step 9 で定義された  $e$ )、表一に各ゾーン間の複合モードトリップ数の計算結果を示す。目的関数の値は、各々の計算例とも 4 回程度の反復回数で収束してほぼ等しい値となっている。複合モードトリップ誤差も 3 回程度の反復回数で収束し誤差がほぼゼロとなっている。比較的少ない反復回数で解が収束しているのは、設定したリンク交通容量が配分値に比べて比較的大きく、混雑効果がさほど効いてなかったためと考えられる。いずれにしても、各ゾーン間における複合モードトリップ数の計算値は各々の計算例とも 1% に満たない差の範囲に収束していることから、

表二 複合モードトリップの計算結果

	計算例 1	計算例 2	計算例 3
(1, 2)	415.44	415.44	415.46
(1, 3)	784.71	784.46	784.68
(1, 4)	590.55	590.54	590.53
(2, 3)	1018.62	1018.60	1018.58
(2, 4)	416.21	416.20	416.20
(3, 4)	603.35	603.36	603.36

表三 ターミナルの魅力度

	18	19	20	21	22	23	24
基準ケース	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
ケース 1	5.0	-10.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
ケース 2	5.0	5.0	-10.0	5.0	5.0	5.0	5.0

表四 複合モードトリップの推移

OD ペア	基準ケース	ケース 1	ケース 2
(1, 2)	415	428	418
(1, 3)	785	803	789
(1, 4)	591	604	594
(2, 3)	1019	1020	1030
(2, 4)	416	417	421
(3, 4)	603	605	605

往復合計	7696	7813	7748
------	------	------	------

提案手法が比較的効率的に一意解を与えることが分る。なお、図一において 1 回目の反復時点で目的関数が最小値を示しているが、これは図二から分かるように複合トリップの値が収束値に比較して大き目に算出されており、このため自動車トリップが小さくなり、目的関数の第 1 項の混雑を表す項が小さくなったためである。複合トリップは続く反復計算で収束しているため、目的関数も収束傾向を示しているが、複合トリップの計算値の変動がもっと大きくなる一般的なケースでは、目的関数も上下変動しながら収束するものと思われる。

② ターミナル属性の変化が手段選択に及ぼす影響

表三は各ターミナルの属性を表すパラメータ値  $\pi_i$  を示したもので、2つの異なるケースについて比較検討した。すなわち、ケース 1, 2 は各々、基準ケースに対し複数の端末交通手段が利用されるターミナル 19, 20 の魅力度を上げた場合であり、ここでは駐車容量が増加し、駐車ロットを探す時間が減少する場合を想定している。ただし、現実にモデルを運用する場合には、 $\pi_i$  は駐車場面積、その駅で利用可能な列車の運行頻度などの



表一七 ターミナル別、端末手段別トリップの構成

	基準ケース				ケース1				ケース2			
	自動車	バス	徒歩	合計	自動車	バス	徒歩	合計	自動車	バス	徒歩	合計
18	—	—	538	538	—	—	263	263	—	—	459	459
19	1695	30	0	1725	2535	70	0	2605	1350	25	0	1375
20	509	39	0	548	376	31	0	407	1604	119	0	1723
21	—	—	1311	1311	—	—	1157	1157	—	—	902	902
22	1167	116	0	1283	949	118	0	1067	1002	107	0	1109
23	—	—	1364	1364	—	—	1378	1378	—	—	1290	1290
24	—	—	927	927	—	—	935	935	—	—	890	890

ターミナルの魅力度を表す変数を含む回帰モデルで推定される尺度である。

表一六はケース1, 2に対応した複合モードトリップの変化を示している。基準ケースと比べケース1, 2ともに複合モード利用の総トリップ数は増加している。ゾーンペアの内訳でみると魅力度が上昇( $\pi$ の値が小さくなる)したターミナルを乗り換えに持つゾーン間では自動車から複合モードへの転換が図られ、そうでないゾーン間ではトリップ数はさほど変化しない傾向があった。表一七はターミナル別、端末交通手段別の複合モードトリップの構成を示している。ターミナル別の複合モード利用は、各々のケースともアクセシビリティが向上した郊外ターミナルへの自動車トリップの増加が著しく、徒歩アクセスからパーク・アンド・ライドのトリップへ移行することが分る。乗り換えや待ち時間等の少ない利便性の良いターミナルほどよく利用されるという実際の選択行動を表しているといえる。駅の魅力度の増加に伴い、端末手段としての自動車トリップが大きく増加しているのは、 $\pi_i$ の変化が相対的に自動車利用者の効用を高める方向に働いたことを示している。また、自動車端末の変化に較べ表一六に示される複合モードトリップ総数の変化が相対的に小さいのは、ネスティッドモデルでは下位選択肢ほど交通サービス水準の変化の影響をより大きく受けるというネスティッド構造の特徴を反映している。

以上の結果から、端末交通手段を含む機関分担・配分統合モデルは乗り換えが生ずるトリップを段階的に予測できること、そして提案した計算手法の解の取束性についても確認できた。

## 6. おわりに

本研究は複数の交通手段を利用するトリップに対し、端末交通手段選択、ターミナル選択を含む複合交通手段として捉え、自動車との競合を考慮した機関分担・配分

同時モデルの提案とその計算手法についての研究を行った。本研究で得られた成果は以下の通りである。

(1) 機関分担モデルをも内包するネットワーク配分モデルを構築することは可能であるが、ターミナル属性やアクセスモード特性を考慮した端末交通手段を含むネットワーク需要予測モデルの開発にはアクセスモード選択、ターミナル選択をネスティッド構造で表現し、ネットワーク均衡モデルと結合させるモデルの方が行動論的にも、実作業の面からも有効であることを示した。

(2) 複合モード選択を含む交通ネットワーク均衡問題を既存の機関分担・配分統合モデルを応用した数理最適化問題として定式化し、解の一意性、計算アルゴリズムを示した。

(3) 数値計算例により提案した計算アルゴリズムの有用性を確認した。また、乗り換えを必要とする異種交通手段を利用するトリップにおいて、端末交通手段に対する需要予測が可能であることを明らかにした。この種の分析はアクセス手段が交通混雑の影響を受けるような状況において特に有効であり、従って、P&R, K&Rの分析に効果を発揮すると期待できる。

しかし、以下に示すような課題も残しており、今後の実証分析への適用も含め実用化への検討が必要である。

(4) 複合交通手段選択モデルが、利用者数それ自身を説明変数とするモデルで与えられ、集積の経済がモード選択に働くモデル構造となっている。こうしたモード選択モデルの行動論的含意を確認する必要がある。

(5) ネスティッド構造を変え、上位と下位の選択を入れ替えた場合には、定式化を若干変更する必要がある。

(6) 代表交通手段を3つ以上にすることができない。

## 参考文献

- 1) 原田昇, 太田勝敏: Nested Logit モデルの多次元選択への適用可能性, 交通工学, Vol. 18, No. 6, pp. 3-11, 1983.

- 2) J. de D. Ortuzar : Mixed-Mode Travel Demand Forecasting Techniques, *Transportation Planning and Technology*, Vol. 6, pp.81-96. 1980.
- 3) E. Fernandez, D.C. Joaquin, Florian, M. and C. Enrique : Network Equilibrium Models with Combined Modes, *Transpn. Sci.*, Vol. 28, No. 3, pp.182-192. 1994.
- 4) Sheffi : *Urban Transportation Networks*, Prentice-Hall. 1985.
- 5) Morison, J.B. : Equilibrium Concepts in Modal Split Modelling, *the Transportation Engineering Journal of ASCE*, Vol. 108, No. TES, pp.457-467. 1982.
- 6) 宮城俊彦, 渡部正樹, 加藤昇 : 土地利用-交通統合モデル化への確率選択理論の応用, 第18回日本都市計画学会学術研究発表会論文集, pp.247-252. 1983.

(1994.4.4 受付)

## A TRANSPORTATION NETWORK EQUILIBRIUM MODEL WITH MIXED MODES

Toshihiko MIYAGI and Haruo MINAKUCHI

This paper presents a model for predicting mixed mode trips within a network equilibrium framework, in which for given total origin-destination trips the trips of primal transits, of auxiliary transit as access mode and the users of terminals of those primal transits are simultaneously predicted. Access modes choice, terminal choice of transit and choice of primal transit are structured as the nested logit, being assumed to be competitive with the automobile choice. The model is formulated as a mathematical optimization program of which Kuhn-Tucker conditions provide a generalization of a combined modal split and assignment model. An iterative solution procedure is proposed to solve the mathematical program and its convergency is examined.