

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*

A Study for Transport Network Equilibrium Model Considering Composite Mode

宮城俊彦**・水口晴男***

By Toshihiko MIYAGI and Haruo MINAKUCHI

The purpose of this paper is to construct a model for forecasting a composite mode trip in the context of joint Modal Split / Assignment Model. It is important for access mode choice and transfer point choice in a composite mode to present how the choice process is. This paper examines modal choice behavior from a point of view of a joint choice of access mode and terminal choice behavior, and furthermore take account for a competitive situation of auto and a composite mode from the extended network equilibrium concept.

1.はじめに

近年の都市圏の拡大に伴う公共交通網の整備、あるいは都市内における自動車の増加による交通渋滞の発生などのため、パークアンドライドやキッスアンドライドのように鉄道やバスなどの公共交通機関を使って都市へ向かう人は少なくない。このような人々は、あるターミナルまでは自動車やバスで行き、そこで異種交通機関に乗り換えて目的地まで向かうと考えられる。そこで、自動車・バス・鉄道などの代表交通手段としてただ1つの交通機関だけを利用することを前提とした需要予測でなく、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交通計画を策定していく上で必要となってくる。

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¹⁾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、Ortuzar²⁾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³⁾は複合モード選択と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、端末手段は自動車アクセスのみに限定している。本研究の目的はFernandezらのモデルを特殊ケースとして含むような複合モード選択・配分同時モデ

*) キーワード 複合交通手段、交通ネットワーク均衡モデル

**) 正会員 工博 岐阜大学教授 工学部土木工学科
(〒501-11 岐阜市柳戸1-1)

***) 学生会員 岐阜大学大学院 工学研究科 土木工学専攻

ルを構築することである。

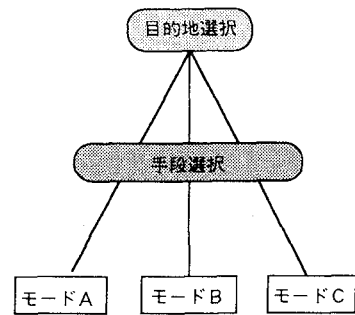
そこで、複合モードを考慮したときのモーダル・スプリットの基本的な考え方についてまず次節で触れる。本研究ではモーダル・スプリットの考え方として端末手段選択を下位選択肢とし、複合モード選択を上位選択肢とするネスティッド構造のモデルを採用する。次に、自動車の競争を反映するため機関分担・配分同時モデルに対する基本的アプローチを検討する。ここでのモデル化の基本的視点は、複合モードを含む交通機関選択問題も交通ネットワーク上の経路選択問題として扱うか、あるいはターミナル個有の魅力度を反映するために機関選択・配分統合モデルとして扱うかという点である。この視点より4つのモデル化の方向を示す。

本研究では、ターミナル個有の魅力度を反映させるための統合モデルとして定式化する方法を構築しており、その数理モデルと計算手法を最後の節で示す。結果として得られるモデルはネスティッド構造を反映して端末交通手段選択・ターミナル選択そして自動車との競争をも考慮した交通ネットワーク均衡モデルである。

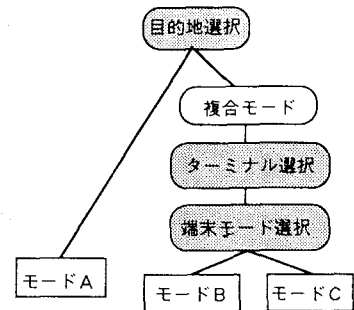
2. モーダル・スプリットの考え方

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のアプローチは基本的に次の2つに分類できよう。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。

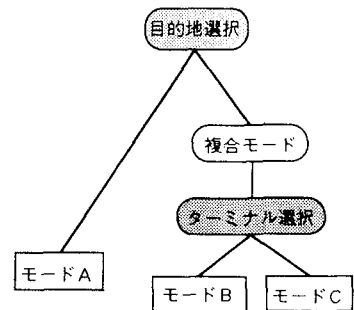
a) は、通常の代表交通選択モデルと同じ考え方で複合モードも1つの個別選択肢として取り扱うものである。このアプローチでは端末手段及びターミナルの選択はあらかじめ与えられていることが前提となり、トリップ行為者の選択構造が反映できないため政策感应型のモデルとはならない。b-1) は、選択樹を仮定したネスティッド構造をもっており、下位選択肢に端末交通手段を含み、複合モードの合成費用と単一モードの費用との比較によって交通手段選択が決定されるというものである。この場合、ターミナル選択をどのように含ませるかはいくつかのバリエーションがある。b-2) は、b-1) の変種で、アクセスモードは与えられており、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



a) 個別モード選択



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⁴⁾。JMSAは代表交通機関選択を対象にしておき、端末手段選択について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暗々裡に仮定されている。すなわち、ネットワーク問題の拡張問題として端末手段を取り扱っているが、

その場合の問題点としては乗り換え地点の選択に伴うターミナルの魅力度（乗り換えの容易さ、駐車場面積、ターミナルデパートでのショッピング・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。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的アプローチと2つのネステ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。

①Wardrop均衡モデルの応用

図1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Morison⁵⁾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を過小推定する可能性があり、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、あるいはネットワーク作成が繁雑になる、などの欠点をもつ。

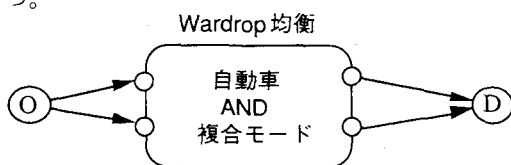


図1

②確率配分モデルの応用

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の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、それよりも遠いターミナルで降り、目的地までは道路ネットワークを利用するという交通機関選択問題としては不合理な行動が生じ易い。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重なっているため、異なるリンクとしてバス網を表現するならば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。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2参照）。この種の複合モードモデルはFernandezら³⁾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、端末交通手段選択は組み込んでおらず、また、計算手法も提示されていない。

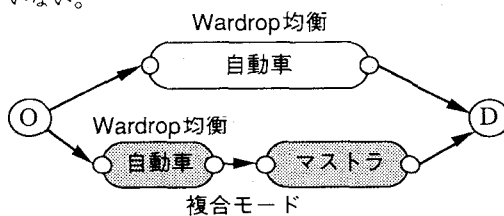


図2

④端末手段選択を含む複合モード選択モデル

端末交通手段、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。そして複合モード選択と自動車選択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⁶⁾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. 端末手段選択を含む機関分担・配分統合モデル

(1) 前提条件

④のアプローチ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過程は不適切であるが、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) モード個有の属性、ターミナル属性はある尺度で与えられるものとし、パラメータとして与える。
- (6) 鉄道利用のイグレスは考慮しない（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とする端末交通として処理できる）。

(2) 定式化

今、ODペアrs内のトリップ $\bar{q}_{rs}$ 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非線形最適化問題で与えられる。

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

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

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

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

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

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

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

$$\sum_t \hat{q}_{rs,t} = \hat{q}_{rs,t} \quad (\varphi_{rs,t}) \quad (2g)$$

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

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。また、原則として「^」は複合モードに関係した変数を表す。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 $a (\in M)$ の走行時間関数

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)

$\hat{q}_{rs}$: 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)

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

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

γ_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

γ_2 : door-to-door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

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

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

$\hat{q}_{rs,t}$: 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

$\hat{q}_{rs,t}^b$: 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

上の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 $\hat{q}_{rs,t}^b$ は次式で与えられる。

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

自動車アクセストリップ数は $\hat{q}_{rs,t}^a = \hat{q}_{rs,t} - \hat{q}_{rs,t}^b$ で与えられる。ここで、 $\hat{u}_{rs,t}^a, \hat{u}_{rs,t}^b$ 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 $\hat{u}_{rs,t}^i = \hat{u}_{r,t}^i + \hat{u}_{t,s}^m$ ($i=a, b$) 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 $\hat{u}_{r,t}^i$ ($i=a, b$) のみで表現されることに注意する。したがって、

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

このとき、 $\hat{u}_{r,t}^i$ は混雑遅れを含み、起点 r からターミナル t ではWardrop均衡が成立する。また、端末手段が3個以上存在するとき、(3')は通常の変項ロジットモデルとなり、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 $\hat{q}_{rs,t}$ は、次のロジット型で表される。

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

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 $\hat{u}_{rs,t}$ 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。

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

③複合モード選択

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

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

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 $\hat{\phi}_{rs}$ 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。

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

このように、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、次の(3)計算方法で示すように、 $\hat{q}_{rs}$ 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、

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

が成立する。

上述NLP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

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

とおけばよい。また、Fernandezら³⁾のモデルの目的関数は $\hat{q}_{rs,t} = \hat{q}_{rs,t}^b$ とおいた場合に等しい。

(3) 計算方法

数理最適化問題によって表現される均衡状態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。

- ① $\hat{q}_{rs}$ を仮定する。 $q_{rs} = \bar{q}_{rs} - \hat{q}_{rs}$ として自動車利用トリップが求められる。
- ② 自動車トリップを配分して、 u_{rs} を求める。
- ③ 複合モードの各ターミナル t を利用する場合のOD所要時間 $\hat{u}_{rs,t}^a, \hat{u}_{rs,t}^b$ を求める。
- ④ 式(5)より、複合モードのターミナル t を経由する合成所要時間 $\hat{u}_{rs,t}$ を求める。
- ⑤ 式(4)より、ターミナル t を利用する複合モード利用トリップ $\hat{q}_{rs,t}$ を求める。
- ⑥ 式(3)を利用してターミナルの端末交通手段数を求める。
- ⑦ 式(7)を用いて複合モード利用のODトリップ時間 ϕ_{rs} を求める。
- ⑧ 式(6)を用いて、複合モード利用ODトリップを再計算する。
- ⑨ 前に仮定した $\hat{q}_{rs}^{(n-1)}$ と⑧で求められる $\hat{q}_{rs}^{(n)}$ が許容誤差ないであれば計算を終了する、そうでなければ⑩へ進む。
- ⑩ 複合モード利用の自動車アクセストリップ $\hat{q}_{rs,t}^a$ を配分し、自動車の所要時間を修正する。
- ⑪ $\hat{q}_{rs} = \hat{q}_{rs}^{(n)}$ として置き換え、①に戻る。

以上の計算を通して、以下のような変量が求められる。

$$[q_{rs}, \hat{q}_{rs}, \hat{q}_{rs,t}^a, \hat{q}_{rs,t}^b, \hat{q}_{rs,t}, \hat{q}_{r,t}, x_a, x_a^m]$$

5. おわりに

本研究では、代表交通手段だけでなく端末交通手段を含んだ複合モードとして機関分担・配分同時モデルを構築するにあたり、どのように手段選択を扱うかという視点よりモデル化の方向を検討した。その結果、利用者の選択構造に類似性の異なる選択肢を考慮できる階層構造を用いることにより、モード特性やターミナル特性をより明確に反映できることが明らかとなった。

次に、手段選択を3段階の階層構造、すなわち端末手段選択、ターミナル選択そして複合モード選択とし、交通ネットワーク均衡のもとで機関分担・配分統合モデルとして定式化した。このモデルにより、乗り換えを生ずる組み合わせの異種交通手段を利用するトリップのそれぞれの交通手段に対する需要予測

が可能となった。また、端末交通種段数を拡張したり、混雑影響を考慮することで様々な複合モード解析モデルとして機能させることができる。たとえば、物流におけるミックス・モード分析、あるいは高速道路におけるIC選択問題などについても同様に解析できると考えている。

今後の課題としては、複合モードにおけるターミナル特性をどのような変数で表現するか検討する必要がある。また、実際に対象地域への分析を通してモデルの有用性を検討も図る必要もある。

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, C. Enrique: Characteristics of Composite Mode Modelling in the Context of Network Equilibrium, Paper Presented at WCTR in Ryon. 1991
- 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 晃: 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, pp247-252. 1983