

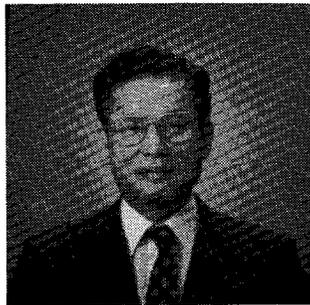
# 招待論文

## 交通量配分理論の系譜と展望

### A SYNTHESIS AND PERSPECTIVE OF TRAFFIC ASSIGNMENT MODELS

加藤 晃\*

By Akira KATO



#### 1. はじめに

わが国において交通量配分に関連する学術論文の第1号は、昭和32年(1957年)の第4回日本道路会議に提出された佐佐木<sup>1)</sup>による輸送計画法によるアプローチであろう。その後、星野<sup>2)</sup>は連立方程式によって交通量を推計する手法を提案し、等時間原則を導入した定式化を示している。また、平原<sup>3)</sup>は情報理論的エントロピー法を、坂下<sup>4)</sup>は時間価値分布に着目した転換率モデルを提案した。これらの研究は、交通配分理論に関するわが国の先駆的研究であり、そのアイデアは世界的にも十分通用するものであった。

一方、実際の道路網を対象に、電子計算機によるシミュレーションによって交通配分を行う手法が著者らによって提案され<sup>5)</sup>、実際に名古屋市道路網に適用された<sup>6)</sup>。また、星野も連立方程式モデルを北九州道路に適用し、電子計算機によって求解している<sup>7)</sup>。以上のわが国における交通配分理論の展開を踏まえ、1960年代までに合衆国で開発された手法のレビューが星野<sup>8)</sup>や松井<sup>9)</sup>によって行われている。

上述のようにわが国で交通配分研究の先鞭がつけられて以来30年を経て、現在の交通配分研究は当時とはかなり様相が異なってきた。特に、ここ数年来の諸外国での交通配分理論は、変分不等式問題あるいは相補性問題として定式化されるようになり<sup>10),11)</sup>、配分理論の一般化、精緻化が進行すると同時に、内容の理解にはかなり高度の数学的知識を必要とするようになってきた。また、わが国でもこの種の研究がなされるようになってきた<sup>12),13)</sup>。交通配分研究も新しい局面を迎えたといえることができる。

翻って、これまでの交通配分研究の発展を眺めると、星野や松井のレビュー論文以来久しく交通配分研究の足跡を辿る研究が行われていないのに気付く。交通配分研究は、1970年代に1つの転換期があった。それは1960年代に盛んに行われてきたシミュレーション手法から数理計画的技法を使った配分理論への移行である。したがって、1970年代に提案された種々の研究を包含するような総括的研究が必要と思われる。本研究の第1の着眼点もそこにある。

交通配分研究が進行するにつれて、多種多様なアプローチが提案されると同時に、いくつかの統一的な理論枠組が構成されてきた。その典型的なものがWardrop均衡理論(内容は2.(2)に示す)であり、さらにはラ

\* 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)

Keywords: traffic assignment model, traffic equilibrium

ンダム効用理論がそうである。こうした理論枠組の中心となる概念は、人の交通行動をどのような考え方で捉え、説明するかということである。理論は仮説からある結果を演繹するものであり、現象をいかに再現するかの点からはおのずから限界がある。本研究は、モデルの背景にある基本となる考え方を抽出する形で既存のモデルを分類し、その特質を明らかにしようとするものである。

ところで、現在研究されている交通配分研究の中心課題は交通均衡モデルであり、Wardropの配分原則以来、多くの研究者がこの命題に取り組んできた。現在の理論は、その形式こそ異なれ、基礎となる概念や手法は1960~1970年代の研究に見出すことができる。本研究では、Wardropの均衡原理の延長上にある需要・パフォーマンス均衡モデル、動的交通均衡モデルについても触れ、古典理論との関係を明らかにする。

また、交通配分理論に残された課題を、特に実務への応用という視点から整理し、改良の方向性を提示したい。

2. 交通量配分理論の分類と特質

(1) 交通量配分手法の一般的構造と分類基準

交通量配分モデルの基本的構成は、単一モード（交通機関を一種類だけとするもの、たとえば自動車交通について）のOD需要量をネットワークに負荷し、リンク交通量の平衡値およびその交通サービス水準を決定することである。ここで、ネットワークはノード（結節点）とリンク（結節点を結ぶ区間）からなる網状のものを指す。さらに、「平衡」という用語は、後で用いる「均衡」という用語と区別して用いており、ある基準のもとで「安定した状態になった」ことを示し、必ずしもWardropが提唱した意味での平衡状態を意味するものではない。

交通配分手法の一般的構造は、図-1のように表わすことができる。図-1は交通配分の構造を一般化したものであるが、この図の各段階の扱い方によって、交通配分理論の考え方と解法の主眼点が微妙に相異なるので、以下この図に沿って稿を進める。ここで、この図に用いられている記号は次のようである。

- $q_i$  : ODペア  $i$  の交通量
- $t_a$  : リンク  $a$  の交通抵抗
- $t_a(\cdot)$  : リンクパフォーマンス関数  
(リンク  $a$  の機能を示す関数、 $Q-V$  曲線もこの関数の一種である)
- $c_{ki}$  : ODペア  $i$  の  $k$  番目の経路の交通抵抗
- $f_{ki}$  : ODペア  $i$  の  $k$  番目の経路を利用する交通量
- $x_a$  : リンク  $a$  の交通量
- $u_i$  : ODペア  $i$  の交通抵抗
- $\delta_{aki}$  : リンク・経路結合行列  $\delta$  の要素

$$\delta_{aki} = \begin{cases} 1 : \text{ODペア } i \text{ の } k \text{ 番目の経路上にリンク } a \\ \text{がある場合} \\ 0 : \text{そうでない場合} \end{cases}$$

なお、後の説明のため、次のような添字の集合を定義しておく。

$I = \{i\}$  : ODペアの集合

$A = \{a\}$  : リンクの集合

$R_i = \{k\}$  : ODペア  $i$  が利用できる経路の集合

また、以下においては交通抵抗を所要時間によって代表させるものとする。

さて、図-1に示した交通配分プロセスを数学的に表現してみよう。プロセス (I) と (II) を結びつける関係は次のように表現できる。

$$c_{ki} = \sum_{a \in A} t_a \delta_{aki} \dots \dots \dots (1)$$

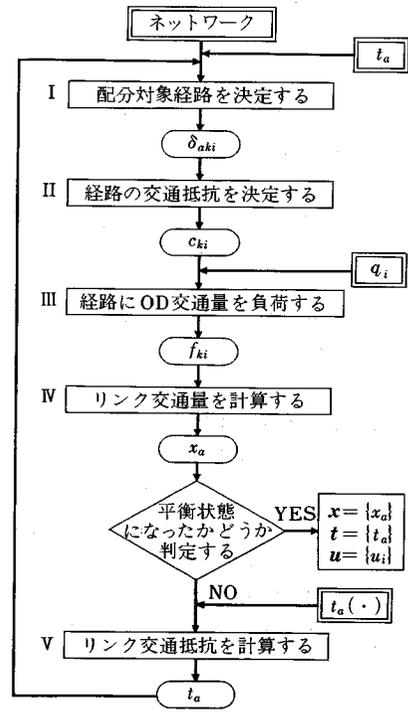
(III)において、OD交通量は配分対象経路へ分配されるが、そのとき次式が成立しなければならない。

$$q_i = \sum_{k \in R_i} f_{ki} \dots \dots \dots (2)$$

(III)と(IV)を結びつける関係は次式で与えられる。

$$x_a = \sum_{i \in I} \sum_{k \in R_i} \delta_{aki} f_{ki} \dots \dots \dots (3)$$

経路交通量  $f = \{f_{ki}\}$ 、リンク交通量  $x = \{x_a\}$  が物理的に意味のある量であるためには、次の非負条件を満足する必要がある。



□ インプット (与件)

図-1 交通配分の一般的な構造

$$f_{ki} \geq 0 \quad \forall k \in R_i, \forall i \in I \dots\dots\dots (4)$$

(V) のリンク所要時間の更新には、リンクパフォーマンス関数を用いられる。

$$t_a = t_a(x_a) \dots\dots\dots (5)$$

ここで、式(2)、(3)、(4)をフローの成立条件式とよび、交通量配分の基本となる式である。また、フローの成立条件式を満足する経路交通量  $F = \{f\}$  を可能交通量とよぶ。ある与えられたODパターン  $q$  を満足する可能交通量は無数に存在する。したがって、成立条件式はある特定のフローパターンを決定するための必要条件ではあるが、それだけでは十分でないことに注意を要する。

図一の全体プロセス(I)~(V)に、どのような手法を用いるかでさまざまな交通配分手法を構成することができる。言い換えれば、個々のプロセスに使われている手法を分類することによって、既存の交通配分手法が分類できるといえよう。ただし、(II)については、式(1)のリンク所要時間の加法性を前提としており、この仮定を変える配分手法は、現在のところ提案されていないので、考慮外とする。

図一の各プロセスにおいて用いられているモデルを対比的に分類すると次のようになる。

- (I) 単一経路モデルと複数経路モデル
- (III) 全数配分モデルと分割配分モデル
- (IV) 交通量修正モデルと単純負荷モデル
- (V) フローインディペンデント配分(配分される交通量は各リンクの交通量と無関係とする配分)モデルとフローディペンデント配分(配分される交通量は各リンクの交通量に支配されるとする配分)モデル

(I)はOD交通量を1本の経路のみに配分するか否かという視点であり、オール・オア・ナッシング配分かマルチパス配分かということである。また、(III)は全OD交通量を配分するか、分割されたOD交通量を配分するかの問題である。(IV)は、配分された結果生じるリンク交通量を次のプロセスにそのまま使うか、あるいはそれまでに配分された結果の情報を用いて修正して次のプロセスに使うかということであり、凸結合法やリンク平均化法などが修正法に含まれる。(V)は、リンク所要時間を計算する際、パフォーマンス関数を用いて値を修正するか、交通量に関係なく一定とおくモデルかということである。言い換えれば、「容量制約なし」か「容量制約付き」かということである。

既存の配分手法は、形式的には上述の分類基準で分類できるが、手法上の違いによる分類だけでは、交通配分理論のもつ本質を見落とす危険がある。したがって、交通配分理論の分類と特質という観点からは、さらに次の

ような基準が必要となろう。

(A) Wardrop 均衡モデルと非 Wardrop 均衡モデル  
Wardrop 均衡については次節に詳述するが、そのモデルと解法は次のように大別できる。

(A-1) 最適化モデルと連立方程式モデル

(A-2) 近似解法(シミュレーション)と厳密解法

(A)は人の交通行動をどのように捉えるかという交通配分理論の基礎となる行動仮説の違いを表現している。

(A-1)は(A)の表現形式であり、(A)での行動仮説を数学的に表現し、かつフロー成立条件式を加えた連立方程式を直接解くモデルなのか、それとも、それらの方程式系を等価な最適化問題に置き換えて解こうとするモデルかという違いを表現している。後者は、人の交通行動は何らかの最適化行動の表象であり、したがって、最適化モデルとして表現し得ることを前提としている。

(A-2)は、分類形態上は(A)の表現形式である(A-1)の解法の分類となるべきであろうが、実際の交通量配分手法の発展経緯はそうっておらず、(A)に対する直接的なアプローチとして発展してきた。すなわち、Wardropの均衡原理の数学的表現形式が提出された後に、その解法が研究されたのではなく、その概念の表現形式としてのシミュレーション手法の方が以前に提案され、後に数学的表現形式が普及したという歴史的経緯がある。すなわち、前述した種々の手法[(I)~(V)]の組合せがその表現形式であったといえる。本研究では(A)を大分類とし、その特質を議論することとする。

(2) Wardrop 均衡モデル

a) Wardrop 均衡の数学的表現形式

J. G. Wardrop<sup>14)</sup>は1952年に決のような2つの交通配分原則を提案した。

(i) 起終点間に存在する可能な経路のうち、利用される経路についてはみな等しく、利用されないどの経路のそれよりも小さい。

(ii) 道路網中の総走行時間は最小である。

(i)はWardropの第1原則あるいは等時間原則などとよばれている。(ii)はWardropの第2原則あるいは総走行時間最小化原則などとよばれている。本研究では、(i)と(ii)を含めてWardrop均衡原理とよぶが、特に断らない限り「均衡」という用語は第1原則を指すものと約束する。(ii)は平均所要時間関数(式(5))の代わりに、限界走行時間関数を用い、第1原則を適用した場合に実現されるフローパターンに相当する。さて、Wardropの均衡原理が実際の道路網上で成立しているとするためには、以下のような状況が成立していると認める必要があろう。

(W-1) すべての利用者は常に所要時間を最小にする

ように経路を選択する。

(W-2) 利用者は利用可能な経路に関する完全な情報を得ている。

(W-3) すべての利用者は同一の評価基準で経路を選択する。

(W-2) は (W-1) の「常に」という表現を強調するために、また、(W-3) は (W-1) での「すべての」という表現を強調するために付け加えている。

このとき、Wardrop 均衡は次のように表現できる。

可能交通量  $f \in F$  に対し次式が成立する。

$$(c_{ki}(f) - u_i) f_{ki} = 0 \dots\dots\dots (6 \cdot a)$$

$$c_{ki}(f) - u_i \geq 0 \dots\dots\dots (6 \cdot b)$$

式 (6) は次式と等価である。

$$\text{もし } f_{ki} > 0 \text{ ならば } c_{ki}(f) = u_i \dots\dots\dots (7 \cdot a)$$

$$\text{もし } c_{ki}(f) \geq u_i \text{ ならば } f_{ki} = 0 \dots\dots\dots (7 \cdot b)$$

式 (7) は Wardrop の第一原則 (i) を忠実に表現している。ところで、M. J. Beckmann ら<sup>15)</sup> や Jorgensen<sup>16)</sup> は、式 (6) あるいは (7) を満足するフローが、次の最適化問題を解いて得られることを証明した。

$$\min. z[x(f)] = \sum_a \int_0^{x_a} t_d(\omega) d\omega, \text{ s.t. } f \in F \dots\dots (8)$$

$[x(f)]$  は、式 (3) によって、 $x$  が  $f$  の関数であることを表現したものである。この証明は、Kuhn-Tucker 条件を利用して容易に行える。

以上のように、Wardrop 均衡は、2. (1) の (A-1) で示した 2 つの表現形式、すなわち、連立方程式モデル (6) と最適化モデル (8) を得たことになる。

b) 計算方法

(i) ヒューリスティックな手法

計算方法は (A-2) に示したように厳密解法と近似解法 (シミュレーション手法) に分類できる。厳密解法は主に 1970 年代に入ってから開発されたものであり、それまではもっぱらヒューリスティックな解法 (直観的な判断によって妥当である、あるいは収束するとして採用された手法) が中心であった。その代表的なものが、BPR 法<sup>17), 18)</sup>、Wayne 法<sup>19), 20)</sup>、および IA (Incremental Assignment) 法<sup>21)</sup> である。これらの手法はいずれもプロセス (I) においてオール・オア・ナッシング配分を実行するが、プロセス (III) および (IV) の処理が異なっている。

すなわち、BPR 法では、プロセス (IV) において次のような修正計算を行う。

$$x_a^{(m)} = \frac{1}{n} \sum_{s=1}^n \Delta_a^{(s)} x_a^{(s)} \dots\dots\dots (9)$$

ここに、

$$\Delta_a^{(s)} = \begin{cases} 1 : s \text{ 回目の反復計算時に探索された最短経路} \\ \quad \text{にリンク } a \text{ が含まれているとき} \\ 0 : \text{そうでないとき} \end{cases}$$

同様に、プロセス (V) でのリンク所要時間を次式で修正する。

$$t_a^{(m)} = (1 - \beta) t_a^{(m-1)} + \beta t_a^{(m)} \dots\dots\dots (10)$$

BPR 法では  $\beta = 0.25$  が使用された。Overgaard は経験的にこの方法が等時間原則に従う手法であることを発見したが、しかし、理論的な裏付けを必要とすることを述べている<sup>22)</sup>。

Wayne 法は、プロセス (V) において次のような修正計算が用いられている。

$$x_a^{(m)} = \frac{1}{n} \sum_{s=1}^n x_a^{(s)}$$

一方、MIT で開発された IA 法は、リンク交通量の修正計算は行わない代わりに、プロセス (III) において分割された OD 交通量を用いる。IA 法は最短経路選択仮説 (W-1) を忠実に実行したものであり、極論すれば、個々の OD トリップを最短経路に配分する手法である。しかし、微少なトリップの配分を何回でも反復すると膨大な計算時間を必要とするため、OD 交通量のある適当な量に分割して配分をしようとしたものであり、Wardrop 均衡の「粗い」近似計算手法ということができる。

現在、わが国の実際分析で用いられている分割法の原形は IA 法にあり、1960 年代後半に研究された<sup>23), 24)</sup>。

さて、この時期には、式 (7-a) と式 (2), (3) を連立して解く解析的な手法もいくつか提案された。代表的なものが、Mosher<sup>25)</sup>、星野<sup>2), 7)</sup>、佐佐木<sup>26)</sup> による方法である。Mosher のアプローチの最も特徴的な点は、等時間経路を形成する経路を発見するため、余分な経路を取り除く工夫をしたことである。そのため、まず前もって決められたリンク数以上のリンクで構成される経路を除外し、次に、ゼロ・フロー時の所要時間に基づく  $R$  個の競合経路を抽出し、それらの経路に対し等時間原路を適用した。

星野や佐佐木の方法も連立方程式を解析的に解こうとするものであるが、佐佐木法では Mosher のように経路を除外してシステムを縮小する代わりに配分比という別の条件式を立て、方程式と未知数の数を等しくさせ解を求めようとした。しかし、これらの手法は、連立方程式を作成するまでが大変であり、規模の大きなネットワークには適用不可能であった。また、式 (7-a) のみを考慮し、(7-b) の条件を無視しているため、等時間経路を識別する必要がある。しかし、どの経路において等時間が成立するのかを事前に把握することはできないため、正確な方程式体系が構成できないという欠点があった。したがって、星野<sup>7)</sup> が述べているように、OD 間の経路のとり方によっては負の解を得る危険性があった。

(ii) 厳密解法

1970年代に入ると数値計画技法を用いた計算手法が開発され、Wardrop均衡を求める手法は著しく発展した。特にLeBlank<sup>27)</sup>らによるFrank-Wolfeの分解原理の適用は、この手法を大規模ネットワークに適用可能なものにした。FW法によるWardrop均衡の計算法がこれまでのヒューリスティックな方法と異なる点は、プロセス(IV)において次式のような凸結合を用いる点である。

$$x_{\alpha}^{(m)} = (1 - \alpha^{(m)}) x_{\alpha}^{(m-1)} + \alpha^{(m)} y_{\alpha}$$

$$0 \leq \alpha \leq 1 \dots \dots \dots (11)$$

$y_{\alpha}$  は  $|z_{\alpha}^{(m-1)}|$  に基づいて計算された最短経路にオール・オア・ナッシング配分を実行して得られるリンク交通量である。式(11)によるリンク交通量の修正法はBeckmannら<sup>15)</sup>によっても提案されていた。ただ、刻み幅  $\alpha^{(m)}$  は  $\alpha^{(m)} = \alpha$  で、かつ適当に与えられるものとされた。しかし、 $\alpha^{(m)}$  を事前に決められた一定値を用いる場合には、解は収束しない場合がある。その点、FW法では目的関数(8)を常に小さくするように  $\alpha^{(m)}$  が決定され、解はしだいに安定していく。凸結合法(FW法)の例からもわかるように、BPR法、Wayne法も類似の均衡化させる機構をもった配分法ということができ、等時間原則を近似的に満足する手法であると想像できる。

わが国では、IA法を改良した方法が日本OR学会において提案され<sup>28)</sup>、また、井上は非線形計画手法の一種である勾配射影法を用いた計算法を開発している<sup>29)</sup>。ただ、後者については経路列挙を必要とし、それが難点となっている。一方、連立方程式を解く手法としては、佐佐木の配分比条件にかわってネットワークのカット(任意のODペア間を結ぶ経路を切断し、起点と終点を分離する断面)上で経路交通量とOD交通量の関係式を作成し、方程式と未知変数の数が等しくなるような連立方程式の樹立法が飯田<sup>30)</sup>によって提案された。飯田によるカット法は、佐佐木の方法に比べるとより大きなネットワークに適用可能であるが、カット方程式の作成対象となる経路を見出すのに計算時間がかかるという難点がある。また、均衡条件式(7)とカット方程式がどのような関係にあるのかが不明瞭である。それに対し、井上によって提案された方法<sup>31)</sup>は、式(7)の均衡条件式を直接解こうとする点で連立方程式モデルの厳密解法の最初のものといえよう。ただし、線形パフォーマンス関数を仮定しており、一般に用いられる非線形パフォーマンス関数の場合には適用できないという問題点をもつ。いずれにせよ、この方法は、近年注目を浴びている相補性問題の最も単純な場合を扱っており、その着眼点は高く評価できよう。

(3) 確率配分モデル

Wardrop均衡モデルの前提条件(W-1)~(W-3)は

現実の交通行動を正確に表現しているとはいいがたい。特に(W-2)、(W-3)はかなり強い条件であり、現実の交通行動を表現するにはこれらの条件を緩める必要がある。すなわち、

(S-1) 利用者は利用可能経路に関し不完全な情報しか得ていない。

(S-2) 利用者は異なる評価基準で経路を選択する。この条件を厳密に定式化することは困難であるが、1つの可能な表現は、経路所要時間  $c_{kl}$  を確率変数  $\bar{c}_{kl}$  と定義することである。この場合の利用者の最適化行動は次のように表現できる。

$$P_{kl} = \text{Pr}.[\bar{c}_{kl} < \bar{c}_{li}, k \neq l, k, l \in R_i] \dots \dots \dots (12)$$

ここに、 $P_{kl}$  はODペア  $i$  で経路  $k$  を選択する確率である。

$\bar{c}_{kl}$  は次に示すように2つの異なる定義が可能である。

- (i)  $\bar{c}_{kl} = \bar{c}_{kl} + \varepsilon_{kl}$
- (ii)  $c_{kl} = a_{kl} + \bar{\omega} \bar{c}_{kl}$

ここに、記号「 $\sim$ 」はその変数が確率変数であることを表わしている。また、 $\bar{c}_{kl}$  はODペア  $i$  の経路  $k$  の所要時間の期待値である。 $\varepsilon_{kl}$  は誤差項であり、 $\bar{c}_{kl}$  で表現できない利用者の経路選択の忌避要因である。また、 $a_{kl}$  は貨幣タームで表わされた経路費用、 $\omega$  は時間価値で利用者ごとに異なる値をもち、ある確率分布  $g(\omega)$  に従うと仮定する。

(i) のタイプのモデルは、まず、Abrahamによって提案され<sup>32)</sup>、 $\varepsilon_{kl}$  には矩形分布が仮定された。Burrell<sup>33)</sup> も矩形分布を仮定した配分法を提案しているが、両者はいずれも式(12)で示された公式によって経路選択確率を求めるものではなかった。著者は、 $\varepsilon$  に正規分布を仮定して選択確率公式(12)によって選択率を求める方法を提案し<sup>34)</sup>、星野は対数正規分布を仮定し経路分担率を求め、同氏の提案する方程式モデルに組み込んでいる<sup>7)</sup>。誤差項に正規分布を仮定するのは最も自然な方法といえるが、選択確率の計算は複雑となり、3経路以上の場合には選択確率を解析的に求めることはできない。3経路以上の場合の計算法が提案されたのは、著者の提案以降ずっと後のことであり、数値積分法<sup>35)</sup>、モンテカルロシミュレーション法<sup>36)</sup>、クラーク近似法<sup>37)</sup>などが開発された。

BeilnerとJacobsは  $\varepsilon$  にWeibull分布を仮定することによって、明示的に選択確率公式を導く方法を考案した。BeilnerとJacobsは電気回路網におけるキルヒホッフの法則との類似式を誘導することに主眼があったが、彼らの誘導法は、仮定を少し変えるだけで、今日非集計モデルで用いられているロジット公式の誘導法となり、次のような選択公式を導くことができる。

$$P_{ki} = \frac{\exp(-\theta c_{ki})}{\sum_{k \in R_i} \exp(-\theta c_{ki})} \dots \dots \dots (13)$$

一方、Dial<sup>39)</sup>は式(13)を前提にした経路配分手法を考案した。Dial法の最大の特徴は、有効経路の概念を用いて配分対象経路を限定する点にある。有効経路の決定方法についてDialは2つの方法を提案しているが、計算時間等の関係からいって推奨できるのは次の方法である。すなわち、「最短経路樹を含むネットワークにおいて、起点からあるノードまでの所要時間がその先行ノードまでの所要時間より大きければ、それはリーズナブルな経路、すなわち、有効経路であり、配分の対象となる」というものである。確率配分法は、式(13)から推察できるように同時に複数経路へ配分する複数経路配分法(2.(1)の手法の分類(I))になる。しかし、式(13)から明らかなように、事前に配分対象経路集合 $R_i$ がわかっていなければならない。このため、合理的経路をある基準で列挙する必要があったが、Dial法では上述の基準を用いて、最短経路探索アルゴリズムを利用して有効経路集合が決定できるため、複数経路配分法としてはきわめて効率的である。

ただ、これまでに述べてきた手法は、経路選択確率がフローインディペンデントであるという点で問題を残している。

(ii)の考え方に基づく選択確率の計算は、坂下<sup>4)</sup>によって提案された。その基本的な考え方を示したのが図-2である。

いま、ODペア*i*に2つの経路が存在するものとする。 $c_{1i} < c_{2i}$ ならば、利用者は経路1を選択する。図より、その領域は2つの直線が交差する点より左側の部分である。対応する $\omega$ の値は $\omega_0$ で与えられる。したがって、 $c_{1i} < c_{2i}$ と判断する人の割合は、 $\omega$ の分布において斜線を施した面積部分に相当する。式で表現するならば、

$$P_{1i} = \int_0^{\omega_0} g(\omega) d\omega$$

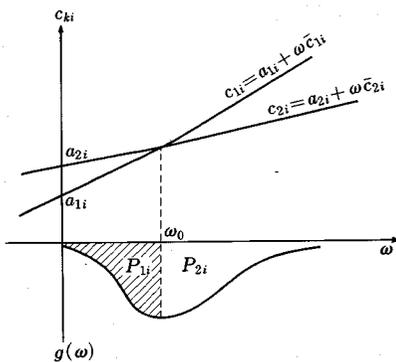


図-2 坂下モデルの概念図

$$P_{2i} = 1 - P_{1i} = \int_{\omega_0}^{\infty} g(\omega) d\omega$$

で与えられる。このモデルでは $\omega$ の分布形とそのパラメーターをどのように推定するかがキーポイントになる。特に都市内の交通配分に用いた場合には、経路列挙の問題が生じる。したがって、わが国では都市間交通の分析に利用されるケースが多く、その場合、 $g(\omega)$ には対数正規分布が使われているようである<sup>40)</sup>。

なお、式(13)のロジット公式を導くその他のモデルには、情報論的エントロピーモデル<sup>2),41)</sup>や松井の統計力学的アプローチ<sup>42)</sup>が知られている。また、宇野<sup>43)</sup>による関数方程式論による分担率の導出法はかなり汎用性のあるもので興味深く、Jacobsらと同様にロジット公式をも導くことができる。

また、1950年代には、高速道路への転換量や鉄道の分担量を求める、いわゆる、転換確率モデル(その多くは実測値に適合させるための簡単な論理構成からできている)が多く提案されたが、それらの多くは、BeilnerとJacobsの確率モデルあるいは宇野の関数方程式モデルによって導くことができる。

なお、式(12)によって選択確率を与えるのではなく、ノードにおける分岐確率をマルコフ過程で与え、発生した交通が目的地に吸引されるまでを吸収マルコフ過程を用いて定式化したユニークな交通配分理論が佐佐木<sup>44)</sup>や松井<sup>45)</sup>によって提案されている。

### 3. 交通量配分理論の拡張

#### (1) 概 説

1970年代後半から1980年代前半にかけて、2.で紹介したWardrop均衡モデルや確率配分モデルの拡張が盛んに行われた。すなわち、(1)需要変動型交通均衡モデル、(2)確率均衡モデル、(3)動的交通均衡モデルなどの発展である。

交通配分手法は上述したように、ODトリップが既知で与えられていることを前提としたものであった。しかし、OD間の交通需要量、あるいは、OD間のモード別交通量は、地域間の交通サービス水準やモード別の地域間サービス水準の関数である一方、それらの交通サービス水準は、また、利用交通量の関数であることが知られている。したがって、交通需要量の算出と交通配分プロセスの間には、使用する交通サービスについて整合性がとれている必要がある。こうした段階的需要予測法の内部矛盾を解消すべく提案されたのが需要変動型モデルであり、TRCモデル<sup>46)</sup>を始めとして、多くの研究が行われてきた<sup>47)</sup>。特に1970年代以降は、段階的需要予測法における前3段階の交通需要量を推定する作業と4段階目の配分プロセスを統合する各種モデルが提案されるよ

うになり一段と実用性を高めてきている。なお、2. で述べてきた交通均衡モデルは、この節の「需要変動型」という用語に対応して「需要固定型」という形容詞をつけて区別する。

2. で紹介された確率配分モデルに共通な理論的欠陥は、経路選択確率を決定する経路所要コストがフローに無関係に与えられるという点であった。この問題を解決すべく提案されたのが、Daganzo によるランダム効用理論を採用したモデル<sup>48)</sup>と Fisk によるエントロピー型モデル<sup>49)</sup>である。特に、Fisk の提案したモデルは、経路列挙を必要としない Dial 法を用いて解くことができ、これまでの確率モデルが有していた配分対象経路をどのように選別するかという問題点を解消している。両モデルとも経路選択関数にパラメーターを含んでおり、パラメーターを交通量データから統計的に推定することが可能である。このことは、Wardrop 均衡モデルのように交通量推定を純粹に理論的アプローチで求めようとする方向から、現実データに則した交通量推定手法への変更を促した点で意義が大きく、モデルの信頼性を高めるのに貢献している。なお、Daganzo の提案したモデルと Fisk の提案したモデルは互いに共役な関係にあり、本質的には同じものであることが宮城<sup>50)</sup>によって示されている。

以上、述べてきた手法は、いずれも静的な交通ネットワークフローの予測手法であった。近年の都市高速道路の整備水準の向上、道路整備費の伸び悩みに伴う道路運用・管理政策の必要性、そして将来予測されるタイムフレックス制度の導入などを考慮するとき、どうしてもネットワークフローの時間的変動を予測する手法が必要となる。特にピーク時交通フローをどのように求めるかは重要な問題である。従来の静的配分法をピーク時交通流解析に適用する場合の常套手段は、ピーク時交通需要量を日交通量配分解析と全く同様な方法で配分するというものであった。その場合の問題点は、前の時間帯の交通流のネットワーク残存量を無視している点であり、この単純化によってピーク時配分法は著しく不正確なものとなっていた。この問題を解決するために動的交通配分手法が提案されるようになったが、ここでは Wardrop 均衡を前提にした動的配分法のみを取り上げることにする。

## (2) 需要変動型交通均衡モデル

需要変動型交通均衡モデルの原型は、1950 年に M. J. Beckmann ほか<sup>15)</sup>によって提案された。すなわち、2. (2) a) で記述したような行動仮説のもとでは、Wardrop 均衡条件が導き出せるが、そのとき、OD 間のトリップコスト  $u_i$  が需要関数  $q_i = D_i(u_i)$  によって与えられるとしたのが需要変動型交通均衡の定義式である。

$$f_{ki}(c_{ki}(f) - D_i^{-1}(q_i)) = 0 \dots \dots \dots (14 \cdot a)$$

$$c_{ki}(f) - D_i^{-1}(q_i) \geq 0 \dots \dots \dots (14 \cdot b)$$

Beckmann の最も優れた着想点は、式 (14) を直接解くのではなく、これを等価な数理最適化問題に置き換え、最適化問題として交通均衡問題をとらえ直した点である。すなわち、均衡条件式 (14) は次の最適化問題の解が満足すべき必要条件を与える。

$$\min. z(x, q) = \sum_{a \in A} \int_0^{x_a} t_a(\omega) d\omega - \sum_{i \in I} \int_0^{q_i} D_i^{-1}(\omega) d\omega \dots \dots \dots (15)$$

$$\text{s.t.} \sum_{i \in I} f_{ki} = q_i, \quad x_a = \sum_{i \in I} \sum_{k \in K_i} \delta_{aki} f_{ki}, \quad f_{ki} \geq 0 \dots \dots (16)$$

この問題は需要固定型交通均衡モデルと同様、FW 法を用いて解くことができるので求解上の問題点はないが、現在までのところ実用に耐えるような需要モデルは提案されておらず、したがって、Beckmann モデルを既存の段階的推定法に代わる予測モデルとして位置づけるには至っていない。Beckmann モデルは永らく日の目を見なかったが、1970 年代に入って、既存の需要モデルを前提にした Beckmann の修正モデルが提案されるようになってきた。その最初のモデルが Evans による分布配分統合モデルである<sup>51)</sup>。ただ、Evans 以前にも TRC モデルや MIT モデルのように需要・パフォーマンス均衡を実現しようとしたモデルが提案されており、また、Murchland も Evans と類似の考え方をすでに示していた<sup>52)</sup>。特に、MIT では Manheim を中心として DODO TRANS のような IA 法を主体とした需要・パフォーマンス均衡モデルの概念構成と実用化に多大の努力を払っていた<sup>53)</sup>。わが国では杉恵が MIT 法の実用化を試みている<sup>54), 55)</sup>。しかし、Evans 以前のモデルは Wardrop 均衡をいかに実現するかという点では理論的根拠がいま 1 つ不明瞭であり、前節で述べたヒューリスティックな配分法がもつ問題点をそのまま継承していたといえる。Evans 型のモデルのわが国への導入は加藤・宮城<sup>56)</sup>によって行われたが、それはさらに発展され、発生・集中トリップ制約を設定しない、いわゆる本来の Beckmann 型均衡モデルの実用性についてもさらに検討された<sup>57)</sup>。ただ、著者らの分析は自動車交通のみを対象としており、また、利用した需要関数の性質から短期予測に適用が限定されているという意味で、需要変動型モデルの限界が需要関数にあることが同時に明らかとなった。

Evans 以降、既存の需要モデルと配分プロセスを統合する各種モデルがモンテリオール大学の Florian を中心に精力的に研究された。その結果、分布・機関分担・配分統合モデル<sup>58)</sup>、機関分担・配分統合モデル<sup>59), 60)</sup> のような Beckmann モデルの実用化モデルが提案されるに

至った。これらの統合モデルはEMME/2という形でマイクロ・コンピュータにパッケージ化され、北米を中心として、ヨーロッパを含む、20以上の機関にすでに販売され交通分析に適用されている<sup>61)</sup>。また、BART (Bay Area Rapid Transit) の運営管理を担当するAC Transitも最近EMME/2のプログラムパッケージを購入し、自己の管理するシステムの運用分析に応用しているが、従来の大型計算機利用の場合に比べ、経費の効率的運用が図られ、多様な情報を得ることができたと言われている<sup>62)</sup>。

EMME/2の成功は、ネットワーク情報の管理をマイクロコンピュータによってシステムティックにかつ容易に行える点およびアウトプットがバッチ形式ではなく、グラフィック機能によって視覚的にわかりやすい形で行われる点にあると思われるが、しかし、現時点で最も信頼できるアップデートされた需要予測理論を基礎にしていることでユーザーに信頼されている点も見逃せない。すなわち非集計型需要モデルをアグリゲートした形の交通機関分担モデルを用い、それと配分プロセスを結合させることによって、データに準拠したより信頼できる機関分担モデルが利用でき、かつ自動車との競合概念を精緻化することによって、より政策感応型の分析ができるということであろう。

機関分担・配分統合モデルのわが国の適用例については、河上、溝上<sup>63)</sup>によって行われたが、その際、機関分担モデルのパラメーターを均衡プロセスを通して行うという手法が導入された。集計型機関分担モデルの使用を前提とするとき、この種の手法は有効であり、ネットワークデータを必要としないという点で経費の節約というメリットをもっている。

### (3) 確率交通均衡モデル

Fiskはフローディペンデントな確率選択公式が次の最適化問題で与えられることを明らかにした<sup>49)</sup>。

$$\min. z(f) = \frac{1}{\theta} \sum_{i \in I} \sum_{k \in R_i} f_{ki} (\ln f_{ki} - 1) + \sum_a \int_0^{x_a} t_a(\omega) d\omega \dots \dots \dots (17)$$

$$\text{s.t. } f \in F$$

この問題に対応した均衡解の条件式は、

$$f_{ki} = \frac{q_i \exp(-\theta c_{ki}(f))}{\sum_{k \in R_i} \exp(-\theta c_{ki}(f))} \dots \dots \dots (18)$$

で与えられる。すなわち、式(18)は経路交通量 $f_{ki}$ は、それが経路に負荷されたときの経路コスト $c_{ki}(f)$ と平衡するように求められる。式(17)より明らかなように、 $\theta$ が大きくなると、目的関数の第2項の比重が大きくなり、式(17)は需要固定型均衡モデルの目的関数を近似する。同様に、 $\theta$ が小さくなれば第1項の比重が相対的

に大きくなり、式(18)で与えられる経路配分交通量は、経路コストに無関係に、各経路に等配分されるようになる。 $c'_{ki} = \log c_{ki}$ とおくならば、式(18)はAASHOの分担率公式に類似のものとなる。実際の交通状況はそれらの中間にあると予想でき、したがって、道路観測データより最も適合性のある $\theta$ を選択することができる<sup>64)</sup>。問題は、観測交通量から求めた $\theta$ がどの程度信頼でき、予測にどこまで利用できるかということにある。すなわち、観測交通量は調査された分布交通量 $q_i$ に必ずしも対応したものでないということ、そして、 $\theta$ はゾーンの分割レベルによって変化すると予想されることである。この種の問題は、重力型分布モデルの適合性が議論された時代にも問題にされた点である。

さらに確率均衡モデルではリンク交通量を求めることはできるが、経路交通量を求めることは現実にはほとんど不可能に近く、実際分析に用いた場合には困る場合もあり得る。ただし、有効経路を作成する際、何らかの規準を導入して代替経路の数を限定すれば、この問題は解決できよう。

確率均衡配分問題を解くための手法としては、逐次平均化法<sup>65)</sup>と縮小写像法<sup>66)</sup>が提案されている。逐次平均化法は、目的関数の第2項のみを線形近似した目的関数を解く第1ステップと、得られた解を前の解と凸結合させる2段階で構成され、第1ステップの問題を解くにはDial法を用いればよい。第2ステップの結合パラメーターには反復回数の逆数が用いられる。反復回数 $n$ が増加するにつれ、 $1/n$ は必ず小さくなるので、凸結合した解は必ずある値に収束する。したがって、解が本当に収束したのかを判断する基準が重要であり、停止規準の設定が重要となる。刻み幅を $1/n$ とおく理由は、凸結合を決定するパラメーターを未知変数において、目的関数から求めようとしても、前述した理由により目的関数のエントロピー項が計算できないため、最適な結合パラメーターが求められないからである。このため、計算時間はどうしても長くなる。一方、縮小写像法は、Dial法による解と前の解を凸結合させる点では逐次平均化法と同じであるが、 $(n-1)$ 個目の解 $x^{(n-1)}$ およびそれを更新して得る解 $x$ 、 $x$ を更新して得る解 $y$ の3つのフローパターンによって $x^{(n)}$ を決定する。すなわち、逐次平均化法に比べると余分に1回の計算を行うが、逐次計算法に比べると解へ収束するまでの反復回数が少なく済むことが報告されている<sup>66)</sup>。

### (4) 動的交通均衡配分モデル

Wardrop均衡は、1日の交通に対して成立するものではなく、ネットワークを流れる同時刻帯のフローについて成立すると仮定した方が現実的である。このとき同時刻帯に流れるフローをどのように定式化するかという問

題に直面する。1日のある任意の時間帯のフローは、起点の出発するODトリップが動的に変化する結果、そして、いくつかの起点から出発した交通がある道路区間を共有する結果、時間的に変動する。等時間の動学化を試みた例としてChuとGazisによる研究を始めとし<sup>67)</sup>、いくつかの考え方が提案されている<sup>68)~70)</sup>。これらのモデルは動的現象を記述してはいるものの、単一ODペアに限定されたものであり、現実のネットワークへの適用となるとまだ先が長い。実際分析への適用を目的とした定式化がHo<sup>71)</sup>や松井ら<sup>72)</sup>によって示されているが、松井の手法の概要を示すと次のようである。時間を時間帯別に離散化し、 $n=1, \dots, N$ とするとき、ある任意の時間帯  $n$  で Wardrop 均衡が成立するためには、

$$q_i(n) = \sum_{k \in R_i} f_{ki}(n) \dots \dots \dots (19 \cdot a)$$

$$f_{ki}(n) \geq 0 \dots \dots \dots (19 \cdot b)$$

というフロー成立条件のもとで、次の目的関数を最小化すればよい。

$$J = \sum_{i \in I} \sum_{k \in R_i} \sum_n f_{ki}(n) c_{ki}(n) \dots \dots \dots (20)$$

このとき、次のような均衡条件式を得ることができる。

$$f_{ki}(n) > 0 \text{ のとき } c_{ki}(n) = u_i(n) \dots \dots \dots (21 \cdot a)$$

$$f_{ki}(n) = 0 \text{ のとき } c_{ki}(n) \geq u_i(n) \dots \dots \dots (21 \cdot b)$$

これらの式では、式(6)が時間帯  $n$  で成立することを表現した式になっており、複数ODペアの解析に適用可能である。ただ、松井モデルでは、ある時間帯  $n$  で Wardrop 均衡が成立するということが前提となっており、なぜ式(20)を最大化することによって Wardrop 均衡が得られるのかという点については不明確である。式(19)、(20)で構成される問題は、そのままでは解くことができないので、時間帯  $n$  における経路  $k$  上の存在台数  $x_{ki}(n)$  を用いて、目的関数(20)を次のように近似する。

$$J' = \sum_n \sum_{i \in I} \sum_{k \in R_i} x_{ki}(n) + \frac{1}{2} \sum_{i \in I} \sum_{k \in R_i} \frac{x_{ki}(n)^2}{S_{ki}} \dots \dots \dots (22)$$

そして、 $x_{ki}(n)$  に対応して次の保存条件式を仮定した。

$$x_{ki}(n) = x_{ki}(n-1) + q_i(n) - S_{ki}(n) \dots \dots \dots (23)$$

ここに、

$S_{ki}(n)$ : 時間帯  $n$  で OD ペア  $i$  の経路  $k$  から流出する交通量

$\bar{S}_{ki}(n)$ :  $S_{ki}(n)$  の時間帯  $n$  での OD ペア  $i$  の所要時間中の平均値

このように、問題は離散型最小原理の問題として定式化ができ、オール・オア・ナッシング法で解けることが示された。ただし、この問題を解くためには、時間帯別OD交通量が与えられている必要がある。

従来、静学的交通均衡モデルをピーク時交通解析に適用するときには、ピーク時OD交通量配分を日交通配

分の場合と同様に適用していた。

しかし、式(23)に示されるように、ある時間帯に注目したときのネットワーク上に存在する台数は、前の時間帯のフローと着目する時間帯のフローのネットワーク上での残存台数で構成される。したがって、従来のように、ピーク時OD交通量を単にネットワークに配分するだけでは残存交通量の問題が扱えず、ピーク時混雑問題に十分対処し得ない。交通需要の増加に伴ってピーク時混雑時間帯が他の時間帯にどのように影響していくかは、交通分析の重要な課題の1つであり、動的交通配分手法の今後に果たす役割に期待したい。

#### 4. 課題と展望

##### (1) 交通量配分理論のインプットとアウトプット

本節では、前節までに紹介されたモデルのうち、最もよく用いられる Wardrop 型交通均衡モデルの適用における諸問題を整理し、今後、解決すべき課題について見解を述べるとともに、今後の研究の方向性についての若干の私見を付加しておく。

問題の整理にあたって、考慮すべき点は、交通配分手法の作業環境(図-3)から明らかであろう。

すなわち、交通配分という作業は、①OD交通量、②交通ネットワーク、③パフォーマンス関数、という入力条件が与えられたとき、交通量(フロー)や交通サービス水準をどのように求めるかが直接的な目的となる。したがって、どの程度正確に交通量を予測し得るのかがまず問題とされねばならないが、インプット条件を無視してその議論は成立し得ない。

次に交通配分の本来の目的は、交通量や交通サービス水準の単なるアウトプットではなく、それをを用いた計画代替案の評価にあるという点である。すなわち、1次アウトプットの精度をいかに高めようとも評価手法との適合性がなければ、その努力は全く無意味なものとなる。ただし、計画代替案の評価手法は、計画目標や代替案の種類などによっても変化し、多種多様な広がりがあり、計画評価を行う立場に応じてその視点が異なってくる。この報告では、交通量配分を人の交通選択行動を表現するモデルであるという考え方を重視してきた。その観点からいえば、交通量配分の結果と直接的にかかわりがあるのは、利用者便益の推定という問題である。これらの

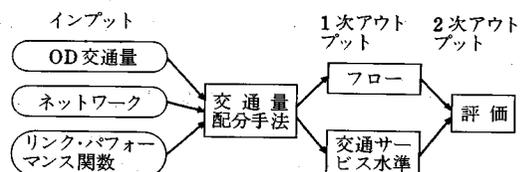


図-3 交通量配分手法の作業環境

問題に絞って、以下に諸問題を整理し、今後の課題について考察してみよう。

## (2) インプット条件と予測精度

交通量配分の予測精度をうねんするとき、計算結果と調査交通量の適合度指標がよく使われる。適合度指標は確かに1つの予測能力を表す指標である。しかし、利用するOD交通量と用いる実測のリンク交通量の間直接の相関関係がなければ、適合度による比較は何の意味ももたないであろう。適合度指標が意味をもつ唯一のケースは、OD交通量が時間空間的な平均値であり、比較の対象となる調査リンク交通量も時間的な平均値であると判断できる場合のみである。OD交通量の空間的な平均性についていえば、その標本の抽出法からして、それが成立していると仮定してもよいであろう。したがって、問題は、インプットデータとアウトプットデータの時間的位相の同調性ということになる。このように考えるならば、適合度指標としてリンク交通量を用いる場合には、その時間的な変動特性についての吟味が必要となろう。また、時間空間的に安定した指標としてどのような指標があるかが議論されなければならないだろう。こうした問題はあつたものの、各国で研究された予測精度の比較では、いずれも均衡配分法が従来手法に比べ適合度の点で優れていることを明らかにしており<sup>73)~75)</sup>、わが国でもこの種の手法が実務にもっと利用されてもよいと考える。

交通量予測に最も大きな影響を与えるのは、ネットワークの構成手法である。ゾーンの分割の粗さ、分析対象とするネットワークのきめ細かさなどは、アウトプット結果に大きく影響を与える。等時間配分原則の妥当性も用いられるネットワークの詳細さに依存しているといえる。ネットワーク集約化の程度が大きくなればなるほど、等時間配分原則を適用することの根拠が薄れ、オール・オア・ナッシング配分に近い配分手法がより現実的になってくると思われる。しかし、いずれの手法を用いるにせよ、すべてのOD交通量を集約化されたネットワークに負荷するわけであり、実際の交通状況と手法とのずれが大きくなる。その意味では、需要変動型交通配分手法の方が方法論的な合理性がある。需要変動型モデルでは交通サービス水準に応じた交通量しかネットワークに負荷しないからである。交通発生・集中点の非集計化、ネットワークの集計化の予測への影響などとともに、需要変動型モデルとネットワーク集約化の問題についても研究されるべきであろう。

リンク・パフォーマンス関数の問題点については、現在進められているような時間パフォーマンス関数と日パフォーマンス関数の関係<sup>76),77)</sup>についてより一層の研究がなされるべきであろう。都市内交通においては、リンク

通行遅れよりも交差点遅れの方が大きな比重を占めるため、交差点での遅れに重点を置いたパフォーマンス関数の開発も今後の大きな課題である。

## (3) 利用者便益と交通量配分理論

現在、実際に利用されている分割法をバイパス建設や環状道路等の効果分析に利用した場合、その効果を過小評価する危険をもっている。たとえば、バイパス建設の効果算定に適用した状況を想定してみよう。分割法では、前もって決められた分割数に応じたOD交通量が最短経路に負荷されるので、配分の初期段階でのOD交通量は都心部の道路を負荷されるであろう。たとえば、5分割として、初め4回までが都心部道路に割り当てられ、残りの最後の1回になって初めてバイパスが最短経路になり、そこに残りの5分の1のOD交通量が負荷されたとする。その結果、やはりバイパスの方がまだ空いていた状況だとしても、分割法ではすでに負荷した交通量を別の経路に移し変える作業をしないので、まだ早い経路があつたとしても、そのままの結果で終了してしまう。バイパスは都心を迂回するケースが多いので、距離的には長くなる。したがってこのような状況が起こりやすい。交通均衡配分法の適用は、この種の問題を回避することができ、実際分析においてもこの点が確認されている<sup>78)</sup>。

一方、需要固定型の交通均衡配分法の最大の理論的欠点は誘発交通量あるいは他のモードからの転換交通量が算定できないということである。一般に、マストラのサービス改善によって自動車利用からマストラ利用へ転換する交通量は少ないが、その逆は大きい。したがって、分布交通量は変わらなくても転換交通量によって自動車利用トリップが増加し、混雑が生じるケースは多々あると予想できる。このような問題に対処していくためには、需要変動型の交通均衡モデルが適しており、今後はこの方向の研究がなされてくるであろう。

需要変動型モデルの弱点は、前にも述べたように交通需要関数をどう設定するかという点にある。交通需要は交通行動を起こす主体(人、貨物)の社会的経済的な現象であるので、ミクロ行動論的な定式化が必要となるが、しかし、予測モデル全体としての精度という観点から考察するならば、需要関数のみ詳細なモデルを設定しても意味がないので、現在利用されている重力モデル程度の現象を大略説明できるようなモデルでよいと考える。

## 5. ま と め

本研究では、過去30年のわが国での交通配分理論の研究成果を踏まえ、その研究の流れを体系化することを試みた。わが国で交通配分研究が行われた初期の段階では、今振り返れば、種々の興味あるアイデアが提起されたが、残念なことには、これを一般理論として体系化す

るまでには至らなかった。近年の諸外国の研究は、交通配分理論を1つの普遍性をもった理論として位置付けるような一般化の努力が行われている。変分不等式問題、相補性問題としての定式化がその流れを汲むものであり、交通均衡問題は、今や交通工学者の手から数理経済学者あるいは数学者などの手へ移らんとしている。この現象は、ある意味では喜ばしいことであり、交通研究の分野で培われた考え方が他の分野にも貢献できるような普遍性をもってきたことの現われであるとみることがができる。その反面、手法的には高度になり、技術者の能力を越えようとしていることも事実であり、経済均衡分析が経験したように、実務には何の役にも立たないという、実務家からの批判を受けることになる。しかし、交通均衡問題は、もはや閉じた研究分野ではなく、各方面の研究者に開放された土俵であり、今後は同じ土俵で議論が交わされることも事実である。

このように交通配分理論では、経済学、数理工学、OR、交通工学の区別がなくなってきつつあるが、それぞれの研究者のバックグラウンドがあり、数学者は問題を抽象化して数理手法として解く傾向が強いし、経済学者は説明する変数などの経済的意味と論理性にうろさいが、必ずしも交通現象を十分熟知していない点もある。交通工学からのアプローチは、他分野からの接近法を参考にしながら、実際の交通現象に対応できる理論構築が必要とされてこよう。

最後に、この論文をまとめるにあたり、岐阜大学 宮城俊彦助教授の絶大な助力を得た。彼の助力がなかったならば本編は成し得なかったことを記して、感謝の言葉としたい。

#### 参考文献

- 1) 佐佐木綱：道路網における輸送計画について、第4回日本道路会議論文集、pp.43~46, 1957年。
- 2) 星野哲三：道路網における交通流配分の理論、第5回日本道路会議論文集、pp.68~70, 1959年。
- 3) 平原覚治：道路の利用率の推定について、第6回日本道路会議論文集、pp.633~635, 1961年。
- 4) 坂下 昇：交通量配分の微視的理論について、高速道路、Vol. V, No. 8, 1962年。
- 5) 加藤 晃・中原清志：道路網における交通配分計画について、第7回日本道路会議論文集、pp.60~63, 1963年。
- 6) 加藤 晃：道路網計画における交通流解析の適用 (I)・(II)、道路9月号、pp.728~737、道路10月号、pp.875~884, 1964年。
- 7) 星野哲三：道路網における交通流配分の理論 (I)・(II)、道路4月号、pp.281~290、道路5月号、pp.377~392, 1963年。
- 8) 星野哲三：交通量配分理論の分類と特質、高速道路と自動車、Vol. XII, No. 8, pp.27~34, 1969年。
- 9) 松井 寛：道路網における交通量配分理論について、交通工学、Vol. 6, No. 5, pp.43~47, 1971年。
- 10) Magnanti, T. L. : Models and algorithms for predicting urban traffic equilibria, Transportation Planning Models (M. Florian, ed.), North-Holland, pp.153~186, 1984.
- 11) Fernandez, J.E. and Friesz, T.L. : Equilibrium predictions in transportation markets : the state of the art, Transpn. Res. B, Vol.17 B, No.2, pp.155~172, 1983.
- 12) 宮城俊彦・野々山弘紀：不動点アルゴリズムによる交通均衡の計算法、第4回土木計画学研究発表会講演集、pp.391~402, 1982年。
- 13) 宮城俊彦・加藤 晃：需要・パフォーマンス均衡モデルの実用化に関する一手法の提案：理論、交通工学、Vol.20, No.1, pp.21~29, 1985年。
- 14) Wardrop, J.G. : Some theoretical aspects of road traffic research, Proc. Inst. Civil Engineers, PART I, Vol.1, pp.325~378, 1952.
- 15) Beckmann, M.J., McGuire, C.B. and Winsten, C.B. : Studies in the Economics of Transportation, Yale University Press, New Haven, Conn, 1956.
- 16) Jorgensen, N.O. : Some Aspects of the Urban Traffic Assignment Problem, Graduate Report, ITTE, University of California, 1963.
- 17) U.S. Department of Commerce, Bureau of Public Road : Traffic Assignment Manual, Washington, D.C., 1964.
- 18) Humphrey, T.F. : A report on the accuracy of traffic assignment when using capacity restraint, paper presented for the 46th Annual Meeting of the Highway Research Board, Washington, 1967.
- 19) Smock, R.B. : An iterative assignment approach to capacity restraint on arterial networks, HRB Bulletin, No.347, pp.60~66, 1962.
- 20) Smock, R.B. : A comparative description of capacity restrained traffic assignment, HRB Record, No.6, pp.12~40, 1963.
- 21) Martin, B.V. and Manheim, M.L. : A research program for comparison of traffic assignment techniques, HRB Record, No.88, pp.69~84, 1965.
- 22) Overgaard, K.R. : Testing a traffic assignment algorithm, Vehicular Traffic Science, Elsevier, New York, 1967.
- 23) 中部地方建設局：名古屋周辺道路網整備計画調査報告書 (配分交通量将来計画編)、1966年。
- 24) 北山種夫・戸山一雄・堀江幸男：新しい手法を応用した道路網の交通量配分、高速道路と自動車、Vol. X, No. 8, pp.25~33, 1967年。
- 25) Mosher, W.W. : A capacity restraint algorithm for assigning flow to a transport network, HRB, No.6, pp.41~49, 1963.
- 26) 佐佐木綱：道路網における交通量の配分手法、日本地域学会年報、第2号、pp.19~34, 1963年。
- 27) LeBlank, L.J., Morlok, E.K. and Pierskalla, W.P. : An accurate and efficient approach to equilibrium traffic assignment on congested networks, Transpn. Res., Vol.9, pp.309~318, 1974.

- 28) 日本オペレーションズ・リサーチ学会：新手法による高速道路交通量の推計，報文シリーズ，T-73-2，1973年。
- 29) 井上博司：道路網における均衡交通量配分の勾配射影法による解法，土木学会論文報告集，No. 313，pp. 125～133，1981年。
- 30) 飯田恭敬：カット法による等時間原則交通量配分—三角型道路網への適用，交通工学，Vol. 5，No. 6，pp. 26～38，1970年。
- 31) 井上博司：道路網における等時間原則による交通量配分に関する基礎的研究，京都大学博士論文，1975年。
- 32) Abraham, C. : La repartition du trafic entre itineraires concurrents, *Revue general des Routes et des Aerodromas*, 1961. [三谷 浩訳：転換交通量の推定について，道路10月号，1962年.]
- 33) Burrell, J. E. : Multiple route assignment and its application to capacity restraint, *Proc. 4 th Int. Symp. on the Theory of Traffic Flow*, Karlsruhe, 1968.
- 34) 加藤 晃：道路網における交通量配分の基礎的な考え方について，第8回日本道路会議論文集，pp. 72～75，1965年。
- 35) Hausman, J. A. and Wise, D. A. : A conditional probit model for qualitative choice : Discrete decisions recognizing interdependence and heterogeneous preference, *Econometrica* 46, pp. 403～426, 1978.
- 36) Lerman, S. R. and Manski, C. : An estimator for the multinomial probit model, 56th Meeting *Transpn. Res. Board*, 1977.
- 37) Daganzo, C. F. : *Multinomial Probit*, Academic Press, New York, 1979.
- 38) Beilner, H. and Jacobs, F. : Probabilistic aspects of traffic assignment, *Proc. 5 th Int. Symp. on the Theory of Traffic Flow and Transportation*, Berkeley, pp. 183～194, 1972.
- 39) Dial, R. B. : A probabilistic multipath traffic assignment which obviates path enumeration, *Transpn. Res.*, Vol. 5, No. 2, 1971.
- 40) 土木学会編：交通需要予測ハンドブック，技報堂出版，1981年。
- 41) 香川一男・飯田恭敬：交通量配分に関する情報理論的接近，第8回日本道路会議論文集，pp. 1082～1085，1965年。
- 42) 松井 寛：交通量分布パターンの確率的考察，土木学会論文報告集，No. 190，pp. 99～109，1971年。
- 43) 宇野敏一：関数方程式論を用いた経路選択モデルの統一に関する研究，京都大学博士論文，1985年。
- 44) 佐佐木綱：吸収マルコフ過程による交通量配分理論，土木学会論文集，No. 121，pp. 55～62，1986年。
- 45) Matui, H. : Theory of traffic distribution through the continuous time absorbing Markov process, *Bulletin of Nagoya Institute of Technology*, pp. 317～326, 1969.
- 46) Irwin, N. A., Dodd, N. and Von Cube, H. G. : Capacity restraint in assignment programs, *H. R. B. Bulletin* 297, pp. 109～127, 1961.
- 47) Sheffi, Y. : *Urban Transportation Networks*, Prentice-Hall, INC., Englewood Cliffe, New Jersey, 1985.
- 48) Daganzo, C. F. : Unconstrained external formulation of some transportation equilibrium problems, *Transpn. Sci.*, Vol. 16, No. 3, pp. 332～360, 1982.
- 49) Fisk, C. : Some developments in equilibrium traffic assignment methodology, *Transpn. Res.*, 14 B, pp. 243～245, 1980.
- 50) 宮城俊彦：交通ネットワーク均衡の理論と計算法，京都大学博士論文，1982年。
- 51) Evans, S. P. : Derivation and analysis of some models for combined trip distribution and assignment, *Transpn. Res.*, Vol. 10, pp. 37～57, 1976.
- 52) Murchiland, J. D. : Road traffic distribution in equilibrium, conference paper, *Mathematical Methods in the Economic Science*, Mathematisches Forschungsinstitut, Oberwolfack, West Germany, 1969.
- 53) Manheim, M. L. and Ruiter, E. R. : DODOTRANS I : A decision oriented computer language for analysis of multimodal transportation systems, *HRB Highway Research Record* 314, pp. 135～163, 1970.
- 54) 杉恵頼寧：増加配分法の実用化に関する研究，土木学会論文報告集，No. 204，pp. 83～93，1971年。
- 55) 杉恵頼寧：短期交通政策の効果測定モデルとその適用例，*IATSS Review*, Vol. 6, No. 4, pp. 18～27, 1980年。
- 56) 加藤 晃・宮城俊彦・吉田俊和：交通分布・配分統合モデルとその実用性に関する研究，*交通工学*，Vol. 17, No. 6, pp. 3～11, 1982年。
- 57) 宮城俊彦・加藤 晃：需要パフォーマンス均衡モデルの実用化に関する一手法の提案：適用事例，*交通工学*，Vol. 20, No. 2, pp. 3～8, 1985年。
- 58) Florian, M. A. and Nguyen, S. : A combined trip distribution, modal split and trip assignment model, *Transpn. Res.*, Vol. 12, No. 4, pp. 241～246, 1978.
- 59) Florian, M. : A traffic equilibrium model of travel by car and public transit modes, *Transpn. Sci.*, Vol. 11, No. 2, pp. 166～179, 1977.
- 60) Florian, M. and Spiess, H. : On binary mode choice assignment models, *Transpn. Sci.*, Vol. 17, pp. 32～47, 1983.
- 61) Gordon, M. : EMME/2 : A new generation in transportation planning, *Mass Transit*, Vol. XII, 1986.
- 62) Roy Nakadegawa 氏 (Director of AC Transit) との私的意見交換による。
- 63) 河上省吾・溝上章志：手段分担・配分統合モデルを用いた手段選択関数と均衡交通量の同時推定法，土木学会論文集，No. 371，pp. 79～87，1986年。
- 64) 宮城俊彦・小川俊幸・小嶋幸則：均衡確率配分法に関する事例研究，土木学会第40回年次学術講演会講演概要集，第4部，1985年。
- 65) Sheffi, Y. and Powell, W. B. : A comparison of stochastic and deterministic traffic assignment over congested networks, *Transpn. Res.*, Vol. 15 B, No. 1, pp. 53～64, 1981.
- 66) Miyagi, T. : On the stochastic user equilibrium model consistent with the random utility theory : A conjugate dual approach, *Proc. of the WCTR*, pp. 1619～1635, 1986.

- 67) Chu, K. C. and Gazis, D. C. : Dynamic allocation of parallel congested traffic channels, Proc. of 6th Int. Symp. on Transportation and Traffic Theory (Buckley, D. J. ed.), pp. 307~326, 1974.
- 68) Hurdle, V. F. : The effect of queuing on traffic assignment in a simple road network, Proc. of 6th Int. Symp. on Transportation and Traffic Theory (Buckley, D. J. ed.), pp. 519~540, 1974.
- 69) Alfa, A. S. : Time-dependent route assignment of peak traffic, Transpn. Eng. Jour. ASCE, pp. 153~165, 1981.
- 70) Ben-Akiva, M., De Palma, A. and Kanaroglou, P. : Dynamic model of peak period traffic congestion with elastic arrival rates, Transpn. Sci., Vol. 20, No. 2, pp. 164~181, 1986.
- 71) Ho, J. K. : A successive linear optimization approach to the dynamic traffic assignment problem, Transpn. Sci., Vol. 14, No. 4, pp. 295~305, 1980.
- 72) 松井 寛・丹羽知紀 : 道路網上の経路誘導に関する基礎的研究, 土木計画学研究論文集, No. 4, pp. 85~92, 1986年.
- 73) Florian, M. and Nguyen, S. : Recent experience with equilibrium methods for the study of a congested urban area, Traffic Equilibrium Methods (Florian, M. A. ed.), Springer-Verlag, pp. 382~395, 1976.
- 74) Dow, P. D. C. and Van Vliet, D. : Capacity-restrained road assignment II : Equilibrium methods, Traffic Engng. & Control, Vol. 20, No. 6, 1979.
- 75) 加藤 晃・宮城俊彦・平岡 隆 : 最短経路原則に基づく交通配分手法の比較・検討, 交通工学, Vol. 14, No. 7, pp. 3~11, 1979年.
- 76) 北川 久・太田勝敏 : 配分手法で用いる  $Q-V$  式に関する考察, 交通工学, Vol. 19, No. 3, pp. 4~13, 1984年.
- 77) 溝上章志・松井 寛・可知 隆 : 日交通量配分におけるリンクコスト関数の理論的算出, 土木学会第 42 回学術研究発表会講演集, 第 4 部, 1987年.
- 78) Miyagi, T. and Yoshida, T. : Some aspects of the combined trip distribution and assignment model derived from the user equilibrium concept, Res. Rept. of the Faculty of Gifu Univ., No. 36, pp. 55~62, 1986.  
(1987. 11. 12・受付)
-