Ⅳ-89　多種モード混合ネットワークにおけるバスの最適サービス水準の決定方法

名古屋大学　正員　河上省吾
名古屋大学　学生員　溝上章志
○　名古屋大学　学生員　伊藤節男

1. はじめに

多手段交通網における交通需要予測や交通施設計画を行なうにあたって、従来用いられてきた4段階推定法では、各モードの費用や所要時間等のサービス水準が、あらかじめ与えるが、これらの値と配分の結果得られる値　との間に大きな格差が生じたり、交通施設の効果が正確に反映されないという欠陥が生じる。そこで、本研究では、与えられた一定のOD交通量のもとで、リンク走行時間や経路選択規範の異なる自動車とバスが、同一のネットワークを共用する場合、分担率から導かれるモード別均衡需要と、需要ーパフォーマンス均衡を考慮しながら、システム全体の評価基準として、利用者便益最大化を達成するバスの最適サービス水準の決定方法について検討する。

2. モデルの定式化

〈機関選択モデル〉　交通目的達成のための犠牲量は、時間Tと費用Pだけで表わされると考え、時間価値wの概念を用いた一般化費用を導入することによって、各モードの分担率が決定されるとする。人は、一般化費用が最小となる交通手段を選択するから、交通目的の効用が非常に大きい場合、i番目のOD間にモードxとyが存在するときの交通機関別分担率は、D_iをiODペア間の潜在需要とすれば、$x_i/D_i=\int_{w^*}^{\infty}\varphi(w)dw$　$y_i/D_i=\int_0^{w^*}\varphi(w)dw$となる。　―(1)

〈配分規範〉　本研究では、自動車とバスの2種モードが、同一のネットワークを共用するような多種モード混合ネットワーク均衡問題について考えている。両モードの配分規範は、利用者便益の立場から、自動車、バス利用者とも等一般化費用配分原則に従うものとする。今、N_i；i番目のODトリップ数、$x_i(y_i)$；自動車(バス)を利用するODペアiのトリップ数、$x_{ik}(y_{ik})$；$x_i(y_i)$のうち$k(h)$経路を利用する自動車(バス)のトリップ数、f_s；単位時間あたりのS系統のバス運行頻度、$t_a^x(t_a^y)$；リンクaで自動車(バス)を利用したときの一般化費用関数、V_a；混合モードによるリンクaの混合リンク交通量とすると、各種の制約条件式は次式となる。

OD保存式　$N_i=\sum_k x_{ik}+\sum_h y_{ih}$　非負条件　$x_{ik}\geqq 0, y_{ih}\geqq 0$　―(2)

また、リンク交通量はバスを自動車に換算(換算係数α)することによって次式のようになる。

$V_a=\sum_i\sum_k \delta_{ika}x_{ik}+\sum_s \Delta_{a,s}f_s\alpha$　―(3)　ここにδ_{ika}, Δ_{as}は0,1の値をとるダミー変数である。一方、一般化費用関数はリンク交通量の連続な単調増加関数、$t_a^x(V_a)$, $t_a^y(V_a)$となる。すると、等一般化費用配分原則は、各モードの経路交通量と運行頻度を変数とした、次のような最適化問題として定式化できる。

目的関数　$F_x=\sum_a\int_0^{V_a}t_a^x(V)dV \rightarrow min$　―(4)

制約条件　$\sum_k x_{ik}=x_i$, $x_{ik}\geqq 0$　―(5)

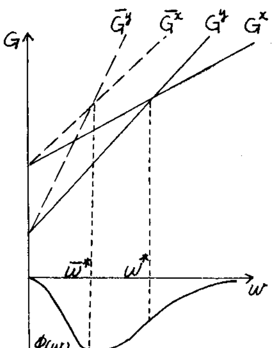
さらに、Kuhn-Tucker定理より、目的関数(4)が、制約条件(5)のもとで最小となるための必要条件は次式である。

$\sum_a t_a^x(V_a)\delta_{ika}-\lambda_i=0$　(if $x_{ik}>0$)　―(6)

$\sum_a t_a^x(V_a)\delta_{ika}-\lambda_i\geqq 0$　(if $x_{ik}=0$)　―(7)

λ_iはラグランジュ乗数である。同様のことが、バス利用者について表現できる。

〈利用者便益の測定〉　今、一般化費用が$\bar{G}^x$である既存のモードx(自動車)があるところに、一般化費用が$\bar{G}^y$であるモードy(バス)が混入することにより、分担率の変化と、需要ーパフォーマンス均衡を通して、モードx, yの一般化費用がG^x, G^yに変化する。(図1)　モードyの所要時間は、経路所要時間だけでなく、平均待ち時間($30/f_s$)も考慮すると、制御可能なサービス水準(f_s)の変化に伴う需要の変動と、需要ーパフォーマンス均衡によるサービス水準とが併に考慮され、分担率に反映される。このとき、システム全体の利用者便益の増加分を考えると、次の内容のものとなる。



$\varphi(w)$：wの確率密度関数
図-1. 分担率と利用者便益

a)　モードxからモードyへ転換した利用者；　費用の節約額 ＋ 増加所要時間の貨幣価値換算額

b) モードxの利用者；　減少所要時間の貨幣価値換算額

ここで、利用者便益の増加量Bの最大化をシステムの評価基準と考えると、

$$B=\sum_{i}\Big\{(p^{x}-p^{y})\int_{0}^{w^{*}}\varphi(w)\,dw+(\bar{t}^{x}-t^{y})\int_{0}^{w^{*}}w\varphi(w)\,dw+(\bar{t}^{x}-t^{x})\int_{w^{*}}^{\infty}w\varphi(w)\,dw\Big\}\rightarrow max \quad -(8)$$

$\bar{t}^{x}$はyが混入する前のxの所要時間である。このシステムは(8)の全体最適化問題が、運行頻度やサービス水準の変化に伴う利用者の意志を反映した分担率の変動を通して部分最適化問題(4),(5)に制約を課し、一方、2つ(自動車，バス)の部分最適化問題が、相互に影響しながら、与えられた分担需要のもとで経路配分パターンを決定し、その結果として求まる走行時間や費用を通して全体最適化問題に干渉するという構造になっている。従って、部分最適化問題は、全体最適化問題の制約条件とみることができ、これらは2レベルシステム制御問題を構成している。

3. 部分最適化問題の凸性とシステムの再定式化

2節で定式化されたシステムを直接解くことは非常に困難である。しかし、部分最適化問題が凸計画問題であれば具合が良い。そこで、部分最適化問題(4),(5)の凸性について検討する。制約条件式は、経路交通量、および運行頻度に関して線形であるから、これらを満足する変数の集合Rは凸集合である。ここで、任意の2点$\boldsymbol{Z}^{(1)}$, $\boldsymbol{Z}^{(2)}\in R$に関して、$F_x$をテーラー展開すると、

$$\begin{aligned}
&F_x(\boldsymbol{Z}^{(2)})-F_x(\boldsymbol{Z}^{(1)})-(\boldsymbol{Z}^{(2)}-\boldsymbol{Z}^{(1)})^{T}\nabla F_x(\boldsymbol{Z}^{(1)})\\
&=\frac{1}{2}(\boldsymbol{Z}^{(2)}-\boldsymbol{Z}^{(1)})^{T}H[\theta\boldsymbol{Z}^{(2)}+(1-\theta)\boldsymbol{Z}^{(1)}](\boldsymbol{Z}^{(2)}-\boldsymbol{Z}^{(1)})\\
&=\frac{1}{2}\Big(\sum_{a}\frac{dt_a^{x}}{dV_a}\Big)\Big\{\Big(\sum_{i}\sum_{k}d_{ik}\frac{\partial V_a}{\partial x_{ik}}\Big)+\Big(\sum_{i}\sum_{h}e_{ih}\frac{\partial V_a}{\partial y_{ih}}\Big)+\Big(\sum_{s}g_s\frac{\partial V_a}{\partial f_s}\Big)\Big\}^{2}\\
&\quad+\Big(\sum_{a}t_a^{x}\Big)\Big(\frac{\partial}{\partial x_{ik}}+\frac{\partial}{\partial y_{ih}}+\frac{\partial}{\partial f_s}\Big)^{2}V_a \qquad -(9)
\end{aligned}$$

ここで、$0\leqq\theta\leqq1$，Hはヘッシアン行列を示し、$d_{ik}(e_{ih})$ g_sは、(1)の解集合と(2)の解集合での自動車(バス)の経路交通量の差，S系統の運行頻度の差を表わす。今，$t_a^x(V)$を単調増加関数と仮定すると、$\frac{dt_a^{x}}{dV_a}>0$となり、また$x_{ik}\geqq0, y_{ih}\geqq0, f_s\geqq0$に対して$V_a\geqq0$であり、かつ$\sum_a t_a^x\geqq0$であるから、(9)$\geqq0$となる。よってこれより、(5)(6)(7)は(4)(5)の必要十分条件となる。つまり、混合フローにおける等一般化費用配分原則問題は、単一モードの場合と同様に$\boldsymbol{Z}\in R$で、凸計画問題となり、F_xの局所的最小解は大局的最小解に一致する。同じように、バスの利用者における等一般化費用配分原則についても同様のことがいえる。以上のことから、2節で定式化された2レベルシステムは、以下のように再定式化することが可能である。

目的関数

利用者便益の増加量 (8) → MAX.

制約条件

自動車のKuhn-Tucker必要十分条件　(6),(7)

バスのKuhn-Tucker必要十分条件

OD保存条件式

非負条件

モードの需要制約 $N_i\int_{0}^{w^{*}}\varphi(w)\,dw-\sum_{h}y_{ih}=0$

この問題は、通常の第2種の非線形計画問題となっている。

4. 計算法

この問題を解くために、変換法を用いて制約条件なし問題Gに変換し、降下法を基礎とした解法を採用した。この問題の特徴は、決定変数の数が未知であり、また、その数が非常に多いことである。それらの問題点を解決するためのアルゴリズムを以下に述べる。

0. 初期実行可能解$\boldsymbol{Z}^{0}$を与える。
1. $\boldsymbol{Z}^{k}$に対応したG^{k}、およびリンクサービス水準を求め、各OD対に対し、Column Generation Algorithmを用いて、実行可能経路$p\in E^{k}$を選択する。
2. $p\in E^{k}$である経路に対して、勾配$\nabla G(\boldsymbol{Z}^{k})$を求める。
3. 勾配法により、降下方向ベクトルd^{k}，刻み幅α^{k}を求め、$\boldsymbol{Z}^{k+1}=\boldsymbol{Z}^{k}+\alpha^{k}d^{k}$を新しい解とする。
4. $G^{k}-G^{k+1}<\varepsilon_1$，かつ$\alpha^{k}\|d^{k}\|<\varepsilon_2$ならば終了し、さもなくば、$k=k+1$として、手順1へもどる。

今後、モデルの実際問題への適用の有効性を確証していく必要があり、その結果は発表時に報告する予定である。

参考文献

1) MICHAEL FLORIAN ; "A Traffic Equilibrium Model of Travel by Car and Public Transit Modes," Transportation Science Vol.11, No2 May 1977
2) 松井寛，山下益宏 ；「多種モード混合ネットフローに関する研究」交通工学，Vol13 No7. pp21～29. 1978
3) 宮城俊彦 ：「交通ネットワーク均衡の理論と計算法に関する基礎的研究」京都大学学位論文．1982
4) 河上省吾，溝上章志 ：「バス輸送計画の策定システムに関する研究」第5回土木計画学研究発表会講演集 pp.226～232 1983