

名古屋大学 正 員 河上 省吾
名古屋大学 学生員 溝上 章志

1. 従来の研究と本研究の概要

本研究の目的は、リンク走行時間や経路選択規範の異なる多種のモードが、同一の道路ネットワークを共用する場合の交通需要予測手法、並びに最適バスサービスレベル設計手法を開発することにある。

従来の四段階推定法では、所要時間等のサービスレベルを外生的に与えるために、配分過程を経て得られたサービスレベルと与件値との間に大きな格差が生じる恐れがある。本来、これらのサービスレベルは、交通需要と交通パフォーマンスとの均衡値として求められるべきであり、また、新規の交通施設の評価の際も、均衡値を用いて行なわなければ、その正確な効果を計測することはできない。このような理由から、交通施設計画に対して、四段階の各プロセスを結合した交通需要予測手法・効果測定手法の開発が強く望まれている。このような中で需要-パフォーマンス均衡を組み入れた交通需要予測モデルがいくつか開発されており、それらの主要な研究をTable. 1に示す。

ここで対象としているように、新規交通施設計画がバス輸送システムの導入の場合には、その便益の帰属主体は、現在何らかの交通手段を利用してトリップを行、ている人であり、その効果が発生集中や分布交通量に大きな変化を与えることはないと考えられる。そこで、本研究では交通機関別分担と配分プロセスを結

合した交通需要予測手法と、それを用いた最適バス輸送計画法を開発した。本研究で開発したモデルは、構造の点で松井のものに類似している。しかし、本モデルを用いることにより、個人の交通に対する効用最大化原理に基づいたモード選択から得られる総利用者便益を最大化するようなシステムを設計することができる。そのため、より実際に近い交通現象を再現することができるうえ、利用者最適な機関・経路選択需要下での最適バス輸送計画問題にまで、モデルを拡張することが可能である。

本研究では、2章で多種モード混合ネットワーク均衡問題の定式化とその必要条件について述べ、3章で本モデルに用いたModal Demand Model (以下MDモデルと記す)とMDモデルに基づく全モード利用者の便益の測定法、システム評価基準について述べる。4章では、分担需要-パフォーマンス均衡を考慮した交通需要予測問題、及び最適バス輸送計画問題を、スレベルStackelberg計画として定式化する。次に、部分最適化問題を構成する多種モード混合ネットワーク均衡問題の凸性を証明することにより、7、部分最適化問題をその必要十分条件で置換えた形で4章で定式化された問題の再定式化を行なう。5章では、求解のためのアルゴリズムの開発と、仮想的ネットワーク下の適用例について述べる。

2. 多種モード混合ネットワーク均衡問題

多種モード混合ネットワーク均衡問題とは、自動車や

Table. 1 結合モデルに関する従来の研究

型	論	使用目的	モデル	年	結合プロセス	主 要 内 容
集計	決定	予測	Florian ²⁾	1977	分母・分母・配分	集計型ロジックタイプの分母率とBeckmann タイプモデルに3D-P対称交通需要予測モデル。
	決定		加藤・岩城 ²⁾	1979	分母・配分	Beckmann タイプの逆需要関数に重み係数を添用して、場合の目的関数意味づけとその解の存在・解決。
	決定		河上・田田 ²⁾	1981	分母・分母・配分	同時逆推定最適化問題として定式化し、解法として交通費用が収束するまでIA法を用いた反復分布交通量を求める。
	決定・確率		Boyce・LeBlanc・Chen・Lee & Lin ²⁾	1981	分母・分母・配分	Boyce (1): OD対、m: モード、k: ルート) を変数にしたBeckmann タイプモデルに、個々の最適最小化選択行動のばらつきを考慮するための各プロセスのエントロピー条件を導入している。このモデルによる各プロセス選択の証明を行っている。nested logit タイプの選択モデルとの関係を示す。
	決定・確率		岩城 ²⁾	1982	分母・配分	Beckmann モデルを用いたモード均衡モデルを解くために、その対称均衡問題と考える逆推定関数の導入もいわれる。
	決定		松井・山下 ²⁾	1978	分母・配分	各モード利用者は利用者最適な選択を行なうという条件のもとで、system最適となる分母率をプロババと求める。
非集計	確率	予測	Sheffi & Daganzo ²⁾	1979	分母・分母・配分	3過程をハイパーネットワークという仮想的なネットワークを仮定し、各過程に於ける逆推定率を求める。この時、需要と便益が同時進行するようなサービスと需要量の関係条件を示す。

バスなどのリンク走行時間や経路選択規範の異なる多種のモードが、同一の道路ネットワークを共有する場合のネットワーク均衡状態を求める問題である。

今、モデルの一般性を失わない程度に問題を簡略化するために、車とバスという二種類のモードが同一道路ネットワークを共有している場合を考える。まず、各モードのリンク走行時間の相異について考えてみる。対象とする道路ネットワークは \$n\$ 本のリンクから成り、\$n\$ 個の O-D 間トリップが分布するとき、各変数を、

- \$N_i\$; \$i\$ 番目の O-D トリップ数 (\$i=1, 2, \dots, n\$)
- \$x_i\$; 自動車を利用する \$i\$ 番目の O-D トリップ数
- \$y_i\$; バスを利用する \$i\$ 番目の O-D トリップ数
- \$x_{ik}\$; 自動車を利用する \$i\$ 番目の O-D トリップのうち、\$k\$ 経路を利用するトリップ数 (\$k=1, 2, \dots, k_i\$)
- \$y_{ik}\$; バスを利用する \$i\$ 番目の O-D トリップのうち、\$k\$ 経路を利用するトリップ数 (\$k=1, 2, \dots, k_i\$)
- \$f_s\$; 単位時間当りの \$s\$ 系統の運行頻度 (\$s=1, 2, \dots, S\$)
- \$t_a\$; リンク \$a\$ 上で自動車を利用したときの走行時間 (\$a=1, 2, \dots, A\$)
- \$t_a^b\$; リンク \$a\$ 上でバスを利用したときの走行時間

とおく。ここで、\$N_i\$ を与件とした場合を考えると、\$i\$ 番目 O-D トリップの保存式は次のように表わされる。

$$N_i = x_i + y_i = \sum_k x_{ik} + \sum_k y_{ik} \quad (1)$$

$$x_i, y_i, x_{ik}, y_{ik} \geq 0 \quad (2)$$

さらに、リンク \$a\$ の交通量 \$Q_a\$ は、バス台数を換算係数 \$Q\$ を用いて自動車台数に換算することによつて、

$$Q_a = \sum_i \sum_k \delta_{ika} x_{ik} + \sum_s \sum_k \delta_{ksa} f_s \quad (3)$$

で表わすことができる。ここに、\$\delta_{ika}\$ は自動車における \$i\$ 番目の O-D ペア間の第 \$k\$ 経路がリンク \$a\$ を含むとき 1、含まないとき 0 の値をとるブーリアン変数であり、\$\delta_{ksa}\$ はバス系統 \$s\$ がリンク \$a\$ を含むとき 1、含まないときには 0 の値をとるブーリアン変数である。また、\$t_a^x\$, \$t_a^b\$ はリンク \$a\$ 上の交通量 \$Q_a\$ の関数として

$$t_a^x = t_a^x(Q_a) \quad t_a^b = t_a^b(Q_a) \quad (3)$$

のように表わされる。

次に、各モードの経路選択規範について考える。第 1 のモードである自動車の利用者は、Wardrop が提案した第 1 原則である等時間原則に従うものとする。一方、第 2 のモードであるバス利用者は、容量制約なしの等時間原則（この配分結果は、すべての O-D トリップを

最短経路に配分することと同値である。）に従うものとする。上記の 2 つの配分規範は、トリップを行なう人がそれぞれのモードを利用した場合、自分にとって最良の経路を選択したときの交通均衡状態を表現することになり、user-optimized flow pattern となる。

単一モードの等時間原則によるネットワーク均衡問題は、N.O. Jørgensen によつて最適化問題として定式化されたが、多種モードが混合した場合の自動車の等時間原則による均衡パターンも、自動車の経路交通量を変数とした場合、次のように表現することができる。

$$\text{minimize } F_x = \sum_i \int_0^{x_i} t_a^x(v_a) dv_a \quad (4)$$

$$\text{subject to } \begin{cases} \sum_i x_{ik} = x_i \\ v_a = \sum_i \sum_k \delta_{ika} x_{ik} + \sum_s \delta_{ksa} f_s \\ x_{ik} \geq 0 \end{cases} \quad (5)$$

この最適化問題の解が、多種モード混合状態における自動車の経路選択規範である等時間原則の概念に一致することは、\$\lambda_i\$ を \$i\$ O-D ペア間に固有の値と考えた時の Kuhn-Tucker 条件

$$\frac{\partial F_x}{\partial x_{ik}} = \begin{cases} \sum_k \delta_{ika} t_a^x(v_a) - \lambda_i = 0 & (x_{ik} > 0 \text{ のとき}) \\ \sum_k \delta_{ika} t_a^x(v_a) - \lambda_i \geq 0 & (x_{ik} = 0 \text{ のとき}) \end{cases} \quad (6)$$

により、単一モードの場合と同じように示すことができる。一方、バス利用者に対しては、輸送可能条件

$$Q \sum_s \delta_{ksa} f_s \geq \sum_i \sum_k \delta_{ika} y_{ik} \quad (\text{for all } a) \quad (7)$$

を伴うと、容量制約なしの等時間原則は、

$$\text{minimize } F_y = \sum_i \sum_k \sum_s \delta_{ksa} y_{ik} t_a^b(v_a) \quad (8)$$

$$\text{subject to } \begin{cases} \sum_i y_{ik} = y_i \\ v_a = \sum_i \sum_k \delta_{ika} x_{ik} + \sum_s \delta_{ksa} f_s \\ y_{ik} \geq 0 \end{cases} \quad (9)$$

のように定式化できる。ここで \$Q\$ はバス容量である。この Kuhn-Tucker の必要条件は次のようになる。

$$\sum_k \delta_{ika} \{ t_a^x(v_a) - \sigma_a \} - \mu_i \geq 0 \quad (10.a)$$

$$y_{ik} \{ \sum_k \delta_{ika} \{ t_a^x(v_a) - \sigma_a \} - \mu_i \} = 0 \quad (10.b)$$

$$\sigma_a \geq 0, \quad y_{ik} \geq 0 \quad (10.c)$$

$$\sum_i \sum_k \delta_{ika} y_{ik} - Q \sum_s \delta_{ksa} f_s \leq 0 \quad (10.d)$$

$$\sigma_a \{ \sum_i \sum_k \delta_{ika} y_{ik} - Q \sum_s \delta_{ksa} f_s \} = 0 \quad (10.e)$$

$$(9)$$

ここで、\$\mu_i\$ は \$i\$ 番目 O-D ペア、\$\sigma_a\$ はリンク \$a\$ に特有のラグランジュ乗数である。今、式 (7) が有効な制約条件でなければ (10.e) から \$\sigma_a = 0\$ となる。このとき \$\mu_i\$ は \$i\$ 番目 O-D ペアのバスによる所要時間となり、式 (10.a) (10.b)

は自動車に対するKuhn-Tucker条件(4)と同一のものとなる。よ、て、バス利用需要が容量よりも常に小さければ、最適化問題(7)~(9)の最適解はバス利用者に対する等時間原則を表現している。

3. M.D.モデルに基づく便益の測定方法と

システムの評価基準

3.1 M.D.モデル

利用者の便益を測定するためには、各モードに対する個々人の効用を明示的に表現することが必要である。この各モードに対する個人の効用の概念を用いたモデルとしては、非集計交通行動モデル(Mc Fadden²⁾)とM.D.モデルがある。非集計交通行動モデルは、利用者の便益測定(Sasaki³⁾)に対して、多くの利点を持つが、ネットワーク均衡経路との結合時の整合性のために、本研究では、M.D.モデルを採用する。

M.D.モデルとは、交通目的の効用と交通に伴う各種の不効用に独立な確率分布を仮定し、潜在需要のうち選択された交通手段の不効用よりも大きな効用を持つトリップだけが、その交通手段の有効需要として顕在化すると考えるモデルである。今、トリップのための犠牲量として費用と時間だけを考えるならば、トリップによる不効用は、一般化費用 $G = c + \omega t$ で表わされる。i番目O-Dペア間トリップ需要を N_i 、 $\phi(\omega)$ を時間評価 ω の確率分布、 P_i^* をi-O-Dペア間の所要費用としたときの自動車、バスの需要 x_i 、 y_i は、それぞれ

$$x_i = N_i \int_{P_i^*}^{\infty} \phi(\omega) d\omega \quad y_i = N_i \int_{P_i^*}^{\infty} \phi(\omega) d\omega \quad (1)$$

$$\text{ここに、} \omega_i^* = (P_i^* - P_i^0) / (t_i^* - t_i^0) \quad (2)$$

で表現される。ただし、 $t_i^* \geq t_i^0$ 、 $P_i^* \leq P_i^0$ の場合だけを考慮している。

3.2 M.D.モデルに基づく便益測定法とシステム評価基準

従来、新規の交通施設投資に対する効果の測定には、主に、転換利用者と誘発利用者だけに対して、Marshallの理論に基づく利用者余剰の計測が行われてきた。しかし、実際には、新規交通施設の設定により新規交通施設への転換者が生じ、既存の交通施設の混雑が緩和される。すると、新規交通施設の設定後も既存交通施設を利用している主体に対しても、交通コストの減少という純同接便益が生じる。このように、総合的な交通計画の見地からは、新規交通施設利用者の便益だけでなく、他の交通施設利用者への効果を計測する必

要がある。そこで、本研究では、個人の効用に基礎をおいたM.D.モデルを導入し、両モードの利用者便益の測定法とシステム評価基準について検討する。

今、一般化費用が G_x である自動車だけが使用されている任意のO-Dペア間に、一般化費用が G_y なる新規のバスシステムが導入されたとする。すると、自動車からバスへの転換により交通機関分担需要とパフォーマンスの均衡状態がシフトし、両モードの一般化費用はそれぞれ G_x 、 G_y に移動する(P_2^*)。このとき、両モードの利用者便益の増加量は次のようになる。

a) 自動車からバスへの転換利用者にと、ては、費用は減少するが、所要時間が増加するから、直接便益は、

(費用節約費) - (増加所要時間の貨幣価値換算額)

b) バス導入後も自動車を利用する人にと、ては、純同接便益として、

(減少所要時間の貨幣価値換算額)

よ、て、システム全体の利用者便益の増加量 $B(z)$ は、

$$B(z) = \int_{P_1^*}^{P_2^*} (P_i^* - P_i^0) \phi(\omega) d\omega + (P_2^* - P_2^0) \int_{P_2^*}^{\infty} \phi(\omega) d\omega + (P_2^* - P_2^0) \int_{P_2^*}^{\infty} \phi(\omega) d\omega N_i \quad (3)$$

となる。ここで、 P_2^0 はバスシステムが導入される以前の車によるi-O-Dペア間所要時間であり、費用については簡単のため両モードともi-O-Dペア間で与件としている。式(3)で表わされる増加便益の総和は、トリップを行なうすべての人についての便益を測定していることから、多種モード混合ネットワークにおけるバスシステム導入の効果を評価する上で最良のものと考えることができる。そこで、システム評価関数として式(3)を採用し、式(3)が最大になるようなシステムの設計を行なう。

4. 交通機関分担需要・パフォーマンス均衡を考慮した

多種モード混合フロー問題とバスサービス決定問題

4.1 モデルの定式化

交通機関分担需要とパフォーマンスとの均衡を考慮した多種モード混合ネットワークにおけるバスサービス決定問題は、3.1で述べた交通機関分担需要と、2.で述

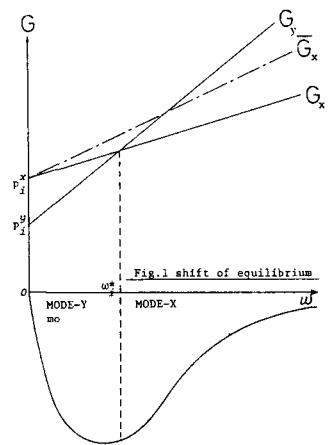


Fig.1 shift of equilibrium

べた需要・パフォーマンス均衡下で、システムの評価関数を最適にするようなバスサービス水準を設定する問題である。具体的には、制御可能なバスの運行頻度をパラメトリックに変化させたとき各モードに対するネットワーク均衡条件式(4)(5)、(7)(8)(9)を満足させながら、式(4)で表わされるシステム評価基準を最大にするようなバスの運行頻度を決定することである。この問題を定式化すると、以下のようになる。

$$\begin{aligned} & \text{maximize } B(x) = \sum_{i \in N} \left(\frac{1}{\theta_i} \right) \int_{\theta_i}^{\infty} f(w) dw - \left(\frac{1}{\theta_i} \right) \int_{\theta_i}^{\infty} f(w) dw - \left(\frac{1}{\theta_i} \right) \int_{\theta_i}^{\infty} f(w) dw \Big\} N_i \\ & \text{subject to } \sum_i x_{ik} + \sum_i y_{ik} - N_i = 0 \\ & \quad w_i^* = (p_i^* - p_i^*) / (c_i^* - c_i^*) \\ & \quad \text{minimize } F_x = \sum_i \int_{\theta_i}^{\infty} x_{ik}^*(v) dv \\ & \quad \text{subject to } \begin{cases} \sum_i x_{ik} = x_i \\ v_k = \sum_i \sum_j \delta_{ijk} x_{ik} + \sum_j d_{kj} f_{kj} \\ x_{ik} \geq 0 \end{cases} \quad (4) \\ & \quad \text{minimize } F_y = \sum_i \sum_j \sum_k \delta_{ijk} y_{ik} x_{ik}^*(v_k) \\ & \quad \text{subject to } \begin{cases} \sum_i y_{ik} = y_i \\ v_k = \sum_i \sum_j \delta_{ijk} x_{ik} + \sum_j d_{kj} f_{kj} \\ y_{ik} \geq 0 \\ Q \sum_j d_{kj} f_{kj} > \sum_i \sum_j \delta_{ijk} y_{ik} \end{cases} \end{aligned}$$

この問題は、最適化問題の制約条件として最適化問題を含んだ2レベルStackelberg計画問題⁽⁶⁾を構成している。まず、このStackelberg問題のもつ意味について考えてみる。システム設計主体の設定した評価関数(4)で表わされるシステムの全体最適化問題は、制御可能な運行頻度や、内生的に決定される所要時間の変化に伴う分担率の変化を通して、式(4)(5)、式(7)~(9)の部分最適化問題の制約条件に影響を及ぼす。一方、2つの部分最適化問題は、混合フローという形で相互に影響を及ぼしながら、与えられた分担率のもとで、各モード利用主体にと、そのuser-optimized flow patternを決定する。この結果はリンク走行時間を通して全体最適化問題に干渉し、全体最適化問題を最適にするようなバスの運行頻度を求めるという構造になっている。

次に、このモデルが再現する現象について考えてみる。全体最適化問題の中に含まれる分担率モデルは、与えられたサービスレベルのもとで、トリップ主体は自分にとって非効用の最も小さい交通機関を必ず選択するという構造をしており、システム最適化のために他のモードを強制的に選択させられる人は存在しない。

そのため、このモデルは、任意の制御可能なサービスレベルのもとで、経路選択だけでなく交通機関選択についても、利用者最適パターンを再現することになる。さらに、手段選択過程がネットワーク均衡過程よりも上位のレベルにあるということから、選好の順位付けを行っていることになり、本モデルを用いれば、より実際に近い交通需要を予測しながらバスサービスレベルの設定を行うことが可能となる。

このことから、式(4)の問題を交通需要予測問題として考える場合には、外生的に設定されたバスサービス水準のもとでの利用者最適な分担率と経路フローパターンが再現され、一方最適バス輸送計画問題として考える場合には、利用者最適な手段選択とフローパターンのもとでシステムにと、最適なサービス水準を求めることができる。

4.2 部分最適化問題の凸性とモデルの再定式化

前節で定式化された2レベルStackelberg問題を、直接解くことは困難であるが、部分最適化問題をその必要十分条件で置き換えることができれば、問題(4)の必要条件を得ることができる。そのためには、

- (a) 目的関数が z に関して微分可能な凸関数であること、
- (b) 任意に固定された z に対して、部分最適化問題の有限な最適解 $x(z)$, $y(z)$ とそれに対応する最適Lagrange乗数 λ が存在すれば良い。ここで x, y, λ は解ベクトルであり、 $z = (x, y, \lambda)$ である。

そこで、多モード混合均衡フローを決定する部分最適化問題(4)(5)の凸性について検討する。

まず、制約条件(5)は、経路交通量及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。次に目的関数(4)の凸性について考える。今、解集合の任意の2点 $z^{(1)}$, $z^{(2)} \in R$ に関して、式(4)をテラー展開すると、

$$\begin{aligned} F_x(z^{(2)}) & \approx F_x(z^{(1)}) + (z^{(2)} - z^{(1)})^T \nabla F_x(z^{(1)}) \\ & \quad + \frac{1}{2} (z^{(2)} - z^{(1)})^T H(z^{(1)}) (z^{(2)} - z^{(1)}) \quad (5) \\ & \quad \text{となる。ここで } 0 \leq \theta \leq 1 \text{ で、} H \text{ はヘッシアン行列を示す。このとき、} \\ F_x(z^{(2)}) - F_x(z^{(1)}) & - (z^{(2)} - z^{(1)})^T \nabla F_x(z^{(1)}) \\ & = \frac{1}{2} (z^{(2)} - z^{(1)})^T H(z^{(1)}) (z^{(2)} - z^{(1)}) \\ & = \frac{1}{2} \sum_k \frac{d^2 x_k}{dv_k^2} \left\{ \left(\sum_i \delta_{ik} x_{ik} \frac{\partial v_k}{\partial x_{ik}} \right) + \left(\sum_j \delta_{jk} x_{jk} \frac{\partial v_k}{\partial y_{jk}} \right) + \left(\sum_j d_{kj} f_{kj} \frac{\partial v_k}{\partial f_{kj}} \right) \right. \\ & \quad \left. + \sum_i \lambda_{ik}^* (v_k) \cdot \left(\frac{\partial}{\partial x_{ik}} + \frac{\partial}{\partial y_{ik}} + \frac{\partial}{\partial f_{ik}} \right)^2 v_k \right\} \quad (6) \end{aligned}$$

ここで、 d_{ik}, e_{ik} は、それぞれ、点(1)と点(2)の解集合での i 番目0-Dペア間の自動車、バストリップにおける、第 k 、第 l 経路交通量の差であり、 g_k は k 系統の運行頻度の差を表わしている。今、 $h_k(u)$ は単調増加関数と仮定できるから、 $dh_k(u)/du \geq 0$ となる。また、 $x_{ik} \geq 0$ 、 $y_{ik} \geq 0$ 、 $f_k \geq 0$ に対して $u \geq 0$ であり、かつ $h_k(u) \geq 0$ であるから、式(4) ≥ 0 となり、 H は半正定値となる。これによつて

$$F_x(z^{(2)}) \geq F_x(z^{(1)}) + (z^{(2)} - z^{(1)})^T \nabla F_x(z^{(1)}) \quad (7)$$

となるから、目的関数 F_x は凸関数であると言えることができる。

凸関数であれば擬凸関数であり、目的関数が擬凸関数で実行可能領域が凸であればKuhn-Tucker条件は十分条件となることから、式(5),(4)は式(4),(5)の必要十分条件となる。つまり、多種モード混合フローにおける等時間原則配分問題も、単一モードの場合⁽¹⁾と同様に $z \in R$ で凸計画問題となり、 F_x の局所最適解は大局的最適解に一致する。バス利用者に対する部分最適化問題についても全く同様のことが成立する。よつて、全体最適化問題の制約条件を構成する2つの部分最適化問題は、その必要十分条件で置き換えることができる。

以上の結果より、4.1で定式化された問題は、以下に記す問題と等価になる。

$$\begin{aligned} \max \quad & B(z) = \sum_k \left\{ (y_k^2 - p_k^2) \int_0^{x_k} \phi(u) du + (q_k^2 - t_k^2) \int_0^{y_k} \phi(u) du + (r_k^2 - s_k^2) \int_0^{f_k} \phi(u) du \right\} N_k \\ \text{subject to} \quad & \sum_k x_{ik} + \sum_k y_{ik} - N_i = 0 \\ & w_i^* = (p_i^2 - q_i^2) / (x_i^2 - x_i^2) \\ & \sum_k x_{ik} = x_i, \quad \sum_k y_{ik} = y_i \\ & u_k = \sum_k \delta_{ik} x_{ik} + \sum_k \delta_{ik} y_{ik} \\ & \sum_k \delta_{ik} h_k^*(u_k) - \lambda_i = 0 \quad (x_{ik} > 0 \text{ のとき}) \\ & \sum_k \delta_{ik} h_k^*(u_k) - \lambda_i = 0 \quad (x_{ik} = 0 \text{ のとき}) \\ & \sum_k \delta_{ik} h_k^*(u_k) - \mu_i = 0 \quad (y_{ik} > 0 \text{ のとき}) \\ & \sum_k \delta_{ik} h_k^*(u_k) - \mu_i \geq 0 \quad (y_{ik} = 0 \text{ のとき}) \\ & Q \sum_k \delta_{ik} f_k > \sum_k \delta_{ik} y_{ik} \\ & x_{ik} \geq 0, \quad y_{ik} \geq 0 \end{aligned} \quad (8)$$

この再定式化により、問題(8)は通常の等式・不等式条件をもつ第II種の非線形計画問題に変換される。

5. 解法とその適用例

5.1 解法のアルゴリズム

第II種の非線形計画問題は、種々の方法で解くこと

が可能である。ここでは、まず各種の制約条件付最適化問題をペナルティ関数法によつて

$$F(u, t_m) = -B(u) + t_m \sum_k G_k^+(u) + t_m^{1/2} \sum_k E_k^+(u)$$

なる制約条件なしの最小化問題に変換し、問題(9)の持つ特性に通したアルゴリズムを開発することによつて問題(9)を解くことを試みた。ここに、 t_m は $\lim_{m \rightarrow \infty} t_m = 0$ を満足し、単調減少する正值であり、 $G_k(u)$ 、 $E_k(u)$ はそれぞれ、不等式条件式と等式条件式、 $u = (z, \lambda, \mu)$ である。

問題(9)の持つ主な特性を考察してみると以下のようになる。

① 式(9)の決定変数は、各モードの経路交通量と各バス系統の運行頻度である。これらの決定変数の中で、各モードの経路交通量を表わす変数の数は前も、て与えられているわけではなく、最適化の過程で求まるものである。また、その総数は、ネットワーク規模のべき乗のオーダーで増加するため、決定変数の数が極めて多くなる。

② 全体最適化問題は、部分最適化問題(ネットワーク均衡問題)を最適解に向かわせると同時に、自らも最適解の方向へ修正されなければならない。

これらの特性を満足するためには、部分最適化問題であるネットワーク均衡問題を解くためのルーチをアルゴリズムの中にとり入れながら全体最適化問題の解の修正が行なわれるようなアルゴリズムを開発する必要がある。また、各モードの通過経路を、各イテレーションで実際に用いられる可能性のあるものだけに限定することによつて、計算時の記憶領域をできる限り小さくすることが重要である。以下に、本研究で開発したアルゴリズムを紹介する。これは、宮城⁽²⁾の解法を応用したものである。

step 0. 初期実行可能解 u^0 を与え、 $E_k^0 = E_k^0 = \emptyset$ 、 $m=0$ とおく。

ここで E_k^0 、 E_k^0 は自動車・バス利用者の配分の対象となる経路集合である。

step 1. u^m に対応したリンクフロー z^m を求め、目的関数の値 F^m を計算する。次に各モードに対するリンクバフオーマンス $h_k^* = h_k^*(u_k)$ 、 $h_k^* = h_k^*(u_k)$ を求め、各0-Dペアに対する最短経路 P_k^* 、 P_k^* を求める。

step 2. $P_k^* \in E_k^m$ 、 $P_k^* \in E_k^m$ であればstep 3.へ、そうでなければ $E_k^m = E_k^m \cup P_k^*$ 、 $E_k^m = E_k^m \cup P_k^*$

step 3. $P_k \in E_k^m$ 、 $P_k \in E_k^m$ 、各系統の f_k に対して、勾配 $\nabla F(u^m)$ を計算する。

step4. $P_1 \in E_1^{(m)}$, $P_2 \in E_2^{(m)}$, f_i からなる変数集合 $U^{(m)}$ に対して, $\|VF(U^{(m)})\| < \varepsilon$ ならば計算を終了し, もしそうでなければ step5 へ進む. ε は与えられた正値である.

step5. 降下方向ベクトル $d^{(m)}$ を求める. ここでは勾配法を用いるため, $d^{(m)} = -VF(U^{(m)})$ とする.

step6. 最適刻み幅 $\alpha^{(m)}$ を

$$F(U^{(m)} + \alpha^{(m)} d^{(m)}) = \min F(U^{(m)} + \alpha d^{(m)})$$

なる1次元探索法により求める.

step7. 新しい解を, $U^{(m+1)} = U^{(m)} + \alpha^{(m)} d^{(m)}$ とする. こゝでもし, $U^{(m)}$ のうちで負となるものがあれば0とおき, それらに対応する自動車利用経路 g_i , バス利用経路 g_j を解集合 $E_1^{(m)}, E_2^{(m)}$ から除き,

$$E_1^{(m+1)} = E_1^{(m)} - g_i, \quad E_2^{(m+1)} = E_2^{(m)} - g_j \quad \text{とする.}$$

step8. 新しい目的関数値 $F^{(m+1)}$ を求める.

step9. あらかじめ指定された正の定数 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ に対して $F^{(m)} - F^{(m+1)} < \varepsilon_1$ かつ $\alpha^{(m)} \|d^{(m)}\| < \varepsilon_2$

ならば計算を終了する. そうでなければ step10. へ

step10. $m = m+1$ として step1. へもどる.

5.2 モデルの適用例

本研究で提案したモデルとその解法の有用性を検証するために, Fig.2 に示す1 O D 2 経路のうち, 片方の経路にバス路線が設定されているような簡単なネットワークを対象にして,

Table.1 parameters	
total number of trips	900
bus charge conversion factor α	2.0
average riders of car	1.2
car cost	¥250

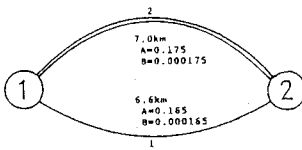


Fig.2 model network

バスの運行頻度を外生的に与えた交通需要予測問題に対するモデルの感度分析を行った. この時, 外生的に与えられる変数の値を Table.1 に示す. また, 自動車によるリンク走行時間関数 $t_a(v_a)$ は $t_a(v_a) = A_a + B_a v_a$ なる線形関数と仮定し, バスのリンク走行時間関数は, 自動車のそれの1.5倍とした. 各ネットワーク情報は, Fig.2 に示すとおりであり, 時間評価値は $N(6.67, 9.07)$ の正規分布の正の部分だけを考えた確率分布に従うものとする. Table.2 にその結果を示す. バス運行頻度が少ない場合, つまり, バスの分担率が低く道路の混雑が激しい場合には, 経路1と2の間で, 所要時間の相

Table.2 sensitivity for bus frequencies

bus freq.	3	4	6	10	15	20
自動車利用経路の所要時間	227.15 (11.67)	204.91 (11.59)	175.25 (11.35)	146.41 (11.11)	146.38 (11.11)	179.78 (11.05)
バス利用経路の所要時間	61.70 (11.16)	52.59 (11.10)	42.12 (11.01)	32.52 (11.00)	8.76 (10.90)	7.47 (10.99)
F(U)	161.16 (26.65)	192.13 (24.07)	232.64 (21.49)	271.06 (19.49)	284.85 (18.34)	302.75 (17.80)
B(U)	65819	58912	49766	40852	35615	33228
収束回数	44	33	28	50	47	17
VF	29.7	7.6	12.2	6.9	45.3	36.8
バス分担率	35.8	42.6	51.7	60.2	65.5	67.2

対誤差が多少程度生じている. これは, 第2経路を配分対象経路にとり込んだ時に, 自動車での O D ペア間所要時間として, 現イテレーションでの各経路所要時間の平均値を用いていることに起因するものと考えられる. この誤差も, 運行頻度が増加し, 道路の混雑が緩和されるのに従って減少する. 現実的には, この誤差も全く無視できるものであると考えられる. また, 運行頻度の変化に伴う自動車・バス両モードの所要時間の変化, 目的関数, バス分担率等の変化の傾向から見ても, このモデルとアルゴリズムの有効性が判断できる. Fig.3, Fig.4 に, 運行頻度が本例の場合の解と目的関数値の収束状況を示す. 28回の繰返しで, $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 制約による収束判定を満足しているが, 15回程度でも最終的な解にほぼ到達していることが分る. 総 CPU 時間は FACOM-382 で 2.96 秒程度であり, 計算時間の上でも十分に実用性のあるアルゴリズムになっていると考えられる. 全体最適化問題の凸性が保証されていないため, 収束回数セリウムにばらつきが見られるが, 初期値を変えても同じ解に収束することから, これらの解は大局的最適解に到達していると考えられる.

次に, Fig.5 に示すような, リンク1, 2がバス路線を共用している道路ネットワークを対象にして, 運行頻度をパラメトリック決定変数として取り込んだバスサービス

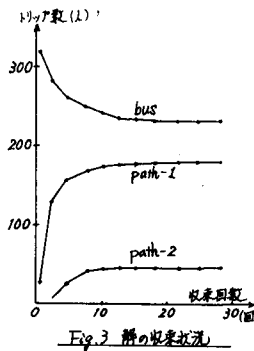


Fig.3 解の収束状況

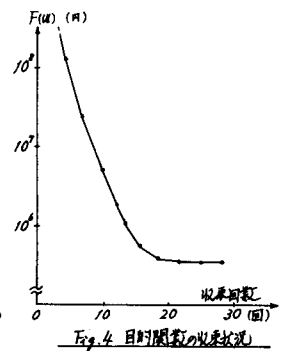


Fig.4 目的関数値の収束状況

決定問題を考え

る。徒歩速度を
km/h、その他の
変数はTable.1の
ものと同様とし、
各リンクの A_n, B_n
はFig.5に示す
とおりである。統
トリップ数が、
6000/hで、その
O-D構成比と自
動車による所要
費用をTable.3に
示す。この時、

最適バス頻度は20.2/h、バス分担率は10.9%となり、
目的関数値は 0.60709×10^4 円/hとなる。各モードのフロ
ーパターンをFig.6, Fig.7に示す。自動車の場合、①-
②-④と①-③-④、④-③-⑤と④-①-⑤のO-D
経路で等時間フローパターンが成立している。その
誤差は、0.07%、8.47%であり、実際には無視でき
るものと考えても良い。

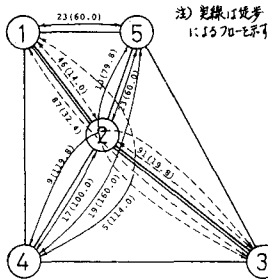


Fig.6 flow pattern of bus users

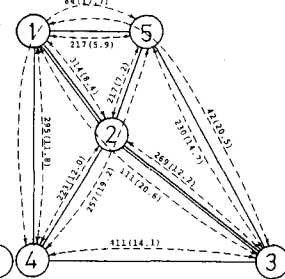


Fig.7 flow pattern of car users

6. おわりに

本研究では、バスと自動車という多様なモードが同
一リンクを共用する路面交通ネットワークにおいて、
交通機関選択過程とネットワーク均衡過程とを結合し
た交通需要予測手法を開発すると同時に、両モード
利用者の増加便益を最大にするようなバス輸送計画の
決定手法について検討を行った。我々は、これらの問
題を各モードのネットワーク均衡問題を表現する部分
最適化問題を制約条件として、システム全体の旅便益
の増加量を表す全体最適化問題を最適化する2レベ
ルStackelberg問題として定式化した。このモデルは、

ある制御可能な交通サービスが与えられれば、部分最適
化問題から得られるトリップ費用等のサービスレベルの
もとで、個人は自分にとって効用最大となる交通機関
と経路を選択するという構造をしている。そのために、
交通需要予測モデルとしては、利用者最適に基づいた実
際に近い交通行動を表現できるモデルになっていると考
えられる。このモデルを用いることにより、交通施設
投資のあった後の、短期の交通機関分担、配分交通量
の予測が可能となる上、システム最適となるような交通施
設計画の策定を行なうことも可能である。

実際にこの問題を解く際には、部分最適化問題の凸性
を証明することにより、必要十分条件になった部分最適
化問題のKuhn-Tucker条件を全体最適化問題の制約条件
とみなし、ペナルティ関数法を用いて解く方法を示した。
さらに、ネットワーク均衡問題の性質を考慮しつつ、ペ
ナルティ関数の最適解を探索するためのアルゴリズムを
開発し、モデルネットワークに適用することにより、モ
デルとアルゴリズムの有用性を実証した。

しかし、本モデルを実際のバス・自動車混合ネットワ
ークに適用する際には、各モードのリンク走行時間関数
や時間評価値の確率密度関数の正確な推定が必要であり、
実測や調査により、これらの実態を十分に検討すること
が重要である。

参考文献

- 1) M. Florian (1977). A Traffic Equilibrium Model of Travel by Car and Public Transit Modes, *Transportation Science*, Vol.11, No.2, pp.166-179
- 2) 田嶋 孝城 (1979). 交通ネットワークにおける需要均衡問題とその解決, 土木学会論文報告集, 第289号, pp.121-130
- 3) 河上 佳田 (1981). 分散 配分過程を結合した交通量予測モデル, 土木学会論文報告集, 第306号, pp.45-58
- 4) D.E. Boyce, L.J. LeBlanc, K.S. Chou, Y.T. Lee & K.T. Lin (1981). Combined Models of Location, Destination, Mode and Route Choice: Implementation Issues Related to a Generalized Algorithm. *Proc. of the Conference on Structural Economic Analysis and Planning in Time and Space*
- 5) 孝城 (1982). 双対交通均衡モデル—交通モード均衡を例に—, 第4回土木計画学研究発表会講演集, pp.403-412
- 6) 板井 山下 (1978). 多モード混合の最適ネットワークフローに関する研究, *交通工学*, Vol.13, No.7, pp.21-29
- 7) Y. Sheffi and B. Boyanov (1979). Hypernetworks and Supply-Demand Equilibrium Obtained with Disaggregate Demand Models, *TRR* 673, pp.113-121
- 8) T.A. Benenich and B.M. Fadden (1975). Urban Travel Demand-A Behavioral Analysis
- 9) K. Sasaki (1982). Travel Demand and the Evaluation of Transportation System Change; A Reconsideration of the Random Utility Approach, *Environment and Planning A* 14, pp.169-182
- 10) 志水 (1982). 多目的と競争の理論, 共立出版
- 11) 井上 (1981). 道路網における均衡交通量配分の均衡制約法による計算法, 土木学会論文報告集, 第313号, pp.125-133