【土木計画学研究・論文集 No.6 1988年11月 招待論文】

利用者均衡を制約とする交通ネットワークの最適計画モデル*

Optimal Transportation Network Planning Models Constrained by User Equilibrium

朝 倉 康 夫**

By Yasuo ASAKURA

1. 序 論

最適交通網計画（Optimal Network Design）とは，ある評価基準からみた「望ましい」交通ネットワークを構成することである．方法論的には，リンクとノードの配置・選択と，その容量の決定に関する「モデル」を数理最適化問題として定式化し，それを解くことである．モデルの適用範囲は，長期の戦略計画から短期の運用計画にわたるすべての交通網計画の領域をカバーすることができ，機能的にも広範囲にわたるネットワークの計画と設計を対象にすることができる．

このとき，最適化の目的となる評価関数が包括的であればあるほど，最適計画モデルは交通網計画の過程に近づく．なぜならば，代替案作成から予測，評価に至るプロセスからなる交通網計画の目的は，本来「望ましい」ネットワークの計画・設計にあるからである．したがって，そのための方法論研究の必要性は改めて述べるまでもなく，これはまた最適交通網計画モデルの研究意義に他ならない．[1),2)]

しかし，複数の計画評価主体の多様な評価指標のすべてを，目的関数あるいは制約条件として最適化問題の中に取り込むことは難しい．これは，数学的対応の限界に加えて，定量的な評価指標作成の困難さによるところが大きい．そこで，現在までに研究・開発されてきたネットワークの最適計画手法を計画策定過程に位置づけるならば，「ある与えられた評価基準から見た計画案の作成を支援するための方法論」とするのが適当である．

伝統的な交通網の最適計画モデル[3)]は，OD分布交通量が与えられているという条件のもとに，ネットワークを構成する最適なリンクの組合せ（離散変数）を求めるものであり，数学的には整数計画問題として取り扱われてきた．研究の主な関心は，膨大な数の解の組の中から，最適解を効率的に求める方法の開発にあったといってよい．このような最適化モデルでは，交通の流れを二次的なものとして必ずしも明示的に扱っていないこともあり，モデルの有効性に対して現実的な視点からの批判が加えられたこともあった．しかし，最近では，解法の改良によりある程度規模の大きなネットワークを対象にすることが可能になったほか，[4)]

* キーワード：最適交通網計画，利用者均衡，2レベル最適化，交通システム分析
** 正会員 工博 愛媛大学講師 工学部土木工学科（〒790 松山市文京町3）

複数の評価関数を持つ場合や計画評価との結合が試みられており，その適用範囲は拡大しつつある.[5)]

一方，与えられたネットワークにおいて生じる交通流を記述・予測するための方法は，いわゆる交通量配分手法として研究されてきた．その理論は現在までに，高度に精緻化されるとともに，数理的手法の発展にともない，計算技術的にもかなり操作性の高いものとなってきている．[6),7)]

今日では，フロー分析手法に関する研究の成果を受けて，ネットワークの最適計画モデルの中で交通流を明示的に扱うような展開が可能となってきている．このような背景にあって，本研究の第一の目的は，交通網の最適計画モデルを交通システム分析の枠組みの中でとらえ，その概念的モデルフレームを示すことにある．これはモデルの基本的構造を知るうえで極めて重要である．最適計画モデルの対象が，ネットワーク構造を持つすべての交通システムの計画と運用にあることからも，システム論的な理解の必要性は明らかであろう．

第二の研究目的は，ネットワーク利用者の合理的な交通選択行動が利用者均衡理論により記述できることを前提に，それを考慮した道路網の最適計画モデルの定式化について説明することにある．ＯＤ需要が与えられている場合においてモデルの構造を示した後，需要がサービスレベルにより変化する場合へと議論を拡張する．これは，ネットワーク交通流を考慮した典型的な交通システムの最適計画モデルであり，上述の一般的モデルフレームの適用例を示すものである．

以下では，2.において交通システム分析における最適計画モデルの一般的フレームを示す．3.では，それを用いてＯＤ需要が所与の場合の道路網の最適計画モデルの定式化について述べる．4.では，ＯＤ需要の変化を内生的に決定することのできる最適計画モデルを説明し，最後に5.において，最適ネットワーク計画モデルに関する今後の研究の方向性について2，3の考察を加える．

2. 一般的モデルフレーム[8)]

最適交通ネットワーク計画モデルの一般的モデルフレームを説明するために，まず，交通システム分析の概念的枠組を示し，記述モデルと計画モデルの定義と役割について述べる．つぎに，記述モデルを内生化した最適計画モデルが，２レベル最適化問題として一般的に定式化できることを示す．

(1) 交通システム分析の概念的枠組

交通システムは，ある特定の環境における人や物の移動・輸送にかかわる物理，社会・経済および制度的要素の集合体である．交通システムの分析を行うために，これらを次の三つの要素に集約する．すなわち，経済活動の土地への投影である土地利用(A)，交通システムの供給条件(T)，交通の流れ(F)である．これらの要素間には次のような関係がある．交通の流れ(F)は，土地利用(A)によって規定される交通需要が，交通供給(T)との相互作用により顕在化したものである．一方，土地利用(A)は，交通の流れ(F)から決まる交通サービス水準の影響を受けて変化する．交通サービスの供給者は，これらの相互作用を考慮して供給条件(T)を操作し，交通システムを管理・運営していく．

交通システム分析の役割は，いくつかのサブモデルを用いて，このような構成要素間の関係を明らかにし，システム供給者の意志決定を支援することにある．

交通システム分析の概念的フレームワークに関しては，とくに供給サイドの解析に焦点をあてた研究がこれまでにいくつか報告されており，[9)〜13)] 体系的なレビューも行われている．[14),15)] システム構成要素も先に集約したものに加えて，制度的環境や利用可能な資源を考慮しているものもある．しかし，交通システム解析における最適計画モデ

ルの役割を理解するためには，複雑なシステム構成は必要ではない．そこで，本研究では従来の交通システム分析の成果を参考にして，最小限の要素〔A，T，F〕からなるシステム構成を用いるものとした．

交通システム分析におけるサブモデルは，大きく２つのグループに分けることができる．これらはそれぞれ交通システムの需要側と供給側の行動に関わるものである．以下では，その特徴を明らかにするために，供給者の意志決定変数を計画変数（Design Variable），需要側であるシステム利用者の行動を表す変数を挙動変数（Behavior Variable）と呼んで区別する．計画変数は，ネットワークの構成や容量などハードな交通施設・技術と，運行頻度や料金体系などソフトな管理・運用政策の両者を含むものである．挙動変数は，利用者の交通選択行動あるいは集計された交通流を表す変数であり，トリップ生成の有無，出発時刻，目的地，交通手段，経路の選択に関わっている．

第１のモデルグループは，需要側の行動を表すものである．これを交通状態の記述（descriptive）モデルと呼ぶ．これは，与えられた計画変数に対する挙動変数の値を求めるものであり，システム利用者の交通選択行動を記述するものでなければならない．

利用者の行動を集計することによって得られる交通の流れのパターンは，二つの異なったメカニズムの結果生じる．ひとつは，利用者の交通システムに対する需要が，経済活動水準（A）に規定されるとともに，システムのサービス水準（L）により変化するというメカニズムである．他のひとつは，サービス水準が，交通供給水準（T）と利用者数（F）の大小により変化するというメカニズムである．これらの関係を，それぞれ需要関数$F=D(\cdot)$およびパフォーマンス関数$L=P(\cdot)$により表す．後者は単なる物理的関係を表すものであって，経済的行動に影響されるものではない．

$$F=D(A,L,\alpha) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2.1)$$

$$L=F(T,F,\beta) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2.2)$$

ここに，α，βはそれぞれの関数のパラメータである．

経済活動水準を交通システム分析の外生変数とすれば，記述モデルは交通システムの供給条件が与えられたときに生起する安定的なフローパターンF_{EQ}とサービス水準L_{EQ}の組

$$[F_{EQ}, L_{EQ}] = f(A,T,\alpha,\beta) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2.3)$$

を求めるものである．〔F_{EQ}，L_{EQ}〕は，式(2.1)と(2.2)をともに満足していなければならない．このようなモデルは，需要モデルあるいは需要・パフォーマンス均衡モデル[9]と呼ばれる．

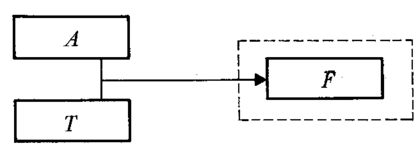

Fig. 1　Study Area of Descriptive Models

利用者均衡は，与えられた交通ネットワーク上での需要・パフォーマンス均衡であり，交通量配分におけるWardropの等時間原則[16]を一般化した概念である．[17] 利用者は各自の交通費用が最小になるように合理的な交通選択行動を行うとすると，その結果生じるであろう交通流の均衡状態とは，『個々の利用者にとって，自己の選択を変更してもトリップに必要な費用を現状よりも少なくすることができない状態』である．

記述モデルは，供給側の技術的特性が固定されているときの交通量の予測を行うものであるが，供給側からみると，ある供給行為を実行したとき交通システムのパフォーマンスにどのような影響が及ぶかを調べるために用いるモデルである．このモデルは需要側の行動のみを説明するものであ

って，供給側の行動は外生的に取り扱われる.

交通システム分析における第2のモデルグループは，システム計画(planning or design)モデルあるいは供給モデルと呼ばれる．これは，各種制約条件下での供給者の取る行動をモデル化したものであり，供給者の合理的意志決定過程に対応している．計画モデルは，供給行為が交通システムに及ぼす影響を考慮しつつ，望ましい計画変数の値を決定できるようなモデル構成を持っているが，供給行為の影響を考慮するためには，記述モデルを内に含んでいなければならない．また，意志決定の評価基準に何らかの望ましさの指標を用いることから，計画モデルは最適化手法を用いた規範(normative)モデルの体裁を取ることが多い.

計画モデルは，需要とパフォーマンスの相互作用の結果，実際に生じる需要とそのサービスレベルに応じて供給者が行動したときの均衡状態を説明するものであると解釈することも可能である．すなわち，供給者の行動を交通システムのサービス水準と利用者数の関数(供給関数)

$$T=S(F,L,\gamma) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (2.4)$$

で表すとすると，この均衡は，

$$\{T^*,[\hat{F}_{EQ}^*,\hat{L}_{EQ}^*]\}=g(A,\alpha,\beta,\gamma) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (2.5)$$

と書くことができる．ここに，

$$[\hat{F}_{EQ}^*,\hat{L}_{EQ}^*]=f(A,T^*,\alpha,\beta) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (2.6)$$

である.

このような場合，計画モデルを需要・パフォーマンス・供給均衡モデル[9]と呼んでもよい．しかし，現在までのところ，需要の変化を織り込んだ計画モデルに関する研究は少なく，需要が与えられたときのパフォーマンス・供給均衡モデルとでも呼ぶべきものが多い.

〔A,T,F〕の関連において計画モデルの対象範囲を示すと，Fig.2となる．土地利用(A)は与件であるとすると，計画モデルは，決定すべき交通供給水準と土地利用の相互作用により，どのような交通の流れ(F)が生起するかを記述しつつ，望ましい供給水準(T)の値を決定できるものでなければならない.

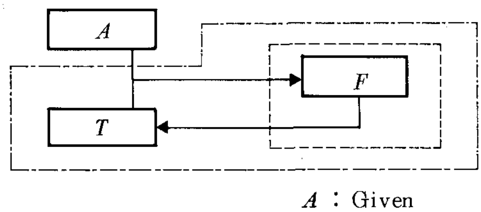

Fig. 2 Study Area of Planning or Design Models

交通システム計画モデルは，戦略(strategic)レベルから戦術(tactical)，操作(operational)レベルに至る領域を対象としている．その具体的な特徴は，操作可能な計画・運用変数として何を選択するかによって示される．計画・運用変数として，ネットワークの構成とその容量を選んだとき，交通網計画(Network Design)モデルとなる．与えられたネットワーク上での交通流を記述するために利用者均衡の概念を用いると，それを考慮した交通網計画モデルは，典型的な交通システム計画モデルということになる．車両のルーティング・スケジューリングや交通制御も，ネットワーク問題として扱えるので，これらを交通網計画モデルに含めて考えることもできる.

(2) 交通システムの最適計画モデル

先に述べたように，交通システムの計画モデルは規範モデルの体裁を取り，各種制約条件下で計画評価関数を最適にするような計画変数の値を求める数理最適化問題として定式化されるのが一般的である．計画モデルは記述モデルを内生的に持つから，定式化においては，両者を最適化問題の

中でどのように組み合わせるかということに関する枠組みが必要である.

記述モデルを内生的に持つということは，それが計画モデルの制約条件のひとつに含まれるということを意味する．制約条件が単なる等式や不等式の集合として書けるとき，最適化問題は通常の非線形計画問題あるいは組合せ計画問題となる．しかし，用いる記述モデルによっては，このように単純な構造のモデル構成とはならない．たとえば，利用者均衡がある種の最適化問題として書けることはよく知られているが，それを内生的に持つネットワークの計画モデルの構造は通常の最適化問題とやや異なる.

このような最適計画モデルの一般的フレームワークは，「2レベル計画問題」の視点からゲーム論的に捉えると理解しやすい．2レベル最適化問題とは，以下のようなものである.

■2人の競争者(player)の間で演じられる2人非ゼロ和競争問題を考える．用いる記号は以下のとおりである.[18),19)]

$\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y}$ ：競争者1，2の戦略ベクトル

X, Y ：実行可能な戦略ベクトルの集合

$f_i(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y})$：競争者 i $(i=1, 2)$ の目的関数

$g_i(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y})$：競争者 i $(i=1, 2)$ の制約条件ベクトル

競争者 i は，それぞれ自己の目的関数 $f_i(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y})$ を最小にしようとして行動する．このとき，競争者間の協力や相互情報の有無により，いくつかの解の概念がある.

2人の競争者間に協力関係がない場合を考える．どちらか一方の競争者のみが，他方に関するすべての情報(目的関数や制約条件)を持っているとする．いま，競争者1が2に対して優位な立場にあるとすると，彼(leader)は自己の戦略に対して競争者2(follower)が取るであろう行動を予測して，最適戦略を先に決定することができる．競争者2は，1の戦略を受動的に受け入れて行動せざるをえない．この場合の解(1，2の戦略)が，競争者1先手のStackelberg解と呼ばれるものである.

Stackelberg解は，次のように定式化された最適化問題の解 $[\boldsymbol{x}^s, \boldsymbol{y}^s] = [\boldsymbol{x}^s, \boldsymbol{y}'(\boldsymbol{x}^s)]$ である.

$$f_1(\boldsymbol{x}^s, \boldsymbol{y}'(\boldsymbol{x}^s)) = \min_{\boldsymbol{x} \in X} f_1(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y}'(\boldsymbol{x})) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (2.7)$$

sub. to

$$g_1(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y}'(\boldsymbol{x})) \leqq 0 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (2.8)$$

$$f_2(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y}'(\boldsymbol{x})) = \min_{\boldsymbol{y} \in Y} f_2(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y}) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (2.9)$$

sub. to

$$g_2(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y}) \leqq 0 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (2.10)$$

これは，制約条件にもうひとつの最適化問題を持つ問題であり，2レベル最適化(bilevel optimization)問題と呼ばれている．式(2.7)～(2.8)は上位の問題で，競争者1の行動規範を表している．式(2.9)～(2.10)は下位問題であり，競争者2の行動を記述している．競争者1は自己の戦略 $\boldsymbol{x}$ に対して競争者2が取るであろう最適化行動 $\boldsymbol{y}'(\boldsymbol{x})$ を知っているから，これを予見して自己の最適戦略 $\boldsymbol{x}^s$ を選択する．このとき，競争者2は $\boldsymbol{x}^s$ に対して $\boldsymbol{y}'(\boldsymbol{x}^s)$ を選択せざるを得ない.

Stackelberg解を図示するために，戦略 $\boldsymbol{x}$，$\boldsymbol{y}$ を連続なスカラ変数とし，2次元空間で考える.

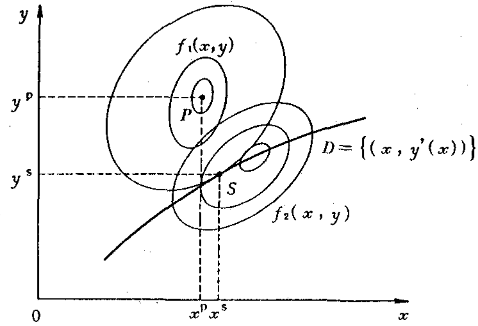

Fig. 3 Stackelberg Solution

Fig.3において，曲線Dは与えられたxに対する競争者2の取る戦略$y'(x)$の集合を表している．Dはx一定の直線が，$f_2(x,y)$の等高線と接する点をつないで得られる．$f_1(x,y)$のD上における最小点Sが，Stackelberg解$[x^S, y^S] = [x^S, y'(x^S)]$である．競争者2がD上の戦略を取る限り，競争者1にとってx^S以上に望ましい戦略はない．

なお，競争者2が1に協力する（あるいは1が2の戦略を完全に制御できる）ならば，競争者1はf_1の最適点Pを選ぶことができる．点SとPは，後に述べる最適道路網計画モデルにおいて，利用者均衡交通流を仮定した場合の解と，システム最適流を仮定した場合の解にそれぞれ対応している．

交通システムの供給側である計画者を競争者1(leader)，需要側である利用者を競争者2(fllower)と考えると，交通システムの最適計画問題は，以上に述べた枠組みを用いて定式化できる.[20)~22)]

上位問題は計画者の意志決定を表しており，競争者1の戦略$\boldsymbol{x}$が計画変数に対応している．目的関数$f_1(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y}'(\boldsymbol{x}))$は，計画者からみた交通システム全体の評価関数である．最小化問題として考えるために，これをある種の費用関数としておく．制約条件は，計画を実行する上での予算制約や，目的関数に含まれなかった評価視点からの制約により構成される．

下位問題は利用者の交通選択行動を記述するものである．利用者は同様の行動規範を持つ個人から構成される集団であり，戦略$\boldsymbol{y}$とは集計化された交通行動に他ならない．一般に利用者は，計画者の目標を知って行動することはなく，与えられた計画パラメータに対して，自己の交通費用が最小になるように交通選択をしようとする．このような利用者の行動を集計すると交通の流れが得られるが，これがある種の最適化問題の解となっていることは多い．先に述べたネットワーク上の利用者均衡や，OD分布交通量予測のためのエントロピーモデル[23)]などがその例である．

利用者の交通選択行動を表す最適化問題の目的関数は，一般に計画者の評価関数とは一致しない．また，計画者は，計画案$\boldsymbol{x}$に対して利用者が取るであろう行動$\boldsymbol{y}'(\boldsymbol{x})$を予測して，政策決定を行うであろう．このような点からも，交通システムの最適計画問題が2レベル計画問題として記述できることは容易に理解できる．

交通計画のプロセスを2レベル最適化問題として解釈しようとすることは，とくに新しい考え方ではない．通常の代替案選択型の交通計画プロセスは，計画者先手のStackelberg問題を近似的に解いているのである．(Fig.4)もし，すべての実行可能な代替案に対して需要解析・計画評価を行うことができるならば，この手順は2レベル最適計画問題の厳密解を計算していることと等価である．

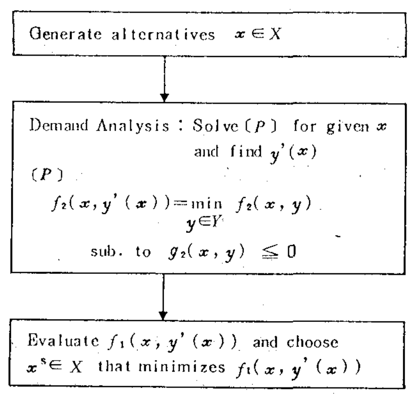

Fig. 4 Transportation Planning Process as Bilevel Optimization Problem

3. 道路網の最適計画モデル

交通システムの計画者は，ある評価視点からみてシステム全体の状態が最適になるような供給行為を計画する．計画者は利用者の交通行動を予測して，最適戦略を決定するとすれば，交通システムの最適計画モデルは，2レベル最適化問題として定式化できる．3.では，この一般的フレームを

適用することにより，道路ネットワークの最適計画モデルを定式化し，解を求める手順について説明する．

従来の最適交通網計画モデルでは，ＯＤ需要は固定されていることが前提であった．そこで以下では，需要があらかじめ与えられているときの定式化を示す．需要の変化を内生化したモデルは，4.で述べる．

(1) 需要固定の場合の定式化[20]

【計画変数】

道路網計画では，ネットワークの構成とその容量が主な計画変数となる．ここでは，道路区間の容量（連続変数）を計画変数とする．連続的な変数を用いることの主な利点は，問題の数学的特性を簡単にし，解を求める上でネットワーク交通流を明示的に考慮しやすいという点にある．これは，交通量の増加による交通サービス水準の低下，すなわち交通混雑が支配的である場合のネットワーク計画問題を扱う上で都合がよい．道路網計画問題は，このようなケースに相当する．

連続的な計画変数を用いる場合でも，離散変数の場合と同様に，実行可能なネットワークの最大構成は先験的に与えられている．最適解の集合のなかで，その値がゼロであるような容量を持つリンクは，最適ネットワークから除かれるので，最終的にはある特定のネットワーク構成が得られることになる．

【上位問題の目的関数と制約条件】

一般的には，ネットワークの整備による波及効果を費用と便益に分け，〔費用－便益〕の最小化を目的関数として選ぶ．計測が比較的容易な費用は，利用者のトリップに関する直接費用とネットワークの建設と運用に関する費用に分けることができる．便益は利用トリップの増加により評価できるが，ＯＤ交通量が固定されている場合，このような便益は一定である．したがって，目的関数としては，費用のみの最小化が用いられる．

目的関数に含まれなかった費用は，制約条件として考慮することができるので，最適計画モデルにおいて計測可能な費用は，目的関数か制約条件のどちらかに含まれることになる．なお，最適解を求める計算技術の面からは，定式化の段階で制約条件とした評価関数を便宜的に目的関数に含めて解くこともあるし，その逆の場合もある．

本研究では，利用者のトリップ費用を道路網全体で集計した総走行時間の最小化を目的関数に取る．この指標の値を計算するためには，計画変数と挙動変数であるネットワーク交通流の両者が必要である．すなわち，総走行時間は，各リンクごとの走行時間と交通量の積をネットワーク全体で集計したものであるが，リンク走行時間は，後に述べる走行時間関数から計算される．これは供給側の計画変数であるリンク容量と，利用者の行動を集計して得られるリンク交通量の関数となっている．

制約条件は，リンク容量を増加させるために必要な建設・改良費用をネットワーク全体で集計したとき，それがあらかじめ与えられた総投資費用の上限を越えないという制約である．この他に，各リンク容量が非負であるという制約を設けておく．

【下位問題】

道路網利用者は与えられたネットワーク上で自由に経路選択行動を行うと仮定すれば，その結果として得られる交通流は利用者均衡条件を満足する．したがって，2レベル計画問題の下位問題であるネットワーク交通流の記述モデルとしては，ＯＤ需要固定型の利用者均衡モデルを用いることになる．

利用者費用関数に相当する各リンクの走行時間関数が，当該リンク交通量のみの単調増加な凸関数であれば，利用者均衡問題は数理最適化問題として定式化できる．交通混雑が存在する限り，利

用者均衡問題の目的関数は上位問題の目的関数である総走行時間と一致しない．制約条件は，OD分布交通量が与えられている場合の，ネットワーク交通流の実行可能性に関する条件式から構成される．

【定式化】

このような前提条件を設けたとき，最適道路網計画モデルは以下のように定式化できる．なお，交通手段は自家用車のみであるとしておく．

$$\min_{\boldsymbol{C}} \sum_{a\in A} V_a'(\boldsymbol{C})\ t_a(V_a'(\boldsymbol{C}),C_a) \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots (3.1)$$

sub. to

$$\sum_{a\in A} G_a(C_a) \leqq G \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots (3.2)$$

$$C_a \geqq 0 \quad \text{for} \quad a\in A \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots (3.3)$$

$$\min_{\boldsymbol{h}} \sum_{a\in A} \int_0^{V_a} t_a(x,C_a)dx \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots (3.4)$$

sub. to

$$\sum_{k\in K_{ij}} h_{kij}=T_{ij} \quad \text{for} \quad i\in I,\ j\in J \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots (3.5)$$

$$V_a=\sum_{i\in I}\ \sum_{j\in J}\ \sum_{k\in K_{ij}} \delta_{akij}h_{kij} \quad \text{for} \quad a\in A \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots (3.6)$$

$$h_{kij} \geqq 0 \quad \text{for} \quad k\in K_{ij},\ i\in I,\ j\in J \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots (3.7)$$

ここに，

C_a ：リンク a の容量（計画変数）

V_a ：リンク a の交通量

$V_a'(\boldsymbol{C})$ ：下位問題のパラメトリック最適解としてのリンク交通量

$t_a(V_a,C_a)$ ：走行時間関数

$G_a(C_a)$ ：建設・改良費用関数

G ：ネットワーク全体への総投資費用の上限

h_{kij} ：ODペア ij 間のパス k の交通量

T_{ij} ：OD交通量

δ_{akij} ：ODペア ij 間のパス k がリンク a を通るとき1，そうでなければ0

A ：リンク a の集合（$a\in A$）

K_{ij} ：ODペア ij 間のパス k の集合（$k\in K_{ij}$）

I,J ：発生および集中ノードの集合（$i\in I$，$j\in J$）

である．

走行時間関数，建設・改良費用関数としてはたとえば，

$$t_a(V_a,C_a)=t_{a0}\left[1+r(V_a/C_a)^k\right] \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots (3.8)$$

$$G_a(C_a)=g_a C_a \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots (3.9)$$

を用いればよい．ここに，

t_{a0} ：自由走行速度による走行時間

r,k ：パラメータ

g_a ：容量1単位を建設・改良するための費用

である．

式（3.1）～（3.3）は計画者の行動を示しており，これが上位問題である．目的関数である総走行時間を評価するためには，下位問題において決められるリンク交通量 $V_a'(\boldsymbol{C})$ の値が必要であるが，制約条件（3.2）～（3.3）に，下位問題が影響することはない．なお，問題の記述を簡単にするため，便宜的にすべてのリンクが建設・改良の対象であるとしておくが，特定のリンクのみの拡幅を考える場合への対応は容易である．

一方，式（3.4）～（3.7）は，OD交通量が与えられたときの利用者の経路選択行動を記述する需要固定型の利用者均衡問題である．計画変数であるリンク容量は，走行時間関数に含まれる形で下位問題の解を規定する構造となっている．

道路網計画では，交通システムの供給側がネットワークの構成や容量を決定することはできるが，

利用者の経路選択行動を直接指示することはできない．ここに定式化した計画モデルでも，利用者は自由に経路選択を行うことができ，その意味でこの問題は，需要側の自由な交通行動を保証しつつ道路網全体の効率的利用を達成する計画案を求めるものであるといえる．

これに対し，ネットワーク上の交通流をシステム供給側が直接制御できるような状況を想定したときの計画問題は，２レベル最適化問題のフレームを持たない．利用者は供給側が指定した最適経路を利用するから，均衡条件が問題の制約にならないからである．ネットワークのフロー変数は，計画変数と同様にシステム供給者側の決定変数となる．利用者行動に関する仮定以外は，すべて先の定式化に関する前提条件と同様であるとすれば，最適計画問題は以下のように定式化できる．

$$\min_{C,h} \sum_{a\in A} V_a\, t_a(V_a, C_a) \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots (3.10)$$

sub. to

$$\sum_{a\in A} G_a(C_a) \leqq G \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots (3.11)$$

$$C_a \geqq 0 \quad \text{for} \quad a\in A \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots (3.12)$$

$$\sum_{k\in K_{ij}} h_{kij} = T_{ij} \quad \text{for} \quad i\in I,\ j\in J \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots (3.13)$$

$$V_a = \sum_{i\in I,}\ \sum_{j\in J,}\ \sum_{k\in K_{ij}} \delta_{akij}\, h_{kij} \quad \text{for} \quad a\in A \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots (3.14)$$

$$h_{kij} \geqq 0 \quad \text{for} \quad k\in K_{ij},\ i\in I,\ j\in J \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots (3.15)$$

この問題は，いわゆるシステム最適交通流を前提とした計画問題[24]であり，通常の非線形計画問題である．問題の構造は利用者均衡流を前提とする場合に比較して簡単であり，解を求める手順も容易である．道路網計画では，システム最適交通流の仮定は現実的ではないが，混雑が厳しく利用者均衡流とシステム最適流の差が小さいと考えられる場合には，先に定式化した最適計画問題（ 3.1 〜 3.7 ）の近似解を与えるものとして，この問題を利用することも考えられる．

(2) 解　法

定式化した問題に解が存在することは，以下の条件の下で保証されている．[18]上位問題の目的関数である総走行時間，制約条件である建設・改良費用および下位問題の目的関数は，計画変数および挙動変数に関して連続変数であり，下位の制約領域は凸である．さらに，下位の均衡問題は許容であって，ある計画変数とそれに対して利用者均衡条件を満足する挙動変数との組からなる集合は空集合でない．

Stackelberg計画問題に対する厳密解を計算するためには，次の２つの計算ステップを繰り返し適用するというのが基本的考え方である．[18]

step.1　与えられた上位問題の解（現在の試行点）に対して下位問題を解く．

step.2　下位問題の最適条件を用いて，現在の試行点における上位問題の目的関数と制約条件の値と勾配を求める．それらを用いて上位問題の解を更新し，新しい試行点とする．

下位問題の制約式が，下位問題の決定変数に関して線形等式のみであれば，step.2における勾配を求めることは比較的簡単である．しかし，道路網計画問題では，下位問題である均衡問題の制約条件には，変数の非負条件（不等式）が含まれているため，やや複雑な手順となる．このような２レベル計画問題の一般的解法をネットワーク計画問題に応用したものとしては，井上[25]による高速道路の最適流入制御に関する研究，河上・溝上[26]によるバス運行頻度の最適化に関する研究がある．しかし，この一般的手順は，必ずしもネットワーク問題の特徴を利用したものとはなっておらず，大規模な問題に適用することは難しい．

利用者均衡条件を変分不等式[27]により記述し，それを上位問題と組み合わせる方法は，ネットワーク問題の特徴を活かすひとつの方法である．たとえば，Marcotte[28]は，繰り返しごとに制約を順に緩めていく方法と，逆に順に制約を加える方法を提案している．しかし，どちらの方法でも，繰り返しを重ねるごとに計算量が増加するという欠点を持っている．

Fisk[29]は，計画問題を鞍点問題に帰着させ，Ermolev[30]のアルゴリズムを適用する方法を示している．これは，Frank-Wolfe 法による補助計算を繰り返すもので，アルゴリズムは簡単であるが，収束計算に用いるパラメータの選択に問題が残されている．[31]

LeBlanc & Boyce[32]による方法は，線形な2レベル計画問題の解法として提案された Bard[33]のアルゴリズムを適用し，上位と下位の目的関数をパラメータにより線形結合するものである．この方法の利点は，システム最適交通流を前提とする問題の解法を使える点にあるが，最終的な解の決定法に問題が残されているほか，アルゴリズム自体にも改良の余地があるという指摘を受けている．[34]

この他，パターン探索法の応用[35],[36]なども報告されている．しかし，いずれにしても，現在までに提案された厳密解法では，適用可能なネットワークの規模はきわめて小さい．効率的な解法の開発のためには，利用者均衡問題の感度分析の考え方を発展させるのが有効であるという指摘[37]にもみられるように，有効な解法に関する研究課題は多く残されている．

最適ネットワーク計画問題の適用計算を現実規模の交通網に対して行うためには，解の厳密性を犠牲にしたヒューリスティックな方法に依らざるを得ないのが現状である．これは，上位，下位問題の繰り返し操作による方法である．この方法では，計画変数の更新の際に交通流を固定的に扱っている．そして，更新された計画変数の値に対して，挙動変数を再度計算するのである．つまり，リンク容量を固定してネットワーク交通流を求める問題（需要固定型の利用者均衡問題）と，リンク交通量を固定してリンク容量の値を求める問題を交互に解くことによって，計画変数と挙動変数の値を同時に求めようとする方法である．

この方法ではフロー変数が厳密な意味では計画変数を完全に制約していないので，最終的に得られた解から計算される上位問題の目的関数の値が，厳密解における値よりも悪い値となることは避けられない．[38] ヒューリスティックな手順によって，実際規模の道路ネットワークを対象に数値計算を行った研究[20]によれば，目的関数の収束，計画変数の値の妥当性などが確認されている．

この他の実用的な方法は，システム最適交通流を仮定した問題の解を用いることである．式（3.10）～（3.15）の非線形計画問題は，分解法の適用などにより比較的簡単に解けるので，それにより求められた最適容量を近似解とするのである．交通混雑は，システム最適交通流を仮定したときにも考慮されており，結果的に利用者均衡交通流との差が小さい場合もある．ただし，走行時間を評価するためのリンク交通量は，最適容量に対する利用者均衡問題の解を用いるべきである．

4. 需要の変動を考慮した場合への展開[39]

ＯＤ分布交通量が与えられた場合の利用者均衡を制約とする最適道路網計画モデルを拡張することにより，需要交通量を内生的に決定できる計画モデルを定式化する．まず，交通システム分析における計画モデルの位置づけなどに関連させて，需要変動を考慮することの意義を明らかにする．つぎに，ＯＤ分布交通量の決定を内生化した最適道路網計画モデルを２レベル最適化問題として定式化し，その特徴を示すとともに，解を求める手順と適用計算例の概要について述べる．

(1) 需要変動を考慮することの意義

従来の最適交通網計画モデルは，ＯＤ分布段階の交通需要が外生的に与えられているという条件の下に，最適なネットワークの構成や容量を決定するものであった．ＯＤ分布交通量が与えられているということは，交通網の計画時点における将来のＯＤ分布交通量が何らかの方法により知られており，交通網の整備・改良が行われても，あらかじめ与えられたＯＤ分布パターンは変化しないと仮定していることにほかならない．

ＯＤ交通量を与えて固定的に扱うことには，２つの問題がある．第一は，サービスレベルの整合性の欠如である．一般に，将来のゾーン間ＯＤ分布交通量の予測値を得るためには，各ゾーンの発生・集中交通量あるいはそれを説明する指標，およびゾーン間のサービスレベル（多くの場合，ゾーン間所要時間）の予測値が必要である．将来の交通網が与えられているという条件の下でも，その設定は容易でないのに，交通網計画モデルではネットワークが与えられていない状態で，サービスレベルの値を設定しなければならない．仮想的に交通網を与えてその値を設定したとしても，それと結果的に得られた交通網上でのネットワーク均衡流が与えるサービスレベルの値は異なるであろうから，その相違をどのように解釈すればよいかという問題が生じる．

第二に，ＯＤ交通量を固定すること自体の問題である．交通網を建設・改良し，サービスレベルが向上すれば，それに応じてＯＤ分布段階，あるいは発生・集中段階でも交通需要はシフトする．とくに，長期の戦略的計画の場合には，ネットワークの構成が大きく変わることもあるから，あらかじめ与えたＯＤ分布交通量を固定的に扱うことは現実的でない．

交通網計画モデルにおいて，ＯＤ需要の変化を内生化することの意義は，交通システム分析における計画モデルの役割からも明らかである．計画モデルは，本来，需要・パフォーマンス・供給均衡を扱うことのできるものでなければならない．3.で述べた需要固定型の最適交通網計画モデルは，パフォーマンス・供給均衡モデルであるに過ぎず，計画モデルの一般的枠組に十分に対応したものではない．需要の変動を内生化して初めて，最適交通網計画モデルは，計画モデルが本来備えるべき構成を持つことになるのである．

交通需要の変動を考慮することは，与えられた土地利用に対して望ましい交通ネットワークを考える上でも都合がよい．土地利用パターンを交通需要関数の説明要因として計画モデルに取り込めば，その土地利用に対し，ある評価視点からみて最も整合したネットワークを得ることができる．

需要変動型の計画モデルでは，計画変数を操作することによる交通需要の間接的なコントロールが可能である．これは，需要追随型ではない交通網計画の展開を議論する上でのひとつの方向性を示していると考えられる．

(2) 従来の研究

ＯＤ分布交通量を内生的に決定することのできる最適交通網計画モデルは，既にいくつか提案されている．著者は，システム最適交通流を仮定するDantzigらによる交通網計画モデル[24]と，ＯＤ分布パターンを決定するための重力モデル的エントロピー法[23]を結合する方法を提案した．[40] しかしこのモデルは，ＯＤ交通量が記述的であるのに対し，配分交通量はシステム最適フローであり，両者の整合性に問題があった．Boyce & Soberances[41]およびBoyce & Janson[42]は，離散的な計画変数を持つモデルにおいて，ＯＤ需要の変動を扱おうとしているが，定式化の過程とフローの取り扱いに検討の余地が残されている．

Lundqvist[43]やLos[44]は，土地利用配置とネットワーク構成の同時最適計画モデルの中で，交通需要の変動を扱っている．これらのモデルでは，

発生・集中量がサービスレベルに応じて決定され，それがOD交通量を決定する構造になっている．しかし，OD分布パターン（単位OD）は，所与とされているから，必ずしも需要変動が内生化されているとはいえない．

(3) モデルの定式化

以上に紹介した需要変動型の計画モデルは，ネットワーク交通流の記述が不十分であるという点に共通の問題がある．OD交通量も配分交通量もネットワーク利用者の交通選択行動を集計したものであるから，それらはネットワーク上での利用者の行動に対応したものでなければならない．

一方，2レベル最適化問題として定式化された需要固定型のネットワーク計画モデルでは，利用者均衡条件により交通流を記述しており，交通流の現象合理性は満足されていた．利用者均衡は，利用者の自由な交通選択行動の結果生じる交通流の均衡状態であり，需要が変動する場合でも成立する．したがって，需要固定型の計画モデルの下位問題を需要変動型の均衡問題に置き変えることにより，OD需要の変化を内生化した最適ネットワーク計画モデルを定式化することができる．

需要変動を考慮すること以外の前提条件は，需要固定の場合と同じであるとする．すなわち，交通システムの供給者は，総投資費用制約の下に，ネットワーク全体での総交通費用を最小にするように，各リンクの容量を決定しようとしているとする．また，同様に，交通手段は自家用車のみであるとしておく．このとき，最適計画モデルは，需要変動型の利用者均衡問題を制約とする2レベル最適化問題として以下のように定式化できる．

$$\min_{\boldsymbol{C}} \sum_{a\in A} V_a'(\boldsymbol{C})\, t_a(V_a'(\boldsymbol{C}), C_a) \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots (4.1)$$

sub. to

$$\sum_{a\in A} G_a(C_a) \leqq G \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots (4.2)$$

$$C_a \geqq 0 \quad \text{for} \quad a\in A \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots (4.3)$$

$$\min_{\boldsymbol{h}} \sum_{a\in A} \int_0^{V_a} t_a(x, C_a)\,dx - \sum_{i\in I,\, j\in J} \sum \int_0^{T_{ij}} D_{ij}^{-1}(y)\,dy \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots (4.4)$$

sub. to

$$\sum_{k\in K_{ij}} h_{kij} = T_{ij} \quad \text{for} \quad i\in I,\ j\in J \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots (4.5)$$

$$V_a = \sum_{i\in I,}\ \sum_{j\in J,}\ \sum_{k\in K_{ij}} \delta_{akij} h_{kij} \quad \text{for} \quad a\in A \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots (4.6)$$

$$h_{kij} \geqq 0 \quad \text{for} \quad i\in I,\ j\in J,\ k\in K_{ij} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots (4.7)$$

ここに，$D_{ij}^{-1}(y)$は，ODペア ij 間の需要関数 $D_{ij}(\cdot)$ の逆関数である．

式（4.4）〜（4.7）で与えられる下位問題は，Beckmann 型の利用者均衡問題である．[45] 交通網が与えられたとき，この問題の解であるネットワーク交通流が利用者均衡条件を満たすことは，解が満足すべき最適性の条件から導くことができる．[1] 交通混雑が存在しない場合，目的関数式（4.4）は消費者余剰の最大化を意味するが，混雑が存在する場合，その経済学的意味は知られていない．

この最適交通網計画問題では，ネットワーク全体の社会的交通費用を最小にするような各リンクの容量を決定できるほか，そのネットワークにおける交通流を同時に求めることができる．このフローパターンは利用者均衡条件を満足しており，

フローを各ＯＤペアごとに集計すればＯＤ交通量が得られ，各リンクごとに集計すればリンク交通量が得られる．どちらも同じ均衡メカニズムにより決まるものであるから，ＯＤ交通量と配分交通量は同じ交通サービスレベルに対応している．ＯＤ交通量は，ネットワーク整備時点での交通サービスレベルにより説明されるから，先に述べたようなＯＤ予測段階と交通網整備後のサービスレベルのズレも生じない．

ＯＤパターンは需要関数により規定されるため，関数の選択は重要である．需要関数は，ＯＤペア間の交通サービスと経済活動のレベルにより，当該ＯＤ需要量を説明する関数である．操作性を考慮したとき，次のような指数関数型の関数を用いると都合がよい．

$$D_{ij}(t_{ij}) = A_i B_j \exp(-\gamma\ t_{ij}) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (4.8)$$

ここに，

A_i ：ゾーン i の活動水準（発生パラメータ）

B_j ：ゾーン j の活動水準（集中パラメータ）

t_{ij} ：ゾーン i, j 間の交通費用

γ ：パラメータ

である．発生および集中パラメータとして，各ゾーンの土地利用を表す社会・経済指標を用いることにより，土地利用パターンを交通網計画モデルのインプット条件とすることができる．交通目的を考慮する場合には，目的に応じたパラメータを選ぶことになる．

計画対象地域の既存ＯＤパターン $D_{ij}{}^0$ が利用できる場合には，それを需要関数に反映させることも可能である．すなわち，

$$D_{ij}(t_{ij}) = A_i B_j D_{ij}{}^0 \ \exp(-\gamma\ t_{ij}) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (4.9)$$

である．計画期間に応じてパラメータ γ を調整することにより，既存ＯＤパターンが将来需要を規定する強さを考慮できる．

なお，需要関数は，利用者の行動を説明する効用関数により裏付けられていなければならないが，ここに用いた指数関数型の需要関数が導かれるための効用関数を明示するには至っていない．

ところで，供給者側の目的関数を総走行費用の最小化に取る場合，下位問題の制約条件に何らかの需要制約を設ける必要がある．そうでなければ，「交通投資を行わず，交通を発生させないようにすることで，走行費用を最小にする」という実際的でない解が選ばれる可能性がある．

土地利用計画などから各ゾーンの発生・集中量があらかじめ求められている場合は，ＯＤ分布交通量を発生，集中エンドで制約すればよい．すなわち，

$$\sum_{j \in J} T_{ij} = O_i \qquad \text{for} \quad i \in I \cdots\cdots (4.10)$$

$$\sum_{i \in I} T_{ij} = D_j \qquad \text{for} \quad j \in J \cdots\cdots (4.11)$$

を下位問題の制約に加えることになる．ここに，O_i, D_j は，それぞれゾーン i, j の発生および集中交通量である．条件によっては，これらの制約のどちらか一方のみを用いてもよい．[46]

発生・集中交通量は与えられていないが，対象地域全体での生成交通量は上位の社会・経済計画により与えられている場合には，総トリップ数 T による制約を受けることになる．[47]

$$\sum_{i \in I,} \ \sum_{j \in J} T_{ij} = T \qquad \cdots\cdots (4.12)$$

どのような需要制約を用いるかは，土地利用の与え方にも関係している．将来予想される土地利用の変化が大きい場合には，それを一旦発生・集中量に変換するよりも，直接需要関数に取り込み，式（4.12）による制約を行うほうが望ましい．

しかしながら，利用者均衡問題に需要制約を加えることは，計画モデルの位置づけからみて，本来望ましいものとはいえない．ＯＤ交通量だけで

なく，発生・集中交通量や生成量も交通網のサービスレベルの変化による影響を受けるから，それを固定することは必ずしも妥当ではない．

下位問題の需要制約を除くためには，上位の目的関数を変更しなければならない．需要の変動を内生化することにより，利用者の便益は固定的でなくなるから，計画評価関数である上位の目的関数を〔利用者費用－利用者便益〕の最小化に変更することが一つの方法である．このような評価基準として，たとえば消費者余剰の最大化を考えることができる．

$$\max_{\boldsymbol{C}} \sum_{i\in I}, \sum_{j\in J} \int^{T_{ij}'(\boldsymbol{C})} D_{ij}^{-1}(y)\,d_y - \sum_{a\in A} V_a'(\boldsymbol{C})\ t_a(V_a'(\boldsymbol{C}), c_a) \quad \cdots\cdots\cdots (4.13)$$

消費者余剰を計算するためには，ＯＤ交通量とリンク交通量の値が必要である．これらは共に下位問題により計算されるものであり，いずれも計画変数であるリンク容量のパラメトリックな関数として記述されている．

なお，以上の議論においては，交通手段の分担関係の変化による需要変動は考慮されていない．これを考慮するためには，分担を内生化した利用者均衡問題[48]を下位問題とすればよい．

(4) 解を求める手順

２レベル最適化問題の解を求めるための一般的手順を適用すれば，需要の変化を内生化したネットワーク計画モデルの最適解は，需要が固定されている場合と同様の考え方により求めることができる．しかし，需要固定の場合に比較して，その手順が複雑になることは避けられない．

定式化に忠実な解を求めるための方法として，需要固定の場合のＦｉｓｋによるアルゴリズム[29]を需要変動の場合に拡張することが考えられる．[8]下位問題である利用者均衡問題を変分不等式により再定式化し，上位問題との組合せによる鞍点問題に帰着させることは，需要変動の場合でも困難ではない．最適解を求めるためには，Frank-Wolfe法を繰り返し適用することになる．

他のひとつの方法は，超過需要関数による下位問題の再定式化の考え方[48]を用いることである．この方法は，ＯＤペア間を直結するダミーリンクを作成し，そのリンクに顕在化しなかった需要（超過需要，Excess Demand）を流す．このとき，超過需要量は一種のリンク交通量と見なすことができるので，需要変動型の問題を見かけ上，需要固定型の問題と同様に取り扱うことが可能となる．したがって，3.に紹介した解法が，そのまま使えることになる．ただし，需要交通量に関する制約が付けられている場合には，超過需要関数法による再定式化が困難となることもある．

計算コストを考えると，このような厳密解法は，規模の大きなネットワークに対して有効ではない．実用的には，解の厳密性を犠牲にした方法を用いなければならない．ヒューリスティックな方法としては，需要固定の場合と同様に，上位と下位の最適化問題を交互に繰り返し解く方法が考えられる．しかし，この方法を用いても，下位問題である均衡問題を複数回解かなければならないので，計算量は少なくない．繰り返しを重ねるごとに，下位問題の反復計算回数を減らすなどの工夫が必要となる．

(5) 実際規模ネットワークでの数値計算の概要[47]

京都府南部地域を中心とする京阪奈地域の道路網を対象に，定式化した需要変動型計画モデルの数値計算を行った．ネットワーク規模は，ノード数92（うちセントロイド数33），リンク数306である．計画変数は，道路網構成が与えられたときの各区間の拡幅容量である．ただし，道路計画実務における路線計画との対応を考慮して，個々のリンク容量ではなく，複数の道路区間から構成さ

れる「路線」の容量を決定変数としている．また，需要関数の発生・集中指標には，ゾーンの従業者数を用いた．

数値計算の結果を以下に要約して示す．

①既存の交通容量を与えて，下位問題である利用者均衡問題によるネットワーク交通流の現況再現性を調べた．発生交通量，ＯＤ交通量，区間交通量のいずれをとっても，再現性はおおむね良好であることが示された．

②従業者数が現在の分布パターンであるとして，ネットワーク全体への総投資費用の上限値の違いによる結果の差異を調べた．いずれの場合も目的関数や計画変数は，繰り返し回数と共に収束する傾向にあり，得られた最適ネットワークも予見された定性的傾向に合致するものであった．建設投資額を変えて，最適化問題を解くことにより，ネットワークのおおまかな整備順位を知ることができるほか，投資による時間短縮効果などの議論も可能であることがわかった．

③将来開発が進むと予想されるゾーンの従業者数が増加したとして計算を行った．現況の従業者分布の場合に比較して，従業者数を増加させたゾーンを通過する路線の容量が大きくなっており，得られたネットワークが土地利用指標の変化に連動していることが示された．

5. 今後の課題

本論文の狙いは，交通網の最適計画モデルを交通システム供給側分析の枠組みでとらえ，一般的モデルフレームを提示するとともに，その具体例として道路網の計画モデルを構築することにあった．

非協力２人ゲームにおいて，競争者間に情報の優劣がある場合の均衡解であるStackelberg解は，制約条件に最適化問題を持つ２レベル最適化問題の解である．計画者(leader)が利用者(follower)の交通行動を予測できるという前提に立つとき，交通システムの最適計画モデルは２レベル最適化問題のフレームの中に定式化できる．交通網計画の場合，所与のネットワークにおける利用者の合理的な交通選択行動は，利用者均衡の概念により記述することができる．したがって，最適交通網計画モデルは，利用者均衡条件を制約として持つ２レベル最適計画問題となる．この計画モデルは，ネットワーク交通流の現象合理性と，交通システム供給者側の計画合理性の両者を満足する．

交通システムの計画モデルは，需要・パフォーマンス・供給均衡を扱うものでなければならないが，従来の最適交通網計画モデルは，ＯＤ分布交通量を固定的に扱っており，それによるいくつかの問題点を持っていた．利用者均衡概念はＯＤ需要が固定的でない場合にも一般性を持つから，需要変動型の利用者均衡問題を制約とする２レベル最適計画モデルは，ＯＤ需要を内生化した最適ネットワーク計画モデルとなる．この考え方を用いて，本研究では需要変動型の最適道路網計画モデルを定式化し，解を求める手順と適用計算例の概要を示した．提案したモデルは，単純化された仮定に基づいているので，論理的には優れているが，効率的な解法を示すに至っていないこともあり，操作性や実用性の面では必ずしも十分なものとはいえない．

本論文に関連して，議論に値するいくつかの魅力ある研究課題が今後に残されている．以下にそれらを列挙して，まとめとしたい．

(1) 一般的モデルフレームの適用と拡張

いくつかの伝統的計画・運用モデルに，２レベル計画問題の枠組みを適用することにより，モデルの解釈および展開が可能となるものと思われる．たとえば，高速道路の最適運用（料金決定[49),50)]および流入制御[51)]），ネットワークの最大容量の計量化，最適土地利用配置[52)]などである．

計画者と利用者の間の提携や情報交換が仮定で

きる場合には，計画者がStackelberg戦略を取ることが最善ではないかもしれない．また，交通システムには，供給者と利用者の行動を抑制あるいは調整する主体が存在する場合もある．このようなケースに対するモデルフレームの拡張は興味深い．

(2) 計画評価関数

需要変動の場合，上位問題の目的関数である計画評価関数を工夫する必要がある．本研究では，消費者余剰を用いる場合を示したが，より望ましい指標の開発をしなければならない．そのためには，効用関数と，それから導出される需要関数の関係について，緻密な議論を行うことが必要である．

複数の評価指標の取り扱いも今後の課題である．単一の評価関数を持つ最適計画モデルは，評価視点の明確な計画代替案を発生させることができるという利点を持つ．計画変数の最適値とそれに対する挙動変数の値を求めておけば，その案に対する他の評価視点からの評価も可能である．異なった評価関数を持つ複数のモデルを適用すれば，複数の特徴ある計画案を作成できるので，それぞれの比較・評価により最終的な案を選択すれば良いであろう．この点は，計画評価の問題と密接にかかわっており，評価における研究の成果を取り込むことが重要であると思われる．

(3) 解法および数値計算法

定式化した最適化問題の厳密解法の開発は，数学的にも重要な課題である．問題が線形の場合について，大規模な2レベル最適化問題の解法が研究途上であり，問題の性質によってはその適用が可能であろう．

交通量配分計算の効率化を目的としたネットワーク分割と階層化による方法[53]についても，適用可能性を検討する必要がある．

(4) 実用的な視点からの検討課題

定式化した道路網計画モデルは，交通時間節約の視点から直接的な道路投資効果をマクロに把握するために使うことができるし，ネットワークの整備順位を知るうえでも利用できるものと思われる．しかし，実用化に際しては，利用者均衡モデルの適用と同様の問題を抱えている．たとえば，計算過程のパッケージ化や，ディスプレイ上でのインタラクティブな計画案の作成・修正システムの開発などにより，モデルへの接近性を高めることが有効であろう．

謝　　辞

経験の浅い著者に，このような発表機会を与えていただいたことに対し，土木計画学研究委員会に感謝いたします．

論文奨励賞の受賞論文は，筆者が研究に着手し始めてから終始適切なご指導をいただいた京都大学佐佐木綱教授との共著論文であり，ここに改めて深甚なる謝意を表します．同時に，京都大学飯田恭敬教授には，ネットワーク研究の広範な領域に渡って，貴重な示唆をいただいたことに対し，心から感謝いたします．また，岐阜大学加藤晃教授をはじめとする交通ネットワーク研究分科会の諸先生方には，本研究を進める上で多くの知的刺激をいただいたし，愛媛大学柏谷増男教授には，本稿を取りまとめる上で適切なコメントをいただいた．ここに記して感謝の意を表します．

参 考 文 献

1) 土木学会編：交通ネットワークの分析と計画，最新の理論と応用，第18回土木計画学講習会テキスト，1987.

2) 飯田恭敬・森津秀夫・朝倉康夫：交通ネットワークの最適計画手法の現況と課題，高速道路と自動車，Vol. 31，No. 3，pp. 27－36，1988.

3) Steenbrink, P.A.: Optimization of Transport Networks, John Willey & Sons, 1974.

4) Magnanti, T.L. & R.T. Wong: Network Design and Transportation Planning; Models and Algorithms, Transp. Sci., Vol. 18, pp. 1–55, 1984.

5) 森津秀夫：最適交通網構成手法に関する基礎的研究，京都大学学位論文，1984.

6) 加藤 晃：交通量配分理論の系譜と展望，土木学会論文集，No. 389／IV－8, pp. 15–27, 1988.

7) 宮城俊彦・溝上章志：交通ネットワークフロー分析手法の現況と課題，高速道路と自動車，Vol. 31, No. 2, pp. 24–33, 1988.

8) 朝倉康夫：交通ネットワーク均衡を考慮した道路網と土地利用の最適計画モデル，京都大学学位論文，1988.

9) Florian, M. & M. Gaudry: A Conceptional Framework for the Supply Side in Transportation Systems, Transp. Res., Vol. 14B, pp. 1–8, 1980.

10) Florian, M. & M. Gaudry: Transportation Systems Analysis: Illustrations and Extensions of a Conceptual Framework, Transp. Res., Vol. 17B, pp. 147–153, 1983.

11) Morlok, E.K.: Types of Transportation Supply Functions and Their Application, Transp. Res., Vol. 14B, pp. 9–27, 1980.

12) Manheim, M.L.: Understanding "Supply" in Transportation Systems, Transp. Res., Vol. 14A, pp. 119–35, 1980.

13) 宮城俊彦・加藤 晃：需要・供給均衡概念に基づく交通需要予測の基本枠組みについて，都市計画学会論文集，No. 17, pp. 313–318, 1982.

14) Turnquist, M.: Research Opportunities in Transportation System Characteristics and Operations, Transp. Res., Vol. 19A, 357–366, 1985.

15) Lardinois, C.: Supply Models for Intercity Passenger Transport: a Review, Transport Reviews, Vol. 7, No. 2, pp. 119–143, 1987.

16) Wardrop, J.G.: Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research, Proc. of Inst. of Civil Engineers, Part II, pp. 325–378, 1952.

17) Florian, M.: An Introduction to Network Models used in Transportation Planning, in Transportation Planning Models (Florian ed.) North-Holland, pp. 137–152, 1984.

18) 志水清孝：多目的と競争の理論，第6章，9章，共立出版，1982.

19) Bagchi, A.: Stackelberg Differential Games in Economic Models, Lecture Notes in Control & Information Sci., Springer-Verlag, 1984.

20) 朝倉康夫：交通混雑を考慮した最適道路網計画モデルとその適用，土木計画学研究・論文集，No. 2, pp. 157–164, 1985.

21) Fisk, C.S.: Game Theory and Transportation System Modelling, Transp. Res., Vol. 18B, pp. 301–313, 1984.

22) Fisk, C.S.: A Conceptional Framework for Optimal Transportation Systems Planning with Integrated Supply and Demand Models, Transp. Sci., Vol. 20., pp. 37–37, 1986.

23) 佐佐木綱：都市交通計画，第7章，国民科学社，1983.

24) Dantzig, G.B. et al.: Formulating and Solving the Network Design Problem by Decomposition, Transp. Res., Vol. 13B, pp. 5–17, 1979.

25) 井上博司：高速道路と一般道路の最適交通分担，土木計画学研究・講演集，No. 5, pp. 233–237, 1983.

26) 河上省吾・溝上章志：分担，配分過程結合交通需要予測モデルとそれを用いた最適バス輸送計画策定手法の開発，土木学会論文集，No. 353／IV–2, pp. 101–109, 1985.

27) Smith, M.J.: The Existense, Uniqueness and Stability of Traffic Equilibria, Transp. Res., Vol. 13B, pp. 295–304, 1979.

28) Marcotte, P.: Network Optimization with Continuous Control Parameters, Transp. Sci., Vol.

17, pp. 181–197, 1983.

29) Fisk, C.S.: Optimal Signal Controls on Congested Networks, Proc. of 9th Int. Symp. Transportation and Traffic Theory in Delft, VNU Science Press, pp. 197–216, 1984.

30) Ermolev, Y.M.: Methods of Solution of Nonlinear External Problems, Kibernetika, Vol. 2, pp. 1–17, 1966.

31) 朝倉康夫：利用者均衡条件により制約された最適ネットワーク形成問題の解法，土木計画学研究・講演集，No. 9, pp. 417–423, 1986.

32) LeBlanc, L. & D.E. Boyce: A Bilevel Programming Algorithm for Exact Solution of the Network Design Problem with User Optimal Flows, Transp. Res., Vol. 20B, pp. 259–265, 1986.

33) Bard, J.: An Efficient Point Algorithm for a Linear Two-Stage Optimization Problem, Oper. Res., Vol. 31, pp. 670–684, 1983.

34) Marcotte, P.: A Note on a Bilevel Programming Algorithm By LeBlanc and Boyce, Transp. Res., Vol. 22B, pp. 233–237, 1988.

35) Abdulaal, M. & L. LeBlanc: Continuous Equilibrium Network Design Models, Transp. Res., Vol. 13B, pp. 19–32, 1979.

36) LeBlanc, L. & M. Abdulaal: A Comparison of User Optimum Versus System Optimum Traffic Assignment in Transportation Network Design, Transp. Res., Vol. 18B, pp. 115–121, 1984.

37) Friesz, T.L.: Transportation Network Equilibrium, Design and Aggregation: Key Developments and Research Opportunities, Transp. Res., Vol. 19A, pp. 413–427, 1985.

38) Harker, P.T. & T.L. Friesz: Bounding the Solution of the Continuous Equilibrium Network Design Problem, Proc. of 9th Int. Symp. Transportation and Traffic Theory in Delft, VNU Science Press, pp. 233–252, 1984.

39) 佐佐木綱・朝倉康夫：ＯＤ需要の変動を内生化した最適道路網計画モデル，土木学会論文集，No. 383/Ⅳ-7, pp. 93–102, 1987.

40) 朝倉康夫：交通混雑を考慮した最適ネットワーク形成に関する2, 3の考察，土木計画学研究・講演集，No. 6, pp. 231–238, 1984.

41) Boyce, D.E. & J.L. Soberances: Solutions to the Optimal Network Design Problem with Shipments Related Transport Cost, Transp. Res., Vol. 13B, pp. 65–80, 1979.

42) Boyce, D.E. & B.N. Janson: A Discrete Transportation Network Design Problem with Combined Trip Distribution and Assignment, Transp. Res., 14B, pp. 147–154, 1980.

43) Lundqvist, L.: Integrated Location Transportation Analysis: A Decomposition Approach, Reg. Sci. & Urban Eco., Vol. 3, No. 3, pp. 233–262, 1973.

44) Los, M.: A Discrete Convex Programming Approach for the Simulataneous Optimization of Land Use and Transportation, Transp. Res., Vol. 13B, pp. 33–48, 1979.

45) Beckmann, M.J., C.B. McGuire & C.B. Winston: Studies in the Economics of Transportation, Yale University Press, New Haven, 1956.

46) Evans, S.P.: Derivation and Analysis of Some Models for Combining Trip Distribution and Assignment, Transp. Res., Vol. 10, pp. 37–57, 1976.

47) 佐佐木綱・朝倉康夫・寺本泰久：発生・集中段階の需要変動を内生化した最適道路網計画モデルの数値計算，交通工学，Vol. 23（掲載予定），1988.

48) Sheffi, Y.: Urban Transportation Networks, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1984.

49) 赤松　隆・桑原雅夫：確率的利用者均衡条件下での最適混雑料金，土木学会論文集，No. 389/Ⅳ-8, pp. 121-129, 1988.

50) 佐佐木綱・朝倉康夫・成瀬英治・宇野伸宏：消費者余剰最大化を目的とする都市高速道路の料金決定問題，ＪＳＣＥ関西支部昭和63年度講演概要，1988.

51) 飯田恭敬・朝倉康夫・邵　春福・田中啓之：複数経路を持つ都市高速道路に対する最適流入制御法，ＪＳＣＥ年次学術講演概要Ⅳ，1988.

52) Asakura, Y. & T. Sasaki: An Optimal Land Use Design Model with Traffic Congestion, Proc. of 5th IFAC/IFORS/IFIP Conf. Transp. Control Systems in Wien, Genser R. (eds.), Pergamon Press, pp. 83–88, 1986.

53) 飯田恭敬・朝倉康夫・広川誠一・鷹尾和享：ネットワークの分割およびハンドリングによる交通量配分計算の簡略化，土木計画学研究・講演集，No.11（掲載予定），1988.

【昭和62年度土木学会論文奨励賞受賞】