

均衡制約付き最適化問題の土木計画への応用可能性 Applying Mathematical Programs with Equilibrium Constraints to Infrastructure Planning

セッションの主旨

宮城俊彦（岐阜大学地域科学部）

静的な交通ネットワーク均衡問題は変分不等式問題や不動点問題の応用によって理論的にはほぼ完成した感がある。現在、動的な交通均衡問題への関心が深まっているが、これとは別に、静的ネットワーク均衡問題を応用した新たな計画問題の構築への試みが関心を集めつつある。この問題は元々経済学において Stackelberg の leader-follower 問題あるいは Nash 均衡モデルとして知られていた経済行動モデルから出発している。その後 2 段階最適化問題として再構築され、上位、下位問題が両方とも数理最適化問題で構成される数理最適化モデルとしてオペレーション・リサーチの分野で研究され始めた。ある時点での最適な政策決定は、与件である人々の行動に影響を及ぼす。よって、人々の政策決定に対する反応を考慮した意志決定問題は、何らかの政策決定変数を含む上位問題と、人々の行動を記述する下位問題からなる 2 段階最適化問題として定式化される。（空間的）経済均衡あるいはネットワーク均衡は一般的には変分不等式問題で記述される。従って、変分不等式問題で記述される均衡問題を下位問題に、上位問題に政策決定問題をもつ 2 段階最適化問題が構成される。この問題を均衡制約付き最適化問題 (Mathematical Programs with Equilibrium Constraints: MPEC) という。このように MPEC は下位問題として現象記述モデルを、上位問題には政策決定問題をもつ数理計画問題であり、計画者が日常的に行う計画策定プロセスそのものを厳密に表現したモデルといえ、今後、土木計画学への応用が期待できる。

MPEC の土木計画への応用にあって焦点となる問題は、以下のような点が考えられる。

(1) どのような計画問題に応用できるのか

MPEC では、交通や経済活動を記述する現象記述モデルが下位問題を構成する。土木計画の分野では多くの現象記述モデルが開発されてきた。土地利用モデル、交通均衡モデルあるいは交通流モデルなどがその典型である。MPEC を応用するに当たっては、従来より研究の蓄積があり、均衡モデル体系がある程度確立している分野ならばどの分野でも構わない。例えば、交通計画は、現実にも 4 段階推定法をベースに行われている（4 段階推定法そのものが都市交通計画プロセスと呼ばれた時代があったほどである）。4 段階推定法をベースにした交通政策の検討は、厳密に定式化すれば MPEC そのものである。従来は、上位計画の最適化の概念が希薄であったため、政策変数をパラメトリックに変化させてその効果を現象記述モデルで確認しているケースが多かったといえる。しかし、より効率的な交通投資や公共事業計画の策定が要求される今日、上位計画問題をいかに構成し、現象モデルとの相互関連のなかで最適な代替案集合を発見していくは計画家に要求されている課題の一つであろう。

同様に、現象記述モデルであっても、変数が共通集合をもち、異なる目的関数を最適化する問題などにも MPEC は有効であろう。例えば、土地利用・交通統合モデルなどがそうである。

MPEC が適用されてきた分野は、最適ネットワーク設計問題、交通信号パラメータ決定問題、高速道路流入制御問題、料金決定問題、施設最適配置問題などであるが、今後とも適用範囲が広がるものと予想される。

(2) 予想される難問

MPEC の最も悩ましい問題は、数理計画問題としての性質が“素直でない”点であろう。すなわち、下位問題の解集合は一般に凸ではない。このことは、従来、非線形計画法で開発されてきた多くの反復解法が直接的には利用できないことを意味する。下位問題の解集合が、必要十分条件で置き換えられるような単純な場合はその限りではない。しかし、一般の均衡条件式は不等式を含む非線形連立方程式体系（あるいは相補性・変分不等式条件）で与えられる。したがって、解法は必然的に複雑になるが、土木計画システムはシステムが巨大で変数が多いことを考慮すると、何らかの簡便法の開発が必要となろう。加えて、解の唯一性の問題も議論の対象となろう。従来は、解法の容易さと政策論的含意から唯一解が求められるように計画問題を構成してきた。しかし、“複雑性システム”の議論に見られるように、解の多様性こそが今日の課題であり、MPEC もこの種の問題を内在している。このように、従来、なおざりにしてきた問題に対し、どのようにアプローチしていくかが問われることになる。

本セッションでは、これまでわが国で提案されてきた MPEC および現在研究されているモデルを概説するとともに、この分野の最新動向を含め今後の研究課題を議論することを意図している。なお、本セッションは 2 レベル最適化を扱う part I と相補性問題・変分不等式を扱う part II で構成されているが、それは上記の内容から判断できるように MPEC の下位問題は相補性・変分不等式問題で構成されるからである。また、part I では、複数解へのアプローチ法としての話題に遺伝的アルゴリズムを取り上げている。無論、この問題に対するアプローチがこれがベストと考えるものではない。ゲーム論的アプローチも重要であるし、アルゴリズムとしてはラグランジュ緩和法なども検討されてしかるべきである。また、このスペシャルセッションが、わが国で研究されている MPEC のすべてを網羅しているわけでもない。これらの点を含め参加者からの活発な意見を期待したい。

1. 2 段階最適化問題の応用

- (1) 土地利用と交通ネットワークの整合性問題
- (2) 公共交通の最適サービス決定と交通ネットワーク均衡問題
- (3) 公共交通の料金設定と交通ネットワーク均衡問題
- (4) 交通施設の組み合わせ最適化問題と遺伝的アルゴリズム

(1) 土地利用と交通ネットワークの整合性問題

朝倉康夫（愛媛大学環境建設工学科）

与えられた交通ネットワークに対して整合的な都市施設の配置や土地利用を求める問題（Facility Location or Land Use Design）に限定して議論したい。交通ネットワークに整合的な土地利用あるいは都市施設の配置を求めるモデルの役割のひとつは、一般の規範的計画モデルの役割と同様に、計画の目標や方向性を提示することにある。他の役割は、与件とした交通ネットワーク（代替案）の評価にある。一般に、ネットワーク上での施設配置問題（0-1 整数計画問題であることが多い）では、利用者は施設を自由に選択することはできず、「最寄り」の施設が割り当てられる。もちろん、施設が提供するサービスの内容にもよるけれども、利用者の自由な選択行動（施設選択や経路選択）を前提とするほうが自

然な場合も考えられる。このとき、下位の最適化モデルにより利用者の行動を記述することにすれば、施設配置問題は2段階最適化モデルとして定式化できる。また、施設配置問題ではリンクの容量制約が考慮されることはあっても、走行費用に代表される交通サービス水準は固定されていることが多い。施設配置パターンによりネットワーク交通流が大きく変化する場合には、利用者均衡問題（目的地・経路選択の統合型）を下位問題とすればよい。各ゾーンの用途別立地量（連続変数）を決定変数とする最適土地利用配分モデルについても、同様である。

（２）公共交通の最適サービス決定と交通ネットワーク均衡問題

溝上章志（熊本大学環境システム工学科）

交通ネットワーク上に自動車と公共交通機関が存在する場合の公共交通サービスの決定問題について考える。ただし、ここでの公共交通は、交通事業者ではなく、対象とするネットワーク上の交通システムを総合的に計画・管理する交通計画者によって導入されるとする。このような問題で考慮されるべき事項は以下である。（１）意志決定主体（グループ）が総合交通計画者Aと交通需要者Bの2（多）者あること、（２）AはBの行動規範や制約条件に関する情報を持っているが、BはAが示す戦略しか分からず、示された戦略に対して自己最適な行動をとる。このように、Aは主導権を持っていて彼にとっての最適戦略をBより先に決定できるという意志決定の序列がある。このような問題を Stackelberg 計画問題といい、上記の問題は総合交通計画者先手の Stackelberg 計画問題で記述できる。この問題では、（３）Aの行動規範は交通システム全体の最適化（上位問題でシステム最適化問題）であり、Bのそれは交通手段と経路という選択に対する効用最大化（下位問題で需要変動型利用者均衡問題）であるというように、両主体の行動規範が異なっていることが特徴である。

先手である総合交通計画者が交通需要者に示す戦略は、公共交通ネットワークやその運行頻度などのサービスレベルであり、交通需要者はそのレベルを見て交通手段と経路を選択する。この場合、リンク上で複数モードが相互に影響し合う場合とそうでない場合に分けられるが、対象とする公共交通機関が鉄道の場合は後者で、自動車と同一の車線を走行するバスなどの場合が前者の例である。後者の場合は、下位問題の分担需要変動型利用者均衡問題は凸計画問題となるから、その Kuhn-Tucker 条件で上位問題の制約条件に置き換えることによって通常の非線形計画問題となり、Stackelberg 計画問題の必要条件を容易に得ることができる。一方、前者の場合は下位問題が数理最適化問題で定式化できないことから、後者ほど容易に解けない。

ここでは、バスを主体とする公共交通の政策分析に Stackelberg 計画問題を適用した成果と問題点に触れる。

（３）公共交通の料金設定と交通ネットワーク均衡問題

鈴木崇児（岐阜大学土木工学科）

公共交通機関の料金設定の標準的な分析は、交通企業の供給行動と利用者の選択行動を表す最適化問題と各主体の行動の相互作用によって生じる現象を記述する均衡モデルを用いて行われてきた。

供給主体の条件としては、公共交通機関のような規模の経済が働く状況下で行われるのサービス供給

の料金設定においては、赤字を回避し、経営を維持していくために次善価格設定の考え方が重要である。例えば、単一の企業が複数のサービスを同時に供給する場合を想定した次善価格設定は、企業のゼロ利潤を保証した上で、社会的厚生を最大化するように各サービスに料金を割り当てるラムゼイ価格設定となる。一方、公共交通の利用者の行動は、効用最大化問題として記述され、料金に対するモード選択率の変化としてモデル化される。

上述の2つの主体の行動が生じさせる需給均衡をモデル化し分析が行われてきたが、これらの応用では料金設定によって生じる公共交通機関と自動車の間の競争環境の変化、すなわち、公共交通機関と自動車利用の分担関係の変化によって道路ネットワーク上で生じる混雑状況の変化が明示的に考慮されてこなかった。

この問題を含めた料金設定問題の枠組みは、MPEC、すなわち、下位問題の均衡状態を制約とした2段階最適化問題として定式化できる。本研究では、ラムゼイ価格基準を多手段ネットワーク均衡の枠組みで再構成することで、上位問題をラムゼイ価格基準を用いた社会的厚生を最大化問題、下位問題を機関分担配分同時決定問題とするラムゼイ価格均衡問題(Ramsey Price Equilibrium Problem:RPEP)として定式化する。本研究の主要な目的は、ラムゼイ価格均衡問題のモデル化とその計算手法、数値例題を用いた料金設定、公共交通企業に対する補助政策の検討である。

(4) 交通施設の組合せ最適化問題と遺伝的アルゴリズム

秋山孝正（岐阜大学土木工学科）

本報告では、土木計画分野での組合せ最適化問題として、高速道路乗り継ぎ制の導入の有無を決定する計画問題を考える。この問題の挙動変数は交通フローであるため、交通均衡配分のために制約条件を含んでいる。また施設計画上の予算などに対応する乗り継ぎ制導入箇所の総数についての制約条件がある。これらの制約のもとで、社会的効率（総走行時間最小など）から組合せを決定する問題である。乗り継ぎ制導入箇所の組合せ最適化問題は、交通量配分を下位問題とする複雑な非線形問題となっており、通常の方法では最適化することが困難である。そこで、組合せ問題の解法として有効な遺伝的アルゴリズムを利用する。遺伝的アルゴリズム(GA)は、生物進化の原理に着想を得た最適化・探索アルゴリズムである。一般に数理最適化問題にGAを用いる場合、遺伝子の集合である染色体で解集合を表現する。また個体の適応度が目的関数値に対応する。GAでは仮想的な染色体で生物集団を設定し、環境に適応する個体が、子孫を残す確率が高くなるよう世代交代シミュレーションを実行する。この遺伝子変化により生物集団が進化するプロセスを一つの求解手順と考えることができる。ここでは、具体的な計算結果を示すとともに、非線形の組合せ最適化問題へGAを適用する場合の有効性と課題について整理する。

II. 変分不等式問題の応用

- (1) 変分不等式問題と空間的一般均衡モデル
- (2) 時間帯別交通配分と変分不等式問題
- (3) 規模の経済性をもつ交通ネットワーク考慮した空間経済モデル

(1) 変分不等式問題と空間的一般均衡モデル

赤松 隆（豊橋技科大学知識情報工学科）

交通ネットワーク研究の分野では、静的な交通均衡配分モデルが、（有限次元の）変分不等式問題（VIP: Variational Inequality Problem）として表現できることが、Smith(1979)、Dafermos(1980)の研究以来、よく知られている。そして、その枠組みは、均衡配分モデルの一般化、解の特性解析、計算法の開発等に有効であることが、'80年代以降の多くの研究によって明らかにされてきた。また、交通均衡配分問題と類似した数理構造を持った物流モデルである空間的価格均衡モデルについても、Florian(1982)以降、VIPの枠組みを用いることによって、多くの発展的研究がなされている。

従来のこれらの研究の多くは、quantity (flow)変数 のみを未知変数とした形式のVIPのみに基づいた表現と解析を行ってきた（実際には、price(cost)変数 のみを用いた表現、あるいは、quantity と price の2種類の変数を同時に用いた表現も可能である）。そのため、静的交通配分モデルと見かけ上はかなり異なった構造を持つ均衡モデル（動的な交通均衡配分、立地均衡、多地域産業連関分析等）については、VIPの枠組みの利用は不可能か、あるいは、あまり有効ではないと思われるようである。

それに対して、本研究は、都市経済学／地域科学／土木計画等の分野において現れる多くの空間的均衡システムモデルが、VIPの枠組みで統一的に表現・解析できることを示す。具体的には、立地均衡モデル、多地域産業連関モデル等の部分均衡モデル、さらに、それらを整合的に統合した空間的（多地域）一般均衡モデルに対して、VIPとしての表現とそれを用いた各種解析・計算法開発の方法が示される。

(2) 時間帯別交通配分と変分不等式問題

藤田素弘（名古屋工業大学社会開発工学科）

時間帯別配分の変分不等式問題への適用について考える。時間帯別配分は通常1日単位で行われている静的配分を、1時間帯（7時台、8時台など）ごとに適用する方法である。すると、1日単位では生じなかった問題が生じる。それは7時に出発した交通量が7時台に目的地に到着できず、8時台に到着するということを見逃すことである。よって時間帯別配分では当該時間帯の最終時刻に各リンクに残っている残留交通量を次の時間帯で走らせるという調整を行う必要がある。この調整は以下のようになる。

$$\begin{aligned} & \text{(各リンクの時間帯別交通量)} \\ & = (\text{静的配分による配分交通量}) + (\text{前時間帯の残留交通量}) \\ & \quad - (\text{現時間帯の残留交通量}) \end{aligned}$$

この調整は、繰り返し計算によって不動点を求める計算となる。よって、その計算で得られる各リンク交通量（調整済み交通量と呼ぶ）は、ネットワーク全体のリンク交通量とリンク所要時間の関数となる。また、あるリンク a のリンク所要時間は、調整前はそのリンク a の交通量のみに依存しているのだが、調整後は他のリンクの交通量にも依存することになる。時間帯別配分（厳密に解く場合）はこの調整済みの交通量とリンク所要時間をもとに利用者均衡（等時間原則）を再現する方法といえる。このような問題は基本的な利用者均衡モデルにおける積分形の目的関数の定式化はできない。しかし、より一般的な利用者均衡の定式化である変分不等式問題として扱えば解くことができるのである。

（３）規模の経済性をもつ交通ネットワークを考慮した空間経済モデル

上田孝行（岐阜大学土木工学科）

交通ネットワークは規模の経済性と外部性を有する代表的なシステムの一つである。それらが交通産業組織を規制する際の論拠となっており、同時に、近年注目されているハブ港湾・空港の整備効果を分析する上での支配的要因にもなっている。しかし、従来の交通改善の効果分析においてこれらの視点が明示的に考慮されることはほとんどない。大きな期待が寄せられている地域開発効果も規制のあり方や規模の経済性の程度の如何によっては必ずしも十分に発揮されない可能性が大きい。本研究は規模の経済性を持つ交通ネットワークを含んだ空間経済モデルを一連の非線形相補性問題として定式化し、その特性と政策的含意について考察する。そして、そのモデルに基づいた政策評価手法と均衡制約付最適化問題の関係についても併せて言及する。