

## 公共輸送企業の供給行動を内生化した 都市交通システムの混雑管理

鈴木 崇 児

### 1. はじめに

都市交通システムにおいて混雑管理が常に主要な政策課題であった<sup>1)2)3)</sup>理由はいくつか考えられる。ひとつには、都市交通システムに含まれる個々の経済主体にとって混雑現象は重要な関心事であること、またひとつには、混雑現象がシステムに含まれるその他の要素と複雑に関連しており、混雑管理を他の政策問題から切り離して検討し難いこと、さらには、都市交通システムが機能するために各所で発生する調整が目に見える形で現れたものが混雑現象であり、多くの人々がその存在を背後にあるシステムの非効率性を示す象徴として認知しており、政策実施に対する理解が得られ易いことなどによるだろう。

利用者は交通サービスの選択をその利用価値と負担費用の差によって判断する。負担費用には貨幣費用以外にもサービス品質に関連する主な費用として時間費用とそれ以外の混雑費用が含まれる。このうち混雑と伴に変動する費用は利用者の判断を誤らせる原因となるため、サービス選択に関する評価の中で多くの関心を集める。また、利用者の交通手段選択は外部性、その多くは混雑現象を通じて他の利用者に影響を与え、都市交通システム内で利用者にとってコントロールできない要素として共有されている。

一方、供給者である輸送企業は、収入と費用の差、すなわち利潤を基準としてサービス供給する。混雑は多くの需要量とそれに比して少ないサービス供給量によって生じており、高収入と低支出を暗示している。採算条件が厳しい中では輸送企業にとっては積極的に混雑を解消する誘因を持たないように思われるものの、供給量の増加やサービス品質の差別化等を通じた混雑緩和によって新たな利潤が確保できるならば、輸送企業は積極的な姿勢をとり得る。混雑に関連する種々のサービス品質は供給費用の構造を通じて、価格設定と密接に関連しているため、輸送企業にとって混雑水準を変化させること

は収入、支出両面に渡って経営を左右することになる。

都市交通システムの管理者は、利用者全般に一定の衡平性を確保しつつ、システムを効率的に運営するために規制・助成政策等を通じてサービス品質に影響力を行使する。サービスの貨幣費用に関連する過度の規制・助成政策、特定の交通施設投資への偏重は、貨幣費用以外のサービス供給品質に歪みを生じさせ、都市交通システムの効率性を阻害し、ピーク時の道路渋滞や公共輸送機関の過度の混雑を助長する一因となった<sup>4)</sup>。また、貨幣費用は利用者にとって部分的な費用でしかなく、旅行時間の消費や肉体的、精神的負荷といった時間以外の混雑に関連する費用にも配慮したバランスのとれた政策決定が望まれている。

従前の都市交通政策では、混雑緩和、低廉かつ高品質なサービス供給、潜在的な需要の充足、衡平性への配慮といった様々な政策目標が掲げられてきたが、その時節に応じて最重要目標が対処的に選ばれることが多く、複数の政策指標の適切なバランスについてまで計画や政策が描かれてきたとは言い難い。もとよりこのような複雑かつ総合的な課題を検討することには困難が伴う。しかしながら、需要に合わせて都市交通システムを拡充することから、より効果的に使うことへと交通政策の目的が転換しつつある現在では、政策変更によるシステムのリバランスへの配慮、すなわち相互作用によって変化する混雑を含めた複数交通機関のサービス水準を適正に調整することが管理者に一層求められている。有効な政策立案の鍵は混雑水準をはじめとする変動するサービス水準の管理にあり、それらの変動を生じさせる異種交通手段間の相互作用を含むメカニズムを理解することは依然として重要な課題となっている。

これまで、都市交通システムにおける混雑問題については、自動車利用によって生じる道路混雑問題を交通工学の分野で、公共輸送企業の供給行動を考慮した車中混雑の問題を交通経済学の分野で主として取り扱ってきており、これらの横断的な議論は未だ十分ではない。このため工学的な観点から具体的な混雑問題を扱ってきた都市交通ネットワーク均衡分析<sup>5)</sup>においては、自動車利用による道路混雑の影響評価に力点が置かれてきた。しかしながら、そのことは公共輸送機関における車内混雑についての分析が重要でないことを意味しない。都市交通システムの管理者の政策変更に対してサービス供給量が変化しない道路混雑とは異なり、公共輸送機関の車内混雑を分析するためには、政策変更に対する供給主体である輸送企業の反応も都市交通ネットワーク均衡分析の枠組みに統合する必要がある。この統合された枠組みによって都市交通システムの混雑管理のような複数交通機関に対する需給をバランスよく組み合わせるような施策立案に対し

て、より説得力のある分析が可能になる。

上述の観点から本論では自動車と公共交通機関の2手段交通ネットワーク均衡<sup>6)</sup>の枠組みに交通輸送企業の供給行動を統合することにより、自動車利用に対する混雑課金施策や公共輸送企業の規制政策が及ぼす都市交通ネットワーク全体への影響を検討するための基本的枠組みを構築する。

## 2. 公共輸送機関の供給量を考慮した都市交通ネットワーク均衡モデル

ここでは2手段交通ネットワーク均衡モデルと公共輸送企業の独占市場における行動を含む最も単純な都市交通システムに対する混雑管理モデルを構築する。

単純化のために都市交通システムは単一起終点がそれぞれ一本の自動車と公共輸送機関の互いに独立した経路で接続されており、道路面上での自動車と公共輸送機関のフローの相互作用は考慮しないものと仮定する。

総交通需要量は都市交通システムのパフォーマンスを示す一般化旅行費用に応じて変化する単調減少関数として表す。例えば(4)式に示す指数関数が当てはまる。ここで、 $Q$ 、 $C$  はO-Dペア間の総需要量と一般化旅行費用、 $Q_0$ 、 $C_0$  は観察されたO-Dペア間の総需要量、一般化旅行費用、 $\gamma$  はパラメータを表す。

$$Q = Q_0 \exp(-(C - C_0)/\gamma) \quad (1)$$

全ての交通利用者は自動車 ( $j=1$ ) か公共輸送機関 ( $j=2$ ) で移動する。

$$Q = \sum_{j=1,2} q_j \quad (2)$$

利用者はO-Dペア間の一般化旅行費用が最も安い交通機関を利用する。なお、 $c_j$  は交通機関  $j$  の一般化旅行費用を示す。

$$C = \min_j \{c_1, c_2\} \quad (3)$$

利用者が交通機関  $j$  を利用する場合の知覚費用は、貨幣費用および時間費用と混雑に関するその他の費用の和である一般化費用として(4)式のように定義する。各々の交通機関を利用するための一般化費用は、都市交通システムの状態を定義する種々の変数の変化を織り込んだ均衡によって決定される。

$$c_j = p_j + \omega t_j(q_j) + \eta_j(t_j, q_j, S_j) + \zeta_j \quad (4)$$

ここで、 $p_j$  は料金、 $t_j$  は所要時間、 $\omega$  は時間価値、 $q_j$  は需要量、 $S_j$  は供給量、 $\eta_j$  は混雑に関するその他の費用、 $\xi_j$  はその他の各交通機関に特有の費用を表す。

### (1) 自動車による旅行費用

私的交通手段の代表である自動車を利用した旅行費用は次の特徴を持っている。貨幣費用に関しては、供給者と需要者が同一であるため通常は供給者から需要者へ料金として課される減価償却費、人権費、保険費、税金等が交通手段選択の場面では知覚されず、通行料金、駐車料金、燃料費が知覚されている。知覚されない貨幣費用の多くは自動車の所有に関係して支出されるため、たとえ公共輸送機関を利用しても自動車を所有していれば回避不能費用として負担することになる。その結果、自動車の利用増加は平均費用の低減につながる。この費用構造が自動車利用を助長する一因となっているものの、その知覚についてはドライバー間の個人差が大きく、交通手段選択の分析に確定的に導入するには困難な面が多い。

時間費用については自動車は混雑の影響を強く受ける。既存の道路ネットワーク容量がドライバーにとっては所与であり、ネットワーク上の混雑水準は自動車利用に対する集計的な需要に依存して決まるため、個々のドライバー自身の選択を変更することはできても、ネットワーク上の混雑水準を自身でコントロールすることはできない。さらに混雑水準に応じて時間費用が不確定に変動するため、交通手段選択時には考慮されない追加的な費用が生じ得る。また、その他の混雑から生じる知覚費用については、肉体的疲労よりも精神的疲労によるところが大きく、ドライバー間の個人差も大きい。

ここでは、利用者にとって影響が大きいと思われる道路混雑による時間費用を自動車利用による混雑費用として考慮することで議論を簡素化する。

道路システムのパフォーマンスを表す旅行時間関数は、需要量と旅行時間の関係から需要量の増加と道路容量の減少に対して旅行時間が逡増する単調増加関数を想定するのが一般的である。例えば、実用的な分析においては以下に示す BPR 関数のように特定化される。ここで、 $t_{01}$  はゼロフロー時の自動車の旅行時間、 $a_1, a_2$  はパラメータを表す。

$$t_1 = t_{01} \{1 + a_1 (q_1/S_1)^{a_2}\} \quad (5)$$

### (2) 公共輸送機関による旅行費用

公共輸送機関による旅行費用は以下の特徴を持っている。バスや鉄道などの公共輸送

機関については供給者と需要者が分離している。このためサービスを供給するための減価償却費、燃料費、人権費、保険費、税金、通行料金、駐車料金等、様々な費用が料金として課されており、交通手段選択時に回避可能な貨幣費用として需要者に知覚される。時間費用についての混雑の影響は、利用される交通機関の技術的特性によって異なるものの自動車利用と比べれば比較的小さいと思われる。バスは一般には自動車と交通路を共有するため混雑の影響を受ける。一方、鉄道は専用軌道を持つため混雑による影響を受け難い。時間費用とは対照的に混雑によるその他の知覚費用は肉体的、精神的両面に及び自動車利用の場合と比較して相対的に大きいと思われる。その多くは車内混雑に起因するものであり、定期的な交通手段選択を想定すれば変動幅は道路混雑よりは相対的に小さいと思われるものの、利用者にとって大きな不確定要因となっている。

以降では、本論の趣旨である混雑を含む交通機関間の相互作用に着目するため、利用者にとって影響が大きいと思われる車内混雑による知覚費用を公共交通機関利用による混雑費用として考慮して議論を簡素化する。

まず、サービス供給量を超えて利用者が需要できる公共輸送機関の場合には過度に需要量が供給量を上回らない限りは、時刻表等に示された旅行時間を維持できることから旅行時間は一定と考えられる。

$$t_2 = \text{const.} \quad (6)$$

このケースでは車内混雑が生じるため、利用者が知覚する混雑費用は需要量や旅行時間の増加、サービス供給容量の減少と伴に増加すると考えられる。公共輸送機関の車内混雑を考慮した知覚費用関数については、実証分析に用いられる代表的な関数が特定化されている訳ではないが、上記の特徴を満たす関数は自動車の所要時間関数に準ずれば以下のように定義できる。

$$\eta_2 = t_2 \eta_{02} \{1 + \beta_1 (q_2/S_2)^{\beta_2}\} \quad (7)$$

ここで、 $\eta_{02}$  は利用者がいない時の単位時間当たりの車内混雑費用、 $\beta_0, \beta_1$  はパラメータを表す。

次に、サービス供給量を超えて利用者が需要できない公共輸送機関、例えば安全性への配慮から全員着座が義務付けられている航空機や特急列車、定員制限のあるバス等の、旅行時間については需要量に関連して(8)式のように定義できる。

$$t_2 = \begin{cases} \text{const}, & 0 \leq q_2 \leq S_2 \\ \infty, & q_2 > S_2. \end{cases} \quad (8)$$

また、混雑による時間費用以外の知覚費用については、サービス供給量を超えて利用者が需要できない公共輸送機関の場合には車内混雑が生じないため供給容量の範囲内では一定と考えられる。

$$\eta_2 = \begin{cases} \text{const}, & 0 \leq q_2 \leq S_2 \\ \infty, & q_2 > S_2. \end{cases} \quad (9)$$

### (3) 都市交通システムの均衡

自動車と公共輸送機関の均衡状態での需要分担関係は、公共輸送機関がサービス供給量を超えて需要されるケースとされないケースで異なる。まず、公共輸送機関がサービス供給量を超えて需要されるケースについては、それぞれの交通機関によって需要増加のために追加的に生じる旅行費用の要素が時間費用とそれ以外の混雑に関する知覚費用で異なるものの、旅行費用全体としての性質は逓増的な単調増加関数で同じであるため、図1に示すように通常の自動車だけのネットワーク均衡と同じように両方の交通機関の旅行費用が等しくなるように均衡する。

図1は横軸に都市交通システム全体に対する総需要量を取り、その内訳である自動車

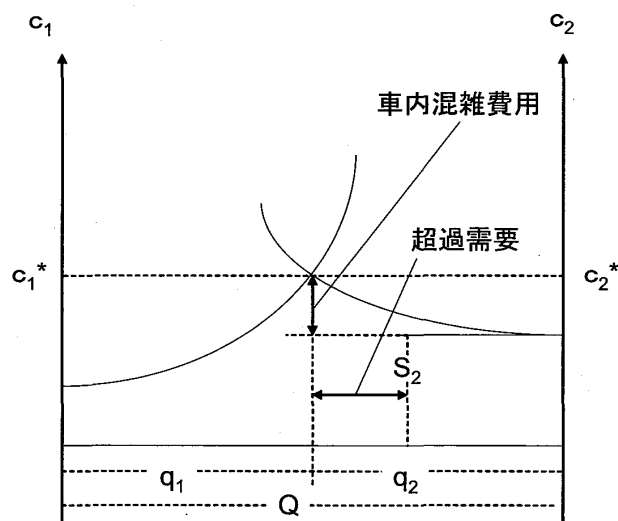


図-1 公共輸送機関に車内混雑がある場合

に対する需要量を左から、公共輸送機関に対する需要量を右からとり、それぞれの交通機関に対する需要量に対応する旅行費用を縦軸にプロットしている。ただし、都市交通システムに対する総需要自体が可変の場合には総交通需要はシステムのパフォーマンスに応じて変化するため横軸の長さも変化することに注意が必要である。図1における各交通機関の切片はそれぞれ混雑がない状態での旅行費用を表しており、各需要量に対応した旅行費用との差が混雑に関する追加的な費用、すなわち、自動車については道路混雑による時間費用の増加を、公共輸送機関については車内混雑による知覚費用の増加を表している。

続いて、公共輸送機関がサービス供給量を超えて需要されないケースについては、均衡状態においてサービス供給が制約となる場合とならない場合で異なる。すなわち、潜在的な利用者を含む公共輸送機関の利用者数が公共輸送機関のサービス供給量  $S_2$  以下ならば都市交通システムは図2、一方、潜在的な利用者を含む公共輸送機関の利用者数が  $S_2$  以上の場合には図3に描かれるように均衡状態が生じる。図3の状態では、たとえ需要分担が安定的であっても利用者の旅行費用は自動車と公共輸送機関の間で異なる。このギャップは潜在的には公共輸送機関を選択する誘因を持つ利用者が自動車を余分に選択するために生じている。

### 3. 公共輸送企業のサービス供給モデル

公共輸送企業のサービス供給に関する総費用  $TC_2$  は、固定費用  $FC_2$  と可変費用  $VC_2$

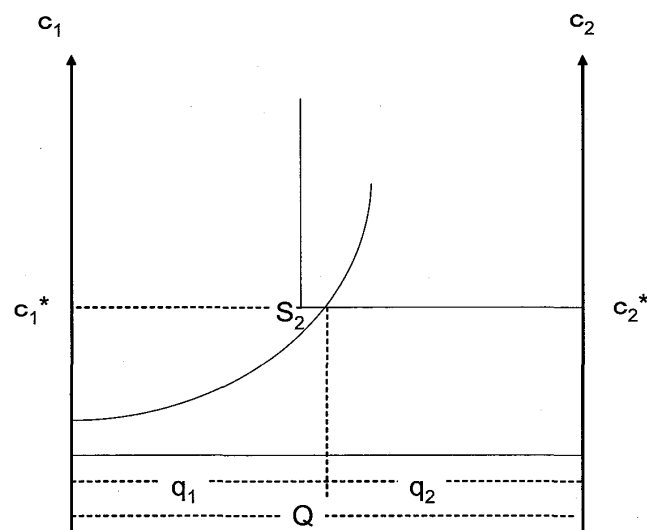


図-2 公共輸送機関に車内混雑がなく超過供給の場合

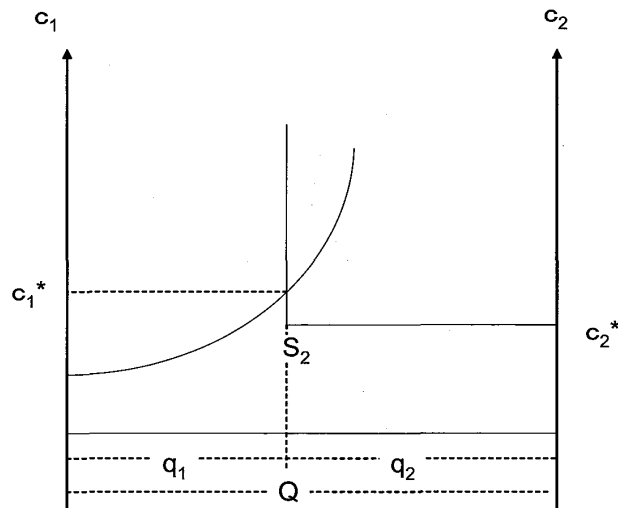


図-3 公共輸送機関に車内混雑がなく超過需要の場合

の和として表せるものと仮定する。

$$TC_2(q) = FC_2 + VC_2(q), \quad q > 0 \quad (10)$$

ここで  $q$  は公共輸送企業に対するサービス需要量を表す。また、この総費用関数は以下の性質を満たし、公共輸送サービスは自然独占下で供給されるものとする。

$$TC_2(q_2^1) + TC_2(q_2^2) \geq TC_2(q_2^1 + q_2^2), \quad (11)$$

$$MC_2 = \partial TC_2 / \partial q_2 > 0, \quad (12)$$

$$\partial^2 TC_2 / \partial q_2^2 > 0 \quad (13)$$

ここで、上付きの添え字  $i = 1$  は既存企業を  $i = 2$  は参入企業を表し、2企業の需給量で市場の需給量をカバーすると仮定する。

$$q_2^1 + q_2^2 = q_2, \quad S_2^1 + S_2^2 = S_2$$

ここで、 $q_2^1, S_2^1$  は既存企業についてのサービス需要量と供給量、 $q_2^2, S_2^2$  は参入企業に対するサービス需要量と供給量を表すものとする。以上の条件に対応する公共輸送機関は、図4に示すような自然独占状態、すなわち、単一企業による平均費用曲線に対して需要曲線 a か b であるケースで供給されている。a のケースは自然独占で密度の経済が作用する状態であり、輸送企業に対するサービス需要量が増加することによって平均費用が逡減する状態にある。一方、b のケースは同じく自然独占であるものの密度の不経済



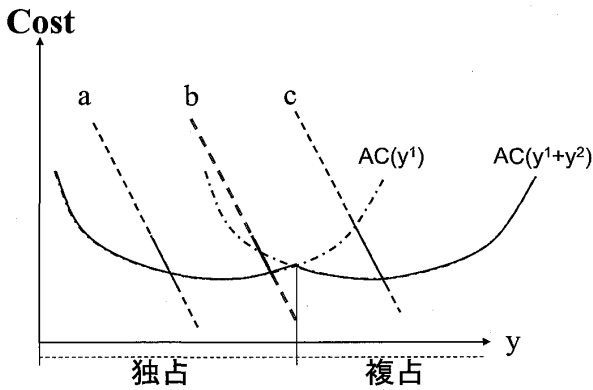


図-4 費用の劣下方性と自然独占条件

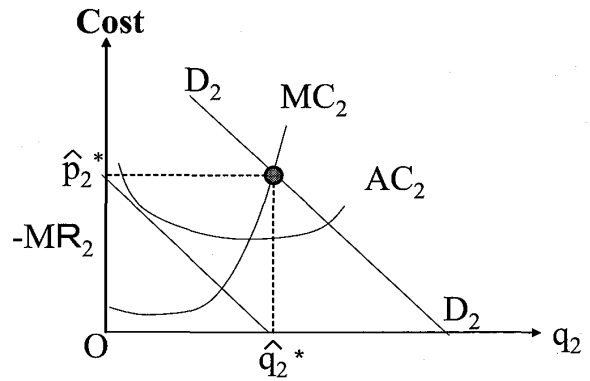


図-5 自由独占市場での最適供給条件

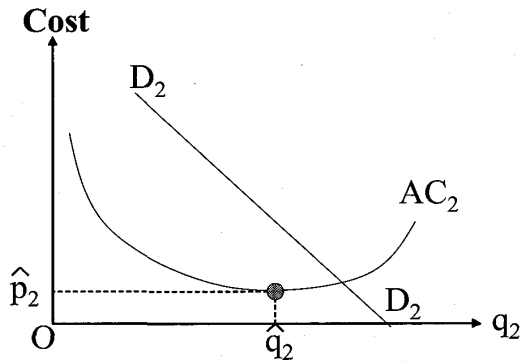


図-6 コンテストブル市場での最適供給条件

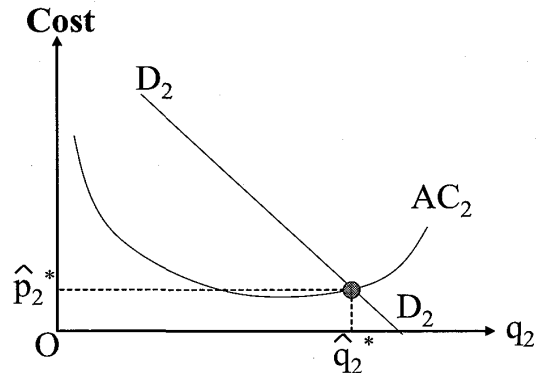


図-7 規制独占市場での最適供給条件

が作用する状態であり、輸送企業に対するサービス需要量が減少することによって平均費用が逡減する状態にある。cのケースは(11)式が成立せず、既存企業のみでサービスを提供するよりも、新規参入企業とともに供給した方が平均費用が低いため公共輸送市場は複占状態となる。

以降では、公共輸送市場を独占状態にあると仮定し、規制に関連して自由独占市場：A、コンテストブル独占市場：B、規制独占市場：Cの3種類に分類して議論する。公共輸送企業はそれぞれの独占市場の性質に関連し、異なる基準で設定される料金と供給量でサービスを提供する。ただし、輸送企業の設定する料金  $p_2$ 、サービス供給量  $S_2$  に対して需要量  $q_2$  がどの程度に決まるのかは輸送企業にとっては既知ではなく、都市交通システムの均衡、すなわち市場によって決められることに注意が必要である。

## (1) 自由独占市場：A

自由独占市場は市場は規制されていないものの既存企業以外の企業が参入する誘引を持たない状況を仮定し、通常は規制の効果を検討するためのベンチマークとして検討される。自由独占市場では、既存企業の利潤を最大化するように都市交通システム内での公共輸送機関の料金  $p_2$  とサービス供給量  $S_2$  が決定される。新規参入がないため、既存企業に対するサービス需要量  $q_2^1$  と都市交通システム内での公共輸送機関のサービス供給量  $S_2$  は一致する。

$$\max_{p_2, S_2} \Pi(p_2, q_2^*(p_2, S_2)) \quad (14)$$

ここで、\* は均衡値を示し、公共輸送サービスに対する需要  $q_2^*(p_2, S_2)$  は、公共輸送サービスの料金  $p_2$  と  $S_2$  を所与とする都市交通システムの均衡解に一致するものとする。公共輸送企業の利潤は以下のように記述される。

$$\Pi(p_2, q_2^*(p_2, S_2)) = p_2 q_2^*(p_2, S_2) - TC_2(S_2) \quad (15)$$

上述の利潤最大化問題を解析的に解けば、(16)(17)式のサービス供給者の最適反応条件が導かれる。すなわち、輸送企業は利潤を最大化するために均衡状態において以下の連立方程式を満たすように価格  $p_2$  と容量  $S_2$  を調整すればよく、限界収入が限界費用を上回る限り、供給量を増加して利潤を追求することになる。

$$p_2 = -q_2^*(p_2, S_2) \frac{\partial p_2}{\partial q_2^*(p_2, S_2)} \quad (16)$$

$$p_2 = \frac{\partial TC_2(S_2)}{\partial q_2^*(p_2, S_2)} \quad (17)$$

図4における需要曲線と平均費用曲線の関係がbのケースで考えれば、(16)(17)式に示される自由独占市場におけるサービス供給企業の最適輸送条件は図5のように図示できる。サービス供給企業は正の利潤を得ており、仮に他企業との競争が生じれば、サービス価格を値下げし、供給量を増やす余力を持っている。

## (2) コンテストابل独占市場：B

コンテストابل独占市場は規制緩和状態の端的なベンチマークとして検討される。都市交通システムの管理者は公共輸送市場への参入と退出が可能なように市場を整備す

ると仮定する。例えば、退出時に固定費用に関わる生産設備の公共への売却や労働者への失業対策を保障すれば、退出時には近似的に総費用が埋没せず、 $T(0)=0$  と考えることができる。また、参入企業に対する対抗手段としての既存企業の料金改定にはタイムラグが必要であると仮定し、その条件の下で既存企業は潜在的な参入企業との競争を考慮しつつ、自身の操業が維持可能になるように料金  $p_2^1$  とサービス供給量  $S_2^1$  が決定できるものとする。Baumol ら<sup>7)</sup> に倣い、コンテストブル独占市場における市場均衡条件式を以下のように定式化する。

$$q_2^1(S_2^1) + q_2^2(S_2^2) = q_2(p_2, S_2) \text{ and } p_2^1 q_2^1(S_2^1) - TC_2(S_2^1) \geq 0 \quad (18)$$

$$p_2^2 q_2^2(S_2^2) - TC_2(S_2^2) \leq 0 \text{ for all } p_2^2 \leq p_2^1 \text{ and } q_2^2(S_2^2) \leq q_2(p_2^2, S_2^2) \quad (19)$$

これらの条件が成立すれば、既存企業は新たな企業の参入を防ぐために最小料金を設定しなければならない。その結果、サービス供給の最適条件は(20)式のように簡単化される。

$$\hat{p}_2^1 = \min_{q_2^1} \frac{TC_2(S_2^1)}{q_2^1(S_2^1)} \quad (20)$$

図4における需要曲線と平均費用曲線の関係がbのケースで考えれば、(20)式で示されるコンテストブル独占市場におけるサービス供給企業の最適輸送条件は図6のように図示できる。なお、コンテストブル独占市場下では企業の合理的な行動によってサービス供給が制限されることになり、企業が設定するサービス価格に対する潜在的な需要の一部が満たされないことになる。

### (3) 規制独占市場：C

規制独占市場では以下のように公共輸送サービスは非負利潤条件のもとで社会的総余剰を最大化するように規制者によって定められた料金と供給量で1つの公共輸送企業によって供給される。

$$\max_{p_2, S_2} CS(p_2, q_2^*(p_2, S_2)) + PS(p_2, q_2^*(p_2, S_2)) \quad (21)$$

$$\text{s.t. } \Pi(p_2, q_2^*(p_2, S_2)) \geq 0 \quad (22)$$

ここで、 $D(\bullet)^{-1}$  を逆需要関数、 $C^*(p_2, S_2)$  を都市交通システム利用者全体の一般化旅行費用とし消費者余剰  $CS$  を以下のように定義する。

$$CS(p_2, q_2^*(p_2, S_2)) = \int_0^{q_2^*} (D(x)^{-1} - C^*(p_2, S_2)) dx$$

一方、生産者余剰  $PS$  は以下のように定義される。

$$PS(p_2, q_2^*(p_2, S_2)) = p_2 q_2^*(p_2, S_2) - VC_2(q_2^*(p_2, S_2))$$

上述の制約付社会的総余剰最大化問題から、公共輸送機関に対する最適規制条件は (23) (24) 式のように導かれる。輸送企業の経営が維持可能な範囲では、 $\Pi = 0$  で社会的総余剰は最大となる。すなわち、限界費用と平均費用が一致するように価格と供給量の組み合わせを選びつつ、平均費用を可能な限り下げる供給量を選ぶことで、利潤が負にならない範囲で最も多くの需要を満たすことが可能となる。

$$p_2 = \frac{TC_2(S_2)}{q_2^*(p_2, S_2)} \quad (23)$$

$$p_2 = \frac{\partial TC_2(S_2)}{\partial q_2^*(p_2, S_2)} \quad (24)$$

先の 2 ケースと同様に図 4 における需要曲線と平均費用曲線の関係が  $b$  のケースで考えれば、(23) (24) 式に示される規制独占市場におけるサービス供給企業の最適輸送条件は図 7 のように図示できる。規制下の企業は、自由独占やコンテストブル独占市場の場合と比較してより多くの輸送サービスを供給することが図の比較から理解できる。

#### (4) 自動車利用に対する課金施策

自動車に対する混雑課金施策についての費用は、 $S_1$  を課金される自動車の台数とし、その総費用  $TC_1$  が固定費用  $FC_1$  と可変費用  $VC_1$  の和で表されるとする。

$$TC_1(S_1) = FC_1 + VC_1(S_1) \quad (25)$$

固定費用は施設の維持によって、可変費用は料金収受によってそれぞれ生じると仮定する。なお、課金は全ての自動車利用に適用され、平均乗車人員を 1 (人/台) とし、 $q_1 = S_1$  のように自動車の需要は課金台数と一致すると仮定する。

### 4. 都市交通システムにおける混雑管理問題

都市交通システムにおける混雑管理問題に代表される異種交通機関についての施策を

組み合わせたパッケージアプローチはシステムの状況に応じてシナジー効果を生じさせ、個別の交通機関を対象とした施策よりも効果的になる可能性がある。都市交通システムの管理者は、公共輸送機関についての規制政策、自動車についての混雑課金施策を組み合わせることでシステムの効率性を可及的に高めるように政策を決定しようとする。それを実現するためには、管理者は施策変更に対する利用者とサービス供給者の行動変化を織り込んだ上で施策変更を最適に調整する必要がある。この政策決定を客観的に決定するためには、様々な都市交通システムの状況下で種類が異なる施策の有効な組み合わせを検討できる統一的な分析的枠組みが必要となる。

これらの問題は利用者とサービス供給者の最適選択の結果生じる都市交通システムの均衡状態を制約とする最適政策決定問題として定式化できる。数理的にはこの種の問題は、シュタッケルベルグのリーダー・フォロアー問題<sup>8)</sup>、もしくは、均衡制約付数理最適化問題：MPEC (Mathematical Programs with Equilibrium constraints)<sup>9)10)11)12)</sup>と呼ばれる共通した構造を持つ。

本論で説明してきた都市交通システムにおける諸条件の組み合わせは、表1に示すように規制政策に関わる公共輸送市場条件と自動車利用に対する課金条件を考慮して6ケースあり、都市交通システムの技術的、経済的な特徴をパラメータや関数形、また最適条件式として外生的に与えることで共通する分析的枠組みの中で異なる施策評価とその比較が可能になる。以下では表1に示すパッケージ施策についての定式化の例を示す。

まず、公共輸送市場が規制独占で自動車利用に課金するケースC2について考える。都市交通システムの管理者は、公共輸送企業にとってサービス供給が維持可能な範囲で社会的総余剰を最大化するように企業を規制しつつ、自動車利用にも課金する。この際、公共輸送企業に対して料金のみを規制するケースと品質契約等を通じて料金とサービス供給量の両方を規制するケースが考えられる。例えば、後者の問題は以下のように定式化される。

表-1 混雑管理問題の分類

市場構造 交通施策	自由独占	コンテスト ブル独占	規制独占
基準均衡状態	A 1	B 1	C 1
混雑料金施策	A 2	B 2	C 2

$$\max_{p_1, p_2, S_2} \int_0^{Q^*} \{D^{-1}(x) - C^*\} dx + \sum_{j=1,2} p_j q_j^* - VC_j(S_j) \quad (26)$$

$$\text{s.t. } p_j q_j^* - FC_j - VC_j(S_j) \geq 0 \text{ for } j = 1, 2 \quad (27)$$

$$p_1, p_2, S_2 \geq 0 \quad (28)$$

ここで\*は都市交通ネットワークの均衡値を表す。さらに、公共輸送企業に対する利潤条件が有効制約であれば、(23)(24)式に示した輸送企業の最適供給条件式を都市交通ネットワークの均衡条件式に含めて問題を簡略化して解くことができる。

$$\max_{p_1} \int_0^{Q^{**}} \{D^{-1}(x) - C^{**}\} dx + \sum_{j=1,2} p_j q_j^{**} - VC_j(S_j) \quad (29)$$

$$\text{s.t. } p_j q_j^{**} - FC_j - VC_j(S_j) \geq 0 \text{ for } j = 1, 2 \quad (30)$$

$$p_1 \geq 0 \quad (31)$$

ここで\*\*は(23)(24)式を条件に含めた都市交通ネットワークの均衡値を表す。

3章で定式化した公共輸送企業の最適供給条件を市場構造に応じて都市交通システムの均衡条件に含めることで、自動車利用に課金しないA1、B1、C1のケースは均衡問題として、自動車利用に課金するA2、B2、C2のケースはA1、B1、C1について定義された均衡問題を制約とする自動車利用に対する最適課金問題として定式化することができる。

鈴木<sup>13)</sup>は、公共輸送企業のサービス供給量が固定され、公共交通機関に混雑が発生しない状況で、表1に示す施策の組み合わせを含む政策決定問題について分析を試みている。その結果、限定的な状況下ではあるものの、公共輸送企業行動を内生化した都市交通システムの最適政策決定問題がMPECに基づく統一的な分析的枠組みの下で定式化され、個々の都市交通施策の実行可能性と効率性が評価できることを示している。仮想的な都市交通システムの状況についての数値シミュレーションからは、①自動車利用に対する課金はすべてのケースにおいて都市交通システムの効率性を改善する。②公共輸送市場に対する規制緩和はサービス供給量の制限を通じて都市交通システム全体の効率性を抑制する。③同じ理由により規制緩和は自動車利用に対する課金施策の効果を限定的なものにする。④自動車課金収入からの公共輸送企業への適切な補助はすべての利用者の厚生を引き上げる。等の結果が得られている。

## 5. 都市交通システムの混雑管理問題の数値解法

本論で扱ってきた問題では、公共輸送企業が供給するサービスに対する価格や供給量に対する需要量は都市交通システムにおけるネットワーク均衡によって決まるため、必ずしも需要量を価格や供給量に対する陽表的な関数として定義することができない。この特徴がMPECの数値計算を難しくする要因となっている。現実にも公共輸送企業や規制主体は市場の反応を考慮しながら価格や供給量を逐次調整して行かざるを得ず、この特徴は数値計算に固有の問題ではない。

MPECの解法は大きく分けて2つある。1つは、非線形感度分析<sup>14)</sup>と呼ばれる特定の政策変数値に対する均衡問題の内生変数の変化をもとに主問題の目的関数の勾配を計算し、降下方向法で解く方法であり、もう1つは政策変数の組み合わせを変えながら均衡問題を解き、その目的関数値を比較して、ヒューリスティックに最適な政策変数の組み合わせを割り出す方法である。計算機の飛躍的な能力の発展により、後者の計算手法もそれ程非効率ではなくなっている。その最も単純な方法は、政策変数の定義域を離散的区間に別けて代表値を決め、それに対応する均衡解を全て計算する方法である。また、この計算手法の非効率性を回避するために遺伝的アルゴリズム等の手法<sup>15)</sup>が応用されている。

## 6. おわりに

本論では都市交通ネットワーク均衡モデルに公共輸送企業の供給行動を統合し、料金と伴にサービス供給量を扱うことによって、都市交通施策の変更に対して道路上の混雑だけでなく、公共輸送機関の車内混雑も内生的に決定するモデルを構築し、都市交通システムにおける混雑管理問題に対する統一された分析的枠組みを示した。

今後、この枠組みに対する数値計算の分析可能性を保障するためには、まず、各市場構造に対応した公共輸送企業の最適供給条件を含む都市交通システムの均衡解の一意性について検討が必要である。その上で数理最適化問題としての具体的な解法について検討が可能となる。また、公共輸送企業のサービス供給量は運行頻度と車輛容量の組み合わせとして決まり<sup>16)</sup>、運行頻度と車輛容量の変化が需給両面に与える影響も異なる。政策立案の観点からは明示的にこれらの要素を変数として扱うことも有用であろう。

## 参考文献

- 1) Downs, A., The law of peak-hour expressway congestion, *Traffic Quarterly*, Vol.16, pp.393-409, 1962.

- 2) Thomson, J. M., *Great cities and their traffic.*, Gollancz, 1977.
- 3) Mogridge, M. J. H., *The self-defeating nature of urban road capacity policy: A review of theories, disputes and available evidence*, *Transp. Policy*, Vol.4, pp.5~23, 1977.
- 4) 竹内健蔵、鉄道運賃規制と次善の道路料金形成との関連性について、*交通学研究*、2000年研究年報、pp.215~223、2000。
- 5) 土木計画学研究委員会編、*交通ネットワークの均衡分析*、土木学会、1998。
- 6) Florian, M. and H. Spiess : *On binary mode choice/assignment models*, *Transp. Sci.*, Vol. 17, pp. 32~47, 1983.
- 7) Baumol, W.J., J. C. Panzer and R.D. Willig, *Contestable markets and the theory of industry structure*, Harcourt Brace Jovanovich, 1982.
- 8) Yang, H. and Yagar S., *Traffic assignment and traffic control in general freeway-arterial corridor systems*. *Transpn. Res-B*, 28B(6), pp.463-486, 1994.
- 9) Z.Q.Lou, J.S.Pang, D.Ralph., *Mathematical Programs with Equilibrium Constraints*. Cambridge university press, New York, 1996.
- 10) 鈴木崇児、都市鉄道の次善料金形成－自動車交通との競合下での理論－、*中京大学経済学研究叢書*第10輯、勁草書房、2000。
- 11) MPEC 研究会、*MPEC にもとづく交通・地域政策分析*、中京大学経済学部附属経済研究所研究叢書 第9輯、勁草書房、2003。
- 12) Ferrari, P., *A model of urban transport management*, *Transp. Res. B*, Vol.33, pp.43~61, 1999.
- 13) 鈴木崇児、都市交通管理施策決定のための交通ネットワーク均衡に基づく分析的枠組み、*交通学研究* 2005年研究年報、pp.71~80、2005。
- 14) Fiacco, A.V., *Introduction to Sensitivity and Stability Analysis in Nonlinear Programming*. Academic Press, New York, NY, 1983.
- 15) 長尾智晴、*最適化アルゴリズム*、昭晃堂、2000。
- 16) 寺田一薫、*バス産業の規制緩和*、日本評論社、2002。