早稲田大学 産業経営研究所『産業経営』
第45号　2009年12月　pp. 25-36

道路交通の時間・空間的分析

～連続的な土地におけるADLモデルの適用可能性について～

橘　　洋　介

要　旨

道路利用者の出発時刻選択問題とその出発時刻の再配分を促す課金ルールを示したADL（Arnott, de Palma, Lindsey）モデルの，連続的な土地における適用可能性について検討を行う。ADLモデルに対する空間的側面の導入は離散的なネットワークにおいて行われてきたが，都市での課金を考える場合には，都市内の土地利用の最適化への拡張可能性に限界がある。したがって，土地利用を分析可能である，連続的な土地におけるADL課金の適用可能性についての検討を行った。その結果，適用可能性は最大の交通量／交通容量となる地点およびその他地点の交通容量に依存する。そして適用可能なケースは，課金ポイントとなる地点よりも外側に，この地点よりも小さい交通容量となる地点が存在しない場合に限られることが明らかとなった。

キーワード：単一中心都市，連続的な土地，道路交通，混雑，ADLモデル，交通量／交通容量と交通容量

A Time Allocation Analysis of Road Transport in a Spatial Structure: Applications of the ADL Model for Continuous Land Use

Yosuke TACHIBANA

Abstract

We consider applicable conditions of the ADL model for continuous land use. The ADL model considers road user departure time choices and road charges in reallocating individual departure times. This model has been extended for discrete networks. These analyses are, however, difficult to extend into land use optimization. To resolve this problem, we introduce continuous land use into the ADL model. We show that applicable conditions depend on maximum traffic volume/capacity and capacity of other points. This rule is only applicable in the absence of points whose capacity is lower than those of charged points.

Key words: monocentric city, continuous land, road transport, congestion, ADL model, traffic volume/capacity and capacity

投稿受付日　2009年2月27日
採択決定日　2009年6月30日

早稲田大学商学学術院助教

1. はじめに

Arnott, de Palma, Lindsey による ADL モデルは，道路交通混雑の時間的側面に着目し，利用者個人の最適化の結果としての均衡と社会的余剰の最大化を実現する課金ルールを示したものである。具体的には，固定された bottleneck に対してオーバーフローする交通の時間的推移を記述するものである。交通行動は派生需要と呼ばれるように，本来的に達成を望む活動に付随して生じるものである（例えば所得稼得のための労働供給に付随して通勤が行われる）。したがって，交通行動は本来的に達成を望む活動から制約を受けるものである。その中で，時間的側面に着目したのが ADL モデルであり，出社時刻のような時間的制約の下で交通行動を行う人々の行動パターンを記述したものである。一般に人々は「無駄な」時間の浪費を避けることを望んでいると考えることが可能であり，本来的な活動に付随して生じる時間的費用については最小化を望んでいるといえる。しかし，交通施設の容量的な制約から，すべての人が自分の望むタイミングで施設利用を行うことが難しい状況が生じることは少なくない。これが交通混雑である。そこで，交通施設の利用者は本来的な活動に由来する時間的制約と施設容量の制約の双方を考慮しながら，各人の時間的費用を最小化するという問題に直面するのである。ADL モデルにおいては，固定的な施設容量を仮定し，全員が同時に当該施設を利用することが不可能であるという想定の下で，本来的活動が要求する時間的制約から逸脱する（例えば出社時刻よりも早く着く，あるいは遅刻する）費用と，待ち行列での時間浪費による費用のトレードオフを考慮する人々の行動が定式化されている。しかし，このモデルは一点経済を考えており，都市の空間的性質を捨象している。したがって bottleneck 前後の空間的特徴が捨象されている。ところが，交通の目的は距離の克服にあることからすれば，移動すべき距離との関係で混雑現象を記述することが必要である。実際に都市において課金を行うことを考えれば，課金ポイントを何処に設置することが望ましいのかという点は大きな課題となる。

空間の導入については，ネットワークモデルを応用した研究が蓄積されている。ADL（1990b, 1993b）は，離散的なネットワークにおける交通量配分と最適課金ルールを求めている。de Palma, Kilani, Lindsey（2005）はこの様なネットワークモデルを用いて，モード及びルートの選択についてのシミュレーションモデル METROPOLIS を構築し，実際にシミュレーションを行っている。また，この様な設定の下で，様々な条件を追加した分析についても豊富な蓄積が存在する（Tabuchi（1993），Verhoef et al.（1996）等）。

しかし，この種の分析では，ノードとリンクを予め与えた上での考察に限定されてしまうが，都市における道路交通の改善を考えた場合，稀少な土地がどのように配分されているのかについても考慮する必要があるが，このような問題を扱う都市経済モデルは，連続的な土地を仮定している。したがって，土地利用との関連を考えるのであれば，連続的な空間における課金ルールについても明らかにする必要がある。そのため本論では，宅地および道路用地の配分を所与とした

上での，ADL 課金の適用可能性を検討する。土地利用を固定する理由は，土地利用の最適化問題は立地の変更を伴うことから，現実的には長期的な問題と考えるべきものであり，他方，混雑課金は出発時刻の変更のみで良いことから，短期的な問題と考えることが適切であるからである。以下，モデルを説明した上で実行可能な課金ルールを検討し，今後の課題について整理を行う。

2．モデル

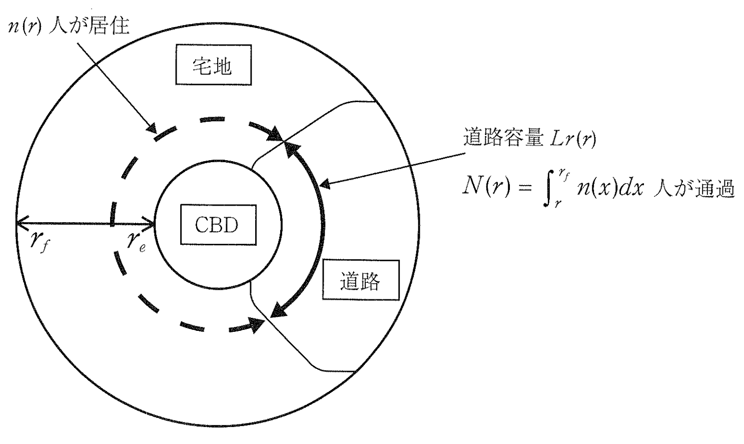
先ずは空間的な特徴づけから行う。道路交通混雑の生じている都市を考える。この都市は境界 r_f をもつ単一中心都市とする（中心は r_c：$r_c < r_f$）。この都市には固定された N 人（$N \in \Re$）が居住しており，同質な都市住民は，都市中心（CBD：Central Business District）へ移動するものとする。CBD 内では混雑は生じていないものとする。土地は居住用地と放射方向の道路用地に配分されているものとする（円周方向の移動費用はかからないものとする）。そして，その配分は固定されているものとする。また，各地点 $r(\in \Re)$ には $n(r)$ 人が立地しているものとする（$n(r) > 0$）。したがって，ある地点 r における道路利用者の総数は，

$$N(r) = \int_r^{r_f} n(x)dx \tag{1}$$

となり，r の減少に対して $N(r)$ は単調増加である（$N(r)$ は連続とする）。また，各地点における土地の総量と道路面積（交通容量と等しいと仮定）を，それぞれ $L(r)$，$L_T(r)$ とする（ただし，$L_T(r) \in \Re$，$L_T(r)$ は r 上で連続かつ $0 < L_T(r) < L(r)$ とする）。

本論では複数考え得る混雑の指標の中から，各地点の交通量と交通容量の比である，$\dfrac{N(r)}{L_T(r)}$ を課金ポイント探索の指標とする。$\dfrac{N(r)}{L_T(r)} > 1$ となる地点においては，単位時間あたりの処理能力

図 1　モデルの空間的特徴付け



（交通容量）を交通量が上回るため，必ず混雑が生じることとなる。この指標に基づいて課金ポイントを探索する理由は２つ存在する。１つ目は $\dfrac{N(r)}{L_T(r)}$ （と $N(r)$）に依存して，課金によって得ることのできる社会的余剰が定まるからである。２つ目は，課金体系の単純化のためである。(4)式より，$t_e - t_0 = N(r) / L_T(r)$ が導かれることから明らかなように，$\dfrac{N(r)}{L_T(r)}$ の大きさに依存して混雑時間帯が変化することから，複数回の課金を行う必要がある場合には，$\dfrac{N(r)}{L_T(r)}$ が大きい順に課金ポイントを選択することで，２回目以降の課金体系を単純化することができる。なお，以下では $\dfrac{N(r)}{L_T(r)}$ を交通量／交通容量比率と呼ぶことにする。この交通量／交通容量比率については，$[r_c, r_m^1]$ は連続かつ compact なので，$[r_c, r_f]$ において最大の交通量／交通容量比率が少なくとも一つ存在する（uniqueness は各ケースで条件として課す）。このときの r を $r_m^1 \in [r_c, r_f]$ とする。さらに $[r_c, r_f]$ について考えると，compact 性を満たさないため，この区間において最大の交通量／交通容量比率の存在は保障されないが，もし存在する場合には，その r を $r_m^2 \in [r_c,\ r_m^1]$ （ただし $r_m^2 < r_m^1$）と呼ぶことにする。以下，このような半開区間において最大の交通量／交通容量比率を見つけることが可能な場合には，CBD 外周である r_c までこの操作を行うことができる（i 番目に大きい交通量／交通容量比率を r_m^i とする）。

次に時間的な特徴づけを行うが，これはオリジナルの ADL モデルに準拠したものである。ある地点 r_m^i を取り出し，通勤時間帯（同一の始業時刻 t^* に向けてのトリップが行われる）に立地点から CBD へ向かう $N(r_m^i)$ 人のトリップを考える。もし，地点 r_m^i への到着率が交通容量 $L_T(r_m^i)$ を上回った場合には queue が発生する。各人は，待ち行列に加わって長い旅行時間による苦痛を味わうか，それとも待ち行列に参加しない替わりに目的地に予定時刻より早着もしくは延着する苦痛を味わうかの選択を行わねばならない。この予定時刻とのズレによる費用のことをスケジュール・コストと呼ぶ。したがって各人のトリップ費用を線形で表せば，

$$C(t) = \alpha\,(\text{旅行時間}) + \beta\,(\text{早着時間}) + \gamma\,(\text{延着時間}) \tag{2}$$

となる。α, β, γ はそれぞれ旅行時間，早着時間，延着時間の shadow cost である。立地点から CBD までの旅行時間は bottleneck における待ち時間 $T(t)$ のみであり（すなわち free-flow 区間における所要時間は０とする），t は各人の出発時刻である。すると各個人の早着時間は，$t^* - t - T(t)$，延着時間は $t + T(t) - t^*$ となる。到着目標時刻にちょうど到着するような出発時刻を t_n とすると，出発時刻 + 旅行時間 = 到着目標時刻なので $t_n + T(t_n) = t^*$ となる。したがって各個人の旅行費用は，

$$C(t)=\begin{cases}\alpha T(t)+\beta(t^*-t-T(t)) & for \quad t<t_n \\ \alpha T(t)+\gamma(t+T(t)-t^*) & for \quad t>t_n\end{cases} \tag{3}$$

となる。ここで料金を $\tau(t)$, 旅行価格（旅行費用＋料金）を $p(t)$ とすると，$p(t)=C(t)+\tau(t)$ となる。そして均衡では全てのトリップに対して同じ $p(t)$ が成立する。

料金が課されない場合の均衡であるが，これはすべての人々が，他者のトリップが開始される時間に対する最適反応として出発時刻を決定した場合に達せられる Nash 均衡である。全てのトリップは内生的に決定される t_0 から t_e（t_0, t_e：混雑の発生時刻と解消時刻）の間で行わるため，$t_e-t_0=N(r_m^i)/L_T(r_m^i)$ が成立する。t_0 に出発する人の旅行価格は $p(t_0)=C(t_0)=\beta(t^*-t_0)$ となり，t_e に出発する人の旅行価格は $p(t_e)=C(t_e)=\gamma(t_e-t^*)$ となる。全ての旅行価格が等しくなることが均衡条件であるから，$p(t_0)=p(t_e)=p$ より，

$$t_0=t^*-\frac{\gamma}{\beta+\gamma}\left(\frac{N(r_m^i)}{L_T(r_m^i)}\right),\ t_n=t^*-\frac{\beta\gamma}{\alpha(\beta+\gamma)}\left(\frac{N(r_m^i)}{L_T(r_m^i)}\right),\ t_e=t^*+\frac{\beta}{\beta+\gamma}\left(\frac{N(r_m^i)}{L_T(r_m^i)}\right) \tag{4}$$

が得られ，旅行価格は，

$$p=C=\frac{\beta\gamma}{\beta+\gamma}\frac{N(r_m^i)}{L_T(r_m^i)} \tag{5}$$

となる。ここで，混雑を解消するような社会的最適を実現する料金は，

$$\tau(r,t)=\begin{cases}\dfrac{\beta\gamma}{\beta+\gamma}\dfrac{N(r_m^i)}{L_T(r_m^i)}-\beta(t^*-t) & for \quad t\in[t_0,t^*] \\ \dfrac{\beta\gamma}{\beta+\gamma}\dfrac{N(r_m^i)}{L_T(r_m^i)}-\gamma(t-t^*) & for \quad t\in[t^*,t_e]\end{cases} \tag{6}$$

となる。つまり混雑による外部性である queue での待ち時間費用に相当する金額を課金することによって，出発時間帯（したがって到着時間帯）を変化させること無く，待ち行列を解消することが可能となる。したがって利用者の厚生上の変化はなく，死重的損失であった待ち時間が貨幣として回収可能となるというのがこのモデルの帰結である。以上のモデルにおいて，実行可能な ADL 課金の課金ルールを次節において検討する(1)。

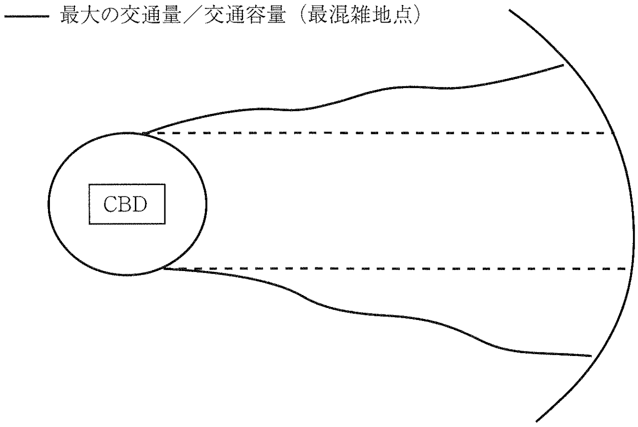
3．課金ルール

道路交通の効率化を目的とする場合の課金ルールは，社会的余剰の最大化がその基準となるべきである。しかし，一方で課金ルールが余りに複雑となってしまう場合には，政策としての実行可能性が担保されなくなるという欠点がある。したがって以下では，各道路利用者の課金額算出および課金は，１箇所の課金ポイント通過においてのみ行われるという課金ルールを考える(2)。

3.1　都市中心で最大の交通量／交通容量比率をとり，交通容量が最小となる場合

CBD の外周部である r_c でその都市における最大の交通量／交通容量比率をとり，かつ全ての

図２　都市中心が最大の交通量／交通容量比率となる場合



地点において $L_T(r_c)$ よりも道路容量が大きい場合である。

この場合は $L_T(r_c)$ において ADL モデルのルールに従って課金を行うことで，都市における道路混雑は解消する。なぜなら $L_T(r_c)$ に依存した課金は，r_c 以遠からの時間あたり発生交通量を $L_T(r_c)$ に等しくするものであり，この場合，r_c 以外の地点の交通容量は $L_T(r_c)$ よりも小さくないことを条件として課しているので，いかなる地点においても bottleneck が生じることはないためである。この場合に道路利用者に課すべき課金は，

$$\tau(r_c,t)=\begin{cases}\dfrac{\beta\gamma}{\beta+\gamma}\dfrac{N(r_c)}{L_T(r_c)}-\beta(t^*-t) & \forall t\in[t_0(r_c),t^*]\\[2ex] \dfrac{\beta\gamma}{\beta+\gamma}\dfrac{N(r_c)}{L_T(r_c)}-\gamma(t-t^*) & \forall t\in[t^*,t_e(r_c)]\end{cases} \tag{7}$$

となる。これはオリジナルの ADL モデルにおける課金ルールそのものである。そしてこの場合には，$L_T(r_c)$ において課金を行うことが，他のどの地点で課金を行う場合と比べても望ましいことが明らかである。その理由は，交通量／交通容量比率が最大であることと(7)式より明らかである。すなわち，都市中心では $N(r)$ が最大であり，加えて $\dfrac{N(r_c)}{L_T(r_c)}$ が $[r_c,\ r_f]$ において最大であるため混雑時間帯が最長であることから，(7)式に依拠した課金によって回収可能となる余剰が最大であるためである。

【命題１】 人口分布が固定された単一中心都市において，交通量／交通容量比率が最大となり，また同時に交通容量が最小となる地点が都心である場合には，都心一箇所において ADL モデルに従った課金を行うことで，交通混雑の解消と社会的余剰の最大化が同時に達成される。

課金を行わない場合には，$r_c<r$ において bottleneck が生じる可能性もあるため，非課金時と

課金時では生じる状況が異なる場合がある。したがって，本来は非課金で生じる状況と課金後に生じる状況を比較する必要があるが，しかしこの場合は課金を行うことで，少なくとも社会的余剰が増加することは明らかである。なぜなら，そのような新たな bottleneck と $L_T(r_c)$ との間でどのような均衡が生じようとも，$L_T(r_c)$ で処理する道路利用者は $N(r_c)$ と不変である上，多段階の bottleneck に起因する非効率が解消されるためである。

現実に行われているロードプライシングでは，課金地域と非課金地域を遮断する地点の設定について，専ら技術的制約から課金ポイントを都市近傍の橋梁やトンネルに設定することが行われている（ストックホルム等）。しかしながら，これは最大の交通量／交通容量となる地点（都市近傍の最小の道路容量地点であるため）で課金しているとみなすことも可能である。したがって，現実的制約から行われているロードプライシングが，結果的には厚生上も望ましい地点で課金していると考えられるケースも存在する。

3.2　最大の交通量／交通容量比率をとる地点が都市中心ではない場合

最大の交通量／交通容量比率をとる地点がCBD外周部より乖離し，２番目に大きい交通量／交通容量比率をとる地点が都市中心（r_c）と一致する場合について考える。ただし，それぞれの地点より外側（r_c は r_m^1までの区間）に，交通容量が $L_T(r_m^1)$，$L_T(r_c)$ よりも小さくなる地点が存在しないことが実行可能性の条件となる（図３を参照）。

$r \in [r_m^1,\ r_f]$ の道路利用者に対しては，r_m^1において ADL モデルのルールに従った課金を行うことで，彼ら ($N(r_m^1) = \int_{r_m^1}^{r_f} n(x)dx$) の出発率は r_m^1の容量と等しい $L_T(r_m^1)$ となる。移動が行われる時間帯は $[t_0(r_m^1),\ t_e(r_m^1)]$ となり，これは全ての r について最大である。彼らに対してはこの地点で ADL モデルに示されたルールで課金を行えばよい。

次に，$[r_c,\ r_m^1]$ の区間であるが，この区間の交通容量については，必ず r_m^1よりも厳密に大きくなっている[3]。そして仮定より，この区間における最大の交通量／交通容量比率は r_c において達

図３　最大の交通量／交通容量比率となる地点が都市の中心から乖離し，２番目の交通量／交通容量比率となる地点が都市の中心にある場合

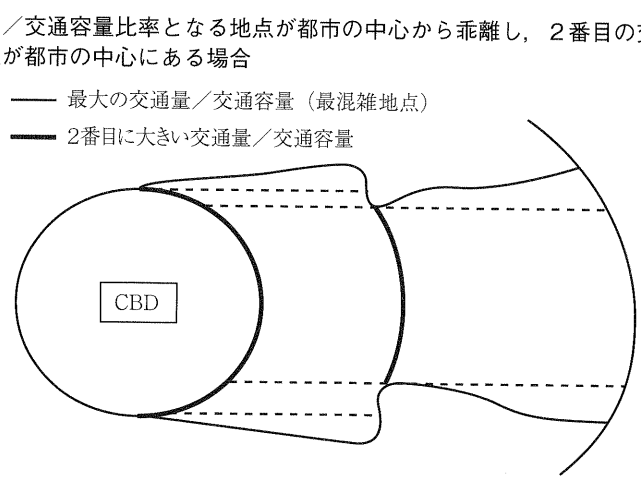
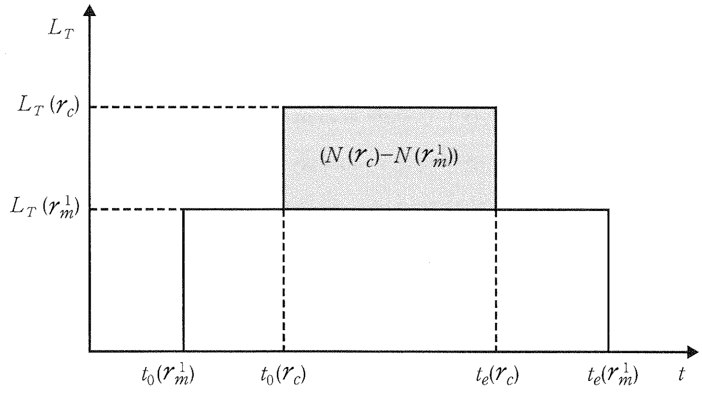


図４　２番目の交通量／交通容量比率となる地点（都心）における交通処理イメージ



成される。したがって，$N(r_m^1)=\int_{r_m^1}^{r_f} n(x)dx$ については時間当たり $L_T(r_m^1)$ で出発が行われるため，$(L_T(r_c)-L_T(r_m^1))$ という容量に対する人の出発処理を考えれば良い。

r_c において課金を行う場合に，これらの道路利用者の出発時間帯が最大の出発時間 $[t_0(r_m^1), t_e(r_m^1)]$ の真部分集合となる（すなわち，r_c における道路の空き容量がこの地点での出発時間帯において常に $(L_T(r_c)-L_T(r_m^1))$ となる）ために，都市中心 r_c での課金は容量一定として考えることができる（証明については補論を参照されたい）。したがって，課金ルールは通常の ADL モデルの課金ルールがそのまま適用可能となる。課金ポイントを交通量／交通容量比率に依存して選択することのメリットはこの点にある。よって，r_c においては $(N(r_c)-N(r_m^1))$ に対して $\dfrac{N(r_c)-N(r_m^1)}{L_T(r_c)-L_T(r_m^1)}$ に依存しての，ADL モデルのルールに従った課金を行うことで彼らの出発率は $(L_T(r_c)-L_T(r_m^1))$ となり，この地点における道路容量と一致する。そして，各道路利用者に対する課金回数は，それぞれ１回である。また，r_c と一致する r_m^i が３番目以降であっても同様の議論が成立する。

この課金の厚生上の含意は，必ずしも最善を求めるものではないことである。課金ポイントを社会的余剰の最大化を基準として探すのが一般的ではあるが，このルールは混雑時間帯の長さを基準として課金ポイントを探している。しかし，このルールは先に述べたように，２番目以降の課金ポイントにおいて交通容量を一定と見なすことが可能である。したがって，分割された各区間は独立した区間と見なすことが可能であり，各地点での課金ルールが極めて簡潔となる。ゆえに政策上の実行可能性を制約とした場合のルールと考えられる。

【命題２】 人口分布が固定された単一中心都市において，最大の交通量／交通容量比率をとる地点が CBD 外周部より乖離し，２番目に大きい交通量／交通容量比率をとる地点が都市中心（r_c）と一致する場合で，かつそれぞれの地点より外側（r_c は r_m^1 までの区間）

に，交通容量が $L_T(r_m^1)$，$L_T(r_c)$ よりも小さくなる地点が存在しない場合を考える。すると，最大の交通量／交通容量比率をとる地点において区間を分割し，r_m^1 では r_m^1 以遠に立地する道路利用者に対して $L_T(r_m^1)$ に依存した ADL モデルのルールに従った課金を，r_c では r_c から r_m^1 までに立地する道路利用者に対して $(L_T(r_c)-L_T(r_m^1))$ に依存した ADL モデルのルールに従った課金を行うことで混雑は解消する。

4．結果が明らかでない場合についての議論

最大の交通量／交通容量比率となる地点が r_c から乖離するケースで，r_m^i が漸近的に r_c に近づくものの，永久に一致しない場合の問題がある。理論上は課金を定義できるものの，その地点から CBD までの区間において課金ポイント数が無限回となり[(4)]，政策的な実行可能性が担保されない。このルールにおいて課金が有限回で終了するのは，偶然に r_c がある区間における最大の交通量／交通容量比率をもたらす場合のみである。それ以外は恣意的な stopping rule に依らざるを得ない。また同様に，２番目に大きな交通量／交通容量比率をとる地点が，漸近的に１番目に大きな交通量／交通容量比率をとる地点へと近づく場合の課金ルールも解明しなければならない。なにより，3.2の場合には3.1の場合と異なり，このルールで選択した課金ポイントでの課金が，余剰最大化をもたらすとの保証が存在しないことが最大の課題である。ここでの課金ルールでは，シンプルかつ余剰の改善は可能ではあるが，余剰の最大化は保障されていない。

また最大の交通量／交通容量比率をとる地点よりも外側に，交通容量が $L_T(r_m^1)$ よりも小さい地点がある場合には，混雑を解消する課金を行うことは定義可能であっても，その課金によって厚生が改善するのか否かが明らかではないため，課金を行うことの望ましさを判定することができない。例えば，3.1の場合と同様に r_c で最大の交通量／交通容量比率をとるものの，外側に交通容量が $L_T(r_c)$ よりも小さい地点（これを r_s と名付ける）がある場合を考えると，$L_T(r_s)<L_T(r_c)$ となる $L_T(r_s)$ が存在するため，さらに $L_T(r_s)$ において bottleneck が生じる可能性が排除できない。なぜならこの課金は，bottleneck 以遠の出発率を bottleneck の交通容量と等しくする機能しか持たず，その出発が行われる地点を調整する機能は有さないからである。したがって，単純に最大の交通量／交通容量比率に基づいて課金を行うことは実行可能性を満たさない恐れがある。この可能性を排除するためには r_c において $\dfrac{N(r_s)}{L_T(r_c)}$ となるように課金を行えば良いが，これは $L_T(r_c)$ の交通容量を十分に活用しないことを意味する。現実に行われているロードプライシングの多くが，橋梁やトンネル等を課金ポイントとしているのは，技術的に課金地域と非課金地域の遮断が容易であることを理由としてであるが，交通流の観点からはこのような地点での課金は，課金地点よりも外側に新たな bottleneck を生じさせないという含意があるといえる。しかし，経済厚生の視点からは，これらの課金地点での課金が本当に望ましいのかは明らかではない。

これらの課題に対応するためには，課金が行われていない場合に達成される状況を明らかにす

る必要がある。この点について，Kuwahara（1990）による離散的ネットワーク上での，Two-Tandem Bottleneck（bottleneckが２箇所存在する）の分析がある。この分析に対して，連続的な土地における非課金時のbottleneckの発生状態を整理する必要がある。

また，この分析においては道路用地の配分を所与としていた点が課題として挙げられる。土地利用の最適化は長期的な政策である一方，混雑課金は短期的な政策ではあるが，連続的な土地における課金ルールを検討する意義は，土地利用との関連にあることからすれば，土地利用の最適化問題との統合可能性を明らかにする必要がある。すなわち，立地変更の自由を認めた場合に，このような効用を持つ（交通費用を持つ）個人によって，如何なる立地が実現するのか，又その立地が望ましいものであるのかを検討する必要がある。

５．まとめ

本論では，空間的な広がりのある中で混雑課金を行う場合，どこに課金ポイントを設置することが可能であるのか（望ましいのか）について検討を行う目的から，単一中心都市の連続的な土地および道路用地におけるADL課金の適用ルールを検討した。その結果，実行可能な課金ルールは，最大の交通量／交通容量比率となる地点と，その地点よりも外側の道路容量 $L_T(r)$ に依存することが明らかとなった。CBDの外周部である r_c がその都市において最大の交通量／交通容量比率をとる場合には，その交通量／交通容量に依存しての，需要の平準化を実現する時間変動的な課金を行うことが可能であり，また社会的余剰を最大化するという意味で望ましい。

他方，最大の交通量／交通容量比率となる地点がCBD外周部より乖離する場合には，その地点よりも内側（CBD寄り）について考えると，compact性を満たさないため，この区間における最大の交通量／交通容量比率なる地点については存在が保障されないが，もし存在する場合には，しかもそれが都市中心 r_c である場合には，r_m^1 で $[r_m^1,\ r_f]$ から出発する道路利用者に対して $L_T(r_m^1)$ に依存した課金を行い，r_c で $[r_c,\ r_m^1]$ から出発する道路利用者に対して $(L_T(r_c)-L_T(r_m^1))$ に依存した課金を行うことで，シンプルな課金によって道路混雑を解消することが可能となる。

本論では，空間的要素の導入に加えて，課金ルールとしての簡潔さについても注意を払って考察を行った。具体的には，各道路利用者が立地点からCBDまで行うトリップの中で，課金されるのは１回だけであることと，課金ポイントの設置箇所が多くとも２箇所であるということである。現実の政策において，「課金ポイントは多ければ多い方がより効率的である」といった主張がなされることが少なくないが，本論において，必ずしもそうではないことを明らかにした。課金箇所の設定は，あくまでも各地点における総交通量と道路容量に依存するものであり，場合によっては（例えばケース１のように），ただ１箇所における課金で余剰の最大化が達成可能となる。このことは，現実に混雑課金を検討している都市にとって，大いなる福音であるといえる。ケース１の場合，と表現すると，限定されたケースのように捉えられるが，一般的に都心に近いほど交通量は多く，またその交通量の多さに比しての交通容量はより不足していると考えられ

る。したがって，ケース１に該当する都市は少なくないと考えられる。そのような都市においては，都心近くの，それも特に交通量／交通容量が大きい地点である，橋梁やトンネルが課金ポイントの候補となる。そしてその課金ポイント候補は，アクセス制限が容易であるという物理的な意味でも，課金ポイントの候補として最も望ましい地点と一致するのである。その意味で本論は，効率性と実行可能性の両者の存立可能性を明らかにしたものであるといえる。

また，ケース２のように必ずしも都心近傍に交通量／交通容量が最大となる地点が存在しない場合でも，２番目にそれが大きい地点が都心近傍であるということも，決して珍しいものではないと思われる。例えば，都心へ向かうルートにおいて，都心近傍ではない地点に橋梁やトンネルが存在する場合は，その橋梁等で最大の交通量／交通容量が生じるものの，一般的にはトリップの終点が都心であることから，２番目にそれが大きい地点が都心近傍となる可能性が高いと考えられる。このような場合は，課金ポイントは２箇所，そして各人が課金されるのは，課金ポイントの通過数に関わらず一人につき一回のみで良いのである（これは電子課金技術を用いれば容易なことである)。

以上より，本論における検討結果は道路交通混雑を抱える多くの都市において，実行上の大きな指針あるいは効率を考えた場合の理論的バックボーンとなり得るものである。特に，実行上の制約から課金ポイントを探すことが，必ずしも効率性に反することがないケースも少なくないといえることは，「技術的」に実行可能な課金の効率性に関する（相当程度の）正統性を示すものといえる。

補論　２番目以降の課金ポイントにおける出発時間帯の包含関係

最大の交通量／交通容量比率となる地点がCBD外周部より乖離する場合，r_m^2以降のbottleneckにおける道路利用者の出発時間帯が，最大の出発時間帯$[t_0(r_m^1),\ t_e(r_m^1)]$の真部分集合となるか（すなわち，$r_m^{i+1}$における空き容量がこの地点での出発時間帯において常に$(L_T(r_m^{i+1})-L_T(r_m^i))$となるか）について検討を行う。

$$\frac{N(r_m^1)}{L_T(r_m^1)}=\frac{\dfrac{N(r_m^1)}{L_T(r_m^1)}(L_T(r_m^2)-L_T(r_m^1))}{L_T(r_m^2)-L_T(r_m^1)}=\frac{\dfrac{L_T(r_m^2)}{L_T(r_m^1)}N(r_m^1)-N(r_m^1)}{L_T(r_m^2)-L_T(r_m^1)},$$

ここで$\dfrac{N(r_m^1)}{L_T(r_m^1)}>\dfrac{N(r_m^2)}{L_T(r_m^2)}\Rightarrow\dfrac{L_T(r_m^2)}{L_T(r_m^1)}N(r_m^1)>N(r_m^2)$より，$\dfrac{N(r_m^1)}{L_T(r_m^1)}>\dfrac{N(r_m^2)-N(r_m^1)}{L_T(r_m^2)-L_T(r_m^1)}$となり，また，

全ての道路利用者にとってt^*，α，β，γは共通なので，結論として$\dfrac{N(r_m^1)}{L_T(r_m^1)}>\dfrac{N(r_m^2)}{L_T(r_m^2)}\Rightarrow[t_0(r_m^1),\ t_e(r_m^1)]\supset[t_0(r_m^2),\ t_e(r_m^2)]$がいえる。したがって，$r_m^2$における道路容量は常に$(L_T(r_m^2)-L_T(r_m^1))$となる。また同様の議論が，$r_m^2$以降の隣り合う$r_m$同士で成立する。

注

(1) ADL モデルの詳細については ADL（1990a, 1998等）を参照されたい。

(2) 都市全体の課金ポイントは複数個所となる可能性がある。

(3) $n(r)>0$ と $\forall r, \dfrac{N(r_m^1)}{L_T(r_m^1)} > \dfrac{N(r)}{L_T(r)}$ より，$\forall r < r_m^1, L_T(r_m^1) < L_T(r)$ となる。

(4) 1人1回のみの課金ルールではあるが，区間の分割が無限に可能となるため，課金ポイントの数も無限個となる。

参考文献

1）Arnott, R., de Palma, A., Lindsey, R., (1988). Schedule Delay and Departure Time Decisions with Heterogeneous Commuters. *Transportation Research Record* 1197, 56-67.

2）Arnott, R., de Palma, A., Lindsey, R., (1990a). Economics of a bottleneck. *Journal of Urban Economics* 27, 111-130.

3）Arnott, R., de Palma, A., Lindsey, R., (1990b). Departure time and route choice for routes in parallel. *Transportation Research A* 25A, 309-318.

4）Arnott, R., de Palma, A., Lindsey, R., (1993b). A dynamic traffic equilibrium paradox. *Transportation Science* 27, 148-160.

5）Arnott, R., de Palma, A., Lindsey, R., (1998). Recent development in the bottleneck model. in Button, K. Verhoef, E ed. *Road Pricing, Traffic Congestion and the Environment* 79-110.

6）de Palma, A., Kilani, M., Lindsey, R., (2005). Congestion pricing on a road network: A study using the dynamic equilibrium simulator METROPOLIS. Transportation Research Part A-Policy and Practice 39, 588-611.

7）Fujita, M., (1989). *Urban Economic Theory-Land Use and City Size-*. Cambridge University Press.

8）Kuwahara, M., (1990). Equiliburium Queueing Patterns at a Two-Tandem Bottleneck during the Morning Peak. Transportation Science 24, 217-229.

9）Sundaram, R., (1996). *A First Course in Optimization Theory*. Cambridge University Press.

10）Tabuchi, T., (1993). Bottleneck congestion and modal split. *Journal of Urban Economics* 34, 414-431.

11）Verhoef, E., Nijkamp, P., Rietveld, P., (1996). Second-best congestion pricing: The case of an untolled alternative. *Journal of Urban Economics* 40, 279-302.

12）スウェーデン公共道路庁発表資料：http://www.stockholmsforsoket.se/upload/Infomaterial%20VV/Faktablad_Eng_Allm_v2_3.pdf#search='stockholm congestion tax'