

動的な限界費用に関する一考察*

A Study on Dynamic Marginal Cost and its Implications*

桑原雅夫**・井料隆雅***

By Masao KUWAHARA**・Takamasa IRYO***

1. はじめに

本稿では、最近話題となっているロードプライシングや高速道路におけるランプ流入制御の、基本となる限界費用について、動的な渋滞現象を考慮した考え方について考察する。限界費用（マージナルコストとも言う）は、従来から経済学分野で、需要と供給のバランスを考慮しながら、研究が積み重ねられてきた。一方、交通工学分野では、需給バランスについては、あまり議論されてこなかったものの、交通状況が時間的にどのように変化するかという、動的な解析が進められてきた。そこで、今回は経済学で発達してきた需給バランスの理論と、交通工学が得意とする動的な交通解析を、統合した“動的な限界費用”について考察する。

2. 静的な限界費用

まず、経済学で提案されてきた静的な枠組みにおける限界費用の考え方を復習する。1本の道路を通過する利用者の需給バランスを考えよう。利用者の私的費用は、需要が増えると混雑が激しくなって旅行時間が増えるので、需要に対して増加する私的費用

*キーワード：限界費用，ボトルネック，交通渋滞

**正員，Ph.D，東京大学生産技術研究所

(東京都目黒区駒場4-6-1，
TEL03-5452-6418，FAX03-5452-6420)

***正員，工博，東京大学生産技術研究所

(東京都目黒区駒場4-6-1，
TEL03-5452-6418，FAX03-5452-6420)

用が掛け、これが図1における供給曲線である。これに、費用が安くなれば需要も増えるという関係を表す需要曲線を重ねることができる。

この需要曲線と供給曲線の交わる点が、需給がバランスする均衡点になり、そのときの需要が均衡需要となる。この場合、利用者が支払う私的費用は均衡点までの縦方向の距離なので、総費用は図1の網掛けの部分となる。

次に、限界費用であるが、限界費用とは1単位の需要が追加された場合に、どれだけ総費用が変化するかを表す曲線で、需要曲線に対しては図1のように限界費用を書くことができる。限界費用と需要曲線が交わる点が、社会的余剰を最大化する最適点となることが証明されている。(社会的余剰とは図中の消費者余剰と課金収入による生産者余剰の和で表される。) 均衡点から最適点に移行させるため

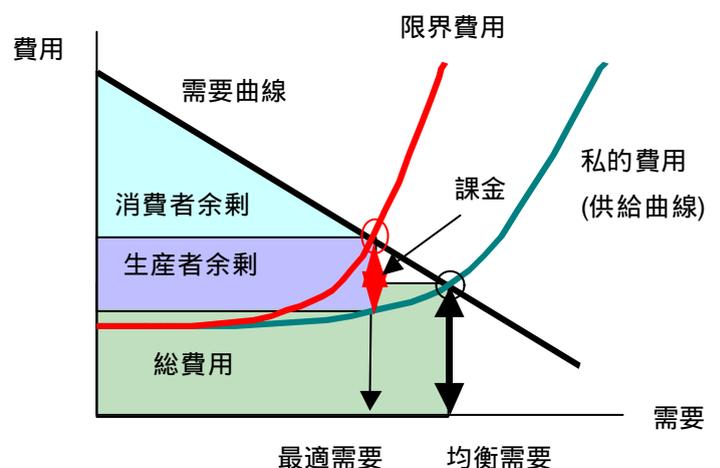


図1 静的な需給バランス

には、均衡需要を最適需要まで落とす必要があり、そのための各種の方策が考えられる。たとえばロードプライシングを行って最適点に移行させる場合には、図中の矢印の課金を行うことによって移行させることができる。

3. 動的な限界費用

さて、今度は交通渋滞の動的な解析に、この限界費用分析を拡張してみよう。図2のように1本の道路に1つのボトルネックがある簡単なネットワークを考える。家を出て目的地に行くときに途中必ず B で表されるボトルネックを通過するという想定である。ボトルネック地点の B とそのはるか上流地点 A において1台1台の車両の通過時刻を観測するとこの図のように、A と B 地点における累積交通量図を書くことができる。この2本の線の横方向の距離は、A から B までの車両の旅行時間を表すので、総費用は、2本の線で囲まれる面積になる。(本論文では、議論を簡潔にするために旅行時間を費用と読み替える。)

次に、静的な分析と同じように、限界費用を考える。限界費用とは1単位の需要が追加された場合の総費用の変化なので、ある時刻 t に1台車両を追加すると、この車両が加わったために、この時刻より後の車両の A 地点の累積図は、1台ずつ破線のように上に移動する。一方、地点 B の累積図は、ボトルネックからの流出レートが変わらないので、変化しない。したがって、A 地点におけるもとの累積図と需要追加後の累積図の差から総費用の増加分を求めることができる。図2よりこの差は、「車両が1台追加された時刻 t から渋滞が解消するまでの時間 + 自由旅行時間」に等しくなる。

これは興味深い結果で、追加された車両自身は図2の網掛けの四角の費用しか負担しないにもかかわらず、その後のすべての車両に影響を与えてしまう

ために、総費用は当該車両の負担費用よりもかなり

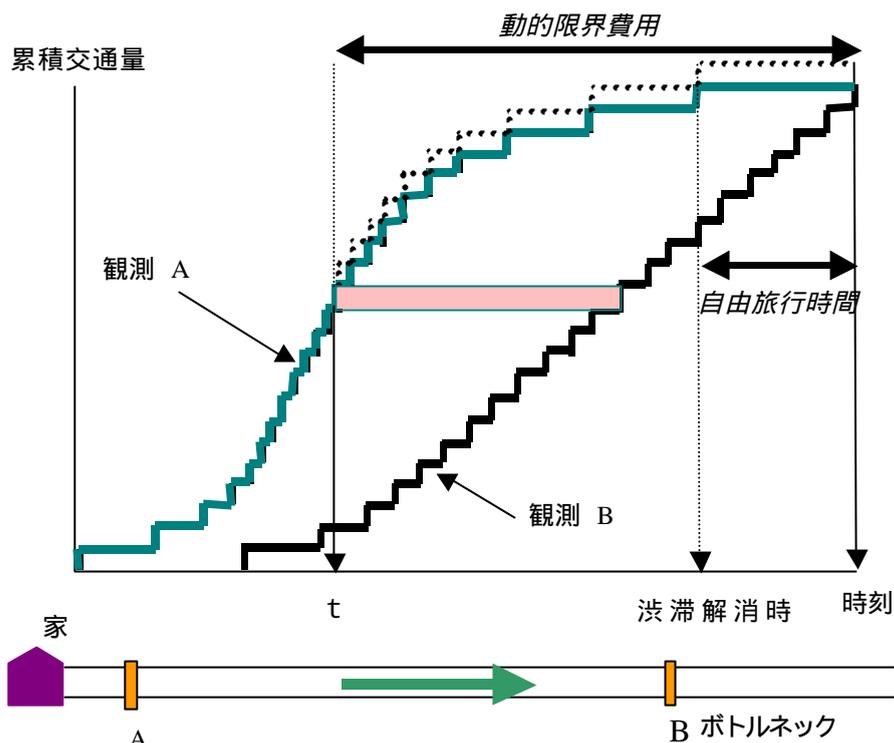


図2 累積図上の動的な限界費用

大きくなる。

4. 交通政策への応用

以上の動的限界費用の結果を実社会のロードプライシング政策と、ランプ流入制御に応用する。

(1) ロードプライシング政策

前節と同じように、1本の道路にボトルネックがあり、そこに渋滞が発生する状況を考える。図3の2本の線は、図2の階段状の線をスムーズな曲線に近似し、地点 A の累積曲線を自由旅行時間分右にシフトさせたものである。したがって、細い矢印の距離が1台の車両の遅れ時間になり、2本の線で囲まれた面積が総遅れ時間となる。

一方、限界費用であるが、渋滞解消時刻までの時間なので、渋滞が始まったばかりにボトルネックを通過する車両の限界費用は図中の(1)と非常に大きい。中間の時刻に通過する車両の限界費用は(2)で、渋滞が終わるころの車両の限界費用は、(3)のようにかなり小さくなる。すなわち、限界

費用はボトルネックへの流入時刻に対して線形に減少する。社会的に最適な課金額を決定するためには、需要がどのようなメカニズムで顕在化しているのかを定義する必要がある。言い換えれば、需要曲線の定義である。もしも、利用者は自分の負担する旅行時間や課金額で構成される費用に基づいて（渋滞時間全体の平均的な費用などではなく）、トリップを行うかどうかを意思決定するものと仮定すれば、課金額は限界費用と私的費用の差額分となる（詳細は文献1参照）。よって、課金額は図3のように破線の矢印で表すことができ、課金総額は網掛けの三角形全体の面積に等しい。すなわち、費用の単位を旅行時間1単位とすれば、図3の三角形の面積が総課金額となる。

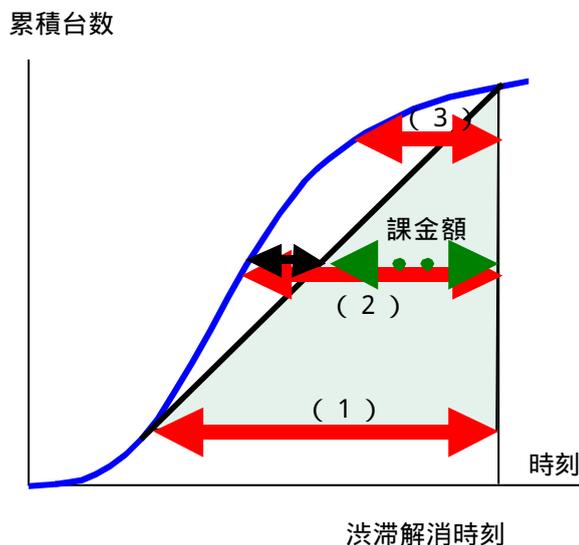


図3 ボトルネックでの限界費用課金

需給バランスを考慮すれば、このような課金を行えば私的費用が課金分だけ増大するので、顕在化する需要量は図3よりも小さくなるはずである。したがって、渋滞継続時間も短くなるため、動的限界費用も課金額も図3の量よりも小さくなるであろう。どの程度小さくなるのかは、需要曲線の定義によるが、このような需給バランスを考慮した課金額の設

定については、桑原¹⁾に詳しく記載している。

さらに、利用者の公平性を考えた場合、上記のような動的な限界費用課金を行うと、渋滞の始まったばかりにボトルネックを通過する利用者の負担量が大きくなり、明らかに公平ではなくなる。まず考えられることは、利用者がトリップ時刻を変更させる可能性である。利用者の時間的な制約の許す範囲で、当然トリップの時刻の選択を更新することは行われるはずである。各利用者が、目的地に到着したい希望到着時刻の制約を持つ場合に、どのような時刻選択をして需給バランスが維持されるのかについては、既存の出発時刻選択問題^{3,4,5)}と動的限界費用を組み合わせることで解析することができる¹⁾。

(2) ランプ流入制御

最後に、動的な限界費用の分析をランプ流入制御に応用してみよう。図4のように、高速道路と一般街路が並行する路線を考える。高速道路では渋滞がなければ30分で目的地につくことができるが、一般街路を使った場合には、60分かかると想定である。簡単のために、高速道路は無料とする。

このような状況では、早く行ける高速道路を利用する人が増えると、高速道路に渋滞が発生して遅れが生じるために、高速道路の旅行時間が次第に一般街路の60分に近づいてくることが想定できる。

最初に、利用者均衡状態を考えることにする。オンランプから高速道路に乗れる利用者は、渋滞遅れ時間が30分までは高速道路を利用し、それを超えると高速道路の遅れ時間を30分に維持する流率だけ（すなわち高速道路ボトルネックの容量だけ）高速道路を利用し、残りは一般街路を選択するようになる。やがて、ピークが過ぎて需要が少なくなれば、すべての利用者が高速道路を利用しても容量を上回らない状態になり、高速道路の渋滞が次第に減少していくであろう。



図4 並行する一般街路と高速道路
における流入制御

一方、このように高速道路の渋滞が発生している場合について、限界費用を考えて見よう。高速道路の限界費用は、前節の分析に基づけば、ある時刻の動的限界費用は、その時刻からの渋滞継続時間 + 自由旅行時間 30 分になる。一方、一般街路は渋滞がないので、限界費用は自由旅行時間 60 分のままである。

システム全体の総費用を最小にするためには、両方の経路の限界費用を均衡させればよいので、この場合には高速道路の渋滞継続時間が 30 分になるまでランプ流入制御をして需要を高速道路に乗せないようにすればよいことになる。詳細な経路選択を考慮したシステム最適制御については、桑原ら²⁾を参照願いたい。

これまで我々は流入制御を考える場合に、個人の私的費用に着目しがちであった。少なくとも、両方の経路の均衡問題を考える場合には、個人の私的費用を均衡させるような配分を考えてきた。ところが、動的な限界費用によれば、システム最適を考える場合には、私的費用ではなく渋滞継続時間に注目することが理論的には正しいことになる。

現実には高速道路と一般街路が並行する路線は数多く存在し、その多くの場合について両経路の私的費用の差は、おそらく「数十分」のオーダーであろう。均衡状態の分析では、この数十分の差を如何に均衡させるのかに議論の焦点が当てられるわけである。一方、両経路の渋滞継続時間の違いを観察すれば、おそらく私的費用の差よりも大きい「時間」のオーダーで差がついているケースも珍しくないであろう。システム最適を達成させるには、限界費用すなわち渋滞継続時間を均衡させることがポイントであり、

その意味では（私的費用にそれほどの差はなくても）、渋滞の大きさに差が出ているような平行路線については、流入制御などの需要調整政策の導入根拠が得られるものと思われる。

5. まとめ

渋滞という時間的にダイナミックな現象に対しては、限界費用も動的に考える必要がある。本稿では動的な限界費用が、実は「自由旅行時間 + 渋滞継続時間」になるという興味深い結果と、いくつかの交通政策への応用について考察した。

今後の理論面の課題としては、ランプ流入制御のように経路選択がある場合について、トリップの出発時刻選択も同時に考慮する理論が必要である。また実務的には、需要曲線をどのように定義して定量的に求めるのか、各種関連政策の現場への適用可能性の検討などが上げられる。

参考文献

- 1) 桑原雅夫：動的な限界費用に関する理論的分析，土木学会論文集，投稿中
- 2) 桑原雅夫，吉井稔雄，熊谷香太郎：動的システム最適配分とランプ流入制御に関する研究 - 簡略ネットワークにおける基礎的分析 - ，土木学会論文集，No.667 / IV-50，pp.59-71，2001.1
- 3) Hendrickson, C., and Kocur, G.: Schedule Delay and Departure Time Decisions in a Deterministic Model, *Transportation Science*, Vol.15, No.1, 1981.
- 4) Vickrey, W.S: Congestion Theory and Transportation Investment, *American Economic Review* 59, 1969.
- 5) 桑原雅夫:道路交通における出発時刻選択に関する研究解説,土木学会論文集, No.604/IV-41, pp73-84, 土木学会,1998.1