

# ネットワークに対する費用便益分析

- 理論と実務への応用 -

本稿では、ネットワークを明示的に考慮した場合の便益評価方法を理論モデルを用いて検討する。得られる結論は、どれほど複雑なネットワークであっても、あるリンクの費用の低下やキャパシティの増加による便益は、そのリンクでの消費者余剰と混雑税収の変化に、他のリンクで発生する純混雑外部性の変化を加えたものになる、というものである。この結果は、ネットワーク性を考慮した場合でも、通常の費用便益分析の方法は有効であり、あらたにネットワークが生む効果等を考慮する必要がないことを示している。また、理論的な結果をもとに、現状の便益評価方法の問題点を明示する。

キーワード ネットワーク, 費用便益分析, 混雑, 外部性

城所幸弘

KIDOKORO, Yukihiko

経済博 東京大学空間情報科学研究センター助教授

## 1 はじめに

公共事業の評価を費用便益分析を用いて行う際に、「ネットワークをどのように考えればよいか」という疑問が、実務者の側から提示されることが多い。この疑問に答えを出すには、ネットワークを明示的に考慮した理論モデルを作り分析する必要がある。そこで、本稿では、ネットワークを考慮した理論モデルを作り、ネットワークに対する様々な政策が生む便益をどのように測定すべきかを分析する。また、理論的な分析結果をもとに、鉄道事業の便益評価方法を示した運輸政策研究機構(1999)<sup>1)</sup>の問題点を明示する。

具体的な分析に進む前に、これまでの文献との関連を述べる。本稿の内容はだまかに言って、2つの流れと関連している。1つは、費用便益分析の流れである。代表的な文献としては、Harberger(1972)<sup>2)</sup>、Mohring(1976)<sup>3)</sup>、Boadway and Bruce(1984)<sup>4)</sup>、Kanemoto and Mera(1985)<sup>5)</sup>、Jara-Diaz(1986)<sup>6)</sup>、金本(1996)<sup>7)</sup>、Small(1999)<sup>8)</sup>が挙げられる。これらの文献は、いずれも、公共投資が引き起こす社会的余剰の変化を、他の市場で起きる変化を考慮に入れて分析している。本稿も、一般均衡モデルの中で、便益変化を考えるとという点で、これまでの文献と共通している。しかし、これまでの文献はネットワークの構造を明確にモデル化して分析していない。そのため、よく用いられる簡単な2点間ネットワークモデルとそれ以外の複雑なネットワークでどのような違いが生じるかという点や、ネットワークに対する様々な政策が生む便益

をどのように計算すべきかという点については、明らかになっているとは言えない。本稿の分析は以上の点を明示的に取り上げている点で、これまでの分析と異なっている。

もう1つの流れは、ネットワーク効果の研究の流れである。経済学でネットワーク効果の問題を扱ったのは、Rohlf's(1974)<sup>9)</sup>が通信サービスのネットワークを論じて以来数多い。Liebowits and Margolis(1994<sup>10)</sup>、1998<sup>11)</sup>)は、Kats and Shapiro(1985)<sup>12)</sup>や Farrell and Saloner(1985)<sup>13)</sup>に代表されるネットワーク効果の研究の多くが、“pecuniary”な効果(死重損失(dead weight loss)に影響を与えない効果)と“real”な効果(死重損失に影響を与える効果)を混同して議論してきたと主張している。本稿で行っているネットワークの分析は一般均衡モデルを用いているため、Liebowits and Margolis(1994, 1998)の批判に耐えるものになっている。すなわち、本稿のモデルでは、pecuniaryな効果は相互に相殺されるために最終的な便益には含まれない。残ったrealな効果は、よく知られている外部性(ここでは、混雑外部性)であり、ネットワーク自体が持つ効果というのは存在しない。この結論は、Liebowits and Margolis(1994, 1998)の結論を便益評価に応用したものになっている。

本稿の構成は以下のとおりである。2章で、モデルを組み立てる。3章で、さまざまな政策が生む便益を分析する。4章で、本稿で得られた結果と、運輸政策研究機構(1999)の便益評価方法を比較し、問題点を明示する。5章で分析を締めくくる。

## 2 モデル

$N$  点間を結ぶネットワークを考えよう。 $N$  点は相互にリンクで結ばれている。点  $i$  ( $1 \leq i \leq N$ ) と点  $j$  ( $1 \leq j \leq N$ ) を結ぶリンクでは、 $M$  個のネットワークサービスが供給されている ( $M$  の輸送手段があると考えてもよいし、 $M$  の経路があると考えてもよい)。リンク  $i-j$  間で供給される、点  $i$  から点  $j$  への  $k$  番目 ( $1 \leq k \leq M$ ) のネットワークサービスを  $x^{ijk}$  とする。(以下の分析では  $x^{ijk} > 0$  を仮定する。) また、点  $i$  から点  $i$  へのネットワークサービスの需要はゼロ、つまり、 $x^{iik} = 0$  と仮定する。図 1 に、 $N=2, M=2$  の例を示す。

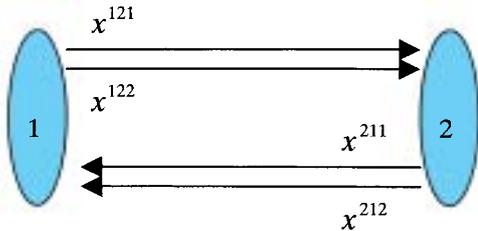


図 1  $N$  点間ネットワーク ( $N=2, M=2$ )

点  $i$  の消費者は、合成財  $z$  とネットワークサービス  $x^{ijk}$  を需要する。なお、点  $i$  の消費者が、 $i \rightarrow j \rightarrow i$  や  $i \rightarrow j \rightarrow j'$  のネットワークサービスを需要する、つまり、消費者が、往復のネットワークサービスや、ある点を経由して別の点へ到達するネットワークサービスを必要することを考慮しても結果は変わらない。点  $i$  の消費者の効用関数は擬線形であると仮定し、

$$U^i = z + u^i(\dots, x^{ijk}, \dots) \quad (1)$$

とする。ここで、 $u^i$  は、点  $i$  の消費者が利用できるすべてのネットワークサービスに依存する。本稿のすべての分析において、効用関数は凹関数であると仮定する。また、 $z$  の価格を 1 に基準化する。このような擬線形の効用関数のもとでは、効用の変化をそのまま消費者余剰の変化とすることができる<sup>14)</sup>。ネットワークサービス  $x^{ijk}$  の価格(時間費用を含む)を  $p^{ijk}$  とすると、点  $i$  の消費者の予算制約は、

$$z + \sum_j \sum_k p^{ijk} x^{ijk} = y^i \quad (2)$$

である。ここで、 $y^i$  は、点  $i$  の消費者の稼得可能所得である。

リンク  $i-j$  間で供給される、点  $i$  から点  $j$  への  $k$  番目のネットワークサービス  $x^{ijk}$  1 単位当たりの社会的費用は、ネットワークサービス供給企業の費用  $c^{ijk}$  と混雑の時間費用  $TC^{ijk}(x^{ijk}, s^{ijk})$  ( $s^{ijk}$ : ネットワークサービス  $x^{ijk}$  を供給するためのキャパシティー) からなる。ネットワークサ

ービス  $x^{ijk}$  に関する混雑時間費用は、 $x^{ijk}$  が増加するほど増加し、 $s^{ijk}$  が増加するほど減少する、つまり、

$$\frac{\partial TC^{ijk}}{\partial x^{ijk}} \equiv TC_{x^{ijk}}^{ijk} > 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial TC^{ijk}}{\partial s^{ijk}} \equiv TC_{s^{ijk}}^{ijk} < 0 \quad (4)$$

であると仮定する。以上より、ネットワークサービス  $x^{ijk}$  の社会的費用関数  $C^{ijk}$  は、

$$C^{ijk} = (c^{ijk} + TC^{ijk}(x^{ijk}, s^{ijk})) x^{ijk} \quad (5)$$

である。

政府はネットワークサービス  $x^{ijk}$  1 単位当たり、混雑税を  $t^{ijk}$  徴収する。なお、便宜上、政府が混雑税を徴収すると考えているが、ネットワークサービスを供給するために必要なインフラの所有者が、ネットワークサービス供給企業より利用料を徴収すると考えても差し支えない。

ネットワークサービス  $x^{ijk}$  を供給する企業の利潤  $\pi^{ijk}$  は、

$$\pi^{ijk} = (p^{ijk} - TC^{ijk}(x^{ijk}, s^{ijk}) - t^{ijk}) x^{ijk} - c^{ijk} x^{ijk} \quad (6)$$

である。ここで、 $p^{ijk} - TC^{ijk}(x^{ijk}, s^{ijk}) - t^{ijk}$  は、ネットワークサービス供給企業が受け取る価格である。交通の場合、ネットワークサービス供給企業としては、鉄道会社、航空会社等を考えればわかりやすい。道路交通の場合、ドライバー自身がネットワークサービスを供給し消費すると考えればよい。ネットワークサービス供給企業は十分に競争的であると仮定する。したがって、

$$\pi^{ijk} = 0 \quad (7)$$

が成立する(7)より、

$$p^{ijk} = c^{ijk} + TC^{ijk}(x^{ijk}, s^{ijk}) + t^{ijk} \quad (8)$$

かつ、

$$p^{ijk} x^{ijk} - C^{ijk}(x^{ijk}, s^{ijk}) = t^{ijk} x^{ijk} \quad (9)$$

である。

## 3 分析

はじめに、ネットワークサービス供給企業の費用  $c^{ijk}$  が  $c^{ijkWO}$  から  $c^{ijkW}$  へ下落する場合を考える。これは、例えば、新技術の導入により鉄道や航空の運行コストが削減される場合である。この場合の便益は、

ネットワークサービス  $x^{ijk}$  に関する、ネットワークサービスの価格  $p^{ijk}$  で測った消費者余剰の変化：

$$\int_{p^{ijkW}}^{p^{ijkWO}} x^{ijk}(\dots, p^{ijk}, \dots) dp^{ijk}$$

ネットワークサービス  $x^{ijk}$  に関する、混雑税収の変化：

$$-t \int_{c^{ijk}}^{c^{ijkWO}} \left( \frac{dx^{ijk}}{dc^{ijk}} \right) dc^{ijk}$$

ネットワークサービス  $x^{ijk}$  の変化が、他のネットワークサービスに与える純混雑外部性の変化：

$$\sum_{i'} \sum_j \sum_{k'} \int_{c^{ijk}}^{c^{ijkWO}} (TC_{x^{i'jk'}}^{i'jk'} x^{i'jk'} - t^{i'jk'}) \left( \frac{dx^{i'jk'}}{dc^{ijk}} \right) dc^{ijk}$$

である（ここで、 $1 \leq i' \leq N, 1 \leq j' \leq N, 1 \leq k' \leq M$  かつ  $i' \neq i, j' \neq j, k' \neq k$ ）。これは、

ネットワークサービス  $x^{ijk}$  に関する、ネットワークサービス供給費用  $c^{ijk}$  で測った消費者余剰の変化：

$$\int_{c^{ijk}}^{c^{ijkWO}} x^{ijk} (\dots, c^{ijk}, \dots, s^{ijk}, \dots, t^{ijk}, \dots) dc^{ijk}$$

ネットワークサービス供給費用  $c^{ijk}$  の低下が引き起こす、全ネットワークサービスに関する純混雑外部性の変化：

$$\sum_{i'} \sum_j \sum_{k''} \int_{c^{ijk}}^{c^{ijkWO}} (TC_{x^{i'jk''}}^{i'jk''} x^{i'jk''} - t^{i'jk''}) \left( \frac{dx^{i'jk''}}{dc^{ijk}} \right) dc^{ijk}$$

と書き直すことができる。ここで、 $1 \leq i'' \leq N, 1 \leq j'' \leq N, 1 \leq k'' \leq M$ 、また、純混雑外部性 = 混雑の外部不経済 - 混雑税である（以下、数学的な結果の導出はすべて付録で行う。）

- は、便益が発生する市場に注目して分類したものである。すなわち、+ は、ネットワークサービス  $x^{ijk}$  の市場で起きる変化であり、はそれ以外の市場で起きる変化である。 $c^{ijk}$  の低下は、ネットワークサービス価格  $p^{ijk}$  を変化させるため、ネットワークサービス  $x^{ijk}$  に関して、消費者余剰を変化させる（）。また、 $c^{ijk}$  の低下により、ネットワークサービス  $x^{ijk}$  が変化するため、 $x^{ijk}$  に関して、混雑税収も変化する（）。 $c^{ijk}$  の低下は、 $x^{ijk}$  以外のネットワークサービスに影響を与える。それらは、のように、他市場における純混雑外部性の変化としてまとめられる。- を、発生する効果の種類に注目して、

- のようにまとめることもできる。すなわち、は、 $c^{ijk}$  の低下が直接的にもたらす、ネットワークサービス  $x^{ijk}$  に関する消費者余剰の変化である（の消費者余剰の計算では、 $c^{ijk}$  の低下が直接的に  $p^{ijk}$  を低下させる効果と  $x^{ijk}$  の変化を通じて  $p^{ijk}$  を変化させる効果の両方が含まれているが、では  $c^{ijk}$  の低下が直接的に  $p^{ijk}$  を低下させる効果しか含まれていない。）は、 $c^{ijk}$  の低下が全ネットワークサービスの価格や需要を変化させることによる、全ネットワークサービスに関する純混雑外部性の変化である。当然、常に、+ + = + なの

で、便益の計算の際には、どちらを用いてもよい。

直観的な理解を助けるために、簡単なモデルを使って、図解しながら説明しよう。図 1 で示した、2 点間モデルを考える。簡単化のために、ネットワークサービス  $x^{121}$  では混雑が発生するが、他のネットワークサービス  $x^{122}, x^{211}, x^{212}$  では混雑が発生せず（つまり、 $TC^{ijk}$  は一定）、混雑税もゼロであると仮定する。

第一に、ネットワークサービス  $x^{121}$  のコスト  $c^{121}$  を低下させるプロジェクトを考えよう。このときの社会的総余剰の変化は、= 0 なので、+ になる。なぜ、 $x^{121}$  以外のネットワークサービスで生じる変化を考慮する必要がないかを直観的に理解するには、一般均衡需要曲線概念を理解することが重要である。一般均衡需要曲線とは、図 2 で示すような、他の市場での変化を織り込んだ需要曲線である（なお、一般均衡需要曲線に関するより詳細な説明については、金本 (1996) を見よ。）

一般的に、プロジェクトを実施しない場合には、価格が  $p^{iWO}$  で、需要が  $x^{iWO}$  だったとしよう。プロジェクトを実施する場合には、価格は  $p^{iW}$  に変化するとする。この  $i$  市場での価格の変化は、 $i$  市場以外の価格や需要に当然影響を与える。図 2 では、 $i$  市場以外での価格や需要の変化によって（マーシャルの）需要曲線が DD から DD'へシフトする様子を描いている（マーシャルの需要曲線は、他の市場での価格を一定として描かれることに注意せよ。）結果として、プロジェクトを実施する場合の需要は、 $x^{iW}$  になる。この（ $x^{iWO}, p^{iWO}$ ）から（ $x^{iW}, p^{iW}$ ）への変化は、他の市場での変化を織り込んだものであり、これを結んだものが、一般均衡需要曲線になる。

ネットワークサービス  $x^{121}$  のコスト  $c^{121}$  が低下した場合、一般均衡需要曲線はどのように描かれるのだろうか？ネットワークサービス  $x^{121}$  に関しては、図 2 と同様の図を描くことができる。したがって、便益を求める際には、その一般均衡需要曲線を基に消費者余剰を計算し（）、それに、混雑税収の変化を加えればよい（）。他

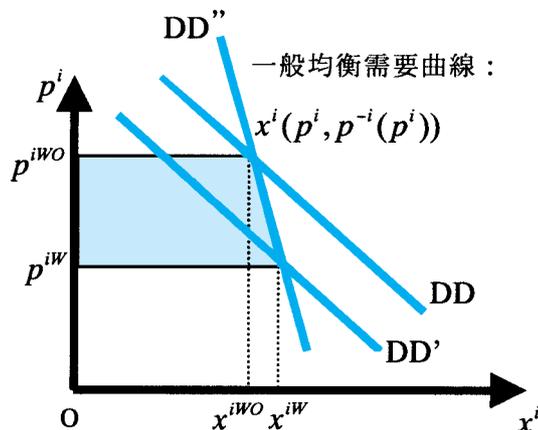


図 2 一般均衡需要曲線

のネットワークサービス  $x^{122}$ ,  $x^{211}$ ,  $x^{212}$  に関する一般均衡需要曲線は、図 3 のようになる（ここでは、 $x^{122}$  に関する一般均衡需要曲線を描くが、 $x^{211}$ ,  $x^{212}$  に関しても同様の図が描ける。）

ネットワークサービス  $x^{122}$  に関しては、 $p^{122} = c^{122} + TC^{122}$  が常に成立するため、需要曲線がいかにシフトしようとも、 $p^{122} = c^{122} + TC^{122}$  が一般均衡需要曲線になる。図 3 から容易にわかるように、この場合は、消費者余剰は全く変化しない。また、混雑税はゼロなので、混雑税収もゼロである。したがって、ネットワークサービス  $x^{122}$  で起きる変化を考慮する必要はなく、 $= 0$  になる（ $x^{211}$ ,  $x^{212}$  についても同様である。）つまり、コストが低下したネットワークサービス  $x^{121}$  に関してだけ、消費者余剰と混雑税収を計算すればよいことになる。

第二に、ネットワークサービス  $x^{122}$  のコスト  $c^{122}$  を低下させるプロジェクトを考えよう。このとき、社会的総余剰の変化は、 $= 0$  なので、 $+$  になる（なお、ネットワークサービス  $x^{122}$  では混雑が発生しないので、 $=$ ,  $=$  が成立する。）

ここでも、直観的な理解を助けるために図解しよう。ネットワークサービス  $x^{122}$  に関しては、図 2 と同様の図が描けるので、それをもとに消費者余剰（ ）を計算すればよい。の純混雑外部性は2つに分けられる。まず、混雑が発生しない  $x^{211}$ ,  $x^{212}$  に関しては、図 3 と同様になり、付け加えるべき余剰の変化はゼロになる。次に、 $x^{121}$  に関しては、図 4 のようになる。

ここでは、このプロジェクトにより、ネットワークサービス  $x^{121}$  の混雑が緩和され、価格が下がるケースを図示しているが、他のケースも同様に分析できる。なお、図が煩雑になるのを避けるため、図 4 では（マーシャルの）需要曲線を描いていない。プロジェクトを実施しない場合の均衡点はDで、プロジェクトを実施した場合の均衡点はCである。ネットワークサービス  $x^{121}$  では均衡点は常

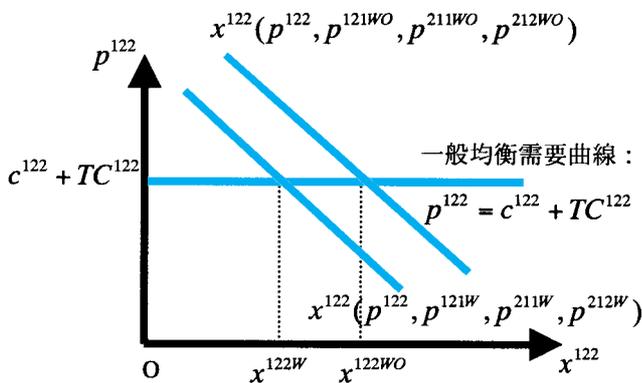


図 3 ネットワークサービス  $x^{122}$  の一般均衡需要曲線

に  $p^{121} = c^{121} + TC^{121} + t^{121}$  上にあるため、これが一般均衡需要曲線になる。 $x^{121}$  に関する消費者余剰の増加は、台形 ABCD である。消費者の支払額の変化は、長方形 BCFO - 長方形 ADGO である。これに対し、社会的費用の変化は、- 台形 EFGH である（9）より、混雑税収の変化は、消費者の支払額の変化より、社会的費用の変化を引いたものになるので、混雑税収の増加は、- 台形 ABCD + 台形 ECDH である。消費者余剰の増加と混雑税収の変化を加えると、ネットワークサービス  $x^{121}$  の最終的な余剰として残るのは、台形 ECDH である。これは、価格と限界費用の乖離がもたらしているネットワークサービス  $x^{121}$  での死重損失（純混雑外部性）が減少したことによる便益である。容易にわかるように、もし、価格と限界費用が等しい場合には、限界費用曲線が一般均衡需要曲線になるため、台形 ECDH はつぶれて存在しない。したがって、この場合は、ネットワークサービス  $x^{121}$  での余剰の変化を考える必要はなくなる。つまり、最適な混雑税がかけられ、価格と限界費用が等しい状況では、たとえ混雑が存在していても、混雑が全く発生していない場合同様、付け加えるべき余剰の変化はゼロである。

次に、ネットワークサービスのキャパシティ  $s^{ijk}$  が  $s^{ijkWO}$  から  $s^{ijkW}$  へ上昇する場合を考える。これは、例えば、鉄道で複線を複々線に拡張したり、道路で車線数が増加する場合である。この場合の便益は、

ネットワークサービス  $x^{ijk}$  に関する、ネットワークサービスの価格  $p^{ijk}$  で測った消費者余剰の変化：

$$\int_{p^{ijkW}}^{p^{ijkWO}} x^{ijk} (\dots, p^{ijk}, \dots) dp^{ijk}$$

ネットワークサービス  $x^{ijk}$  に関する、混雑税収の変化：

$$-t \int_{s^{ijkW}}^{s^{ijkWO}} \left( \frac{dx^{ijk}}{ds^{ijk}} \right) ds^{ijk}$$

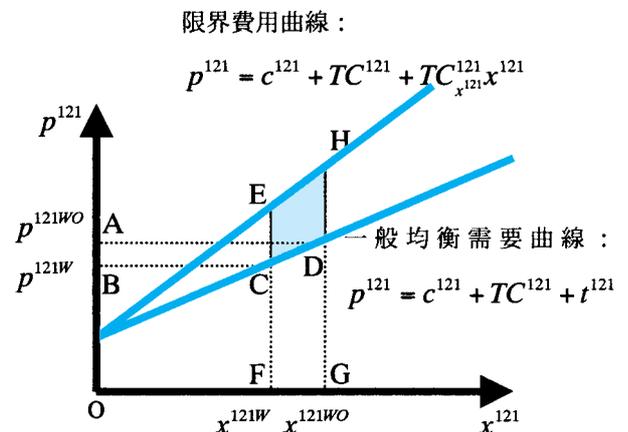


図 4 ネットワークサービス  $x^{121}$  の一般均衡需要曲線

ネットワークサービス  $x^{ijk}$  の変化が、他のネットワークサービスに与える純混雑外部性の変化：

$$\sum_i \sum_j \sum_k \int_{s^{ijkW}}^{s^{ijkWO}} (TC_{x^{ijk}}^{ij'k'} x^{ij'k'} - t^{ij'k'}) \left( \frac{dx^{ij'k'}}{ds^{ijk}} \right) ds^{ijk}$$

であり、これは、

ネットワークサービス  $x^{ijk}$  に関する、ネットワークサービスのキャパシティー  $s^{ijk}$  で測った消費者余剰の変化：

$$\int_{s^{ijkW}}^{s^{ijkWO}} TC_{s^{ijk}}^{ijk} x^{ijk} (\dots, c^{ijk}, \dots, \dots, s^{ijk}, \dots, \dots, t^{ijk}, \dots) ds^{ijk}$$

ネットワークサービスのキャパシティー  $s^{ijk}$  の上昇が引き起こす、全ネットワークサービスに関する純混雑外部性の変化：

$$\sum_i \sum_j \sum_k \int_{s^{ijkW}}^{s^{ijkWO}} (TC_{x^{ij'k'}}^{ij'k''} x^{ij'k''} - t^{ij'k''}) \left( \frac{dx^{ij'k''}}{ds^{ijk}} \right) ds^{ijk}$$

とかける。ネットワークサービスのキャパシティー  $s^{ijk}$  が上昇する場合については、ネットワークサービスの供給費用  $c^{ijk}$  の低下の場合と全く同じ説明が展開できる。最後に、ネットワークサービスに対する混雑税  $t^{ijk}$  を  $t^{ijkWO}$  から  $t^{ijkW}$  へ引き上げる場合を考える。これは、例えば、ラッシュ時の鉄道運賃を引き上げたり、混雑している道路の通行料を上げる場合である。この場合の便益は、

ネットワークサービスに対する混雑税  $t^{ijk}$  の上昇が引き起こす純混雑外部性の変化：

$$\sum_i \sum_j \sum_k \int_{t^{ijkW}}^{t^{ijkWO}} (TC_{x^{ij'k''}}^{ij'k''} x^{ij'k''} - t^{ij'k''}) \left( \frac{dx^{ij'k''}}{dt^{ijk}} \right) dt^{ijk}$$

である。混雑税  $t^{121}$  を上げることを考えよう。ネットワークサービス  $x^{121}$  に関する図を図 5 に示す。混雑税の引

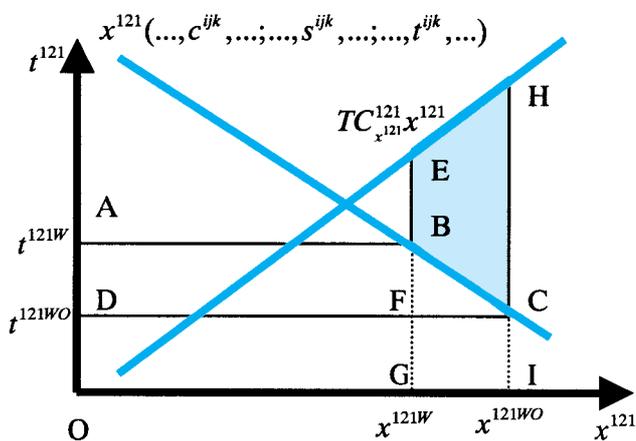


図 5 混雑税  $t^{121}$  の上昇による便益

き上げによって、ネットワークサービス  $x^{121}$  は減少し、その結果、消費者余剰と混雑外部性が減少する。ネットワークサービス  $x^{121}$  に関する、消費者余剰と混雑外部性の減少は、それぞれ、台形 ABCD、台形 EGIH である。しかし、混雑税の上昇は、混雑税収を増加させる。ネットワークサービス  $x^{121}$  に関する、混雑税収の増加は、長方形 ABGO - 長方形 DCIO である。これらを合計すると残るのは、ネットワークサービスの減少が、混雑による外部不経済を減少させ、純混雑外部性が減少する効果、つまり、台形 EBCH である。他のネットワークサービスに関しては、ネットワークサービスの供給費用  $c^{ijk}$  の変化と同様、純混雑外部性の変化だけが付け加えるべき便益になる。したがって、最終的な便益は、全ネットワークサービスに関する、純混雑外部性の変化になる。

#### 4 計算例

本稿で得られた結論を、現実の費用便益分析に応用してみよう。運輸政策研究機構(1999)の都市間鉄道建設プロジェクト(pp.104-124)を例にとる。以下の表 1 に、プロジェクトを実施した場合(新線を整備した場合)と実施しない場合の費用、需要量等をまとめる。

今、全交通機関で混雑が発生しておらず、価格=限界費用が成立していると仮定しよう(実際、運輸政策研究機構(1999)の都市間鉄道建設プロジェクト(pp.104-124)の例では、混雑の発生は想定されていない)。この場合は、混雑税収と純混雑外部性がゼロなので、3章の分析を応用して、鉄道ルートだけに関して、消費者余剰の変化を計算すればよい。運輸政策研究機構(1999) p.107)と同様、時間評価値として39.3(円/分)を用いる。また、鉄道ルートの一般均衡需要関数を線形で近似しよう。

表 1 都市間鉄道建設プロジェクト

・プロジェクトを実施しない場合

交通機関	所要時間(分)	費用(円)	需要量(人/日)
鉄道	190	11,000	100
航空	120	14,000	110
自動車	400	5,500	10

・プロジェクトを実施する場合

交通機関	所要時間(分)	費用(円)	需要量(人/日)
鉄道	140	11,000	135
航空	120	14,000	80
自動車	400	5,500	5

プロジェクトを実施する場合の一般化価格は

$$39.3 \times 140 + 11,000 = 16,502 \text{ (円)}, \quad (10)$$

プロジェクトを実施しない場合の一般化価格は

$$39.3 \times 190 + 11,000 = 18,467 \text{ (円)} \quad (11)$$

なので、利用者便益は、

$$\frac{(18,467-16,502)(100+135)}{2} = 230,888 \text{ (円)} \quad (12)$$

である。

これに対し、運輸政策研究機構(1999)が都市間鉄道建設プロジェクトの例(pp.104-124)で用いている便益評価方法は以下のようなものである。まず、需要で加重平均した一般化価格を求める。プロジェクトを実施する場合の、加重平均した一般化価格は

$$\begin{aligned} & (39.3 \times 140 + 11,000) \times \frac{135}{220} \\ & + (39.3 \times 120 + 14,000) \times \frac{80}{220} \\ & + (39.3 \times 400 + 5,500) \times \frac{5}{220} \\ & = 17,414 \text{ (円)} \end{aligned} \quad (13)$$

であり、プロジェクトを実施しない場合の、加重平均した一般化価格は

$$\begin{aligned} & (39.3 \times 190 + 11,000) \times \frac{100}{220} \\ & + (39.3 \times 120 + 14,000) \times \frac{110}{220} \\ & + (39.3 \times 400 + 5,500) \times \frac{10}{220} \\ & = 18,717 \text{ (円)} \end{aligned} \quad (14)$$

である。この一般化価格の変化が、全需要量に当てはまると考え、利用者便益を、

$$\frac{(18,717-17,414) \times (220+220)}{2} = 286,660 \text{ (円)} \quad (15)$$

と求めている(なお、運輸政策研究機構(1999)の都市間鉄道建設プロジェクトの例(pp.104-124)では、326,260(円)となっているが、これは、計算の過程で単純な計算ミスを犯していることによる)。この例では、真の便益の1.24倍の便益を求めており、便益をかなり過大推定している。加重平均した一般化価格をもとに行う便益計算は、3章の経済学的分析で得られた結果とは全く相容れないものである。したがって、このような方法を用いても真の

便益は得られない(当然、数値例によっては便益を過少推定することもありうる)。

交通の経路選択では、ロジットモデル等の確率的な経路選択モデルが用いられることが多いが、この場合の便益はどのように評価すべきなのだろうか? 運輸政策研究機構(1999)の、加重平均した一般化価格をもとに行う便益計算方法の理論的根拠は筆者には不明だが、この方法はロジットモデルと整合的であるという主張がなされることがある。しかし、この主張は正しくない。ロジットモデル等の確率的な経路選択モデルを用いた場合は、Small and Rosen(1981)<sup>15)</sup>が導出した便益計算方法により、経済理論と整合的な形で便益を計算することができる。ただし、ロジットモデル等で用いられる効用関数は、経済学で通常考えられる効用関数の一類型であるため、3章で示した方法で便益を近似することができる(ロジットモデルと効用関数の関係についてはAnderson et al.(1988)<sup>16)</sup>を見よ)。つまり、少なくとも近似的には、確率的な経路選択モデルの有無に寄らず、3章で示した方法で、便益を計算することが可能である。運輸政策研究機構(1999)の、加重平均した一般化価格をもとに行う便益計算方法はSmall and Rosen(1981)の便益評価方法と理論的な整合性がないため、近似としての便益を求めることもできない。

また、各交通機関が完全に代替的であると仮定するならば、運輸政策研究機構(1999)の、加重平均した一般化価格に基づく方法が正しい便益を与えるのではないかと指摘もある。この点に関しては注意が必要である。もし、各交通機関(各ルートでもよい)が完全に代替的であるならば、各交通機関の一般化価格は等しくなる。そのため、加重平均した一般化価格 = 各交通機関の一般化価格となり、加重平均した一般化価格を基に計算しても、各交通機関の一般化価格を基に計算しても結果は同じになる。このとき、本稿の方法と、運輸政策研究機構(1999)の、加重平均した一般化価格に基づく方法は一致し、加重平均した一般化価格を基に計算しても正解に到達できる(ただし、言うまでもないが、この場合に、わざわざ加重平均した一般化費用を用いる必要はない)。しかし、表1のケースでは、各交通機関の一般化価格が異なっているため、完全代替ではありえない。したがって、加重平均した一般化価格に基づく方法は、正しい便益を与えない。

なお、混雑が発生している場合でも同様に計算できる。しかし、混雑が発生する場合、運輸政策研究機構(1999)の計算方法は、さらに便益の計算を誤る可能性がある。例えば、運輸政策研究機構(1999)の都市内鉄道建設プロジェクトの例(pp.84-103)では、通常の便益以外

に「混雑緩和便益」を考えて、それを付け加えるという方法をとっている。金本(1996)が強調しているように、ただ単純に「混雑緩和便益」を加えるという方法は、生産者余剰を注意深く計算しない限り、便益の測定を誤る可能性が高い。付け加えるべきものは、あくまで純混雑外部性の変化(=混雑の外部不経済の変化-混雑税収の変化)である。例えば、あるプロジェクトによって混雑が変化するケースを考えよう。このようなケースであっても、混雑に対して正しい価格付けが行われており、その結果、価格と限界費用が常に等しくなっている状況では、純混雑外部性の変化はゼロであるため、付け加えるべき便益はゼロになる。このケースでは「混雑緩和便益」は混雑税収の減少によって完全に相殺されるので考慮する必要がない。「混雑緩和便益」を考慮して便益計算を行いたいのであれば、それが混雑税収の減少等として現れる生産者余剰の減少によって相殺されることを、常に念頭におくべきである。

## 5 おわりに

本稿では、ネットワークを明示的に考慮した理論モデルを用い、便益評価方法を検討した。本稿の分析が示す結論は、どれほど複雑なネットワークであっても、あるリンクでの費用の低下やキャパシティーの増加から得られる便益は、そのリンクを通過するネットワークサービスに関する消費者余剰と混雑税収の変化に、他のリンクで発生する純混雑外部性を加えたものになる、というものである。この結論は、Mohring(1976)の指摘と整合的である。Mohring(1976)は、道路ネットワークに対する便益計算に関して、以下のように述べている。

「限界費用料金が幹線道路ネットワークに課せられている場合、改良の結果生じる社会の総便益の推定のためには、その改良がなされた道路についてのデータだけが必要である。その改良によりその幹線道路のネットワークの他の部分の交通条件が変わり、経済の他の価格も変わることが予想されるが、それでもこれは間違いはない。しかしながら、限界費用での価格付けが、一般に、そのネットワークで失敗する場合、そのリンクの1つを改良すると他のリンクの死重損失を変化させるであろう。その失敗の程度に応じて、改良の便益を完全に推計するためには、その体系全体の死重損失を生じさせる変化を推計する必要がある。しかしながら、再び、それはネットワークのある一部のトリップの変化に関連する消費者便益ではなく、その改良に直接含まれないネットワークの部分に基づいて推計されなければならない死重損失の変化だけである。」

本稿の分析で得られた結果は、以上のMohring(1976)の指摘を、ネットワークを明示的に考慮して具体化したものであり、また、それがどのようなネットワークに対しても成立することを示している。つまり、ネットワークを考慮した場合でも、正しい便益評価法を用いれば、ネットワークが生み出す効果を別に考慮する必要はない。

最後に5つの点を述べておきたい。第一に、本稿では、擬線形で所得効果が発生しない効用関数を仮定しているが、当然、この仮定を緩和すると、本稿で示した以外の効果が発生する。しかし、この仮定の緩和がもたらすものは、ネットワーク独自に起因する効果ではなく、あくまで所得効果に起因する効果である。この点に注意しないと、単なる所得効果をネットワークの効果として捉えて、誤解を引き起こすことになってしまうだろう。

第二に、本稿の分析では、ネットワークサービスの供給費用  $c^{ijk}$  やキャパシティー  $s^{ijk}$  の変化は、 $c^{jik}$  や  $s^{jik}$  に影響を与えない。これは、例えば、鉄道において、上りだけを拡張する場合に対応している。 $c^{ijk} = c^{jik}$  や  $s^{ijk} = s^{jik}$  が成立し、点  $i$  から点  $j$  へのネットワークサービスの供給費用やキャパシティーの変化が、同時に、点  $j$  から点  $i$  へのネットワークサービスの供給費用やキャパシティーの変化をもたらす場合は、消費者余剰や混雑税収も点  $i$  から点  $j$  へのネットワークサービスだけでなく、点  $j$  から点  $i$  へのネットワークサービスに関しても計算する必要がある(城所(2001)<sup>17</sup>)はこのようなケースを分析している。しかし、便益の測定方法自体に本質的な違いはない。

第三に、本稿では、主として既存のネットワークへ投資をすることを念頭において分析した。しかし、本稿の分析は、新規にネットワークを作る場合の分析にも応用できる。そのためには、ネットワークサービス供給費用が高すぎて使用できないネットワークが、費用が下がって使用可能になると考えればよい。このように考えれば、新規にネットワークを作るときであっても、本稿の分析をそのまま応用できる。ただし、この場合、需要がゼロのときの価格を知らなければならない。局所的にしか需要関数がわからない場合は、Harberger(1972)が述べているように、需要がゼロのときの価格の推定は大きな誤差を伴うだろう。その場合にどのように対処すべきかという問題は依然解決されていない。

第四に、本稿では、混雑によって、価格と限界費用が乖離するために、純混雑外部性が発生している。しかし、価格と限界費用が乖離する原因としては、様々なものが考えられるだろう。例えば、日本の都市鉄道に対しては公正報酬率規制が行われているが、この規制は、価格と限界費用との乖離を生じさせる(都市鉄道に関する公正

報酬率規制に関しては, Kanemoto and Kiyon(1995)<sup>8)</sup>, Kidokoro(1998)<sup>9)</sup>を見よ. このような場合であっても, 本稿の分析をそのまま適用できる. つまり, 重要なのは, 価格と限界費用の差がもたらす歪みであり, それが混雑によるものか規制によるものかは便益の計算上, 違いをもたらさない.

第五に, 4章で例示したように, 運輸政策研究機構(1999)の, 加重平均した一般化価格に基づく便益評価方法では, 便益を正しく計算できないことを強調しておきたい. そのため, 現行の方法を用いる費用便益分析では, 誤った結果をもたらすことになる. 正しい費用便益分析のためには, 3章で展開した, 経済学的に正しい便益評価方法を用いることが重要である. なお, 空港整備事業の費用便益分析マニュアル<sup>20)</sup>にも同様の問題があるが, 本稿で指摘した問題の他に, ボトルネックをどう考えるかという問題が加わるため, その検討は別の機会に委ねたい.

謝辞: 本稿を書くにあたり, Richard Arnott (Boston College), 福島隆司(東京都立大学), 八田達夫(東京大学), 金本良嗣(東京大学), 文世一(京都大学), 上田孝行(東京工業大学)の各氏より, 有益な示唆や助言をいただいた. また, Kenneth Small氏(University of California, Irvine)には, 本稿の便益評価法がロジットモデルの下でも近似的に成立することをご指摘いただいた. ここに記して感謝する.

### 付録: 3章の結果の導出

点*i*の消費者の効用最大化問題は,

$$\max_{\{z, \dots, x^{ijk}, \dots\}} \left\{ U^i = z + u^i(\dots, x^{ijk}, \dots); z + \sum_j \sum_k p^{ijk} x^{ijk} = y^i \right\}$$

とかける. この効用最大化問題を解くと,

$$p^{ijk} = u_{x^{ijk}}^i \quad \text{for all } j, k \quad (A1)$$

である(なお, ここでは, Mohring(1976)に従い, 消費者は, 自らの行動が混雑に与える影響を考慮しない, つまり, 価格を一定として行動すると仮定する. (A1)より,

$$x^{ijk} = x^{ijk}(\dots, p^{ijk}, \dots) \quad \text{for all } j, k \quad (A2)$$

である. また(8)と(A2)より,

$$x^{ijk} = x^{ijk}(\dots, c^{ijk}, \dots; \dots, s^{ijk}, \dots; \dots, t^{ijk}, \dots) \quad \text{for all } j, k \quad (A3)$$

である.

総余剰SWは, 各点の消費者余剰と全リンクでの混雑税収の和になるので(2)より,

$$\begin{aligned} SW &= \sum_i U^i + \sum_i \sum_j \sum_k t^{ijk} x^{ijk} \\ &= \sum_i y^i - \sum_i \sum_j \sum_k p^{ijk} x^{ijk} + \sum_i u^i \\ &\quad + \sum_i \sum_j \sum_k t^{ijk} x^{ijk} \end{aligned} \quad (A4)$$

である.

第一に, ネットワークサービス供給企業の費用  $c^{ijk}$  が  $c^{ijkWO}$  から  $c^{ijkW}$  へ下落する場合を考える. この場合の便益を(8)(A1)を使って整理すると,

$$\begin{aligned} \Delta SW &= - \int_{c^{ijkWO}}^{c^{ijkW}} \left( \frac{dp^{ijk}}{dc^{ijk}} \right) x^{ijk} dc^{ijk} \\ &\quad - \sum_i \sum_j \sum_k \int_{c^{ijkWO}}^{c^{ijkW}} \left( \frac{dp^{ij'k'}}{dc^{ijk}} \right) x^{ij'k'} dc^{ijk} \\ &\quad + \sum_i \sum_j \sum_k \int_{c^{ijkWO}}^{c^{ijkW}} t^{ij'k''} \left( \frac{dx^{ij'k''}}{dc^{ijk}} \right) dc^{ijk} \\ &= \int_{p^{ijkW}}^{p^{ijkWO}} x^{ijk} dp^{ijk} - t^{ijk} \int_{c^{ijkW}}^{c^{ijkWO}} \left( \frac{dx^{ijk}}{dc^{ijk}} \right) dc^{ijk} \\ &\quad + \sum_i \sum_j \sum_k \int_{c^{ijkW}}^{c^{ijkWO}} \left( TC_{x^{ij'k'}}^{ij'k'} x^{ij'k'} - t^{ij'k''} \right) \left( \frac{dx^{ij'k''}}{dc^{ijk}} \right) dc^{ijk} \\ &= \int_{c^{ijkW}}^{c^{ijkWO}} x^{ijk} dc^{ijk} \\ &\quad + \sum_i \sum_j \sum_k \int_{c^{ijkW}}^{c^{ijkWO}} \left( TC_{x^{ij'k''}}^{ij'k''} x^{ij'k''} - t^{ij'k''} \right) \left( \frac{dx^{ij'k''}}{dc^{ijk}} \right) dc^{ijk} \end{aligned}$$

となる.

第二に, ネットワークサービスのキャパシティ  $s^{ijk}$  が  $s^{ijkWO}$  から  $s^{ijkW}$  へ上昇する場合の便益を考える. この場合の便益は(8)(A1)より,

$$\begin{aligned} \Delta SW &= - \int_{s^{ijkWO}}^{s^{ijkW}} \left( \frac{dp^{ijk}}{ds^{ijk}} \right) x^{ijk} ds^{ijk} \\ &\quad - \sum_i \sum_j \sum_k \int_{s^{ijkWO}}^{s^{ijkW}} \left( \frac{dp^{ij'k'}}{ds^{ijk}} \right) x^{ij'k'} ds^{ijk} \\ &\quad + \sum_i \sum_j \sum_k \int_{s^{ijkWO}}^{s^{ijkW}} t^{ij'k''} \left( \frac{dx^{ij'k''}}{ds^{ijk}} \right) ds^{ijk} \\ &= \int_{p^{ijkW}}^{p^{ijkWO}} x^{ijk} dp^{ijk} - t^{ijk} \int_{s^{ijkW}}^{s^{ijkWO}} \left( \frac{dx^{ijk}}{ds^{ijk}} \right) ds^{ijk} \\ &\quad + \sum_i \sum_j \sum_k \int_{s^{ijkW}}^{s^{ijkWO}} \left( TC_{x^{ij'k'}}^{ij'k'} x^{ij'k'} - t^{ij'k''} \right) \left( \frac{dx^{ij'k''}}{ds^{ijk}} \right) ds^{ijk} \\ &= \int_{s^{ijkW}}^{s^{ijkWO}} TC_{s^{ijk}}^{ijk} x^{ijk} ds^{ijk} \\ &\quad + \sum_i \sum_j \sum_k \int_{s^{ijkW}}^{s^{ijkWO}} \left( TC_{x^{ij'k''}}^{ij'k''} x^{ij'k''} - t^{ij'k''} \right) \left( \frac{dx^{ij'k''}}{ds^{ijk}} \right) ds^{ijk} \end{aligned}$$

となる.

第三に、ネットワークサービスに対する混雑税  $t^{ijk}$  を  $t^{ijkWO}$  から  $t^{ijkW}$  へ引き上げる場合を考える。この場合の便益は (8) (A1) より、

$$\begin{aligned} \Delta SW &= - \int_{t^{ijkWO}}^{t^{ijkW}} \left( \frac{dp^{ijk}}{dt^{ijk}} \right) x^{ijk} dt^{ijk} \\ &- \sum_i \sum_j \sum_k \int_{t^{ijkWO}}^{t^{ijkW}} \left( \frac{dp^{ij'k'}}{dt^{ijk}} \right) x^{ij'k'} dt^{ijk} \\ &+ \int_{t^{ijkWO}}^{t^{ijkW}} x^{ijk} dt^{ijk} + \sum_i \sum_j \sum_k \int_{t^{ijkWO}}^{t^{ijkW}} t^{ij'k'} \left( \frac{dx^{ij'k'}}{dt^{ijk}} \right) dt^{ijk} \\ &= \sum_i \sum_j \sum_k \int_{t^{ijkWO}}^{t^{ijkW}} \left( TC_{x^{ij'k'}}^{ij'k'} x^{ij'k'} - t^{ij'k'} \right) \left( \frac{dx^{ij'k'}}{dt^{ijk}} \right) dt^{ijk} \end{aligned}$$

である。

#### 参考文献

- 1) 運輸政策研究機構[1999], 「鉄道プロジェクトの費用対効果分析マニュアル99」
- 2) Harberger, A. C., [1972], *Project Evaluation*, University of Chicago Press.
- 3) Mohring, H., [1976], *Transportation Economics*, Ballinger Publishing Co (藤原明房・萩原清子監訳「交通経済学」, 勁草書房)
- 4) Boadway, R. W. and Bruce, N., [1984], *Welfare Economics*, Basil Blackwell.
- 5) Kanemoto, Y. and Mera, K., [1985], "General Equilibrium Analysis of the Benefits of Large Transportation Improvements," *Regional Science and Urban Economics* 15, 343-363.
- 6) Jara-Diaz, S. R., [1986], "On the Relation Between Users' Benefits and the Economic Effects of Transportation Activities," *Journal of Regional Science* 26, 379-391.
- 7) 金本良嗣[1996], 「交通投資の便益評価・消費者余剰アプローチ」, 日交研シリーズ A-201, 日本交通政策研究会
- 8) Small, K. A., [1999], "Project Evaluation," in Gomez-Ibanez, J., Tye, W. B., and Winston C. (eds.) *Essays in Transportation Economics and Policy*, 137-177, Brookings Institution.
- 9) Rohlfs, J., [1974], "A Theory of Interdependent Demand for a Communication Service," *Bell Journal of Economics* 5, 16-37.
- 10) Liebowits, S. J. and Margolis, S. E. [1994], "Network Externality: an Uncommon Tragedy," *Journal of Economic Perspectives* 8, 133-150.
- 11) Liebowits, S. J. and Margolis, S. E. [1998], "Network Effects and Externalities," In the *New Palgrave Dictionary of Economics and the Law*, 671-675, Macmillan Reference Limited.
- 12) Kats, M. L. and Shapiro, C., [1985], "Network Externalities, Competition, and Compatibility," *American Economic Review* 75, 424-440.
- 13) Farrell, J. and Saloner, G., [1985], "Standardization, Compatibility, and Innovation," *Rand Journal of Economics* 16, 70-83.
- 14) Varian, H. R., [1992], *Microeconomic Analysis*, Norton.
- 15) Small, K. A., and Rosen, H. S., [1981], "Applied Welfare Economics with Discrete Choice Models," *Econometrica* 49, 105-130.
- 16) Anderson S. P., De Palma, A., and Thisse, J.-F., [1988], "A Representative Consumer Theory of the Logit Model," *International Economic Review* 29, 461-466.
- 17) 城所幸弘[2001], 「ネットワークに対する費用便益分析」, 日交研シリーズ A-297, 日本交通政策研究会
- 18) Kanemoto, Y. and Kiyono, K., [1995], "Regulation of Commuter Railways and Spatial Development," *Regional Science and Urban Economics* 25, 377-394.
- 19) Kidokoro, Y., [1998], "Rate of Return Regulation and Rate Base Valuation," *Regional Science and Urban Economics* 28, 629-654.
- 20) 運輸政策研究機構[1999], 「空港整備事業の費用対効果分析マニュアル1999」

(原稿受付 2001年3月23日)

## Cost-benefit Analysis for Networks - Theory and Application -

By Yukihiro KIDOKORO

We develop the benefit-estimation method, explicitly taking networks into account. Our theoretical model shows that the benefits from a decrease in cost or an increase in capacity at link ij equal the changes in consumer surplus and revenues from congestion tax at link ij plus the changes in net congestion externalities at all the links but link ij. This result demonstrates that the usual benefit-estimation method is valid even if we take networks into account and that we do not have to consider additional benefits. Applying the results, we pin down the problems in current benefit-estimation methods in Japan.

**Key Words ; network, cost-benefit analysis, congestion, externality**