【土木計画学研究・講演集　No.22(1)　1999年10月】

誘発交通による混雑悪化の可能性と交通プロジェクト評価のあり方

Possibility of congestion deterioration by induced demand and its implications to CBA

河野達仁*，森杉壽芳**

By Tatsuhito KONO and Hisa MORISUGI

1．背景と目的

交通施設整備を行うと，新たな交通需要を誘発し，結局混雑緩和にはつながらないという現象が生じている．特に，近年各省庁において整備されつつある費用便益分析マニュアルは交通市場における一般均衡需要曲線に基づく消費者余剰で便益を計測する．したがって，交通所要時間が整備後に上昇する場合，便益は負であるという分析結果が得られる．ここから，この分析結果の正否に関する議論が生じている．

そこで本研究では，交通施設整備後，所要時間が上昇するケースはどのような状況で生じるかを分析する．また，その状況に応じた費用便益分析の方法について考察する．

2．分析

(1)　本研究の考え方

現在，各省庁において整備されつつある費用便益分析マニュアルにおいて採用されている便益評価手法はファースト・ベストの経済を仮定した一般均衡需要曲線による利用者便益の計測に基づいている．

図-1 に利用者便益の計測方法を示した．通常のケースでは，交通施設整備が行われ費用曲線が c から c'に減少するとともに，部分均衡需要曲線は d から d'に変化し，一般均衡需要曲線は gd のようにかける．このケースでの利用者便益は網掛けを掛けた面積によって計測される．部分均衡需要曲線の d から d'への変化は間接効果による影響である．しかしながら，この間接効果の影響が大きいと整備後の部分均衡需要曲線は図-1 に示した d"のようになり，一般均衡需要曲線は gd"のようになり，利用者便益は 0 になる．

実際，費用便益分析適用において，このように一般化費用が整備後上昇するケースが生じている．

Key Words : 整備効果計測法，交通計画評価 ，誘発交通
*学生員　工修　東北大学　　情報科学研究科
**正会員　工博　東北大学教授　　情報科学研究科
（〒980-8577　仙台市青葉区荒巻字青葉）

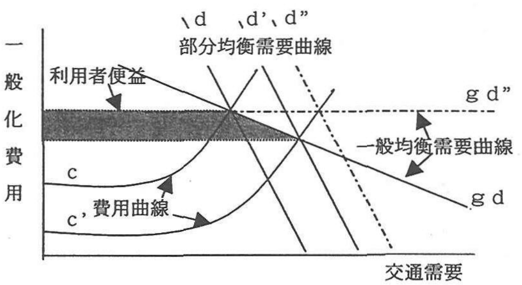

図-1　一般均衡需要曲線による利用者便益計測

そこで本研究では，どのような状況において所要時間が整備後上昇するかを検討する．次にそのような状況での便益分析の計測方法について考察する．

(2)　一般均衡モデル

本研究では，間接効果の影響をみるために一般均衡モデルを定式化する．主体は消費者および企業のみを考え，空間を導入したモデルとする．

【消費者】

$$\max_{x_c,t_c,l_c,h_c} \quad u(x_c,t_c,l_c,h_c) \quad \cdots (1)$$

$$\text{s.t.} \quad x_c + r\,h_c = wL_c + \pi/N + r\overline{H}/N \quad \cdots (2)$$

$$\tau t_c + L_c + l_c = \overline{\Omega} \quad \cdots (3)$$

ただし，

$u(\cdot)$：直接効用関数，x_c： 合成財需要量（価格は 1）
t_c： 交通の需要量，l_c：余暇時間 ，h_c：敷地面積
L_c：労働時間，r：地価，w：賃金率，π：企業利潤，τ：交通所要時間，　$\overline{H}$：当該都市面積
N： 当該都市人口，$\overline{\Omega}$： 利用可能時間（固定）

【企業】

$$\max_{X_i,L_i,NL_i,t_i} \quad \pi = X_i - wL_i \quad \cdots (4)$$

$$\text{s.t.} \quad X_i = a(N)f(NL_i) \quad \cdots (5)$$

$$NL_i = L_i - \tau t_i \quad \cdots (6)$$

$$t_i = \bar{t}_i X_i \quad \cdots (7)$$

ただし，

X_i：合成財の生産量

$a(N)$：集積の経済を示す関数（$\frac{\partial a}{\partial N}>0$と仮定）

NL_i：生産に従事できる純労働時間

$f(\cdot)$：生産関数（具体的には$\bar{b}\cdot NL_i$とする．）

L_i:：労働需要時間，t_i：企業が行う交通量

$\bar{t}_i$：交通量と生産量の比率（固定）

【市場均衡】

合成財：　$Nx_c = X_i$　… (8)

労働：　$NL_c = L_i$　… (9)

敷地：　$Nh_c = \overline{H}$　… (10)

効用：　$u = \bar{u}$　… (11)

ただし，

$\bar{u}$：地域間効用（一定），当該都市を small-open と仮定している．

【交通市場】

需要：　$Nt_c + t_i = T$　… (12)

供給：　$\tau = g(T,s)$　… (13)

ただし，

T：全交通量

$g(T,s)$：交通所要時間関数（sは整備を示す．）

(3)　一般均衡需要関数の導出

本研究の目的のためには式(1)～(13)を同時に満たす交通所要時間が増加するケースの存在条件を検討すればよい．そこで式(1)～(13)を逐次的に解いていく．なお，ワルラスの法則より1本式が冗長となるためここでは式(10)を利用しない．

ステップ1：生産関数の変形

式(5)の具体的な関数$X_i = a(N)\bar{b}\cdot NL_i$に式(6)，(7)を代入し，$X_i$について解くと式(14)が得られる．

$X_i = A(N,\tau)L_i$　… (14)

ただし，$A(N,\tau) = \dfrac{a(N)\bar{b}}{(1+a(N)\bar{b}\tau\bar{t}_i)}$

関数$A(N,\tau)$の性質として式(15)が得られる．

$$\frac{\partial A}{\partial N} = \frac{\frac{\partial a}{\partial N}\bar{b}}{(1+a\bar{b}\tau\bar{t}_i)^2} > 0,\quad \frac{\partial A}{\partial \tau} = \frac{-a^2\bar{b}^2\bar{t}_i}{(1+a\bar{b}\tau\bar{t}_i)^2} < 0 \cdots (15)$$

ステップ2：労働時間と合成財の関係

式(14)に式(8)，(9)を代入して式(16)が得られる．

$L_c = x_c/A(N,\tau)$　… (16)

ステップ3：整理

所得制約式(2)に式(4)を代入し，更に式(8)，(9)を利用すると式(2)は式(18)のようにかける．これまでの処理により式(1)～(13)は次の6式で表現できる．

$$\max_{x_c,t_c,l_c,h_c} \quad u(x_c,t_c,l_c,h_c) \quad \cdots (17)$$

s.t.　$Nh_c = \overline{H}$　… (18)

$\tau t_c + x_c/A + l_c = \overline{\Omega}$ … (19)

$u = \bar{u}$　… (20)

$Nt_c + \bar{t}_i Nx_c = T$　… (21)

$\tau = g(T,s)$　… (22)

ステップ4：消費者効用最大化

式(17)～(19)の最大化問題をラグランジアンで表現し，一階の条件をとると式(24)～(29)が得られる．

$$L = u(x_c,t_c,l_c,h_c) + \lambda(\overline{\Omega} - \tau t_c - \frac{x_c}{A(N,\tau)} - l_c) + \mu(\overline{H} - N h_c) \quad \cdots (23)$$

$$\frac{\partial L}{\partial x_c} = \frac{\partial u}{\partial x_c} - \frac{\lambda}{A(N,\tau)} = 0 \quad \cdots(24)$$

$$\frac{\partial L}{\partial t_c} = \frac{\partial u}{\partial t_c} - \lambda\tau = 0 \quad \cdots(25)$$

$$\frac{\partial L}{\partial l_c} = \frac{\partial u}{\partial l_c} - \lambda = 0 \quad \cdots(26)$$

$$\frac{\partial L}{\partial h_c} = \frac{\partial u}{\partial l_c} - \mu = 0 \quad \cdots(27)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = \overline{\Omega} - \tau t_c - L_c - l_c = 0 \quad \cdots(28)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \mu} = \overline{H} - N h_c = 0 \quad \cdots(29)$$

式(24)～(29)を解けば，最適消費量x_c^*，t_c^*，l_c^*，h_c^*，λ^*，μ^*が$A(N,\tau),\tau,N$の関数として得られる．これらの最適消費量および乗数を式(23)に代入すると，間接効用関数$v(A(N,\tau),\tau,N)$が得られる．

間接効用関数のNおよびτに関する導関数を導く．式(30)の一項目は集積の経済による利益（以下，集積の経済と略）を示し，2項目は人口増加による敷地面積減少による不利益である．式(30)の符号についてはこれらの項の大きさに依存する．一方，式(31)の符号は確実に負と決定される．

$$\frac{\partial v}{\partial N} = \underset{(+)}{\lambda^*}\frac{x_c^*}{\underset{(+)}{A^2}}\underset{(+)}{\frac{\partial A}{\partial N}} + \underset{(+)}{\mu^*}\underset{(-)}{(-1)}\underset{(+)}{N} \quad \cdots(30)$$

$$\frac{\partial v}{\partial \tau} = \underset{(+)}{\lambda^*}\frac{x_c^*}{\underset{(+)}{A^2}}\underset{(-)}{\frac{\partial A}{\partial \tau}} - \underset{(+)}{\lambda^*}\underset{(+)}{t_c^*} < 0 \quad \cdots(31)$$

ステップ5：地域間効用一定

人口移動を許すと地域間の効用は一定になる．

$$v(A(N,\tau),\tau,N)=\bar{u} \quad \cdots(32)$$

式(32)より式(33)が全微分から得られ，その符号は式(30)，(31)より決定される．集積の経済が存在しない場合は式(33)の符号は必ず負である．

$$\frac{\partial N}{\partial \tau}=-\underset{(-)}{\frac{\partial V}{\partial \tau}}\Big/\underset{(+or-)}{\frac{\partial V}{\partial N}} \quad \cdots(33)$$

ステップ6：交通市場

現在まで得られた関数を式(21)に代入して式(34)が得られる．これは交通一般均衡需要関数である．

$$\begin{aligned}&N(\tau)\cdot t_c(A(N(\tau),\tau),\tau,N(\tau))+\\&\bar{t}_i\cdot N(\tau)\cdot x_c(A(N(\tau),\tau),\tau,N(\tau))=T\end{aligned} \quad \cdots(34)$$

以上の作業により，式(34)と交通所要時間関数(22)で全モデルが表現されている．

(4)　交通所要時間増加の可能性

ここでは，交通施設整備による所要時間増加の可能性を検討する．ここで，式(34)を $T=T(\tau)$ と書けるとして，式(22)との連立方程式を考える．整備 s による交通所要時間 τ の変化をみるために両式に陰関数定理を適用すると式(35)が得られる．

$$\frac{d\tau}{ds}=\underset{(-)}{\frac{\partial g}{\partial s}}\Big/(1-\underset{(-or+)}{\frac{\partial T}{\partial \tau}}\underset{(+or-)}{\frac{\partial g}{\partial T}}) \quad \cdots(35)$$

$\frac{\partial g}{\partial s}$ **の符号**：整備がなされる時の交通量を固定とした所要時間の変化であるため，負である．

$\frac{\partial T}{\partial \tau}$ **の符号**：交通一般均衡需要曲線の傾きであるため，一般的には負と考えられる．しかし，条件によっては正になることも考えられる．正になる条件については3章で詳細に検討する．

$\frac{\partial g}{\partial T}$ **の符号**：交通量増加に対する供給側の要因による所要時間変化である．これは一般的には正と考えられる．しかし，鉄道など所要時間に対して規模の経済が働く交通施設等では負になるケースなど存在する可能性がある．

したがって，一般的には $\frac{\partial T}{\partial \tau}$ が負であり，$\frac{\partial g}{\partial T}$ が正であり，式(35)の符号は負となる．一方，本研究の目的は整備後所要時間が増加するケース，すなわち式(35)の符号が正となる条件を検討することである．符号が正になる条件は表-1の2ケースのみである．

表-1　整備による所要時間の上昇があり得るケース

	$\frac{\partial T}{\partial \tau}$ の符号	$\frac{\partial g}{\partial T}$ の符号
ケース1	負（一般的）	負
ケース2	正	正（一般的）

ケース1が起こりうる状況は明らかである．すなわち，鉄道などの規模の経済が生じる施設整備のケースで $\frac{\partial g}{\partial T}$ の符号が負となり，一方 $\frac{\partial T}{\partial \tau}$ の符号は一般的な負であるケースである．ケース2に関しては，$\frac{\partial T}{\partial \tau}$ の符号が正になる条件は簡単には得られない．交通一般均衡需要関数の性質を分析する必要がある．3章で詳細に検討を行う．

3．交通一般均衡需要関数の分析

(1)　交通一般均衡需要関数の要因分解

式(34)の全微分から式(36)が得られる．なお，項の上および下の( )の説明および利用は(3)節で行う．

$$\frac{dT}{d\tau}=\overset{(\#,\$)}{\underset{\substack{(\#:-)\\(\#\$:+or-)}}{\frac{\partial N}{\partial \tau}}}\underset{(+)}{t_c} \qquad (1\text{項目})$$

$$+\underset{(+)}{N}\cdot(\underset{(+)}{\frac{\partial t_c}{\partial A}}(\overset{(\#,\$)}{\underset{(+)}{\frac{\partial A}{\partial N}}}\overset{(\#,\$)}{\underset{\substack{(\#:-)\\(\#\$:+or-)}}{\frac{\partial N}{\partial \tau}}}+\underset{(-)}{\frac{\partial A}{\partial \tau}})+\underset{(-)}{\frac{\partial t_c}{\partial \tau}}+\overset{(\#)}{\underset{(+or0)}{\frac{\partial t_c}{\partial N}}}\overset{(\#,\$)}{\underset{\substack{(\#:-)\\(\#\$:+or-)}}{\frac{\partial N}{\partial \tau}}})\ (2\ \text{項目})$$

$$+\underset{(+)}{\bar{t}_i}\cdot(\overset{(\#,\$)}{\underset{(+)}{\frac{\partial A}{\partial N}}}\overset{(\#,\$)}{\underset{\substack{(\#:-)\\(\#\$:+or-)}}{\frac{\partial N}{\partial \tau}}}+\underset{(-)}{\frac{\partial A}{\partial \tau}})\cdot\underset{(+)}{\frac{\partial x_c}{\partial A}}\cdot\underset{(+)}{N} \qquad (3\text{項目})$$

$$+\underset{(+)}{\bar{t}_i}\cdot\underset{(+)}{x_c}\cdot\overset{(\#)}{\underset{\substack{(\#:-)\\(\#\$:+or-)}}{\frac{\partial N}{\partial \tau}}}+\underset{(+)}{\bar{t}_i}\cdot\underset{(+)}{N}\cdot(\underset{(-)}{\frac{\partial x_c}{\partial \tau}}+\underset{(+or0)}{\frac{\partial x_c}{\partial N}}\overset{(\#,\$)}{\underset{\substack{(\#:-)\\(\#\$:+or-)}}{\frac{\partial N}{\partial \tau}}}) \quad \cdots(36)$$

（4項目）　　　　（5項目）

1項目:人口変化による消費者交通量変化

2項目:個人の交通量変化による消費者交通量変化

3項目:技術進歩変化による企業交通量変化

4項目:人口変化による合成財需要増加を通した企業交通量変化

5項目:個人の合成財需要変化による企業交通量変化

(2)　消費者の需要に関する設定

式(36)の需要変化に関する項の符号条件を設定するには，消費者行動における選好の設定が必要である．これらは式(24)～(29)から得られる．全微分を

とると式(37)が得られる．なお，ここでは２回微分をu_{xx}のように表し，さらに消費者を示すサブスクリプトｃを省略する．

$$
\begin{bmatrix}
u_{xx} & u_{xt} & u_{xl} & u_{xh} & \frac{-1}{A} & 0 \\
u_{tx} & u_{tt} & u_{tl} & u_{th} & -\tau & 0 \\
u_{lx} & u_{lt} & u_{ll} & u_{lh} & -1 & 0 \\
u_{hx} & u_{ht} & u_{hl} & u_{hh} & 0 & -N \\
\frac{-1}{A} & -\tau & -1 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & -N & 0 & 0
\end{bmatrix}
\begin{bmatrix} dx \\ dt \\ dl \\ dh \\ d\lambda \\ d\mu \end{bmatrix}
= \begin{bmatrix} \frac{-\lambda}{A^2} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{-x}{A^2} \\ 0 \end{bmatrix} dA
+ \begin{bmatrix} 0 \\ \lambda \\ 0 \\ 0 \\ t \\ 0 \end{bmatrix} d\tau
+ \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \mu h \end{bmatrix} dN
+ \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix} d\overline{\Omega}
+ \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} d\overline{H} \quad \cdots(37)
$$

式(37)から得られる式(38)を用いてＡやτの変化に伴う需要変化（dx，dt，dl）を得ることができる．なお，式(37)の縁付ヘッセ行列のｉ行ｊ列の余因子をDijのように表す．対称行列であることからDij=Djiである．また，dfがdxの場合はｉ=１，dtの場合はｉ=2, dlの場合はｉ=3, dhの場合はｉ=4となる．

$$
df = -\lambda \frac{1}{A^2} dA \frac{D_{i1}}{D} + \lambda d\tau \frac{D_{i2}}{D} + \left(-x \frac{1}{A^2} dA + t d\tau - d\Omega\right) \frac{D_{i5}}{D} + (\mu h dN - dH) \frac{D_{i6}}{D} \quad \cdots(38)
$$

ここで，次の３つの仮定をおく．

仮定１：合成財，交通量の需要は利用可能時間Ω増加に対して増加する．式(38)より式(39)が得られる．

$$
\frac{\partial x}{\partial \Omega} = -\frac{D_{15}}{D} > 0, \frac{\partial t}{\partial \Omega} = -\frac{D_{25}}{D} > 0 \quad \cdots(39)
$$

仮定２：合成財，交通量は敷地面積Ｈ増加，すなわちｈの増加に対して需要不変あるいは減少する．

$$
\frac{\partial x}{\partial \overline{H}} = -\frac{1}{N}\frac{D_{16}}{D} \le 0, \frac{\partial t}{\partial \overline{H}} = -\frac{1}{N}\frac{D_{26}}{D} \le 0 \quad \cdots(40)
$$

仮定３：合成財と交通量はヒックスの意味で補完関係にある．

$$
\left.\frac{\partial x}{\partial \tau}\right|_{u=const.} = \lambda \frac{D_{12}}{D} < 0 \quad \cdots(41)
$$

式(39)～(41)と最適化の２階の条件を式(38)に適用すると，式(42)の需要の性質が導かれる．

$$
\frac{\partial x}{\partial A} > 0, \frac{\partial t}{\partial A} > 0, \frac{\partial x}{\partial \tau} < 0, \frac{\partial t}{\partial \tau} < 0, \frac{\partial x}{\partial N} \ge 0, \frac{\partial t}{\partial N} \ge 0, \cdots(42)
$$

(3)　一般均衡需要関数の傾き

式(36)の各項の上につけた＃は人口移動に関する項であり，＄をつけた項は集積の経済に関する項である．また，式(40)および式(15)，(33)による符号条件を式(36)の各項の下に記した．なお，(#:－)は人口移動のみで集積の経済が存在しない場合には符号は負，（#$:+or-）は人口移動および集積の経済の存在の場合には符号は正あるいは負となることを示す．式(36)より表-２の結果が得られる．

表-２　条件設定による式(36)の符号条件

条件設定		各項の符号				
人口移動	集積の経済	１項	２項	３項	４項	５項
無し	無し	0	－	－	0	－
有り	無し	－	－	－	－	－
有り	有り	+or-	+or-	+or-	+or-	+or-

表-１で設定したケース２が起こりうるケース（式(36)の符号が正）は，表-2から人口移動かつ集積の経済が存在しなければありえないことがわかる．

集積の経済は外部経済を発生させている．したがって，ファーストベストの経済にない．つまり，一般均衡需要関数による便益計測は不可能といえる．

4.　結論

本研究では，交通施設整備後に交通所要時間が上昇するケースはいかなる条件で生じるかを分析した．その結果，交通機関において所要時間に関して規模の経済が有るケースあるいは集積の経済によるケースの２ケースが条件として得られた．実際に，首都圏などで交通施設整備を行っても混雑が緩和しないという状況は集積の経済が要因として考えられる．

集積の経済は外部性であり，ファースト･ベストの世界ではない．すなわち，このケースでは交通一般均衡需要関数による便益評価は適用できないことになる．したがって，交通施設整備によって所要時間が上昇しているケースにおいて費用便益分析を行う際には集積の経済の有無の確認が必要である．

なお，本研究では都市圏全体の交通所要時間が増加するケースを扱っている．したがって，ルート選択において交通所要時間が上昇するケースについては扱っていない．ルート選択においてこのような現象がおきる例はピグー･ナイト･ダウンズのパラドックスなどとして知られている[1]．このケースでは交通一般均衡需要関数による便益評価が可能である．

【参考文献】 紙面の制約上，次のものだけ記す．

1)R.Arnott and K.Small, "The Economics of Traffic Congestion Rush-hour driving strategies that maximize an individual driver's convenience may contribute to overall congestion," American Scientist. Vol. 82