特集　地域科学

トリップ推定モデルとしての
オポテュニティー・モデルの利用の仕方

岡　部　篤　行

都市におけるトリップ行動を推定することは，都市の交通施設を計画する際に欠くことのできないプロセスの1つであろう．実際そのために数多くのモデルが提案されまた利用されてきた．もちろんこれらのモデルはそれぞれにさまざまな特長を備えているが，トリップ目的たる施設の「トポロジカル」な関係を素朴ながらにも考慮したモデルとなるとその数は少ない．そのなかの1つとして intervening opportunities モデル（以後オポテュニティー・モデルとよぼう）はユニークな存在である．そこで，ここではこのモデルに焦点をあてて，このモデルの内容を検討しながら適切な利用の仕方を考えてみようと思う．

トリップ行動において「トポロジカル」な要因が働いている1例として，いま，ある人がある古本を求めて神田古本屋街を探し歩くというトリップを考えてみよう．ご承知のように神田古本屋街は駿河台下から神保町交叉点あたりまでほぼ線形状に古本屋が並んでいる．典型的なパターンとしては，まず駿河台下の最初の古本屋に入り求める古本があるかないかを調べ，見つからない場合は2軒目の古本屋に入り，また見つからない場合は3軒目の古本屋へ……，と求める古本が見つかるまで神保町交叉点へ向けてブラブラ歩くというパターンが考えられよう（図1）．

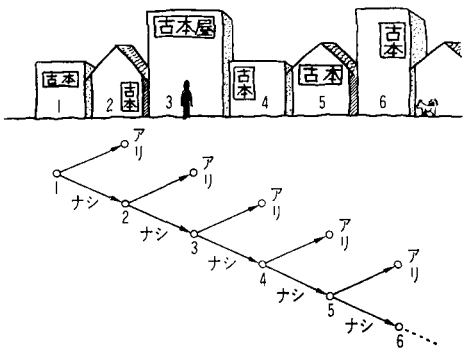


図1　シュナイダーモデルにおける探索過程

このようなトリップ行動が想定される所においてそれぞれ古本屋へ立ち寄るという機会の要因を考えてみると，もちろん種々な要因によってはいようが，その1つにその古本屋が駿河台下から何番目にあるかというトポロジカルな要因があげられるであろう．トリップ行動が目的施設の並び順序によっているような例は，この他にもさまざまな現象に見いだされる．たとえばショッピング街においてある商店の売り上げはその商店が人々の動線のどの順序に位置しているかで左右される例などはその1つであろう．このトリップ行動におけるトポロジカルな要因に着目してモデルを提案した最初の人はおそらく Stouffer (1940) であろう．それ以来この概念をもとにしたモデルがいくつか提案されてきているが，それらについては第6節で要約的に述べることにして，ここでは，いちばん利用頻度の高い Schneider (1959, CATS (1960)) モデルに焦点をあててみよう．

1.　オポテュニティー距離

一般にトリップ推定モデルの変数としては，い

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．

ろいろな種類の距離が用いられている．多くは空間距離，時間距離，料金距離であるが，先のトリップ例などから考えられるように「順序の距離」というようなものも1つの距離であろう．オポテュニティー・モデル族に共通なのは，この「順序の距離」を変数としている点である．これをまず説明しておこう．

いま，都市内のトリップ目的たる全オポテュニティー（施設でも会いにゆく先の人でもよいが，それらを総称してオポテュニティーとよぼう）のなかで当面関係するオポテュニティー（たとえば古本探しならば古本屋）をOとしよう．つぎに空間距離あるいは時間距離tを考え，ある地点からの「距離」$V(t)$を距離t以内にあるオポテュニティーOの量で測ることにしよう．ここで「距離」$V(t)$は，オポテュニティーOに関するオポテュニティー距離とよばれるものである．先の具体例にそっていうと，駿河台下から100mの所までに古本屋が20軒あるとするとその地点までのオポテュニティー距離$V(100)$は20となる．

オポテュニティー距離に関して注意しておくべき点は，距離tは助変数であるということである．同じ距離tでも，たとえば駿河台下から100mの地点までに25軒の古本屋があれば$V(100)=25$となる．視点を変えて見ると駿河台下から25軒目の古本屋が100mの所にあったとしても150mの所にあったとしてもその本屋までのオポテュニティー距離は変わらず$V=25$ということである．オポテュニティー・モデル族のモデルは，このような距離をもってトリップ行動を説明しようとするものであるから，利用に際しては推定対象とするトリップにこのような性質が見いだされそうなトリップであるかをまず考えておく必要がある．

2. モデルで推定されているトリップ行動

シュナイダーのオポテュニティー・モデルを利用する場合，そのモデルがどのようなトリップ行動を仮定してみちびかれたのかを理解しておくとどのようなトリップ行動へ適用するのが適切であるかがわかるだろう．そこでシュナイダーの仮定とモデルの導出を少し見ておこう．

まずインターヴィーニング関数を

$G(V)$＝オポテュニティー距離V以内で，求めるオポテュニティーを見つけない確率

と定義しておく．さて，いまある1人の人が当面関係するオポテュニティーOのなかである1つの満足のゆくオポテュニティーを求めてトリップを行なうという文脈でつぎの仮定を設定しよう．

仮定：ある人があるオポテュニティー距離$V(t_1)$と$V(t_2)$の間にあるオポテュニティーのなかに求めるオポテュニティーを見いだす確率$G(V(t_1))-G(V(t_2))$は，オポテュニティー距離$V(t_1)$以内のオポテュニティーに求めるオポテュニティーを見いだせない確率$G(V(t_1))$とオポテュニティー量$u=V(t_1)-V(t_2)$に求めるオポテュニティーを見いだす確率$1-G(u)$との積である．

すなわち数式で表現すると

$$G(V)-G(V+u)=G(V)(1-G(u)) \quad \text{for all } V,\ u\geq 0 \tag{2.1}$$

とあらわされる．この解は，オポテュニティー量を個数で数えるか連続量として測るかで多少形が異なるが本質的には同じで

$$G(V)=\begin{cases} q^V,\ 0<q<1,\ \text{整数}\quad V\geq 0 \\ \text{または} \\ e^{-pV},\quad p>0,\ \text{実数}\quad V\geq 0 \end{cases} \tag{2.2}$$

で与えられる．これよりゾーンiの人がゾーンjへトリップする確率P_{ij}は，V_{ij}をゾーンiからゾーンjへのオポテュニティー距離とすると

$$P_{ij}=G(V_{ij-1})-G(V_{ij}) \tag{2.3}$$

で与えられる．したがってO_iをゾーンiの人口とすると，ゾーンiからゾーンjへのトリップ数T_{ij}は

$$T_{ij}=O_iP_{ij}=\begin{cases} O_i(q^{V_{ij-1}}-q^{V_{ij}}) \\ O_i(e^{-pV_{ij-1}}-e^{-pV_{ij}}) \end{cases} \tag{2.4}$$

で推定される．

ここでもう1度上の仮定を具体的に古本屋の例

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．

で考えてみよう．確率P_jを駿河台下からj番目の古本屋へゆく確率とすると，この場合式(2.3)において$V_{ij}=j$であるから

$$P_j=q^{j-1}-q^j=q^{j-1}(1-q) \qquad (2.5)$$

で与えられる．パラメータqが1軒の古本屋で求める本を見つけられない確率，$1-q$が見つけられる確率であることを頭におくと，式(2.5)は1軒目で見つけられず2軒目にゆき，2軒目でも見つけられずに3軒目，……$j-1$軒目でも見つけられなかった確率$q\cdot q\cdots\cdots q=q^{j-1}$に$j$軒目でついに見つける確率$(1-q)$より成っていることがわかる(図1)．すなわち仮定は，満足のゆくようなオポテュニティーを探し求め，それがあったところでトリップをやめるというプロセスを表現したものであると理解できよう．このようなトリップ行動は買い物トリップにおいてよく見いだされるパターンで，シュナイダーのモデルもこのようなトリップに適用するのが適切と思われる．

3. 通勤トリップ推定の仕方

シュナイダーのモデルはショッピングトリップを推定する場合の他に，通勤トリップの推定にも利用されている．この場合慣用的に用いられている方式は，オポテュニティーOとして都市内に分布している就業オポテュニティーを考え，これに関するオポテュニティー距離をV_{ij}^eとし，ゾーンiの人口をO_i^hとすると，ゾーンiからゾーンjへの通勤トリップ数T_{ij}は式(2.4)より

$$T_{ij}=O_i^h\{\exp(-pV_{ij}^e-1)-\exp(-pV_{ij}^e)\} \qquad (3.1)$$

で与えられるというものである．しかしこの方式は，先のシュナイダーの行動仮定の文脈で考えると，住宅地を所与にして就業地を探し求めてゆくというプロセスを想定していることになってしまう．このプロセスは都市内の通勤トリップを理解するのに不自然である．結局通勤トリップは就業地を基点にどこで住宅を見つけるかで捉えられるから，慣用的方式の場合とは逆に就業地から住宅を探し求めるプロセスで捉えればよい．そのためにはオポテュニティーOとして住宅オポテュニティーを考え，これに関するオポテュニティー距離をV_{ij}^hとし，ゾーンjの就業オポテュニティー数をO^e_jとするとゾーンjに就業地を持っている人がゾーンjに住宅地を見つける量，すなわちゾーンiからゾーンjへの通勤トリップ数T_{ij}'は，

$$T'_{ij}=O_j^e\{\exp(-pV_{ji-1}^h)-\exp(-pV_{ji}^h)\} \qquad (3.2)$$

で与えられよう．式(3.1)と比較してV_{ij}^eがV_{ji}^hと逆になっている点に注意されたい．簡便法として就業オポテュニティーと住宅オポテュニティーを人口数で代用したとしても$T_{ij}\neq T_{ij}'$であることは明らかであろう．以上のことからショッピングトリップ等の推定には式(2.4)を，通勤トリップの推定にはそれと「逆」の式(3.2)を利用するのが適切と思われる．

4. 対象地域のスケールとオポテュニティー認識の不完全性

都市内に分布しているオポテュニティーに関して人間の知識は完全ではありえない．家から100m以内にある八百屋はどこにどうあると知っていても1kmも離れたところとなると，何軒かの八百屋があっても知っているのはそのうちの一部であろう．このことを考えると，オポテュニティー距離は実際都市に存在しているオポテュニティーに関してではなく，そのなかから認識されたオポテュニティーに関して考えるのが自然であろう．この点をシュナイダーモデルで考慮するために人間のオポテュニティー認識の度合いを表現する認識関数として

$f(t)$＝距離tまでに存在するオポテュニティーを認識する割合

としよう．すると認識されたオポテュニティー距離$V^*(t)$は，存在しているオポテュニティーに関してのオポテュニティー距離$V(t)$と

$$V^*(t)=f(t)V(t)$$

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．

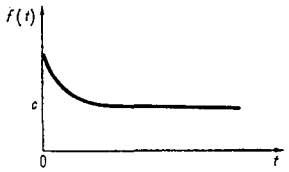


図 2　認識関数

の関係にある．そこでオポテュニティー距離の不完全性を考慮するには，元の式(2.4)において $V(t)$ を $V^*(t)$ で書き換えればよいであろう．

さてこの修正の妥当性をデータで調べてみると，認識関数 $f(t)$ はほぼ図2のようになっていることがわかる．この図を見てみると，人間のオポテュニティー認識の度合はある程度の距離まで減少してゆくがそれ以上になると一定となってしまうことがわかる．すなわちある程度遠くなってしまえば，10kmのところでも20kmのところでも知らない度合は同じようなものであるということであろう．

この事実から判断すると，シュナイダーモデルを利用する場合比較的中小都市でのトリップ推定には認識関数を導入する必要があり，一方大都市で大きなゾーンを単位とする場合は認識関数を導入する必要性はそれほど認められない．なぜなら後者の場合 $f(t)=c$ としてよく，そのとき

$$\exp(-pf(t)V(t))=\exp(-pcV(t))$$
$$=\exp(-p'V(t))$$

となり，形式的に式(2.2)と同じになるからである．なおオペレーショナルな $f(t)$ としては，$f(t)=\exp(-\beta t)$ が利用しやすいであろう．

5.　ゾーン割によるバイアス

2人以上の人間，2つ以上の物的施設が同時にまったく同じ位置に存在することは，それらが空間にある体積を持っている以上不可能であり，そのことはまた空間の持つ重要な意味でもあろう．この点を地域全体に関するトリップ推定の場合で考え合わせると，人々は都市のそれぞれ異なった地点に居るということで個人のオポテュニティーに関する空間関係はすべて異なっているのだから，厳密には地点地点の個人ごとにトリップ推定をやりそれを集計して地域全体のトリップ推定を行なわなければならなくなる．しかしこれは実際上できないことである．

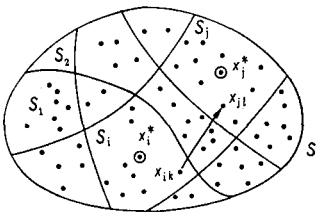


図 3　ゾーン化

そこで便宜的にはつぎのような方法が用いられている．まず地域 S をゾーン区分する．$S=S_1+S_2+\cdots\cdots+S_n$．つぎにそれぞれのゾーン S_i にいる個人 O_i およびオポテュニティー D_i がゾーン S_i の中心地点 x_i^* に全部集まっていると仮定する．そして最後にこれらの点で代表されるゾーンにトリップ推定モデルを適用する(図3)．この方法は確かに便利な方法であるが，面を点とあつかってしまうのであるから当然トリップ推定値にバイアスが生じる結果となる．そこでここではそのバイアスがシュナイダーモデルの場合どのようになっているかについて述べておこう．

バイアスを数式的に述べるために，記号を

$P(x_{ik}, x_{jl})$＝ゾーン i の地点 x_{ik} にいる個人 k がゾーン j の地点 x_{jl} にあるオポテュニティーへトリップする確率(図3)

$P_s(k)$＝個人 k がサンプルされる確率

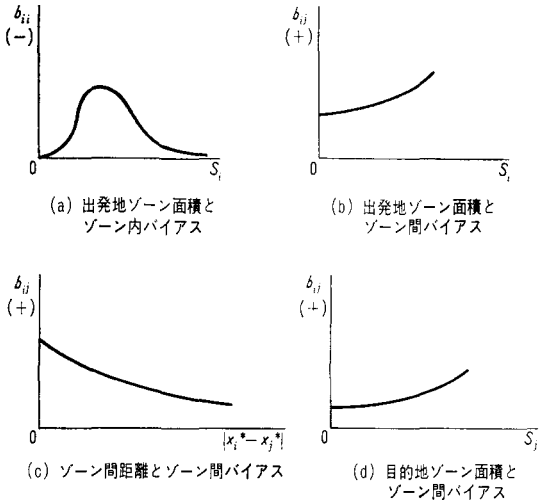
としよう．すると原理的にゾーン i からゾーン j への正確なトリップ確率 P_{ij} は，ゾーン i にいる個々人の地点 x_{ik} からゾーン j にある個々のオポテュニティーの地点 x_{jl} までのトリップ確率の集計として

$$P_{ij}=\sum_{k=1}^{Oi}\sum_{l=1}^{Dj}P(x_{ik}, x_{jl})\,P_s(k) \qquad (5.1)$$

で与えられよう．一方便宜的な方法は先に述べたことからわかるようにゾーン i のすべての個人 k，ゾーン j のすべてのオポテュニティー l に対して

$$P(x_{ik}, x_{jl})=P(x_i^*, x_j^*),\quad P_s(k)=1/O_i$$

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．



(a) 出発地ゾーン面積とゾーン内バイアス　(b) 出発地ゾーン面積とゾーン間バイアス

(c) ゾーン間距離とゾーン間バイアス　(d) 目的地ゾーン面積とゾーン間バイアス

図 4　ゾーン化にともなうバイアス

と仮定されていることに等しいから，便宜的な方法によるトリップ確率は

$$P_{ij}^*=D_jP(x_i^*,\ x_j^*) \qquad (5.2)$$

で与えられる．するとゾーン化にともなうバイアス b_{ij} は

$$b_{ij}=P_{ij}-P_{ij}^* \qquad (5.3)$$

であらわされ，このバイアスがゾーンの大きさ，ゾーン間の距離でどのように変わるかが知りたいところである．詳細な議論をはぶいて定性的な結果だけ述べると，図4a，b，c，d のようにあらわされる．

この図からおもな結論を要約すると，まずゾーン内のトリップ確率は常に過大評価され，ゾーン間のそれは常に過少評価される．つぎにゾーン内のトリップ確率は，ゾーンが大きくなるにつれてあるところまではバイアスが大きくなるがそれ以後は逆に小さくなる．これは一見予想外の結果と思われるが，全地域が1つのゾーンになってしまえばすべてそのゾーン内でトリップするため正確な方法でも便宜的な方法でも $P_{ii}=P_{ii}^*=1$ となるのが理解できよう．

第3にゾーン間のトリップ確率は，出発地ゾーン，目的地ゾーンが大きくなればなるほどバイアスは大きくなり，また出発地ゾーンと目的地ゾーンの距離が離れれば離れるほど小さくなる．

それでは実用上どのくらいのゾーン割をすればバイアスの影響を気にしなくてもよいかが問題となるが，線形の地域を仮定したときに10万人の都市で約35ゾーンぐらいにすれば約1％のバイアスですむという結論を得ているので，1つの目安となるかと思われる．

6.　オポテュニティー・モデル族のモデル

いままでシュナイダーのオポテュニティーモデルのみについてその利用の仕方を考えてきたが，オポテュニティーモデルにはシュナイダーモデルしかないわけではなく，他にもいくつかのモデルが提案されている．シュナイダーのモデルと同様，それぞれ一定の行動仮定からみちびきだされたもので興味深いが，ここで詳細に述べる余白がないのでいくつかのモデルの結果式だけを列挙して利用上の糸口としておこう．詳細については後述の文献を参照されたい．なお共通の記号として

V_{ij}＝ゾーン i からゾーン j までのオポテュニティー距離

u_j＝ゾーン j のオポテュニティー量

V＝全オポテュニティー $(=\sum_j V_{ij})$

k＝定数

を用いることにする．

i) Stouffer モデル(1940)

$$P_{ij}=k\frac{u_j}{V_{ij}}$$

移住モデルとして開発された．

ii) Porter モデル(1956)

$$P_{ij}=k_1\frac{u_j}{V}\left(\frac{1}{1-k_2(1-V_{ij})^2}+\frac{1}{1-k_2(1-V_{ji})^2}\right)$$

移住モデルとして開発された．

iii) Stouffer モデル(1960)

$$P_{ij}=k_1\frac{(u_iu_j)^{k_2}}{(V_{ij}^*V_{ji})^{k_3}}$$

ここで V_{ij}^* はゾーン i とゾーン j の中心を通り，それを直径とする領域のオポテュニティー．ただし，それぞれの変数の内容は先の定義と少々異なるので注意．

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．

(文献参照のこと)なお移住モデルとして開発された.

iv) Tomazinis モデル(1962)

$$P_{ij}=k\frac{u_j}{V_{ij}}$$

形式的には Stouffer の モデル と同じだが, 考え方を異にする.

v) Ruiter の修正 Schneider モデル(1967)

$$P_{ij}=\exp(-pV_{ij-1}{}^{k})-\exp(-pV_{ij}{}^{k})$$

近距離のトリップ行動が Schneider モデルとととくに異なる.

vi) Heanue-Pyers モデル(1967)

$$P_{ij}=k\frac{u_j}{V_{ij}}\left(1-\frac{V_{ij}}{V}\right)$$

Tomazinisモデルとして紹介されることがあるが明らかにTomazinisのオリジナル・モデルと異なっている.

＊付記：この小論に関する詳細な議論については後述の拙稿を参照いただければ幸いである.

参 考 文 献

Chicago Area Transportation Study (CATS), (1960), *Final Report* II

Heanue, K. E. and Pyers, C. E., (1966), A comparative evaluation of trip distribution procedures, *Highway Research Record*, 114, pp. 20-50.

Okabe, A., (1976), A theoretical comparison of the opportunity and gravity models, *Regional Science and Urban Economics*, 6.

——, (1977), Formulation of the intervening opportunities model for housing location choice behavior, *Journal of Regional Science*, 17.

——, (1977), Spatial aggregation bias in trip distribution probabilities I, *Transportation Research*, (forthcoming).

Porter, R., (1956), Approach to migration through its mechanism, *Geografiska Annaler*, 38, pp. 317-43.

Schneider M., (1959), Gravity models and trip distribution theory, *Papers and Proceedings of the Regional Science Association*, 5, pp. 51-8.

Stouffer, S. A., (1940), Intervening opportunities : a theory relating mobility and distance, *American Sociological Review*, 5, pp. 845-67.

——, (1960), Intervening opportunities and competing migrants, *Journal of Regional Science*, 2, pp. 1-26.

Tomazinis, A. R., (1962), A new method of trip distribution in an urban area, *Highway Research Board Bulletin*, 347, pp. 77-99.

おかべ・あつゆき　1945年生　東京大学都市工学科大学院博士課程

学生論文(卒論, 修論)の募集

来年度のフォーラム欄の1つに, 学生論文の紹介欄を設けます. 卒業論文や修士論文あるいはリポートなどのうち, テーマや取りあつかい方におもしろ味のあるもの, アイデアに富むものを, 研究室の先生による一括紹介や学生諸君の直接執筆によって紹介したいと考えています.

論文誌に発表できるものは論文誌に投稿してください. そこまでのレベルには達しなくても若い頭脳で一生懸命に考えたものには多くの読者の共感をよんだり刺激になったりするものがあるでしょう. そういった「さわり」をぜひこの欄でご紹介ください.

原稿の長さは1件あたり最大1/2ページ(25行×45行で図や表もこの分量の中に含めます). ただし, 先生が一括してご紹介くださるときは, 全体を1～2ページとし, 内部の分量の割り振りは自由とします.

常設欄としたいので, 締切日はとくに設けません. 応募原稿は学会事務局宛お送りください.

◎論文誌投稿のおすすめ

論文誌を新しい形にしたため収容能力が飛躍的に増えました. 半年ぐらいで掲載される場合もあります. ふるってご投稿ください.

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会. 無断複写・複製・転載を禁ず.