

道路網容量制約の下での最適土地利用配分モデル*

--- 経路変更を考慮した場合 ---

Optimal Land Use Allocation Model Constrained by Road Network Capacity Constraint

--- A Case Considering Route Choice Behavior ---

柏谷増男** 朝倉康夫*** 下岡英智****

BY Masuo KASIWADANI, Yasuo ASAKURA, Hidetomo SHIMOOKA

Driver's route choice behavior is considered in the formulation of an optimal land use allocation model constrained by road capacity constraint. Previous LP type model is modified and iteratively solved, in which route choice probability is up-dated using multinomial logit model. Numerical examples are calculated for testing the model characteristics. It is found that the LP model whose decision variables are zonal allocated floor space and path flow gives the upper bound of the proposed model. The allocated floor space of the proposed model is about 1.5 times of that of the previous model, and it means that the assumption on driver's route choice makes significant differences.

1. はじめに

筆者らは、これまで道路網容量を考慮した容積率配分計画について研究を行ってきた。

この研究では、配分すべき床面積から発生する交通量がどのリンクを通行するかを表す指標値を配分の前に固定して影響係数と呼び、この指標値を使ったリンク制約式を設けている。その際、配分床面積のもとでの均衡配分交通パターンが事前に影響係数の求めた時のものとは異なること、及び影響係数の値を固定しているためリンク容量制約式が実態感覚に比べて過度に厳しくなっている等の問題点があった。そこで本研究では、ある活動が特定の立地点への立地を強く望むときには経路を迂回することもあ

りうると考え、より弾力的なリンク制約式の導入を目指している。以下では、土地利用配分モデルの定式化に先だって、まず、道路網の最大容量モデルの中で経路選択の変更をどのように表現するかについて考察する。次に、その考え方を筆者らが提案してきた最適土地利用配分モデルに応用した場合のモデル展開を述べ、数値計算によってその妥当性を検証する。

2. 道路網最大容量について

(1) 最大容量決定の前提条件^[1]

一般に道路網最大容量とは、特定条件下（物理的・経済的・環境的な限界条件下）において、道路網全体として受け入れ可能な最大交通量であると定義されている。本研究では、モデルの定式化の関係から最大容量を求める方法としてLPの応用を考える。LPモデルの前提条件には、①単位OD表が所与、②目的地選択率が所与、③目的地選択率と経路選択率が所与、という3つの場合がある。①の場合では

*キーマンズ 道路網最大容量、土地利用配分モデル、経路選択行動

**正会員 工博 愛媛大学教授 工学部 土木海洋工学科 (〒790 松山市文京町3)

***正会員 工博 愛媛大学助教授 工学部 土木海洋工学科

****学生員 愛媛大学大学院 工学研究科

経路交通量、②の場合では経路交通量とゾーン別発生可能交通量が決定変数となる。しかし、経路交通量を決定変数とすると、変数の数は全ODペア間の総経路数となり、大規模ネットワークではかなりの数となるため実用的ではない。また、フローパターンはシステム最適フローとなるため、道路網利用者の経路選択行動が考慮されているとは言えない。一方、③の場合ではネットワーク上のフローパターンを発生交通量の関数として表すことができるため、ゾーン別発生可能交通量のみが決定変数となり、変数の数は対象地域のゾーン数で済む。

(2) 目的地選択率と経路選択率が所与の最大容量モデル

本研究では、目的地選択率と経路選択率が所与の場合の最大容量モデルを(LP 1)と名付けて考察する。そのモデルを以下に示す。

(LP 1)

$$\begin{aligned} \max. \quad & \sum_i U_i \\ \text{sub. to} \quad & \sum_i Q_{ai} \cdot U_i \leq C_a \quad \text{for } a \in A \quad \dots(1) \\ & U_i \geq 0 \quad \text{for } i \in I \end{aligned}$$

ここで、 U_i はゾーン*i*からの発生可能交通量、 C_a はリンク容量、 Q_{ai} は影響係数でゾーン*i*から発生したトリップのうちリンク*a*を通過するものの割合、である。 Q_{ai} は、ゾーン*j*を選ぶ目的地選択率 q_{ij} と経路*k*を選ぶ経路選択率 r_{ijk} により、式(2)のように表すことができる。

$$Q_{ai} = \sum_{j,k} r_{ijk} \cdot q_{ij} \cdot \delta_{ijk a} \quad \text{for } i \in I, a \in A \quad \dots(2)$$

経路選択率は、ODペア*ij*間の選択可能経路集合を K_{ij} としたとき、例えば次のような多項ロジット型で事前に与えることができる。

$$r_{ijk} = \exp(\theta \cdot t_{ijk}) / \sum_k \exp(\theta \cdot t_{ijk}) \quad \text{for } k \in K_{ij} \quad \dots(3)$$

ここで、

θ : パラメータ

$$\begin{aligned} t_{ijk} &: \text{ODペア } i, j \text{ 間の経路 } k \text{ の走行時間} \\ &= \sum_a t_{a0} \cdot \delta_{ijk a} \end{aligned}$$

t_{a0} : リンク*a*の自由走行時間(固定)

$\delta_{ijk a}$: ODペア*i, j*間の*k*番目経路にリンク*a*が含まれている場合は1、その他は0

このモデルでは、ネットワークの最大容量に達した時点でいくつかのリンクが容量制約に達しても、あるODペア間では通行可能な経路が残っている可能性がある。事前に与える影響係数を求める際に設定した経路選択率(および利用可能経路)の値が適切であれば、残っている経路は通行可能でも利用される可能性が小さいであろうから問題は生じない。しかしながら、事前に仮定した経路選択率は、事後の交通発生パターンの下で生じるであろう経路選択率とは異なるかもしれない。そこで、「経路選択」という記述性は残しつつ、経路利用パターンの変化を内包した形でモデルの展開を試みる。なお、目的地選択率については、固定的に扱うものとする。

(3) モデルの改良

(LP 1)では、最大容量に達した時点でも、あるODペア間で容量に達していない経路があれば、それを利用することも可能である。したがって、一旦、(LP 1)を解いた後で、影響係数すなわち経路選択率の変更を認めれば、更にトリップを負荷することができるであろう。そこで、目的地選択率(q_{ij})は固定したまま選択可能経路集合(K_{ij})を変更することにより、経路選択率(r_{ijk})の値だけを再計算することを考える。そして、少なくとも一つのODペアが非連結となるまで、すなわち、 K_{ij} が空集合となるまで、経路選択率の計算とそれを与件とした(LP 1)の計算を繰り返すようにしたのが次のモデルである。

(Model 1)

初期設定: $K_{ij}^{(0)}$ の初期値を定め、 $U_i^{(0)}$ 、 $V_a^{(0)}$ を0とおき、 $n=1$ (繰返し回数)とする。

step 1 $K_{ij}^{(n)}$ に対応して $r_{ijk}^{(n)}$ を算出し、影響係数 $Q_{ai}^{(n)}$ を計算する。

step 2 (LP 1)において式(1)の右辺から $V_a^{(n-1)}$ を

引き、 $Q_{a1}=Q_a^{(n)}$ として(LP 1)を解く。その解を、第n段階の最適解 $U_i^{(n)*}$ とする。

step 3 $U_i^{(n)}$ と $V_a^{(n)}$ を更新する。

$$U_i^{(n)} = U_i^{(n-1)} + U_i^{(n)*}$$

$$V_a^{(n)} = V_a^{(n-1)} + \sum_{i \in I} Q_a^{(n)} \cdot U_i^{(n)*}$$

step 4 $V_a^{(n)} = C_a$ となるリンクを含む全ての経路を $K_i^{(n)}$ から除き、 $K_i^{(n+1)}$ を得る。

step 5 $K_i^{(n+1)} = \emptyset$ となるODペアが1つでもあれば計算終了。そうでなければ $n=n+1$ としてstep 1へ。

(4) (Model 1)における最大容量

(Model 1)における最大容量は、先に述べたLPモデルの前提条件②(目的地選択率が所与)の場合の最大容量に近いものであると考えられる。そこで、両者の違いについて考察してみよう。前提条件②の場合のモデルは、(LP 2)のように定式化できる。

(LP 2)

$$\max. \quad \sum_i U_i$$

sub. to

$$\sum_k h_{ijk} = U_i \cdot q_{ij} \quad \text{for } i \in I, j \in J \quad \dots(4)$$

$$\sum_{i,j,k} h_{ijk} \cdot \delta_{ijka} \leq C_a \quad \text{for } a \in A \quad \dots(5)$$

$$h_{ijk}, U_i \geq 0 \quad \text{for } i \in I, j \in J, k \in K$$

ここで、

h_{ijk} : 経路交通量

(LP 2)と(Model 1)とは以下の共通点を持つ。①目的地選択率が所与で固定されている、②モデルの解が少なくとも1つのODペアが非連結となる状態で得られる。

ここで、式(1)に式(2)を代入すると、

$$\sum_{i,j,k} r_{ijk} \cdot q_{ij} \cdot \delta_{ijka} \cdot U_i \leq C_a.$$

一方、式(4)より $\sum_j h_{ijj} = U_i \cdot q_{ij}$ から、上式は

$$\sum_{i,j,k} r_{ijk} \cdot \delta_{ijka} \cdot \left(\sum_j h_{ijj} \right) \leq C_a. \quad \dots(6)$$

一般に式(5)と(6)は一致しないが、 r_{ijk} の値と(LP 2)によって得られた経路交通量の比率が同じとなるODペア間においては一致する。また、(LP 2)では経路の指定を行わないため、非現実的な経路へ交通量が流れることもあるし、経路自体は妥当であっても所要時間の著しく大きな経路にフローが流れるなど利用率が必ずしも現実的であるとは限らない。これに対し、(Model 1)では経路集合と選択率により交通流に制約をかけているので、これらの設定が妥当であれば得られたフローパターンの現実性は低い。

(Model 1)のアルゴリズムによって得られる解は、経路集合(K_{ij})の内容の変更に伴って、経路選択率(r_{ijk})の値を更新しながら繰り返し計算し、少なくとも1つのODペアが非連結となるまで計算が行われるので、結果的には(LP 2)の解に下から近づくはずである。一方、(LP 2)では経路交通量を変数に取っているため、経路選択率により自由度が制約された(Model 1)の解より更に大きな最大容量を与えることになる。このことから、(Model 1)の上限は(LP 2)で、下限は(LP 1)で与えられるといえる。

3. 道路網最大容量を考慮した最適土地利用配分モデル

先に述べた道路網最大容量モデルでは、解として得られるゾーン別の発生可能交通量を床に変換することにより、各ゾーンでの立地可能床面積をとりあえず求めることはできるが、土地利用効率は考慮されていない。また、LP型の土地利用配分モデルである Herbert-Stevens モデルでは、土地利用効率は考慮されているが、道路の容量による制約は入っていない。筆者らは既に土地利用配分モデルに道路網最大容量の考え方を組み込んで、土地利用配分の際に道路網の最大容量を考慮できるようにしたモデルを提案しているが^[2]、このモデルに経路変更の考え方を導入すると以下のモデルが得られる。これを(Model 2)と称する^[3]。

(Model 2)

初期設定: $K_{ij}^{(0)}$ の初期値を定め、 $U_i^{(0)}$ 、 $V_a^{(0)}$ 、 $G_{im}^{(0)}$ をそれぞれ0、(既存交通量)、(既

存立地床面積)とおき、 $n=1$ (繰返し回数)とする。

step 1 $K_i^{(p)}$ に対応して $r_{ijk}^{(p)}$ を算出し、影響係数 $Q_{ai}^{(p)}$ を計算する。

step 2 次のモデルより第 n 段階の最適解 X_{im}^* を計算する。

$$\max. \sum_{i,m} b_{im} \cdot X_{im}$$

sub.to

$$\sum_i (X_{im} + G_{im}^{(n-1)}) \leq D_m \quad \text{for } m \in M \quad \dots(7)$$

$$\sum_m (X_{im} + G_{im}^{(n-1)}) / u_m \leq N_i \quad \text{for } i \in I \quad \dots(8)$$

$$\sum_{i,m} Q_{ai}^{(p)} \cdot \alpha_m \cdot X_{im} \leq R_{\max} \cdot C_a - V_a^{(n-1)} \quad \text{for } a \in A$$

$$X_{im} \geq 0 \quad \text{for } i \in I, m \in M$$

ここで、 X_{im} :ゾーン i における活動 m の立地可能床面積、 b_{im} :ゾーン i における活動 m の単位床面積あたり付け値、 $G_{im}^{(n)}$:ゾーン i における n 段階までの立地床面積、 D_m :対象地域全体での活動 m の総需要床面積基準値、 N_i :ゾーン i の立地可能面積、 u_m :地区環境条件に基づく活動 m の容積率、 $R_{\max}$:リンク切斷判定基準、 α_m :活動 m の単位床面積あたりの発生原単位。

step 3 $X_{im}^{(n)}$ 、 $V_a^{(n)}$ 、 $G_{im}^{(n)}$ の更新。

$$X_{im}^{(n)} = X_{im}^{(n-1)} + X_{im}^{(p)*}$$

$$V_a^{(n)} = V_a^{(n-1)} + \sum_{i,m} \alpha_m \cdot Q_{ai}^{(p)} \cdot X_{im}^{(p)*}$$

$$G_{im}^{(n)} = G_{im}^{(n-1)} + X_{im}^{(p)*}$$

step 4 $V_a^{(n)} = R_{\max} \cdot C_a$ となるリンクを含む全ての経路を $K_i^{(p)}$ から除き、 $K_i^{(p+1)}$ を得る。

step 5 $K_i^{(p+1)} = \emptyset$ となる OD ペアが 1 つでもあれば計算終了。そうでなければ $n=n+1$ として

step 1へ。

このモデルにおいて、式(7)は需要床面積の制約であり、式(8)は地区環境条件からみたゾーンの面積制約である。step 2において式(7)、(8)の制約にかからなければ、あるリンクが交通容量に達してそのリンクを含む経路が通行不能となる。このとき、選択可能な経路が残っておれば、その経路を使ってトリップすることができるから OD 間是非連結ではない。

したがって、残った経路に対して経路選択率を再度計算し、影響係数を求め直せばさらに床面積の配分が可能となる。どれかひとつの OD ペア間で経路がなくなるまで、すなわち OD 間が非連結となるか、あるいは、式(7)、(8)の制約に達するまでこの手順を繰り返せば、最終的な床の最適配分を求めることができる。

4. 数値計算例

(1) (LP 2)と(Model 1)の比較

ここでは、先に述べた(LP 2)と(Model 1)を小規模ネットワークに適用し、この2つのモデルの比較を行う。用いたネットワークを図-1に、リンクデータと経路を表-1に示す。

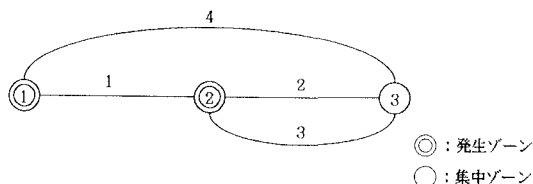


図-1 小規模ネットワーク

表-1 リンクデータと経路

リンク番号	t_0	容量	経路 (δ_{ijk})					
			OD 1-3			OD 2-3		
1	.10	10,000	0	1	1	0	0	
2	.10	10,000	0	1	0	1	0	
3	.06	6,000	0	0	1	0	1	
4	.17	10,000	1	0	0	0	0	

表-2 経路交通量

	Model 1	LP 2
経路交通量	$h_1 = 10000.$ $h_2 = 5002.$ $h_3 = 4998.$ $h_4 = 4998.$ $h_5 = 1002.$	$h_1 = 10000.$ $h_2 + h_4 = 6000.$ $h_3 + h_5 = 10000.$

(Model 1)は2回の繰返しでネットワークが非連結となり計算を終了した。ゾーン別発生交通量に関

しては、2つのモデルとも $U_1^* = 20000$ 、 $U_2^* = 6000$ と等しい値を得た。しかし、経路交通量は表-2に示すように同じではない。なお、この例では(LP 2)の経路交通量を一意に決めることができないため、経路交通量の和で表した。

この結果から経路集合としてODペア間のすべての経路を与えれば、経路交通量には違いが生じることがあるものの、ゾーン別発生交通量においては2つのモデルで得られる解は近いといえる。

(2) 従来の最適土地利用配分モデルとの比較

ここでは、影響係数を固定した従来の最適土地利用配分モデルと、経路の変更を内生化した(Model 2)との比較をする。

(a) 使用データ

用いたネットワークは、松山市都心部を参考にしたもの(図-2)である。簡単のため立地主体は1つとし、その発生原単位を10、容積率を200%とする。また既存の立地はないものとし、立地可能ゾーンは2つ(セントロイド1, 2)で、立地可能面積は両方とも1000とする。集中ゾーンは3つ(セントロイド3~5)で、目的地選択率は表-3に示すとおりとする。付け値の値は、 $b_{11}=100$ 、 $b_{21}=200$ とする。選択可能経路については、Dial法を用いて初期選択可能経路を求めた。また、各ODペア間の初期選択可能経路数は経路走行時間が短いものから順に3本までとしている。

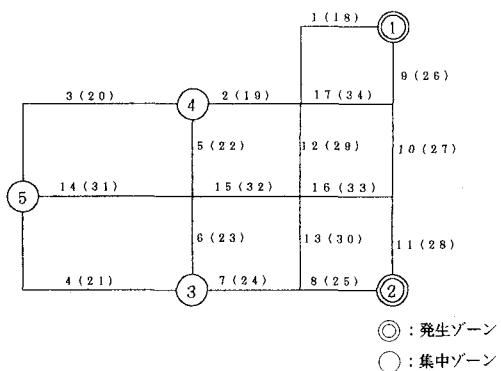


図-2 松山都心部ネットワーク

表-3 目的地選択率

i \ j	3	4	5
1	0.5	0.3	0.2
2	0.1	0.6	0.3

表-4 第1段階での経路選択率

O	D	経 路		
		1	2	3
1	3	.332	.337	.331
	4	.496	.504	.000
	5	.332	.332	.336
2	3	1.000	.000	.000
	4	.334	.334	.332
	5	.323	.337	.340

表-5 第2段階での経路選択率

O	D	経 路		
		1	2	3
1	3	.000	.000	1.000
	4	.496	.504	.000
	5	.000	1.000	.000
2	3	1.000	.000	.000
	4	1.000	.000	.000
	5	1.000	.000	.000

表-6 第1段階の配分結果

目的関数値	ゾーン 1	ゾーン 2
331,961	.00	1659.81

シャドープライス LINK(32) = 33.20

表-7 第2段階の配分結果

目的関数値	ゾーン 1	ゾーン 2
172,904	1174.92	277.06

シャドープライス LINK(9) = 11.75, (28) = 33.33

(b) 計算結果と考察

従来モデルは、(Model 2)の第1回目の繰返しに相当する。与件とした経路選択率を表-4に、第1回目の最適配分を表-6に示す。1回目の配分が終わった段階で、(1→3), (1→5), (2→4), (2→5)のOD間では少なくとも1本の経路が失われた。第2回目の配分のために再計算された経路選択率を表-5に示す。(Model 2)は2回の繰返しで最大容量に達した。非連結になったODペアは、(1→3), (1→5), (2→4)の3ODであった。表-7は第2段階で新たに配分された床面積である。

これらの結果を見ると、従来モデルに比べて、(Model 2)では立地可能床面積で約2倍、目的関数値も約1.5倍になっている。また、従来モデルではゾーン1には立地できなかったが、(Model 2)では立地可能となっている。この結果より、従来最大容量による制約がいかに厳しかったかがわかる。

5. おわりに

これまで筆者らは、道路網容量の制約の下で、影響係数を与件とした場合の最適土地利用配分モデルについて研究を進めてきた。しかし、このモデルで用いられているネットワーク容量の考え方では、特定のリンクが容量制約に達した時点でも、ODペア間に利用可能な経路が残されている可能性があり、OD間が非連結になっているとは限らない。これは影響係数すなわち経路選択率を固定であると仮定したことによるものであり、場合によっては道路利用者にとってかなり厳しい制約となっていることもある。そこで本研究では、立地が進むことによってOD間の利用経路の変更が生じることを考慮し、経路選択率を内生的に決めることのできるモデルの開発を試みた。得られた主な成果は以下のとおりである。(1)これまでに研究してきたLPによる最適土地利用配分モデルに経路の変更を組み込んだシミュレーションの考え方を導入した新たなモデルを提案した。このモデルは、一旦床面積が配分された段階において選択可能経路集合を変更し、すなわち、非連結になった経路を経路集合から除くことによって経路選択率と影響係数を再計算し、再びLPによる配分モデルを解くというものである。少なくとも1つのO

Dペアが非連結になるまでこの手順を繰り返す構造となっている。

(2)提案したモデルを松山市都心部ネットワークに適用した。このような局所的なネットワークでは、従来モデルの計算結果に比べて目的関数値で約1.5倍、配分床面積でも約2倍という結果を得たが、市全体のネットワークではこれほどの配分量に達することはないかもしれない。いずれにしても、提案したモデルの変数の数は、従来モデルより多くなることはなく実際規模のネットワークに対しても十分に適用できることが確かめられた。

しかしながら、このモデルには以下のような問題点が残されている。

(1)目的地選択率の変更について、現実には新たな床が配分されれば、ODパターンすなわち目的地選択率が変わる可能性があるが、このモデルでは考慮されていない。経路選択率の変更と同様の形で目的地選択率の変更を考慮するのであれば、現在のモデルを拡張することで対応できる。

(2)提案したモデルでは走行時間を交通量の関数とはしておらず、交通量が容量に達するまでは一定の値であるとしている。しかしながら、新たに発生した交通による道路混雑を明示的に考慮するためには、フローディペンデントな走行時間関数を導入する必要がある。ひとつの考え方は、床面積配分の各段階において経路選択率を求める際に、フローディペンデントな関数により経路の走行時間を求めるよう修正を加えればよい。これはきわめて軽微な修正で対応可能であり、現在検討を進めているところである。

《参考文献》

- [1] 柏谷増男, 朝倉康夫: 道路ネットワークの最大容量から見た都市開発規準の指標化に関する研究, 科学研究費補助金(一般C)研究成果報告書, pp.11-14, 1992
- [2] 柏谷増男, 朝倉康夫, 下岡英智: 道路ネットワークから見た容積率問題, 土木計画学研究・講演集, No.15(1), pp.443-450, 1992
- [3] 下岡英智, 柏谷増男, 朝倉康夫: 容積率配分計画からみた道路網最大容量について, 土木学会平成5年度全国大会講演概要, 1993