都市交通の視点から見た省エネルギー型都市構造とは？

鈴木 勉，田頭 直人

1．はじめに

都市問題と資源・エネルギー問題は，両者が表裏一体の関係にあるにもかかわらず，石油危機を迎えた1970年代の一時期に散見されたものの，これまで同時に考察されることは少なかった．地球環境問題が本格的に議論されるようになったここ10年ほどの間に，生活の質そのものを問う都市づくりと，有限だが現代生活に欠かせない存在となったエネルギーの節約との間に横たわる矛盾が，ようやく重く認識されるようになってきた．

人間が住まう都市の空間構造をどのように計画するかは，巡りめぐって自分たちの生活の営みに必要なエネルギー量に影響を及ぼしている．ゆとりある広々とした居室では，おのずと冷暖房に多くのエネルギーが必要となるし，巨大都市では郊外に家を持つと，通勤や買い物のために長距離を移動する機会が多くなり，自動車だと燃費がかさむ．長寿命の大規模オフィス専用ビルをつくると，ライフサイクルでの省エネと，エネルギー供給での規模の経済性が実現するが，需要の時間的変動とシステム効率を考えると，同時に多様な都市機能が隣接していた方が好ましい．

このような具体例は枚挙に暇がないが，本稿はこの中で，都市交通における省エネルギーに着目する．かつて，輸送需要の増大は経済発展を物語るバロメータであり，我々はむしろこれを歓迎してきた．しかし，車社会の進展による環境破壊に象徴される深刻な問題を生み出し，省資源・省エネルギーはむしろ制約条件ではなく，目標そのものになりつつある感さえある．

すずき つとむ 筑波大学 社会工学系
〒305 つくば市天王台1-1-1
たがしら なおと (財)電力中央研究所 経済社会研究所
〒100 千代田区大手町1-1-1

そこで，都市構造の改変を広義のデマンドサイドの省エネルギー方策として位置づけ，あえて省エネルギーのための都市の生活空間設計とは何か，といった設定で都市構造のあり方を考えてみることにする．

筆者の一人は，[4] で職場あるいは住宅の交換による通勤交通エネルギーの削減について論じたが，このとき，就業者の分布は変えられないものとしていた．しかし，長期的には都市計画を通してその計画的変更は可能である．そこで本稿ではこれを変えられるものとすると，今もし通勤のことだけを考えたならば，職場と住宅を一対ずつ組み合わせておけばよい．ところがこうすると，企業や役所が互いに取引や情報交換を行う等の業務目的の交通（業務交通）が長距離化し，車依存度が大きいためにエネルギーも多量に消費してしまうと考えられる．従って，職場はやはり，現実の都市に見られるように集中していた方が良いのかもしれない．

このように，望ましい都市構造には，職住近接性と同様，業務機能同士の近接性も求められる．しかし，これらを両立させるものが頻繁に提案されている業務多核分散型都市構造であるかどうかは，まだ明らかにされていないと言ってよい．

このような背景を踏まえ，本稿では多核分散型の業務立地が本当に望ましいのか，また望ましい場合，他の立地形態に比べてどの程度有利になり得るのかを明らかにするため，単純化した都市モデルを用いて，都市交通の多くを占める通勤および業務交通の交通量の総和を最小化する業務分布を導き，業務立地と交通量の関係をわかりやすく示すことを試みる．また，東京都市圏における距離－エネルギー構造をベースに，現実の条件下でのエネルギー消費から見た業務立地のあり方についても調べることにする．

© 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．

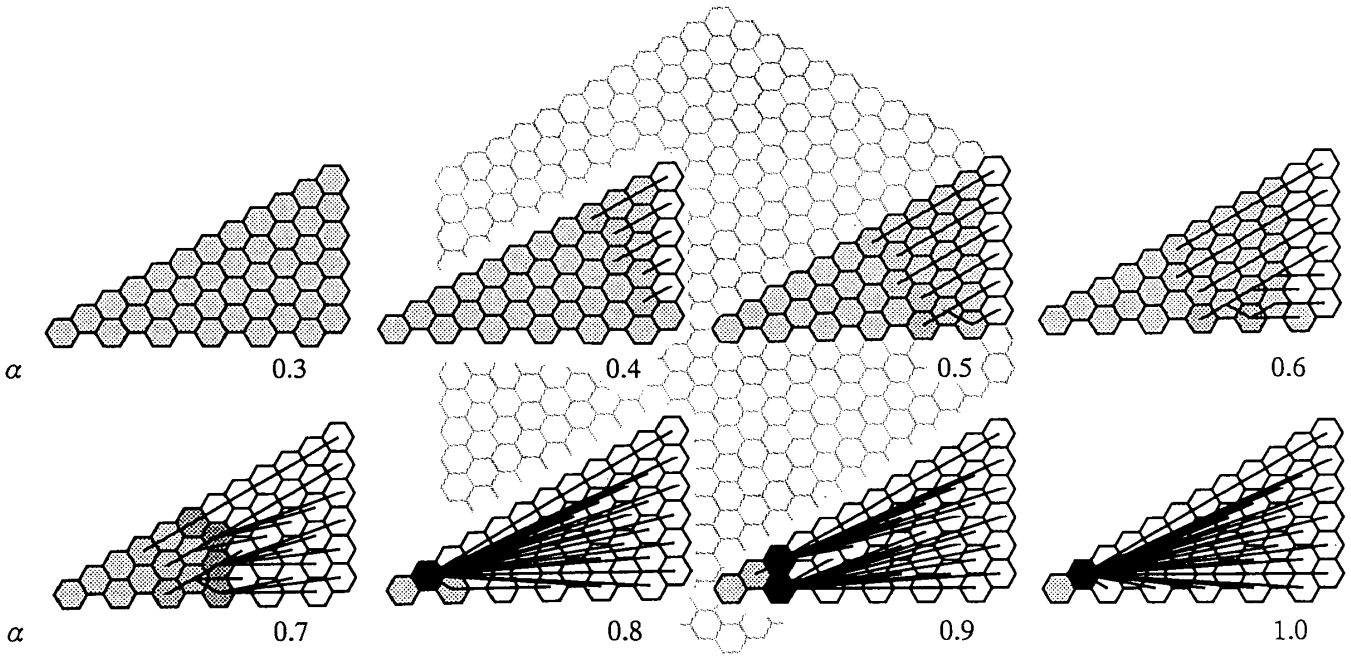

図1　総交通量を最小化する業務立地（均一居住分布；濃さが業務密度を表す）

2．業務立地と交通量のモデル

まず，簡単な離散モデルによって業務立地と交通量の関係を記述し，交通量を最小化する業務立地を導く．

n 個のゾーンからなる都市を考え（$N=\{1,\cdots,n\}$ とする），ゾーン i から j へ通勤する就業者数を r_{ij}，j で働く従業地就業者数を $r_{\cdot j}$ とし，ij 間の距離を d_{ij}，i に住む常住地就業者数 $r_{i\cdot}{}^*$，全就業者数 $r_{\cdot\cdot}{}^*$ は所与とする．kl 間の業務移動量は k,l の就業者数に比例，かつ距離 d_{kl} に依存しないと仮定し，就業者1人当りの業務移動発生率（片道通勤—トリップ当りの業務トリップ数を意味する）を $\alpha(\geq 0)$ として以下で与えられるものとする．

$$\alpha\frac{r_{\cdot k}r_{\cdot l}}{r_{\cdot\cdot}{}^*} \tag{1}$$

この仮定は必ずしも実際と整合するものではない（重力モデルのように，相互の距離が近いほど移動数が多いのが一般的）が，業務移動数を一定とするために成り立つとしておく．また，ここでは居住環境維持のために必要な居住地密度は与件とし，業務地や道路に関しては空間制約がない，すなわち立体化などでいくらでも建設できるものとする．

このとき，所与の居住分布に対して通勤および業務の総交通量（人×距離）を最小にする業務地分布を求める非線形計画問題は

$$\begin{aligned}&\min_{\{r_{ij}\}}\quad D=\sum_i\sum_j d_{ij}r_{ij}+\frac{\alpha}{r_{\cdot\cdot}{}^*}\sum_k\sum_l d_{kl}r_{\cdot k}r_{\cdot l},\\&\text{subject to}\ \sum_j r_{ij}=r_{i\cdot}{}^*,\quad i\in N,\\&\qquad\qquad\sum_i r_{ij}=r_{\cdot j},\quad j\in N,\\&\qquad\qquad r_{ij}\geq 0,\quad i,j\in N\end{aligned} \tag{2}$$

となる．目的関数の第1項が片道の通勤交通量，第2項が業務交通量の総和を表す．この問題の解は，業務分布を与件と見れば通勤交通量も最小化されているので，職住近接も実現されている．業務分布の初期値としていくつかのパターンを与え，その中で D が最小の解を最終解とする．

均一居住人口の場合の解を，隣り合う中心間の距離が1の397$(=6\sum_{i=1}^{11} i+1)$個の正六角形領域からなる都市モデルで求めると，図1のようになる．ただし，対称性から独立な変数は1/12のセクターの42個の領域のみとしても一般性は失われないので，図ではこの部分のみを示している．$\alpha=0.5$ の場合の都市全体は薄線で示されるようになっている．また，線は通勤流を表している．距離 d_{ij} については，広がりを持つ2ゾーン間の平均距離は，中心点間の距離よりも大きくなるので，それを論じた [2] [3] に準じて補正を行っている．

図1を見ると，業務移動発生率 α が0.4の辺りから就業地がリング状に集積し，その内部は職住が一致するパターンが導かれ，α が1に近づくにつれ一極集中に近づく．このように，$\alpha=0.4\sim0.9$ の時にリング状に集積する業務立地が導かれるが，これを多極分散型と見なすことにすれば，これが望ましい状態になる

© 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．

可能性があることがわかる．

3．集中か分散か？

しかしこのモデルでは，通勤・業務ともにゾーン内移動の距離が依然残るという集計による問題があり，これが解にバイアスを与えている可能性がある．そこでこれを，ゾーンを考えないリング状連続モデルに置き換えると，次のようになる．

図1の結果を踏まえ，半径1の円盤状都市を考え，居住地は密度1で一様に広がっているとする（総就業人口はπ）．業務地は図2に示すように都心からx_mの位置まで同じく密度1で円盤状に広がっており（この内部では職住は一致し通勤は発生しない），またx_mの位置より外側の居住地に住む人は，x_mの位置（幅は微小）に集積している業務地（これを以下，極という）へ通勤しているとする．必要となる移動距離を，居住地から業務地までの通勤交通と，業務地内部での業務交通とに分けて求めると，まず平均通勤距離は

$$\begin{aligned} d_c&=\frac{1}{\pi}\cdot 2\pi\int_{x_m}^{1} x(x-x_m)dx \\ &=\frac{1}{3}(1-x_m)^2(2+x_m) \end{aligned} \tag{3}$$

となる．また，一様に分布する半径aの円周上の2点間平均距離，円周とその内部の円盤上の2点間距離，円盤上の2点間距離はそれぞれ$4a/\pi$，$32a/9\pi$，$128a/45\pi$となることから，平均業務距離は

$$\begin{aligned} d_b&=\frac{\alpha}{\pi^2}\{\pi^2(1-x_m^2)^2\frac{4x_m}{\pi}+\pi^2(1-x^2{}_m)x^2{}_m\frac{32x_m}{9\pi}\cdot 2 \\ &\quad+\pi^2x_m^4\frac{128x_m}{45\pi}\} \\ &=\alpha\frac{4x_m}{45\pi}(45-10x_m^2-3x_m^4) \end{aligned} \tag{4}$$

となり，両者の和として，平均総距離は

$$\begin{aligned} d&=d_c+d_b=\frac{1}{3}(1-x_m)^2(2+x_m) \\ &\quad+\alpha\frac{4x_m}{45\pi}(45-10x_m^2-3x_m^4) \end{aligned} \tag{5}$$

と求められる．総就業人口は決まっているので，これを最小化することは総交通量を最小化することになる．(5)のx_mに関する一階微分は

$$\frac{\partial d}{\partial x_m}=(1-x_m)(1+x_m)\{\frac{4\alpha}{3\pi}(3+x_m^2)-1\} \tag{6}$$

と求められるので，平均総距離を最小にする極の半径x_m^*は

$$x_m^*=\begin{cases} 1, & 0\le\alpha<\dfrac{3\pi}{16}(\fallingdotseq 0.589), \\ \sqrt{3(\dfrac{\pi}{4\alpha}-1)}, & \dfrac{3\pi}{16}\le\alpha\le\dfrac{\pi}{4}(\fallingdotseq 0.785), \\ 0, & \alpha>\dfrac{\pi}{4} \end{cases} \tag{7}$$

となり，業務移動発生率αとの関係は図3のようになる．

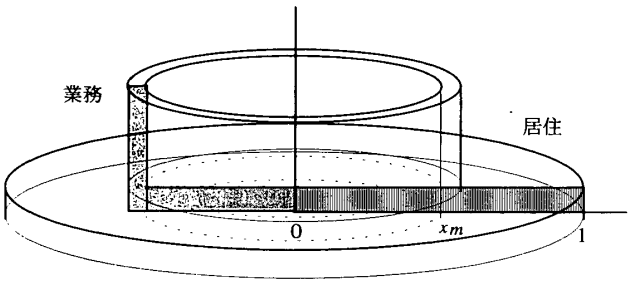

図2　リング状連続モデル

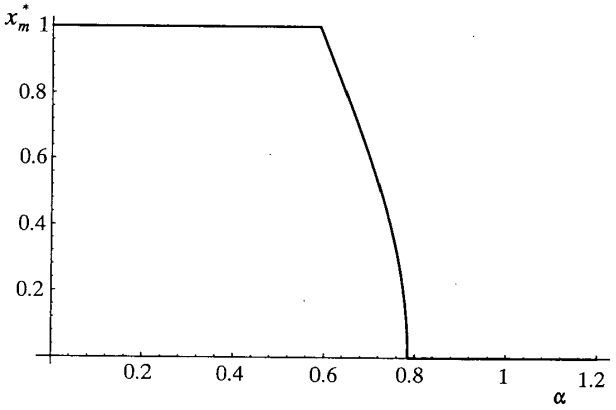

図3　業務移動発生率と交通量を最小化する極の半径との関係

リング状分散型が望ましくなる業務移動発生率αの範囲は0.589～0.785と離散モデルの場合よりも狭くなり，αがこれより小さいときは職住一致(完全分散)型，大きいときは一極集中型が総交通量を最小化する．しかし，$\alpha=0.8$付近では平均総距離dは業務分布によらずほぼ一定であり，分散型がよいケースでは他の分布でも総交通量はそれほど変わらない．つまり，大まかに言えば，0.8程度を境に，αが小さい場合は完全分散，大きい場合は一極集中が望ましい業務立地となり，境ではリング状分散によって若干有利になるが，この場合は他の分布でもそれほど変わらないと結論づけられる．なお，居住人口密度が中心ほど高くなるような現実的な場合でも，同様の結論が得られることが確認される．

この結果が意味するところは，仮に業務地と居住地のマッチングがコントロールされて職住近接が実現できるとしても，多核型の業務地が好ましい場合は，業務立地が総交通量に与える影響は少ないということであり，また業務移動発生率が低い場合はむしろ職住一

© 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．

致型への移行が望ましいということである．ただし，現実の都市では，交通需要は人・場所により異なり，交通目的や交通手段にも様々なものが存在し，また鉄道網や高速道路網などによって距離空間も歪められている．従って，多核型が有利な場合もあるかもしれない．

4．エネルギー消費による評価

以上をエネルギーで評価した場合はどうなるだろうか．結論から言ってしまうと，これまでの議論と比べて多核型の分散が好ましいケースは現条件下では見い出しにくく，新たな条件整備が必要である．

昭和63年東京都市圏パーソントリップ調査から得られる移動距離とエネルギー消費原単位の基本的関係を見てみると，まず，東京都市圏における旅客交通トリップのトリップ長と，１人が１km移動するために必要なエネルギー消費量（人km当たりのエネルギー消費原単位という）の関係は図４に示すとおりになっている[7]．この図は，トリップ長に対して，そのトリップが平均的に人km当たり消費しているエネルギーと，その交通手段別の内訳を同時に示したものである．ただし，凡例の「鉄道端末」とは，鉄道利用の際に出発地～駅間，あるいは駅～目的地間の徒歩・二輪車，バス，あるいは自動車による移動を意味している．

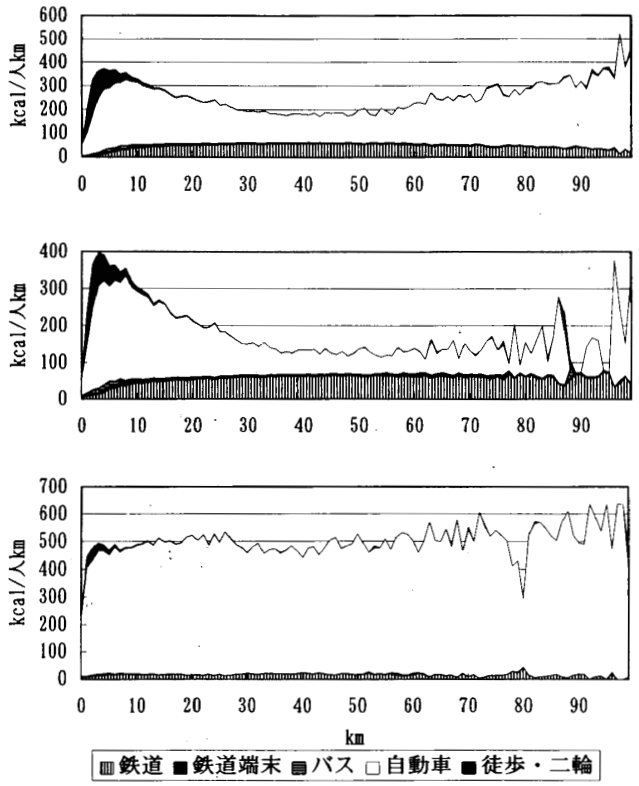

図４　トリップ長とエネルギー消費原単位の関係
（上：全交通，中：通勤交通，下：業務交通）

この図から，トリップ長がおよそ２km以内の場合は徒歩が多いため原単位は小さいが，自動車の分担率が急増する３kmほどで370kcal／人km位のピークがあり，さらに長くなると鉄道の分担が上がることにより，例えば40～50kmの場合は200kcal／人kmを下回ることがわかる．50kmを超えると原単位は上昇するが，これは鉄道が整備されていないODが増えるためであろうと考えられる．この傾向は通勤交通に顕著で，長距離でも原単位は150kcal／人kmを切る上，長距離化しても原単位は上昇する気配がない．ただし，距離が長いほど１トリップ当たりのエネルギー消費が減少するという逆転現象は起こっておらず，少なくとも現状の分担率では，遠隔化した方が平均的にトリップ当たりエネルギー消費を減少させるようなことはないと言える．また交通目的によっては様相も異なり，こと業務交通に関しては自動車依存度が高く，近距離を除いてほぼ500kcal／人kmで一定である．

次に業務立地の望ましさを判断するために，これを地理的に把握する．図５の上の図は通勤交通に関する目的地（就業地）ベースで見たエネルギー消費原単位の分布である．都心区（千代田・中央区）・副都心区（新宿・豊島区等）で原単位が最も小さく，郊外へ向かうほど高くなる．これは郊外へ行くほど，鉄道に代わって自動車の利用比率が高くなっていくためである．

ところが都心区への通勤は一般に長距離となっており，原単位は小さくても，１トリップ当たりのエネルギー消費量は大きくなる．そこで，原単位に移動距離を乗じた１トリップ当たりのエネルギー消費量の分布（図５真中）を見ると，都心区よりも新宿・豊島・北・江東各区等や，都心からやや離れた川崎・横浜市等のエネルギー消費量が最も小さくなる．これらの地域では鉄道の利用も便利でありながら住宅地に近く，都心部よりも平均通勤距離が短いためと思われる．すなわち，通勤だけを考えるならば，省エネルギーの観点から望ましい業務立地場所は都心以外にも広がっていると言える．

しかし，旅客運輸部門のエネルギー消費量は，通勤目的に次いで，業務目的の占める割合も高い．そして業務目的はエネルギー消費原単位の大きい自動車分担率が高く，業務立地の分散はこの面で移動距離を増加させ，エネルギー消費量も増加させてしまうという懸念が生じる．業務目的の発生地ベースのエネルギー消費原単位に関しては，千代田・中央・新宿区等で低いものの，その他では通勤の場合のような地理的な差違

© 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．

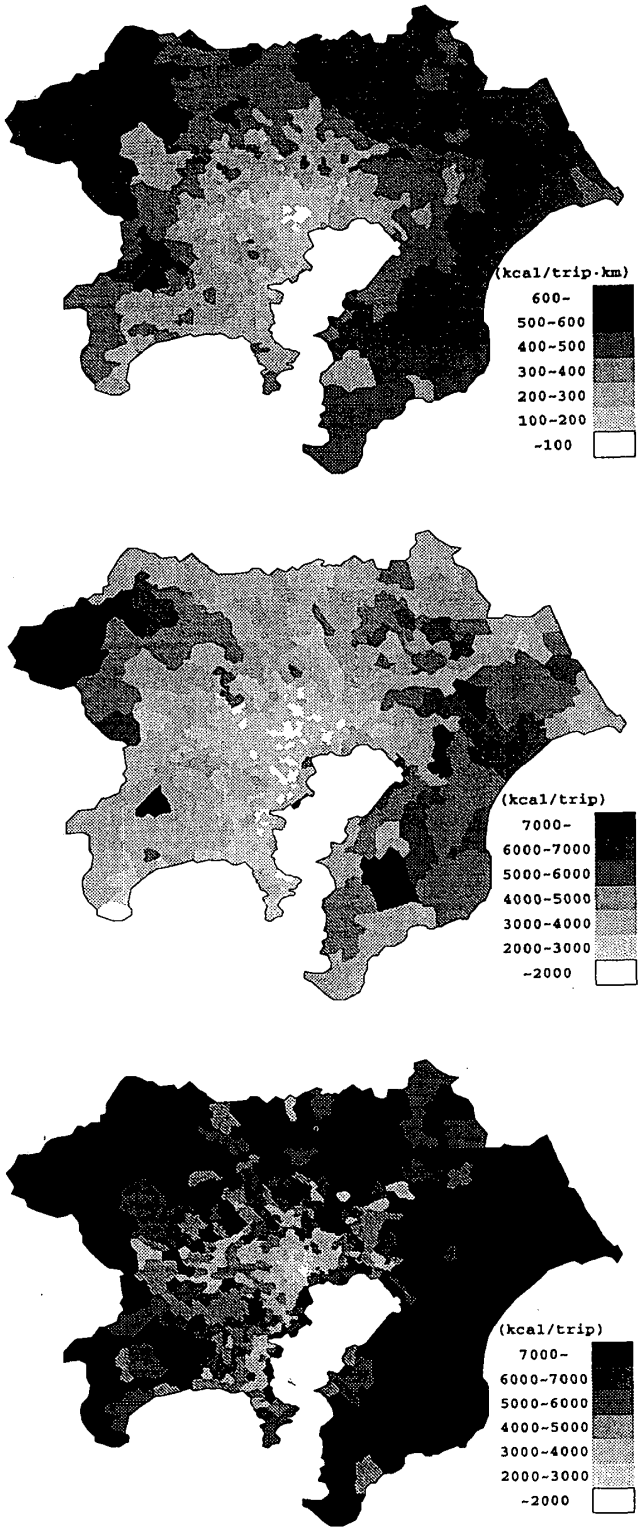

図5　首都圏の交通用エネルギー消費の地理的分布
上：通勤交通原単位（目的地ベース）
中：通勤交通トリップ当たり消費量(目的地ベース)
下：業務交通トリップ当たり消費量(発生地ベース)

は見られない．1トリップ当たりのエネルギー消費量（発生地ベース）の分布は図5下図のようになるが，これが少ない地域は都心区，新宿・豊島・渋谷・台東区等の副都心区等の比較的狭い地域に限られる．すなわち，業務目的のみで見た場合は，業務立地は都心区が望ましく，現状での周辺への立地はエネルギー消費量を増大させるであろうと考えられる．

ここで，混雑条件を考慮していないことを指摘される諸兄もおられるであろうが，我々の試算では混雑の影響は小さいことが分かっており，上記と同様の結論が得られる．

通勤・業務目的の両者を総合的に評価すると，業務目的で優位な千代田・中央区と，通勤目的で優位な新宿・豊島区等では，各々他者の方でもエネルギー消費が比較的少ない範囲にあるが，それより郊外へ向かうと，主に業務交通のエネルギー消費が全体のそれを押し上げるため，省エネルギーの観点では業務立地は現在の都心・副都心区に限定した方が望ましいといえるであろう．

5．おわりに

以上見てきたように，運輸部門に着目した省エネルギー型都市構造は，図らずも現状の一極集中を是認するものとなってしまった．業務目的の交通は自動車依存度が高く，手段転換が望めない場合は遠距離化がそのままエネルギー消費を押し上げるため，現状では省エネルギーの観点からは業務地の多極分散は好ましくないということになる．

しかし，業務立地の分散化傾向は，生産効率主義から生活の質重視へといった国民意識の移行に沿う政策方向として今後も推進されていくであろうと思われる．従って，業務分散と省エネルギーとが両立する条件整備が求められるわけであるが，そのための施策のまず第1は分散先周辺地域における大量公共交通機関の整備である．例えば首都圏の業務核都市の1つとして位置づけられている八王子市近辺では，モノレール建設による公共交通整備が進められている．これによってこの核を中心とした通勤圏の自動車分担率が大幅に抑えられるならば，エネルギー消費増を回避するケースも考えられる．施策の第2は，業務交通におけるモーダルシフトである．もし物の輸送を伴わない自動車トリップが潜在的に多いとすれば，分散後の業務交通を鉄道等に誘導する策が有効であろう．そして施策の第3は，業務交通の発生頻度の小さい企業を選択的に分散立地させるように誘導することである．これは今後の情報化社会の進展によっては，業種・職種を問わず成立することかもしれないが，当面はもともと業務交通の発生が少ないか，あるいは情報化が進んでいて業務交通の発生が少ない企業や部門の分散立地が行われ，

© 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．

金融業や営業部門等，face to face の情報交換が重要な業種・職種は都心に立地するといったマルチレイヤー構造になっていることが必要ではないかと考えられる．

都市問題にしても，エネルギー・環境問題にしても，ORができることは，まだまだ沢山ある．今後ますますこの方面の議論が発展していくことを期待したい．

なお，本稿作成にあたり，建設省総合技術開発プロジェクトに関連して設置された都市構造とエネルギー研究会の委員の方々，および本誌編集委員の諸氏から貴重なご意見をいただいた．また，昭和63年東京都市圏パーソントリップ調査に基づくデータは，東京都市圏交通計画協議会より使用許可番号第561号を得たものである．関係諸氏にはここに深く謝意を表する次第である．

参考文献

[1] (財)計量計画研究所(1996)：省資源・省エネルギー型市街地計画ガイドラインの作成報告書，平成８年３月．

[2] 栗田　治・腰塚武志(1988)：領域間平均距離の近似理論とその応用，都市計画論文集，No. 23，43-48．

[3] 栗田　治・腰塚武志(1989)：周上で一様な点に関する平均値のある導出法とその応用，日本OR学会春季研究発表会アブストラクト集，181-182．

[4] 鈴木　勉(1994)：職住割当の最適化による通勤交通エネルギーの削減効果，オペレーションズ・リサーチ，Vol. 39，No. 5，243-248．

[5] 鈴木　勉(1995)：Minisum型職住割当下での最適就業地立地，日本OR学会春季研究発表会アブストラクト集，90-91．

[6] 田頭直人(1994)：通勤と業務交通からみた最適なオフィス分布について，都市計画論文集，No. 29，511-516．

[7] 田頭直人・鈴木　勉(1994)：旅客交通におけるモーダルシフトによるエネルギー削減効果の分析，第10回エネルギーシステム・経済コンファレンス講演論文集，99-104．

[8] 鈴木　勉・田頭直人(1996)：業務立地と都市交通エネルギー消費の関係に関するモデル分析，第12回エネルギーシステム・経済コンファレンス講演論文集，177-182．

新時代のコンピュータ総合誌　隔月刊
Computer Today
偶数月18日発売／定価930円
1月号・特集
分散オブジェクトネットワーク
——Java，分散オブジェクト技術——
転機を迎えた分散オブジェクト／CORBA, Web, Java ORB／ORBの使用事例：情報技術コンソーシアムの場合／オブジェクト指向よもやま話／対談：アルゴリズムの結晶—D.E.クヌース，長尾　真
連載　新・アルゴリズムの道具箱　インターネットと法　CMC研究ノート（新連載）

月刊誌　数理科学
毎月20日発売／定価980円
2月号特集
ゲージ場理論の新展開
ゲージ場とその量子論　藤川　和男
ゲージ原理の発展　L. オラファティ
ゲージ場の一起源　吉川　圭二
物性物理におけるゲージ理論　青木　秀夫
モノポール方程式とトポロジー　深谷　賢治
電磁気に見るゲージ原理　外村　彰
宇宙物理とゲージ理論　前田　恵一

好評既刊
Mathematicaの基礎と応用
——分かりやすいプログラミング
小国　力著　カラー口絵4頁・A5・定価2266円
MATLABと利用の実際
——現代の応用数学とCG
小国　力著　カラー口絵16頁・B5・定価2884円

近刊
データモデルとデータベースⅠ・Ⅱ
三浦孝夫著　Ⅰ：A5・約200頁／Ⅱ：A5・約150頁

サイエンス社
〒151 東京都渋谷区千駄ヶ谷1-3-25　☎(03) 5474-8500
インターネットホームページ
http://www.bekkoame.or.jp/~saiensu

© 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．