

施設—交通システムの評価手法Ⅱ

—最適施設配置—

荒井良雄

目次

- I はじめに
- II 評価手法の定式化
 - 1 問題の所在
 - 2 データ形式
 - 3 評価の測度
- III 道路ネットワークの評価
 - 1 評価の前提
 - 2 データ
 - 3 アクセス条件の推定
 - 4 アクセス条件の変化
 - 5 アクセス条件の格差
 - 6 高速道路整備の効果

—・—・—・— 以上、前稿
- IV 施設の最適配置
 - 1 交通ネットワークと施設配置
 - 2 最適施設配置推定の諸問題
 - 3 施設—交通システム評価への適用
- V 最適施設配置と都市システム
 - 1 施設システムの集合としての都市システム
 - 2 道路ネットワーク整備に伴う最適配置の変化
 - 3 高速道路整備の都市システムへの影響

以上、本稿

前稿¹⁾では施設—交通システムの評価手法の研究の前半として交通ネットワークの評価手法を検討したが、本稿では後半として、施設の最適配置、およびその応用として都市システムならびに地域システムと交通ネットワークの關係に議論を進める。

IV 施設の最適配置

1 交通ネットワークと施設配置

前稿で検討した交通ネットワークの評価手法はすでに定められた配置を持つ施設のシステムを所与の条件とし、施設に対するアクセス条件を測度として交通ネットワークの有効性を評価している訳であるが、施設配置を一定に保って交通ネットワークに手を加えるのとは逆に、交通ネットワークをそのままにして施設配置を変えてもその評価結果は変化する。交通ネットワークのある状態を所与として、それに最もよく適合する施設のシステムの配置を検討する視点がここに生ずるのである。

いま、考察の対象とする施設が企業ないしは行政当局の意志決定によってその配置を計画しうるようなものであるならば、その施設のサービス水準をもっとも向上させようような配置を決める方法が計画策定の手法として求められるのは当然であろう。また、商業施設のように単一の意志決定主体を持たない場合でも、長期的な均衡に向う動きの中で試行錯誤による合理性の追及が行われるならば、結果として生ずる施設システムの配置は所与の交通ネットワークに最もよく適合した形態に近づいていくであろうと考えられる。

空間的な観点から施設のサービス水準の向上を考えれば、できるだけ多数の施設を施設利用者（サービス対象）に接近させて配置することが望ましいことはいうまでもない。しかし一方、

1) 荒井良雄(1985)：施設—交通システムの評価手法Ⅰ—交通ネットワークの評価—，信州大学経済学論集，33，

施設を設置・維持するには多大な費用が必要であり、経済的な効率性からみれば施設は少数であることが望ましい。こうした相反する要請を、施設を交通ネットワークの条件に合わせてうまく配置することによって、できるだけ満足させようとするのが、施設の最適配置である。

もとより、こうした施設の最適配置は、現実には施設が設置されていく経緯をまったく無視している。企業や行政当局等の意志決定プロセスは最適配置の理論的前提よりはるかに複雑であるから、理論上求められた最適配置がそのまま現実の配置として実現されるという場合はむしろ少ないであろう。しかし、現状の施設システムが理論上の最適性からのどのよう乖離しているかが明確に確認されれば、次の段階の意志決定プロセスに大きな影響を与えることができる。特に、交通ネットワークの整備が計画されており、整備後の段階で施設システムをどう対応させていくべきか、といった議論を展開するには、当該段階の交通ネットワークを前提とした最適配置を求めることは施設システムの計画策定上で有力なツールとなろう。

2 最適施設配置推定の諸問題

最適施設配置の問題は地域科学・計量地理学・OR等の分野で扱われており、文献も多数にのぼる²⁾。ここではこれらの研究史をレビューする余裕はないが、若干の研究事例をもとに最適施設配置の推定に伴う技術的問題点を整理しておきたい。

(1) 問題の形態

Hodgart (1978) の整理よれば、最適施設配置問題の形態は次の3つに分類される³⁾。

- ① 当該地域にはもともと施設がないものとして新しく m 個の施設を配置する問題（「一般問題」）
- ② 既にある施設の配置をそのままにして新た

に k 個の施設を追加する問題（施設追加問題）

- ③ 既に m 個の施設があるときに、立地条件の悪い施設を廃止し、代わりに一定数の施設を新設することによって施設システムを再編成する問題（「再編成問題」）

従来の多くの研究ではこの3つのうち最初の「一般問題」が取り扱われているが、一般には②の「施設追加問題」の方が解がより簡単に求まる。特に、後述する Heuristic な解法をとる場合には反覆による収束計算が省略できることが多いため、同一の手法を用いても「一般問題」に比べて著しく容易に解くことができる。逆に言えば、「一般問題」が解けるならば「施設追加問題」もその応用として解くことができることになる。また、③の「再編成問題」は「一般問題」の部分問題（一部の施設の配置を固定したままで残りの施設の最適配置を求める問題）であるので「一般問題」の応用として解くことができる。結局、通常は「一般問題」の解法を確立できればほとんどの問題をその応用として解くことができることになる。したがって、本研究でもこの「一般問題」を中心に扱っている。

(2) 目的関数

最適施設配置を推定するには、まずある配置がどの程度「望ましい」ものであるか、という「望ましさ」の測度を定義しなければならない。配置の「望ましさ」の測度が定義されれば考えるさまざまな配置を比較して「望ましさ」が最大になるものを選択すればよいことになる。この「望ましさ」(もしくは「望ましくなさ」)の測度が目的関数である。したがって、最適配置の推定は具体的には目的関数が最大（もしくは最小）の配置を求める手順として定式化される⁴⁾。

目的関数のタイプを Hodgart (1978) は大きく3つに分けて整理している。第1のタイプは

2) Hodgart (1978) は70年代後半までの最適施設配置問題に関する幅広い研究史のレビューを行っている。

Hodgart, R. L. (1978): Optimizing Access to Public Services: A Review of Problems, Models and Methods of Locating Central Facilities, *Progress in Geography*, 2, 17-48

3) Hodgart, R. L. (1978) *op. cit.*

4) もちろん、ここでいう「最適性」はあくまで定義された目的関数を持つ意味の範囲内のことでしかない。何ををもって「望ましい」とすべきかは当該施設の持つ社会的意味によって左右されるから、目的関数の定義は施設システムの社会的目的に即して吟味されなければならない。

総移動量（費用）最小を考えるもので、ある施設システムについて想定されるすべてのサービス対象（たとえばすべての人口）が当該施設を利用するための必要な移動の総量（総費用）を最小化する配置を求めることになる。これは当該施設利用のための平均アクセス時間を最小にすることに等しいから、そのような配置は平均的な意味でのアクセス条件を最もよくするものであることになる。

このタイプの目的関数は最適施設配置問題として最も早くから研究されており、Cooper (1963), Maranzana (1964), Yeats (1968), ReVelle and Swain (1970), Törnqvist (1971) など早い時期の研究の多くはこうしたタイプの目的関数を用いている⁵⁾。このタイプの拡張として倉庫の配置問題で、総移動費用と倉庫の操業費用の総計を最小にする目的関数が検討された例もある⁶⁾。

目的関数の第2のタイプは総需要量最大を考えるものである。施設システムが供給するサービスに対する需要が弾力的である場合、サービス対象と施設とのアクセス距離は需要量を逓減させる効果を持つため、アクセス距離に対する需要曲線は減少曲線を描く。この現象を仮定すればサービスに対する需要の総量は施設システムの配置に依存することになるので、この総需要量を最大にするように配置を決めようとするのが、総需要量最大の目的関数である。この

タイプの目的関数を用いる場合にはアクセス距離に対する需要の逓減曲線がどのような形状をとるかが問題となる。Hodgart (1978)⁷⁾はこの需要曲線として、負の exponential 曲線を用いる方法を紹介しているが⁸⁾、需要曲線の推定については問題も多く、総需要量最大の目的関数を用いた最適配置問題が実際に解かれた事例はあまりない⁹⁾。

目的関数の第3のタイプは公平さを最大にしようとするものである。ある施設が供給するサービスが必要不可欠なものである場合、そのサービスの供給水準が当該地域内のいずれの地点でもできるだけ同じくなるように配置されることが望ましい。これを空間的にみれば、サービス対象ごとのアクセス距離の最大値を最小にすることになる。すなわち、アクセス距離を目的関数としてその minimax 解を求めればよい。

こうした公平さを最大にするという考え方の延長上にあるのが Church, ReVelle らによる一連の研究である。彼らは最適施設配置問題を集合被覆問題 set-covering problem の応用として解いている。集合被覆問題は整数計画法の分野で一般化され種々の応用が考えられている問題であるが¹⁰⁾、これを最適施設配置問題に應用すれば、すべてのサービス対象が一定のアクセス距離（時間）内でいずれかの施設を利用できるようにした上で最も少ない数の施設ですむ配置を求める問題とすることができる。To-

5) Cooper, L. (1963): Location-allocation Problems, *Operations Research*, 11, 331-343
 Maranzana, F. E. (1964): On the Location of Supply Points to Minimize Transport Costs, *Operations Research Quarterly*, 15, 261-270
 Yeats, M. H. (1968): *An Introduction to Quantitative Analysis in Economic Geography*, 高橋潤二郎(訳) (1970) 『計量地理学序説』, 好学社
 ReVelle, C. S. and R. W. Swain (1970): Central Facilities Location, *Geographical Analysis*, 2, 30-42
 Törnqvist, G. (1971): Manufacturing Goods, Servicing People and Processing Information at Multiple Locations, in *Törnqvist, G., S. Nordbeck, B. Rystedt and P. Gould (1971): Multiple Location Analysis, Lund Studies in Geography, C, 12, 13-33*
 6) Kuehn, A. and N. Hamburger (1963): A Heuristic Program for Locating Warehouse, *Management Science*, 9, 643-66

7) Hodgart R. L. (1978) *op. cit.*

8) 地区 i から地点 j にある施設までの移動量（需要量）を T_{ij} とすると

$$T_{ij} = a_i e^{-bd_{ij}}$$

a_i : 地区 i のサービス対象数

d_{ij} : 地区 i から施設のある地点 j までの距離

b : 定数

9) 施設配置問題についての初期の代表的文献である Teitz (1968) など公共施設のサービス供給量を最大化する配置を検討しているが実際の配置問題としての解は求められていない。

Teitz, M. B. (1968): Toward a Theory of Urban Public Facility Location, *Papers of the Regional Science Association*, 21, 35-51

10) たとえば、

前田英次郎, 岩村寛三 (1982): 集合被覆問題と集合分割問題, 今野浩, 鈴木久敏(編) 『整数計画法と組み合わせ最適化』, 日科技連, 185-209

regas, Swain, ReVelle and Bergman (1971), Toregas and ReVelle (1972), ReVelle, Toregas and Folkson (1976)¹¹⁾ はこれを location set-covering 問題と呼び、消防署などの緊急サービス施設の最適配置に適用している。

Church and ReVelle (1974) は location set-covering 問題を拡張した maximal covering location 問題を解いている。location set-covering 問題が一定のアクセス距離の中ですべてのサービス対象に対するサービス供給が可能となるように施設配置を決めているのに対して、maximal covering location 問題は条件を緩和し一定のアクセス距離内にあるサービス対象の数が最大となるように施設配置を決めるものである¹²⁾。

配置の「望ましさ」の議論をさらに進めて、より複雑な条件を含んだ目的関数を考えることもできる。Austin (1974)¹³⁾ は施設がその立地点の周辺に与える影響には必ずしもプラスの便益のみではなくマイナスの効果を与える場合もあることを指摘した上で、施設からのアクセス距離に応じて変化する place utility の概念を用いて、施設の性質に応じた place utility を最大化する配置を求めることを提案している¹⁴⁾。Church and Roberts (1983) はこれを受けて maximal covering location 問題を応用して

様々な形状の place utility 曲線を用いた場合の最適施設配置問題を実際に解いている¹⁵⁾。

以上のように最適施設配置の推定にあたっては、需要の弾力性や距離による逓減といった提供するサービスの性質によっても、あるいは施設システムの効率性を求めるのかサービスの公平さを求めるのか、といった選択によっても必要な目的関数の定義が異ってくる。この問題については、議論の対象とする施設の持つ性質に応じて個別に判断していく他はないが、あまりに複雑な目的関数を用いると配置問題の解法が難しくなり、理論的には優れた関数であっても現実の条件の中では解けない問題になってしまう危険性もある。最適施設配地問題を現実の問題解決に適用する場合の状況を考えてみれば、必要以上に精密な解を求めてもあまり役に立たないことが多いと思われ、その意味では、単純でも容易に解の求まる方法が望ましいといえよう。

(3) 解法

問題の性質に応じて目的関数を定義できれば、それを必要な制約条件のもとで解く解法を考えればよいことになる。しかし、最適施設配地問題は解くべき条件によって採りうる解法が異なり、また実務上の問題として問題の大きさ（特に施設の数）が大きくなると理論上は可能でも

11) Toregas, C., R. Swain, C. ReVelle and L. Bergman (1971): The Location of Emergency Service Facilities, *Journal of the Operations Research Society of America*, 19, 1363-1373

Toregas, C. and C. ReVelle (1972): Optimal Location under Time or Distance Constraints, *Papers of the Regional Science Association*, 28, 133-143

ReVelle, C., C. Toregas and Falkson (1976): Application of the Location Set-Covering Problem. *Geographical Analysis*, 8, 65-76

12) Church, R. and C. ReVelle (1974): The Maximal Covering Location Problem, *Papers of the Regional Science Association*, 32, 101-118

最近では Kubo (1984) が maximal covering location 問題に施設容量の制限を組み込んだ方法で保育園の最適配置問題を解いている。

Kubo, S. (1984): Population Distribution and Location of Public Service Facilities, *Bulletin of the Department of Geography Univ. of Tokyo*, 16, 23-47

13) Austin, C. M. (1974): The Evaluation of Urban

Public Facility Location: An Alternative to Benefit-Cost Analysis, *Geographical Analysis*, 6, 135-145

14) たとえば消防署のような施設の場合、防災上は施設までの距離が近い方が有利であり、一定以上の距離になると施設から受ける便益はなくなる。一方、あまり施設に近づきすぎると、施設から発生する騒音や交通の混乱等でマイナスの影響を受ける。こうしたことを総合すると、この場合の place utility は施設の直近でマイナスであり、遠ざかるにつれてプラスに転じ、さらに遠くなるとゼロに近づくという曲線を描くことになる。もちろん place utility の曲線の形状は施設の性質によって異なるが、Austin はこれを次の種類に分類している。

① 近隣に迷惑な施設 site-noxious facility

② 近隣に対して中立な施設 site-neutral facility

③ 近隣に好まれる施設 site-preferred facility

15) Church, R. L. and K. L. Roberts (1983): Generalized Coverage Models and Public Facility Location, *Papers of the Regional Science Association*, 53, 117-135

実際には解けなくなる場合が多い、などという事情がある。そのため、数多くの解法が提案されていながら、これといった決め手がない状況にある。ここでは解法についての立入った議論をする余裕はないので、これまでに試みられた解法の基本的な考え方について簡単に紹介するのに止める。

最適施設配置問題の解法を大別すると、対象地域を連続なユークリッド平面と考えると施設配置を連続な実数値の座標の組で表現される点として求めようとする立場と、対象地域を有限個の不連続なノード node の集合と考えるとこの集合から適当な個数のノードを選ぶことによって施設配置としようとする立場に分けられる。数学的な意味からいえば、前者はユークリッド平面上に定義された連続な目的関数の最大・最小を求める問題¹⁶⁾に帰着されるし、後者は有限個の解の組み合わせの中から目的関数を最大または最小にするものを求める整数計画問題に帰着される。

別の分類をすれば、解法は厳密解を求めようとする立場と、とりあえず近似的な解でもよいとする立場に分けられる。後者では特に、探索的 heuristic 方法と呼ばれる様々な解法が提案され、大規模な問題を解くのに広く用いられている。

配置を連続な座標位置で求めようとする例としては Cooper (1963), Törnqvist (1971) などがある。Cooper (1963)¹⁷⁾は目的関数を施設座標で偏微分した連立方程式を解くことによって最適配置の厳密解を求めている。もちろん複数の施設の場合こうした連立方程式は非常に複雑になり解析的には解けないので、逐次計算により解を求めることになる。しかし、この方法

では問題の規模が大きくなると解くことが急激に難しくなり、実際 Cooper も 2 施設 7 需要ノードの場合しか解いていない。彼はより容易な解法としてグリッドを用いた不連続な座標点の組み合わせ問題に帰着させる近似解法を提案しているが、これはもはや整数計画法の範疇に入る。

これに対して、Törnqvist (1971)¹⁸⁾はユークリッド的な需要平面上で施設を順次移動させて最適解を探索していく heuristic approach によって最適配置を求める方法を提案している。その後 Törnqvist アルゴリズムと呼ばれるようになったこの方法ではユークリッド平面上の格子点を、次々に格子を分割しながら解を探索していくため、分割の回数を適当に定めれば必要な精度で最適配置の座標を求めることができる。この方法では Cooper の方法などに比べて非常に大規模な問題を解くことが可能で Törnqvist 自身 182 個のメッシュに分割された地域に 8 施設を配置する問題を解いているし、Gould, Nordbeck and Rystedt (1971)¹⁹⁾では Törnqvist アルゴリズムを用いて 16,000 メッシュ、4 施設という大規模な問題まで解かれている。

このように heuristic な解法では大規模問題を実用的な早さで解くことができる反面、解が局所的な最適値に陥る場合があり、グローバルな最適性が必ずしも保証されないという欠点がある。特に Törnqvist アルゴリズムのようにユークリッド的な需要平面上を順次探索する形の方法では Hodgart (1978)²⁰⁾が指摘するように、既に配置された施設の連なりが探索の行先を遮りグローバルな最適解に到達できない場合が起りやすいと思われる²¹⁾。

施設配置を有限個のノードの集合の中から選

16) 対象地域に唯一の施設を配置する問題の場合は単純な線形計画問題として解けるが、複数施設の配置の場合にははるかに複雑な問題となる。

17) Cooper, L. (1963) *op. cit.*

18) Törnqvist, G. (1971) *op. cit.*

19) Gould, P., S. Nordbeck and B. Rystedt (1971): Data Sensitivity and Scale Experiments in Locating Multiple Facilities, in Törnqvist, G., S. Nordbeck, B. Rystedt and P. Gould (1971) *op. cit.*, 67-84

20) Hodgart R. L. (1978) *op. cit.*

21) Törnqvist アルゴリズムによる最適配置推定プログラムは NORLOC と呼ばれ Nordbeck and Rystedt (1971) に発表されている。

Nordbeck, S. and B. Rystedt (1971): Computer Cartography: A Multiple Location Program, in Törnqvist, G., S. Nordbeck, B. Rystedt and P. Gould (1971) *op. cit.*, 39-66

なお、同アルゴリズムを用いて日本での研究事例として

び出したノードの組み合わせと考える立場では、最適配置問題は整数計画問題として定式化される。たとえば、目的関数を総移動量（費用）としてこれを最小化するような p 個の施設の配置を求める問題は p -median 問題と呼ばれる。これに類似した問題に、製造費用と配送費用の合計を最小化するように未定個の工場を配置する問題があり、これは plant location 問題と呼ばれ、解法上 p -median 問題と共通性があるとされる²²⁾。

こうした整数計画問題を解く最も簡単な方法は、すべての可能な解の組み合わせについて目的関数を求めてそれが最小または最大になるものを見つけ出すことであるが、 n 個のノードに対して m 個の施設を配置する場合は $\binom{n}{m} = n! / (n-m)! \cdot m!$ 通りあり、問題の規模が大きくなると必要な目的関数の計算回数が急激に大きくなり、実用的には解けなくなる。そのため heuristic な方法によって効率よく解を探索する解法が提案されている。

Kuehn and Hamburger (1963)²³⁾は配送費用を最小にする倉庫の配置問題を heuristic な方法で解いている。彼らのアルゴリズムは配送費用が最も節約できる位置に新しく倉庫をつけ加え、さらに既に置かれている倉庫の配置を動かして費用最小化をはかる、という手順を繰り返すものである。

Maranzana (1964) も heuristic な解法によって最適施設問題を解いているが、彼の解法は交通ネットワーク上のトポロジカルな重心を求めるアルゴリズムを応用して、初期配置から個々の施設に対応するサービス圏を画定した上で

その重心にあたるノードに施設を配置しなおし再びそれに対応するサービス圏を画定する、という手順を繰り返すことですべての施設をサービス圏の重心のノードに一致させて配置させるようにするものである。heuristic な解法としてはこの他に、Törnqvist アルゴリズムを変形して交通ネットワークのノード上に施設を配置する問題に適用する方法も報告されている²⁴⁾。

こうした heuristic な解法では効率よく大規模問題が解ける反面、グローバルな最適性が必ずしも保証されないということは前述のとおりである。そのため大規模な最適施設配置問題の厳密解を求める解法を組み立てる努力がなされている。

こうした解法の中心となるのは線形計画法を応用して整数計画問題としての最適配置問題を解く方法である。たとえば、総移動量最小化の最適配置問題は

$$\text{最小化： } Z = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n a_i d_{ij} X_{ij} \quad (1)$$

$$\text{制 約： } \sum_{j=1}^n X_{ij} = 1 \quad i=1, \dots, n \quad (2)$$

$$X_{jj} - X_{ij} \geq 0 \quad i=1, \dots, n \quad (3)$$

$$j=1, \dots, n$$

$$i \neq j$$

$$\sum_{j=1}^n X_{jj} = p \quad (4)$$

$$X_{ij} = (0, 1) \quad i=1, \dots, n \quad (5)$$

$$j=1, \dots, n$$

a_i : ノード i のサービス対象の数

d_{ij} : サービス対象のノード i から施設のノード j

は、

杉浦芳夫 (1983) : 施設配置問題としてみた非利潤指向的な単一組織意志決定イノベーションの空間的拡散——戦前のわが国におけるラジオ放送局の普及過程を事例として——, 人文地理, 35, 22-44

22) Rosing, K. E., C. S. ReVelle and H. Rosing-Vogelaar (1979) : The p -median and its Linear Programming Relaxation; An Approach to Large Problems, *Journal of the Operational Research Society*, 30, 815-823

23) Kuehn, A. and M. J. Hamburger (1963) : *op. cit.*

24) Robertson (1974), Robertson (1976) は Törnqvist アルゴリズムを変形し、格子点の格子を分割しながら細かな位置を探究するのではなく、直近のノードを順次調べていく単純化された探索法としたものを用いて、交通ネットワーク上の最適施設配置問題を解いている。

Robertson, I. M. L. (1974) : Road Network and the Location of Facilities, *Environment and Planning A*, 6, 199-206

Robertson, I. M. L. (1976) : Accessibility to Services in the Argyll District of Strathclyde : a Location Model, *Regional Studies*, 10., 89-95

までの距離

p : 施設数

n : ノード数

$$X_{jj} : \begin{cases} \text{ノード } j \text{ に施設を設置するとき} & 1 \\ \text{ノード } j \text{ に施設を設置しないとき} & 0 \end{cases}$$

という形に定式化できるが (p -median 問題), 制約式(5)を緩和してを X_{ij} を (0, 1) ではなく非負の実数でもよい, すなわち

$$X_{ij} \geq 0 \quad i=1, \dots, n \quad j=1, \dots, n \quad \text{---(5)'}$$

とすれば, これを線形計画法で解くことができる²⁵⁾。この場合 X_{ij} の (0, 1) 以外の解が求まったならその解は不適當であるが, かなりの割合で X_{ij} の (0, 1) 解が求まり最適解とすることができる²⁶⁾。

線形計画法を用いた解法で整数解が求まらないときは, さらに探索を行って最適解を見つけ出さなければならない。このためには branch and bound 法がよく用いられる。branch and bound 法は整数計画問題の解を列挙木に沿って探索していくのにあたって, 適当な暫定値 bound を用いることによって列挙木の分枝 branch の数を減して効率よく最適解に到達しようとするもので, 上の問題の場合は線形計画法による連続緩和解を暫定値として branch and bound 法を適用することによって最適配置を効率よく求めることができる²⁷⁾。

線形計画法および branch and bound 法による解法は他の形式の最適配置問題にも適用することができ, たとえば Toregas and ReVelle (1972) では location set-covering 問題が, Church and ReVelle (1974) では maximal covering location 問題がこの方法で解かれている²⁸⁾。

線形計画による緩和を考える場合でも問題の規模が大きくなると線形計画法の解法そのもの

が難しくなる。前述の定式化中の制約式のうち(3)の数が n^2 のオーダーで大きくなるため, n が 100 程度でも制約式が 1 万本を越え実用的ではなくなる。ReVelle and Swain (1970)²⁹⁾ はこれに対して制約式(3)をすべて用いるのではなく, 必要に応じて(3)の一部をつけ加えながら線形計画問題を繰り返し解く方法で対処している。また Efromysson and Ray (1966)³⁰⁾ は制約式(3)の代りに,

$$\sum_{i=1}^n X_{ij} \leq n_j X_{jj} \quad j=1, \dots, n \quad \text{---(3)'}$$

n_j : ノード j の施設に割りあてることができる需要ノードの最大数

を用いて制約式の数を n のオーダーに減らす方法により plant location 問題を解いている。ただし, Rosing, ReVelle and Rosing-Vogelaar (1979)³¹⁾によれば Efromysson and Ray の方法は p -median 問題ではうまく行かないようであり, 彼らは ReVelle and Swain (1970) の方法を改良して施設ノードから近い順に一定数の需要ノードについてのみ制約を置くことで問題規模の縮小を行う方法を提案している。

以上のように最適施設配置問題の解法には様々なものが提案されているが, 目的関数の形式, 連続的な配置か離散的な配置か, 近似解でよいのか厳密解が必要なのか, さらに問題の規模によってそれぞれ長短があり, 絶対的な解法は見つかっていないと考えてよいであろう。それ故, 実際の施設—交通システムの中で最適配置問題を解くには問題の目的と条件に応じて適当な解法を選択しなければならないことになる。

3 施設—交通システム評価への適用

本章の最後に最適施設配置問題を施設—交通システムの評価に適用する実例として, 長野県の交通ネットワークの条件に適合する総合病院

25) これを連続緩和問題という。

26) ReVelle, C. S. and R. W. Swain (1970) *op. cit.*

27) Efromysson, M. A. and T. L. Ray (1966): A Branch-bound Algorithm for Plant Location, *Operations Research*, 14, 361-368

28) ReVelle, C. S. and R. W. Swain (1970) *op. cit.*
Toregas, C. and C. ReVelle (1972) *op. cit.*

Church, R. and C. ReVelle (1974) *op. cit.*

29) ReVelle, C. S. and R. W. Swain (1970) *op. cit.*

30) Efromysson, M. A. and T. L. Ray (1966) *op. cit.*

31) Rosing, K. E., C. S. ReVelle and H. Rosing-Vogelaar (1979) *op. cit.*

の最適配置を推定した事例を報告しておく。

(1) 推定方式

第II章で述べたように施設—交通システムの評価のためにはそれぞれに空間的性質の異なる施設・交通手段・サービス対象の3者を整合的に数値データ化する方式が必要であるが、本研究では既述のようにメッシュ・パターンを基本としたデータ形式を用いてシステムを記述している。ここで行う最適施設配置の推定にあっても同様の方法を適用している。

施設—交通システムの評価手法の開発を目的とする本研究のような場合には、交通ネットワークの条件そのものがひとつの評価対象であるから、その一環として最適施設問題を扱う際にも施設へのアクセス条件を単純な直線距離で考えることは適当でない。したがって、Törnqvist アルゴリズムのように連続なユークリッド平面を仮定して最適配置を求める方法は適さず、有限個のノードの集合の中から最適な配置の組み合わせを選ぶ離散的な最適化の方法をとらなければならない。この場合、当該の交通ネットワークに対応するアクセス条件をアルゴリズムに組み込む必要があるが、これは前述の交通ネットワークの最短時間距離行列を用いればよい。第三章ではアクセス条件の推定のために道路ネットワーク上の各ノード間の最短時間距離を Dijkstra 法によって求めて最短時間距離行列を作成しているため、この行列を用いて施設利用のための移動量の計算を行えば当該の道路ネットワークの条件に対応した最適配置の推定が可能になる。

目的関数は前述のように種々のものが考えられるが、ここでは最も一般的な総移動量最小化のタイプを用いている。すなわち、すべてのサービス対象が施設を利用するのに必要な総移動量を目的関数とし、これを最小化する配置を求めることになる。前述のようにこれは平均アク

セス時間(距離)を最小化することと等しい。したがって、目的関数 F は第三章3の総移動量と等しく

$$F = \sum_{i=1}^m p_i l_{ij}$$

- p_i : メッシュ区画 i のサービス対象の数
- l_{ij} : メッシュ区画 i, j 間の最短時間距離
- j : i から最も近い施設があるメッシュ区画の番号
- m : メッシュ区画の数

となる。もちろん l_{ij} は上述のように直線距離でなくネットワーク計算から求めた最短時間距離である³²⁾。

以上のように最適施設配置問題を定式化すると、これは ReVelle and Swain (1970)³³⁾ らが定式化した p -median 問題に相当することになるが、本研究の場合はノード(メッシュ区画)数が 160 とかなり多いため、彼らのように線形計画法を用いた連続緩和問題として解くことは制約式の数が非常に大きくなって困難である。前述のように制約式を変形することによって規模を縮小する方式も試みられてはいるが、ここではあえて厳密解には拘泥せず、heuristic な解法によって解を求めている。用いられたアルゴリズム³⁴⁾は以下のとうりである。

- ① 初期配置を決める。(初期配置は現状の配置を用いる方法や乱数を用いて決める方法が考えられる。)
- ② 1番目の施設の位置を順次動かしながら目的関数を求め、それが最小値 $F_{\min 1,1}$ となる位置に施設を置く。
- ②' 2番目の施設の位置を順次動かし、目的関数の最小値 $F_{\min 2,1}$ の位置にこれを置く。
- ③ 以下、同様に②をくり返し n 個の施設を配置する。
- ④ ②に戻り、1番目の施設を目的関数の最小値 $F_{\min 1,2}$ の位置に置く。

32) その意味では前述の Robertson (1974), (1976) らのアプローチと同様である。ただし最適配置の解法は異なっている。

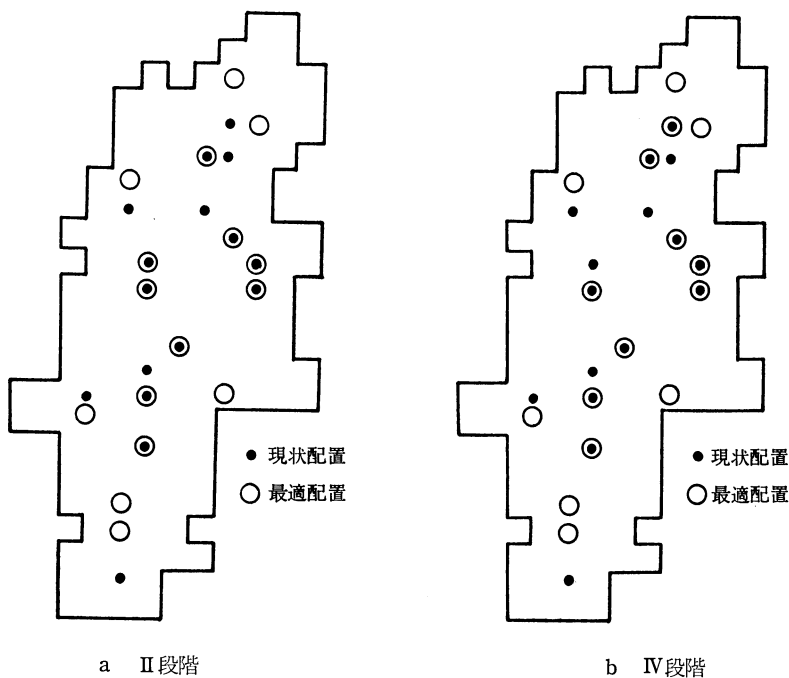
33) ReVelle, C. S. and R. W. Swain (1970) *op. cit.*

34) このアルゴリズムおよびプログラムは(株)日本科学技術研修所によって開発されたものである。

(株)日本科学技術研修所(1982): 公共施設配置の適性度評価手法調査報告書。

- ⑤ ②～③を同様にくり返す。
 - ⑥ $|F_{\min i,j} - F_{\min i,j(i-1)}| \leq \epsilon$ ($\epsilon \approx 0$ の定数) となったとき収束とみなし計算を打ち切る。
 なお、このアルゴリズムでは収束性は保証されており必ず解が求まるが、本研究の例でも②～③を数10～100回程度くり返すことで収束値に到達している³⁵⁾。
- (2) 総合病院の最適配置
 以上の手法を用いて最適配置問題を実際に解

いてみる。対象とする施設には総合病院をとりあげる。サービス対象は人口とし、交通ネットワークとしては第三章でとりあげた長野県の道路ネットワーク・データを用いる。国土地理院の調査³⁶⁾によれば長野県内には18の総合病院があるが、このうち非常に接近して立地している重複分を除いた16カ所の施設からなる施設配置を現状として、これに対する最適配置を推定する。



第13図 総合病院の最適配置

第13図 a は現段階 (Ⅱ段階) の道路ネットワークを仮定した場合の最適配置を現状と比較している。これでは16施設のうち7施設の配置が変更されている。配置の変更を全体的にみれば、現状の配置では相対的に長野市周辺の北信地域に集中しているものが、最適配置ではこれを減らし、伊那市から飯田市へかけての南信地域に施設をつけ加えた形の配置となっている。南信

第5表 総合病院への平均アクセス時間

段階	配置	総移動量 (百万分・人)	平均アクセス 時間 (分)	指数
Ⅱ	現状	51.0	25.4	100.0
	最適	45.6	22.7	89.4
Ⅳ	現状	50.3	25.1	98.8
	最適	44.7	22.3	87.8

35) このアルゴリズムは前述 Kuehn and Hamburger (1963), Maranzana (1964), Robertson (1974) などに比べて単純であるが、相当の規模の問題を実用的な速さで解くことができる。非常に大規模な場合の収束性や局所解

の危険性などの比較検討はまだ行われていない。
 36) 建設省国土地理院 (1981): 『国土数値情報整備調査公共施設一覧 (長野県)』

地域では現状で人口に比べて総合病院が少なく、相対的な病院不足をきたしていることを示すものと思われる。

配置の変更による平均アクセス時間の短縮を第5表に示す。現状の配置では平均25.4分であるのに対し、最適配置では22.7分と11%の短縮となる。

同様の計算を中央道長野線および関越道上越線が開通した後の段階（第Ⅳ段階）での道路ネットワークを仮定して行った結果を第13図bに示す。現段階での最適配置に対して2施設のみが異なる配置となっており、大きな相異はない。平均アクセス時間をみても22.3分と現段階の最適配置に対して1.6%しか差がなく、高速道路網の整備は総合病院の最適配置に大きな影響を及ぼさないことがわかる。

V 最適施設配置と都市システム

1 施設システムの集合としての都市システム

前章で述べた最適施設配置推定の手法は元来、個々特定の施設システムの空間配置の検討に用いることを目指したものである。しかし、交通ネットワークの整備を含めて地域の施設—交通システムの改変を考えると、個々の施設システムの配置と交通ネットワークの整合性の問題は施設立地の集積点としての都市システムと交通ネットワークとの関係に拡張される。

都市に対してシステム・アプローチを試みる都市システムの概念に基づいた都市研究は近年急速に増加しているが、その基礎となる都市システム概念については研究者の間で必ずしも明確な合意が得られている訳ではない。しかし、一定の地域内にある個々の都市を構成要素としてそれらの都市群が構成するシステムの態様を分析しようとする観点は都市システム研究の中で大きな位置を占める流れであることは間違いなく、実際、従来から数多くの研究がなされて

いる³⁷⁾。

その中で、大企業の事業所の集積が都市の成長に重要な役割を果していることを指摘し、都市システムの構造および変動を大企業の事業所配置との関係で把握しようとする立場がある³⁸⁾。こうした立場にならって、企業の事業所を中心とした様々な施設の集積点として都市を考えれば、施設と交通手段の双方を含む概念として施設—交通システムを定義したように、都市と交通手段の双方を含んだシステムとして都市—交通システムを構想することができる。

都市への事業所の設置は、もとよりその周辺の地域に対する事業活動の拠点として意図されているものであり、空間的には点的な要素である事業所の配置と面点な要素である顧客の分布とを結ぶ線的な要素である交通ネットワークの3者の関連の上で事業活動が成立している。その意味で事業所の配置は交通ネットワークと密接に結びついているが、こうした事業所の配置が集積されて都市システムが形成されるとする前述の立場に立てば、都市システムは施設—交通システムの間を媒介として交通システムと不可分に結びついていると考えることができる。そうであれば、都市システムの構造と変動の分析にあたっては都市システムと交通ネットワークとの関係の把握が不可欠であることになる。

前章で扱った最適施設配置の議論は直接には個々の施設システムの配置を対象にしているが、こうした議論の前提は企業の事業所を含めた各種の施設についてある程度共通したものであり、求められる最適配置も同じようなものになることが多い。そこで、こうした各種の施設の集合として都市を考えれば、都市システムを施設配置問題の応用として扱うことが可能になる。特に、都市システムと交通ネットワークとの関係を分析するにあたって、交通ネットワークの変化が施設の配置を変化させ、それが都市システムの変動を引き起す、といった図式を仮定すれ

37) 森川洋 (1982): 都市システム概念の発展と研究動向, 田辺健一 (編), 『日本の都市システム』, 古今書院, 1-26

38) 日野正輝 (1981): 都市群システム研究の動向と課題—

—特に大企業の空間構造および行動との関連において—, 人文地理, 33, 134-153

ば、最適施設配置の検討をもとにして都市システムの変動を予測というアプローチは有効なものであると考えられる。

以上のような視点に基づいた研究事例としては、「地区販売会社」の事業所配置を需要ポテンシャルおよび総移動量を目的関数とする最適配置から説明しようとした日野（1983）^{39）}などの例があるが、ここでは、特に交通ネットワークの変化と都市システムの変動との関係を中心に考え、長野県を例として高速道路網を軸とした道路ネットワーク整備に対応した最適施設配置の変化のシミュレーションを行い、道路ネットワーク整備が当地域の都市システムに及ぼす影響を検討してみたい。

2 道路ネットワーク整備に伴う最適配置の変化

(1) 最適配置推定の前提

道路ネットワーク整備が都市システムに及ぼす影響を検討するために、道路ネットワーク整備のシナリオに対応した最適施設配置の推定を

行う。

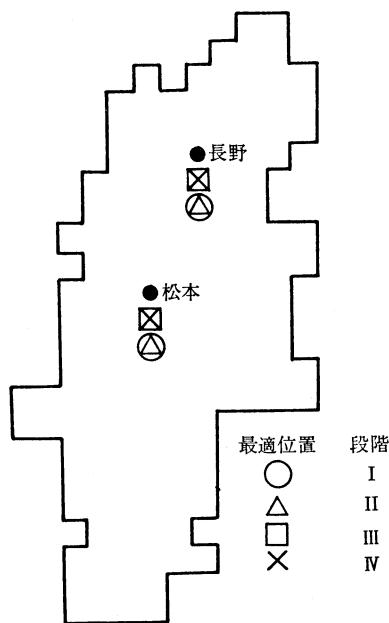
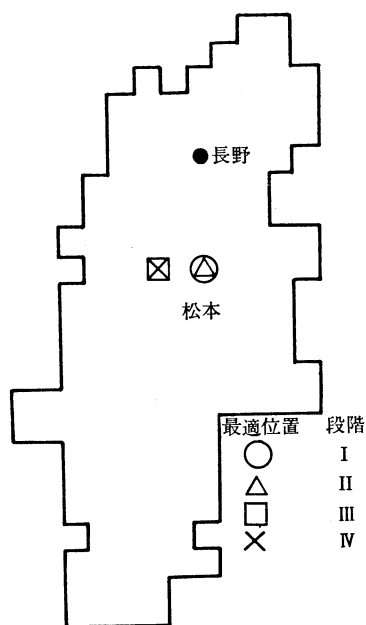
推定の前提となる道路ネットワーク整備のシナリオは第Ⅲ章に示したⅠ～Ⅳの4段階とし、それぞれの段階ごとに最適施設配置を求め比較する。

施設としては数カ所の拠点（センター）によって長野県内一円をサービスするものを想定する。官庁の出先事務所や企業の支店・営業所網が具体的な例である。サービス対象としては種々考えられるが、とりあえずここでは人口を指標として代替する。

目的関数も様々なものが考えられるが、一応最も一般的な総移動量最小型とする。したがって、前章第3節の事例と同様のアルゴリズムを用いることによって最適配置の推定を行うことができる。

(2) 1センターの場合

第14図は県内に1センターを置いた場合の最適配置を求めたものである。現状の施設配置を考えた場合、1センターならば県庁所在都市で



39) 日野正輝（1983）：宮城県における「地区販売会社」事

業所の配置形態，東北地理，35，169-182

ある長野市に施設を置くことが一般的であると思われるが、最適配置では長野市よりかなり南方の松本市よりの位置となる。道路ネットワーク整備の4段階を比較してみても大きな位置の

変化はないが、後半の2つの段階(Ⅲ,Ⅳ段階)では最適位置がやや西方へ移動している。

各々の場合の平均アクセス時間を求めたものが第6表である。最適配置のときの平均アクセ

第6表 1センターの場合の平均アクセス時間

段 階	現 状 配 置 (長野市)		最 適 配 置		
	平均アクセス時間 (分)	指 数	平均アクセス時間 (分)	指 数	現状に対する改善率 (%)
I	122.8	100.0	101.0	100.0	17.8
II	117.0	95.3	95.1	94.2	18.7
III	87.7	71.4	72.1	71.4	17.8
IV	82.2	66.9	68.3	67.6	16.9

ス時間はⅠ段階101.0分、Ⅱ段階95.1分、Ⅲ段階72.1分、Ⅳ段階68.3分と推移するが、これはそれぞれの段階で長野市にセンターを置いた場合(現状配置)に比べて17~18%の改善となる。道路ネットワークの整備にしたがって最適配置の平均アクセス時間は短縮されていくが、その割合は現状配置の場合とほぼ同じであり、高速道路整備の効果はセンター位置にかかわらず表われるものと思われる。

(3) 2センターの場合

2センターの場合の最適位置は第15図に示すように二大都市である長野・松本両市のやや南となる。後半の2段階では両市にさらに近づいた位置となっている。これは高速道路網の整備によって南北方向の交通条件が改善されるため、両市の中心部周辺の人口集積の吸引力が相対的に高くなった結果と思われる。

平均アクセス時間は第7表に示すようにⅠ段

階からⅣ段階へと進むにつれて66.9分、60.6分、53.4分、49.7分と短縮されていく。これを現状配置と比較すると、最適配置の方が平均アクセス時間の短縮の度が小さい。すなわち、Ⅰ段階を100.0とする指数でⅣ段階をみると現状配置では67.8まで低下するのに対して、最適配置では74.3にしかならない。最適配置に対する改善率でみるとⅠ段階17.2%、Ⅱ段階19.1%に対して、後半のⅢ・Ⅳ段階ではそれぞれ10.7%、9.3%と画然とした差がある。

結局、2センターの場合は高速道路網の整備が進む程、現状の二大都市(長野・松本)へセンターを置くことによっても最適配置と同様の効率を得られるようになっていく、と考えられる。

(4) 4センターの場合

4センターの場合の最適配置を第16図に示す。最適位置はいずれの整備段階でも、長野・松

第7表 2センターの場合の平均アクセス時間

段 階	現状配置 (長野・松本市)		最 適 配 置		
	平均アクセス時間 (分)	指 数	平均アクセス時間 (分)	指 数	現状に対する改善率 (%)
I	80.8	100.0	66.9	100.0	17.2
II	74.9	92.7	60.6	90.6	19.1
III	59.8	74.0	53.4	79.8	10.7
IV	54.8	67.8	49.7	74.3	9.3

第8表 4センターの場合の平均アクセス時間

段階	現状配置(長野・松本・上田・飯田市)		最適配置		
	平均アクセス時間(分)	指数	平均アクセス時間(分)	指数	現状に対する改善率(%)
I	49.1	100.0	48.8	100.0	0.6
II	47.3	96.3	47.0	96.3	0.6
III	45.1	91.9	42.7	87.5	5.3
IV	42.1	85.7	38.8	79.5	7.8

本・上田・飯田4市の付近となる。整備段階の違いで最適位置が変化するのは3ケースで、上田市付近のセンター位置が、I・IV段階とII・III段階で異なるのと、飯田市付近のセンター位置がII段階で他と異なっているのみである。その他の場合では最適位置は安定しており、特に長野市および松本市付近のセンターは各段階を通じてまったく変化しない。

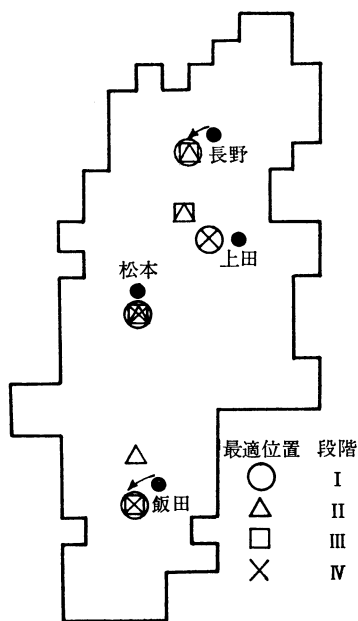
平均アクセス時間は第8表に示すように、48.8分、47.0分、42.7分、38.8分と短縮していくが、その程度は指数を比較してわかるように、1センター、2センターの場合に比べて小さい。最適配置が安定していることを考え合せてみる

と、道路ネットワーク整備の影響はセンターの数が増える程小さくなっていくものと思われる。また、現状配置に対する最適配置の改善率をみても0.6%~7.8%と、1センター、2センターの場合に比べ格段に小さな値となり、現状配置は最適配置との差が小さく、道路ネットワークの変化の影響も受けにくい安定なものであることを意味していると考えられる。

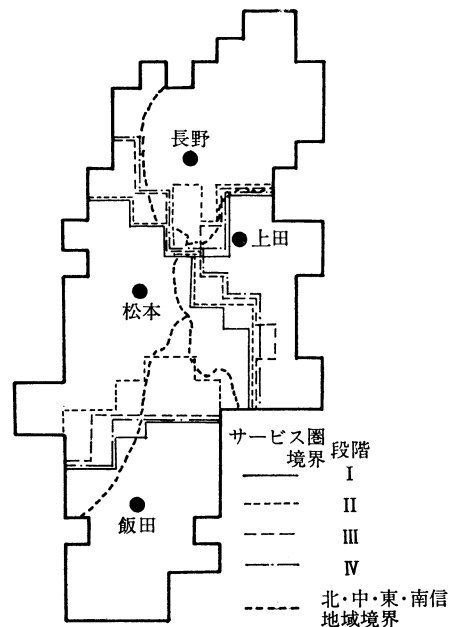
3 高速道路整備の都市システムへの影響

前節の最適施設配置の推定結果をもとに当地域の都市システムの今後の動向について若干の予測を述べてみたい。

(1) 地域システムの空間的安定性



第16図 最適施設配置(4センター)



第17図 最適施設配置のサービス圏(4センター)

前述のように都市を施設の集積点と考える立場に立って、配置された個々の施設がサービスを提供する空間的範囲、すなわちサービス圏を考えてみよう。施設とそれをとり回むサービス圏のモデルは中心都市を核とした地域の結節構造というモデルと対応するから、施設配置およびサービス圏のシステムのアナロジーとして、中心都市を核とする結節的な勢力圏をサブ・システムとし、それを中心都市相互の関係を介して統合したシステム、という構造を持つ地域システムのモデルを構想することができる。

このアナロジーからすれば、地域システムの安定性はシステムを構成するサブ・システムとしての中心都市およびその勢力圏の配置が、当該地域の交通ネットワークの条件と整合しているか否かに大きく影響される、と考えられる。この整合性は現状の中心都市およびその勢力圏の配置が、最適施設配置およびそれに対応するサービス圏の配置とどれだけくい違っているか、という大きさとして把握することができる。したがって、交通ネットワークの条件変化に対する地域システムの安定性は、当該の条件変化によって最適施設配置およびサービス圏配置がどう変化するかを検討することによって、ある程度予測することができるものと思われる。

ところで、長野県では一般に、県域を北信・中信・東信・南信の4地域に区分する地域区分が用いられており、各々の地域の中心都市はそれぞれ長野・松本・上田・飯田市となっている。既に述べたように、長野県の場合、計画されている道路ネットワーク整備の各段階を通じて最適施設配置はかなり安定しており、特に4センターの場合にはその変化は小さい。この4センターの最適配置は上の4中心都市の配置ときわめて近いから、現状の中心都市のシステムの配置は現実の交通ネットワークとよく整合しており、さらに今後の交通ネットワークの条件変化に対してもなお同様に整合的であり続けるものと判断される。

一方、勢力圏の配置を検討するために、前述の最適施設配置に対応する理論的なサービス圏

を求めてみたのが第17図である。この図に示されるように、最適施設配置が各段階を通じて大きく変化しないことに対応して、サービス圏も各段階とも大きな差はない。これを、北・中・東・南信の現実の地域区分と比較してみると、中信一東信、中信一南信の境界でややくい違いがみられるものの、おおむね両者は一致している。したがって、サービス圏の配置の面からみても、理論的に推定した最適配置は現実の地域区分をかなりよく再現しており、現状の地域区分は交通ネットワークとの整合しており安定性も高いと考えられる。

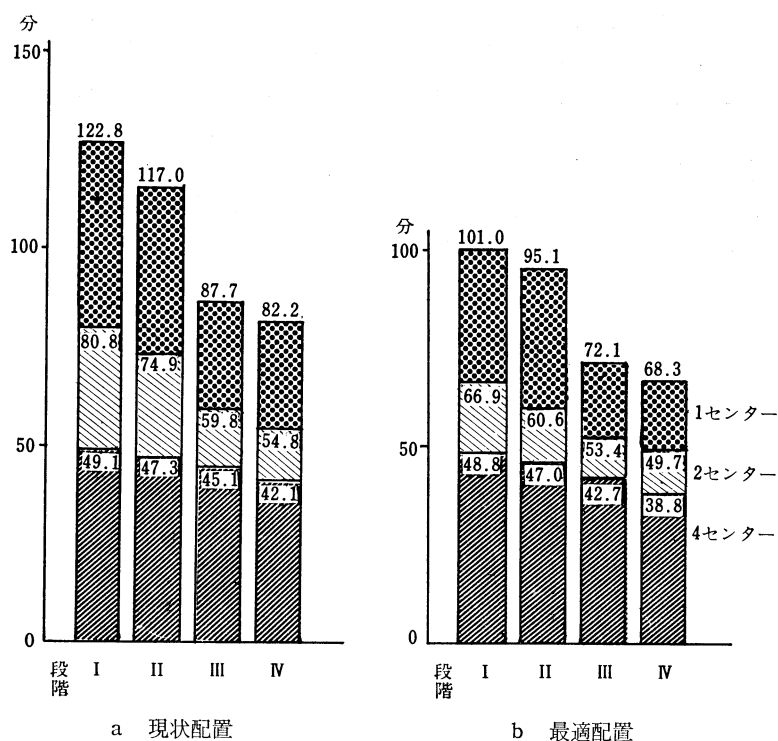
結局、前述のような中心都市を核としてその勢力圏を統合した構造を持つ地域システムのモデルに立脚すれば、現実認識されている4中心都市を核とした4地域からなる地域システムは、現状の交通ネットワークとよく整合しており、しかも今後の高速道路網整備によってもその空間的構成は安定が保たれる、と予測してもよいであろう。

(2) サービス拠点の削減

以上のような地域システムの空間的安定性の議論にもかかわらず、交通ネットワークの整備は都市システムの構造に一定のインパクトを与えることが予測される。

たしかに、当地域に配置される公共施設や企業事業拠点等のサービス拠点の数が一定であるなら、その空間的配置は交通ネットワーク整備にかかわらず一定したものになろう。したがって、施設の集積点としての都市のシステムにも大きな変動は起らない、と考えられる。しかし、高速道路網整備によるアクセス条件の向上は施設利用のための平均アクセス時間を大幅に短縮することになる。第18図aに示すように現状配置の場合、たとえば、1センターのⅣ段階の82.2分は2センターのⅠ段階の80.8分とわずかに1.7%しか違わないし、2センターのⅣ段階の54.8分と4センターのⅠ段階の49.1分は2.1%の差でしかない。

企業の事業活動はもとより、公共サービスについても経営効率の向上が厳しく要求される今



第18図 平均アクセス時間の推移

日の社会情勢を考えれば、同等のサービス水準が維持されるのであれば、サービス拠点削減の動きが当然でてくるものと考えざるを得ない。現状4都市に置かれていた公共施設が2カ所に統合される、あるいは2都市に設置されていた事業拠点が1カ所になるといった事態が予測される訳で、こうした動きが重なれば、都市システム全体が特定の上位中心都市に集中する方向で再編成されていくことになる。すなわち、高速道路網を中心とする道路ネットワークの整備は既存の下位中心都市の中心機能を上位中心都市に集中化し、上位中心都市をより拡大する方向で都市システムの構造に影響を及ぼすであろうことが予測できるのである。

しかし一方では、既存の地域システムとは異なった空間構成をもつ地域システムへ向う動きも考えられる。第18図bの最適配置の場合の平均アクセス時間をaの現状配置の場合と比較してわかるように、2センターや4センターでは

最適配置をとることによる改善が少ないのに対して、1センターでは最適配置による効果が大きい。現状配置の2センターと最適配置の1センターを比較すると、II段階での現状2センターの74.9分よりIII段階での最適1センターの72.1分の方が条件が良い。すなわち、中央道長野線開通以後は、現時点の段階で長野・松本両市にサービス拠点を配置したときよりもさらに良いサービス水準を、適当な位置に拠点を移すことによって得られることになる。こうした条件を考えれば、既存の中心都市以外の地域に拠点を移動し、新たな中心地を形成する、といった動きが出てくることを予想できなくはない。もし、このような動きが出てくるとすれば、従来の都市システムに新しい要因が持ち込まれる訳で、都市システム全体に大きなインパクトを与えることになろう。もちろん、地域システムの空間的構成もそれなりの変化をきたすことになる。

以上のように高速道路網整備が都市システムに及ぼす影響はいくつものベクトルを含んで表われてくるものと考えられ、集中化・分散化という単純な二分論ではとうてい把握しきれない複雑さを内包するものと思われる。いずれにしても、こうした変動は急激に顕在化するものではない。交通システムの改変に徐々に適応する

形で施設配置が変化し、それが大きな流れとなったときに始めて都市システムの変動として認知される訳であって、それまでには今後、相当の時間の経過があるであろう。ここで述べた予測を実証するためにはそれに見合った長期的な観測が必要である。