地理的情報と都市・地域解析

腰塚　武志

1.　はじめに

都市・地域計画の立案過程では，作業が伝統的に図面上で行なわれることが多い．しかも，この作業には試行錯誤がつきものであり，通常多くの作業量が必要である．そこでこれらの作業を計算機で処理させようと試みるわけだが，このとき，次のような経験にしばしば遭遇する．すなわち，目でみて簡単にわかることを計算機で判定させるには，意外と煩雑な手順を必要とする，ということである．

一例をあげよう．図1.1のようにいくつかの領域(行政界のようなもの)があり，別にいくつかの点的な都市施設があるものとする．このとき，ある1つの施設がどの領域に属するか，またはある領域に何個の都市施設があるかを数える，という問題を考えよう．これらの問題は現実を図面でみれば一目瞭然である．しかしこれを計算によって求めようとすると，ことはそれほど簡単ではない(後で述べるように，これらは点位置決定問題または領域探索問題と呼ばれている)．いちいち図面で数えればよいではないか，という議論もあるかもしれない．しかし後で述べるように，この問題を大量に処理しなければならない現実的課題もあり，これらの効率よい計算法を確立しておく必要がある．

こしづか　たけし　筑波大学　社会工学系

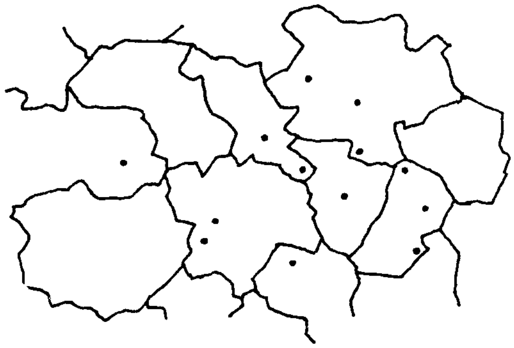
図 1.1　領域と施設

これまで，都市・地域計画の分野では上に述べたような幾何学的計算は，その場その場で工夫がなされてはいるものの，これらを統一的かつ理論的に論ずる機会はなかったように思われる．

ところで，計算機の発達および普及にともない，複雑な問題に関して計算量の理論という分野が確立してきたのは周知の事実であるが，これが幾何学にもおよび，“計算幾何学” というものが台頭してきた．計算幾何学については，本特集の別なところで詳述されようが，われわれが都市・地域計画の作業や分析を計算機で処理させようとすると，問題が計算幾何学の主要な課題と大変深い関係にある場合が多い．そこで本稿では，計算幾何学と関係ある都市・地域計画の問題をいくつか述べることにしたい．

なお，地理的情報処理には，単に都市・地域計画と密接な関係にあるものばかりでなく，もっと

広範囲なもの，たとえば都市行政の現場で有用なもの等も含まれる．しかしこれらは本特集の別なところでとりあげられると思うので，本稿では都市・地域計画，それも都市・地域解析に関係した問題に限定して論ずることにする．

2. 都市・地域計画における分析作業

都市・地域計画を立案する最初の局面では，まず現状の認識から作業が開始される．このとき，主にさまざまな施設と，それを利用する人たちのあいだになんらかの問題があるかどうか（簡単な例としては人口に見合った量の施設があるかというような需給バランス）が議論される．通常，都市施設は地図に表示されているが，都市で展開されている諸々の活動は地図に表示されてはいない．そこで都市施設の現況と諸々の活動を照合し，現状を分析しなければならない．

このような点からみると，都市・地域の分析ではまず，任意に与えられた領域における，ある特定なものの“量”をできるだけ正確に，しかも簡便に知ることが大切である．そしてさらに，この“量”と“分布パターン”により，これがどのような環境を生み出しているか，あるいは，どのような社会的機能を果たしているか，を分析することが重要である．この場合，現況をなんらかの方法で図化してしまえば，ある程度直観でわかり，高度な分析をする必要もないものもあるだろう．しかし，問題によっては直観や経験だけではわからないものもある．

ところである特定なものの量を正確に知るためには，点としてあらわすことのできるもの（点的施設または人間等）はその位置の座標がわかればよい．線であらわされるもの（道路等）は，折れ線近似で表示するとして，頂点の座標およびその接続関係がわかればよい．面については長くなるし，本特集の別なところで詳述されると思うので省略するが，ともかくこれらの幾何学的データに，計算幾何学における効率よい算法を用いれば，任意の領域におけるさまざまな“量”を速く正確に計算することができる．

そこで，都市・地域解析の分野では，まず，分析目的に応じて，**施設等の“量”として何を採用すべきか**（個数，長さ，面積等が考えられるが）をきちんと議論することが必要である．さらに上記の幾何学的データについては，一般的にデータ量が膨大となり，データ作製にコストがかかる．それゆえ，分析ごとに，**どの程度詳しいデータがあれば，どの程度詳しい分析ができるか，**という点についても明確にしておかなければならない．そして効率よい処理が可能となった現在では，目的によっては膨大な幾何学的データ作製にも，多大な意義がある場合もあるだろう．

ただ，幾何学的データのような厳密で詳細なデータは過去にはほとんど作製されてはいない．都市・地域計画では，過去から現在までの趨勢をみることも多く，過去のデータにも意味がある．過去のデータはデータ量の制約等もあり，実際には個々に詳しく調査したとしても，小地域（街区等）で集計したもので保管されている．以下これを“集計データ”と呼ぶことにするが，このようなデータをもとにしても，任意の領域における“量”を誤差の評価も可能なうえで推計できなくてはならない．

3. 任意の領域の人口推定

最初に前述の“量”を人口とした場合について述べることにしよう．ある任意の形状をした小地域の人口を求めることは，都市・地域計画において最も基本的なことである．たとえば，ある住宅団地が外見上（地図上）まったく変化していなくても，20年前と現在とを比較して人口が大きく減少していることがわかったとしょう．これはこの団地で育った子供たちが成人して独立し，老夫婦が残っている（逆もあり得るが）結果生じた，ということを容易に推察することができる．

まず，すべての人の位置がわかっていれば，計

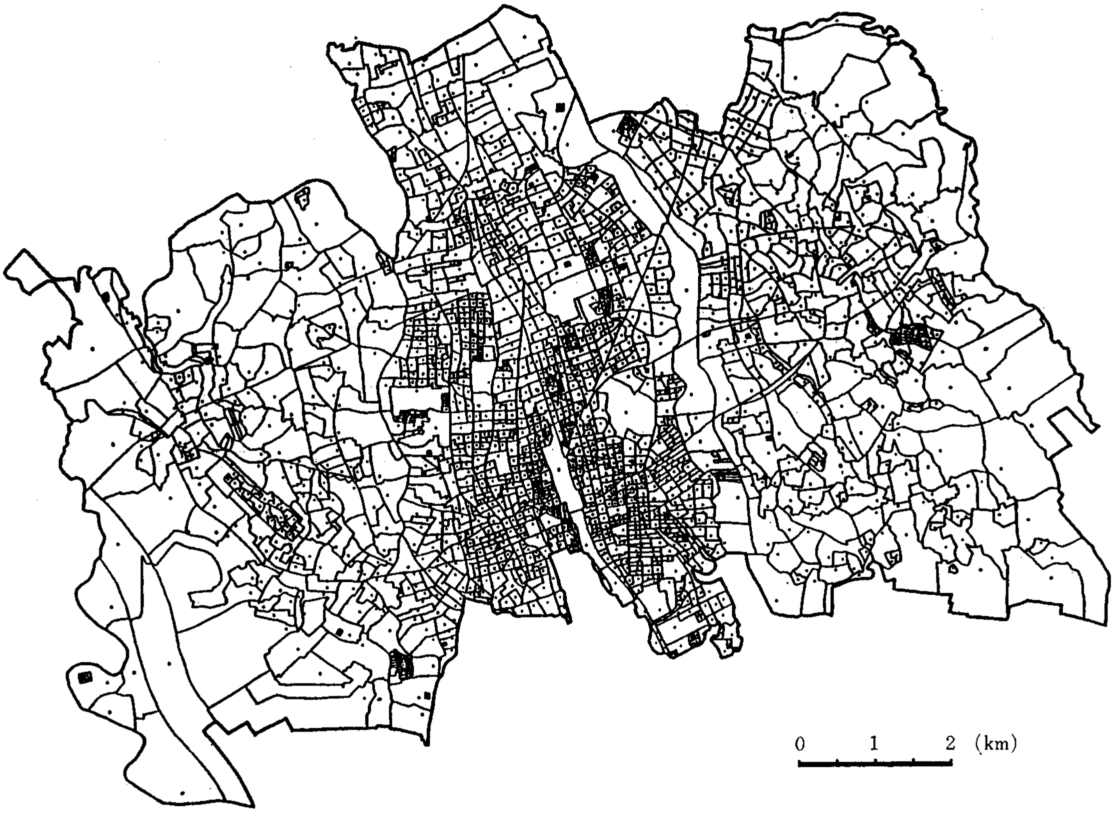

図 3.1 国勢調査調査区（大宮市　昭和50年）

算幾何学の領域探索問題の算法より，正確な人口を効率よく計算することが可能である．現実には調査等の制約により，人口に関するほとんどのデータが集計データであり，これを用いて人口を推定しなければならない．そこで何人かの人々が集計されており，これが1点に集約させられてデータ量のオーダーが下げられている事態を想定しよう．このとき最も重要なことは，推定の精度とまとめ方の程度との関係を追求することである．

ところで日本における集計データの中で，地域が最も小さいものは国勢調査調査区データである．この調査は蓄積もあるし，今後も継続されることが予想されるので，これを例にとって議論しよう．ただし別な調査データ等も用いることができるように，極力一般論として議論しておく．

さて図3.1は埼玉県大宮市の昭和50年における国勢調査調査区をあらわしている．図中の点は調査区の人口を集約させた点（調査区点と呼ぶ）であり，この時点における大宮市の人口約33万人に対し調査区点の数は1854個であり，オーダーが2桁小さい．そして各調査区点の位置をデジタイザーで測り（5時間程度を要した），この点の座標とこの調査区の人口をデータとして貯える．ただし図3.1のような地図は総務庁統計局の資料から自分で作製しなければならないが，これにはかなりの時間が必要である．

さて，人口推定したい任意の形状の領域Dは角数の多い多角形とみなすことができる．いっぽう，貯えられたデータは図3.1において調査区の境界線を除いた調査区点とこれに集約された人口とである．それゆえ計算幾何学の領域探索問題の算法により，この領域Dに含まれる調査区点を効率よく列挙することが可能である．そこで調査区 i の人口 α_i がすべてDに含まれると想定しよう．

図 3.2　領域Dと交わる調査区

すると領域Dの人口 P_D の推定値 $\hat{P}_D$ を単純に

$$\hat{P}_D=\sum_{P_i \in D}\alpha_i \tag{3.1}$$

とすることができる．実はこの推定方法は日本におけるメッシュデータの同定方法と同じであり，当然のことながらこの推定値には誤差が含まれている．図3.2から明らかなように，領域Dに完全に含まれている調査区は問題ないが，領域Dの境界と交わる調査区で誤差が生ずる．

誤差に関する詳しい議論は省略するが，いくつかの仮定のもとに，相対誤差が信頼係数95%で

$$\frac{|\hat{P}_D-P_D|}{P_D} \leqq \frac{4\sqrt{\{\beta_1(\alpha^2+\sigma^2)+\beta_2\alpha\}}\gamma/(\pi\sqrt{\alpha})}{P_D{}^{3/4}} \tag{3.2}$$

と導出することができる［2］［3］．ただし α と σ^2 は調査区人口の平均値と分散をそれぞれあらわし，β_1 は調査区点の打ち方に，β_2 は調査区内の人口分布に依存する．また式中の γ に関しては，領域Dの面積を S，周長を L とすれば $\gamma=L/\sqrt{S}$ となっている．そして調査区点があまり変なところ（たとえば調査区の境界上とか）に打ってなければ $\beta_1=0.13$ としてよく，また調査区内の人口分布が普通であれば（境界の近くのみに偏在しているとかいうことがない等）同様に $\beta_2=0.13$ としてよい．

そこで α と σ^2 を定めた4つの例について式(3.2)の右辺を計算し，P_D を横軸にとってこれを示すと図3.3のようになる．ただしこの場合 $\gamma=4$

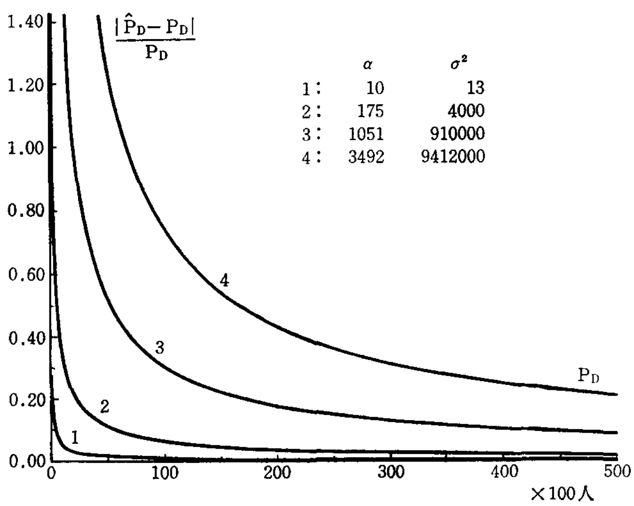

図 3.3　相対誤差の範囲（信頼係数95%）

（領域Dが正方形のときの値）としてあるが，領域Dが凸でしかもあまり細長くなければ，この値は4よりさほど大きくはならない．図3.1で示した大宮市の国勢調査調査区を用いる場合は図3.3のグラフ2が該当する．他の場合の α と σ^2 の値も図3.2に表示されているが，グラフ1は10人程度を1点に集約した場合の相対誤差の範囲を，グラフ3は大宮市付近で500m メッシュ程度を集計の最小単位としたとき，グラフ4は1km メッシュ程度を最小単位としたときの，それぞれの相対誤差の範囲をあらわしている．

これより，信頼係数95%で相対誤差が10%のときの P_D の最も小さい値を求め，およその値で示すと表3.1のようになる．すなわち，集約の程度（α と σ^2）が示されているデータを用い，与えられた精度（この場合，信頼係数95%で相対誤差が10%以下）で地域人口を議論しようとすれば，地域の単位（議論上の）を人口がこの P_D の値以上にな

表 3.1　与えられた精度における P_D の値

α(人)	σ^2	P_D(人)
10	13	200
175	4000	8000
1051	910000	50000
3492	9412000	150000

るように，とらなければならない．したがって，国勢調査調査区データ($\alpha=175$, $\sigma^2=4000$)を用いる場合，議論する地域の単位を8000人以上にする必要があり，都市計画では，この単位はほぼ小学校区に対応する．そこで，小学校区程度を地域の単位としてみる議論や解析には，現在の国勢調査調査区データは十分使いものになるが，これ以上小さい地域を対象とする場合には問題がある．国勢調査そのものは正確な調査であり，これを調査区で一まとめにしたために，これをもとに人口を推定するとき，誤差が大きくなる．それゆえ，調査結果をまとめる段階で今までよりももっと小さい調査区でまとめたデータを整備するなら，都市計画に資すること大であろう．また，地域計画等では，1 km メッシュをデータの最小単位とみて，ある地域の人口を推定していることも多い．このとき，やはり表3.1の $\alpha=3492$, $\sigma^2=9412000$ の場合より議論の単位を15万人程度以上にしなければならないことがわかる．もっとも，これらは大宮市付近で求めた α と σ^2 の値をもとに論じたものであり，他の地域でこの α と σ^2 の値が異なれば，当然単位人口の数値は違ったものになるだろう．

以上をまとめると，人口推定の精度と調査区(集計の最小単位)の人口規模との関係が明らかにされた．これにより得られたデータの集約の度合によって，誤差の程度が評価できるし，逆に精度に応じてデータの集約の程度を定めることも可能になった．

4. 道路密度に関する問題

先の2章で都市施設の“量”として何がよいかを議論すべきであると述べた．ここでは道路を例としてとり，これに関する議論と計算幾何学との関連について論ずることにしたい．

さて前章では，任意の領域における人口が問題となった．ここでは同じような任意の領域における道路網の長さを問題にしよう．さて道路網の曲

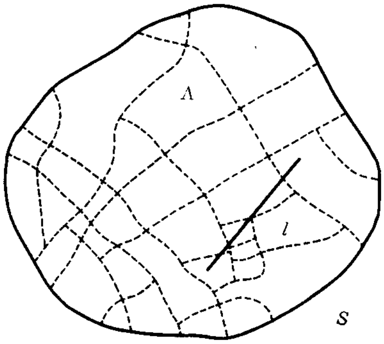

図 4.1 領域と道路網

線を折れ線で近似し，データとしてこれらの頂点や交差点の座標およびグラフ構造が得られているものとすれば，計算幾何学の算法により，任意の領域D内における長さ Λ を正確に求めることができる．また，都市内の細街路のようなものまで含めて考えなくてはならないときには，上の方法ではデータ量が膨大になりすぎる．このようなときには，交差点の位置と3差路か4差路かの区別さえデータとして入れておけば（5差路以上は3差路と4差路の組合せとみなす)，計算幾何学の領域探索問題の算法を用いることにより，領域Dにおける道路総延長 Λ を推定することもできる．すなわち，領域Dの面積を S，D内の交差点数を n，その内で3差路の占める割合を $c(=n_3/n$, ただし3差路の数を $n_3)$ とすると，Λ の推定値は

$$\hat{\Lambda}=(1-c/4)\sqrt{n\pi S} \qquad (4.1)$$

とあらわされる[4]．

以上により道路密度 Λ/S（またはその推定値 $\hat{\Lambda}/S$）が求められるが，この道路密度という指標はこれまで，都市計画の分野ではあまり理論的根拠をもたないまま多用されてきた．これは道路の“量”が大きくなれば，大きな数値となるという意味で素朴な指標であるには違いない．しかし単にそれだけではなく，これにはある“物的”意味がこめられている．いま図4.1のように面積 S の領域があって，この中に総延長 Λ の道路網があるとする．いまこの領域内に長さ ℓ の線分をランダムに落とすと考えると，この線分と道路網との交

点数 ν の期待値は，ポアンカレ (Poincaré) の公式［5］より

$$\mathrm{E}(\nu)=\frac{2\Lambda\ell}{\pi S} \tag{4.2}$$

と導かれる．もっともこれは境界条件等に仮定を入れないと厳密には成立しないが，紙面の都合もあり，ここでは詳しい議論には立ち入らないことにする．上式の両辺を ℓ で割ると，この線分上にできる道路網との交点数の密度に関して

$$\frac{\mathrm{E}(\nu)}{\ell}=\frac{2\Lambda}{\pi S}$$

が得られ，これは ℓ によらない．すなわち，道路密度 Λ/S に $2/\pi$ をかけたものは，対象領域内のさまざまな位置における，線分と道路網との交点に関する線分上の密度の期待値をあらわしている．したがってこの逆数をとると，この値は線分上の交点間の距離の平均値のようなもの（厳密には逆数の関係にあり平均値ではない）に対応する．そこでこれを

$$\zeta=\frac{\pi S}{2\Lambda} \tag{4.3}$$

とおき，これをもとに都市施設の誘致距離について考察しよう．

たとえば小学校区を問題にするとき，いつも適正な通学距離というものが議論される．これまでの通学距離の考え方では，直線距離か道路距離とかいったような普通の距離しか考慮の対象となっていない．しかし現代では，幹線道路が最も通学の障害となっているので，この幹線道路の"量"に注目し，幹線道路が多いところは通学距離を短くし，幹線道路が少ない場合には通学距離が長くなってもよい，としてみよう．図4.1の道路網を幹線道路と考えれば式 (4.3) の ζ は，通学路が幹線道路によって切断される長さの平均値のようなもの，を意味している．長さ ζ が短い場合，通学に何度も幹線道路を横切らなければならないので，この横切る回数の平均値がどの学校区でも同じになるように通学距離を決定するには，各地区における通学距離（平均値か最大値）をこの ζ に比例させた値にすればよい．

ここで大宮市で算出した現実例を示そう．小学校区については後で示すので，まず他の施設を考えるうえでも参考になるような，大まかな数値を

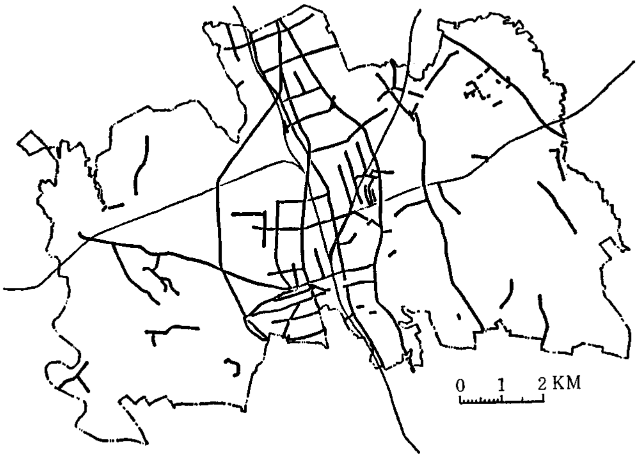

図 4.2 大宮市幹線道路（幅員 9 m 以上）

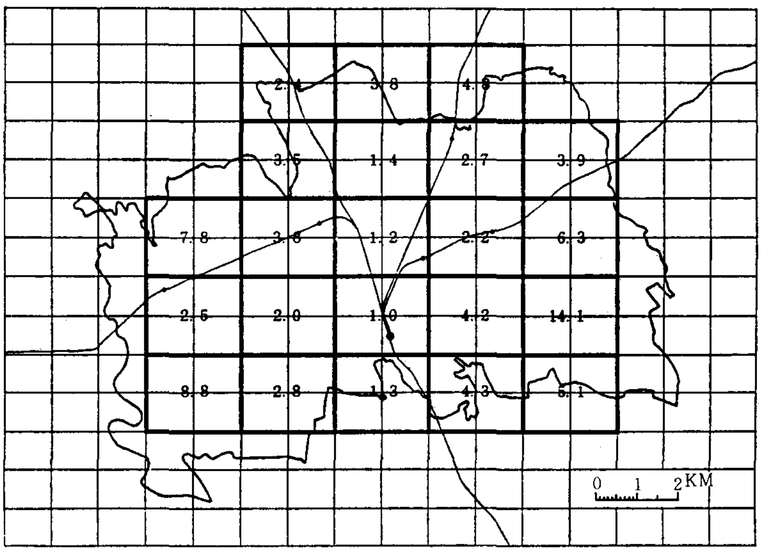

図 4.3 大宮市における $\zeta/\zeta_{\min}$ ($\zeta_{\min}=450(\mathrm{m})$)

はじくことにする．大宮市において幅員9m以上の道路は図4.2のようになっているが，これを幹線道路とみなし，図4.3のような2km メッシュ中での総延長Λを計測した．そして各メッシュごとに式(4.3)のζを計算すると，ζの最も小さいのは都心部でその値は450m となった．各メッシュでのζの値を相対的に表現するために，ζの最も小さい，つまり幹線道路の最も多い地区を1とすると，図4.3のメッシュ内の数値のようになる．これをみると，たとえば都心（数値が1のメッシュ）の左どなりのメッシュでは，以上のような観点からみるかぎり，都心の誘致圏の2倍の長さを誘致圏としてもってよいことがわかる．もっとも，幅員9m以上の道路を幹線道路とみなすことには問題がある．1つには，幅員9mという基準でみると，図4.2にあるように連続した道路のほんの一部しかとりあげられない場合があり，幹線という考え方からするとおかしい．このことから，幹線道路を決める場合，交通量のような点からもみる必要がある．またより現実的には，大宮市は市域を鉄道網によって分断されており，鉄道も当然考慮の対象に加えるべきであろう．ただ鉄道と道路を同列にあつかってよいかどうか問題も残る．

さて同じように大宮市の各学校区(図4.4)でこのζを計算し，次に各学校区の最長通学距離を地図上で計測する．そして前と同じようにζを学校区の中で最も小さいζ_{min}で割って横軸にとり，縦軸に最長通学距離をとって各学校区をプロットすると図4.5のようになる．最長通学距離の長いのは図4.4におけるAからGまでの学校区だが，これらを図4.5からみると，学校区E，F，Gはζの値も大きいので，このような観点からは問題ない．しかし，A，B，Cについてはもっと詳しく検討する必要があるといえよう[6]．

道路密度に関するものとして一例を述べた．さらに網の連結に関する分析や，利便性に関する分析もこの道路密度をもとに論ずることができるが紙面の都合もあり割愛する．

5. おわりに

前章では小学校区を題材にとり，計算幾何学と都市・地域計画との関連について述べた．同じ主題を別な観点からとりあげ，計算幾何学の主要な課題である Voronoi 図との関係を明らかにした分析法のほうが，ある意味で本稿にふさわしいとも考えられるが，概要が最近本誌に載ったこともあり[7]，省略した．地理的情報と都市・地域分析に関係した他のさまざまな問題は文献[8]に載っているので参照していただきたい．なお，本稿

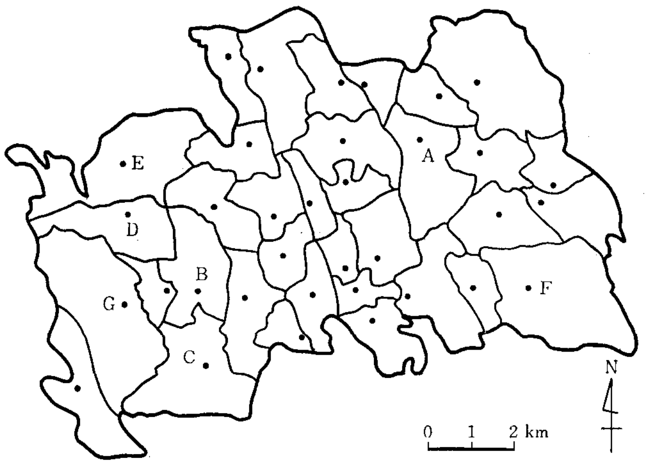

図 4.4 大宮市の小学校と学校区

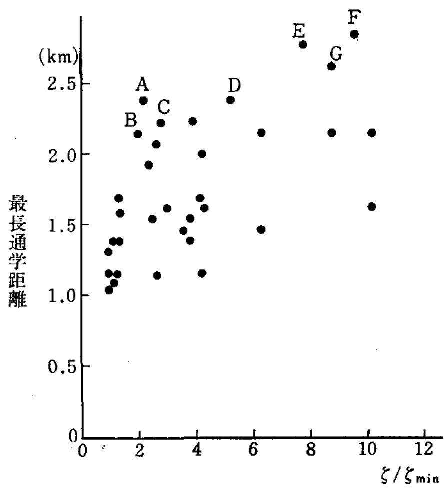

図 4.5 最長通学距離と ζ/ζ_{min}

は文献［9］に加筆訂正を加えたものであり，文献［8］にはない問題について論じている．

最後になりましたが，いつもご指導ご助言をいただいている，東京大学教授伊理正夫先生をはじめ伊理研究室の皆様に謝意を表します．また4章は，大宮市における調査研究委員会がきっかけとなり，得られた成果の一部を示したものである．ご指導いただいた委員長の東京大学教授伊藤滋先生をはじめ各委員の方々に感謝いたします．

参考文献

［1］ 枝広正人，伊理正夫，浅野孝夫：領域探索算法とその実際的評価．日本OR学会春季研究発表会アブストラクト集(1984)，pp.115-116

［2］ 腰塚武志：任意に与えられた領域の人口推定．日本OR学会秋季研究発表会アブストラクト集(1983)，pp.25-26

［3］ 腰塚武志：メッシュデータの誤差について．第5回数理計画シンポジウム論文集(1984)，pp.5-23

［4］ 腰塚武志：道路網と交差点．都市計画，103号(1978)，pp.36-41

［5］ Santaló, L. A.: *Integral Geometry and Geometric Probability*. Addison-Wesley, Massachussetts (1976)

［6］ 伊藤　滋，腰塚武志，他：将来都市規模と公共施設の適正配置に関する調査研究．地方行政システム研究所 (1983)

［7］ 大澤義明：距離分布による都市施設配置計画の研究．オペレーションズ・リサーチ，Vol.30, No.1 (1985)，pp.74-76

［8］ 伊理正夫，他：地理的情報の処理に関する基本アルゴリズム．日本OR学会報文集，T-83-1 (1983)

［9］ 腰塚武志：地理的情報処理と都市計画．日本OR学会第13回シンポジウム論文集(1984)，pp.12-16

