

時間距離行列及び OD 行列の視覚化

榎谷 有三

本稿は、地点間の関係が行列として表現されている時間距離行列及び OD 行列に対する視覚化手法についてそれぞれ考えた。行列の要素をすべて満足するように各地点を 2 次元空間上に再現することは不可能であるため、前者は非類似度行列として、後者は類似度行列として、それぞれの特性を踏まえた視覚化手法について考えた。視覚化手法としては、幾何学的手法、クラスター分析及びグラフ理論を基礎としたアルゴリズムを考えた。そして、北海道の高規格幹線道路網、札幌市の通勤交通及び北海道の自動車交通を対象に実証的分析を示した。

キーワード：視覚化手法、時間距離行列、OD 行列

1. はじめに

地域間、都市間あるいはゾーン間等の地点間の相互関係等进行分析するためのデータは、一般に行列として表現されている。このため、 n 地点を対象とした視覚化の場合、 $n \times n$ 行列の要素 n^2 個の値をできるだけ満足するように n 個の地点を 2 次元空間上に再現することとなる。しかしながら、 n^2 個の値をすべて満足するように再現することは不可能である。したがって、実際的にはネットワーク形態あるいは各地点の地理的位置を損なうことなく、また地点間の相互関係が可能な限り小さい誤差になるように n 個の地点を 2 次元空間上に再現して視覚化を図ることとなる。

地点間の相互関係を表すデータは、類似の度合いを表す指標、すなわち距離のように値の小さい方が類似性が高いことを表す指標と、交通量のように値の大きい方が類似性が高いことを表す指標に大きく分けることができる。そして、前者の距離、時間、費用などの交通抵抗に関する指標は非類似度行列として、後者の自動車交通、通勤交通、貨物、電話通話などの交通流動に関する指標は類似度行列として表すことができる。

本稿においては、非類似度行列に関する例として北海道の高規格幹線道路網を対象とした時間距離行列、類似度行列に関する例として札幌市の通勤交通及び北海道の自動車交通流動を対象とした OD 行列に対する視覚化手法についてそれぞれ考える。

2. 視覚化手法について

地点間の行列データは、前述のように大きく 2 つに分けられる。ひとつは、距離、時間あるいは費用などの交通抵抗に関する非類似度行列で、行列の各要素の値は小さいほど当該地点間の移動が容易（類似度が高い）であり、大きいときには移動困難が増す（類似度が低い）ことを示す。一方、後者の類似度行列の場合、地点間の自動車交通あるいは通勤交通等の交通流動のように、値が大きいほど当該地点間の結合性は強いことから類似性は高くなり、小さいときには結合程度も弱くなることから類似性も低くなる。

したがって、これら非類似度行列あるいは類似度行列を対象とした視覚化を考える場合には、それぞれの特性を踏まえて類似性が高いあるいは低いことを分かり易く表現することができる手法について考えなければならない。非類似度行列を対象とした視覚化手法として、特に時間距離行列を対象とした手法としては多次元尺度構成法 (MDS) [1]-[2]、非線形最小二乗問題 [3]、幾何学的手法 [4]-[6] 等がある。前二者は、数学的に明快であり、適当な最適基準のもとに時間地図の図形 (地点位置) 形状を一意に確定することができる。一方、後者の幾何学的手法は既存のネットワーク形態を基本に、実地図に近い違和感の少ない時間地図の作成を試みようとする視点から、ネットワークを構成するリンクによって結合されている地点間の時間距離の再現を図ろうとするものである。すなわち、幾何学的手法は、「時間地図は実地図との比較によって意味を持つ」との視点からの手法であり、本稿ではこの手法を中心に 3 節にて述べる。

交通や通信などの各種の流動指標を対象とした視覚

ますや ゆうぞう
専修大学北海道短期大学 みどりの総合科学科
〒079-0197 北海道美唄市光珠内町

化は、地点間の機能的な結合関係を明らかにしようとすることから、類似度行列を対象とした視覚化手法は非類似行列の場合と比べて手法も異なってくる。すなわち、流動指標の場合は、地点間の結合関係あるいは依存関係、すなわち OD 交通量を対象に地点間の結節構造の視覚化を図ろうとするものである。結節構造の視覚化手法としては、直接連結法、グラフ理論法、因子分析法あるいはクラスター分析法など種々の方法 [7]-[10] が提案されている。本稿においては、OD 行列を対象に樹状の分類構造を表すデンドログラムが作成できるクラスター分析法、及び地域間の結合関係が有意か否かを基に直接連結性だけを考慮する直接連結法を中心に 4 節にて述べる。

3. 幾何学的手法による時間距離行列の視覚化

3.1 視覚化手法について [4], [6]

各地点を 2 次元空間上 (地図上) に配置しようとするとき、前述のようにすべての地点間の距離を当該地点間の時間距離に等しくなるように配置することは不可能である。ここでは、幾何学的手法及びグラフ理論を基礎に、リンク (道路区間) によって結合されている地点間の距離が当該地点間の時間距離に等しくなるように各地点の座標値を算定して、各地点を 2 次元空間上に配置する時間地図の作成手法について考える。

道路網は、一般にノード (地点)、リンク及びループ (閉路) から構成されるネットワークとして表現できる。そして、各ループは 3 個 (三角形)、4 個 (四角形) 及び n 個 (n 多角形) のノードから構成されている。時間地図の作成においては、これら各ループのうち、幾何学的手法を通して算定がより容易な三角形、四角形を構成するノードから順次座標値を算定する方法を考えている。各ノードの座標値算定のための手順は、以下のように大きく 5 つの手順に分けることができる。図 1 には、座標値算定手順の概要を示した。

手順 1) 各地点の相対的位置関係を求めるために、Spanning tree (木) を作成する。すなわち、Spanning tree は連結グラフの極小なものであり、各地点は互いにただ一つの経路で結ばれているからである。

手順 2) 対象とする道路網に対してループ行列 R を作成する。そして、行列 R を基に、各ループを構成しているリンク数を求めて列ベクトル A を作成して、ループを三角形、四角形あるいは五角形以上に分類する。

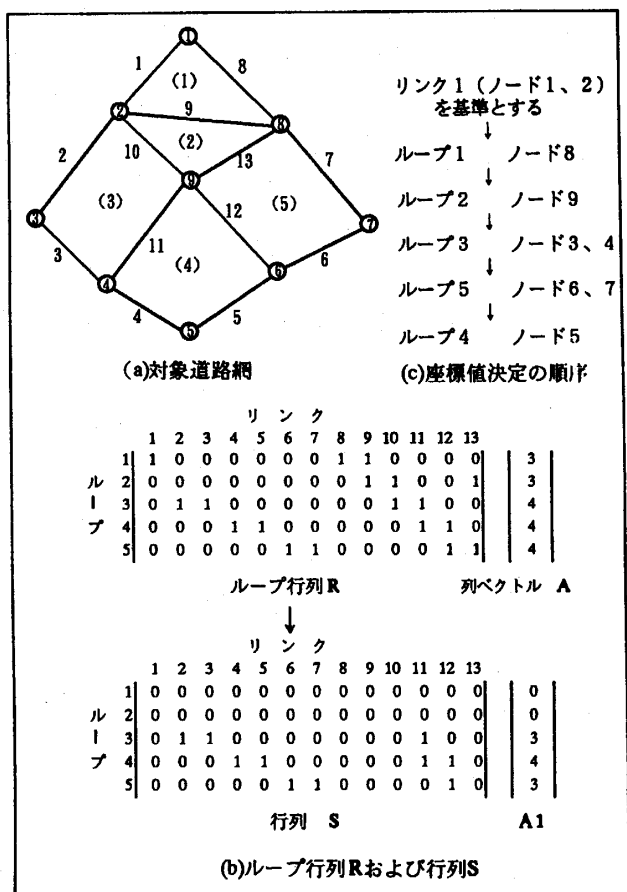


図 1 座標値算定手順の概要

手順 3) 三角形を形成するループを取り出すとともに、これらの三角形に対して各ノードの座標値算定の順位付けを行い、順次各三角形のループを構成する各ノードの座標値を算定する。

手順 4) ループ行列 R において、三角形のループを構成するリンクに該当する列ベクトルの要素を 0 に置き換えて、行列 S 及び列ベクトル A1 を作成する。そして、これらの行列を基に、四角形のループを対象に順位付け及びループを構成する各ノードの座標値を算定する。

手順 5) 順次五角形以上のループに対しても順位付け及び各ループを構成する各ノードの座標値算定を行う。

手順 6) 手順 3)~5) で算定された各ノードの座標値を基に各地点を 2 次元空間上に配置する。

これらの手順を基に、図 1 の (a) の対象道路網を対象としたときの各ノードの座標値決定の順序が (c) に示されている。また、(a) のカッコ内の数値 (ループの順位) は (c) の手順を踏まえたものである。

手順 3) におけるループを構成するノードが 3 個 (三角形) の場合の座標値は、以下のように三角形の

幾何学的手法を基に算定することができる。すなわち、3つのノードのうち2つのノードA, Bの座標値(X_a, Y_a), (X_b, Y_b)が既知としたとき、他の1つのノードCの座標値(X_c, Y_c)を三角形の幾何公式の式(1), (2)を通して求めることができる。ここで、 a, b, c はそれぞれノード間の時間距離である。

$$X_c = \frac{c^2 - a^2 + b^2}{2c} \quad (1)$$

$$Y_c = \frac{\sqrt{\{a^2 - (c-b)^2\}\{(c+b)^2 - a^2\}}}{2c} \quad (2)$$

式(1), (2)から求められる座標値は、ノードA (0.0, 0.0), B ($c, 0.0$) がそれぞれX軸上にあるとしたときの値である。したがって、未地点Cの座標値を式(3), (4)に示す既知点Aの座標値を基準にした値に修正する必要がある。

$$X'_c = X_a + X_c \cos \theta - X_c \sin \theta \quad (3)$$

$$Y'_c = Y_a + Y_c \sin \theta + Y_c \cos \theta \quad (4)$$

ここで

$$\sin \theta = (Y_b - Y_a) / S$$

$$\cos \theta = (X_b - X_a) / S$$

$$S = \sqrt{(X_b - X_a)^2 + (Y_b - Y_a)^2}$$

なお、四角形以上の場合、三角形のようにノード間の時間距離をすべて等しくするような座標値算定は不可能である。特に、リンクで結ばれていないノード間の長さを当該ノード間の時間距離に等しくすることは不可能である。このため、各ノードの相対的位置関係及び時間距離等を考慮した座標値について3次方程式を基礎に算定が試みられている[4]。

3.2 北海道の高規格幹線道路網を対象とした視覚化[6]

国土面積の約22%を占める北海道は、広大な地域に地方中核・中心都市が分散して点在している、いわゆる広域分散型社会を形成している。このため、旅客輸送の87%、貨物輸送の98%を自動車に頼っていると同時に、自動車保有台数及び平均走行距離等いずれも全国平均を上回る自動車社会を形成している。本稿においては、北海道における高規格幹線道路網の整備が市町村間の時間距離の短縮あるいは道路利用者に対する利便性にどの程度効果を発揮しているかを視覚的に把握するため1970, 1990及び2020年の3つの年次の道路網を対象に時間地図の作成を試みた。

1970年は、高規格幹線道路網が整備されていない道路網、1990年は札幌～小樽、登別～深川等の高速自動車国道の一部が開通した道路網である。さらに、

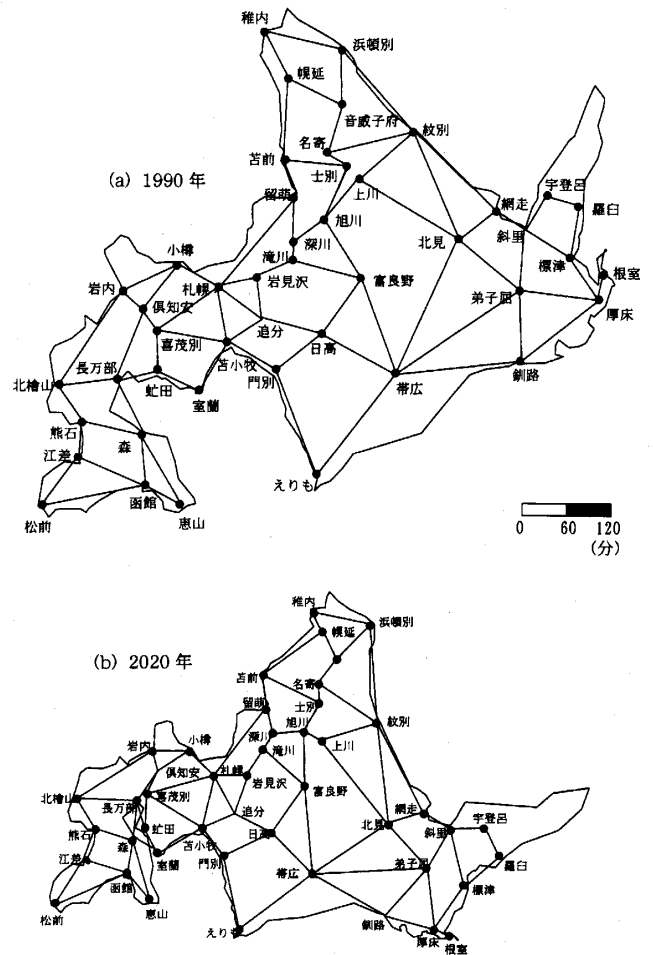


図2 1990年及び2020年の時間地図

2020年は高速自動車国道及び一般国道の自動車専用道路、いわゆる高規格幹線道路網が完成したときの道路網である。ここでは、それぞれの年次の道路網を対象に各市町村間の最短時間距離を算定するとともに、年次ごとの時間距離行列を作成した。そして、作成された時間距離行列を対象に時間地図の作成を行った。

208市町村(212市町村(現在189)のうち離島を除く)すべてを対象とした時間地図の作成は困難であることから、3つの年次の道路網形態及び北海道の地形等を考慮して図2に示す46個のノード(市町村)、77本のリンク(道路区間)及び32個のループ(閉路)からなるネットワークを対象に行った。各リンクの長さ(リンク両端の市町村間の時間距離)を基にSpanning treeを作成するとともに、各ループに順位付けを行って各ノードの座標値を算定して作成した時間地図が図2である。

1970年と1990年とは大きく異なることから、図2には1990年及び2020年の時間地図を図示した。各市町村間のリンクの長さは、当該市町村間の時間距離に等しくなっている。図3には、時間地図の再現性

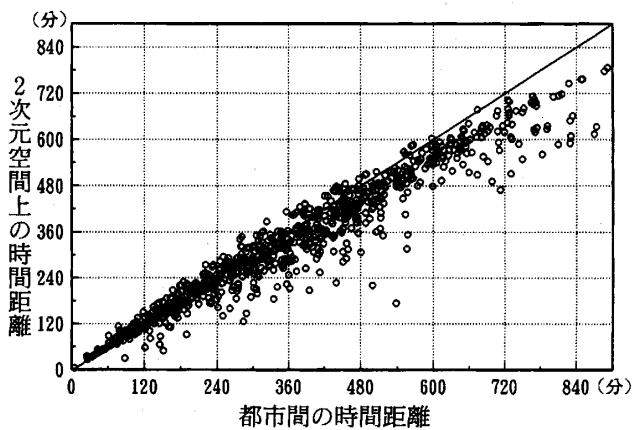


図3 1990年の時間距離の関係

表1 各年次に対する適合度指標

年次	相関係数	RMS誤差	クラスカル
1970年	0.973	59.94	0.143
1990年	0.969	59.69	0.151
2020年	0.955	43.83	0.161

表2 各年次に対する計量的指標

項目	1970年	1990年	2020年
平均時間距離	343分	323分	231分
180分(3時間)に対する累積比率	0.21	0.234	0.374
360分(6時間)に対する累積比率	0.59	0.633	0.871
累積比率50%に対する時間距離	310分	295分	215分

を確認するために、1990年の各市町村間の時間距離と2次元空間（時間地図）上の時間距離の関係を示した。また、表1には各年次の再現性を評価するための3つの適合度指標を示したが、指標値からもある程度再現性の高い時間地図の作成が確認されている。なお、道路網全体の変容を探るために、海岸線の都市を基に閉合トラバースを作成して面積値を比較したとき、1970年の1に対して1990年0.938、2020年0.642であった。

高規格幹線道路網の整備に伴う利便性の変化等を視覚的に、計量的に把握することができる他の手法として、アクセシビリティの概念を基礎とした累積頻度分布曲線が図4である。図4は、208市町村間の21,528市町村ペアを対象に3年次について取りまとめたものである。累積頻度分布曲線が1970年から1990年、そして2020年へと全体的に左にシフトしていることから、時間地図と同様に利便性の増大を視覚的に把握することができる。また、表2に示すように、累積頻度分布曲線から算定することができる各種の指標値が

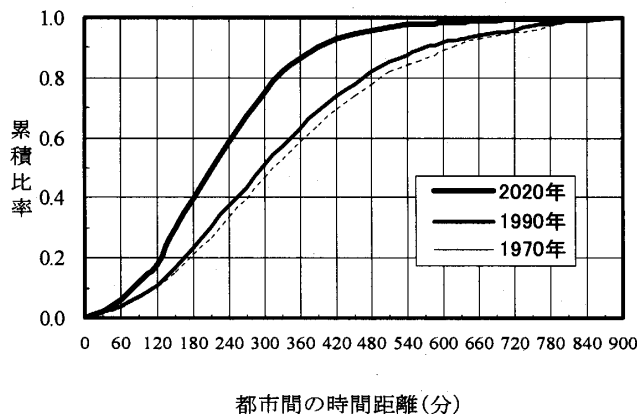


図4 各年次に対する累積頻度分布曲線

らも北海道208市町村間の交流可能性の増大等を計量的に把握することができる。例えば、6時間以内に到達可能な市町村ペアが1970年の6割程度から、2020年には9割近くまで増加、あるいは累積比率50%に対する時間距離が310分（1970年）から215分（2020年）に95分短縮するなどである。なお、表2に示す平均時間距離の値は、図4の累積頻度分布曲線、縦軸及び累積比率1.0に対する横軸で囲まれた面積値でもある[11]。

4. OD行列を対象とした結節構造の視覚化

OD行列を対象とした結節構造の視覚化は、各地点の地理的位置関係を踏まえて地図上に各地点間の結合関係あるいは依存関係を図示しようとするものである。ここでは、それぞれの視覚化手法について述べる。

4.1 結合関係に対する視覚化手法について[9]

結合関係の場合は、交通流動の視点からみた地点間の結合関係を通して交通流動パターンを視覚的に把握しようとするものである。このため、各地点間の結合関係を樹形図（デンドログラム）を通して、階層的に把握することができるクラスター分析を基礎とした視覚化手法について考える。結合関係に対する視覚化手法の手順は、以下のように大きく5つの手順となり、概要を図5に示している。

手順1) OD表（行列）から各地点間の流出率 r_{ij} を求めて流出率行列 R を作成する。流出率は地点 j 間のOD交通量を地点 i の全発生交通量で除した値である。

手順2) 類似度行列は対称的であることが必要であるため、流出率 r_{ij} と r_{ji} を比較し、依存度の大きい地点側の流出率の値に置き換えて類似度行列 D を作

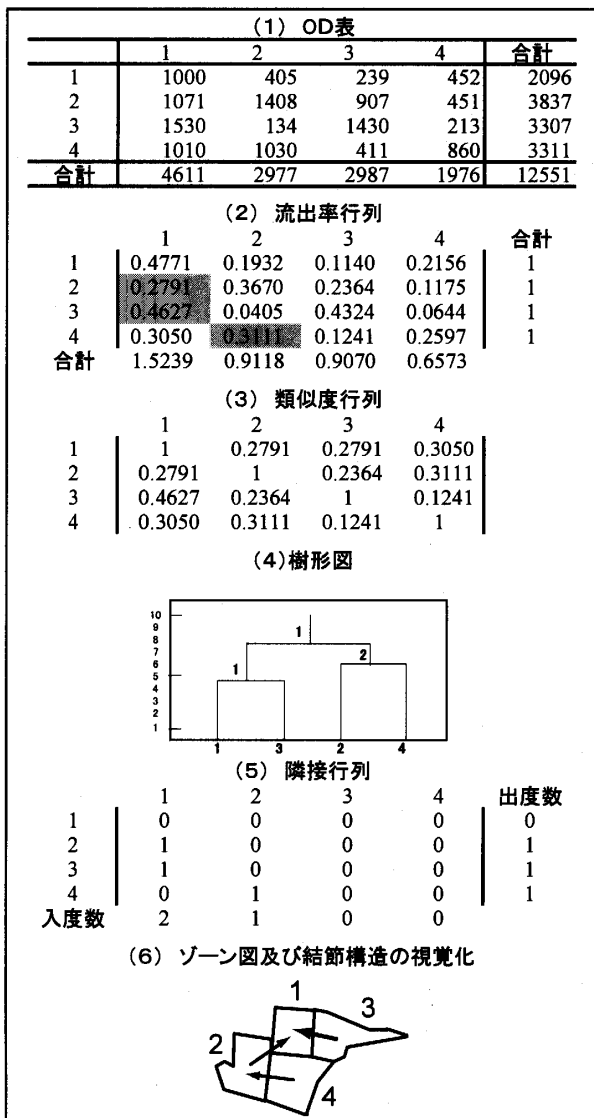


図5 結節構造視覚化手順の概要

成する。

手順3) 類似度行列 D を対象に樹形図が得られる階層的手法を用いたクラスター分析を行う。

手順4) クラスター分析においてクラスター同士が順次融合される過程及び流出率の値を基に、隣接行列 L を作成する。行列の各要素は、地点間に結合関係があれば1、そうでないとき0を取る。

手順5) 隣接行列 D において1を取る地点 ij 間、すなわち依存程度が高い地点間の i から j 方向に対して結合関係の図示化を行って結節構造の視覚化を行う。

なお、手順4)の隣接行列作成手順の詳細については、文献[9]を参照されたい。

本稿においては、職住分布構造の変化等が通勤交通流動に及ぼす影響を把握するため、札幌市の通勤交通の3つの年次(1972, 1983及び1994年)を対象に結節構造の時系列的変化についても分析しているが、こ

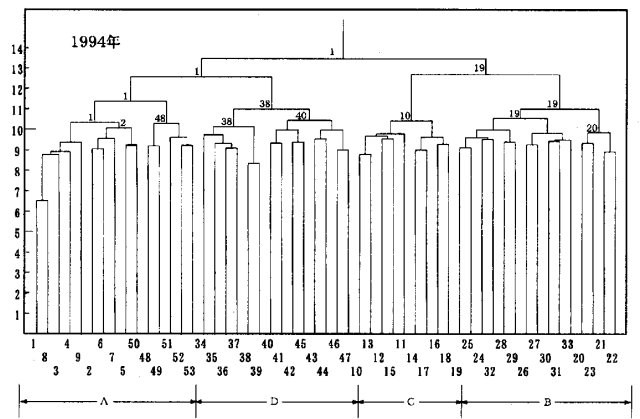


図6 1994年に対する樹形図

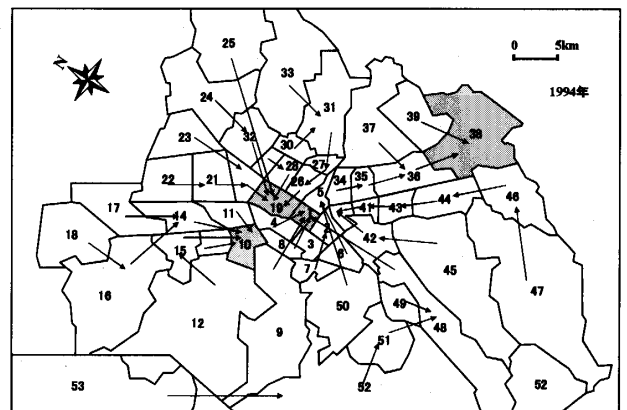


図7 1994年に対する結節構造

こでは1994年を中心に述べる。図7に示す53ゾーンにおける総通勤トリップ数606,116を対象に、ゾーン間の流出率を求めて流出率行列及び類似度行列を作成するとともに、クラスター分析を行った作成した樹形図(横軸:ゾーン番号)が図6である。また、流出率行列及び隣接行列を基に結節構造の視覚化を行った結果が図7である。

札幌市の従業地分布は、ゾーン1(総トリップ数に対する比率19.5%)を中心とした一極集中を呈している。このため、全体的にゾーン1へ向かった通勤交通流動パターンであるが、ゾーン1とは逆方向の副都心として創出されたゾーン38への流動パターン等についても樹形図及び結節構造から視覚的に把握することができる。また、図6において、樹形図を非類似度12で切ったとき53ゾーンは大きく4つのクラスター、すなわち4つの領域(図6のA, B, C, D)に分けることができる。

4.2 依存関係に対する視覚化手法について[10]

依存関係の場合は、交通流動の視点からみた地点間の依存関係を通して圏域及び中心都市等を視覚的に把

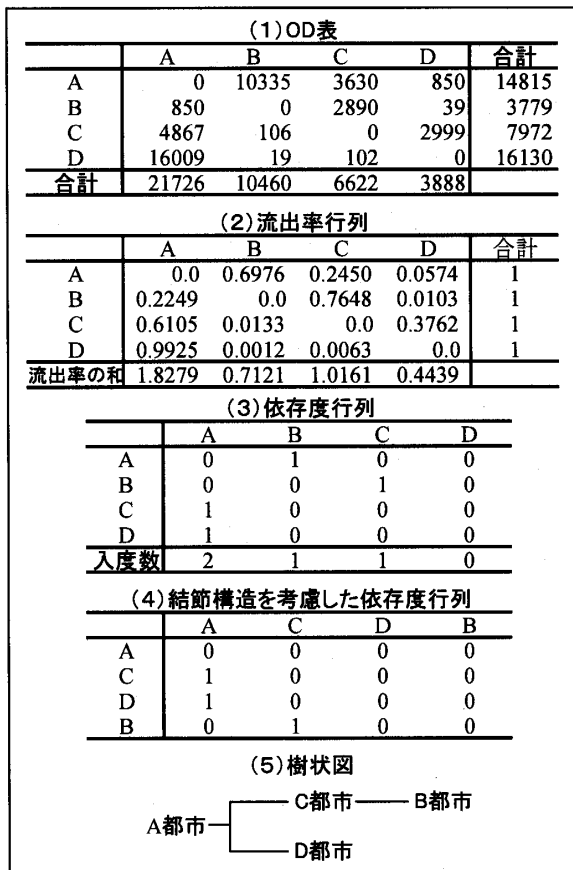


図8 結節構造視覚化手順の概要

握しようとするものである。このため、地点間の直接的連結性だけを考慮する直接連結法を基にした視覚化手法について考える。依存関係に関する視覚化手順は、以下のように大きく5つの手順となり、概要を図8に示した。

手順1) OD表から各地点間の流出率を求めて流出率行列Rを作成する。

手順2) 他の地点から当該地点への依存程度を求めるため、各列(地点)ごとに流出率の和を求める。

手順3) 各地点(各行)ごとに最大流出率の値を求めて、最大流出率を取る地点間を1に、他の要素を全て0とする依存度行列Qを作成する。

手順4) 他の地点からの依存程度を求めるために、依存度行列において各列(地点)ごとに入度数を求める。

手順5) 流出率の和及び入度数を基に結節構造を考慮した依存度行列を作成して、結節構造の視覚化を行うとともに樹状図も作成する。

なお、手順5)の結節構造を考慮した依存度行列の作成及び中心都市、圏域、圏域を構成する地点の設定等の詳細な手順については文献[10]を参照されたい。

本稿においては、自動車交通流動の視点からみた市

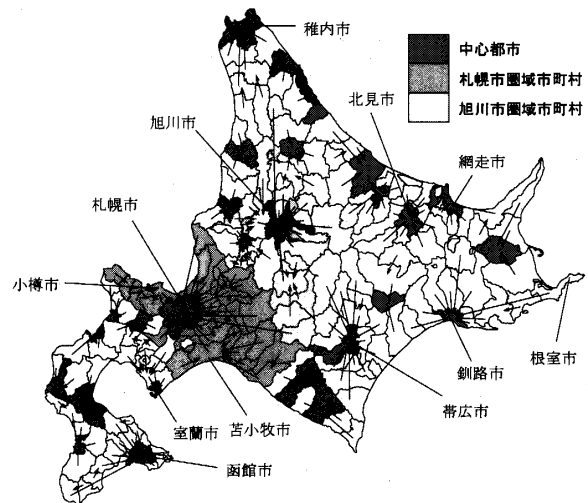


図9 1999年における結節構造

町村間の依存関係を把握するため、北海道208市町村間の2つの年次(1989及び1999年)の自動車OD交通を対象に結節構造の視覚化を試みたが、ここでは1999年を中心に述べる。図9に示す208市町村間の自動車OD交通を対象に、各市町村ごとに流出率及び最大流出率から流出率行列、依存度行列をそれぞれ作成するとともに各市町村の流出率の和及び入度数も求めた。

依存度行列を基にした各市町村の依存関係からなる市町村間の結節構造が図9である。図より圏域を構成している市町村及び規模等を視覚的に把握することができる。圏域(中心都市)は図9に示すように27圏域(都市)からなっており、流出率の和及び入度数の大きい市町村は、札幌市(13.17, 16)、旭川市(10.86, 12)、函館市(8.22, 11)等である。また、圏域を構成している市町村数は、札幌市の場合38市町村、旭川市22、函館市15等である。

5. おわりに

本稿においては、地点間の関係が行列として表現されている時間距離行列及びOD行列に対する視覚化手法についてそれぞれ考えた。行列の要素をすべて満足するように各地点を2次元空間上に再現することは不可能である。このため、前者は非類似度行列として、後者は類似度行列として、それぞれの特性を踏まえた視覚化手法について考えた。そして、北海道の高規格幹線道路網、札幌市の通勤交通及び北海道の自動車交通を対象に実証的分析を示した。

本稿における視覚化手法は、幾何学的手法、クラスター分析及びグラフ理論を基礎としたアルゴリズムを

考えたが、今後はよりシステマチックに地図化が図られる手法の開発が必要である。

参考文献

- [1] 吉本剛典,「全国主要都市間距離の地図化の試み」, 地理学評論, Vol. 54, No. 11 (1981), 605-620.
- [2] 清水英範,「時間地図の作成手法と応用可能性」, 土木計画学研究・論文集, No. 10 (1992), 15-29.
- [3] 清水英範, 井上亮,「時間地図作成問題の汎用解法」, 土木学会論文集, No. 765/IV-64 (2004), 105-114.
- [4] 榎谷有三, 田村亨, 齊藤和夫,「道路網を対象とした時間距離行列の視覚化」, 土木計画学研究・論文集, No. 12 (1995), 567-574.
- [5] 古藤浩,「時間距離網による都市連関構造の視覚化」, 1995年度第30回日本都市計画学会学術論文集, 553-558, 1995.
- [6] 榎谷有三, 浦田康滋, 田村亨, 齊藤和夫,「北海道の高規格幹線道路網を対象とした時間距離行列の視覚化」, 高速道路と自動車, 第40巻第6号 (1997), 32-40.
- [7] 藤日節夫,「交通変革と地域システム」, 古今書院, 1997.
- [8] 伊藤悟,「都市の時空間構造」, 古今書院, 1997.
- [9] 榎谷有三, 下夕村光弘, 田村亨, 齊藤和夫,「クラスター分析法による結節構造の視覚化に関する研究—札幌市の通勤交通を例として—1972-1983-1994—」, 2002年度第37回日本都市計画学会学術論文集, 97-102, 2002.
- [10] 合月孝, 榎谷有三, 加賀屋誠一, 齊藤和夫,「北海道における自動車交通流動特性について」, 土木計画学研究・論文集, No. 21 (2004), 449-456.
- [11] 榎谷有三, 浦田康滋, 浅水嘉敏, 田村亨, 齊藤和夫,「時間距離からみた北海道の市町村間自動車交通流動の特性について」, 土木計画学・論文集, No. 15 (1998), 583-591.