

# カルトグラムの作成手法と応用可能性 — 統計GISの発展と利活用に向けて\*

## Studies on New Cartogram Construction Algorithms and Their Applications -Towards Further Development and Utilization of Statistical GIS\*

清水英範\*\*・井上 亮\*\*\*

By Eihan SHIMIZU\*\*・Ryo INOUE\*\*\*

### 1. はじめに

近年、統計データの有効利用を目的に、国や地方自治体等の多種多様な統計データがWeb上に掲載され、無料もしくは安価に提供されるようになってきた。例えば、総務省統計局の「統計データ・ポータルサイト～政府統計の総合窓口～」(<http://portal.stat.go.jp/>)にアクセスすれば、政府機関のあらゆる統計データを検索でき、その多くを無償でダウンロードすることができる。

また、統計データをGISで管理・利用する、いわゆる統計GISは、GISの比較的簡単な応用として、従来から普及しているが、近年ではWebGISを利用した情報提供も進展している。これも統計局の施策であるが、「統計GISプラザ」(<http://gisplaza.stat.go.jp/GISPlaza/>)を利用すれば、誰でも簡単に、棒グラフ・円グラフ・コロプレスマップ等の視覚化手法を用いて、統計GISのデータを閲覧できるようになっている。

このように、一般市民や研究者が、多種多様な統計データを簡単に入手し、これらをGISの種々の機能を通して視覚化しながら、国土や地域の実態を容易に把握・分析することが可能な環境が整ってきた。

しかし、現在のGISに実装されている統計データの視覚化手法は、グラフ表示やコロプレスマップなど、紙地図以来の伝統的な手法に限定されている。先に述べた、統計データの提供に関わる近年の革新的な動向は、統計データを広く国民に提供し、利活用を図るべきという世論の高まりや、これに呼応した行政の前進、そして、インターネットに代表される情報通信技術の進展によるところが大きい。GISによる統計データの視覚化手法そのものは、決して進化は遂げていない。

統計GISの発展と利活用を考えると、多くの国民が統計データに関心をもち、また、統計データを通して地域の社会経済状況を探ることに興味を見出せるような企

てが重要であろう。そのためには、統計データの視覚化手法についても、これまでとは異なる斬新な方法を探っていくことが必要ではないだろうか。

筆者らは、このような問題意識のもとに、従来から一部の研究者には関心を持たれながらも、未だ十分に実用に足りうる確立した手法が提示されるには至っていないカルトグラム(cartogram)という視覚化手法の潜在的な魅力と可能性に着目した。

カルトグラムは、主に計量地理学やORの分野で研究が行われてきた視覚化手法であり、地図を取って変形させることにより、統計データの空間分布の特徴を視覚化するものである<sup>1,3)</sup>。統計データが示す国土や地域の実態、地域間格差を印象的に表現することが可能である。

地図を変形させる方法により、カルトグラムは距離カルトグラム(distance cartogram)と面積カルトグラム(area cartogram)に分けられる。距離カルトグラムは、都市間の交通所要時間などの地点間の統計データを、地図上の地点間距離の長短で表現するものであり、面積カルトグラムは、行政区域の人口などの地域の統計データを、地図上の地域の面積の大小で表現するものである。

従来の統計データの視覚化手法は、地理的な地図の上に色やグラフによって表現する方法であるのに対し、カルトグラムは地理的な地図そのものを変形させる方法である。地図の変形によって、見る者に新鮮な驚きを与え、これにより、統計データの特徴を印象的に伝えることを試みる。既成概念を超えた魅力がここにある。

筆者らは、GISがこれだけ発展、普及しても一向に変わらない統計データの視覚化手法に対し、カルトグラムがその閉塞感を破る、何らかの突破口を開いてくれるのではないかと期待している。カルトグラムの作成は、統計GISの存在を前提とするならば、原理的に、それ以外のデータを必要としない。実用性の高い手法さえ開発されれば、間違いなく、統計GISの視覚化手法の1つとして広く活用される方法になると考える。

本論文は、筆者らが考えるカルトグラム作成のための基本的な方針を示し、これに基づき、距離カルトグラム、面積カルトグラムのそれぞれについて、実行可能性の高い作成手法を提示するものである。

\*キーワード：カルトグラム、視覚化、統計GIS

\*\*正員、工博、東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻  
(東京都文京区本郷7-3-1、TEL03-5841-6126、FAX03-5841-7453)

\*\*\*正員、博(工)、東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻  
(東京都文京区本郷7-3-1、TEL03-5841-6129、FAX03-5841-7453)

## 2. カルトグラム作成に共通する課題と

### 本研究における基本的な方針

カルトグラム作成は、与えられた統計データを地図上の地点間距離や地域面積で表現するように地理的な地図を変形させる問題である。したがって、カルトグラムの作成は、ある種の最適化の問題である。しかし、このような地図変形は無数に存在するため、最適解を一意に見出すことはできない。例えば、四辺形ネットワークのリンクに与えられた地点間距離を再現する地点配置は無数に存在するし、多角形の地域に与えられた面積を再現する地域形状もまた無数に存在する。すなわち、カルトグラム作成問題は基本的に不良設定問題であり、最適化過程に何らかの正則化条件を設定する必要がある。

カルトグラムは、地理的な地図との比較を通して、統計データの特徴を認識する手法である。カルトグラムが比較の対象となる地理的な地図から不必要に大きく変形している場合、見る者はその変形が意味するところを容易に解釈できないため、視覚化手法として満足に機能しない。そのため、統計データの大小の表現とは無関係な地図形状の変形を極力排除すべきである。換言すれば、このような条件を、カルトグラム作成問題の正則化に利用することが有効である。

このように、カルトグラムの作成は正則化を必要とする最適化過程であり、また、一般には非線形の最適化過程になるであろう。そこには、変数の初期値設定や正則化のためのパラメータ設定などについて、試行錯誤的な作業が少なからず発生する。カルトグラム作成の実用化と普及を図るためには、このような作業負担をいかに軽減し、操作性の高い手法を構築するかが大きな課題となる。作成手法から試行錯誤的な作業を極力排除し、仮に必要であっても、その作業過程を分かりやすくしておくことが必要である。そのためには、少なくとも、作成手法の全体像を概念的にも数学的にも、可能な限り単純かつ明快にしておくことが望ましい。

距離カルトグラム、面積カルトグラムに共通する以上のような課題を念頭におき、また、後述する既往研究の問題点を踏まえ、本研究では、カルトグラム作成に向けての基本的な方針を以下のように設定する。

- (1) 作成手法の全体像を単純かつ明快にするために、カルトグラム作成問題を最小二乗法で記述する。
- (2) 不必要な地図変形を抑制するために、カルトグラム上の地点間の座北方位角を、地理的地図上の方位角に可能な限り近づけるという正則化条件を導入する。
- (3) 以上の基本的な方法論に基づき、距離・面積カルトグラムの双方について、変数の初期値や正則化のパラメータの設定に関する試行錯誤を極力排除、あるいは簡便化した、操作性の高い手法を追求する。

## 3. カルトグラム作成手法の既往研究

### (1) 既往の距離カルトグラム作成手法

地点間の所要時間や旅行費用など地点間の近接性に関する統計データを、地図上の距離で表すように地点を配置する距離カルトグラムは、地理的地図との比較や、時系列の距離カルトグラムの比較によって、統計データの地域間格差や時代変遷を視覚的に示すことができる。この代表例は、地点間所要時間を尺度として地点配置を定める時間地図であり、これまで主に時間地図作成手法として研究されてきた。

この作成は、地点間に近接性データが与えられている対象地点を平面上にいかにか配置するかという問題<sup>4)</sup>である。従来のアプローチは、2つに大別できる<sup>5)</sup>。

1つは、対象地点全ての2地点間に与えられた近接性データを再現しようとする方法である。本稿では、完全ネット型距離カルトグラムと呼ぶ。この作成には一般に多次元尺度構成法(MDS)が適用される<sup>6,9)</sup>。回転・平行移動を拘束すれば、適当な最適基準のもとで地点配置(地図形状)を一意に求めることが可能で、数学的に明快な作成手法である。交通所要時間の変遷をMDSによって視覚化し、地域構造変化の分析へと応用する研究もこれまでに数多く見られる<sup>5, 10-14)</sup>。しかし、MDSでは全地点間の近接性データを再現しようとするため、対象地点数が多い場合、局所的に再現精度が著しく低下し、違和感のある地点配置が得られる場合がある。

もう1つは、鉄道網や道路網などを参考に対象地点を結ぶ連結ネットワークを設定し、このネットワーク上のリンクに与えられた地点間の近接性データのみを再現する方法である。本稿では、部分ネット型距離カルトグラムと呼ぶ。地理的に近接する都市間や大都市間等の人々が注目する近接性データを精度よく再現することが可能である。もちろん、リンクが定義されない地点間の近接性データは一切無視されるため、全ての近接性データについて効果的とはいえないが、一般的には違和感の少ない地図形状が得られる。しかし、2. で述べたように、部分ネット型距離カルトグラムは、近接性データだけでは必ずしも地図形状を確定することはできない。既往研究<sup>15-18)</sup>は、様々な状況に対してそれぞれ対応方法を用意するという個別問題解決型の複雑な手順構成になっており、数学的に明快な解法とはなっていない。

### (2) 既往の面積カルトグラム作成手法

地域の統計データを地図上の地域面積の大小で表現する面積カルトグラムは、地理的地図を変形し地域の隣接関係を保持しながら統計データを表現する連続面積カルトグラムと、隣接関係を捨象し簡略的に表現する非連続面積カルトグラムの2種類に大別される<sup>2,3, 19-21)</sup>。

まず、連続面積カルトグラムに関しては、Tobler<sup>22-24</sup>が初めて計算機を用いた作成手法を提案して以来、様々な手法が提案されてきた。初期の作成手法<sup>22-28</sup>は、地図変形の抑制が十分に考慮されていなかったため、統計データによっては過度の変形を引き起こし、地理的地図との比較対照が難しく視覚的に分かりにくい地図形状を出力することが多く見られた。

この問題を踏まえ、Kocmoud・House<sup>29</sup>やKeimら<sup>30-32</sup>は、地図変形の抑制を考慮し視覚的に優れた地図作成を目指す手法を提案している。しかし、これらのアルゴリズムは複雑で、多くの地図形状制御用の変数を設定する必要があるため、操作が難しい。また、出力地図形状がこれらの変数値に強く依存するため、不適切な設定では統計データを低精度で表現する連続面積カルトグラムしか作成できないという問題がある。

また、数学的に明快な作成手法を構築するという観点から、Gastner・Newman<sup>33</sup>は拡散方程式を応用した手法を提案している。複雑な操作を要せずに連続面積カルトグラムを作成できるが、初期の作成手法と同様に地図変形が大きく、必ずしも視覚的に分かりやすい地図作成ができるとは限らない。

このように既存作成手法は、視覚的に優れた地図作成と作成手法の操作性を両立しておらず、実用的ではない。結果として、これらの作成手法がソフトウェアとして提供されている例<sup>34, 35</sup>は少なく、またこれらのソフトウェアは視覚的に分かりやすい連続面積カルトグラムを作成できる訳ではないのが現状である。

一方、非連続面積カルトグラムに関しては、各地域形状を統計データに合わせて拡大・縮小し、適宜配置する単純な方法<sup>36</sup>が提案されていた。近年、隣接関係に加えて地域形状も捨象して各地域を円で描き、それらの円の面積で統計データを表現するサークルカルトグラムが提案<sup>2, 19</sup>され注目を浴びている。作成手法が簡潔で操作が容易なため、様々な統計データの視覚化に活用されている<sup>37-41</sup>ほか、GeoDa<sup>42, 43</sup>などのソフトウェアに実装されるなど、広く利用され始めている。

一般に、地域重心など地図上の地理的な位置に統計データに合わせた円を配置すると、面積は狭いが統計データは大きい地域の円は周辺地域を表す円と重なり、重なりを解消するよう面積縮尺を定めると統計データが小さい地域の円は判読できないということがしばしば生じる。そこでDorling<sup>2, 19</sup>は、重なりを解消するように円を移動するが、隣接地域を表す円同士は可能な限り接して配置することを指針とした作成手法を提案した。しかし、明確な目的関数を持たずに、逐次、円を移動し重なりを解消しようとするため、地域の全体的・局所的な地理的位置関係を損ない、分かりにくいカルトグラム作成を行う可能性が大きい。

#### 4. 距離カルトグラム作成手法の提案

##### (1) 基本的な考え方

距離カルトグラム作成手法の構築に当たり、基本的な考え方について述べる。

まず、本章では部分ネット型距離カルトグラム作成の数学的な解法の構築を目指す。完全ネット型距離カルトグラムは、全ての対象地点間に近接性データを与えた部分ネット型距離カルトグラムの特殊形といえるので、部分ネット型の数学的な解法を用意すれば、それは距離カルトグラム作成の汎用解法になる。汎用解法があれば、完全ネット型と部分ネット型距離カルトグラムを適宜使い分けることができるばかりでなく、両者の利点を活かした折衷法的な応用も可能になる。

そこで2.の方針に従い、距離カルトグラム作成問題を最小二乗法で記述した上で、距離カルトグラム上の地点間方位角が地理的地図上の地点間方位角から変化するのを抑制する正則化条件を導入する。

まず、地点間の近接性データと方向に関する情報を与えれば、地点配置を一意に定められることを確認しておく。対象地点数が  $n$  のとき、1点をカルトグラム座標に固定するので  $n - 1$  地点の  $x, y$  座標が未知変数となり、その数は  $2(n - 1)$  である。一方、観測方程式数はネットワーク形状によって異なるが、1リンクあたり「距離」と「方向」の2つの観測が存在する。そのため、例えば図-1(a)のようなリンク数が最小のネットワークにおいても、未知変数と同数の  $2(n - 1)$  の観測方程式が存在し、一意な地図形状を得ることができる。

次節では、距離カルトグラム作成問題の定式化を行い、完全ネット型・部分ネット型双方の距離カルトグラム作成が可能な汎用解法の提案を行う。

##### (2) 距離カルトグラム作成の汎用解法の構築

地点  $i, j$  を結ぶリンク  $ij$  の近接性データ  $p_{ij}$  をカルトグラム上の地点間距離で表す距離カルトグラム作成問題は、地点  $i$  のカルトグラム座標を  $(x_i, y_i)$ 、近接性データが与えられたリンクの集合を  $L$  とし、また表記上の都合から  $x_{ij} = x_j - x_i$ 、 $y_{ij} = y_j - y_i$  と表記すると、式(1)の非線形最小二乗問題で表せる。

$$\min \sum_{ij \in L} \left( p_{ij} - \sqrt{x_{ij}^2 + y_{ij}^2} \right)^2 \quad (1)$$

地点間の方位角変化を抑制する正則化項は、正則化

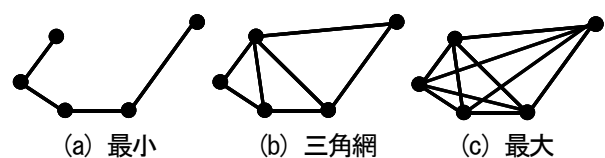


図-1 ネットワークの形状によるリンク数の違い

項の重みパラメータを  $\mu$ 、地点  $i$  の地理座標を  $(x_i^G, y_i^G)$ 、地点  $ij$  間の地理的距離を  $d_{ij}^G$  とすると、式(2)で表せる。

$$+\mu \sum_{ij \in L} \left\{ \left( \frac{x_{ij}^G y_{ij}^G - x_{ij}^G y_{ij}^G}{d_{ij}^G} \right)^2 \right\} \quad (2)$$

すなわち、距離カルトグラム作成問題は式(3)の非線形最小二乗問題で表せる。

$$\min \sum_{ij \in L} \left[ \left( p_{ij} - \sqrt{x_{ij}^2 + y_{ij}^2} \right)^2 + \mu \left( \frac{x_{ij} y_{ij} - x_{ij} y_{ij}}{d_{ij}^G} \right)^2 \right] \quad (3)$$

ここで、距離カルトグラム上の地点座標  $(x_i, y_i)$  に近似値  $(x'_i, y'_i)$  を与え、式(3)を近似値近傍で線形化する。

$$\min \sum_{ij \in L} \left[ \left( p_{ij} - \frac{x'_{ij} x_{ij}}{d'_{ij}} - \frac{y'_{ij} y_{ij}}{d'_{ij}} \right)^2 + \mu \left( \frac{y'_{ij} x_{ij}}{d'_{ij}} - \frac{x'_{ij} y_{ij}}{d'_{ij}} \right)^2 \right] \quad (4)$$

式(4)の  $x'_{ij}/d'_{ij}$ 、 $y'_{ij}/d'_{ij}$  は、それぞれ距離カルトグラム上のリンク  $ij$  の座北方位角の正弦・余弦の近似値である。距離カルトグラム上のリンク  $ij$  の座北方位角の近似値を  $\theta'_{ij}$  と表すと、式(5)と書ける。

$$\min \sum_{ij \in L} \left[ \left( p_{ij} - x_{ij} \sin \theta'_{ij} - y_{ij} \cos \theta'_{ij} \right)^2 + \mu \left( x_{ij} \cos \theta'_{ij} - y_{ij} \sin \theta'_{ij} \right)^2 \right] \quad (5)$$

ところで一般的に、 $\mu$  は  $\mu > 0$  の領域で解の安定性を損なわない範囲で小さく設定し、収束速度の高速化を図る。しかし、ここで  $\mu = 1$  と固定すると、式(6)のように  $x, y$  軸方向で独立の線形最小二乗問題に帰着し、解法を簡便化・高速化することができる。この計算量の削減効果等の詳細は、清水・井上<sup>4)</sup>を参照されたい。

$$\min \sum_{ij \in L} \left[ \left( p_{ij} \sin \theta'_{ij} - x_{ij} \right)^2 + \left( p_{ij} \cos \theta'_{ij} - y_{ij} \right)^2 \right] \quad (6)$$

式(6)では、独立に求めた地点の  $x, y$  座標で座北方位角の近似値  $\theta'_{ij}$  を更新しながら繰り返し計算すると、距離カルトグラム上の地点配置を求められる。なお本稿では以降、式(6)の解法を提案解法と記載する。

提案解法では、変数の初期値設定や正則化項の重みパラメータ設定に試行錯誤を要さず、各リンクの地理的地図上における座北方位角を与えるだけで距離カルトグラムを作成することができる。座北方位角は統計GISに格納されている地点の地理的地図座標から求められるので、完全にこの設定を自動化することができる。また、距離カルトグラム上のリンクの方向が地理的地図上の方向の近くで表現されるため、地理的地図形状からの無用な変形を排除でき、地理的地図との比較が行いやすい距離カルトグラムを作成することが可能である。

このように提案解法は、変数の初期値設定などが不要で、計算時間が短く、かつ地理的地図との比較が容易な距離カルトグラム作成が可能であり実用性が高い。これらの特徴について、次節以降で確認する。

### (3) 提案解法の適用と評価

提案解法を用いて完全ネット型・部分ネット型距離カルトグラムを作成し、解法の適用可能性を検討する。

国土交通省のデータベースTRANETから1965・75・85・95年の都市間(生活圏間)鉄道所要時間データを用いて、所要時間を尺度とした距離カルトグラムを作成する。対象地点は81都市、完全ネット型では3240リンク、部分ネット型では109リンク(図-2)の所要時間データを表現する。また、全リンクの方位変化が0.01rad以下を収束判定条件とした。

1965年の完全ネット型・部分ネット型距離カルトグラムの作成結果を図-3に示し、その適合度指標として所要時間データと距離カルトグラム上の距離の相関係数・KruskalのSTRESS2<sup>45)</sup>を、またCPU Pentium4 1.8GHzの計算機による計算時間を示す。但し、部分ネット型距離カルトグラムでは、図-2上のリンクの所要時間データと距離カルトグラム上の距離の適合度を表す。

まず、完全ネット型・部分ネット型距離カルトグラムの双方を作成できることを確認した。

完全ネット型距離カルトグラム(図-3(a))は、所要時間データと距離カルトグラム上の距離の相関係数は0.995、STRESS2は0.101であり、所要時間データを十分に再現している。

部分ネット型距離カルトグラム(図-3(b))では、相関係数は1.000、STRESS2は非常に小さく、所要時間データをほぼ完全に再現している。距離カルトグラム上のリンクの方向を地理的地図上の方向の近傍で表現しているため、地理的地図に比較的近い地図形状を持った距離カルトグラムを作成できた。

完全ネット型、部分ネット型距離カルトグラムの作成例を示したが、これらは決して分かりやすいとは言えない部分がある。ここでは、2種類の距離カルトグラム

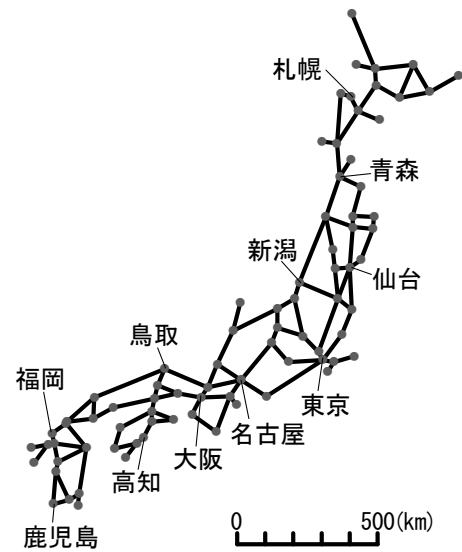


図-2 距離カルトグラム作成対象ネットワーク

が必然的に持つ限界について述べる。

完全ネット型距離カルトグラム(図-3(a))では、全地点間の所要時間データを高精度で表現しているものの、局所的には問題が多い。北海道・四国・九州等の周辺部は大きく変形し、見づらい地図になっている。特に、四国は、本州・九州等の東西両方向からの所要時間データを表現しようとするためほとんど一直線上に配置されてしまい、四国内の所要時間の表現精度が低下する。四国内の所要時間データと距離カルトグラム上の距離の相関係数は0.666であり、全体(相関係数 0.995)と比較すると著しく低い。このように、完全ネット型距離カルトグラムでは、全体的な傾向を示すことは可能だが、局所的には所要時間データを十分に再現できない場合がある。

一方、部分ネット型距離カルトグラム(図-3(b))は、地理的地図上の地図形状を大まかに維持しており、全体として視覚的に理解しやすい。また、所要時間データを正確に再現している。しかし、直接リンクが設定されていない地点間の所要時間データは考慮されないため、これに伴う問題が生じている。例えば、四国・九州間は所要時間が長いにも関わらず、非常に近接して描かれている。このように、部分ネット型距離カルトグラムは、交通整備がなされていない海峡部や広域の閉鎖湾域が対象地域に含まれる際には、適用に十分な注意を要する。

なお、ここで述べた問題点は、完全ネット型・部分ネット型距離カルトグラムが一般的に持つ限界であって、提案解法の限界ではないことに留意されたい。

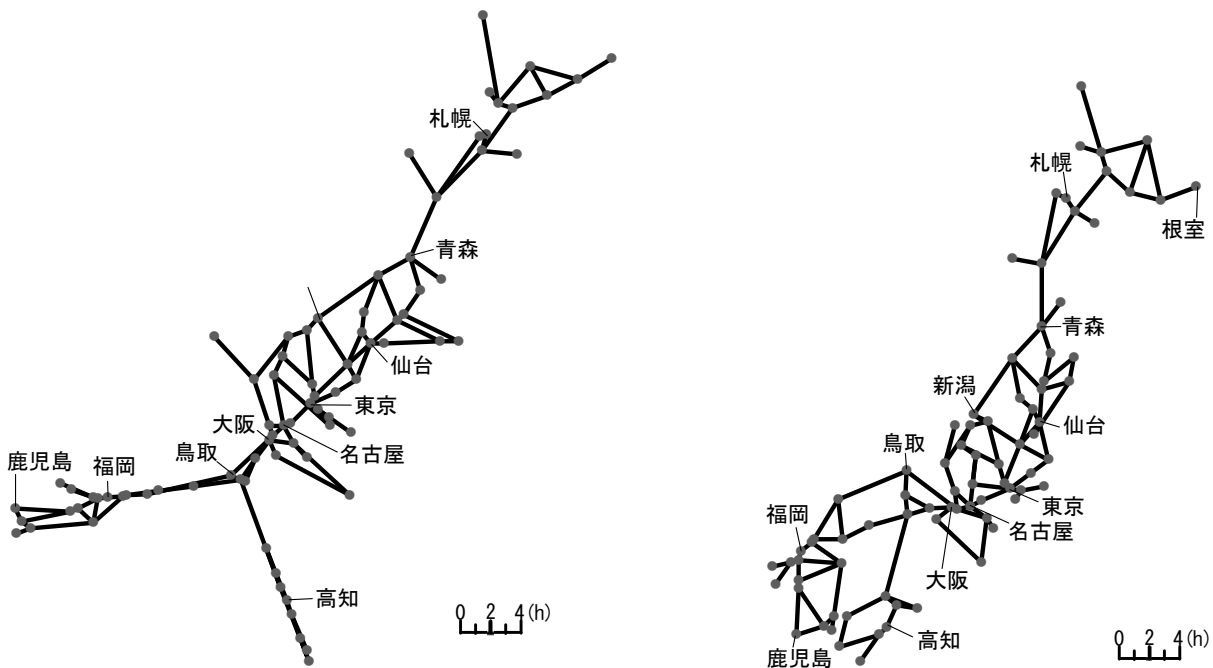
筆者らによる提案解法は、完全ネット型・部分ネット

型の双方に適用可能な汎用解法であり、両者の折衷法的な応用を可能にする。

完全ネット型距離カルトグラムでは、局所的にデータの表現精度が極端に低下する問題が生じたが、汎用解法では、所要時間が極端に長いリンクを削除し、完全ネット型距離カルトグラムの問題を、リンク数が多いながらも部分ネット型距離カルトグラムの問題に置き換えて再計算するといった対応が可能である。また、部分ネット型距離カルトグラムでは、四国と九州が極端に近く配置される問題が生じたが、汎用解法では、四国・九州間に仮想的なリンクを設定して完全ネット型の所要時間(宇高連絡船、関門トンネルを経由する所要時間)を与え、よりリンク数の多い部分ネット型距離カルトグラムの問題に置き換えるといった対応が可能である。

また、提案解法は、線形最小二乗問題の繰り返し計算による解法であるため、重み付き線形最小二乗問題による解法に容易に拡張できる。すなわち、地点間の所要時間の再現精度に重みを与えることができ、上記のような折衷法的な対応をさらに柔軟に適用することが可能になる。なお、言うまでも無く、完全ネット型距離カルトグラムを重み付き最小二乗問題で解く場合、重みをゼロとするリンクを設定することにより、完全ネット型距離カルトグラムを部分ネット型距離カルトグラムに変更することができる。

次節では、提案解法の個別問題への応用例を提示し、その有効性を確認することにより、筆者らによる提案解法の意義をより明確に示すこととする。



(a) 完全ネット型  
(相関係数:0.995、STRESS2:0.101、計算時間:0.89 秒)

(b) 部分ネット型  
(相関係数:1.000、STRESS2:0.007、計算時間:0.14 秒)

図-3 1965年鉄道所要時間距離カルトグラム

(4) 提案解法の実用

完全ネット型・部分ネット型距離カルトグラムの限界を踏まえ、以下に示す折衷法的な応用により、1965年の鉄道所要時間距離カルトグラムの作成を再実行した。

ここでは、完全ネット型距離カルトグラムを重み付き最小二乗法で解く。まず、所要時間が20時間を超えるリンクの重みをゼロと設定した。すなわち、これらのリンクを削除し、部分ネット型距離カルトグラムの問題に変更した。なお、東京起点では、終点が札幌から鹿児島までのリンクは所要時間20時間以下である。完全ネット型の3240リンクのうち、20時間を超える955リンクが削除されたが、主要都市間のリンクの大半が計算対象に含まれている。次に、残されたリンクのうち、図-2のネットワークに示される各リンクの重みを1に、それ以外のリンクの重みを0.02として計算を実行した。なお、重みの大きさは、視覚的に分かりやすい距離カルトグラムとなるよう試行錯誤の上、決定した。

簡単に言えば、基本的には図-2のリンクの所要時間を精度良く再現することを目指す。これらのリンク以外の地点間所要時間についても、極端に大きくない限り、少しは考慮するという方針をとったということである。これにより、局所的な(例えば、四国内の)再現精度と広域的な(例えば、四国・九州間の)再現精度をバランスさせることを目指した。

以上の折衷法的応用による作成結果を図-4(a)に示す。図-3(b)の部分ネット型距離カルトグラムとの比較のため、これと同じネットワーク(すなわち図-2)だけを表示している。重みを1とした図-2のネットワーク上のリンクは、所要時間データと距離カルトグラム上距離の相関係数が0.999とほぼ正確に表現されている。また、全地点間の所要時間データとカルトグラム上距離

の相関係数は0.964と全体傾向を表していることが分かる。また、局所的に所要時間再現精度が著しく低い地域も見られず、視覚的にも理解しやすい地図が得られた。

このように、筆者らの提案解法は、リンクの削除や重視するリンクの指定が自由に行えるため、ユーザーの距離カルトグラム作成の目的に応じて、柔軟に対応が可能な視覚化手法である。

次に、交通整備水準の経年変化を効果的に視覚化する。

時系列比較を行う場合には、前後の( $t$ 期と $t+1$ 期の)距離カルトグラムとの比較を容易にする必要がある。そこで、 $t+1$ 期の距離カルトグラムの作成の際には、 $t$ 期の距離カルトグラム上での対象地点間の座北方位角を初期値として与えるのが適当である。これにより、交通条件の変化以外の距離カルトグラム間の変形を抑え、時系列的な比較が容易になる。

1975・85・95年の鉄道所要時間データを使用して作成した距離カルトグラムを、図-4(b)(c)(d)に示す。但し、1965年時点で所要時間が20時間以下の2285リンクを計算対象にしている。初期値には、前期の距離カルトグラム上の座北方位角を与えた。

図-4では、鉄道整備が進むにつれて、所要時間が短縮してきた様子が表現されている。距離カルトグラム間のリンクの方向変化が小さいため、各リンクの所要時間変化が見やすく、距離カルトグラム間の比較が容易である。また、いずれの距離カルトグラムも、図-2のネットワークのリンクでは、ほぼ完全に所要時間を再現しており、また計算の対象とした地点間全体においても高い再現性を得た。

このように、距離カルトグラムを用いた表現を行うことによって、社会資本整備による所要時間短縮効果を効果的に視覚表現することが可能になる。

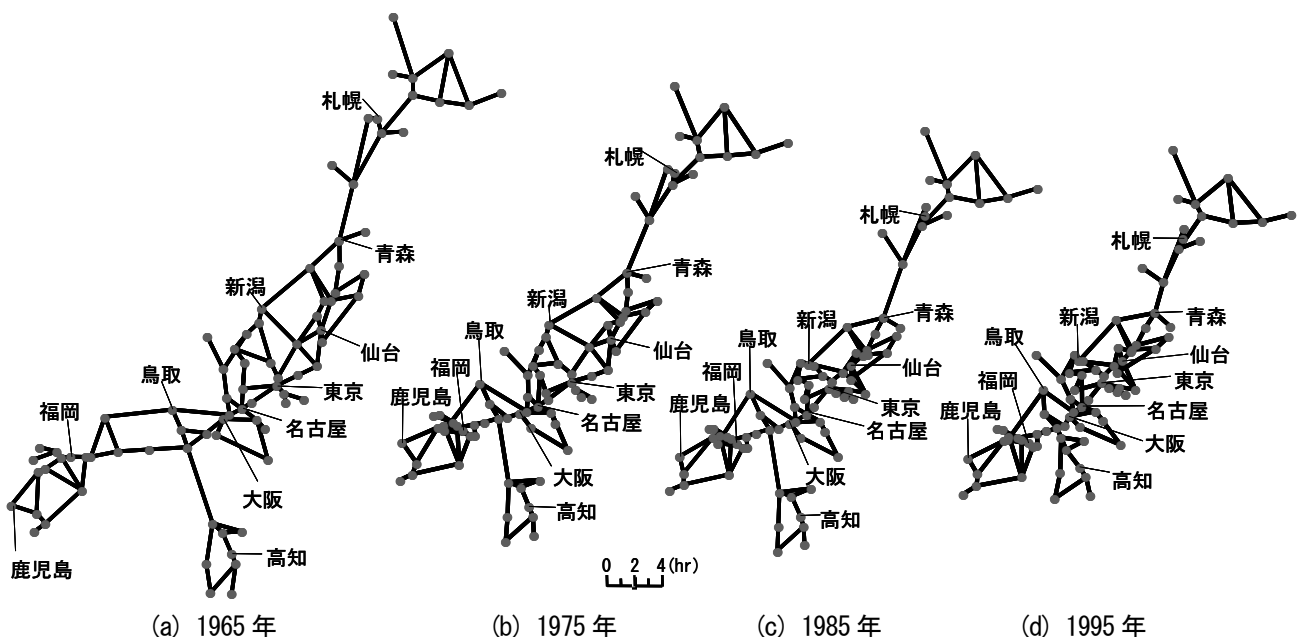


図-4 折衷法による日本の鉄道所要時間変遷の視覚化

(5) 提案した距離カルトグラム作成手法の特徴

本章のまとめとして、提案した距離カルトグラム作成問題の汎用解法の特徴を整理する。

① 完全ネット型・部分ネット型距離カルトグラムの双方に適用可能な汎用解法である。② 距離カルトグラム作成問題を正則化するため、距離カルトグラム上の地点間の方向に関する拘束条件として、その地点間の地理的地図上の方向を与える解法である。近接性データの再現を目的としない、地理的地図から距離カルトグラムへの無意味な変形を極力排除することができ、結果として、地理的地図との比較対照が容易になる。③ 簡単な線形最小二乗問題の繰り返し計算によって、きわめて高速に解を得ることができる。④ 繰り返し計算に必要な初期値は、地理的地図上の地点座標から自動的に計算される座北方位角だけであり、実質的には初期値を必要としない方法である。⑤ 重み付き最小二乗問題への拡張により、完全ネット型・部分ネット型の折衷的な応用が可能であり、ユーザーが対象とする個々の距離カルトグラム作成問題に柔軟に対応することができる。

5. 連続面積カルトグラム作成手法の提案

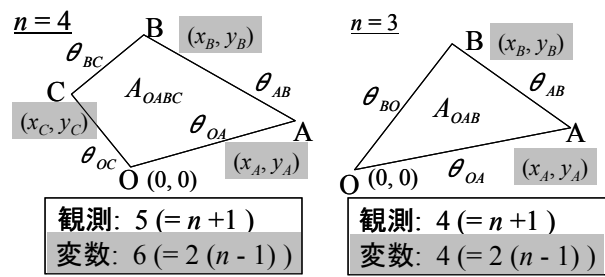
(1) 基本的な考え方

連続面積カルトグラム作成手法の構築に当たり、基本的な考え方について述べる。

2. の方針に基づき、連続面積カルトグラムの地域の辺の方位角変化を抑制する正則化条件を導入する。もし、辺の方位角変化抑制に対して極端に大きな重み付けを行うと、地理的地図からの拡大・縮小のみを許すことになり、地図形状を完全に維持した変形が可能である。

しかし、辺が 4 本以上の多角形では、面積と各辺の方位角の情報を与えても未知変数が観測方程式より多いため、地図形状を一意に定めることができない(図-5)。もちろん、地域の辺だけに方位角変化を抑制する条件を導入するのではなく、地域の全頂点間の方位角に対してその変化を抑制する条件を設定すれば、十分な観測方程式数が得られ、地図形状を一意に定めることが可能である。しかし、全頂点間の方位角変化抑制を行う正則化は、辺の数を  $n$  とすると観測方程式数は  $nC_2$  となり、辺の数が大きい多角形では正則化項が膨大となる。そのため、この正則化項の導入は、収束速度の低下や計算時間の爆発的な増加が予想される。

一方、三角形の場合、面積と辺の方位角変化抑制のみで観測方程式と未知変数の数が等しくなり、一意な地図形状が得ることができる(図-5)。すなわち、連続面積カルトグラム作成問題の正則化には、地域の全頂点間の方位角を考慮する必要はなく、地域を三角網分割し、三角網上の辺の方位角変化を抑制する条件を導入すれば



但し、 $A_{OAB}$ : 多角形 OAB の面積、  
 $(x_A, y_A)$ : 頂点 A の座標、 $\theta_{OA}$ : 辺 OA の方位角

図-5 面積・方位角と頂点座標の関係

十分である。地域を三角網に分割した上で三角形にデータを割り振り、また三角網上の各辺の方位角変化を抑制する条件を導入する場合、未知変数の数は 1 点を座標系に固定するため  $(\text{頂点数} - 1) \times 2$ 、観測方程式数は  $(\text{三角形数}) + (\text{辺数})$  となるため、三角網では常に  $(\text{未知変数数}) \leq (\text{観測方程式数})$  が成り立つことが確認できる。

また、地域の三角網分割は、面積計算が容易になるという利点を備えている。そのため、三角網分割を前提として作成手法を構築すると、作成アルゴリズムやそれを実装するプログラムをより簡潔に記載することが可能になる。また、後述するが、連続面積カルトグラム作成計算時には、頂点の移動によって生じる地域形状の位相破壊が問題となる。三角網分割を前提とすると、位相破壊の有無を簡単に判定することも可能である。

そこで本研究では、地域を三角網分割して統計データを各三角形に按分をすることを前提とし、連続面積カルトグラム作成手法の構築を行う。按分されたデータに三角形の面積を合わせる問題を最小二乗法で表し、三角網上の辺の方位角変化を抑制する正則化項の導入を通して定式化を行う。

なお、地域の三角網分割には Delaunay 三角網分割<sup>46)</sup>を用いる。

(2) 連続面積カルトグラム作成手法の構築

頂点  $i, j, k$  からなる三角形  $t_{ijk}$  のカルトグラム上の面積  $A_{ijk}$  をデータ  $D_{ijk}$  に合わせる目的関数は、三角網を構成する三角形の集合  $T$  とすると、式(7)の最小二乗問題で表せる。

$$\min \sum_{t_{ijk} \in T} \left( 1 - \frac{A_{ijk}}{D_{ijk}} \right)^2 \quad (7)$$

三角網の辺の方位角変化を抑制する正則化項は、辺  $mn$  の地理的地図上の座北方位角を  $\theta_{mn}^G$ 、連続面積カルトグラム上の座北方位角を  $\theta_{mn}^C$ 、頂点  $mn$  を結ぶ辺を  $e_{mn}$ 、三角網の辺の集合を  $E$ 、正則化項の重みパラメータを  $\mu$  とすると、式(8)と書ける。

$$+\mu \sum_{e_{mn} \in E} (\theta_{mn}^C - \theta_{mn}^G)^2 \quad (8)$$

主問題(式(7))と正則化項(式(8))より、連続面積カルトグラム作成問題は式(9)と定式化できる。

$$\min \left[ \sum_{t_{ijk} \in T} \left( 1 - \frac{A_{ijk}}{D_{ijk}} \right)^2 + \mu \sum_{e_{mn} \in E} (\theta_{mn}^C - \theta_{mn}^G)^2 \right] \quad (9)$$

ここで、頂点  $m$  の連続面積カルトグラム上の座標を  $(x_m, y_m)$ 、地理的地点配置上の座標を  $(x_m^G, y_m^G)$  と表し、式(9)を頂点座標による表現に改める。

まず、連続面積カルトグラム上の三角形の面積  $A_{ijk}$  はその頂点  $i, j, k$  の座標を用いると、式(10)と表せる。

$$A_{ijk} = \frac{1}{2} \left| (x_j - x_i)(y_k - y_i) - (x_k - x_i)(y_j - y_i) \right| \quad (10)$$

絶対値記号を除くため、主問題(式(8))を式(11)と改め、

$$\min \sum_{t_{ijk} \in T} \left( 1 - \frac{A_{ijk}^2}{D_{ijk}^2} \right)^2 \quad (11)$$

式(11)に式(10)を代入すると、主問題は頂点座標を未知変数とする問題として記述できる(式(12))。

$$\min \sum_{t_{ijk} \in T} \left[ 1 - \frac{1}{4D_{ijk}^2} \left\{ (x_j - x_i)(y_k - y_i) - (x_k - x_i)(y_j - y_i) \right\}^2 \right]^2 \quad (12)$$

また、正則化項(式(8))は、

$$+\mu \sum_{e_{mn} \in E} \left\{ \arctan \left( \frac{x_n - x_m}{y_n - y_m} \right) - \arctan \left( \frac{x_n^G - x_m^G}{y_n^G - y_m^G} \right) \right\}^2 \quad (13)$$

と書けることから、

$$+\mu \sum_{e_{mn} \in E} \left\{ \frac{x_n - x_m}{y_n - y_m} - \frac{x_n^G - x_m^G}{y_n^G - y_m^G} \right\}^2 \quad (14)$$

とほぼ同値となる。計算上(分母)=0を避けるため、式(15)と改める。但し、 $d_{mn}$ は頂点  $mn$  間距離である。

$$+\mu \sum_{e_{mn} \in E} \left\{ \frac{(x_n - x_m)(y_n^G - y_m^G) - (x_n^G - x_m^G)(y_n - y_m)}{d_{mn} d_{mn}^G} \right\}^2 \quad (15)$$

以上より、連続面積カルトグラム作成問題は式(16)の非線形最小二乗問題で表すことができ、これを解くことにより連続面積カルトグラムを作成が可能である。

$$\min \left[ \sum_{t_{ijk} \in T} \left\{ 1 - \frac{\left\{ (x_j - x_i)(y_k - y_i) - (x_k - x_i)(y_j - y_i) \right\}^2}{4D_{ijk}^2} \right\}^2 + \mu \sum_{e_{mn} \in E} \left\{ \frac{(x_n - x_m)(y_n^G - y_m^G) - (x_n^G - x_m^G)(y_n - y_m)}{d_{mn} d_{mn}^G} \right\}^2 \right] \quad (16)$$

ここで、式(16)を連続面積カルトグラム上の頂点座標の近似値  $x'_i, y'_i$  の近傍で線形化する(式(17))。但し、表

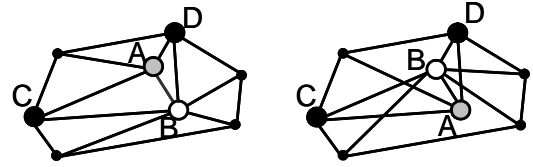


図-6  $\triangle ABC \cdot \triangle ABD$  の反転と三角網の位相破壊

記上の都合より  $x'_{ij} = x'_j - x'_i, y'_{ij} = y'_j - y'_i$  とし、三角形  $t_{ijk}$  の符号付き面積の近似値を  $A'_{ijk} = (x'_{ij}y'_{ik} - x'_{ik}y'_{ij})/2$  と記す。

$$\min \left[ \sum_{t_{ijk} \in T} \left\{ 1 + \frac{3A'_{ijk}{}^2}{D_{ijk}^2} + \frac{A'_{ijk}}{D_{ijk}^2} (y'_{jk}x'_i - y'_{ik}x'_j + y'_{ij}x'_k - x'_{jk}y'_i + x'_{ik}y'_j - x'_{ij}y'_k) \right\}^2 + \mu \sum_{e_{mn} \in E} \left\{ \frac{(x_n - x_m)y'_{mn} - x'_{mn}(y_n - y_m)}{d'_{mn}{}^2} \right\}^2 \right] \quad (17)$$

この式(17)の線形最小二乗問題の繰り返し計算によって連続面積カルトグラム作成が可能であるが、その際には、次の2点を考慮する必要がある。

- 全ての三角形の反転を防ぐ。
- 実用的な時間で計算するため、解法を高速化する。

これらは、正則化項の重みパラメータ  $\mu$  の大きさを制御することで解決できる。その詳細を以下に示す。

まず、 $\mu$  値が小さい場合、三角網の辺の方向変化が大きくなり、三角形の反転が生じる可能性が高くなる。三角形の反転とは、図-6の左図から右図への変形で、三角網ひいては地域形状の位相が破壊される。三角形の反転を防ぐためには、 $\mu$  値を大きく設定し、三角網の辺の方向変化に対する制約を大きくすることが望ましい。

一方、 $\mu$  値が大きい場合、収束速度が低下、収束計算回数・時間の増加を招く。また、収束計算過程で  $\mu$  を固定していると、式(17)の主問題(第一項)の値は収束計算毎に小さくなるため、相対的に正則化条件(第二項)が大きくなり、収束速度が低下する。式(17)は、1次収束する手法であるため、解の近傍では収束速度が低下し、収束計算に時間を要する。この方法を超1次収束させるためには、最適解近傍で  $\mu \rightarrow 0$  となるよう制御する必要がある<sup>47)</sup>。

三角形の反転を防ぎつつ、短時間で連続面積カルトグラム作成を行うためには、収束計算毎に三角形の反転が起こらない最小の  $\mu$  値を設定することが望ましいが、最適値を求めることは難しい。そこで、 $\mu$  の値を

$$\left\{ \sum_{t_{ijk} \in T} (D_{ijk} - A_{ijk})^2 / \sum_{t_{ijk} \in T} (D_{ijk} - A'_{ijk})^2 \right\} \mu \quad (18)$$

に基づき減少させながら収束計算を行い、三角形の反転が観測された場合には  $\mu$  を増加させて再計算を行い、



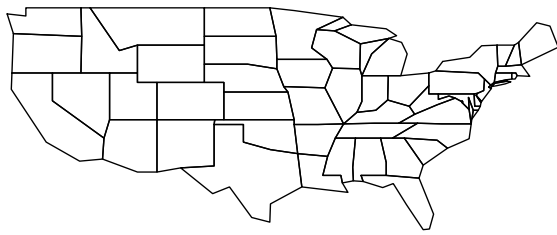


図-7 入力したアメリカ合衆国 州形状データ

表-1 1980年アメリカ人口連続面積カルトグラム  
作成収束計算回数・計算時間・RMSE

$\mu$ 初期値	1	$\sqrt{10}$	10
収束計算(回)	19	28	101
計算時間(秒)	5.0	7.5	23.8
RMSE(人)	25.5	2.1	8.3

表-2 1980年アメリカ人口連続面積カルトグラム  
ヘルマート変換自由度修正済み決定係数

$\mu$ 初期値	1	$\sqrt{10}$	10
国形状	0.907	0.917	0.908
州形状	最小値	0.170	0.895
	中央値	0.998	0.999
	標準偏差	0.141	0.022

(但し、CPU Pentium4 2.8GHz 使用)

三角形反転の防止、および、計算時間の短縮を図る。なお、式展開や計算アルゴリズム等の詳細は、井上・清水<sup>48,49)</sup>を参照されたい。

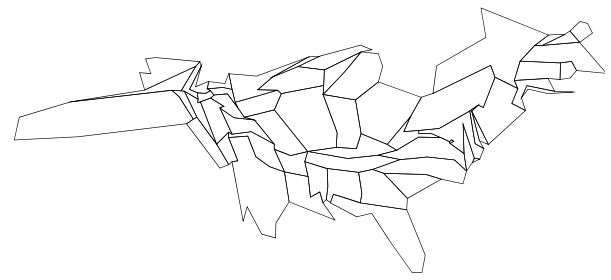
次節では、提案手法をアメリカ合衆国・日本の人口データに適用し、適用可能性を検証する。

### (3) 提案手法の適用と評価

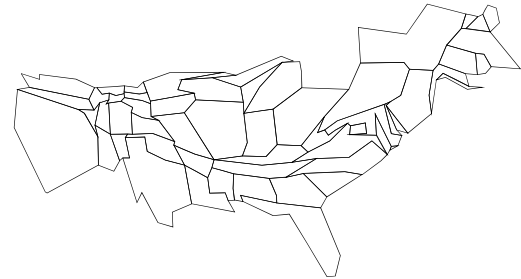
まず、U.S. Census Bureau, United States Department of Commerce による 1980 年アメリカ合衆国州人口データを用いて連続面積カルトグラムを作成する。

適用には、185 の頂点からなる簡略化したアメリカ合衆国地図(図-7)を用いる。但し、提案手法では全地域は連続していないと計算できないため、島は海峡に仮想的なポリゴン・データを設定し、他地域と接続している。湾を挟む両岸の地域は交差する可能性があるため、湾にも仮想的なポリゴン・データを設定している。また、地域が複数のポリゴンに分かれている場合、人口データを地理的な面積に基づいて按分している。なお、連続面積カルトグラム作成計算では、1 点を面積カルトグラム座標に固定する必要がある。提案手法では任意の点を固定しても出力される地図形状は変わらないので、 $x$  軸の最小値の点を固定して計算した。

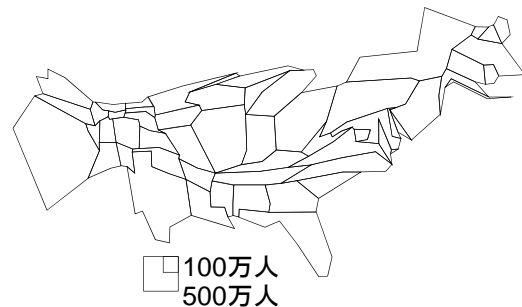
正規化項に対する重みパラメータ  $\mu$  の初期値を 1・



(a)  $\mu$  初期値 1



(b)  $\mu$  初期値  $\sqrt{10}$



(c)  $\mu$  初期値 10

図-8 提案手法による 1980 年アメリカ合衆国 州人口連続面積カルトグラム

$\sqrt{10} \cdot 10$  と設定し、連続面積カルトグラム作成を行った。その作成結果を図-8、収束計算回数・計算時間・RMSE を表-1 に示す。

まず、提案手法によって、連続面積カルトグラム作成が実用的な計算時間で可能であることが確認できた。1 州あたりの人口が約 460 万人であることを考えると RMSE は十分に小さく、図-8 は人口データをほぼ完全に表現していることが分かる。

次に、 $\mu$  初期値による出力連続面積カルトグラムの違いについて注目する。 $\mu$  初期値が小さいと、収束速度が速く計算時間が短いですが、地図変形が大きくなり、視覚的に分かりにくいカルトグラムを出力する。

ここで、カルトグラム上の地図形状と地理的地図形状間の類似度を定量的に評価することを試みる。各地域の地図形状の頂点を合わせるようにヘルマート変換を行い、その自由度修正済み決定係数を 2 形状の類似度指標として用いる(表-2)。まず国全体の地図形状を評価した場合、大きな値の違いは見られない。この要因の一つに、アメリカ合衆国は東海岸に小さな州が集中し頂点が

多いため、東海岸の地図形状が大きく評価され、西海岸の地図形状の変形を反映できていないことが挙げられる。そのため、地図形状を評価するには頂点の分布等に注意を払う必要がある。そこで州毎に地図形状を比較した結果、 $\mu$  初期値 1 の場合、西海岸 3 州(カリフォルニア・オレゴン・ワシントン)で著しい変形を起こすことを確認した。一方、 $\mu$  初期値が $\sqrt{10} \cdot 10$  では、値に顕著な違いは見られず、ほぼ同等の地図形状を維持してい

ることが確認できる。

以上のように、 $\mu$  に大きな初期値を設定することにより辺の角度変化を抑えることが可能になり、比較的分かりやすい連続面積カルトグラムを作成することが確認できた。また、図-8 (b) (c) 間には目立った差異は見られないが、計算時間では約 3 倍の差がある。このことから、正規化項に対する過剰な重み付けは出力結果にはあまり影響を与えず、むしろ計算時間の増加をもたらす好まし

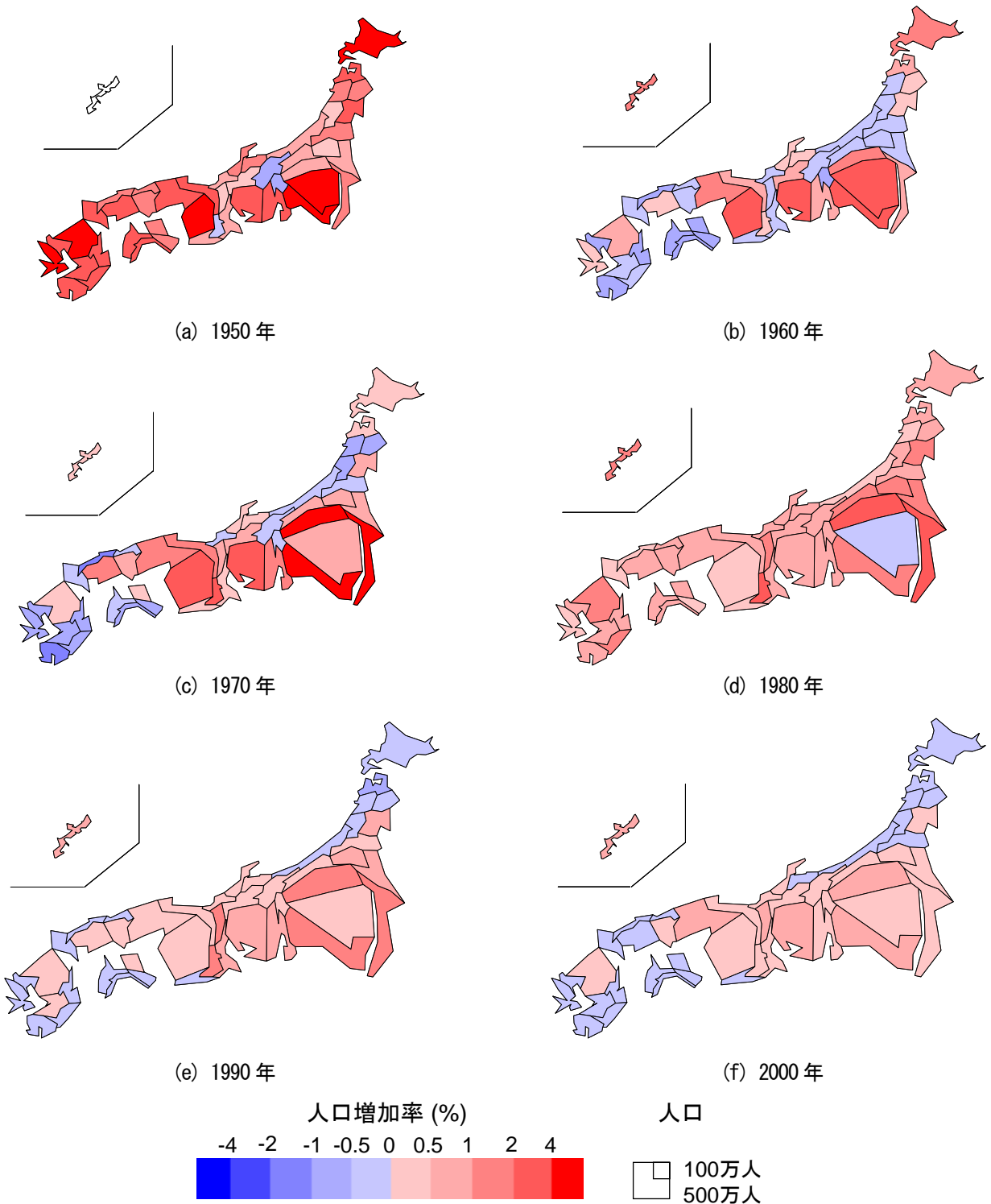


図-9 提案手法による都道府県人口・人口増加率連続面積カルトグラム

くない。しかし、地図変化を抑えかつ高速に計算できる  $\mu$  の最適な値を求めることは現状では困難なため、試行錯誤に頼らざるを得ないといえる。

次に、総務省統計局により整備された 1920~2000 年の 5 年毎の都道府県人口データに対して提案手法を適用し、人口の時系列変化を視覚化した例を示す。

都道府県人口の時系列変化を分かりやすく表現するためには、人口の増減に起因しない地図形状の変形を排除することが望ましい。そこで、まず 1920 年の人口連続面積カルトグラムを、331 の頂点からなる簡略化された都道府県形状データを用いて作成した。その後、5 年毎の人口連続面積カルトグラムを一時点前の連続面積カルトグラムの地図形状を初期値として入力し作成した。

その中から 1950~2000 年の 10 年毎の都道府県人口連続面積カルトグラムを示す(図-9)。但し、一時点前の人口データからの 1 年あたり人口増加率に応じて各都道府県を色分けしている。 $\mu$  初期値は 1、計算時間は地理的地図を初期値として計算した 1920 年の連続面積カルトグラム作成は CPU Pentium4 2.8GHz の計算機で 9.5 秒、一時点前の連続面積カルトグラム上の地図形状を入力して作成した場合は全て 2 秒以内に完了している。

図-9 より、日本の総人口が増加すると同時に三大都市圏に人口が集中していく様子を視覚的に表現することができた。また、これらの図を用いてアニメーション表示することにより、人口の変化をより効果的に視覚化することが可能である。

#### (4) 提案した連続面積カルトグラム作成手法の特徴

本章のまとめとして、提案した連続面積カルトグラム作成問題の特徴を整理する。

- ① 地域を三角網分割することを前提として、連続面積カルトグラム作成問題を簡潔に定式化している。
- ② 三角網の辺の方位角変化を抑制する正則化項を導入して地図変形の抑制を図っており、視覚的に分かりやすい地図作成が可能である。
- ③ 設定項目は正則化項の重みパラメータ  $\mu$  だけで、その数学的意味が明確であるため試行錯誤的操作が容易である。

提案手法は、前節で扱ったアメリカ合衆国の州や日本の都道府県のように、地域数が少なくかつ簡略化された地域形状を入力した場合には、短時間で連続面積カルトグラム作成が可能である。しかし、例えば全国の市区町村など、地域数が多くかつ複雑な地域形状を入力した場合には、主問題および正則化項ともに大きいため、非常に大規模な線形最小二乗問題を解くこととなり、大量の計算機の記憶領域と長時間の計算を要する。現在、三角網分割を前提とした作成手法を見直し、主問題および正則化項を縮小した作成手法の構築に着手している。この開発を今後の課題としたい。

## 6. サークルエリアカルトグラム

### (1) 基本的考え方

サークルエリアカルトグラム作成手法の構築に当たり、基本的な考え方について述べる。

2. の方針に従い、Dorling<sup>2)</sup> 19) の円配置の条件「円の重なりを解消するが、隣接地域を表す円を可能な限り接して配置させる」を、隣接地域を表す円の中心間距離がそれらの半径の和となるよう円を配置する問題と書き換え、最小二乗問題として定式化する。隣接地域の組み合わせの集合を  $C$ 、円  $i$  の半径を  $r_i$ 、中心座標を  $(x_i, y_i)$ 、表記上の都合より  $x_{ij} = x_j - x_i$ 、 $y_{ij} = y_j - y_i$  と表すと、サークルエリアカルトグラム作成問題は、式(19)と書ける。

$$\min \sum_{ij \in C} \left( r_i + r_j - \sqrt{x_{ij}^2 + y_{ij}^2} \right)^2 \quad (19)$$

式(19)は  $p_{ij} = r_i + r_j$  とすると、距離カルトグラム作成問題(式(1))と全く同じ問題である。そこで、距離カルトグラム作成手法(式(6))を適用すると、地理的地図形状に近いサークルエリアカルトグラム作成を行うことができると考えられる。そこで、距離カルトグラムの作成手法を基に、視覚的に分かりやすいサークルエリアカルトグラムを作成できる手法を構築する。

なお、本章では、総務省統計局による 2000 年南関東 1 都 3 県の市区町村別人口および転入超過率のデータを用い、人口を面積で、転入超過率を色で表現したサークルエリアカルトグラムを作成し提示する。

### (2) サークルエリアカルトグラム作成手法の構築

まず、距離カルトグラム作成手法(式(6))をサークルエリアカルトグラム作成に適用した例を図-10に示す。図-10は、地理的位置関係を保ちながら円が配置されているが、円の重なりは大きく、例えば世田谷区・練馬区・江戸川区等を表す円は周囲の円の下に隠れてしまい、その大きさを判読することはできない。

距離カルトグラム作成手法を用いてサークルエリアカルトグラムを作成する場合、隣接地域を表す円は全て接するように配置しようとする。例えば、図-11(a)のデータを表現するサークルエリアカルトグラムを作成すると、小さいデータが与えられた周囲の円同士も接するように配置しようとするため、図-11(b)のような図が得られ、円の重なりが大きくなりデータを読み取りにくい図になってしまう。また、図-11(c)のデータを表現するサークルエリアカルトグラムを作成すると、地理的に隣接していない地域を表す円が重なるように配置されてしまう。このように隣接する地域を表す円が全て接するように配置することは不可能であり、また隣接していない地域の円が接することを防ぐこともできない。距離カルトグラム作成手法をそのまま利用することは

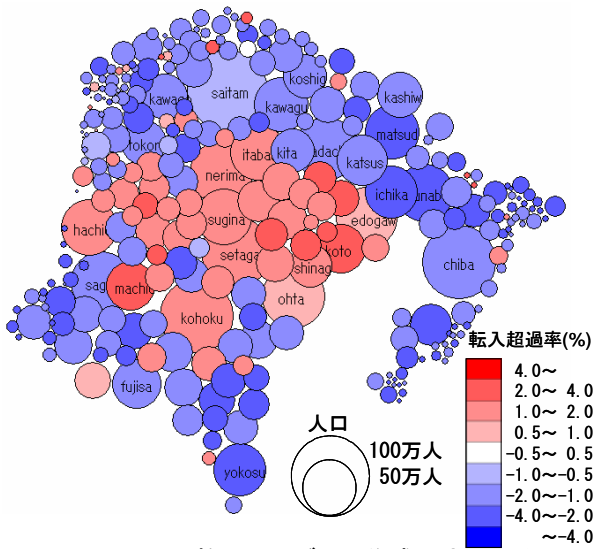


図-10 距離カルトグラム作成手法による  
2000年関東1都3県人口・転入超過率  
サークルエリアカルトグラム

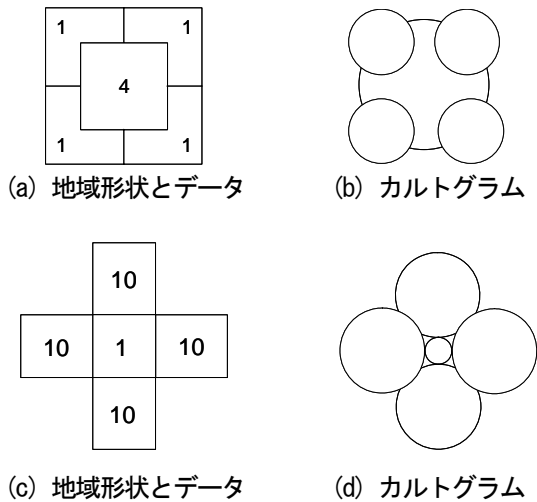


図-11 サークルエリアカルトグラム模式図

きない。

分かりやすいカルトグラム作成には、隣接して配置すると円が重なってしまう場合には、地理的位置関係を保ちながら円を離して配置する必要がある。そこで、地理的位置関係を保ちつつカルトグラム上の円の中心間距離を広げるため、例えば、地域の重心間距離などの地域間の地理的距離を利用し、カルトグラム上の円の中心間距離を与える。地域  $ij$  間の地理的距離を  $d_{ij}^G$ 、地理的地図座標とカルトグラム座標の縮尺変換の変数を  $scale$ 、重み付けの変数を  $\beta$  ( $0 \leq \beta \leq 1$ ) とし、カルトグラム上の円  $ij$  の中心間距離  $d_{ij}$  を、円  $ij$  の半径の和  $r_i + r_j$  と地域  $ij$  間の地理的距離 ( $scale \times d_{ij}^G$ ) の加重平均

$$d_{ij}^A = \beta(r_i + r_j) + (1 - \beta)(scale \times d_{ij}^G) \quad (20)$$

に合わせるように与える。但し、地理的地図座標上の距離をカルトグラム座標上の距離に変換する際には、全て

の円が重ならないように設定しなければならないので、 $r_i + r_j \leq scale \times d_{ij}^G \quad \forall ij$  を満たす必要がある。そこで、 $scale = \max[(r_i + r_j) / d_{ij}^G]$  と設定する。

このとき、サークルエリアカルトグラム作成問題の目的関数は、カルトグラム上の円  $ij$  の中心間距離を  $d_{ij}^A$  に合わせる式(7)と書ける。但し、計算対象の集合  $C$  には、地理的に隣接する地域の組み合わせだけではなく、カルトグラム上で円が重なる地域の組み合わせも加えなければならない。

$$\min \sum_{ij \in C} \left( d_{ij}^A - \sqrt{x_{ij}^2 + y_{ij}^2} \right)^2 \quad (21)$$

カルトグラム上で重なる地域の組み合わせを随時計算対象に入れながら、距離カルトグラム作成手法(式(6))を利用して繰り返し計算で解くことにより、サークルエリアカルトグラム作成の3つの条件を満たす、視覚的に分かりやすい図を作成することができる。なお、本節の式展開、計算アルゴリズム等の詳細は井上・清水<sup>50)</sup>を参照されたい。

### (3) 提案手法の適用と評価

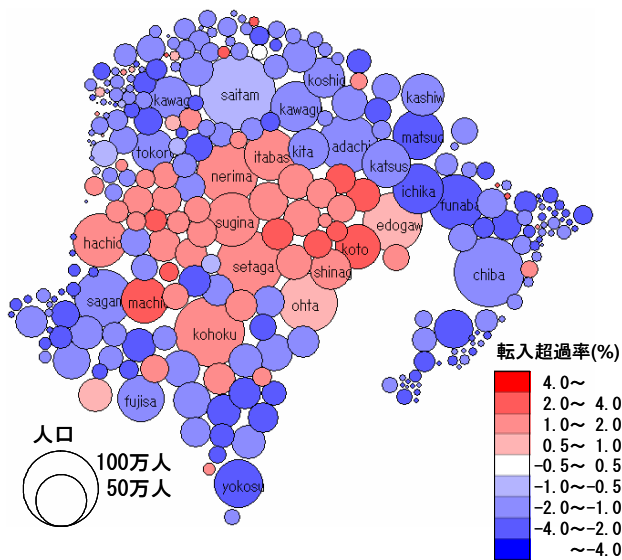
$\beta = 1.00, 0.95, 0.90$  と設定し、提案手法を適用した例を図-12に示す。 $\beta$  の設定に関わらず、全ての場合で地理的な位置関係を保ちながら、重なりが比較的少ないサークルエリアカルトグラムを作成することができる。図-10と異なり円の重なりもほぼ解消されており、表示されている情報を読み取ることができる。

ここで  $\beta$  値の設定によるカルトグラムの違いについて述べる。まず、 $\beta = 1.00$ (図-12(a))では、カルトグラム上で重なる地域の組み合わせを計算対象に加えたため、図-10と比較して円の重なりが少なくなった様子が分かる。しかし、一部の地域では重なりが大きく、データを読み取りにくい場合がある。しかし、 $\beta = 0.95, 0.90$  と小さくするにつれ円が離れて配置され、地理的配置に近く重なり小さいサークルエリアカルトグラムを作成することができる。 $\beta$  値はカルトグラム作成者が作図結果を見ながら設定する必要があるが、一回の計算はCPU1.8GHzの計算機では数秒以内で収束するため、提案手法は十分実用的であると考えられる。

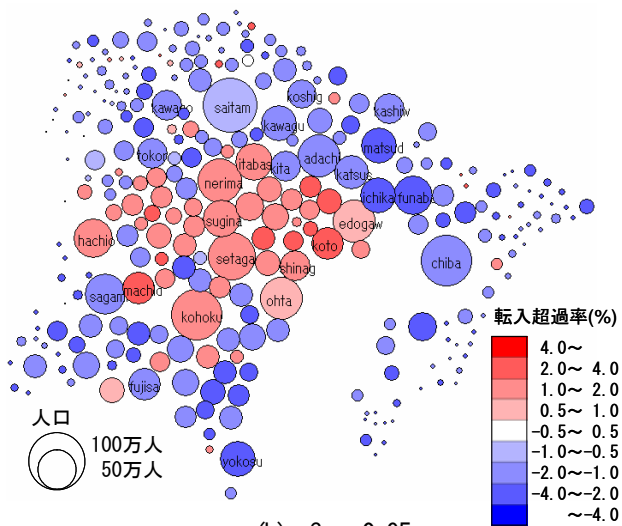
以上のように、提案手法によって地理的配置を保ち円の重なりが少ない、視覚的に分かりやすいサークルエリアカルトグラム作成が可能である。

## 7. おわりに

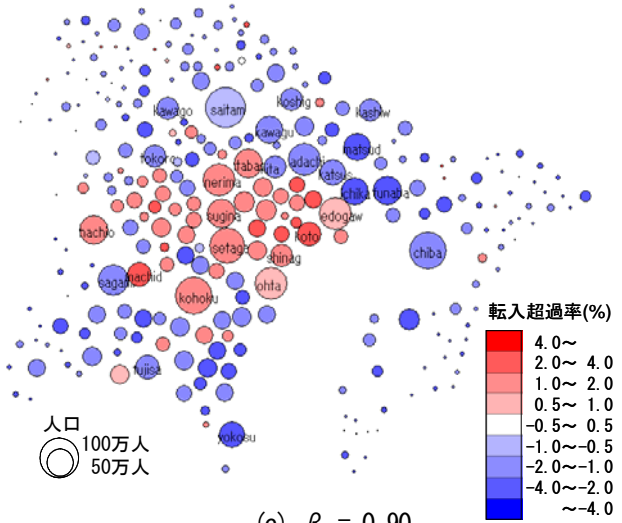
本論文は、統計GISの発展と利活用のためには、統計データの視覚化手法の進展も必要であるとの問題意識のもと、カルトグラムという視覚化手法の潜在的な魅力と可能性に着目し、その合理的かつ実用性の高い作成手



(a)  $\beta = 1.00$



(b)  $\beta = 0.95$



(c)  $\beta = 0.90$

図一 12 提案手法による 2000 年関東 1 都 3 県  
人口・転入超過率サークルエリアカルトグラム

法について探求したものである。

カルトグラムの作成は、統計データの大小を表現するように地理的な地図を変形する問題であるが、最大の課題は、統計データの表現を目的としない地図の変形をいかに排除するかにある。この課題を、概念的にも数学的にも単純かつ明快な方法でいかに実現するのかが、研究の目標であり、論点となる。視覚化手法としてのカルトグラムの特性やカルトグラムの作成を統計 GIS の機能とすることを考えれば、至極当然のことであろう。

しかしながら、このことが既往研究では十分に議論、整理されてこなかったように思う。カルトグラムの作成手法とは何か、何を目標としているのか、どのような基準から手法を比較評価すればよいのか、このようなことが研究者の間に共有されてこなかった。これまで実に多くの手法が提案されながらも、数学的に明快で、かつ実用性の高い手法が未だほとんど無いことや、手法のレビュー研究が極めて少ないことなどは、結局のところ、こういうことに起因しているように思うのである。

筆者らが提案した基本的な方法論は、①作成手法の全体像を単純かつ明快にするために、カルトグラムの作成問題を最小二乗法で記述し、これに、②不必要な地図変形を抑制するために、カルトグラム上の地点間の座北方位角を、地理的地図上の方位角に可能な限り近づけるといふ正則化条件を導入する、という極めて素朴な発想に基づいている。筆者らの乏しい数学の知識の中で、カルトグラム作成の目標を端的に実現しようとする、このような方法論が自然と導かれる。

このような基本的な方法論に基づき、距離カルトグラム、連続面積・非連続面積カルトグラムのそれぞれについて、一応の実行可能性を有する手法を構築できたことが、本研究の最大の成果であると考えている。

繰り返しになるが、カルトグラムの作成問題は、統計データの大小を表現するように地図を変形させるという問題と、統計データの表現を目的としない地図の変形を排除するという問題を合わせた多目的問題である。この多目的問題をいかに記述し、簡単に解いて見せるか、これが研究の醍醐味であり、勝負どころである。こう書いてしまえば、提案されるべき手法は、本研究で構築した手法に限らず、多々あってしかるべきであろう。

本研究を契機に、カルトグラムの作成手法や統計データの視覚化手法に関する研究への関心が高まり、研究分野が一段と活性化され、延いては、統計GISの発展と利活用が促進されることを切に願うものである。

### 謝辞

土木計画学研究委員会・学術小委員会には、招待論文という荣誉を与えていただき、深く感謝致します。

本研究を進めるにあたっては、日頃親しく議論させ

ていただいている諸先生方、そして研究室の学生諸氏から多くのご指導、ご支援をいただきました。特に、森地茂先生、岡部篤行先生、柴崎亮介先生、浅見泰司先生、布施孝志先生には、研究の具体的な内容について、貴重なご意見、ご示唆を数多くいただきました。

ここに記して、深甚なる感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) Monmonier, M.S. : *Maps, Distortion, and Meaning*, Association of American Geographers, Washington, 1977.
- 2) Dorling, D. : *The Visualization of Spatial Social Structure*. PhD Thesis: University of Newcastle upon Tyne., 1991.
- 3) Tobler, W.R. : Thirty five years of computer cartograms, *Annals of the Association of American Geographers*, Vol.94, No.1, pp.58-73, 2004.
- 4) 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, pp.15-29, 1992.
- 5) 伊藤悟 : 金沢都市圏の時空間構造分析—時間距離に基づく各種分析測度の適用と比較—, 金沢大学教育学部紀要(人文・社会科学編), No.50, pp.55-68, 2001.
- 6) Ewing, G.O. : Multidimensional scaling and time-space maps, *The Canadian Geographer*, Vol.18, No.2, pp.161-167, 1974.
- 7) Muller, J. : The mapping of travel time in Edmonton, Alberta, *The Canadian Geographer*, Vol.22, No.3, pp.195-210, 1978.
- 8) 杉浦芳夫 : 多次元尺度構成法(MDS)による空間分析とその拡散問題への応用, 地理学評論, Vol.53, No.10, pp. 617-635, 1980.
- 9) Spiekermann, K. and Wegener, M. : The shrinking continent: new time-space maps of Europe, *Environment and Planning B*, Vol. 21, pp. 653-673, 1994.
- 10) 吉本剛典 : 全国主要都市間時間距離の地図化の試み, 地理学評論, Vol.54, No. 11, pp. 605-620, 1981.
- 11) 吉本剛典 : 再現された時空間における次元性の検討, 地理科学, Vol.37, No.1, pp. 25-41, 1982.
- 12) 伊藤悟 : 長野県中信地域におけるバス交通ネットワークの時空間構造とその変化—1962~1982年—, 金沢大学教育学部紀要(人文・社会科学編), No.35, pp.21-40, 1986.
- 13) 伊藤悟 : 都市の時空間構造—都市のコスモロジー—, 古今書院, 1997.
- 14) 藤目節夫 : 時間・費用距離からみた中四国地域の自動車交通空間の変化, 地理学評論, Vol.72A, No.4, pp.227-241, 1999.
- 15) 榎谷有三, 田村亨, 齋藤和夫 : 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, pp.567-574, 1995.
- 16) 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研究論文集, pp. 553-558, 1995.
- 17) 榎谷有三, 浦田康滋, 田村亨, 齋藤和夫 : 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, Vol.40, No.6, pp.32-40, 1997.
- 18) 古藤浩 : 地域構造と視覚化時間距離網, GIS—理論と応用—, Vol.5, No.2, pp.1-10, 1997.
- 19) Dorling, D. : *Area Cartograms: Their Use and Creation*, No. 59, Norwich: School of Environmental Sciences, University of East Anglia, 1996.
- 20) Dent, B.D. : *Cartography: Thematic Map Design*, Boston: WCB/McGraw-Hill, 1999.
- 21) Slocum, T.A. : *Thematic Cartography and Visualization*, Upper Saddle River: Prentice-Hall, 1999.
- 22) Tobler, W.R. : *Map Transformations of Geographic Space*, Ph. D. dissertation, University of Washington, 1961.
- 23) Tobler, W.R. : Geographic area and map projections, *The Geographical Review*, Vol.53, No.1, pp. 59-78, 1963.
- 24) Tobler, W.R. : A continuous transformation useful for districting, *Annals of New York Academy of Science*, Vol.219, pp.215-220, 1973.
- 25) Kadmon, N. and Shlomi, E. : A polyfocal projection for statistical surfaces, *The Cartographic Journal*, Vol.15, No.1, pp. 36-41, 1978.
- 26) Tobler, W.R. : Pseudo-cartograms, *The American Cartographer*, Vol.13, pp.43-50, 1986.
- 27) Dougenik, J.A., Chrisman, N.R. and Niemeyer, D.R. : An algorithm to construct continuous area cartograms, *Professional Geographer*, Vol.37, No.1, pp.75-81, 1985.
- 28) Gusein-Zade, S.M. and Tikunov, V.S : A new technique for constructing continuous cartograms, *Cartography and Geographic Information Systems*, Vol.20, pp.167-173, 1993.
- 29) Koemoud, C.J. and House, D.H. : A constraint-based approach to constructing continuous cartograms, *The Eighth International Symposiums on Spatial Data Handling Proceedings*, pp.197-204, 1998
- 30) Keim, D.A., North, S.C., Panse, C. and Schneidewind, J. : Visualizing geographic information: VisualPoints vs CartoDraw, *Information Visualization*, Vol.2, pp.58-67, 2003.
- 31) Keim, D.A., North, S.C. and Panse, C. : CartoDraw: a fast algorithm for generating contiguous cartograms, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol.10, No.1, pp.95-110, 2004.
- 32) Keim, D.A., Panse, C. and North, S.C. : Medial-axis-

- based cartograms, *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol.25, No.3, pp.60–68, 2005.
- 33) Gastner, M.T. and Newman, M.E.J. : Diffusion-based method for producing density-equalizing maps, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Vol.101, No.20, pp.7499–7504, 2004.
- 34) Du, C. and Liu, K. : Constructing contiguous area cartogram using ArcView Avenue, *Proceedings of Geoinformatics '99 Conference*, pp.1–7, 1999.
- 35) 村山祐司, 尾野久二 : オープンソースを利用した統合型空間分析システムの開発, *人文地理学研究*, No. 27, pp.71–105, 2003.
- 36) Olson, J.M. : Noncontiguous area cartograms, *The Professional Cartographer*, Vol.28, No.4, pp.371–380, 1976.
- 37) Dorling, D. : Visualizing People in Time and Space. *Environment and Planning B*, Vol.19, No.6, pp.613–637, 1992.
- 38) Dorling, D. : Map Design for Census Mapping, *The Cartographic Journal*, Vol.30, pp.167–183, 1993.
- 39) Dorling, D. : Visualizing Changing Social Structure from a Census. *Environment and Planning A*, Vol.27, No.3, pp.353–378, 1995
- 40) Dorling, D. : The Visualization of Local Urban Change across Britain, *Environment and Planning B*, Vol.22, No.3, pp.269–290, 1995.
- 41) Yano, K. Nakaya, T. and Kato, H. : A New Social Atlas of Kyoto Based on Cartogram Systems for Small Areal Units, *Proceedings of AsiaGIS2001* (CD-ROM), 2001.
- 42) Anselin, L. : *GeoDa 0.9.5-I Release Notes*, Spatial Analysis Laboratory and Center for Spatially Integrated Social Science (CSISS), Department of Agricultural and Consumer Economics, University of Illinois, Urbana-Champaign, 2004.
- 43) Anselin, L., Syabri, I. and Kho, Y. : GeoDa: An Introduction to Spatial Data Analysis, *Geographical Analysis*, Vol.38, No.1, pp.5–22, 2006.
- 44) 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), pp.105–114, 2004.
- 45) 例えば Cox, T.F. and Cox, M.A.A. : *Multidimensional Scaling*, 2nd ed., Chapman & Hall/CRC, Boca Raton, 2001.
- 46) 例えば Okabe, A., Boots, B., Sugihara, K. and Chiu, S.N. : *Spatial Tessellations: Concepts and Applications of Voronoi Diagrams*, West Sussex: Wiley, 2000.
- 47) 藤田宏, 今野浩, 田邊國士 : 最適化法, 岩波講座 応用数学, 岩波書店, 1994.
- 48) 井上亮, 清水英範 : 連続エリアカルトグラム作成の新手法—GIS時代の統計データの視覚化手法—, *土木学会論文集*, No.779 (IV-66), pp.147–156, 2005.
- 49) Inoue, R. and Shimizu, R. : A new algorithm for continuous area cartogram construction with triangulation of regions and restriction on bearing changes of edges, *Cartography and Geographic Information Science*, Vol.33, No.2, pp.115–125, 2006.
- 50) 井上 亮, 清水英範 : サークルエリアカルトグラムの新作成手法, *GIS—理論と応用—*, Vol.13, No.1, pp.43–50, 2005.