サークルエリアカルトグラムの新作成手法

井上 亮・清水英範

A New Method for Constructing Circle Area Cartogram

Ryo INOUE and Eihan SHIMIZU

Abstract: Area cartograms are transformed maps that display data of regions using map area. Since their construction and usage have some difficulties, their simplified form, circle area cartogram, has been proposed. Circle area cartograms omit to represent the shapes and contiguity of regions, and consequently achieve their simple construction method. The simplicity in their construction makes them popular, as some statistical software has adopted them as one of data visualization options. However, their previous solution sometimes outputs cartograms that are difficult to read, since it does not necessarily retain the geographical distribution of regions. Then we propose a new construction method of circle area cartogram that preserves geographical distributions of regions and creates readable cartograms, and show some examples of applications.

Keywords: サークルエリアカルトグラム (circle area cartogram), 視覚化 (visualization), 地理情報システム (GIS)

1. はじめに

近年、国や地方自治体等により収集された多種多様な統計データは電磁媒体で無料あるいは安価に入手可能になっている。その結果、一般市民や分析者が多くのデータを利活用できる環境が整ってきた。

通常、これらの統計データ群は行政区域などの集計単位に基づいてGIS上で管理される。GISの基本機能の一つとして統計データの視覚化機能が提供されており、プレゼンテーションやデータマイニングの道具として利用されている。従来、GISソフトウェアには、地図を統計データの値に基づき色分けするコロプレスマップや、棒グラフや円グラフ等を地図上に記載する手法等、多くの統計データ視覚化手法が実装されてきた(大場, 2003)。更に、WebGISの普及により、例えば総務省統計局「統計GISプラ

ザ」<<http://gisplaza.stat.go.jp/GISPlaza/>>のように、現在ではWeb上でも簡単な操作でこれらの手法を利用して統計データを視覚化することができる。

計量地理学では他の視覚化手法として、エリアカルトグラムと呼ばれる各地域のデータの大小を地図上の面積で表すように地図を変形する手法が提案されている。その中でも、地理的地図を変形して地域形状や隣接関係を保持したままデータを視覚化する連続エリアカルトグラムに関する研究が多く行われてきた(杉浦, 1998; Dorling, 1996; Tobler, 2004)。例えば、図1は面積で2000年の都道府県人口を表し、色の濃淡で人口増加率を表現する連続エリアカルトグラムである(井上・清水, 2005)。連続エリアカルトグラムを利用すると統計データの空間的偏在を視覚的に表現することができる。

この連続エリアカルトグラムは有効な視覚化手法であるが、その利用には3つの問題が存在する。

第1の問題は、読図者が視覚化対象の地域形状に

井上：〒277-8568 千葉県柏市柏の葉5-1-5
東京大学 空間情報科学研究センター
Center for Spatial Information Science, University of Tokyo
5-1-5, Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba, 277-8568
E-mail: inoue@csis.u-tokyo.ac.jp

関する先験的な情報を十分に持っていない場合には、連続エリアカルトグラム上の地域形状と地理的な地域形状との比較対照ができないため、データの特徴を把握できない場合がある点である。例えば、図1のように都道府県形状を変形した連続エリアカルトグラムを示す場合では、地図に馴染みのない人でも日本列島や都道府県の形状は天気予報などを通して日常的に多くの人が目にしておりその形状を認識しているため、図1上に示された都道府県形状の変形の大小を認識でき、表現されているデータの傾向を正しく解釈・理解することができる。

しかし、対象の地域形状に関して先験的な知識を持っていない場合、連続エリアカルトグラムによる視覚化は効果的ではない。例えば、総務省統計局による2000年南関東1都3県の市区町村人口・転入超過率データを視覚化する場合を考える。図2は、対象市区町村を転入超過率に基づいて色分けしたコロプレスマップであるが、これらの市区町村人口を表すように連続エリアカルトグラムを井上・清水(2005)により作成すると図3となる。しかし、読図者はもともと市区町村形状に対する先験的な知識をほとんど持っていないため、図3上の地域形状の歪みを認識することは難しく、カルトグラム上に示された情報を正しく認識することはできない。

第2の問題は、連続エリアカルトグラムではデータ表現が不可能な場合が存在することである。Keim et al. (2004)に示されるように、隣接する地域のデータが大きく異なる場合、隣接関係を保持したままデータを表現することは不可能である。

第3の問題は、作成に時間を要する可能性がある点である。47都道府県の人口を表す図1の作成には、CPU2.8GHzの計算機では20秒程度で計算できる。しかし、地域数の多い連続エリアカルトグラム作成には多くの時間を要する可能性がある。例えば288市区町村の人口を表現する図3の連続エリアカルトグラム作成には、同じ計算機で5分弱の計算時間を要する。より地域数が多い場合にはさらに長時間を要することが予想される。そもそも、視覚化手法とは個人の思考や集団での議論を助けるために適宜用いられるものである。個人的な興味や遊び感覚での利

用も多いため、その作成に長時間の計算を要する可能性がある手法は、視覚化手法として限界があると言わざるをえない。

図1 2000年都道府県 人口・人口増加率
連続エリアカルトグラム (井上・清水, 2005)

図2 2000年南関東1都3県市区町村
転入超過率 コロプレスマップ

図3 2000年南関東1都3県市区町村
人口・転入超過率 連続エリアカルトグラム

そこで、エリアカルトグラムの簡便法として、地域の隣接関係の表現を省略する非連続エリアカルトグラムが提案されている(Olson, 1976)。その一種であるサークルエリアカルトグラムは、隣接関係だけでなく地域形状も捨象して各地域を円で表現し、円の面積の大小で統計データの大小を表す手法で、Dorling(1991)によって提案された。この手法では全ての地域を円で表現するため面積の比較を行うことが容易であり、様々な統計データの視覚化に用いられている(Dorling, 1991, 1992, 1993, 1995a, 1995b, 1996; Yano et al., 2001)。また、作成法が簡潔で操作も容易なため、MAPresso<<http://www.mapresso.com/>>やGeoDa(Anselin et al., to be appeared)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。

しかし、既存の作成手法では、後述のように必ずしも視認性の高い作図を行えるとは限らない。そこで、本研究では、より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手法を提案する。

なお、本稿では、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. 既存のサークルエリアカルトグラム作成手法

サークルエリアカルトグラム作成問題とは、①円の中心座標、②円の縮尺の2点を決定する問題である。ここでは、既存のサークルエリアカルトグラム作成手法について記す。

2. 1 地理的配置にもとづく作成手法

最も簡便なサークルエリアカルトグラム作成手法は、地域の地理的位置、例えば地域の重心などの代表点を利用して円の中心座標を設定し、その後、円の縮尺を調整する手法である。この手法による作図結果を図4に示す。図4では、円の縮尺を大きく描いているため、当然ながら地理的な面積は小さいが人口が多い地域が密集する地方では円が複雑に重なってしまい、円の面積や色の情報を判別することができない。しかし、円の縮尺を小さくし円の重なりを緩和すると、当然、地理的な面積は大きい人口

図4 地理的配置にもとづく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5 Dorling(1991)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

が少ない地域が多い地方では、円が非常に小さくなり、色を認識することが不可能になる。このように、地理的位置関係をもとに円を配置した場合は、データの視認性が著しく低下する可能性がある。

2. 2 Dorling(1991)による作成手法

前述の問題を解消するため、Dorling(1991)は新たな作成手法を提案している。すなわち、①『円の重なりを解消するよう円を移動させる』が、②『隣接する地域を表す円はできる限り接するように配置する』ことを指針とする手法である。作図に当たっては、円を一つずつ順番に移動させる手法をとってい

る。この手法では、円の重なりを解消すると同時に、余白を小さく円を大きく表示することが可能になる。

Dorling(1991)の手法による結果を図5に示す。確かに円の重なりはほぼ解消されており、円の色判別も可能である。しかし、明確な目的関数を持たずに、逐次、円の中心座標を更新しているため、地域の全体的および局所的な地理的位置関係を損なってしまう。図5では特にカルトグラムの周縁部で大きく変形しており、円と市区町村の対応がつきにくい。例えば、八王子市は周縁に押し出されており、奥多摩・秩父の市町村を表す円を見つけることは容易ではない。また、カルトグラムの中心部でも、例えば地理的には東西に並ぶ市川市・船橋市が、カルトグラム上では上下に配置されるなど局所的な位置関係にも相違が生じており、読図を難しくしている。

このように、Dorling(1991)の手法では、円の位置を逐次更新しながら円の配置を決めるため、円の位置関係を大きく崩し、分かりにくいカルトグラム作成を行う可能性がある。

3. サークルエリアカルトグラム作成手法の提案

既存の手法の問題点より、視認性の高いサークルエリアカルトグラム作成には、Dorling(1991)に挙げられている2つの条件、①『円の重なりを解消する』、②『隣接する地域を表す円を可能な限り接するように配置する』に加えて、③『地理的位置関係を保つように配置する』ことが必要である。そこで、これらの条件を満たす新たな作成手法の提案を行う。

まず、サークルエリアカルトグラム作成問題の定式化を行う。①『円の重なりを解消』し、②『隣接する地域を表す円を接するように配置する』ため、隣接地域を表す円の中心間の距離がそれらの半径の和となるように配置する。

隣接している地域の組み合わせ ij の集合を C 、円 i の半径を r_i 、円 i, j の中心間距離を d_{ij} とすると、目的関数は式(1)の非線形最小二乗問題で表される。

$$\min \sum_{ij \in C} (r_i + r_j - d_{ij})^2 \quad (1)$$

ここで、式(1)は地点間の所要時間を表現するように地図上の地点配置を決定する時間地図作成問題

の目的関数と等価であると言える。時間地図作成問題とは、時間地図上の地点 ij 間距離 d_{ij} が、地点 ij 間の所要時間データ t_{ij} に合うように地点を配置する問題である。所要時間が与えられた計算対象の地点間リンクの集合を L とすると、時間地図作成問題の目的関数は式(2)となる。

$$\min \sum_{ij \in L} (t_{ij} - d_{ij})^2 \quad (2)$$

式(1)(2)より、サークルエリアカルトグラム作成は時間地図作成と同値であり、時間地図作成手法を応用できることが分かる。

式(2)の時間地図作成問題は、時間地図上における地点間の距離に関する情報を与えられただけではその地点配置を一意に定めることはできない不良設定問題である。そのため、式(2)を解くためには、何らかの情報に基づき正則化を行う必要がある。サークルエリアカルトグラムの場合と同様、時間地図においても分かりやすい図を作成するためには、できる限り地理的地点配置を保ち地理的な地図との比較対照を容易にする必要がある。そのため、清水・井上(2004)では、まず地点間リンクの方位角変化を抑制する項を導入し、時間地図作成問題を正則化している。時間地図上の地点間距離 d_{ij} を時間地図上の地点座標 (x_i, y_i) で表し、リンク ij の地理座標上の方位角を θ_{ij}^G 、時間地図上の方位角を θ_{ij} 、正則化項の重みを α とすると、式(3)と表される。

$$\min \sum_{ij \in L} \left[\left(t_{ij} - \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2} \right)^2 + \alpha (\theta_{ij} - \theta_{ij}^G)^2 \right] \quad (3)$$

ここで、非線形最小二乗問題である式(3)を数値的に解くことを考える。初期値として例えば地点の地理的座標を与えてその近傍で線形化し、線形最小二乗問題の繰り返し計算によって時間地図上座標の近似値を更新しながら解を求めることとする。

時間地図上座標の近似値を (x'_i, y'_i) とし、式(3)をこの近似値の近傍で線形化する。但し、表記上の都合より、 $x'_{ij} = x'_j - x'_i$ 、 $y'_{ij} = y'_j - y'_i$ 、 $d'_{ij} = \sqrt{x'^2_{ij} + y'^2_{ij}}$ と表す。

$$\min \sum_{ij \in L} \left[\left(t_{ij} - \frac{x'_{ij}}{d'_{ij}} (x_j - x_i) - \frac{y'_{ij}}{d'_{ij}} (y_j - y_i) \right)^2 + \alpha \left(\frac{y'_{ij}}{d'_{ij}} (x_j - x_i) - \frac{x'_{ij}}{d'_{ij}} (y_j - y_i) \right)^2 \right] \quad (4)$$

更に、作成手法の簡便化を行うため正則化項の重み α を1に固定し、時間地図上座標の近似値 (x'_i, y'_i) から求まるリンク ij の座北方位角の近似値を θ'_{ij} と表すと、式(5)が得られる。

$$\min \sum_{ij \in L} \left[\left(t_{ij} \sin \theta'_{ij} - (x_i - x_j) \right)^2 + \left(t_{ij} \cos \theta'_{ij} - (y_i - y_j) \right)^2 \right] \quad (5)$$

式(5)は x, y 軸方向に独立させた線形最小二乗問題となっており、独立に求めた x, y 座標を用いて θ_{ij} の近似値 θ'_{ij} を更新しながら、繰り返し計算で時間地図上の地点配置を求めることになる。

この時間地図作成手法をサークルエリアカルトグラム作成に応用すると、隣接する地域を表す円の中心を結ぶリンクの方位角が、地理的地図上の地域の代表点を結ぶ方位角に近くなるように円が配置される。その結果、サークルエリアカルトグラムの条件③『地理的位置関係を保つように配置する』を満たした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、この時間地図作成手法を適用しサークルエリアカルトグラムを作成した結果を図6に示す。

図6では、図5よりも地理的位置関係を保持したカルトグラムになっている。しかし、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、その大きさを図6から判読することはできない。

式(5)の時間地図作成手法を応用する場合、全ての隣接する地域を表す円が接するように配置される。例えば、図7(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、小さな値が与えられた周囲の地域を表す円同士も接するように配置しようとするため、図7(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となってしまう。また、図7(c)のデータを表現するサークルエ

図6 時間地図作成手法による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7 サークルエリアカルトグラム模式図

リアカルトグラムを作成すると、地理的には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、時間地図作成手法をそのまま利用することはできない。

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、地域間の地理的距離(例えば、地域の重心間距離など)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 β ($0 \leq \beta \leq 1$) 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

$$d_{ij}^A = \beta(r_i + r_j) + (1 - \beta)(scale \times d_{ij}^G) \quad (6)$$

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。すなわち， $r_i + r_j \leq scale \times d_{ij}^G \quad \forall ij$ 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 d_{ij} 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。

$$\min \sum_{ij \in C} (d_{ij}^A - d_{ij})^2 \quad (7)$$

時間地図作成手法の場合と同様に，式(7)の目的関数に対して，円の中心を結ぶ線の方角変化を抑制する正則化項を導入し，近似値近傍で線形化して式展開を行う。すなわち，カルトグラム上の円 i の中心座標を (x_i, y_i) とすると，式(8)と書ける。

$$\min \sum_{ij \in L} \left[(d_{ij}^A \sin \theta'_{ij} - (x_i - x_j))^2 + (d_{ij}^A \cos \theta'_{ij} - (y_i - y_j))^2 \right] \quad (8)$$

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，式(8)を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の3つの要件を満たす，視覚的に分かりやすい図を作成することができる。

ここで， $\beta = 1.00, 0.95, 0.90$ と設定し，本提案手法を適用した例を図8に示す。 β 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ている。図5と異なり，地理的位

図8 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

置関係がほぼ維持されており、地域と円の対応関係を容易に認識することができる。また、図6とは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 β 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8(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6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 of の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。 β 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、提案手法により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。

4. 提案手法の応用

総務省統計局の1994年から2000年まで2年毎の南関東1都3県の市区町村別人口および転入超過率データに対して、本提案手法を適用した(図9)。

1994年では、都心部では転出超過、郊外部では転入超過である。しかし、1996年では都心部のうち、人口の多い練馬区・世田谷区・江戸川区等から転入

図9 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による人口移動の視覚化($\beta = 0.98$)

超過へと転換しはじめることが読み取れる。一方郊外部では、次第に転出超過となる市区町村が増え、2000年では特に人口規模の小さい市区町村では、ほとんど転出超過となっていることが読み取れ、近年の人口の「都心回帰」の様子を視覚化できる。

もちろん、この「都心回帰」現象はコロプレスマップでも判読が可能である。しかし、南関東の人口分布について先験的な知識を持たない人は、コロプレスマップでは南関東全体の人口増減について誤解を生じる可能性が高いのに対し、カルトグラムでは図9から関東1都3県全体として人口がほぼ均衡している様子も把握することができる。

このように、サークルエリアカルトグラムでは、面積と色を用いて2種類のデータを同時に視覚化することができるため、誤解の余地を減らした視覚化を行うことが可能である。

5. おわりに

本稿では、新しいサークルエリアカルトグラムの作成手法を提案した。

まず、サークルエリアカルトグラム作成における要件の整理をおこない、作成問題の定式化を行った。その結果、サークルエリアカルトグラム作成問題が、地点間の所要時間を地図上の距離で表現する時間地図作成問題とほぼ同値であり、時間地図作成手法の応用にて作成可能であることを導き、新たな作成手法を提案した。この提案手法を用いると、円の地理的位置関係を保ちつつ、円の重なりが少ない、データ視認性の高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。

本手法をGISの拡張機能などのソフトウェアとして実装すると、ユーザーが統計データを容易に視覚化することが可能となる。このツールの開発を今後の課題とする。

参考文献

- 井上亮・清水英範(2005) 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」, (779, IV-66), 147-156.
- 大場亨(2003) 『ArcGIS8 で地域分析入門』, 成文堂。
- 清水英範・井上亮(2004) 時間地図作成問題の汎用解法,
「土木学会論文集」, (765, IV-64), 105-114.
- 杉浦芳夫(1998) 分布図による表現—地図を歪める試み。
(中村和郎・高橋伸夫編) 『地理学への招待』, 古今書
院。
- Anselin, L., Syabri, I. and Kho, Y. (to be appeared) GeoDa:
An Introduction to Spatial Data Analysis. *Geographical
Analysis*.
- Dorling, D. (1991) *The Visualization of Spatial Social
Structure*. PhD Thesis: University of Newcastle upon
Tyne.
- Dorling, D. (1992) Visualizing People in Time and Space.
Environment and Planning B, 19(6), 613-637.
- Dorling, D. (1993) Map Design for Census Mapping. *The
Cartographic Journal*, 30, 167-183.
- Dorling, D. (1995a) Visualizing Changing Social Structure
from a Census. *Environment and Planning A*, 27(3),
353-378.
- Dorling, D. (1995b) The Visualization of Local Urban Change
across Britain. *Environment and Planning B*, 22(3), 269-
290.
- Dorling, D. (1996) *Area Cartograms: Their Use and Creation*.
Concepts and Techniques in Modern Geography
(CATMOG), (59), Univ. of East Anglia, Norwich, U.K.
- Keim, D.A., North, S.C. and Panse C. (2004) CartoDraw:
A Fast Algorithm for Generating Contiguous Cartograms.
*IEEE Transactions on Visualization and Computer
Graphics*, 10(1), 95-110.
- Olson, J.M. (1976) Noncontiguous Area Cartograms. *The
Professional Geographer*, 28(4), 371-380.
- Tobler, W. (2004) Thirty Five Years of Computer Cartograms.
Annals of the Association of American Geographer,
94(1), 58-73.
- Yano, K. Nakaya, T. and Kato, H. (2001) A New Social Atlas
of Kyoto Based on Cartogram Systems for Small Areal
Units. *Proceedings of AsiaGIS2001 (CD-ROM)*.