

ボロノイ分割を用いた歴史的地勢境界データの生成

Generation of Historic Geographical Features Boundary by Voronoi Division

加藤 常員*

Tsunekazu Kato*

Abstract

Spatial data of historic geographical features boundaries between countries, counties or villages are required for using GIS (Geographic Information System) in the historical studies. However, such historical boundaries have often kinds of uncertainties; they depend on periods or researcher's opinions. Sometimes they include undefined parts. Therefore historical boundaries, especially those before Edo Period, have rarely been digitalized to spatial data. In this paper, a method for automatic generation of the boundary data using the Voronoi division is proposed. Where rough shapes of the core domain is initially given. Experimental comparison of the proposed method and an existing method is presented.

1. はじめに

近年、地理情報システム(GIS: Geographic Information System)は活用される場面が飛躍的に拡大している。歴史研究の分野においてもその例外ではない[1][2]。GIS が扱う基盤的な情報のひとつに各種の地勢的境界線情報がある。歴史研究分野での GIS の活用では旧国境、郡境、村境などの歴史的な地勢境界線の空間データが不可欠である。我が国の歴史的境界線の空間データ化は、明治期の地図に描かれた歴史的境界線をトレースする方法で計測、データ化が行われて来た[3][4]。しかしながらこの手法は多くの労力が必要となるとともに、当然ながら紙面に描かれていない境界線はデータ化できない。歴史上の境界線には、紙面に描かれていても曖昧なものや専門家による見解が異なる箇所も多い。また、時期により異なる箇所や漠然とした湿地帯などが境界域とされた場所など、不明確さを伴う箇所も多々存在する。そのため、近世以前の旧村境界レベルでの空間データ化は進んでいない。歴史研究者は必要に応じて、必要な地域や時期の境界線地図をその都度作成しているのが現状である。

本研究は歴史研究支援を目的として、必要に応じて歴史的な地勢境界線の空間データ化を行い、2次利用が可能な汎用的なデータ形式での蓄積を実現する方法の確立をめざすものである。著者は地方史誌などに添付される紙媒体の旧境界地図(図 1 参照)を原資料として、境界線をマウスにより入力、空間データ化する一連の手順および処理系の提案を行い、歴史的境界線を半自動でデータ化する歴史的境界線生成システムの開発を進めて来た[5]。開発を進めるシステムは、旧村等の領域の大まかな形状を入力し、面を核とするボロノイ分割[6]により領域間の境界線を生成するものである。これは、紙面に描画された境界線の正確なデータ化をめざすものではない。歴史的な地勢境界線の特徴を考慮し、領域間に想定される漠然とした境界線のデータ化をめざすものである。領域の大まか

* 情報通信工学部情報工学科

な形状はマウスにより点列として入力する。これにより、地図に記載された境界線を正確にトレースする入力方法に比べて作業量が大幅に軽減される。一方、明確でない曖昧な箇所や想定する境界線が曲線的な箇所では、入力頂点数の増加や違和感のある境界線が生成されてしまう不具合が確認されている。本稿では、従前のシステムの入力系を発展させ、漠然とした境界線を得るに適した方法として、領域の概形を3次の閉じたB-Spline曲線を用いて表す手法を提案する。提案方法によるプロトタイプシステムを構築し、境界線生成実験を行った結果について述べる。

2. 歴史的地勢境界線とそのデータ化

2.1 歴史的地勢境界線の概要

歴史的な地勢境界線は、現在の行政界などに比べ遥かに曖昧である。旧行政的境界線には国境から村境、大字界、小字界、さらには屋敷境界までさまざまな階層のものがある。旧国境や旧郡境などの位置については、概ね共通認識にあると思われる。一方、村境以下の大字界、小字界などにおいては、時期や研究者の見解により異なる箇所、もともと境界線が定められていなかった箇所、山や湿地帯などが漠然と境界域として認識された箇所など、不明確さを伴う場合も多い。地図に示される歴史的境界線は、現行地図の境界線と同様に何らかの根拠にもとづき細密に描かれもするが、不明確な箇所の存在などから比較的簡素に示されていることも多い。図1のような地方史誌などに添付される地図が、その一例である。この種の地図はその主題にもよるが、描き込まれている歴史的境界線は、当該地域の現行境界線や地形などを勘案して描かれていると思われる。描かれている歴史的境界線は、位置関係を重視し、極端にデフォルメされることはないが、現行の境界線の描画に比べ平滑的に描かれる場合が多い。

2.2 歴史的地勢境界線のデータ化

GISでの利用を前提とした歴史的境界線は、連結した線分の集合（ポリゴンデータ）で表されている必要がある。線として捉えにくい漠然とした境界部分においても便宜的に線分としてデータ化することが要求される。従前から行われて来た境界線のデータ化は、地図に描かれている境界線を正確にトレースする手法であった。漠然と描かれた歴史的境界線に対し、正確にトレースするデータ化は、必ずしも賢明とは言えない。漠然とした境界線に見合った作業量でデータ化を行う方法の

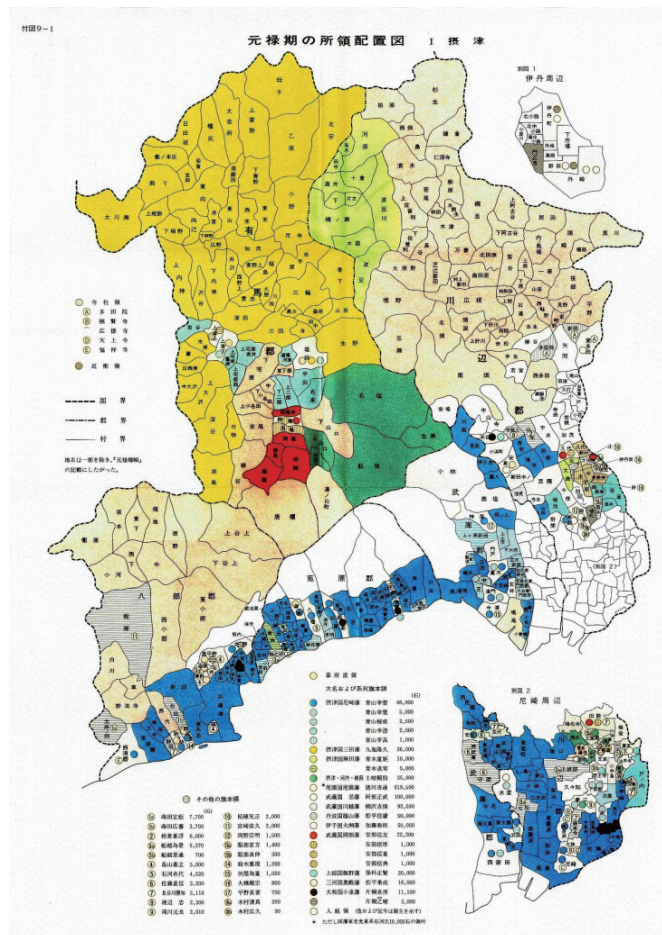


図1 摂津国・所領配置図（兵庫県史第四巻付図9）

確立は意義があると言える。

本研究がめざすデータ化は、境界線が紙媒体等に描かれていることを前提としない。境界線は、言うまでもなく領域間が接する線である。生成すべき歴史的境界線データには、その漠然とした存在を勘案し、つぎの3つの要件が求められる。

- ① 境界線で囲まれる領域（例えば村）にその主要部分を必ず含まれる。
- ② 領域間の相対的な形状や大きさが大きく異ならない。
- ③ 領域相互の位置関係は大きく変わらない。

この3つの要件を踏まえ、各領域の主要（部分）領域を想定すると、境界線はそれら主要部分の間に存在する（図2参照）。この視点にもとづき、各領域の主要部分を与え、各主要部分の位置関係から境界線を推定し、ベクターデータ化を行う。境界線の推定には面を核としたボロノイ分割を活用する。生成される境界線データは、境界線の明確、不明確の区別はされない。また、紙媒体に描かれた境界線のトレースによる精緻な境界線データと同等のデータを得ることもできない。全体として平滑化された、漠然とした概形的な境界線データが得られる。

3. ボロノイ分割

与えた各主要部分をもとにした境界線の推定には、面を核とするボロノイ分割を活用する。ボロノイ分割の基本は、点を核とするボロノイ分割である。境界線の導出の肝となるボロノイ分割について述べる。

3.1 点を核とするボロノイ分割

点を核とするボロノイ分割は、2次元平面に複数の核となる点（母点）を配置し、平面を各母点の所属領域に分けることであり、以下のように定式化される。

$$2 \text{次元平面} \quad : \quad P = \{p_i\} \quad (1)$$

$$\text{母点の集合} \quad : \quad Q = \{q_1, q_2, q_3, \dots, q_n\} \quad (2)$$

$$\text{点 } p, q \text{ 間の距離} \quad : \quad d(p, q) \quad (3)$$

$$p_i \text{に所属する領域} \quad : \quad R_i = \{p_k \mid d(p_k, q_i) < d(p_k, q_j), p_k \in P, i \neq j\} \quad (4)$$

$$\text{ボロノイ分割} \quad : \quad V = \{R_1, R_2, R_3, \dots, R_n\}, \quad \bigcap_{i=1}^n R_i = \phi, \quad \bigcup_{i=1}^n R_i = P \quad (5)$$

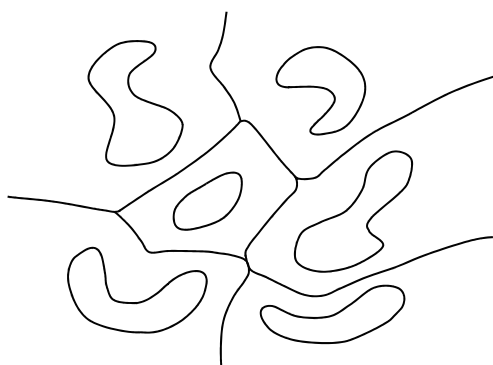


図2 領域の主要部分と境界線
閉曲線内部が領域の主要部分

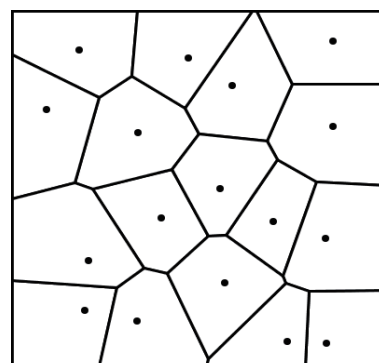


図3 点を核とするボロノイ分割の一例

平面を分ける分割線（分割辺）は、隣接する点間を結ぶ線分の垂直二等分線の一部であり、分割した各領域の形状はすべて凸多角形となる（図3参照）。

以下に点を核とするボロノイ分割を行う素直なアルゴリズムを示す。

- Step 1 一連番号を付与した n 個の母点 $\{p_1, p_2, p_3, \dots, p_n\}$ を与える。
- Step 2 すべての2点間について Step 2-1～Step 2-4 の処理を繰り返す。
 - Step 2-1 i 番目と j 番目の点 p_i, p_j に着目し、両者間の垂直二等分線 l_{ij} を求める。
 - Step 2-2 p_i と p_j 番目以外の各点相互間の垂直二等分線と l_{ij} との交点を求める。
 - Step 2-3 l_{ij} を隣接する交点で区切られた線分 $l_{ijk} (k=1, 2, 3, \dots, m; m \leq n(n-1)/2)$ に分ける。
 - Step 2-4 線分 l_{ijk} の中点 c_{ijk} と点 p_i との距離 $d(c_{ijk}, p_i)$ と他のすべての各点 $p_h (p_i, p_j$ を除く) との距離 $d(p_i, p_h)$ を比較し、 $d(c_{ijk}, p_i)$ が最小である場合 l_{ijk} を分割辺として採択する。
- Step 3 Step 2 で採択された分割辺により分割領域を構成する。

3.2 線分、面を核とするボロノイ分割

線分を核とする線分ボロノイ分割は、点を核とするボロノイ分割と同様に配置した複数の線分に対して、各線分に所属する領域を決定するものである。線分ボロノイ分割の求め方の基本は、配置する各線分を点の集合と捉え、同一線分に属さない点間について点ボロノイ分割を適用することで得られる。すなわち、線分を構成する点の線分所属を区別せずに点ボロノイ分割を行い、同一線分に属する点を核とする領域を合併して得られる領域が、線分を核とするボロノイ分割で得られる各分割領域となる。合併で得られた領域の分割線は必然的に、配置された線分間の二等分線となる。2つの線分 L_1, L_2 間の分割線は、図4に示すような a, c, e, g の4つの直線セグメントと b, d, f の3つの曲線セグメントから構成される複雑なものとなる。

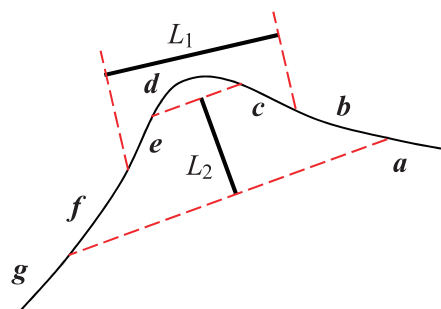


図4 2線分間の分割線
分割線を構成するセグメント $a \sim g$ の接続点は、 L_1, L_2 の端点から垂直に延ばした破線上の点となる。

面は複数の線分で囲まれた閉領域であり、面を核とする面ボロノイ分割は、線分を核とする場合と同様に行える。面を形成している線分群とし、各線分を点の集合と捉え、同一線分群に属さない点間について点を核とするボロノイ分割を適用することで得られる。

4. 歴史的地勢境界線データ生成システム

4.1 歴史的地勢境界線データ生成の工程

生成をめざす歴史的地勢境界線のデータは、旧村領域等のおおよその形状を示すものである。2章で述べたデータ化の3つの要件を踏まえ、歴史的地勢境界線のデータ化手順は、大まかに以下の4つの工程からなる。

(1) 主要部分の設定

求める境界線にかかわる複数の領域（例えば旧村）の各主要部分を設定する。領域の主要部分の形状は、閉領域として指定する。閉領域の指定は主要部分の外周を近似した頂点座標列によって行う。また、ある領域に対してすべての境界線を求める必要がない場合などは、求める境界線部分に

関与しそうな範囲で主要部分の形状を与えれば良く、必ずしも閉領域を設定する必要はない。

(2) 主要部分の補間データの生成

具体的な境界線の生成では、複数の主要部分を与える必要がある。主要部分ごとに形状を (1) で設定した頂点座標列をもとに、各頂点間を複数の点で補間し各主要部分の形状を詳細化する。補間した点座標列データには、主要部分 (領域) ごとの領域番号を属性として付与する。具体的な主要部分形状の補間方法については次節で述べる。

(3) 領域間の境界線の導出

設定した領域の主要部分の形状 (補間点座標列) から生成した点座標列データに対してボロノイ分割を実施する。そこで得られた分割辺に対し、対応する 2 点の領域番号が同じであれば当該の分割辺を除外する。残された分割辺により領域間の境界線は導出される。

(4) 歴史的地勢境界線データ構成

境界線データを構成する分割辺には、異なる領域番号をもつ点データ間で得られたものであるから、各分割辺には 2 つの異なる領域番号を付与することができる。付与された領域番号が同じ分割辺の集合が、1 つの領域のポリゴンデータを構成する。1 つの分割辺は、通常 2 つの領域のポリゴンデータに採択される。

4.2 領域主要部分形状の補間方法

領域の主要部分の形状は、その輪郭の要所要所の座標を指定し、これらを結んだ多角形で表す。形状を表す多角形を構成する線分の両端点を基準とする補間を行うと、自ずと導出される境界線も直線的な要素が多くなり、曲線的要素は得にくい状況が生じる (図 5(a) 参照)。全体として直線的にデフォルメされた印象を与える境界線地図ができあがる。曲線的境界線を得るためには、より多くの頂点を設定すればよいが、見かけ上の対策に過ぎない。多くの頂点を設定すると導出される境界線もそれに応じた変化となるが、漠然とした形状を示すものでなくなる傾向が現れる。この問題点の対応策として、主要部分の形状を図 5(b) に示すような閉曲線により設定する方法を提案する。閉曲線領域の成形には、3 次の B-Spline 曲線を用いる。B-Spline 曲線を採用した理由は、曲線の定義が局所的に行われるため、生成される曲線が予測し易く、修正による影響が限定される特徴を持つためである。

(1) B-Spline 曲線

B-Spline 曲線は、制御点 $\{P_i\}$ とノットと呼ばれるパラメータ $\{t_0, t_1, t_2, \dots, t_{m-1}\}$ によって定義されるパラメトリック曲線である。ノットの数 m は、生成する曲線の次数と制御点の数によって決定される。ノットを $t_i < t_{i+1}$ で等間隔に設定したものを一様 B-Spline 曲線と呼ぶ。B-Spline 曲線の最小単位はセグメントと呼ばれる。 n 個のセグメントから成る一様な 3 次の B-Spline 曲線 $S(t)$ は、

$$S(t) = \sum_{i=0}^{n+2} P_i N_i^3(t), \quad t \in [t_3, t_{n+3}) \quad (6)$$

と定義される。ここで、 $N_i^3(t)$ は 3 次の B-Spline 基底関数と呼ばれる。一様な B-Spline 曲線の場合

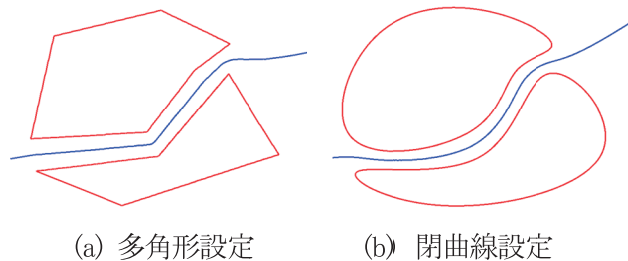


図 5 生成される境界線の差異
赤線:指定領域 青線:生成境界線

には $t_i + t_j = t_{i+j}$ が成り立つ。よって、

$$N_i^3(t) = N_0^3(t - t_i + t_0) \quad (7)$$

が成立する。ここでノット列(ノットの一連の並び)を $t_i = i (i=0,1,2,\dots,m-1)$ と設定すると、 $N_0^3(t)$ は次式で与えられる。図6は(8)式の基底関数のグラフである。

$$N_0^3 = \begin{cases} \frac{1}{6}t^3 & t \in [0, 1) \\ \frac{1}{6}(-3t^3 + 12t^2 - 12t + 4) & t \in [1, 2) \\ \frac{1}{6}(3t^3 - 24t^2 + 60t - 44) & t \in [2, 3) \\ -\frac{1}{6}(t-4)^3 & t \in [3, 4) \\ 0 & t \notin [0, 4) \end{cases} \quad (8)$$

(2) 3次のB-Spline曲線による補間工程

領域の主要部分は、上述したように形状の所要所の座標を指定する。複数設定される主要部分ごとに与えた座標列からB-Spline曲線によって閉曲線領域を表現するものとし、その補間点はB-Spline曲線のノット間のパラメータ t の刻み幅を1以下にすることで得る。ノット間のパラメータ t の刻み幅の逆数が入力点間の補間点数となる。これにより変化の激しいところには多く、そうでないところには少なく補間点を配置することが可能となる。

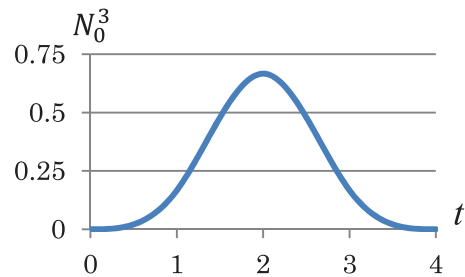


図6 一様な3次B-Spline基底関数 N_0^3

B-Spline曲線は制御点を与えることで曲線が決定されるが、主要部分の形状の入力時に制御点位置を求めるのは現実的でない。そこで、マウスクリックにより入力する点は、想定する領域を示す閉曲線の通過点とし、その位置座標から制御点を算出する。

4.3 歴史的な地勢境界線データ生成システムの機能

前述した工程に従った歴史的な地勢境界線データ生成システムの機能について述べる。

(1) 画像読み込み、表示機能

境界線を生成するに当たり、参照する地図画像をダイアログボックスにより選択させ、読み込み、システムの画面に表示する。画面より大きな画像は、スクロール表示に自動的に切り替わる。

(2) 主要部分形状の点列入力機能

画面上を1回マウスクリックすることで1点が取得される。取得された点には、領域番号が付与される。領域番号はニューメリックアップダウンコントロールの操作で設定する。設定が変更されない限り、同一領域の主要部分の形状を構成する一連の入力点とする。入力点の座標値と領域番号は、リストボックスに登録・表示され、読み込んだ地図の表示領域にもその位置が描画される。

(3) 点列データの生成機能

主要部分の形状を構成する一連の入力点間の補間点を、B-Spline補間により決定する。決定された補間点によって点列データを生成する。入力点間の補間点数はニューメリックアップダウンコン

トロールの操作で設定する。

(4) 入力点の修正機能

主要部分の設定後に形状を表す入力点の削除，挿入，移動が可能である。これらの修正操作はマウスにより行い，直ちに形状も再描画される。

(5) 境界線の導出，表示機能

(3) で生成された形状の点列データに対して面を核とするボロノイ分割を行い，境界線を導出，ポリゴンデータとする。境界線を構成する線分の座標列と領域番号はリストボックスに登録されるとともに，導出された境界線形状が画面に表示される。

(6) リストの表示・非表示切り換え機能

(5) の機能による生成結果を登録したリストボックスの表示・非表示を切り替えられる。

(7) 画像出力機能

画面に描かれた内容を画像ファイルとして出力する。画像ファイルの形式等は，ダイアログボックスで設定する。

(8) 初期化機能

入力点，補間点，表示領域の描画内容のすべてを消去する。初期化後は，(1) の機能で読み込んだ画像が画面に表示された状態になる。また，画面表示のみ消去する機能もある。

(9) CSV ファイル出力機能

入力点と補間点の座標および領域番号を登録したリストボックスの内容，境界線の生成結果を登録したリストボックスの内容を CSV 形式でファイルに書き出す。書き出しは，いつでも実行でき，作業途中の状態も出力できる。

(10) CSV ファイル入力機能

(9) の機能により書き出された CSV 形式のファイルを読み込み，読み込んだデータを該当するリストボックスに登録する。読み込みが完了した時点でのシステムの状態は，読み込むファイルが書き出された時点で復元され，追加の領域設定等ができる。

(11) 再描画機能

(8) または (10) の機能を実行した後，入力点，補間点および生成した境界線を画面に再描画することができる。

5. 歴史的地勢境界線データの生成実験

構築した歴史的地勢境界線データ生成システムを用いて，歴史的地勢境界線データの生成実験を行った。図7はシステムの実行画面の一例である。

5.1 生成実験概要

本システムは，先にも述べたように専門家が地図上に境界線を描画する際に行う境界線の策定作業を想定している。実験においても，境界線が描かれていない地図を参照地図として使用すべきだが，得られた境界線の妥当性の確認のための何らかの方法が必要となる。そこで本実験では，得られる境界線の妥当性の確認を容易に行うために，境界線が描かれている地図を参照地図として使用する。生成される境界線を参照地図上に描くことにより，妥当性は容易に判断できる。具体的には，図1に示した「元禄期摂津国・所領配置図」を参照地図として採用し，描かれている5つの郡境のデータ化を試みる。参照地図の画像サイズは2031×2899ピクセルで，原寸のまま使用した。また，マウスクリックにより設定する主要部分については，各郡の概形に近い形状を入力することにした。

本実験の目的は、提案した手順により 2 章で述べたような大まかな境界線データが生成されるか、また、従前のトレースする手法に比べ、作業量がどの程度軽減できるかの 2 点を確認することである。

今回は、「トレースに近い境界線」を得る実験と「漠然とした境界線」を得る実験の 2 通りを行った。従前のトレースによる手法との比較を念頭に置き、マウスクリックによる主要部分の

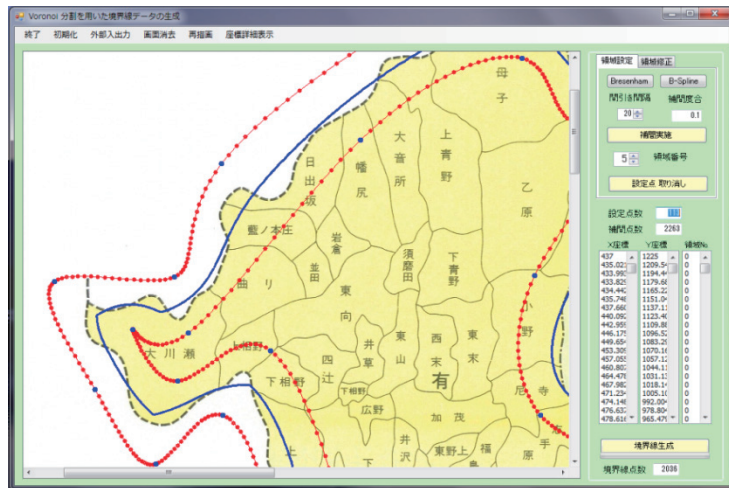


図 7 歴史的境界線データ生成システムの実行画面の一例

入力点数、補間点数、生成境界線を構成する点数をカウントした。また、実験に当たってはシステム操作の訓練を兼ねた試行を数回行った後、点数をカウントする実験を行った。

5.2 生成実験結果

図 8 および図 9 は、実験で生成された境界線データにより郡境を描いた「トレースに近い境界線」および「漠然とした境界線」の図である。図 10 は、参照地図として用いた図 1 に描かれている郡境界をトレースしたデータにより描かれた郡境界地図である。

図 8 は図 10 に比べ境界線の細部が簡略化されているものの、図 10 の形状との類似性が高い。一方、図 9 は図 10 に比べ概形的な境界線となっており、漠然とした形状で位置関係や接続関係を表した図となっている。これらから意図した結果が得られていると判断できる。



図 8 生成された「トレースに近い境界線」の一例

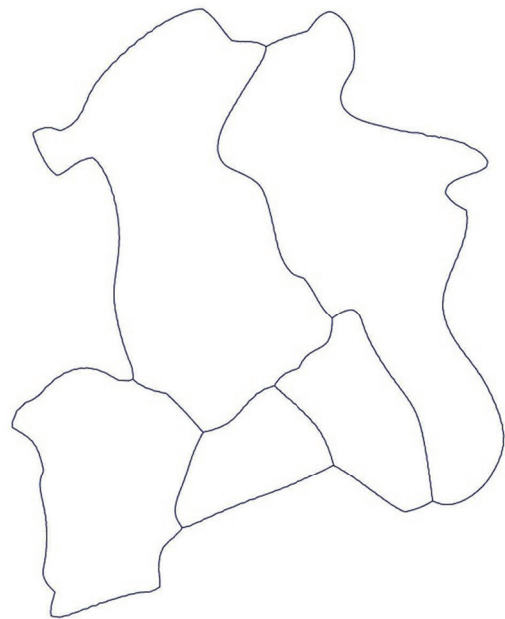


図 9 生成された「漠然とした境界線」の一例

図8に示す境界線を得るために設定した主要部分の入力点数は411点、補間点数は2466点、生成された境界線を構成する点数は2274点であった。図9では、主要部分の入力点数は122点、補間点数は1098点、生成された境界線構成点数は1043点であった。また、図10のトレースによる境界線を構成する点数は2040点である。これらから、提案手法はトレースに近い状況の境界線を約20%程度の入力点数で得られており、またトレースに対し約6%程度の入力点数で概略的な境界線が得られ、大幅に作業量が軽減できていることがわかる。作業量の削減比率については、対象により大きく異なる可能性も否定できないが、概ね提案手法は、同種の空間データの作成方法として有効と考えられる。



図10 トレースによる境界線の一例

6. おわりに

本稿では、GISを利用した歴史研究の場において不可欠な歴史的地勢境界線データの生成方法を提案した。提案方法は、マウスにより領域の主要部分の形状を入力し、入力した点をもとにB-Spline曲線に基づく補間点を生成、面を核とするボロノイ分割を適用して境界線データを作成するものである。提案手法を用いたシステムを作成し、実験を行った。その結果、概ね意図した境界線データが得られた。今回の実験では、提案手法は、トレースによる方法に比べ約20%程度の作業量で済むことが示され、また6%程度の作業量で概略的な境界線データが生成でき、提案手法が有効であることが確認された。

今後の課題としては、適切な補間間隔の設定、ボロノイ分割の処理時間の短縮などが挙げられる。また、今後の展開に当たっては、歴史的地勢境界線にかかわる分野の専門家に本システムの実践的使用を願い、所見を伺うことが大切と考えている。

謝辞

本研究を進めるに当たり、日頃よりご支援、ご教示を賜る帝塚山大学川口洋教授に深謝いたします。また、本研究の一部は、日本学術振興会・学術研究助成基金助成金(23500317)および(25280123)の助成を受けて実施したものである。

参考文献

- [1] HGIS 研究協議会編：『歴史GISの地平』、勉強出版、東京、P.262(2012)。
- [2] Ian N.Gregory and Paul S.Ell：Historical GIS, Cambridge University Press, Cambridge, P.227(2007)。
- [3] 山村祐司：行政区画変遷 WebGIS, <http://giswin.geo.tsukuba.ac.jp/teacher/murayama/boundary/>。
- [4] 宮崎良美：古代を中心とした歴史データベースの試み、第18回公開シンポジウム「人文科学とデータベース」論文集, pp.33-42(2012)。
- [5] 加藤常員：歴史的境界線のデータ化、人文科学とコンピュータシンポジウム2013 論文集, IPSJ

- SIG-CH/PNC/ECAI/CIAS Joint Symposium, 情報処理学会, Vol.2013, No.4, pp.119-126(2013).
- [6] Hurtado et al. : The Weighted Farthest Color Voronoi Diagram on Trees and Graphs, Computational Geometry : Theory and Applications, pp.13-26(2004).