

# 25 構造物を考慮した地形風数値解析のためのモデリング手法の構築

中央大学大学院 学員 ○清水 仁  
中央大学 正員 樫山 和男

【抄録】 本論文では構造物を考慮した地形風数値解析のための複雑地形に対するモデリング手法を提案する。本手法では大型スキャナ及びCADシステムを用いて地形図を数値化することで地形データを獲得する。同様に構造物に対しては設計図を用いることで実在の構造物により忠実なモデル化が可能となる。別々に作成された地形と構造物のCADデータを同座標系上に配置し、CAD上で解析を行う領域の形状データの作成を行う。領域内部は三次元Delaunay分割法、八分木法を用いて有限要素分割を行う。本手法により複雑な微地形及び構造物のモデル化を正確かつ迅速に行うことが可能となる。

【キーワード】 地形風数値解析, 有限要素法, メッシュ生成, CAD, GIS

## 1. はじめに

地形風や構造物周りの気流に関する研究については、主に風洞実験に依存しているのが現状である。しかし、風洞実験は相似則や境界条件の妥当性等の解決すべき問題点がある。一方、近年、計算機性能の飛躍的な向上も相まって、上記の問題のない数値実験の有効性が認められつつあり、数多くの数値計算手法が提案されている<sup>1)</sup>。

気流の数値解析を行うにあたりその解析の前処理にあたる自動要素分割法の開発が急務となっているが、地形上に構造物が存在する領域は複雑極まりなく、未だそのモデリング手法は確立されていない。対象とする領域のモデル化を行う際、オブジェクトの形状をコンピュータに入力するという作業が必要となる。多くの場合CADシステムを用いて三次元形状データ作成を行うが、地形のように自然の形状を有するものをCAD上に入力することは困難であるとされてきた。しかしながら近年、地形データ・スキャニング機能を有するソフトが開発され、また、当初はEWS上で稼働していた地形データ・スキャニングシステムがパソコンでも動作可能となったことで、比較的安価にシステムを手に入れることが可能となった。

そこで本研究では、この地形データ・スキャニングシステムに着目し、従来、地形データをコンピュータ入力する手段として用いられてきた数値地図やデジタルによる入力を持つ、精度やデータ処理にかかる時間といった問題点を解決すべく地形風数値解析のための地形及び構造物モデリングシステムの構築を目的としている。本報告では、既に提案済みである地形のみを考慮した場合の有限要素作成システム<sup>2)</sup>を応用し、地形に加え構造物を考慮した地形風数値解析のためのモデリング手法を提案する。

## 2. 地形モデリングシステム

データの入手から有限要素作成のための形状データ作成までを説明する。本システムの流れを図1に示す。

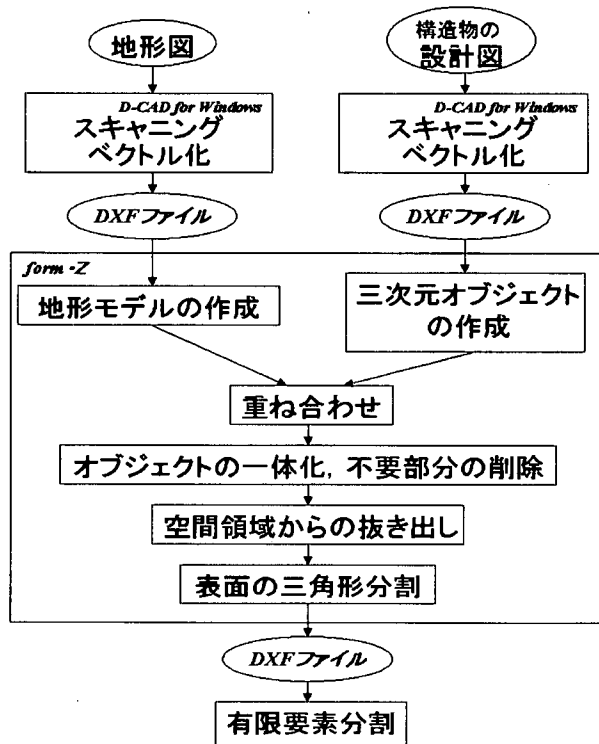


図1 処理フロー

### 2.1. データの入手

地形データの入手には、既存の地形図を用いる。今回は兵庫県香住町余部を対象地域としており、1986年(昭和61年)12月28日、余部鉄橋を回送中の列車が突風(風速25m)により、鉄橋から転落するという事故が起きた場所である。また、構造物のデータはその設計図を用いることにより、実在の構造物を忠実に再現することが可能となる。

## 2.2. スキャニング

対象となる地域の地形図及び構造物の設計図を大型スキャナで読みとり、ラスター・イメージを獲得する。本システムで使用するスキャナは「Context ScanPlus III 800T」で、A0用紙サイズまでのスキャニングが可能である。事例として今回用いた地形図は1/25,000地形図「余部」である。

そして、得られたラスター・イメージに対し四点補正（紙のゆがみや傾きを補正）やゴミ取り（文字や地図記号、埃等の消去）、不要部分の削除等、各種ラスター編集を施し、精度良く、かつベクトル化しやすいラスター・データに修正する。

## 2.3. ラスター／ベクトル変換

本システムではベクトル化ソフトとして、新日鐵社の「NSXPRES」上で稼働する「D-CAD for Windows」を使用している。得られたラスター・データの等高線を、D-CAD上の等高線追跡機能を利用し、コンピュータと対話しながらベクトル化を行うので、作業を高速かつ正確に行うことができる。また、等高線追跡のパラメータを変えることで、デジタイザによる入力と同様に精度、解析領域の大きさ等、必要に応じて獲得するデータ量を自由に調節できるのも、本システムの大きな特徴である。

そして、ベクトル化されたデータをDXF (Drawing Interchange Format) 形式に書き出す。DXFは異なるCAD間でのデータ交換用の中間ファイルとして広く用いられているファイル形式であり、またAsciiタイプのデータなので、任意に読み書きを行うことができる。

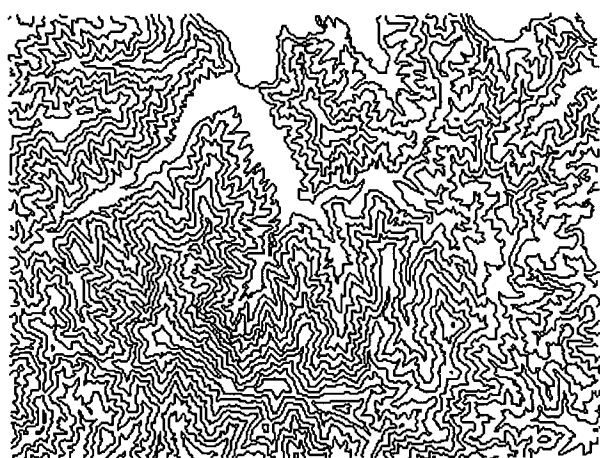


図2 ベクトル化後の等高線

## 2.4. オブジェクトの作成

### 2.4.1. 地形モデルの作成

ベクトル化された等高線（図2）は曲線を多数の点同士をつなぐ微小な直線で近似して表現している。そこで、DXFファイルから点情報のみを抽出し、その全

ての点同士をDelaunay三角形分割法<sup>3),4)</sup>により不等辺三角形網 (Triangulated Irregular Network; TIN) を生成し、三角形パッチを貼りつめることで、地表面形状を表現する（図3）。

しかしながらDelaunay三角形分割は与えられた節点群に対しユニークに決まるので、節点配置によっては地形の凹凸を潰してしまう恐れがある。そこで、尾根や谷線に沿って新たに点を設置することでこれを回避する。

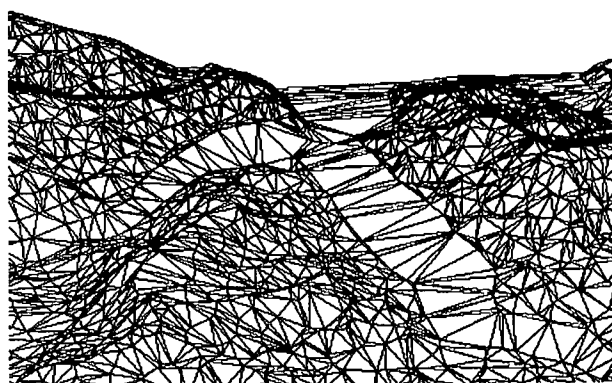


図3 TIN（余部鉄橋付近拡大）

さらにここでは、CADソフトの機能を利用する方法を説明する。本システムでは三次元ソリッドモデラーであるform・Z（米国auto・des・sys社が開発、(株)イメージズアンドメジャーメント社が販売）を用いる。DXFファイルを介しform・Zにデータを取り込み、「地形図作成」機能を用いて三次元に立ち上げる。図4は余部鉄橋付近のデータを三次元化したものである。

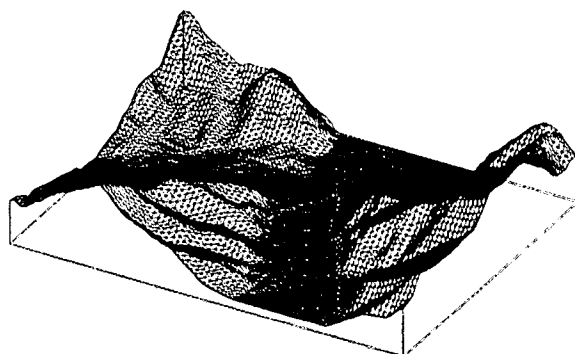


図4 三角形分割された地表面

### 2.4.2. 構造物モデルの作成

構造物モデルは、CADや三次元モデラー上で直接作成する方法と、地形の場合と同様にスキャンされた構造物の設計図をD-CAD等を用いてベクトル化し、モデルを作成する方法がある。設計図をベクトル化したものは、通常二次元ワイヤーフレーム状のオブジェクトなので、これをform・Z上の「三次元立ち上げ機能」を用いて、設計図の寸法通りに、三次元ソリッドとしてオブジェクトを作成する。本報告では図5に示す簡単な橋梁モデルを用いた。

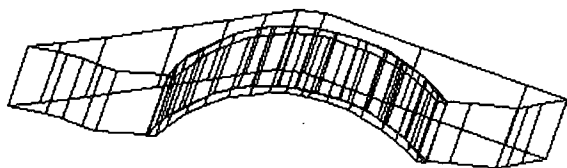


図5 橋梁モデル

## 2.5. 地形のみを考慮した場合の有限要素生成

### 2.5.1. 二次元直交格子の作成

三次元解析領域作成の前処理として、二次元直交格子を作成する。生成された三角形網上に、 $x$ 座標、 $y$ 座標を任意の数で分割して新しく格子点を発生させる。そして各格子点がどの  $TIN$  に含まれるかを判断した後、該当する  $TIN$  を構成する三点を用いて、次の補間式<sup>3),5)</sup>より各格子点の標高値  $h$  を求める。

$$h = \Phi_1 h_1 + \Phi_2 h_2 + \Phi_3 h_3$$

$h_1, h_2, h_3$  は  $TIN$  を形成する三節点の標高値を表し、補間関数  $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3$  は次のように定義される。

$$\Phi_\alpha = a_\alpha + b_\alpha x + c_\alpha y \quad (\alpha = 1, 2, 3)$$

ここで、

$$a_\alpha = \frac{1}{2\Delta}(x_\beta y_\gamma - x_\gamma y_\beta)$$

$$b_\alpha = \frac{1}{2\Delta}(y_\beta - y_\gamma)$$

$$c_\alpha = \frac{1}{2\Delta}(x_\gamma - x_\beta)$$

$(x_\alpha, y_\alpha)$  は  $TIN$  を形成する三節点の座標値、 $\Delta$  は  $TIN$  の面積を表す。以上の過程により  $TIN$  から二次元直交格子状に変換したものを図6に示す。これは、数値地図の標高データと同義のものであり、かつ任意の格子数に分割できるので、微地形を正確に表現し得る数値標高モデル (Digital Elevation Model; DEM) が獲得できる。

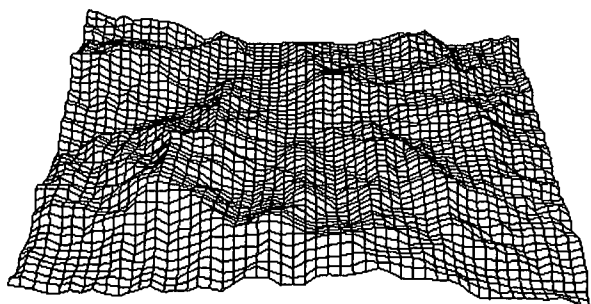


図6 二次元直交格子

### 2.5.2. 三次元有限要素解析モデルの作成

二次元直交格子を鉛直方向に任意の層数積み上げ、三次元有限要素解析モデルを作成する (図7)。この方法で作成された三次元メッシュは高さ方向の層数が一定であり、また、大気境界層を考慮し、地表付近で細か

く、上層ほどサイズの大きいメッシュにしているため、地形風数値解析において精度、及び効率の良い計算が期待される。

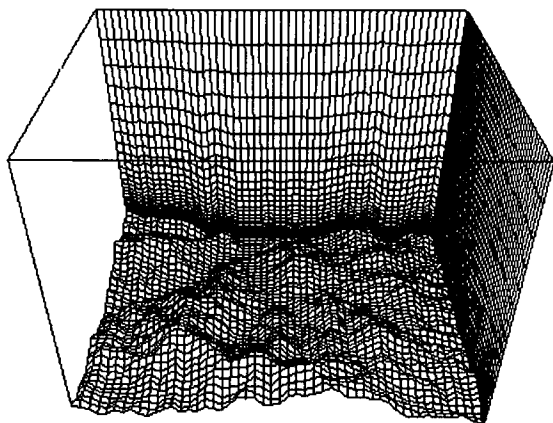


図7 三次元有限要素解析モデル

## 2.6. 構造物を考慮した場合の有限要素生成

### 2.6.1. 地形と構造物の重ね合わせ

作成された地形モデルと構造物モデルを、同一の座標空間上に配置する。基本的には「コピー・貼り付け」で行うことができるが、その際、地形と構造物のスケール、及び位置関係を合わせなければならない。また、*form・Z RenderZone* を用いて各オブジェクトに対し質感の設定を行い全体をレンダリングすれば、景観設計に利用することができる (図8)。

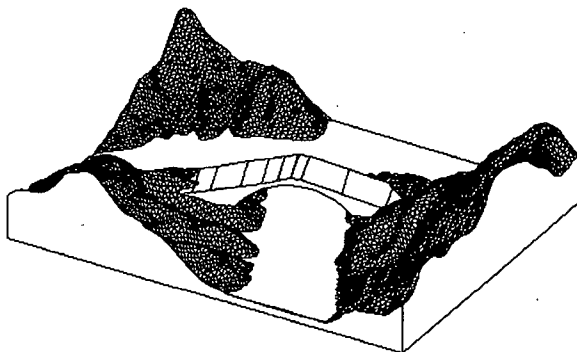


図8 重ね合わせ後のオブジェクト

### 2.6.2. オブジェクトの一体化、不要部分の削除

構造物まわりの三次元メッシュを作成するのに必要となるのは、オブジェクトの外側のデータであり、内部のデータ (重なっている部分) は不要である。しかしながら、通常モデリングされた構造物は、種類別にレイヤーを分け、各部品が独立したオブジェクトになっているため、オブジェクト同士が重なり合う部分が存在する。そこで、ブーリアン演算「合体」により全てのオブジェクトを1つにまとめ、さらには重複する部分 (「ゴースト」と呼ばれる部分) を削除することにより、対象領域全体の境界形状のみのデータを得る。

### 2.6.3. 空間領域からの抜き出し

開境界を設定するために、任意の高さを持つ六面体をあらかじめ作成しておき、その六面体から地形と構造物が一体化されたオブジェクトを、ブーリアン演算「引き算」で抜き出す。ここで残った部分の内部が、気流解析を行う領域となる。

### 2.6.4. オブジェクト表面の三角形分割

オブジェクト表面を三角形分割して境界面を定義する。しかしながら *form・Z* 自体には面を三角形分割する機能が存在しない。そこで、*form・Z* がサポートする *3DGF* や *3DGM* 形式ファイルをインターフェイスとして用いる。これらの形式で保存する際のオプションとして「すべての面を三角形分割する」というものがあるので、これを選択して画面上のデータを保存する。そして、その保存されたファイルを読み込み直すと、意図に合ったデータに変換される（図9）。なお、この三角形は領域内部から見て時計回りに節点結合されているため、領域の内部・外部の判別が可能である。

そして、このデータを *DXF* 形式のファイルに変換する。さらに、*DXF* ファイルから必要な情報を取り出し、有限要素分割の入力データを作成する。

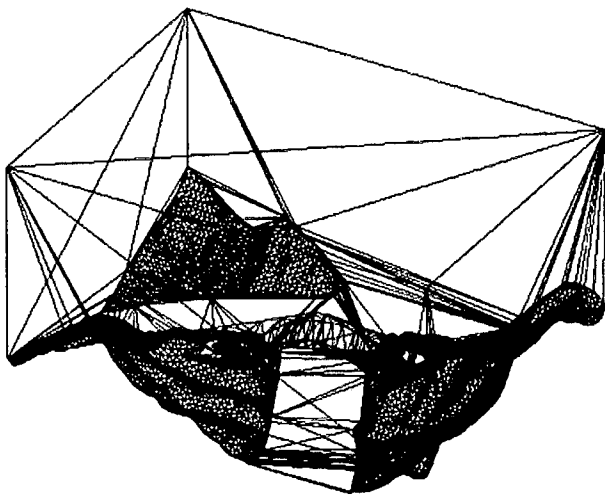


図9 オブジェクト表面の三角形分割

### 2.6.5. Delaunay 分割法の適用

作成された境界データの内部を三次元化された *Delaunay* 三角形分割法<sup>6)</sup>を適用し、四面体を用いて有限要素分割することを考える。一般に四面体は任意形状への適合性に優れており、また、*Delaunay* 分割法により分割された四面体は、与えられた節点配置に対してもっとも正四面体に近くなるという特徴がある。そのため、*Delaunay* 分割法は有限要素解析で好まれる要素の幾何学的条件を満たしやすい有限要素生成法であるといえる。

しかしながら *Delaunay* 分割法は、節点位置をあらかじめ与えてやる必要があり、また、そのままでは非凸領域に適用することができないので、手法を工夫・変更<sup>4),6)</sup>する必要がある。領域内部の節点発生には八分木法<sup>7)</sup>を用いる。八分木法は三次元形状の表面が認識できていることを前提とし、その表面形状が複雑な部分には点密度を高く、平易な箇所には点密度を低く設定できることより、*Delaunay* 分割法の点配置法として有効な手段である。

## 3. おわりに

本報告では、構造物を考慮した地形風数値解析のための地形モデリング手法を提案した。本手法では大型スキャナ、*CAD* ソフトを用いているため、従来困難とされていた地形データと構造物データのリンクがスムーズに行えるようになった。さらに本手法には以下のような特徴がある。

- 小縮尺の地形図を用いることにより、微地形を正確に表現することが可能である。
- 地形図を *CAD* 上に取り込み、等高線追跡機能を利用することで、迅速なベクトル化が行える。
- 設計図をベクトル化することにより、複雑な構造物を正確に表現することができる。
- ブーリアン演算を利用することにより、正確な境界形状データを作成することが可能となった。

本手法を地形風数値解析手法、及び可視化手法と結合させることにより、有効な地形風数値解析システムの構築が可能となる。

今後は、*Delaunay* 分割法の三次元化を早急に進めると同時に、水域を含めた地形モデリング等、利用目的に応じたシステムの改良を進め、汎用性のある地形モデリングシステムの開発を行う予定である。

## 参考文献

- 1) 内田孝紀, 大屋裕二, "地面上の3次元物体を過ぎる安定成層流の数値解析", 第10回数値流体力学シンポジウム論文集, pp304-305, 1996
- 2) 清水仁, 山口敏, 榎山和男, "地形風数値解析のための三次元地形モデリング手法の構築とその利用", 第22回土木情報システム講演集, pp13-16, 1997
- 3) 榎山和男, 岡田毅, "水面波動解析のための最適自動要素分割システムの開発", 土木情報システム論文集 1992年度, pp57-64, 1992
- 4) 谷口健男, "FEMのための要素自動分割", 森北出版, 1992
- 5) K. Kashiya, M. Kawahara, "Input data of water depth in FE analysis of shallow water flow", Eng. Comput., Vol. 2, pp266-270, 1985
- 6) 谷口健男, 太田親, "三次元凸体の四面体有限要素自動分割", 土木学会論文集 No.432 / I-16, pp137-144, 1991
- 7) M. S. Shephard, M. K. Georges, "Automatic three-dimensional mesh generation by octree technique", Int. J. Num. Meth. Eng., Vol.32, pp709-749, 1991