

デジタイザによる標高データ作成とその補間法

伊 藤 太 一

要 旨

GISを始めとするさまざまな地域情報の基礎データとして標高データが不可欠である。だが、DTMの全点を直接読み取って作成するにはかなりの労力を要するので、少ないデータから補間する方法が必要となる。本論ではいくつかの補間法を検討した結果、既知の最寄の3点から未知の点の標高を求める簡便な式が比較的不規則な小面積の地形を対象とした場合、正確で効率がよいことを明らかにした。また、それを用いたマイクロコンピュータを用いた補間のためのプログラムを作成した。

1. はじめに

地理情報システム (Geographic Information System) をはじめとして、さまざまな地域情報をデータベース化するに当たって、標高のデータは不可欠である。そのような数値地形モデル (Digital Terrain Model 略称 DTM) は MIT において1950年代初期に、高速道路の建設地域の土地断面図を描くために考案された¹⁾。今日では人工衛星や航空写真から直接作成する方法も開発されているようだが^{2,3)}、樹林地では地表面の標高は正確に計測できない。また、国土院による国土数値情報の中で全国の標高も記録されているが、演習林程度の地域で活用するにはグリッド間隔が粗過ぎる。

そこで実際には対象地域の地形図から標高を拾い読みすることになる。たとえば、1/25,000の地形図において50mは2mmである。西川⁴⁾はランドサット MSS データに合わせて80m間隔で標高データを1/25,000地形図から読み取っているが、それでも3.5mm間隔である。さらに、1ピクセルが30m四方のランドサット TM データと同精度で地図から標高データを読み取るためにはもっと狭い間隔が要求されるが、デジタイザから座標値が入力できるとはいえ、非人間的な作業といえる。肉眼で読み取るには2mm間隔が限界であり、それでも大変目を酷使する作業である上、標高の読み間違いも不可避である。そこである程度のサンプルデータから補間できないかということが考えられ、それに関する論文がいくつか発表されている。それらを踏まえて、本論では比較的小面積の地域における補間法について検討するとともに、パソコンを利用した補間プログラムを作成した。

2. 標高データの補間法

補間の精度については既に土木の分野からいくつかの実験が発表されており^{5,6,7)}、それらによれば地形図の図化過程、読み取り、サンプル数、サンプル地点、読み取り範囲、補間式などのさまざまなプロセスから生じる誤差の総合されたものが精度を決定する。直線よりも曲線や曲面を用いた補間の方が理論的には精度が高いが、処理時間の増大の割には補間式を2次以上にしてもそれほど精度は向上しないという結果も出ている^{8,9)}。

一般に、スプライン関数などの高次の曲線式を用いた補間はなめらかなので連続性のある曲面の補間には適している。しかし、データ数が多いと莫大な計算時間を要し、今回の標高データのように多数の地点を補間する場合には実用的ではない。また、地形の場合は本来の凹凸が取り除かれてしまうという問題がある。対象地区が狭い範囲に限定されるにしたがって、崖や微地形などによる不規則性が増大するのではなからうか。このように地形には規則性と不規則性が混在し、数学的に高精度で補間しても現況にそぐわない場合が多い。

一方、線形補間では計算時間が短くて済むが、その精度が低くなる。また線形補間では山頂などの特異点の標高が無視されその部分が平坦に表現されるので、ピーク等のデータを追加入力する必要がある。北川¹⁰⁾は、このような問題に対処して、格子点の周囲の地形状況に応じて自動的に最適方式を選択するシステムを開発しているようだが、それがマイクロコンピュータで容易に使えるものか不明である。

そこでそのような不規則な地形や、土木工事などによる人工的な斜面を含む地形でも補間でき、また、計算がマイクロコンピュータでも利用できる実践的な方法について焼岳を事例として考察した。補間法としては、データを三角網に分け2変数5次多項式を用いてそれぞれの3角形の中のデータを算出するというアキマ (Akima) 法、スプライン (Spline) 法、さらに低次にして計算を簡略にしたパーシャルスプライン法、距離重みづけ (Distance Squared Weighted Interpolation) 法¹¹⁾の4種類を検討した。

3. 比較方法

補間法を検討するに先立って、事例として北アルプス国立公園の焼岳を選んだ。焼岳は浸食による崩壊が生じているので不規則な微地形の補間に適当と判断したからである。ここで基準データをもとに、サンプルデータの取り方、その数による違い、および、補間の方式による違いの見地から精度や処理時間の違いを検証した。サンプルの取り方と言うのは、地形の変化する地点は細かく、単純なところでは少なくデータを集めるような人間の判断の有無と精度の関係を調べるものである。作業は次のように進められた。

1) 国土地理院発行1/25,000地形図から焼岳山頂を中心とする3 km四方 (東経137°33'50"-35'50", 北緯36°12'50"-14'30") (図-1) を、点格子板を用いて100 m間隔 (図上では4 mm間隔) のグリッドで区分し、最小単位5 mで標高を読み取り961点 (31×31) からなるDTMを作成した。所要時間は読み取りに約3時間、キーボードからの打ちこみに約1時間、計約4時間であった。あとで点検したところ、5%程度の誤読が見つかったのでそれらを訂正し、基準データとした。

2) 小型のデジタイザが接続されたマイクロコンピュータを用いて、キーボードから入力した標高の座標値を読み取るプログラムをMS-DOS上のBASICで作成した。

デジタイザからのデータ読み取りには、まず読み取る等高線の標高をキーボードから入力し、その等高線上の点の座標値を適当な間隔でカーソルから読み込む方式を採用した。この方式なら

ば、標高をキーボードから入力する手間が少なくはすむが、地形によってはデータ間隔が広くなる部分が生じるので、分布を調べてまばらな部分のデータを追加した。また、読み取り間隔は地形によって変え、山頂など等高線上では表現できないような地点はそれぞれ入力した。このようにたどった等高線には含まれていない山頂などの特異な地点の標高を追加することによって線形補間では無視されてしまう地形が表現できることになる。

以上の方法で範囲内の389点 (Data 1)、範囲内の929点 (Data 2) (図-2)、範囲外も含む874点 (Data 3)、範囲外も含む1,803点 (Data 4) の4種類のデータを作成した。範囲外も含むデータを読みこんだのは、補間式によっては周辺部でオーバーシュート等の異常値が補間される現象に対処するためである。Data 1の作成に約10分、Data 2の作成に25分であった。Data 2と同数のデータからなる基準データを点格子板から作成する1/10の所要時間である。

3) 4種類の標高データを4種類の方法で補間してDTMを作成するとともに、基準データを含む焼岳の透視図を出力した。その処理にはSASと呼ばれる統計処理用のパッケージ¹²⁾に含まれているものを利用した。この中のSAS/GRAPH¹³⁾に含まれているG3GRIDという補間用のプロシジアを用いた。また、補間結果の確認のため補間されたデータの頻度分布を調べ、また、G3Dと呼ばれるプロシジアでグリッドデータから生成した3次元の透視図を描き、日本語ラインプリンタに出力した。視点は焼岳の北西上空に設定した。このプロシジアではランダムな点のX,Y,Z座標値を与えると指定した格子の間隔で値を補間する。すなわちランダムなX,Y座標値からなるある地域の標高データから任意の格子間隔の標高データを作り出せる。これは1種類の標高データからさまざまな間隔のデータを作り出せることを意味する。

4) 補間されたデータと格子板を用いて読み取った基準データとの差を比較し、標準偏差などの基礎統計量を算出し、表-1にまとめた。また、出力した透視図のうち、基準データに基づく図およびData 1に基づく図4枚、Data 4に基づく図3枚、Data 3に基づく図1枚の計9枚を提示した。

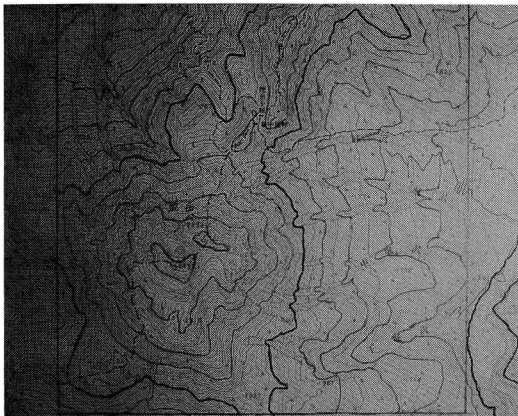


図-1 焼岳を中心とする対象地域地形図

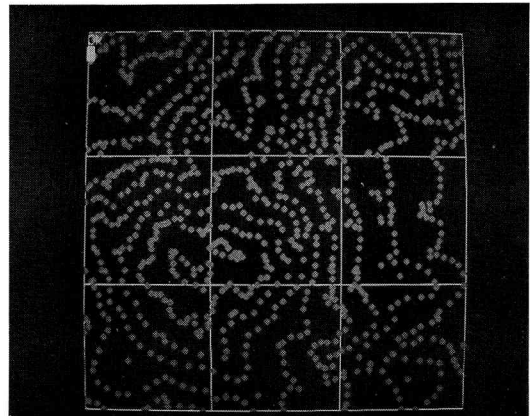


図-2 対象地区のデータ (Data 2) 採取地点とブロック区分

4. 考 察

補間の所要時間は元のデータ数と補間によって生成されるデータ数（X軸方向のグリッド数とY軸方向のグリッド数の積）と補間式の複雑さの積によって規定されると考えられる。簡易な距離重みづけ補間以外はマイクロコンピュータでは処理困難であった。さらに、スプライン補間の場合は大型計算機を用いても、1,803地点からなるData 4では実行不可能であった。アキマ法もスプライン法ほどではないにしても大型計算機でもかなりの時間を要した。

図-3は基準とした地形図から直接読み取った格子点のデータで描いた結果である。表-1から、データ数が389地点の場合（Data 1）には距離重みづけ法以外では標準偏差が200を越えてしまう。図からもアキマ法（図-5）、パーシャルスプライン法（図-6）では後方に曲線が飛出している。さらにスプライン法（図-7）も含めて手前の地形が全く異なり、不適切である。データ数が少ない場合には高度な補間をするよりも単純なものの方が精度が高いということが言える。

Data 2を用いた場合も距離重みづけ法以外ではデータの境界部分で異常な補間が行われていた。対象範囲内のものと範囲外までも広くデータをとったものと比べると、アキマ法やパーシャルスプライン法では著しい差が見られる。いくつかの補間式の中でアキマ法というのは地形などのデータの補間に適しているようにマニュアルに述べられていたのでこれを利用したが、実際には不規則な地形の場合や、データの端の部分では異常な値が生じる。

これに対して周辺部分も含む1,803地点のデータをもとに補間した場合、いずれも標準偏差が小さくなる。透視図からも異常さは薄れているが、アキマ法（図-9）とパーシャルスプライン法（図-10）では凹凸が強調される。反対に、スプライン法では大型計算機でも1,803地点を補

表-1 基準データと補間データの比較

補間法とデータカテゴリー	最小誤差	最大誤差	平均誤差	標準誤差
距離重みづけ法				
Data 1 (389 Points)	-110	125	-1.867	31.716
Data 2 (929 Points)	-100	110	1.453	27.365
Data 3 (874 Points)	-95	125	-2.122	27.597
Data 4 (1803 Points)	-87	75	-1.262	15.423
アキマ法				
Data 1 (389 Points)	-759	586	4.916	210.130
Data 2 (929 Points)	-1136	300	-17.232	123.547
Data 3 (874 Points)	-90	112	-2.073	22.448
Data 4 (1803 Points)	-92	172	-0.311	17.095
パーシャルスプライン法				
Data 1 (389 Points)	-812	594	3.616	210.777
Data 2 (929 Points)	-597	321	-6.806	66.997
Data 3 (874 Points)	-90	113	-2.014	22.322
Data 4 (1803 Points)	-92	94	-0.675	16.095
スプライン法				
Data 1 (389 Points)	-616	572	-0.886	204.368
Data 2 (929 Points)	-90	79	-0.552	16.131
Data 3 (874 Points)	-93	105	-2.054	17.655

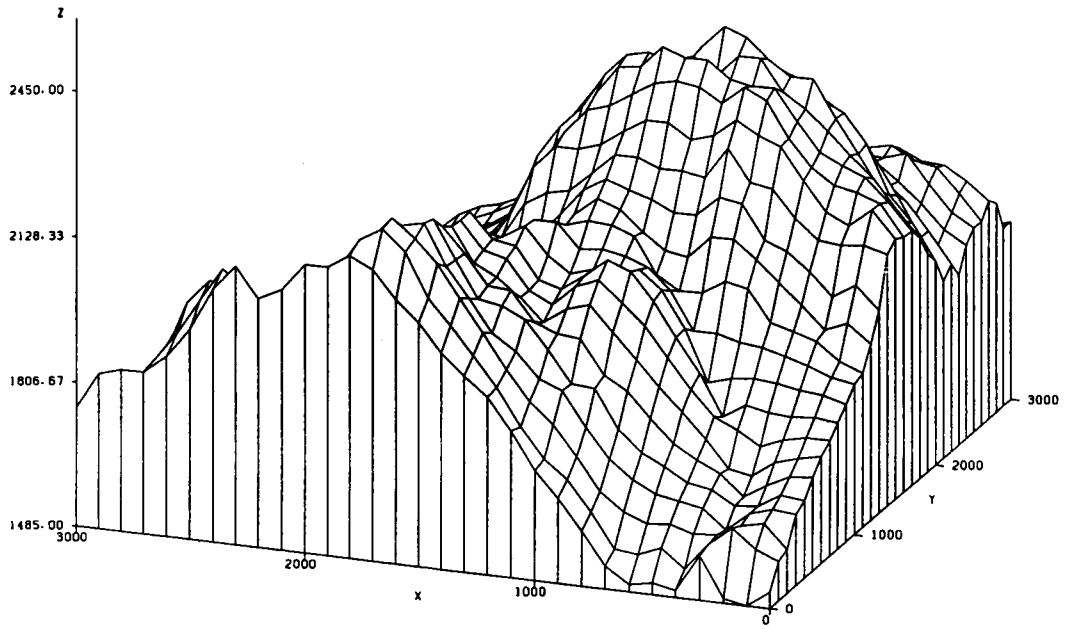


図-3 基準としたグリッドデータによる透視図

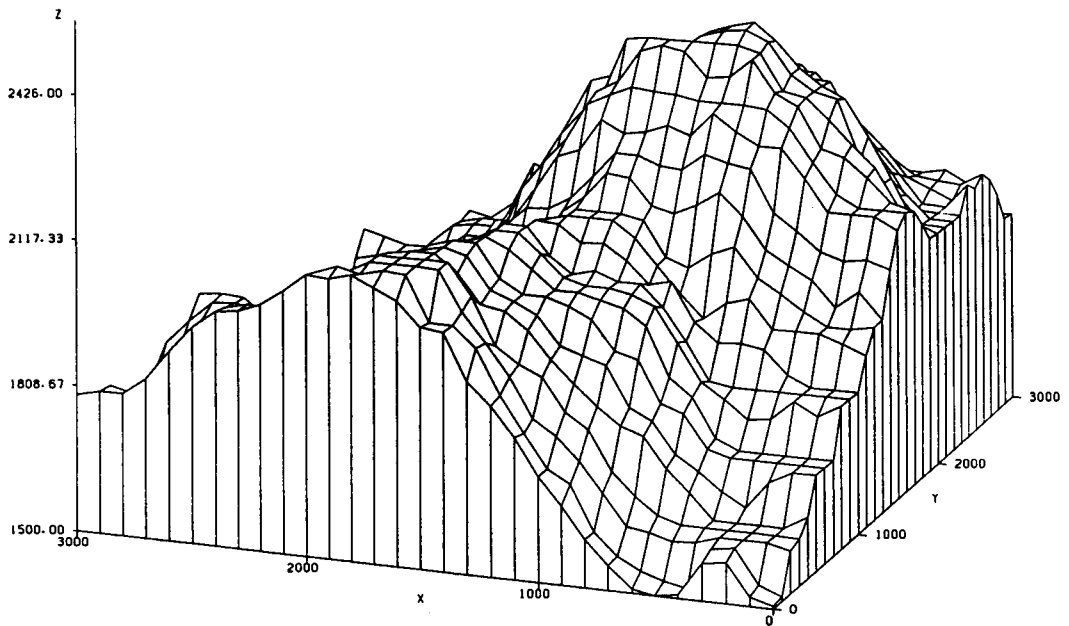


図-4 Data 1 を用いた距離重みづけ法による透視図

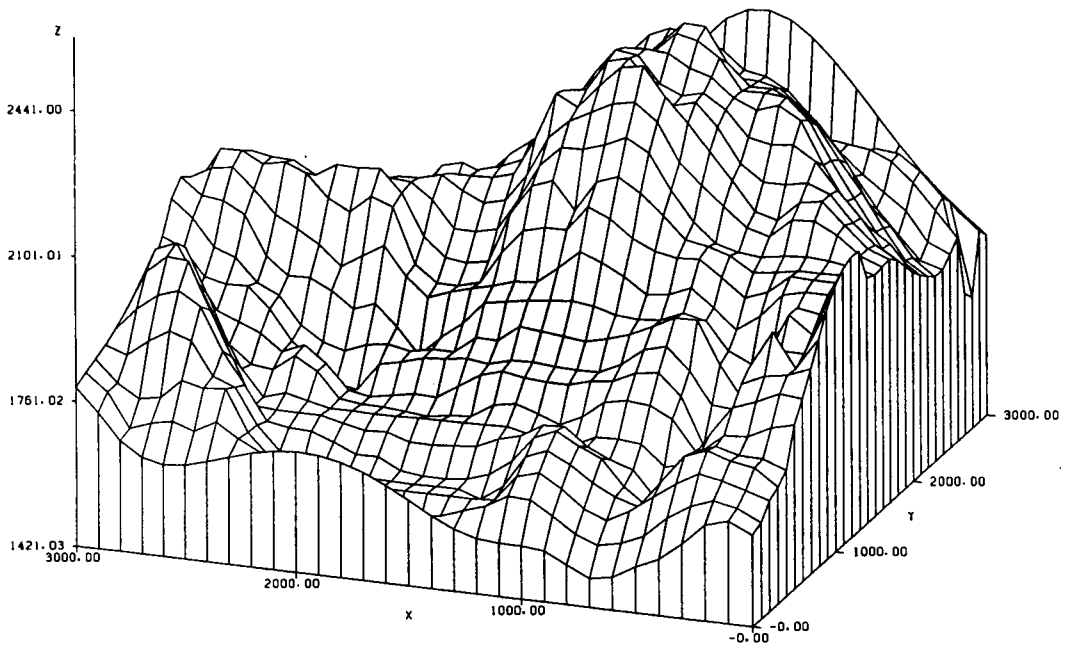


図-5 Data 1 を用いたアキマ法による透視図

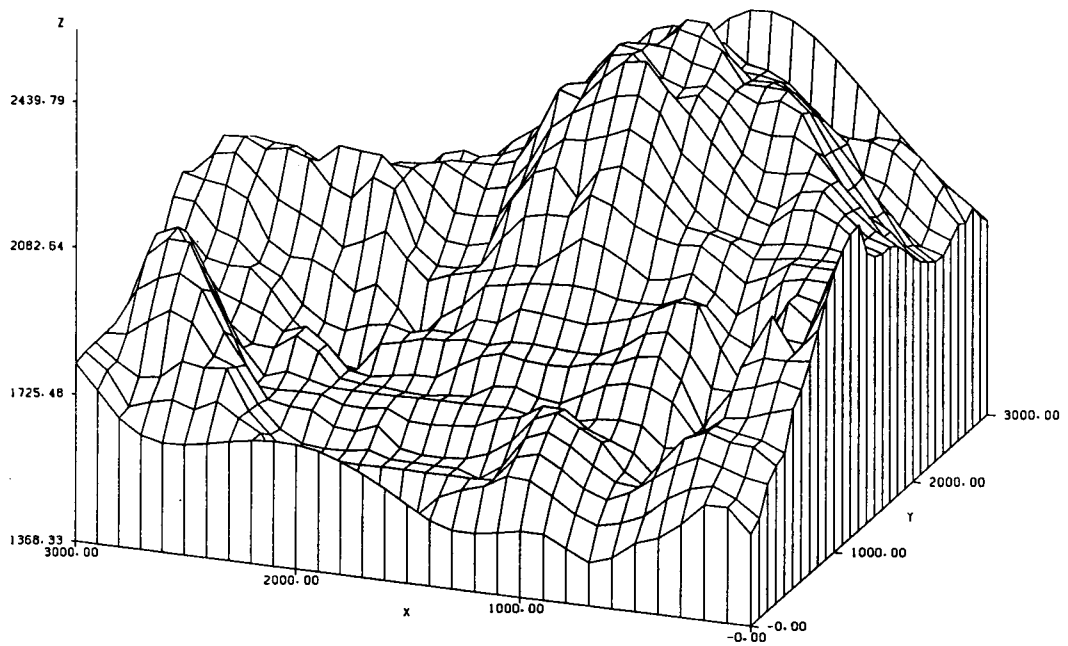


図-6 Data 1 を用いたパーシャルスプライン法による透視図

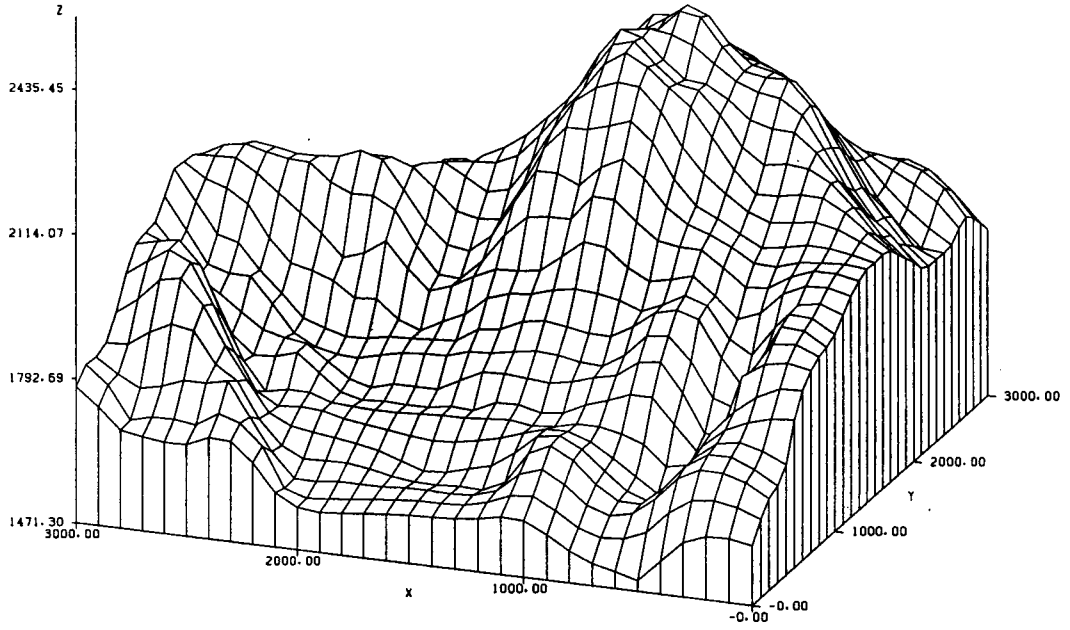


図-7 Data 1 を用いたスプライン法による透視図

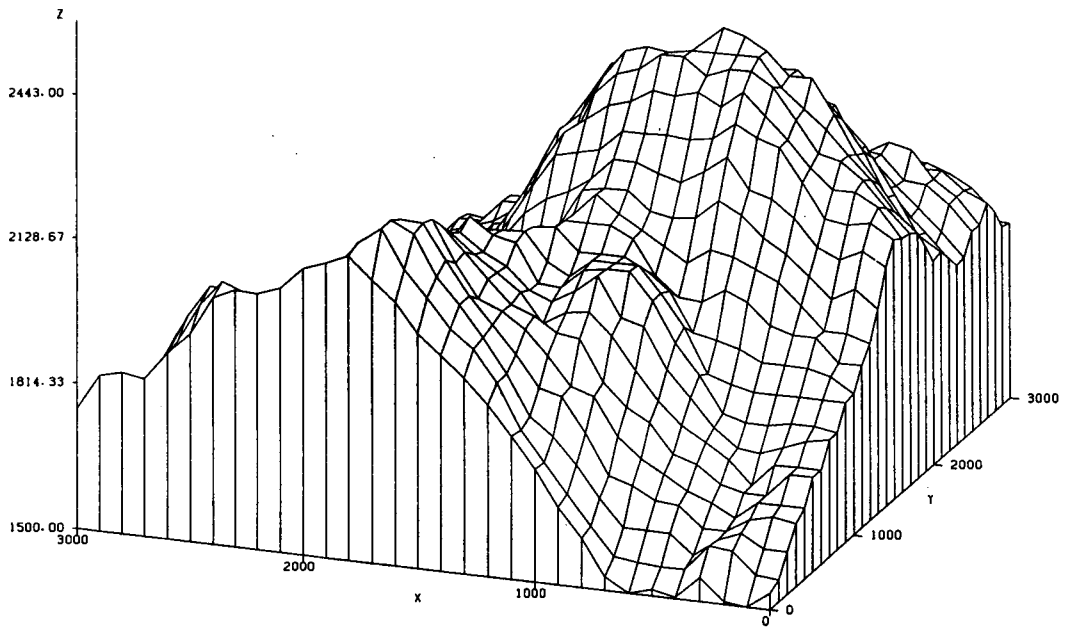


図-8 Data 4 を用いた距離重みづけ法による透視図

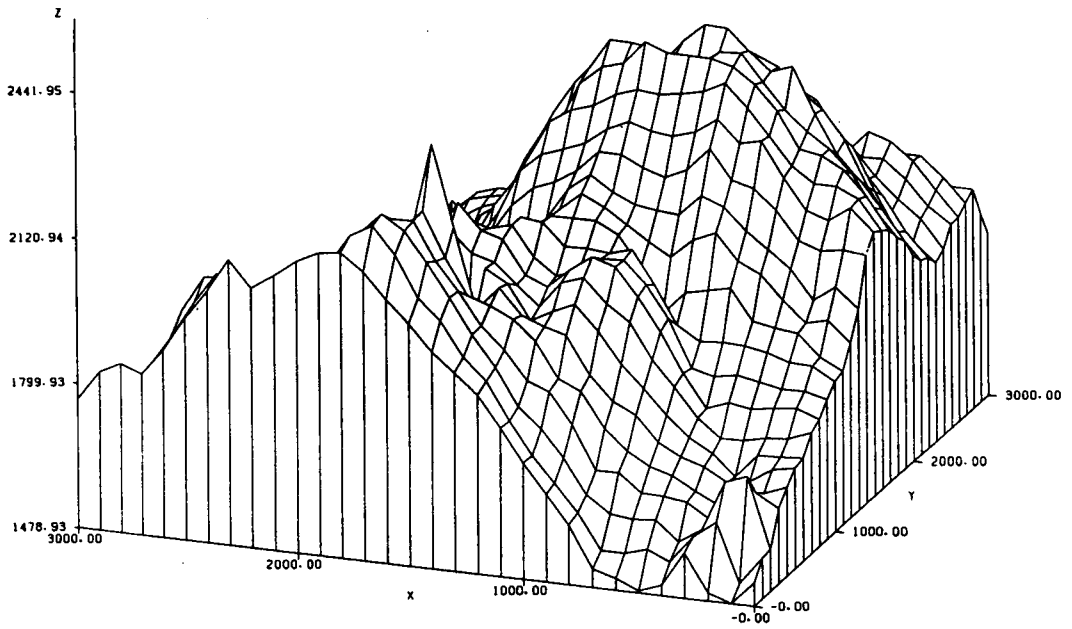


図-9 Data 4 を用いたアキマ法による透視図

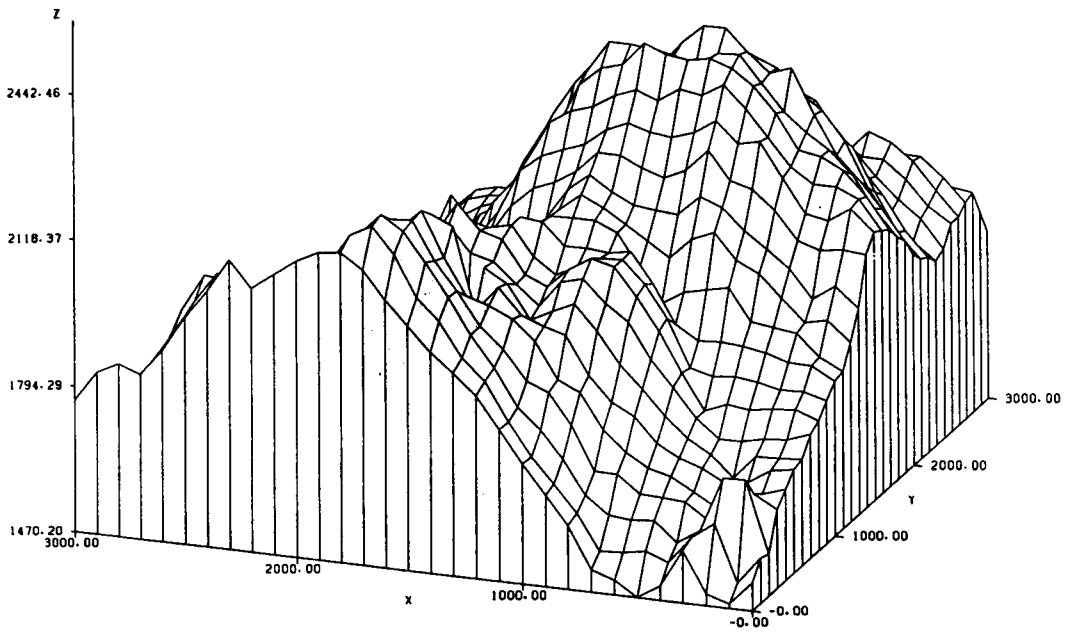


図-10 Data 4 を用いたパースナルスプライン法による透視図

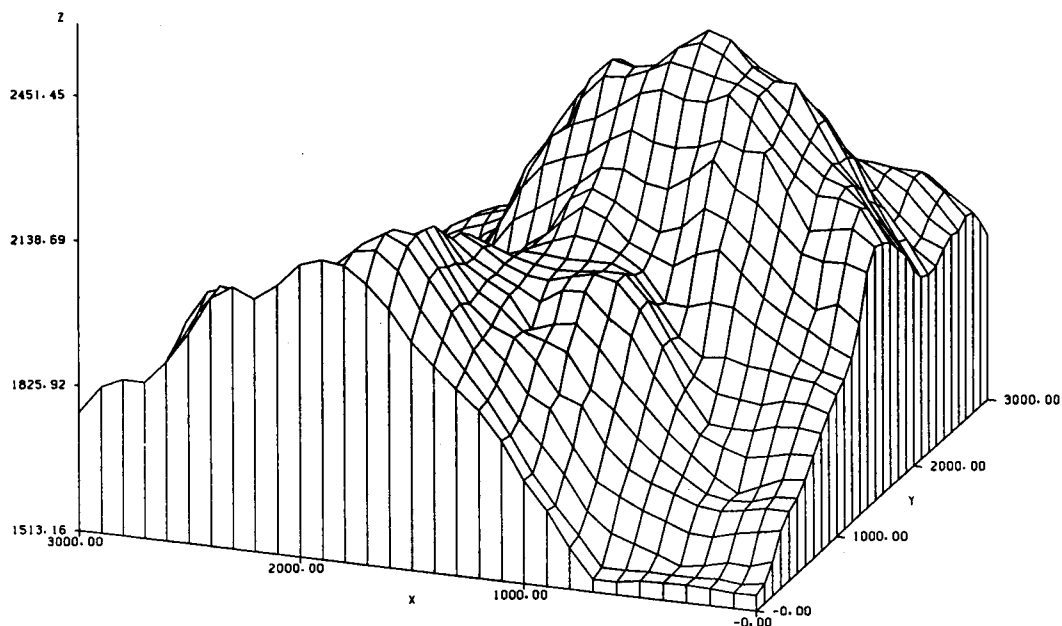


図-11 Data 3 を用いたスプライン法による透視図

間できなかったが、929地点のデータをもとに補間した図（図-11）はかなり精度が高いものの、実際より地形が滑らかになっていることがわかる。一方、距離重みづけ法による補間では（図-8）は基準データの地形の特色をほぼ完全に伝え、標準偏差も最小となっている。

このようにはるかに複雑な計算を必要とする補間よりも簡易な距離による重みづけ法がより実際の地形に近い補間ができることが判明した。スプライン関数などを用いた補間であってもデータ数が適正でないと、大きな誤差の原因となる。今回は意図的に不規則な地形である焼岳を選んだためかもしれないが、連続した数学的な補間と現実の地形とは異なるものである。

以上から、この距離重みづけ式を用いてかなりの精度の補間を行なえることが判明した。更にデータの精度を高めたい時には、既に作成した読み取りデータに追加することが可能であるので、新たに作り直さなくても済む。このようにして山頂などの凹凸点を追加すれば補間精度が高まる。また、グリッド間隔も必要に応じて変更できる。

アキマ法などで端の部分で生じる不自然なオーバーシュートは大きな誤差の原因となるので、対象範囲よりも広くデータをとることが周辺部での精度の低下を防ぐために不可欠である。他の方式でもデータの取り方が補間精度の決め手となる。対象領域よりも広めにデータを読み取ることが、周辺部における不自然なカーブを無くし精度を向上させるために必要である。さらに、山頂部のように突出したり噴火口のように凹んだ特異点はそのデータをそれぞれ入力しないと補間の際に無視され精度が低下する。等高線間隔が広い場合にはその間の点も補ったほうが良い。

読み取りデータ数は多い方が精度が高いが、図-8からも補間されるデータ数の2倍もあれば十分と言える。格子板で961点を読み取るのに約4時間を要したのに対してデジタイザでは1,803点を約30分で読み取ったからデジタイザを利用するに際してはデータ数の増加はそれほど問題とはならない。距離重みづけ法による補間処理に要する時間は、1,803点から931の格子点を作成する場合、マイクロコンピュータ（NEC9801VM2）で40分程度であった。

5. 補間プログラム

距離重みづけ補間式を用いてDTMを生成するための、以下の4ステップからなるプログラムを作成した。

1) デジタイザによる地形図からの標高データの読み取り

地形図をデジタイザ上にはり、図面の左下を原点とする。これで表示される。標高読み取りに先立ってまず原点とX軸上の点を与えて、座標系を決定する。標高データは等高線の値をキーボードより先ず入力しその標高の座標値を順次カーソルより入力する。その際、地形の複雑さに応じて、読み取り間隔を調整する。

2) 標高データのブロック化

読み取ったデータ合計が100点程度であれば全体を補間できるが、それよりも多くなると処理時間が多くなり効率が悪いので適当なデータ数からなるブロックに対象領域を分ける。幾つかにブロック化する際に上下左右の端がそれぞれ10%ずつ重なるようにして、周辺部における補間精度の低下を防止を考慮した。新しく作成されるデータセット名にはブロック番号が付けられる。データの先頭の行にはブロックの位置(I,J)とブロックのX,Y方向の大きさが記録される。それぞれのブロックのデータ数は1ブロック100以下にデータ数なるように決定されるので全体のデータ数によって変わる。

3) 標高データの補間

それぞれのブロックを指定したグリッド間隔で補間する。補間範囲は左上の、座標値(0,0)から始まり、隣のある右端、下端は次のブロックとの連続性を考慮して補間しないことにする。補間されたデータは左上から1行ずつ記録される。

4) ブロックごとに補間されたデータの結合

補間されたデータセット名およびX,Y軸方向のブロック数を指定することによって、それぞれのブロックを順番に結合し新たに指定した1つのデータセットに戻す。

6. ま と め

このプログラムを利用することによって、地図から標高のデータを読み取り、比較的精度の高いDTMが容易にできるようになった。また、ブロック化することによってデータ数が増加しても処理時間やメモリーの制限を気にせずに処理できる。これによって地形の改変やそれにとまなう土量の計算、さらには、サイトプランニングから景観予測、地域計画、環境影響評価に至るまで活用できる。

また、アフィン変換を用いてランドサットなどの他のデータとの結合をする場合の基礎データとして利用できる。DTMを用いた透視図の効果については多く言及されているが、ランドサットデータを透視図として表現した例は余り多くない^{14,15,16,17)}。それはランドサットデータと同精度で多数の標高データを作成することが困難であるという理由にもとづく。今回作成したプログラムを利用すれば指定したグリッド間隔のDTMが容易に作成できるのでGISで活用できると考えられる。

なお、本論は1987年10月に日本造園学会関西支部大会における発表に加筆したものである。

注および参考文献

- 1) TWITO, Roger H. et al. : The Map Program, Buiding the Digital Terrain Model. USFS Pacific Northwest Research Station, Portland, OR, 1987.
- 2) 田中総太郎, 杉村俊郎, 亀田和昭, 朝日守, 外崎重厚 : TM データに基づく10万分の1のランドサット地図の試作. 日本リモートセンシング学会誌, **5**(1), pp.41-56, 1984.
- 3) 榎幹雄 : パーソナルコンピュータを利用した地形図標高の簡易推定. pp.32-35, 出典不明.
- 4) 西川肇 : ランドサット MSS データの画素サイズの標高データからなる数値地形モデル. 日本リモートセンシング学会誌, **4**(1), pp.75-81, 1984.
- 5) 村井俊治, 大林成行, 篠田徹, 高橋博将 : メッシュ法による土工量計算の精度に関する研究. 写真測量, **12**(1), pp.17-22, 1973.
- 6) 北川勝弘 : 数値地形モデルにおける傾斜因子推定の精度. 日本林学会誌, **58**(6), pp.202-213, 1976.
- 7) 土木学会編 : 土木工学における数値解析/計画手法編. サイエンス社, pp.119-133, 1973.
- 8) 村井俊治, 白殷基, 篠田徹 : デジタルテレインモデルとデジタルフォトマップの手法に関する研究. 写真測量, **13**(1), pp.1-7, 1974.
- 9) 柳田聡 : NCM システムを用いた DTM の作成と応用. PIXEL, No.65, pp.138-140, 1988.08
- 10) 北川勝弘 : 数値地形モデルによる地形の解析. 森林科学, No.3, pp.23-27, 1991.
- 11) 距離重みづけ法 : マイクロコンピュータでも短時間で計算可能な式として, 未知の点 P の最近隣 3 点を既知のデータから求め, P の標高をこれらの点からの距離によって配分する一種の内挿法で, 以下の様な式を用いた.

$$z_p = (z_1/d_1^2 + z_2/d_2^2 + z_3/d_3^2) / (1/d_1^2 + 1/d_2^2 + 1/d_3^2)$$
ここで z_p は求めたい点 P の標高, z_{1-3} は最寄の既知の 3 点のそれぞれの標高, d_{1-3} はそれぞれ点 P と既知の 3 点の距離である.
- 12) SAS User's Guide Basics (Ver.5 Edition). SAS Institute Inc., North Carolina, 1985.
- 13) SAS/GRAPH User's Guide (Ver.5 Edition). SAS Institute Inc., North Carolina, 1985.
- 14) 杉村俊郎, 田中総太郎, 工藤勝輝 : ランドサット TM データと数値地形モデルを使った土地景観の立体画, 日本リモートセンシング学会誌, **4**(4), pp.97-106, 1984.
- 15) 杉村俊郎, 西川肇, 藤井寿生 : ランドサット TM データから作成した 3 次元表示画像とその将来性, 日本リモートセンシング学会誌, **5**(4), pp.85-96, 1985.
- 16) 田中総太郎, 杉村俊郎, 西川肇 : ランドサット MSS データと高解像度数値地形モデルを用いた国土の三次元表示, 地理, **30**(3), pp.130-134, 1985.
- 17) 伊藤太一 : 衛星データの環境情報データベースへの統合化, リモートセンシング学会誌, **9**(4), pp.27-41, 1989.