

山岳林地帯における地形解析に関する基礎的研究

北 川 勝 弘

Fundamental studies on the terrain analysis
in mountainous forest areas

Katsuhiko KITAGAWA

目 次

まえがき	47
I 序 論	49
1. 林業工学分野における地形解析の意義	49
2. 地形データの数値的処理と数値地形モデル	50
3. 本論文の目的と構成	52
II 高精度の格子状数値地形モデル作成システムの開発	54
1. 格子状数値地形モデル作成への地形情報の活用	54
2. 点列データの高密度処理方法の設計	55
(1) 点列データ処理の効率化	55
(2) 高密度記憶方式による点列データの格納・探索	56
1) 高密度記憶方式	56
2) 点列データの変換	57
3) 隣接データ点の位置情報	60
4) 点列データの格納構造	62
5) 隣接座標点の探索	64
6) 格子点周辺における点列データの探索方法	64
(3) 点列データ格納・探索方法の新旧比較	65
1) 比較実験の方法	65
2) 実験資料	66
3) 結果と考察	66
3. 格子状数値地形モデル作成へのスプライン関数の導入	69
(1) 在来の格子状数値地形モデル作成方法の問題点	69
(2) スプライン関数の適用方法	70
1) スプライン関数	70
2) 適用上の条件	70
3) アルゴリズム	72
4) 数値モデルによる検討	74
(3) 適用例	74
(4) 考 察	74
4. ハイブリッド方式の格子状数値地形モデル作成システム	77
(1) ハイブリッド方式	77
(2) 基本的なアルゴリズム	77
1) アルゴリズムの概要	77
2) 点列データの調整	77
3) 境界線データに基づく面処理	79
4) 等高線データの迅速な探索	79

4-1)	データ点格納用の記憶領域	79
4-2)	プロトタイプ of データ点探索手順	81
4-3)	データ点探索手順の改良	81
5)	格子点標高の算出方法	83
(3)	適用例	85
(4)	考察	85
1)	格子点標高の演算方式別区分	85
2)	他の数値地形モデル作成方式との演算時間の比較	88
3)	記憶領域の大きさ	88
4)	本システムの特長と問題点	90
5.	まとめ	92
III	格子状数値地形モデルの作成精度の分析	94
1.	格子状数値地形モデルの作成精度の評価方法	94
(1)	作成精度の評価指標	94
(2)	誤差区域面積の簡易算出法	95
(3)	走査線本数と簡易面積算出法の精度	98
2.	各種作成方式による格子状数値地形モデルの精度分析	99
(1)	在来の各種格子状数値地形モデル作成方式	99
(2)	比較実験の方法と資料	100
(3)	結果と考察	101
1)	曲面近似方式とデータ点の抽出数	101
2)	各種作成方式の比較	105
3)	ハイブリッド方式で作成された格子状数値地形モデルの精度	105
3.	まとめ	106
IV	数値地形モデルによる山地の地形計測とその精度	107
1.	山地の地形計測の自動化の意義	107
2.	等高線の点列データに基づく傾斜因子の算出	108
(1)	格子点における傾斜因子の把握方法	108
1)	方位角の把握方法	108
2)	傾斜角の把握方法	110
(2)	データ処理方法	112
(3)	結果と考察	112
3.	格子状数値地形モデルによる傾斜因子の推定精度	113
(1)	傾斜近似方式の種類	114
1)	連続格子点による方法	114
2)	曲面近似による方法	115
(2)	実験方法と資料	117
(3)	結果と考察	120

1)	傾斜近似方式別にみた精度の比較	120
2)	格子間隔の相違と傾斜角の推定精度	123
3)	格子間隔の相違と方位の推定精度	126
4)	傾斜因子と標高の誤差の関係	128
5)	傾斜因子を考慮した適正格子間隔	128
4.	格子状数値地形モデルによる山地平均傾斜の推定精度	131
(1)	平均傾斜の推定方法	132
(2)	実験方法と資料	132
(3)	結果と考察	133
1)	格子間隔と平均傾斜角	133
2)	格子間隔と平均方位角	133
5.	まとめ	136
V	格子状数値地形モデルに基づく山地流域の構造解析法の開発	138
1.	林業工学分野における山地流域の構造解析の意義	138
2.	流域構造解析の基本的アルゴリズム	138
(1)	アルゴリズムの概要	138
(2)	方位図の作成	138
1)	方位図(原図)の作成	138
2)	方位図(原図)の修正	140
(3)	集水面積図の作成	141
(4)	水系図の作成	143
1)	水源位置の確定	143
2)	水系網の抽出	143
3)	水系網の等級区分方法	143
4)	格子点の系統的な次数区分方法	145
5)	流路区間の番号付け	146
(5)	小流域区分の方法	148
3.	適用例	148
4.	考察	153
(1)	方位区分の適合性	153
(2)	水源位置および水流径路の適合性	158
(3)	格子間隔の大きさと水系図	160
5.	まとめ	163
VI	山岳林数値地形解析システム	164
1.	システムの概要	164
2.	適用例	164
3.	考察	170
(1)	水系図の精度	170

(2) 小流域区分結果	171
(3) 水流次数の解析結果	172
(4) 流域構造解析の林道網計画等への応用の可能性	173
4. まとめ	174
VII 総括	176
あしがき	179
謝辞	180
引用文献	181
要旨	188
Summary	190

北川勝弘：名古屋大学農学部林学科

Katsuhiro KITAGAWA : Department of Forestry, School of Agricultural Sciences,
Nagoya University, Nagoya 464-01

(受理：1991年5月15日)

(Accepted : May 15, 1991)

目 次

図-2.2.1	データの1語内への詰め込み	56
図-2.2.2	ビット・プレーン方式	57
図-2.2.3	点列データの変換	59
図-2.2.4	データ点の格納位置	60
図-2.2.5	データ点の存在パターンと隣接点の存在する方向のコード番号	61
図-2.2.6	データ点の情報の1語内格納構造	62
図-2.2.7	隣接点を持つべき現在点を表わす方向コード番号	63
図-2.2.8	点列データ点探索範囲の優先順位	64
図-2.2.9	点列データ処理の3方式の概念図	67
図-2.3.1	傾斜変換線の模式図	71
図-2.3.2	スプライン関数補間の模式図	73
図-2.3.3	数値モデルによるスプライン関数補間の適用例	75
図-2.3.4	スプライン関数補間の適用例	76
図-2.3.5	外挿方式を組み込んだ適用例	76
図-2.4.1	ハイブリッド方式によるDTM作成システムのアルゴリズムの概要	78
図-2.4.2	プロトタイプの等高線データ点探索法	80
図-2.4.3	改良型等高線データ点探索法	82
図-2.4.4	格子点標高算出方法の種別	84
図-2.4.5	格子点標高算出方法の事例	86
図-2.4.6	ハイブリッド方式によるDTM作成の適用例	87
図-2.4.7	点列データ格納用記憶領域の使用頻度	90
図-2.4.8	2本の等高線が著しく不一致となる事例	91
図-3.1.1	誤差区域	95
図-3.1.2	走査線	96
図-3.1.3	モデル等高線	97
図-3.2.1	実験対象地	100
図-3.2.2	作成方式別DTMの誤差	104
図-4.2.1	等高線データに基づく任意の点における方位角の算出	109
図-4.2.2	等高線データに基づく任意の点における傾斜角の算出	111
図-4.2.3	等高線データに基づく方位角算出の適用例	112
図-4.3.1	多項式による地形推定のための格子点の配置	116
図-4.3.2	モデル地域の概念図	119
図-4.3.3	傾斜角推定の平均誤差	124
図-4.3.4	傾斜角推定の誤差比	125
図-4.3.5	方位推定の平均誤差	127
図-4.3.6	標高推定の平均誤差	129

図-4.3.7	標高, 傾斜角および方位の誤差の相関関係	130
図-4.4.1	格子間隔別・平均傾斜角と平均方位角	135
図-4.4.2	平均傾斜と格子間隔との関係	136
図-5.2.1	流域構造解析のアルゴリズムの概要	139
図-5.2.2	8方位区分	140
図-5.2.3	ぶつかりあう方位の修正	141
図-5.2.4	集水面積図の作成	142
図-5.2.5	水源発生のパターン	144
図-5.2.6	格子点の水流次数の決定方法	146
図-5.2.7	格子点の水流次数区分と流路区間の番号づけ	147
図-5.3.1	モデル流域の地形図	149
図-5.3.2	モデル流域の方位図	149
図-5.3.3	モデル流域の集水面積図	150
図-5.3.4	モデル流域の小流域区分図	150
図-5.3.5	水系図(集水面積値レベル=20)	151
図-5.3.6	立体水系図	152
図-5.4.1	方位区分の誤りの事例(1)(DTMデータ点が窪地型配置の場合)	153
図-5.4.2	方位区分の誤りの事例(2)(DTMデータ点の精度が低い場合)	154
図-5.4.3	修正前のDTMデータに基づく等高線図	155
図-5.4.4	修正後のDTMデータに基づく等高線図	157
図-5.4.5	修正されたDTMデータに基づく方位図	158
図-5.4.6	水系図(集水面積値レベル=50)	159
図-5.4.7	2倍の格子間隔に対する方位図	161
図-5.4.8	2倍の格子間隔に対する等高線図	162
図-6.1.1	山岳林数値地形解析システムの概要	165
図-6.2.1	水流次数別水系図	166
図-6.2.2	小流域の区分結果	167

表 目 次

表-2.2.1	1語(32ビット)の分割	58
表-2.2.2	データ格納方式別点列データ探索時間の比較	68
表-2.4.1	点列データ格納用記憶領域の使用頻度	89
表-3.1.1	簡易法による面積算出値の誤差	98
表-3.2.1	作成方式別DTMの誤差の比較	102
表-3.2.2	DTM作成方式間の差異の判定	103
表-4.3.1	モデル地区の平均傾斜と最小格子間隔	118
表-4.3.2	等高線間距離の平均計測値	118
表-4.3.3	近似方式別傾斜角推定の誤差(1)(最小格子間隔で格子点位置の場合)	121
表-4.3.4	近似方式別傾斜角推定の誤差(2)(最小格子間隔で格子中心位置の場合)	122
表-4.3.5	傾斜角, 方位および標高の許容誤差別・縮尺別の格子間隔上限値	126
表-4.3.6	縮尺別・許容誤差別適正格子間隔	131
表-4.4.1	格子間隔別平均傾斜の推定値	134
表-5.4.1	方位図修正のためのDTMデータの修正	156
表-5.4.2	格子間隔の変化に伴う方位推定のズレ	160
表-6.2.1	水流次数別小流域区分結果	168
表-6.2.2	水流次数別小流域解析結果	169
表-6.3.1	水流次数解析結果の総括表	172

山岳林地における地形解析に関する基礎的研究

まえがき

わが国の森林は、戦後の長期にわたる林業関係者の営々たる努力の結果、今日、全森林面積の4割、1,000万haにのぼる林地が人工林となり、21世紀に向けて森林資源の基盤は着々と形成されつつある。これらの森林を今後、間伐問題の克服等を通じて適切に維持、管理し、その資源内容を年々着実に充実させていくなれば、現在約3割の低水準にあるわが国の木材自給率を、資源の量的な面からは将来、大きく改善していくことが可能になると期待される。他方、わが国の林業は、外国材輸入の増大や、供給体制の整備している鉄、プラスチック等の資材との競争、林業経営費の増加などのなかで丸太生産量が伸び悩み、また間伐の必要な森林への間伐実施の立ち遅れ、さらには森林施業方法に対する国民世論の環境保全面からの要求の高まりなど、厳しい状況に置かれている。こうしたわが国の森林・林業を取りまく状況のもとで林業の活性化と発展を図るためには、森林や林地の環境保全を大前提としたうえで林業生産性を向上させ、木材生産費を減少させることが緊急、かつ不可欠な課題の一つとなっている。

地形が複雑で急峻な地域を主たる対象とせざるを得ないわが国の林業の労働生産性は、平坦な地形の林地に多工程処理が可能な大型林業機械を導入している欧米の林業先進諸国や、天然林資源を対象とする東南アジア諸国などと比較して、未だきわめて低く、木材価格決定の主導権を外国からの輸入材によって握られた状態が長らく続いている。そして、それがわが国林業の、今日に至るまでの長期低迷、不振の大きな原因となっているのである。こうした現状を克服し、森林・林地の環境保全を図りつつ木材生産における労働生産性を飛躍的に向上させるために、現在、適切な形で機械化の導入をはじめ、林業技術の抜本的な革新が求められている。そのためには、林業工学分野においても方法論的な革新が必須の課題とならざるを得ない。その際、わが国林業の宿命ともいえるべき、複雑で急峻な地形に関する正確な把握が、全ての面で大前提となる。

林業工学分野を対象とした地形解析手法として、地形指数に基づく森林利用学的地形分類(20, 23)が提案されている。これは、面積1,000ha程度の規模の団地の地形を、その地域の森林開発形態との関連において総括的に把握することを目的とし、傾斜角、起伏量、谷密度の3要素因子を1:50,000の地形図から判読・計測して指数値を決定するものである。地形指数が集運材作業方式の想定に際して実用的意義を持つことは、多くの実用例から確かめられている(32)。しかし、この方法は時代的な制約により、手作業によるデータ採取を前提としている点が、今日の段階では大きな難点となっている。山ひだや傾斜変換線など、局所的な微地形が複雑に変化している状況を正確に把握することは、林業工学分野における各種計画の立案に際して重要な検討因子になるが、地形データ処理の煩雑さ、困難さは、従来、

それらの十分な形での迅速な把握をなかば不可能にしてきたと言っても過言ではない。そして、基礎データとしての地形に関する膨大なデータの処理をほとんど手作業に頼らざるを得なかったことが、この分野における方法論の面での発展を阻害してきたと筆者は考えている。

近年、コンピュータおよびその周辺機器の飛躍的な発展に伴って、ようやく地形データの機械的な入出力が高速に、そして安価に実現されうようになってきた。しかしながら、それら機械的に入出力される地形データを種々の計画立案に際して効率的、効果的に利用するためには、なお検討すべき幾多の問題点が残されている。

たとえば、今日のコンピュータの処理能力が著しく高くなったとはいえ、従来の地形データ処理方法において、対象とする計画区域の大きさがある程度以上に広げたり、あるいは計画の精度を高めるためにデータ採取密度をある程度以上に高めたりしようとすると、データ処理の効率は一般に著しく低下する。コンピュータによる地形データの効率的な取り扱い方に関する検討は、今日においてもなお不可避な課題なのである。また、林業工学分野における各種計画の立案に際しては、大局的な地形状況の把握とともに、個々の場所ごとの局所的な、かつ一般に複雑な微地形の分布状況の把握が重要な意味を持つことが多いから、コンピュータ上で系統的に地形を把握する方法としては、可能な限り正確に局所的な微地形を表現しうるものであることが望ましい。従って、その場合には微地形を表現する方法とその精度が問題となる。

コンピュータを用いて地形データを系統的に処理する手法については、従来から各分野でそれぞれの目的に対応させて種々検討されてきているが、林業・林学分野、とりわけ林業工学分野については、未だ十分な検討がなされていない状態にあると考えられる。しかも、コンピュータを用いての系統的な林業土木・森林作業計画への需要は年々高まる一方であり、林業工学の立場にたった、高精度でかつ効率的な地形データ処理手法の検討は、今日的な急務となっている。

そこで本研究では、林業工学分野を対象とした系統的な山岳林の数値地形解析手法の確立を目的として、数値地形モデルに基づき山岳林における地形特性を可能な限り原図に近く高い精度で再現するための条件に関し、格子状の同モデルの作成方法と基本的な応用方法の両面から基礎的な検討を行ったものである。

I 序 論

1. 林業工学分野における地形解析の意義

日本の森林は、一般に地形急峻な山岳地に生育している割合がきわめて多く、かつ多雨地帯に属していることから、そこで営まれるわが国の林業にとって、森林資源の恒常的な再生産を保障しようとするれば必然的に、森林、山地、流域の保全を図ることが重要な課題となる。そのためには、林業工学分野においても、林業の各種土木施設の建設や伐出作業をはじめとする各種森林作業の実施に際して、個々の林地の状況に応じたきめ細かな森林の取り扱いが望まれる。より本質的な問題としては、種々の林業土木・森林作業計画の立案、実施に先だって、自然環境下における森林および林地の状態を正確に理解する必要があるわけである。

わが国のような温暖多雨の気候条件下では、林地の自然環境の本質をなすものとして、植生や土壌と並んで地形そのものがあげられる。それ故、対象とする林地の地形解析、すなわち地形に関する定性的、定量的な要因の分析は、林業工学分野における各種計画が科学的な裏付けを持つ、より十全なものとして練り上げるうえで欠くことのできない必須の条件であり、それらの計画に対して最も基礎的な資料を提供する手段である。たとえば、伐出作業方式を決定しようとする場合に地形による影響を強く受けること(32, 33)は、一般によく知られている。

今後、わが国の林業経営をより合理的、科学的に遂行するための手段として、森林に関する数値的、地理的、あるいは他の定性的な各種の情報を網羅した森林管理用データベースが飛躍的に発展すると考えられるが、そのデータベース中でも地形情報は最も基礎的な資料となるものである(7, 12, 14, 29, 53)。海外諸国では今日、特に欧米諸国を中心として地理情報システム(GIS)が発達している(127)が、その中心にはいずれも地形を含む地図情報が据えられており、データベースとして蓄積されている。こうした趨勢は早晩、わが国にも必ず波及するであろう。

また、林地や流域の保全を考える際には、防災上の観点にたった事前評価を行うことが望ましいが、地表の形態はその構成物質とともに排水状況や地盤の硬軟など、土地が備えている災害にかかわる素因を形成している(73)から、地形解析結果は災害危険度を予知するうえでの大きな手がかりを与える(15, 17, 26, 30, 35, 85, 109)。それは同時に、林業工学分野における種々の計画立案にとっても、すこぶる有益な情報をもたらすはずのものである。

林業工学分野における各種計画の立案に際して、今後、先に述べたデータベース化された地形情報を活用し、計画の経済性や効率性の面からの検討だけでなく、あわせて計画対象施設や林地についての防災面からの安全性をも最初から考慮したものとしていくことは、森林の環境保全の必要性に対する認識が社会的にも定着しつつあるなかで、林業工学分野において不可避の課題になると考えられる。

以上のように、林業工学分野における地形解析の意義は、今日、従来以上にその必要性和重要性を増しているのである。

2. 地形データの数値的処理と数値地形モデル

地形解析は従来、主として地形図に描かれた等高線や地性線など、連続型の曲線データに基づき手作業で行われてきた(20, 21, 23)が、その作業内容は単調な繰り返しが主であるため、かなり忍耐力を要する煩わしい仕事である。また、手作業による解析結果には、人為に伴う誤差が含まれやすいという難点もある。

これに対して、地形図や航空写真から一定の媒体を通じて、地形の要素を離散型の数値データとして把握し、それに基づいて地形要素を表現させられれば、上記の各種問題点は容易に克服できるから、労力軽減と人為ミスの解消につながり、かつ調査・計測の過程で必要な解析上の区分・判定を一定の基準に従って機械的に行うことができるので、判断の客観化が可能となり、非常に能率的である。近年、コンピュータとその周辺機器が飛躍的に発展したため、たとえばディジタイザやスキャナーによって、地形図上の等高線や各種境界線など、連続型の曲線データを離散型の座標点列データに変換することが容易に行えるようになってきた(1, 2)。空中写真に基づく図化データを直接利用する方法とあわせて、膨大な地形データをコンピュータによって自動的に、かつ迅速に処理しうる条件がようやく成熟してきたといえる。

林業工学分野で各種計画の立案に際して行う地形解析に用いる地形データは、資料作成が簡便にできて、精度が高く、しかも解析結果が森林・林地の解析に適用しやすいものであることが望ましい。それには、地形データを数値化して、面的に広がりをもった地域を任意の目的に対応して再現させることのできる地形モデルを作成する方法が、きわめて有効である(59, 60, 75)。地形(起伏)を数値化して磁気ディスク等に格納し、この数値を利用して地形を数値的に近似表現したモデルを、一般に数値地形モデル(Digital Terrain Model ; DTM)、もしくは数値標高モデル(Digital Elevation Model ; DEM)と呼ぶ。これは、平面位置(X, Y)と標高(Z)が基本となるもので、地形データと内挿公式を用いて、たとえば任意の平面位置に対応する標高や勾配等を求めることができる。入力データとしては、測量成果をそのまま利用する場合と、地形図等から二次的に作成する場合とがある。

DTMは、1956年にアメリカ合衆国のマサチューセッツ工科大学(MIT)で、高速道路の設計計算に地形を数値化するために提案されたのが始まりである(68, 69)。わが国では1960年代の中頃から、土木工学分野を中心としてDTMに関する研究が開始され(81)、宅地造成の事前評価(61)、流出解析(62)、大規模市街地開発(63, 64)、路線選定(74)、土工量計算(77, 112)、数値写真との組み合わせ(76)等々、多様な課題に関する研究が1970年代の初期に一斉に展開された。海外でも1960年代からDTMに関する研究が進展してきた(8)。1970年代後半にはいと、林道の路線選定(36)、DTMによる傾斜因子推定精度(37)やDTMの自動的な作成方法の研究も現れた(13, 65)。そして、1980年代になると各分野において、多様で多彩な数値地形モデルに関する研究が一斉に展開されるようになった。特に地理学分野では、福田(27)の大島を対象とした地形解析例をはじめ、近年、DTMが研究手法として定着した感がある(6, 18, 19, 83, 125)。

DTMの方式は、地形情報源の種類と地形情報抽出点の配置によって異なる。代表的な地形標高表示方式として、①等高線方式、②格子(グリッド)方式、③平行断面(セクション)

方式、④ランダム・ポイント方式、⑤帯状メッシュ方式があげられる(75)。①は空中写真の図化段階における等高線データをそのまま用いるか、もしくは地形図からディジタイザで等高線上の地形点の平面座標を自動的に記録するもので、1次データとしての数値地形モデルの採取法として最も基本的なものである。②は正方形または長方形の格子状に地形点を抽出する方式で、面的な広がりをもつ地域に対して有効である。この方式は、一様な地形点の密度を確保でき、しかも計算処理が簡便であるという利点がある反面、一般的には地形の主要な点、たとえば山頂や尾根あるいは谷などが地形点として抽出されない危険性がある。③は地形を平行な断面の集まりで表現するもので、おおよその路線通過位置が決まっている道路の設計において詳細な土量計算を行う場合等に適している。④は山頂や尾根あるいは谷などの地形の主要な点を抽出する方式であり、②の持つ欠点を改良できる反面、必然的に不規則な地形点の配置になるため、その後の計算処理は②よりも複雑にならざるをえない。⑤は地形をある路線上の等距離点に直交する断面の集まりによって表現するもので、道路の詳細設計に用いられる他、人体や自動車のボディ等、滑らかな連続体の曲線表示に応用される。

山岳林における地形解析では、対象区域全体についての全般的な地形特性と局所的な微地形の分布状況の両者を共に迅速に把握できると好都合であることが多いから、以上の方式のうち、最も基本的な①のタイプと、測定点の位置検索やその他の計算処理が容易な②のタイプのものが、データ処理に要する手間を少なくするうえで適している。①のタイプのDTMは、そのままの形では後の地形解析作業等に適用しにくいものであるが、他方、効率的なデータ処理のためには、等高線の点列データを任意の位置から局所的に検索できることが望ましい。その際には、点列データの格納構造をどのように設計すればよいのかが問題となる。②のタイプのDTMの場合、その作成精度やDTMに基づく地形特性の再現精度がどれくらいのものであるか、すなわち地形データ処理結果の信頼性の如何が問題となる。そのなかでも、山地斜面の傾斜因子や山地の流域構造についての系統的な把握方法とその精度の如何は、山岳林における地形解析結果に対する信頼性を高めるうえで、とりわけ重要な問題である。

林学分野でのDTMに関する研究は、1968年中島(78)による林分地形の数量解析についての報告を皮切りに、山腹崩壊危険要素の計測や予測(34, 84, 110)、林地の斜面傾斜因子の推定精度(37, 101, 103)、山地の地形特性の抽出(9, 104)および計量化(97~99, 124)、地形区分・分類(9, 11, 80)、流域構造の解析(49, 52)、地形情報データベース化(7)、林道(網)配置計画(3, 5, 10, 36, 39, 54, 55, 70~72, 88, 91~95, 100)、架線集材計画(66, 86, 117, 118, 120)、森林作業計画一般(89, 116, 121, 126)、数値地形モデルの自動的作成方法(38, 42, 44~46, 48, 79, 119)、山地の3次元(景観)表示(56, 67)等のテーマが取り組まれてきた。林業工学分野では、DTMを用いた研究が1980年代にはいつてから急速に、多様に進展してきている。わが国の林業工学分野におけるDTMを用いた研究の特徴のひとつとして、山地の地形特性の把握に少なからぬ関心が寄せられていることがあげられる。

先に述べたように、わが国の林地の多くは一般に地形が急峻で複雑な山地に成立しているから、林業工学分野での各種計画の立案に際して行われる地形解析においては、山地の山ひだなど微地形に関する特性、とりわけ傾斜因子の正確な把握が必須の要件になる。従って、

地形データの数値化処理手法についても、山地の微地形に関する特性把握精度が可能な限り高いものであることが望ましいわけである。この点は、航空写真測量に基づく大縮尺の図化データを活用しうるハイウェイ設計などの場合とは事情が大きく異なる。一般に1:5,000以下の中、小縮尺地形図に基づいて「山地の傾斜因子のより正確な把握」を行うという課題は、わが国の林業工学分野における地形解析にとって必須の命題である、と言ってもさしつかえないであろう。

本研究では、以上のような問題意識に基づき、林業工学の立場から見て必要な精度と内容をもった山岳林の数値地形解析手法を確立することを目的として、地形解析の基礎となる手段や方法についての検討を行った。

3. 本論文の目的と構成

本論文は、林業工学分野での各種計画の立案に際して必須の基礎作業となる山岳林における地形解析を、コンピュータを用いて系統的に、高精度で、迅速に、かつ簡便に行うための、「山岳林数値地形解析システム」の確立を目的としたものである。山地の斜面や流域構造を系統的に把握するための必須の手段として数値地形モデル(DTM)を取り上げ、それに基づき山岳林における地形特性を、可能な限り原因に近く高い精度で再現するための条件に関し、格子状DTMの作成方法と基本的な応用方法の両面から基礎的な検討を行った。

具体的な検討課題として、林業工学の立場から見て必要な精度をもつ格子状DTMの作成方法の開発、同DTMを用いた山地地形計測の傾斜因子に関する精度分析、同じく同DTMに基づく山地流域の系統的な構造解析法の開発、および山岳林数値地形解析システムの構築を取り上げた。

本論文の構成は、以下の通りである。

第II章と第III章では、高精度の格子状DTM作成システムの開発に関する諸問題を取り扱った。第II章では、等高線の点列データに基づいて高精度の格子状DTMを作成するための、システム開発に関する問題を検討した。まず、等高線の点列データを座標点に対応した2次元配列の記憶場所に、2種類の高密度記憶方式を用いて効率的に格納し、任意の格子点の周辺で局所的に、必要な本数の等高線の点列を正確、迅速に検索・抽出しうることを示した。次に、格子状DTM作成へのスプライン関数の導入について検討し、その結果を踏まえて、高精度の格子状DTMを作成するための、ハイブリッド方式によるアルゴリズムについて考察した。

第III章では、格子状DTM作成方式の精度分析を課題として取り上げ、従来から用いられてきた代表的な各種の格子状DTM作成方式とハイブリッド方式とを、地形特性の再現精度の面から比較検討した。先ず、格子状DTMの精度を示す評価指標を提案し、それを用いて、従来から用いられてきた各種方式で作成された格子状DTMと前章のハイブリッド方式によるものとの精度を比較し、後者の優位性を示した。

第IV章と第V章では、DTMを応用して地形計測・地形解析を行ううえでの代表的な手法とその精度について取り扱った。第IV章では、DTMを用いた山地の地形計測の手法とその精度について検討した。先ず、格子点位置での方位角と傾斜角を、等高線の点列データに基づい

て直接算出する方法について述べ、とりわけ方位角の算出結果が原図の等高線図ときわめて良く対応するものであり、この方法が手作業による地形計測に置き換えるものであることを示した。次に、格子状 DTM による山地斜面の傾斜因子の推定精度について、傾斜の近似方式や格子間隔の相違の面から検討し、実用的な観点にたつて傾斜因子を考慮した適正格子間隔を求めた。さらに、格子状 DTM を用いて山地平均傾斜を推定する精度について、格子間隔の大きさとの関連で検討した。

第V章では、DTM を用いて山地の流域構造を系統的に解析する方法を開発するための問題点について検討した。ホートン流の水流次数解析法に基づく水系構造解析法により、山地の流域構造の解析、すなわち階層構造を持った小流域への区分が、迅速に、かつ比較的高い精度で行えることを示した。

第VI章では、以上の検討結果に基づいて総合的な「山岳林数値地形解析システム」を提起し、名古屋大学農学部附属稲武演習林月ヶ平地区を対象とした地形解析の適用結果を示し、本システムの有効性について考察した。

最後に、第VII章において本研究全体の総括を行った。

II 高精度の格子状数値地形モデル作成システムの開発

1. 格子状数値地形モデル作成への地形情報の活用

近年、土木計画をはじめ様々な分野で格子状数値地形モデル（以後、本章では「格子状」を略して単にDTMと略称する）が用いられるようになってきたのに伴い、自動的なDTM作成方法も種々提案されている（9, 13, 38, 42, 44~46, 48, 65, 79, 119）。DTMの作成方法に関する問題点としては一般に、①データ処理（採取、格納、探索）方法、②格子点標高の算出方法、③精度、④演算処理時間の4つがあげられる。DTMの精度は一般に格子間隔を細かくとるほど向上すると考えられるが、従来のDTM作成方法が基本的には手作業に頼らざるをえなかったために、格子間隔の設定は、労力的、もしくは経済的な面からの制約を厳しく受けてきた。コンピュータを用いた地形データ処理方法を採用する場合でも、今日のコンピュータの記憶容量にはやはり一定の制約があるため、格子間隔の設定に関しては、おのずからある範囲内に制約されることになる。

DTMに基づいて再現される地形は、当然、原図の等高線図などの持つ精度を超えるものではありえないが、格子間隔を一定とした場合、DTMに基づき山岳林を対象として林業工学分野における各種計画を立案する際には、山腹斜面のひだなど微地形の如何が問題となるため、林業工学の立場から見たDTM作成方式としては、できる限り高精度で原図の持つ地形特性を再現しうるものであることが望ましい。

DTMを作成するには、従来、主として航空写真を図化機にかけて直接、1点ずつ標高を求める方法や、地形図上で演算対象の座標点から2本の等高線に至る距離を手作業で計測して標高を求める方法などが用いられてきた。このうち前者については、特に緩傾斜地での計測精度にむらがり起り易いので、ひとまず等高線を総描したうえで、その等高線点列データを演算処理して個別地点の標高を求めるほうが、精度的に安定した値が得られると考えられる。また、後者については、計測点が大量となる場合、DTMの作成労力が膨大なものとなり、かつ人為による誤差が混入しやすいので、実践的には不都合である。そこで、従来の方法のもつ欠点を克服し、DTM作成の労力を軽減して作成効率を高め、かつ人為によるミスの混入を防ぐためには、コンピュータを用いて系統的に地形情報を処理する方法を採用するのが妥当であると考えられる。

地形情報のうち、等高線データが最も本質的に重要な意義を持つものであり、等高線の点列データから最大傾斜線（落水線）の情報を求め、この地形情報を十分活用することができれば、DTMの作成精度を一段と高めうると予測される。その際、対象区域内の任意の地点において、その周辺の点列データを局所的に迅速に検索・抽出しうることが不可欠の要件となる。従来、2次元平面上での点列データの格納・探索に関する有効な方法論が未確立であったことが、DTMの簡便な作成方法の開発を遅らせてきた原因のひとつにあげられる。

本章では、任意の格子点位置における最大傾斜線（落水線）の地形情報を迅速に抽出し、その地形情報を活用して高精度のDTMを迅速、簡便に作成するシステムの開発に関する諸問題について検討する。

2. 点列データの高密度処理方法の設計

(1) 点列データ処理の効率化

近年、ディジタイザが発達、普及してきたことにより、等高線や境界線など、地形図上の連続した(アナログ型)曲線図形をディジタイザ上でトレースし、離散型の(X, Y)座標値の点列データ(デジタル・データ)として変換したうえで、その数値データをコンピュータで処理する方法が一般化してきた。従来、主として手作業で処理されてきた地形計測・解析作業は、単調な計測の繰り返しとその計測分量が一般に膨大であることが特徴で、労力的にかなりの煩わしさを伴うものであったから、コンピュータを用いて系統的に地形データを処理することは、人力に頼る煩雑な作業を少なくするうえで好都合である。

点列データの採取方法としては、この他に航空写真の図化時に作成される座標データを磁気テープ等を媒体として入力する方法や、地形図をスキャナーを通じて濃淡画像データに変換し、画像処理技術を応用して等高線データを自動的に抽出する方法がある(2)。後者については、各点列データへの標高値の自動的な付与を如何に実現するかが現在の検討課題となっているが、人力に頼る作業部分を極力排除しうる可能性をもった方法として、今後有望とされるものの一つである。いずれの方法を用いるにせよ、点列データはX, Y座標値が採取された順に並んだ「順編成」の形をとるのが普通である。

点列データを取り扱う方法として、各点列ごとにグループ分けして入出力しうる形でファイル(データセット)に格納する従来からの処理方法(以後、「順編成格納」と呼ぶ)による場合、入力データの対象区域を広くしたり、あるいは採取密度を高くしたりするにつれて、一般にコンピュータの演算処理効率が悪くなる。この難点は、順編成格納では普通、点列の先頭から末尾までの全データを参照せざるをえないという、データ格納方式自体のもつ制約から生ずる。本来、ある地点で局所的な地形状況を把握しようとする際に参照すべき等高線の点列データは、当該地点のごく近傍のものだけで十分なはずであり、地形把握の演算処理に必要で、かつ最少限に近い点列データのみを探索できるならば、データ探索に要する時間は当然大幅に短縮できると予測される。後に見るように、コンピュータによる系統的な地形解析作業に要する時間の主要な割合は、演算に必要なデータ点を探索することに費やされている。そこで、地形解析を迅速に行うシステムを開発するうえで、点列データを効率的に処理する方法の検討が重要な課題となるのである。

コンピュータによるデータ処理方法については、地図学の分野を始め、様々な分野で多種多様な研究が行われている(1, 2, 38, 41, 50, 57, 111, 119)。それらの研究のうちで主要なものはいずれも、コンピュータの持つ仕様・能力によって限定された、相対的に少ない記憶領域を如何に有効に用いて大量のデータを格納し、かつ格納されたデータの中から演算処理に必要なデータを如何に迅速に探索(検索)するか、という格納・検索の方法論に関する問題を取り上げている。

広域の面の中にある点列データを機能的に取り扱うには、点列データを2次元平面中で探索しやすい形に変換して格納しておく効果的である。そこで本節においては、高密度記憶方式(38, 50, 113)を応用して点列データを迅速に、効率的に処理する方式の設計について検討する。

(2) 高密度記憶方式による点列データの格納・探索

1) 高密度記憶方式

高密度記憶方式というのは、コンピュータの主記憶装置におけるデータ格納の基本単位である1語のなかに複数個の情報を詰め込むもので、その代表的なものとして「1語内詰め込み方式」と「ビット・プレーン方式」の2つがあげられる(113)。ビット(bit)とは2進数字(binary digit)の略で、2進法で用いられる2個の数字0または1を指し、数ビットが集まって1語を構成する。

1語内詰め込み方式は、複数個の整数型数値データを同一ビット数で1語内に詰め込むもので、図-2.2.1にその模式図を示した。名古屋大学大型計算機センターのライブラリー・プログラムのなかに、この方式によるデータ格納用の‘PACK’と探索用の‘UNPACK’の2つのサブルーチン・プログラムが登録されている。

ビット・プレーン方式は、1語がKビットで構成されているときに、ON(=1)かOFF(=0)の2値で表わされる情報をK個まで、2次元配列の各要素ごとの記憶場所に対応させて格納しうるものである。ブール代数の考え方に基づく論理演算処理法を用いることにより、K個の情報間ではそれぞれ独立に、しかも各要素単位ごとに、情報の格納や削除、および検索が行える。図-2.2.2にその概要を示す。

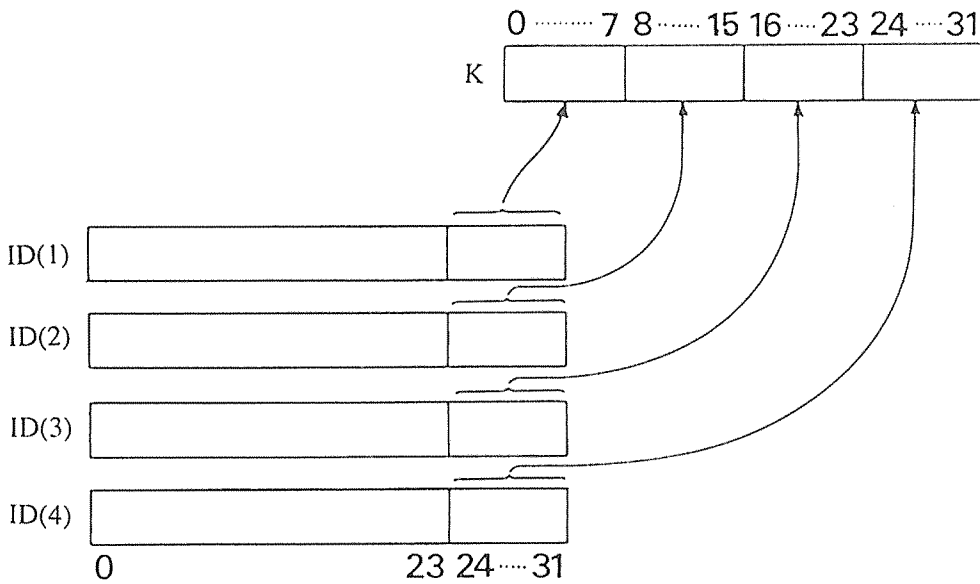


図-2.2.1 データの1語内への詰め込み

Fig-2.2.1 Packing method of the plural information in one "word"

注) 本図は鳥脇(1975)の原図を一部手直しして作成したもの。

Note) This figure was drawn by courtesy of Toriwaki (1975) with a partial modification.

ID(i): 整数型の個別データ Original datum of integer type

K : 基礎単位の記憶領域 Unit memory with packed four data into

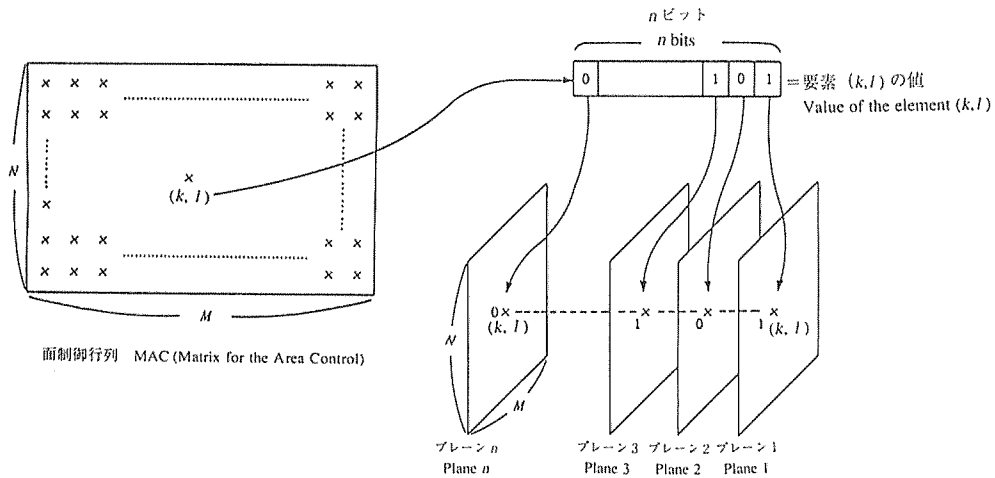


図-2.2.2 ビット・プレーン方式

Fig-2.2.2 Bit-plane method for compacting the two-valued information

注) 本図は鳥脇 (1975) の原図を一部手直して作成したもの。

Note) This figure was drawn by courtesy of Toriwaki (1975) with a partial modification.

2) 点列データの変換

ある対象地域内で任意の格子点 P_{ij} に最も近い点 P を等高線データ群のなかから抽出する場合、順編成型で格納したデータでは、普通、対象区域内にある全ての点列データの先頭から末尾まで逐一検索しなければならないから、対象地域内の格子点全体についてのデータ探索所要時間は必然的に膨大なものになってしまう。これに対して、1語内詰め込み方式を活用すれば、コンピュータの主記憶上にとった2次元配列の記憶場所で、ごく狭い範囲内の格子点のみを検索するだけで事足りるようになれるから、大部分の不要なデータ検索を省略できる。このようなデータ格納・探索方法を「ランダム・アクセス」型と呼ぶことにする。

等高線の高さや座標値などの数値は、あらかじめできる限り少ない桁数で表現しうるように変換しておくこと、データ格納に必要な領域を少なくでき、また数値の表示精度を高められる。1語を構成するビット数 K は大型コンピュータの場合で32、パーソナル・コンピュータの場合で16か8が普通である。いま1語が32ビットからなる大型コンピュータを対象とするとき、同一ビット数で1語内に詰め込まれる数値が表現できる大きさは、2の倍数の分割数2、4、8、16の4通りに対応して表-2.2.1のようになる。

いま、ある対象区域を $(M \times N)$ 個の等間隔に並んだ格子点で覆い、その格子間隔を D とする。ここで測地座標系における任意の位置 $P(X, Y)$ を格子点 $P(I, J)$ に対応する格子座標系の点 $P(u, v)$ に変換するとき、3点の関係は次のようになる。

表-2.2.1 一語 (32ビット) の分割

Table-2.2.1 Numerical values expressed by the divided "k" bits of equal sizes in one "word" with 32 bits, the unit area of the computer memory

分割ビット数 (k) Number (k) of equally divided bits	k ビットでの数値表現 Range of numerical values expressed by "k" bits	左記の個数 (2^k) Number (2^k) of numerical values expressed by "k" bits	誤差 Error ($1/2^k$)
2	$0 \sim 2^2 - 1 = 3$	$2^2 = 4$	$1/2^2 = 0.25$
4	$0 \sim 2^4 - 1 = 15$	$2^4 = 16$	$1/2^4 = 0.0625$
8	$0 \sim 2^8 - 1 = 255$	$2^8 = 256$	$1/2^8 = 0.003906$
16	$0 \sim 2^{16} - 1 = 65535$	$2^{16} = 65536$	$1/2^{16} = 0.0000152$

注) 誤差とは格子間隔を 1 としたときの値

Note : The 'error' means a relative value of the miscalculated coordinate in the case of a unit grid interval.

$$\left. \begin{aligned} I &= [X/D] \\ J &= [Y/D] \\ u &= X/D - I ; (0 \leq u < 1) \\ v &= Y/D - J ; (0 \leq v < 1) \end{aligned} \right\} \dots\dots(2.2.1)$$

ただし, [] はガウスの記号で, 小数部分を切り捨て。

また, $P(u, v)$ を $P(X, Y)$ に戻すには (2.2.1) 式の逆変換により,

$$\left. \begin{aligned} X &= (I + u) \cdot D ; (0 \leq u < 1) \\ Y &= (J + v) \cdot D ; (0 \leq v < 1) \end{aligned} \right\} \dots\dots(2.2.2)$$

の関係で求められる。1 語が K ビットからなる記憶場所に詰め込む複数のデータを 1 個あたり k ビット ($k \leq K$) の数値で表わすことにすると, 小数 u, v に対応した整数値 U, V は次式で表わせる。

$$\left. \begin{aligned} U &= [2^k \cdot u] \\ V &= [2^k \cdot v] \end{aligned} \right\} \dots\dots(2.2.3)$$

等高線や境界線などの任意の曲線に対して, 識別のための記号番号 (コード) を付けることにする。いま, ある点列データのコード (例えば, 等高線の番号など) を L , 点列上のデータ点 $P(X, Y)$ の座標を格子間隔 D に基づいて (2.2.1) 式により変換するとき, ($M \times N$) の 2 次元配列の記憶場所内で, 格子点 $P(I, J)$ に対応した 1 語の記憶場所に 3 つの数値 L, U, V を詰め込むことにすれば, 点 $P(X, Y)$ を探索する場合に, I と J の値が見出しの役割を果たせる。コード L を持つデータ点を探索するには, 各格子点 (I, J) の記憶場所についてコード L を持つデータ点があるかないかを検索し, もし存在すればそのデータ点内に詰め込まれている U, V の値を読みだしたうえで (2.2.3) 式の逆変換によって u, v に変換し, (2.2.2)

式を用いて X , Y を求めればよい。コード L は $0 \sim (2^k - 1)$ の 2^k 個 (種類) の数値 (情報) を表わせるから、座標値を実数型から整数型に変換する際に生ずる、数値の丸めに伴う位置の誤差は、格子間隔 D に対して $D/2^k$ 以内となる。座標値の表示誤差を格子間隔の $1/100$ 以下に抑えるには、8 ビット以上の記憶領域が作業用に必要となる。

u と v のうち、少なくとも片方が必ず 0 となるように点列データを調整できるならば、コード L と座標値 U もしくは V の 2 個のデータで 1 座標点を表わすことができる。また、

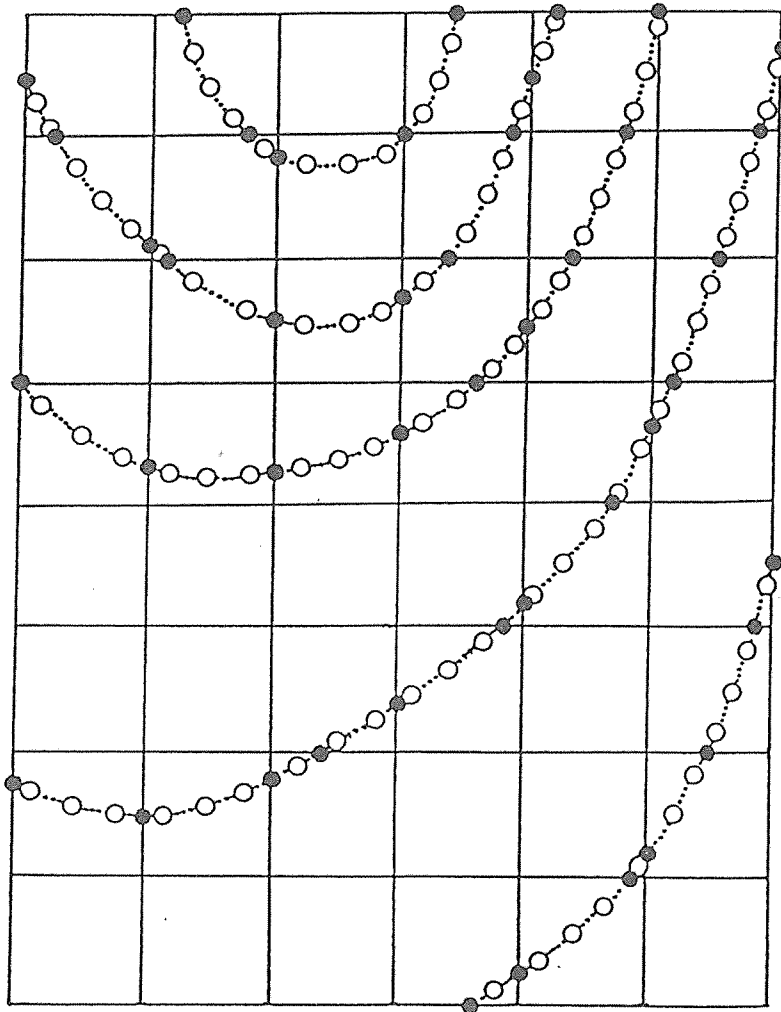


図-2.2.3 点列データの変換

Fig-2.2.3 Conversion of original digitized-contour-data to the regulated coordinate ones

注) 白丸：採取時のデータ点

Note) White circle : Captured coordinate datum

黒丸：変換されたデータ点

Black circle : Converted coordinate datum for the grid DTM generation use

1 格子点あたり 2 語づつのデータ記憶場所を確保できるなら、格子線と曲線との交点を X 方向と Y 方向とで別々に分けて格納することができるので、データ点の検索には好都合である。

図-2.2.3 は、ディジタイザによって採取された任意の間隔をもつ点列データを、データ点間の内挿補間もしくは間引き処理を施すことにより、曲線と格子線との交点からなる新しい点列データに変換する模様を示したものである。また、図-2.2.4 は、格子線との交点である曲線点列上のデータ点の X, Y 座標値が、格子座標系に変換されて格子点位置の記憶場所に格納される際の、データ点と記憶場所との対応関係を示したものである。

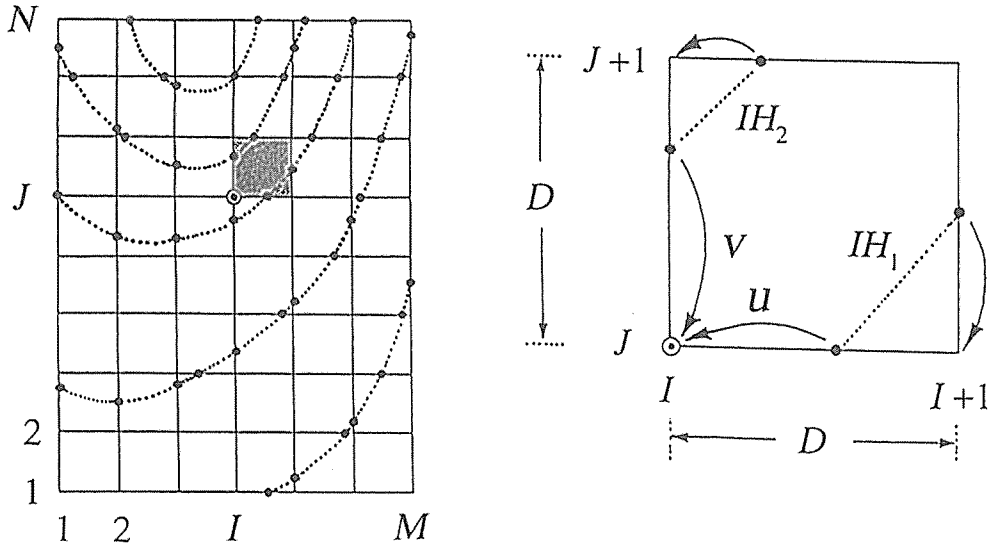


図-2.2.4 データ点の格納位置

Fig-2.2.4 Digitized-contour-data storing system in a grid cell

注) D: 格子間隔 Grid interval

Note) IH₁, IH₂: 等高線番号 Number of contours

3) 隣接データ点の位置情報

微地形の解析を行おうとするとき、ある点列上で抽出された 1 つのデータ点を中心として、その点列上の前後方向で数点づつのデータ点を抽出し、部分的に点列の並びを復元する必要に迫られる場合がある。そのためには、格子点位置に格納される各点列データ点の情報のなかに、同一点列上にある 2 つの隣接データ点が存在する位置（もしくは方向）を示す情報が含まれていると都合がよい。

この隣接データ点の位置情報は、点列並びの迅速な復元が可能となるよう、たとえ複雑に屈曲した地形箇所であってもできる限り一意的に隣接点を確定しうるものであることが望ましい。また、隣接点は 1 データ点につき前後 2 個づつあるから、位置情報の表示に必要なビット数は、できる限り少ない方がよい。

格子座標系においては図-2.2.5 (a~d) に示すように、データ点の存在様式を 4 つのパ

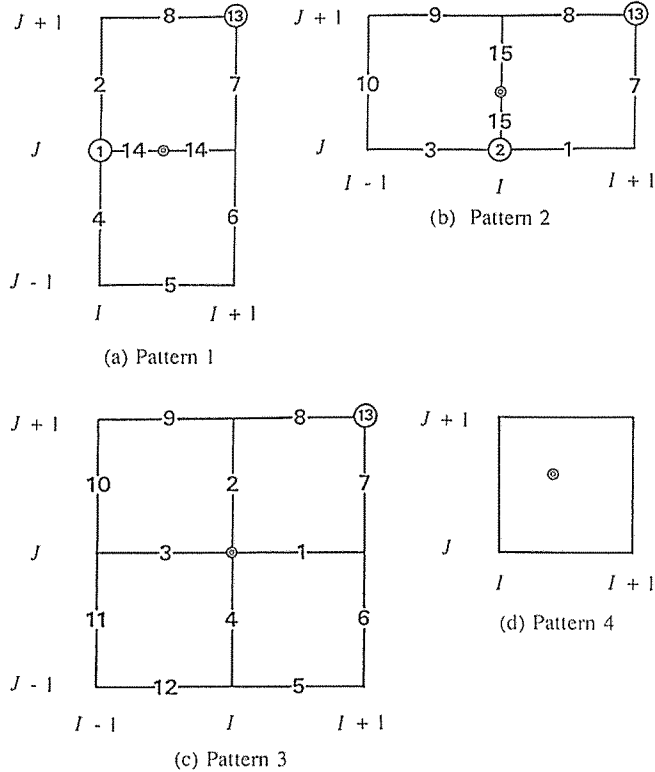


図-2.2.5 データ点の存在パターンと隣接点の存在する方向のコード番号
 Fig-2.2.5 Four existence-mode patterns of a digitized contour datum on a grid line and code numbers of indicating its neighboring coordinate points on the same contour

注) 二重丸：現在点の位置

Note) Double circle : The position of the current point

数字：隣接点の存在する方向を表すコード番号

Digital number : Code number indicating the neighboring coordinate point to the current point on the same contour

丸内数字：隣接点が格子点である場合の方向コード

Digital number in a circle : Code number of indicating the neighboring special grid point to the current point on the same contour

ターンに大別できる。曲線の点列データが、図-2.2.3のように全て格子線との交点となるように変換された場合、すなわち全ての点列データ点が両端の格子点を含む格子線上に存在する場合には、隣接データ点の存在する位置(方向)を、図-2.2.5(a~c)に示した通り、1~15の数字によってコード化することが可能である。コード番号が1から15までの数字で表されるので、表-2.2.1から明らかなように、1つの隣接点位置を表すのに4ビットを充てれば十分である。このコード化において最も重要な条件は、曲線の点列データが必ず格子線との交点のみで成り立っていることであり、もしも図-2.2.5(d)のようなパターンをとるデータ点を含む場合には、4ビットだけでは一意的に隣接点の位置を確定するためのコード

化は困難である。

4) 点列データの格納構造

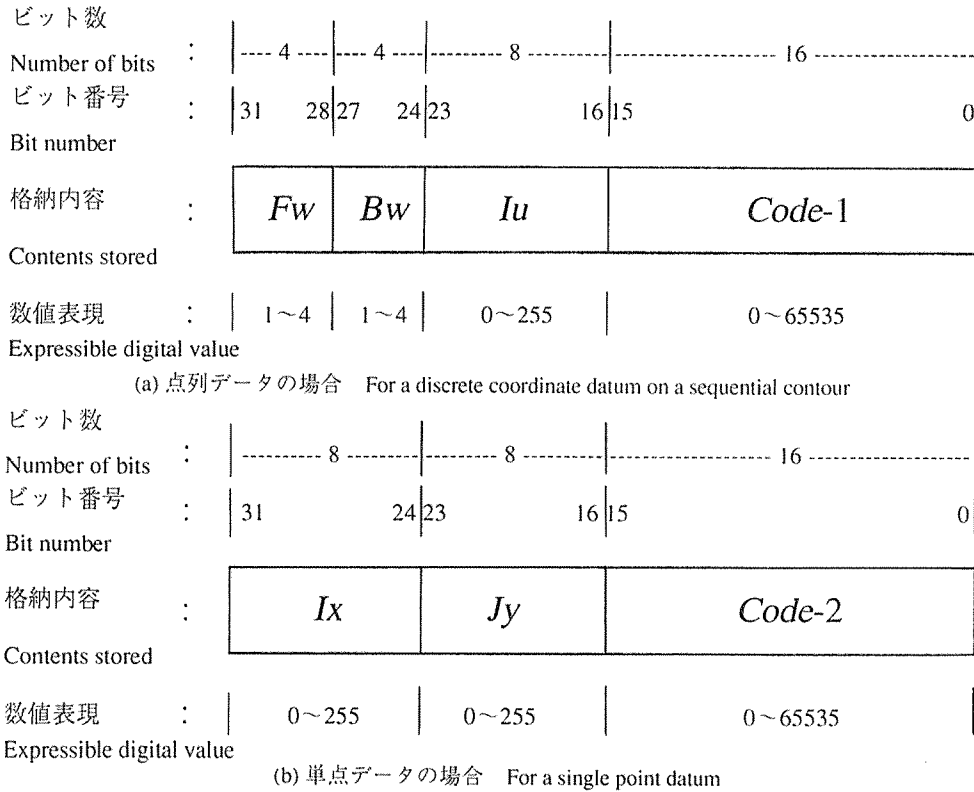


図-2.2.6 データ点の情報の1語内格納構造

Fig-2.2.6 Information storing structure in one "word" for a digitized contour datum

注) *Fw*: 前進方向の隣接点が位置する方向のコード番号

Note) Code number indicating the neighboring coordinate point forward to the current point on the same contour

Bw: 後進方向の隣接点が位置する方向のコード番号

Code number indicating the neighboring coordinate point backward to the current point on the same contour

Iu: 格子内座標系における点列データ点の座標値

Coordinate value of a digitized contour datum on the grid line converted to the grid coordinate system

Code-1: 等高線点列セグメントのコード番号

Code number of a contour segment

Code-2: データ点の種別コード番号

Code number corresponding to a kind of a coordinate point

Ix: 格子内座標系におけるX軸方向の座標値

Coordinate value of the horizontal direction in the grid coordinate system

Jy: 格子内座標系におけるY軸方向の座標値

Coordinate value of the vertical direction in the grid coordinate system

1語32ビット内に点列データの持つ各種情報を効率的に詰め込む格納構造を図-2.2.6(a)に示した。情報の内容は、点列のコード(曲線の種類;16ビット),格子線上の座標位置(8ビット),および格子座標系における両隣接データ点の存在する方向(各4ビット)の4つである。点列コード番号表示用に16ビットを割り当てたことにより,曲線の種類を65,536個まで区別できるので,多数の曲線を実用上十分な数について処理することが可能である。同一の標高を持つ等高線の点列であっても,異なった場所にある別の点列群である場合には,それぞれ別のコード番号を付けて格納する方が点列データを管理しやすい。

なお,単点データの場合には,2つの隣接データ点の位置情報が不要になるから,その分を他の座標位置の表示用に充てて図-2.2.6(b)に示すようにデータ点のもつ情報を格納すれ

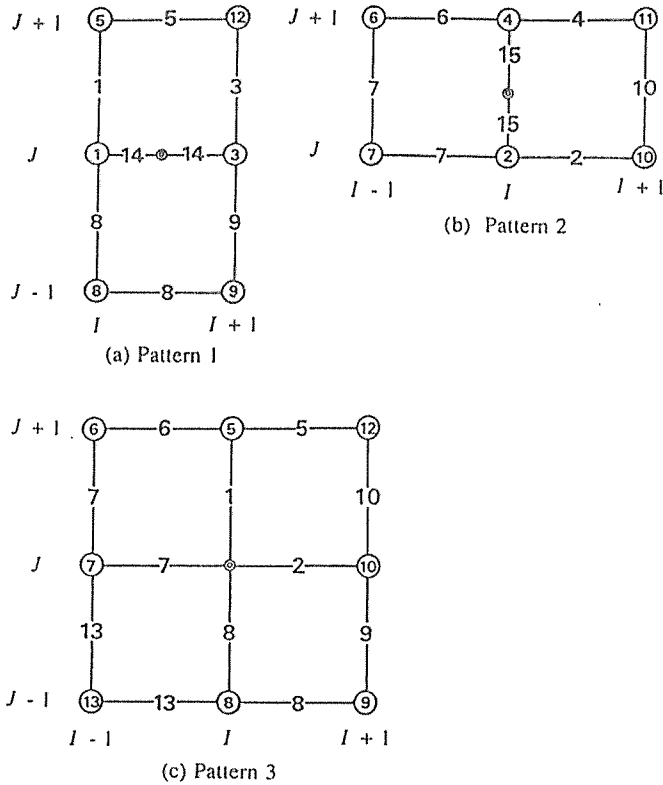


図-2.2.7 隣接点を持つべき現在点を表す方向コード番号

Fig-2.2.7 Code number indicating the current contour datum direction which should be given to its neighboring points on the same contour line

二重丸：現在点の位置

Double circle : Position of a current point

数字：隣接点を持つべき現在点を表す方向コード番号

Digital number : Code number indicating the direction of a current contour datum position which should be given to its neighboring points on the same contour line

丸内数字：隣接点が格子点上にある場合の現在点を表す方向コード番号

Digital number in a circle : Code number indicating the direction of a current contour datum position which should be given to the neighboring special grid point on the same contour line

ばよい。もちろん、これらの格納構造は固定的なものではないので、演算の種類やプログラムの必要に応じて適宜、使いやすいように調整し直すことが可能である。

5) 隣接座標点の探索

あるデータ点 P_1 から隣接点を探索するには、 P_1 点における前進方向もしくは後進方向のコード番号に基づいてデータ点を探索すべき格子点 (I, J) と格子線を確定し、そこに存在するデータ点 P_2 の標高コード番号が P_1 と一致し、かつ P_2 の後進方向もしくは前進方向の方向コード番号が P_1 と P_2 とを結ぶ方向に対応していることを確認すればよい。図-2.2.7は、 P_2 点が P_1 点の隣接点である場合に持つべき「隣接点方向」の方向コード番号を示したものである。

6) 格子点周辺における点列データの探索方法

ある対象地域において地形解析に必要な全ての点列データが順編成ファイルから主記憶上に読みこまれ、1語内詰め込み方式で格納されているものとする。このとき、格子点 $P(I, J)$ の周辺で点列データを探索する手順は、図-2.2.8に示した通りである。点列上のデータ点 $P(X, Y)$ は対応する各格子点位置に格納されているから、探索すべき格子点の範囲を特定する際には、 I と J の値が見出しの役割をはたす。 $P(I, J)$ を中心とした1辺 $2r$ の正方形内に

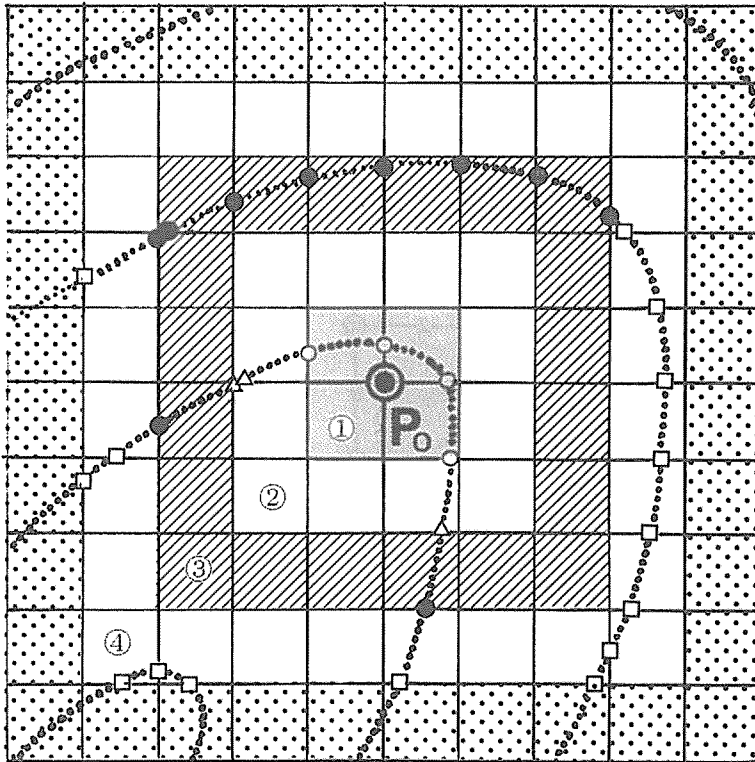


図-2.2.8 点列データ点探索範囲の優先順位

Fig-2.2.8 Priority order for enlargement of areas where digitized contour data should be detected

注) 丸内数字：優先順位

Note) Digital number in a circle : Priority of the digitized data detection

含まれる点列データを、 $r=1, 2, \dots$ として格子点の内側に近い側から順次抽出していく。 $r=2$ 以降の場合、先にデータ探索した内側区域をスキップさせるようにすれば、それだけデータ探索時間を短縮させることができる。

(3) 点列データ格納・探索方法の新旧比較

前項で取り上げた高密度記憶方式による点列データの格納・探索方法が、データ処理効率の点で実際にどれほど従来の方法と異なるものであるかを、比較実験によって確かめることにする。実験の直接の目的は、点列データ格納方法の相違がもたらすデータ探索過程での時間的な差異を把握することである。

従来の方法による点列データの探索では、普通、X、Y座標値が採取された順に並ぶ「順編成ファイル」データの先頭から末尾まで、全てのデータを参照する必要がある。多数の等高線の点列データを対象として、沢山の地点で繰り返しデータ点の探索を行わなければならない場合、この方法では明らかに無駄が多すぎる。このような場合には、データ探索が必要な各地点についての標高階をあらかじめ何らかの方法で算出しておいたうえで、各等高線ごとにグループ分けして「直接編成ファイル」と呼ばれる特別なデータ格納場所に点列データを格納しておき、データ探索に必要な等高線グループの点列データのみを読み出せるようにしておけば、毎回のデータ探索の参照範囲を減らすことが可能となり、探索時間を少なくするうえで有効である(38, 65)。そこで、今回の実験ではデータ格納方式として、①順編成ファイル方式、②直接編成ファイル方式、③高密度記憶方式の3つを取り上げることにする。

1) 比較実験の方法

実験内容は、境界線内に含まれる規則的に並んだ全格子点を対象として、格子点から最寄りの等高線に至るそれぞれの最短距離を算出するに要する点列データの格納・探索時間を、各データ格納方式別に計測するものである。最短距離の演算は、最寄りの等高線中で当該格子点から最短距離となる点列データ点を探索したうえで、基本的にはその点データの前後1点ずつを抽出して連続する3点により放物線近似し、格子点からその曲線に至る垂線の足となる座標点を算出して求めた。

また、点列データの採取密度の違いがデータ格納・探索時間に及ぼす影響を調べるために、格子間隔を2、4、8倍に変化させた時の間引かれた点列データを用いて、上記と全く同様の演算処理を行った。

順編成方式と直接編成方式の場合にそれぞれデータ探索時間を最小にするため、点列データは標高の低い順に並べて入出力処理するようにあらかじめ調整した。さらに、順編成方式の場合について、各標高ごとの等高線点列データから格子点までの最短距離の変換具合を記録しておき、次に読み込んだ点列から格子点までの最短距離がそれ以前の最短距離の最小値よりも大きくなったとき、それ以降の点列データ群の読み込み操作を打ち切らせることにした。

今回の実験ではデータ格納方式別にみたデータ探索時間の差異を把握することを主眼としたため、直接編成方式の場合に必要な格子点の標高階については、あらかじめ別途、算出しておいた結果を用いた。高密度格納方式の場合、1語内詰め込み方式によって、先述のよう

に点列内で隣接する前後のデータ点が存在する方向（向き）（各4ビット）、等高線と格子線との交点の座標値（8ビット）、および等高線の標高と対応したコード番号（16ビット）を1語（32ビット）内に詰め込んだほか、ビット・プレーン方式を用いて「面制御行列」（38）を設け、格子線と等高線との複数の交点の有無や境界線の内外の判別などの処理を行った。なお、順編成方式や直接編成方式の場合にも、この面制御行列を適用して演算の対象となる格子点の識別を行った。

また、順編成方式の場合、データ採取密度が高いときには、演算対象の1格子点ごとに全点列データの先頭から末尾までを毎回読み込む形でともに演算処理を行おうとすると演算時間が多大にかかりすぎて、計算機の処理上の時間的制約にひっかかってしまう。そこで、標高階を利用して各標高階ごとに任意の1点づつを代表として選び出して演算処理を行い、その結果に基づいて総処理時間を推定する方法をとった。図-2.2.9は、3方式による点列データ演算処理の概念図を示したものである（38）。

2) 実験資料

実験資料として、名古屋大学農学部附属稲武演習林の月ヶ平地区（面積約74ha）の縮尺1:5,000、等高線高度差10mの地形図に、格子間隔2mm（実長10m）、大きさ125×145の格子をかぶせたものを用いた。このときの等高線本数は間曲線を含めて59本、入力データの総数は9,818点である。高密度方式の場合、個々の場所の間曲線や閉曲線となる主曲線は、標高が同一でも別々の点列の並び（セグメント）として処理した方が端点付近での「向き」情報の処理上、都合がよいので、それぞれを分離させて106本の等高線として扱った。等高線の点列データは、地形図をディジタイザでトレースして求めたもので、すべて格子線との交点の座標値として出力されている。

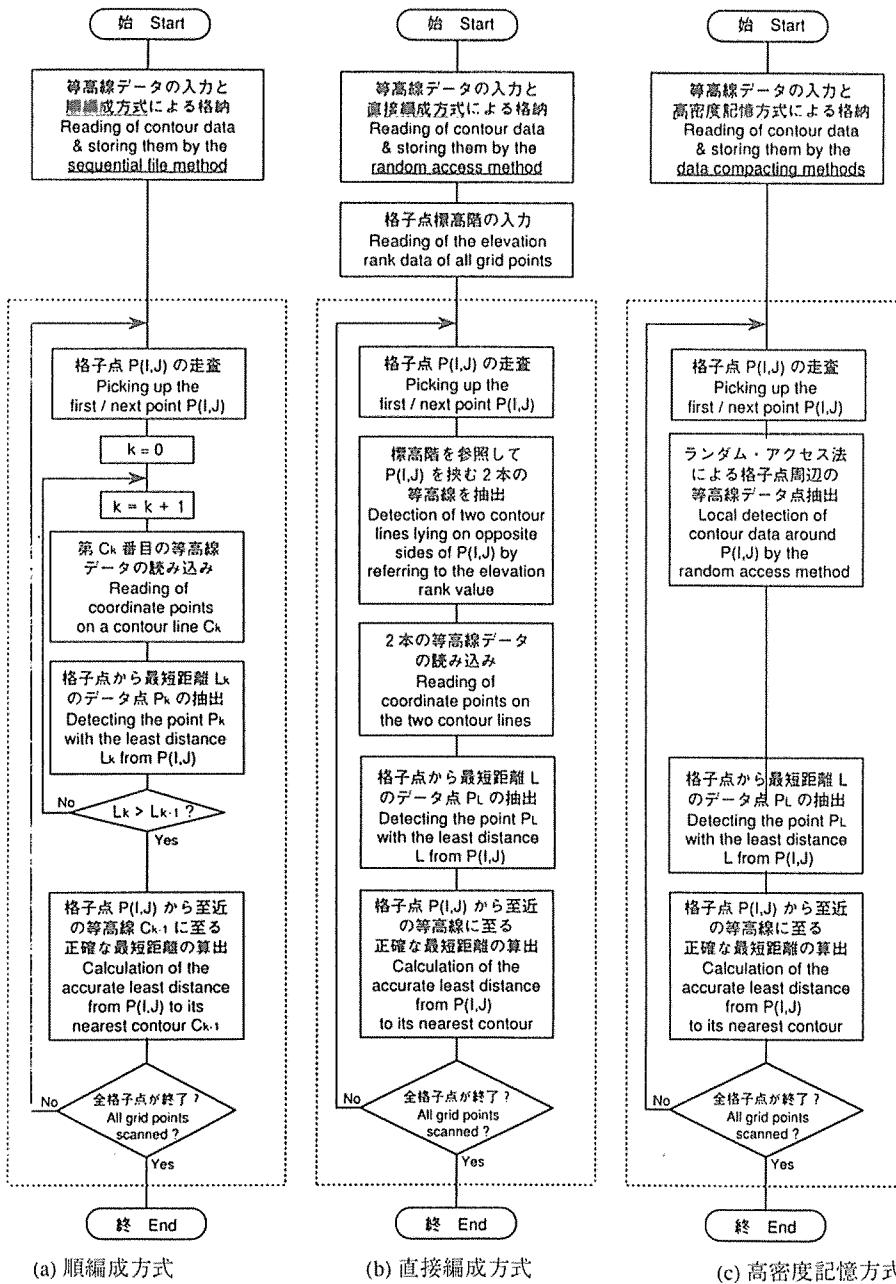
3) 結果と考察

データ格納方式別にみたデータ探索時間の集計結果は表-2.2.2の通りである。表中の時間の数値は、それぞれ3回づつ計算した結果の平均値を採用した。

この表から、①順編成方式と②直接編成方式の両者は、共にデータ密度が高くなるにつれてデータ探索時間が著しく増大する傾向にあること、これに対して③高密度方式では①、②よりもはるかに少ない時間でデータ探索ができること、が特徴としてあげられる。データの密度が高くなるほど、高密度方式の利点は相対的に高くなるわけである。

表-2.2.2において、順編成方式と直接編成方式とで「作業用ファイルへの書き込み」時間が異なり、前者の方が少ない。これはファイル編成方式の違いに対応したデータ処理方式の違いが現れたものである。前者の場合、前に書き込んだ点列データの後ろに、次に読み込んだ点列データを単純に追加書きしているだけなのに対し、後者の場合、ランダム・アクセスができるように点列データのレコード番号を登録しながら、それに対応した記憶場所に点列データを書き込むという、一定の判別処理に要する時間が付加されるためである。

「データの高密度詰め込み」時間は、格子間隔が2以下では、直接編成方式の「作業用ファイルへの書き込み」時間よりも若干大きくなる傾向にあり、格子間隔が1の場合、前者の所要時間は後者の2倍を要している。しかし、入力1点あたり処理時間をみると、高密度方式の場合、格子間隔の大きさの如何にかかわらずほぼ一定している。これは高密度方式の場合、



Sequential file processing system Random access file processing system Data compacting system of high density

図-2.2.9 点列データ処理の3方式の概念図

Fig-2.2.9 Flow chart of three systems for processing the contour data in order to compare their abilities

注) 点線で囲まれた内部は繰り返し演算箇所を表す。

Note) The parts enclosed by dotted lines mean that a series of calculations is to be repeated until some conditions of convergence would be satisfied.

表-2.2.2.2 データ格納方式別点列データ探索時間の比較
Table-2.2.2 Comparison of the time detecting digitized contour data according to the three data storing methods

データ格納方式 Data storing method	(時間の単位 Units: ミリ秒 Millisecond)											
	隣接編成 Sequential			直接編成 Direct access			高密度 High-density					
格子間隔 Grid interval 実長 (Real length, m)	1	2	4	8	1	2	4	8	1	2	4	8
入力等高線本数 Number of input contour lines	59	57	57	57	59	57	57	57	106	103	99	87
入力データ点総数 Total number of input coordinate points	9,818	4,950	2,494	1,223	9,818	4,950	2,494	1,223	9,818	4,950	2,494	1,223
1 等高線あたりデータ点数 Mean coordinate points per contour line	166	87	44	21	166	87	44	21	93	48	25	14
対象区域の大きさ (格子点数) Size of the objective area (Number of grid points)	<1>	<2>	<3>	<4>	<1>	<2>	<3>	<4>	<1>	<2>	<3>	<4>
演算対象の格子点数 Number of the objective grid points	7,361	1,842	462	117	7,361	1,842	462	117	7,361	1,842	462	117
等高線データの読み込み Reading of contour data	61	29	16	8	56	30	16	9	61	32	16	7
作業用ファイルへの書き込み Writing input data into a work file	61	33	17	11	93	64	53	43	-	-	-	-
等高線データの高密度詰め込み Compacting open contour data	-	-	-	-	-	-	-	-	238	119	58	27
データ入力・格納時間の合計 Total time of contour data input and storing	122	62	33	19	149	94	69	52	299	151	74	34
入力 1 点あたり処理時間 Mean process time per input datum	.012	.013	.013	.016	.015	.019	.028	.043	.032	.033	.033	.034
作業用ファイルからのデータ読み出し Reading contour data out from a work file	232,806	28,405	3,986	488	17,343	2,431	371	62	-	-	-	-
至近データ点の探索 Detecting the nearest point on each contour	99,202	11,251	962	260	2,908	409	56	12	865	338	273	150
点列上での前後点の探索 Detecting the neighboring two points	157	40	9	1	132	33	8	0	376	103	35	8
格子点から至近等高線までの距離計算 The minimum length calculation from the objective grid point to its nearest contour	327	83	18	4	326	84	19	4	325	84	18	4
データ探索・演算時間の合計 Total time of the data detection and the elevation calculation for grid points	332,496	39,779	4,975	753	20,709	2,957	454	78	1,566	545	326	162
出力 1 点あたり処理時間 Mean process time per grid point	45.17	21.60	10.77	6.44	2.81	1.61	.98	.67	.21	.30	.71	1.39

注: Note 1) 対象区域の大きさ Size of the objective area: <1> 125 × 145, <2> 63 × 73, <3> 32 × 37, <4> 16 × 19
注: Note 2) 計測時間は各回ごとの演算時間の平均値 Each value of time in the table is the mean of three measurements.

1点ごとに独立した処理が行われているのに対して、直接編成方式の場合、点列並び(グループ)としての集団的な処理が行われることによる若干の処理能率の向上が図られる結果であると考えられる。

一般にデータ入力に要する時間よりもデータ探索時間の方が処理方式の違いによる所要時間の差は大きい。出力1点あたり処理時間をみると、3方式の違いは一目瞭然である。データ数の少ない格子間隔8の場合を除き、順編成方式では他の2方式の10倍以上もの処理時間を要する。順編成、直接編成の2方式と高密度方式とが決定的に異なるのは、前2者が格子間隔が小さくなるにつれて処理時間が増す傾向にあるのに対して、後者は反対に減少する傾向にある点である。

順編成方式の場合、先に述べたように、各標高ごとの等高線点列データから格子点までの最短距離の変化具合を記録しておき、次に読み込んだ点列から格子点までの最短距離がそれ以前の最短距離の最小値よりも大きくなったとき、それ以降の点列データ群の読み込み操作を打ち切らせることにしたが、この措置により、1格子点あたりの平均的な点列データ群読み込み回数は、演算の対象となる全格子点についてみると、何も措置せずに1格子点ごとに全点列データ群を最初から最後まで読み込む場合の約半分に短縮させることができた。

高密度方式の場合、格子間隔が大きくなるにつれて出力格子点1点あたり処理時間が増す原因は、2つの格子点で挟まれる1格子線上に交わる等高線の種類(数)が増え、従って格子点に対応したデータ格納場所に格納される点列データ点が増大し、格子点から最短距離となる点列データ点を判別する際に抽出すべき点列データ点の数が増えるためと考えられる。その逆に、格子間隔が小さくなるにつれて、1格子線上に格納される点列データ点が1個以内となる割合は必然的に増すが、それは不要な複数の等高線に関する判別を行わずに済む格子点の数が増すことを意味し、結果として出力1点あたりの処理時間が小さくなるわけである。このことは、高密度方式の効率的な利用を図るうえで、地形図との対応で格子間隔の設定の仕方が重要な因子になることを示唆するものである。なお、直接編成の場合には、表-2.2.2に掲げた数値以外に、本来ならば標高階の算出に関する時間が加算されるべきものである。

以上の結果から、データの採取密度が高い場合、データの格納・探索方法として、高密度方式が従来の順編成方式や直接編成方式に比べて、きわめて処理効率の高いことが実証されたといえる。

3. 格子状数値地形モデル作成へのスプライン関数の導入

(1) 在来の格子状数値地形モデル作成方法の問題点

DTM作成方法については、入力データの性格・種類に対応して種々の異なった方式がある(75)が、等高線の点列データを利用しうる場合には、格子点をはさむ2本の等高線の高さを、格子点から両等高線に至る距離で比例配分して格子点の標高を求める方法(以後、内挿方式とよぶ)が、DTMの精度の高さと安定性の点で具合がよい。

等高線の点列データを用いても、例えばX軸とY軸に平行な格子線方向で4個の等高線

点列データを抽出して格子点標高を求めるようなアルゴリズムでは、標高値の算出結果に部分的な「穴あき」エラーが発生する場合がある(119)。また、等高線の点列データを単なるランダムポイント・データとみなし、標高を計算すべき格子点の周囲で抽出した数点の等高線データによって、当該格子点からの距離の逆数を重みとした標高値の重み付き平均法を用いる方法も見受けられるが、これは等高線のもつ地形情報の大半を無視するものであって、精度の面からは非常に問題があると考えられる。

筆者はこれまでに、等高線の点列データをプロトタイプの高密度格納構造で取り扱い、内挿方式に基づいた格子状数値地形モデル作成システムを開発している(38, 42)。内挿方式によって作成される格子状数値地形モデルの問題点として、やせ尾根の張出し部や傾斜変換線付近などにおける等高線の再現精度の劣ることがあげられる。そこで、これを改良するために、部分的にスプライン関数を導入することを試みた(43)。本節では、その適用方法の概要と検討結果について述べる。

(2) スプライン関数の適用方法

1) スプライン関数

スプラインとは、プロットされた点(もしくは、その近く)を通る滑らかな曲線を描くために用いられる自在定規を意味する。スプライン関数とは、多項式を何らかの連続条件を満たすように接続した区分的多項式である。スプライン関数のつなぎ目を節点とよぶ。節点 $\xi_i (i=0, 1, \dots, n)$ をもつ m 次のスプライン関数 $S(x)$ は、次の二つの性質をもつ実数軸上で定義された関数である(28)。

① 各区間 $(\xi_i, \xi_{i+1}) (i=0, 1, \dots, n; \xi_0 = -\infty, \xi_{n+1} = \infty)$ において、 $S(x)$ は m 次またはそれ以下の多項式。

② $S(x)$ とその $1, 2, \dots, m-1$ 次の導関数が $(-\infty, \infty)$ で連続。

実際に自在定規を用いて描かれる曲線は、ある近似条件のもとで、3次のスプライン関数になることが知られている(28)。

2) 適用上の条件

図-2.3.1は、傾斜変換線を模式的に表したもので、等高線 H_1 が傾斜変換線であり、破線は等高線 H_3 と H_2 の中間を結ぶ軌跡を示す。内挿方式の場合、2本の等高線ではさまれる格子点の高さは、同図の(a)平面図において、格子点 P から等高線 H_1, H_3 (その標高 H_1, H_3) に至る最短距離をそれぞれ l_1, l_3 とするとき、

$$H = (H_1 \cdot l_3 + H_3 \cdot l_1) / (l_1 + l_3)$$

で求まる。

等高線データに基づいて格子点の標高を求める場合、格子点からの距離が短いデータ点ほど、当該格子点に大きな影響を及ぼすと考えられる。たとえば、多項式の曲面近似方式で格子点の標高を算出する場合には、各データ点に対して格子点からの距離(の逆数)に対応した重みをつけるのが通例である(75)。

図-2.3.1(a)中の破線は、等高線 H_2 と H_3 からの等距離線であり、格子点 P が斜線部分にあれば H_3 よりも H_2 に近いことを意味する。従来、内挿方式のみで算出してきたDTMの精

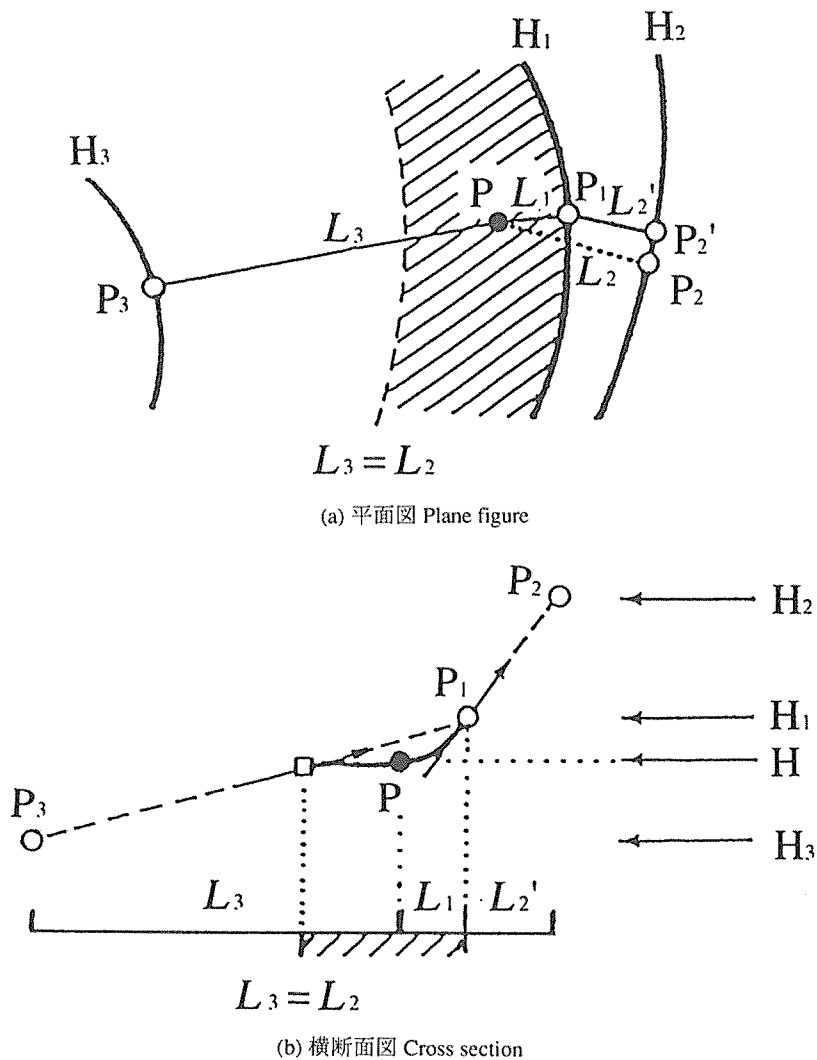


図-2.3.1 傾斜変換線の模式図

Fig-2.3.1 Illustration of the contour line implying the intersection between two slopes of very different inclinations

注) P (黒丸印点) : 標高が算出される格子点

Note) P (Black circle point) : Grid point whose elevation H is to be calculated

H_i : 等高線 Contour line

P_i : 格子点Pから各等高線への至近点

Nearest point from the point P on each contour line

L_i : 格子点Pと各等高線との間の最短距離

Minimum length between the two points, P and P_i

斜線部分 : スプライン関数補間の候補区域

Hatched area : Proposed area for applying the Spline function interpolation to calculate a grid point elevation

度を一層向上させるためには、当該格子点に対して等高線 H_3 よりも近い位置にある等高線 H_2 の座標データを活用する必要があると考えられる。そこで、格子点 P がこの斜線部分にある場合について、スプライン関数を用いた格子点標高 H の算出方法を考える。

ディジタイザ等で採取された等高線の (X, Y) 座標データは、前節の高密度記憶方式で格納されているものとする。この場合、スプライン関数を適用する前提として、次の2条件を仮定する。

- ① 演算に用いる等高線の点列データは H_1, H_2, H_3 からの各1個ずつ (P_1, P_2', P_3) とする。
- ② 図-2.3.1(b)の斜線部 ($l_3=l_2$ の点と P_1 点の間) について、両端点での微係数が P_3-P_1 を結ぶ勾配、および P_1-P_2' を結ぶ勾配と一致し、かつ、この区間で単調増加（もしくは単調減少）となるように3次多項式で補間する。

①はDTMの作成効率に最も直接的な影響を及ぼすデータ探索時間を圧縮するためであり、②はスプライン関数補間区間と非補間区間とが滑らかに連続するようにするための配慮である。

なお、点 P_2 は格子点 P から等高線 H_2 におろした垂線の足であり、その距離 l_2 は格子点 P がスプライン関数補間の対象区域内にあるかどうかを最初に判別する際に用いられる。スプライン関数補間することが確定したなら、格子点 P に最も近い等高線 H_1 上の垂線の足、点 P_1 から等高線 H_2 までの最短距離 l_2' を探索しなおす。

3) アルゴリズム

図-2.3.2は、図-2.3.1(b)の斜線部分で示した2点間をスプライン関数補間する場合の模式図である。高さを y 、距離を x とすると、3次式 y とその導関数 z は次のように表わされる。

$$y=f(x)$$

$$z=y'$$

説明を単純化するため、

$$\textcircled{1} y_0 < y_1, \textcircled{2} z_0 > 0, z_1 > 0$$

とする。単調増加の条件より、

$$\textcircled{3} f'(x) \geq 0.$$

図-2.3.2(b)の曲線のように、 z が $[x_0, x_1]$ の区間で常に正または零である場合には、単純な Hermite 補間で十分である。すなわち、3次多項式 y を

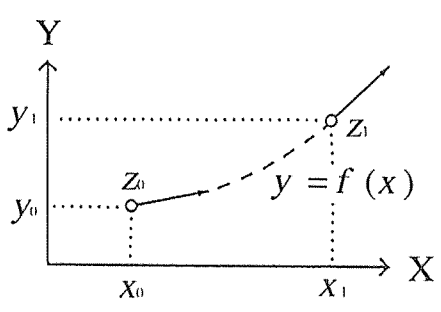
$$y = a_3 \cdot x^3 + a_2 \cdot x^2 + a_1 \cdot x + a_0 \quad \dots\dots(2.3.1)$$

とすれば、 $(x_0, y_0), (x_1, y_1)$ の2組のデータと、(2.3.1)式を x で微分した

$$z = 3a_3 \cdot x^2 + 2a_2 \cdot x + a_1 \quad \dots\dots(2.3.2)$$

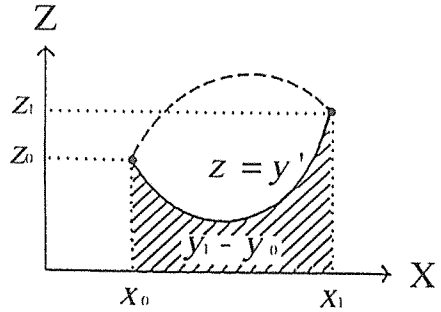
における $(x_0, z_0), (x_1, z_1)$ の2組のデータとで4つの係数が決まるから、两点間にある任意の位置 x における高さ y が求まる。

(2.3.2)式が X 軸と交わる場合、両端点から最寄りの X 軸上の交点までの距離を d_0, d_1 とする。スプラインを描くための関数としては種々の形が考えられようが、ここでは、この交点位置で y の2次導関数が滑らかに連続するものとして、最も単純な放物線を適用する。



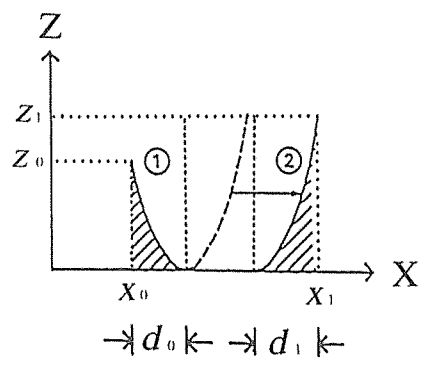
(a) 条件設定

Setting of the conditions for applying the Spline function



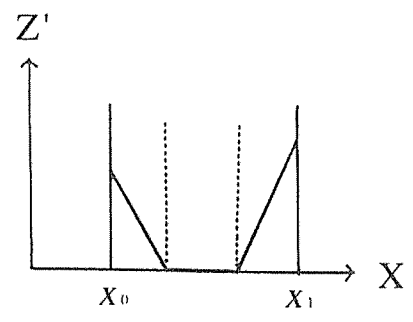
(b) Hermite 補間の場合

The case suitable for the Hermite interpolation



(c) スプライン関数補間の場合

The case suitable for the Spline function interpolation



(d) 2次導関数の連続性

Continuity of the derivative of second order

図-2.3.2 スプライン関数補間の模式図

Fig-2.3.2 Concept of applying the Spline function interpolation to the calculation of a grid point elevation

注) x_0, x_1 : 両端点の座標 Two edge coordinates

Note) y_0, y_1 : 両端点の標高 Elevations corresponding to the coordinates, x_0 and x_1

z_0, z_1 : 両端点を結ぶ曲線に対する両端点での接線勾配

Tangent values at both edge points corresponding to the curve that is to be interpolated between the two points

図-2.3.2(c)において、両端点 (x_0, z_0) , (x_1, z_1) と最寄りの交点との間は、それぞれの交点を通り Z 軸に平行な直線を対称軸とする

$$z = bx^2$$

の形の放物線で結ばれ、両交点間は X 軸と重なる直線で結ばれるものとする。これは、放物線の対称軸に関して片側を平行移動したものとみなすことができる。 z の導関数は図-2.3.2(d)に示されるように連続しているから、スプライン関数としての2条件を満たしていることは明らかである。

さて、①と②の部分に着目して、

$$z_0 = b \cdot d_0^2,$$

$$z_1 = b \cdot d_1^2.$$

斜線部分の面積は、もともと

$$\int_{x_0}^{x_1} y'(x) dx = f(x_1) - f(x_0) = y_1 - y_0$$

であるから、

$$\textcircled{1} \text{の面積} + \textcircled{2} \text{の面積} = b \cdot d_0^3 / 3 + b \cdot d_1^3 / 3 = y_1 - y_0$$

以上の3式の関係から、 y_0 , y_1 , z_0 , z_1 の4つの値が与えられれば、 d_0 , d_1 , b の3変数を決定できる。これより、 $d = x_1 - x_0$ とすると、

$d_0 + d_1 > d$ ならば Hermite 補間、

$d_0 + d_1 \leq d$ ならば スプライン関数補間

という判別が自動的に行えることとなる。

4) 数値モデルによる検討

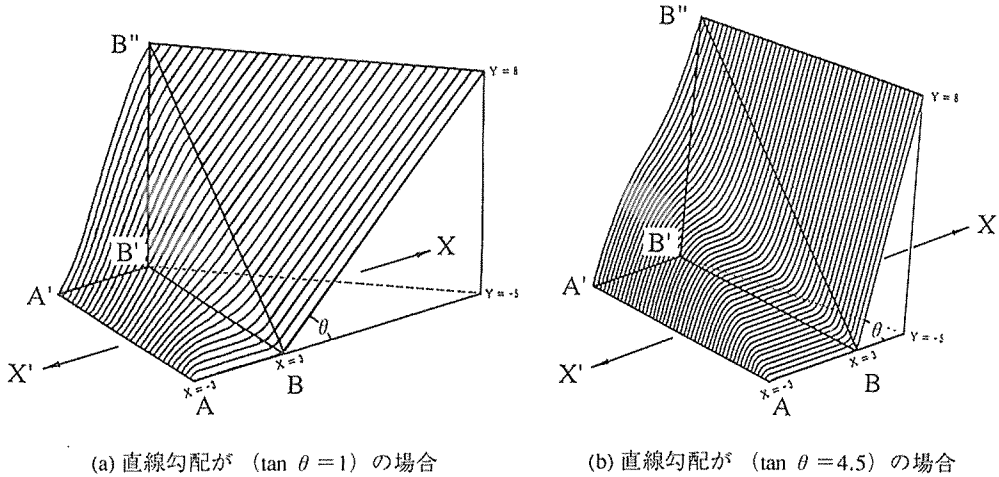
図-2.3.3(a), (b)は、以上の論理を数値モデルに対して適用した結果を示したものである。最大傾斜線方向での $x = -3$ における $\overline{AA'}$ 上の点から、 $x = 3$ における $\overline{BB'}$ 上の点までの区間についてスプライン関数補間を行なったもので、 $\overline{AA'}$ 上の点から $\overline{BB'}$ 上の点までが3次曲線で、その外側部分は図形表示プログラムを単純化する必要上、同一の勾配の直線としてある。また、 $\overline{AA'}$ 側の端点の高さを一定としておき、 $\overline{BB'}$ 側の端点の高さを $\overline{BB''}$ で示したように一様に変化させてある。この図から、スプライン関数により、単調増加という条件をみたしつつ、2つの接続点、すなわち $\overline{AA'}$ 上の点および $\overline{BB''}$ 上の点において、外側の2直線の勾配と等しくなるように3次曲線が接続しており、滑らかに2点間が結ばれていることがわかる。

(3) 適用例

図-2.3.4は、名古屋大学稲武演習林の月ヶ平地区を対象として、前述のスプライン関数を導入したDTM作成方式を実行した結果である。見やすくするために一部分のみを抽出し、拡大して描いてある。この図とは別の、等高線の数を増して描いた結果をみると、等高線間隔が広めの箇所の内側に関しては、スプライン関数を導入したことにより、やや曲線が滑らかになった部分が見受けられる。しかし、図-2.3.4を一見して明らかなように、残念ながら傾斜変換線付近では、予期したほどの精度向上が得られていない。

(4) 考察

数値モデルを対象にした場合と異り、実際の地形図に対してスプライン関数を導入した結果がさほどの効果を発揮しえなかった原因として、今回採用した放物線型を基準とするスプライン関数が、ある条件の下では傾斜変換線付近での地形の実態と合致しなくなるためと推測される。スプライン関数を適用する際の仮定として、等高線 H_1 側の端点での微係数を P_1-P_2' を結ぶ勾配と一致させたにもかかわらず、演算対象の格子点位置が最大傾斜線上で等高線 H_1 から H_3 の方へごくわずかに距離変化するとき、それに対応した勾配変化が予期した



The case for the straight line at the edge points having the gradient of ($\tan \theta = 1$)

The case for the straight line at the edge points having the gradient of ($\tan \theta = 4.5$)

図-2.3.3 数値モデルによるスプライン関数補間の適用例

Fig-2.3.3 Application of the Spline function interpolation method to the mathematical model for generating the DTM

注) 最大傾斜線方向 ($X-X'$) で $A-A'$ 上の点と $B-B''$ 上の点との間を単調増加の条件下で 3 次スプラインにより滑らかに結ぶ例であり、補間区域の両端点で接続する 2 直線の勾配は同一のものとして描いた。

Note) Both figures depict cases where the Spline function of the third order connects smoothly a point on the line $A-A'$ and the other on the line $B-B''$ along the maximum slope direction $X-X'$ under the condition of a monotonous increase of elevation, and are drawn under the hypothesis that two straight lines connected by the interpolation curve at both edge points have the same gradients.

以上に著しく大きく現れてしまった。これは、図-2.3.1 における P_1-P_2 間の距離 l_2' と P_1-P_3 間の距離 l_3 がある一定の比率以上になると、図-2.3.3 (a~b) の最下端のような事例に相当することになるためと考えられる。

もし、そうであれば、演算対象となる格子点が等高線 H_1 にきわめて近い場合には、むしろ H_3 の影響を無視し、 P_1-P_2' を結ぶ勾配を活用して線形近似により P_0 点の標高を求めることにした方が、原図の地形図がもつ特徴をより良く再現しうるはずである。

この推論の妥当性を確かめるために、斜線部内にある格子点のうち、等高線 H_1 が通過する格子線の端点となる位置にある格子点 P について、 P_1, P_2' を基準とする外挿方式により、標高 H を

$$H = \{H_1 \cdot (l_1 + l_2') - H_2 \cdot l_1\} / l_2'$$

で算出した結果が、図-2.3.5 である。この図から、外挿方式を援用することにより、瘦せた尾根の張出し部分を、かなりの高精度で再現しうる事がわかる。

ただし、外挿方式を用いる場合には、当該格子点が 2 本の等高線に挟まれていないことを

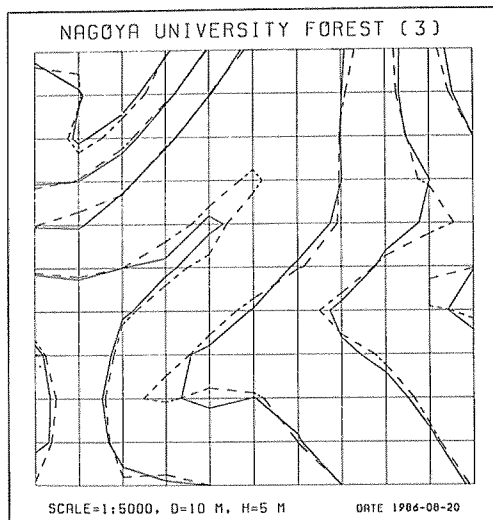


図-2.3.4 スプライン関数補間の適用例

Fig-2.3.4 Application of the Spline function interpolation method to a real contour map for generating the DTM

注) 破線 Broken line : 原図等高線 Original contour line

Note) 実線 Solid line : DTMからの再現等高線 Regenerated contour line through the DTM

格子間隔 Grid interval : 10 m

等高線高度差 Contour elevation interval : 5 m

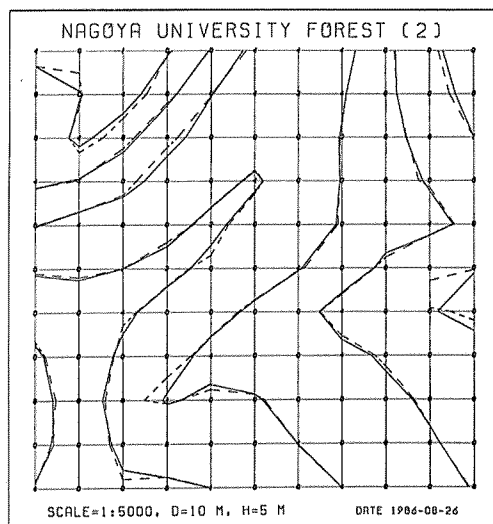


図-2.3.5 外挿方式を組み込んだ適用例

Fig-2.3.5 Application of the extrapolation method for generating a more accurate DTM

注) 破線 Broken line : 原図等高線 Original contour line

Note) 実線 Solid line : DTMからの再現等高線 Regenerated contour line through the DTM

格子間隔 Grid interval : 10 m

等高線高度差 Contour elevation interval : 5 m

確かめる必要がある。当然のことながら、局部的にみて等高線間隔の2倍以上離れた位置にある格子点に対しては、外挿方式を採用できない。

以上のように、等高線データに基づくDTMの作成にスプライン関数を導入してみた結果、理論的な自在定規としてのスプライン関数も、採取する等高線の点列データ点を極力少なくするという条件のもとでは、必ずしも満足のいくような精度向上をもたらさなかった。しかし、外挿法を採用しえない条件の区域も一般に少なくないから、図-2.3.1の斜線区域内に標高を補間すべき座標点Pが存在する場合に、前節の検討結果を踏まえて H_3 よりもPに近い等高線 H_2 がPに及ぼす影響を配慮しようとするなら、やはりスプライン関数による補間法を全面的に排除するのは不都合である。

以上の結果より、DTMの作成精度を高めるためには、内挿方式、外挿方式、スプライン関数補間方式の3つを有機的に組み合わせる必要があることが明らかになった。

4. ハイブリッド方式の格子状数値地形モデル作成システム

(1) ハイブリッド方式

前節でも触れたように、筆者はかつて内挿方式に基づく数値地形モデル作成システム(38, 42)を開発したが、前節の検討結果に基づいてこれを改良し、内挿方式と併せて、等高線の標高を外挿法で比例配分する外挿方式、理論的自在定規としてのスプライン関数による標高補間方式、および独立標高点付近などのような最奥閉曲線内に演算対象の格子点が存在する場合に対応した2次曲面近似方式を取り入れた、新しいDTM作成システムを開発した(45, 46, 48)。4種類の標高補間方法を組み合わせたDTM作成システムであるので、これを「ハイブリッド方式によるDTM作成システム」と呼ぶことにする。本節では、このDTM作成システムのアルゴリズムの概要と、適用結果について述べる。

(2) 基本的なアルゴリズム

1) アルゴリズムの概要

図-2.4.1に、この作成システムで採用したアルゴリズムの概要を流れ図で示した(45, 46)。

2) 点列データの調整

本システムで用いたアルゴリズムは、データ点の格納から探索に至るすべての段階で、等高線の点列データがすべてX、Y方向の格子線との交点からなる、ということが大前提としている。そして、点列上の前後点の方向を本章第2節の図-2.2.5に記した位置コード番号を用いて、座標値および標高コード番号と同時に記憶させる必要があるため、隣接点との間が上記の位置コード番号で表せないような離れ方をした場合には、点列データの格納処理が不可能になってしまう。そこで、ディジタイザにより採取された点列データは、以後の格納・探索をスムーズに遂行させるために、必ず別途作成してある点列データ調整用プログラム(サブルーチン・プログラムの名前:「PREDTM」)を用いて、系統的な格納・探索が可能な型式の点列データとして調整しておくことが望ましい。

なお、この点列データ調整用プログラムは、採取した際の点列データを間引き処理、ある

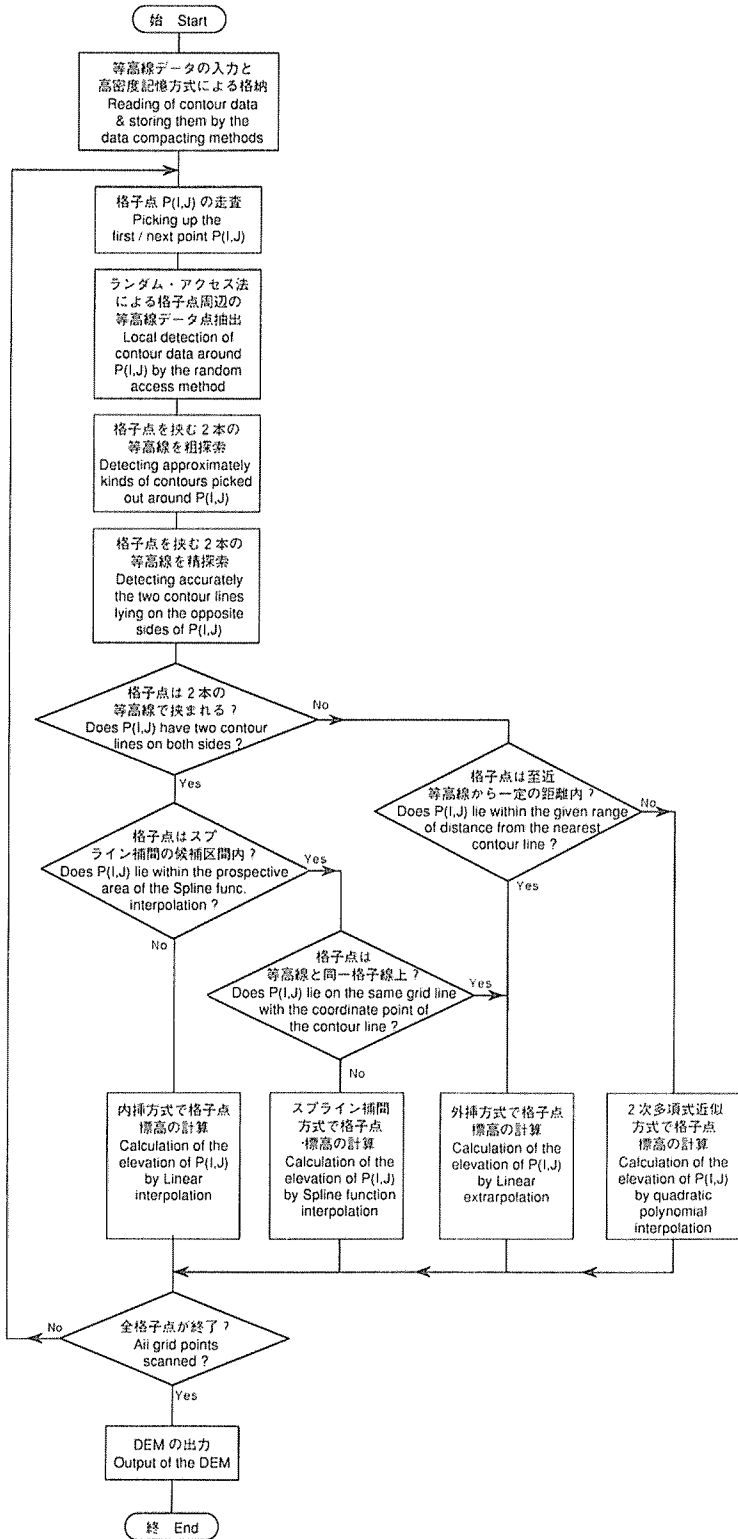


図-2.4.1 ハイブリッド方式による DTM 作成システムのアルゴリズムの概要
Fig-2.4.1 Flow chart of the algorithm of the highly accurate DTM generation system based upon the hybrid method

いは内挿処理して、新しい格子間隔の点列データとして再調整する場合にも用いることができる。

3) 境界線データに基づく面処理

地形図のトレース、もしくは航空写真の図化により等高線の点列データを採取する作業は、直接に格子点の標高を求める作業と比較すれば煩雑さが著しく少ないとはいうものの、それでもやはり、かなり手間のかかる仕事である。従って、DTM 作成の対象区域が長方形に区切って確保した格子内である程度限定しうる場合には、不要な個所での等高線を採取する手間を省略できるようにしておくと、労力的にも、経済的にも好都合である。

そこで本システムにおいては、格子の大きさに対応した2次元配列の各1語からなる記憶場所を、ビット・プレーン方式による「面制御行列」として確保し、そのうちの1ビット・プレーンを用いて境界線の点列データに基づいて境界線の内外を区分する「面処理」を行ない、等高線の点列データ採取区域を必要最小限に抑えられるようにした(50)。具体的には、等高線の点列データを採取しようとする区域の境界線をディジタイザでトレースする際に、その点列データに標高値0を与えて、他の等高線点列データ群と同じように点列データを採取すればよい。

4) 等高線データの迅速な探索

4-1) データ点格納用の記憶領域

格子点 $P_0(I, J)$ の標高を算出するためには、この格子点を挟む2本の等高線を含む、数本の等高線群を探索する必要がある。その際、等高線の点列データ点 $P(X, Y)$ は、格子の大きさ $(M \times N)$ に対応した記憶領域のなかで、格子点位置に対応したデータ記憶場所に格納されているから、 I と J が見出しの役割を果たす。

本システムでは、等高線の点列データの迅速な探索を保証するために、格子線と等高線との交点を X, Y 軸方向でそれぞれ1格子線上に複数の交点が出現した場合でも別々に分けて格納するように、 $(M \times N)$ の大きさの配列を4個確保している。この他に、やはり大きさ $(M \times N)$ の領域をビット・プレーン方式による「面制御行列」として確保している。さらに、点列データの格納段階で1つの格子線上に3個目以上のデータ点が出現した場合には、 X, Y 軸方向の別にはかかわりなく、順編成方式による一定の大きさの点列データ格納場所に出現順に、格子点の X, Y 方向の格子番号や格子座標系での座標値、標高コード、点列上での前後点の存在する方向、の諸情報を通常のデータ格納方法で格納するようにしている。

本システムで用いている面制御行列のビット・プレーンによる情報管理内容は以下の通りである。なお、ここで「格子線」とは、 X 軸方向の場合には右隣の格子点との間、 Y 軸方向の場合には上方の隣接格子点との間をさす。

- ① 境界線の内外
- ② 境界線外のDTM作成追加区域
- ③ 等高線が X 軸方向の格子線と交点をもつか
- ④ 等高線が Y 軸方向の格子線と交点をもつか
- ⑤ 等高線が格子点上を通過するか
- ⑥ 等高線が X 軸方向の格子線と2個目の交点をもつか

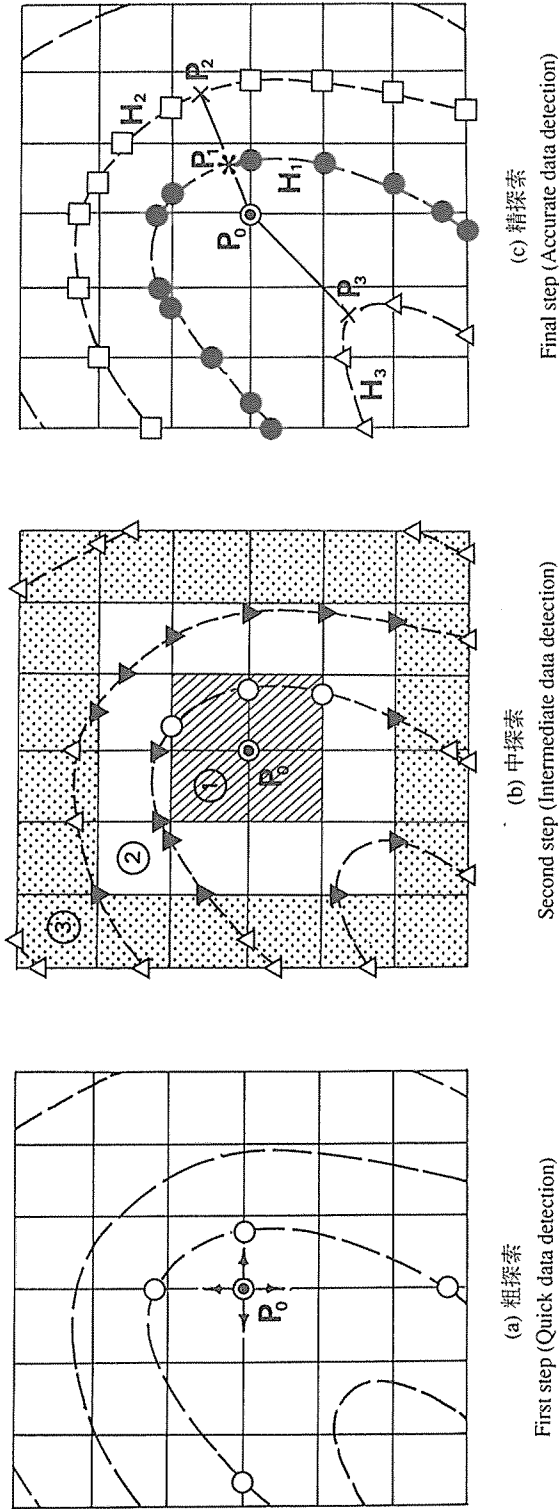


図-2.4.2 プロトタイプの方法で検出されたデジタル化された輪郭データ
 Fig-2.4.2 Proto-type method for detecting digitized-contour-data

注-1) 図中の矢印：データ点探索方向

Note-1) Arrow in Fig (a) : Direction of the quick contour-data detection

注-2) 図中の丸内数字：データ点探索範囲の優先順位

Note-2) Digital number in a circle in Fig (b) : Priority of digitized-data detection

注-3) 図の段階では、格子点 P_0 を挟む 2 本の等高線 H_1, H_3 を確定する ($P_0 \rightarrow P_2$ と $P_0 \rightarrow P_3$ の 2 線分のうちで H_1 との交点 P_1 を持たない方が H_1 の相手方の等高線となる)

Note-3) In the final step (c) of data detection, the contour line H_1 and its partner between which the grid point P_0 lies would be decided by either of the contour lines H_2 or H_3 . P_2 and P_3 are the nearest points on the contour lines H_2 and H_3 respectively from P_0 . Of the two line segments, $P_0 \rightarrow P_2$ and $P_0 \rightarrow P_3$, the one which does not intersect the contour line H_1 would be selected. From the diagram, $P_0 \rightarrow P_2$ intersects the contour line H_1 at P_1 , hence $P_0 \rightarrow P_3$ would be selected. The contour line H_3 therefore will become the partner of H_1 .

- ⑦ 等高線が Y 軸方向の格子線と 2 個目の交点をもつか
- ⑧ 等高線が X 軸方向の格子線と 3 個以上の交点をもつか
- ⑨ 等高線が Y 軸方向の格子線と 3 個以上の交点をもつか

以上のように、1 語 32 ビットのうち使われているのは 9 ビットだけなので、あと 20 数種類の他の 2 値情報を同時に管理することが可能である (40)。

4-2) プロトタイプ of データ点探索手順

本システムにおける等高線点列データ点の探索手順は、可能な限り迅速な探索を保証するため、プロトタイプの段階では、粗、中、精の 3 段階に分けて行うようにした(図-2.4.2 参照)。

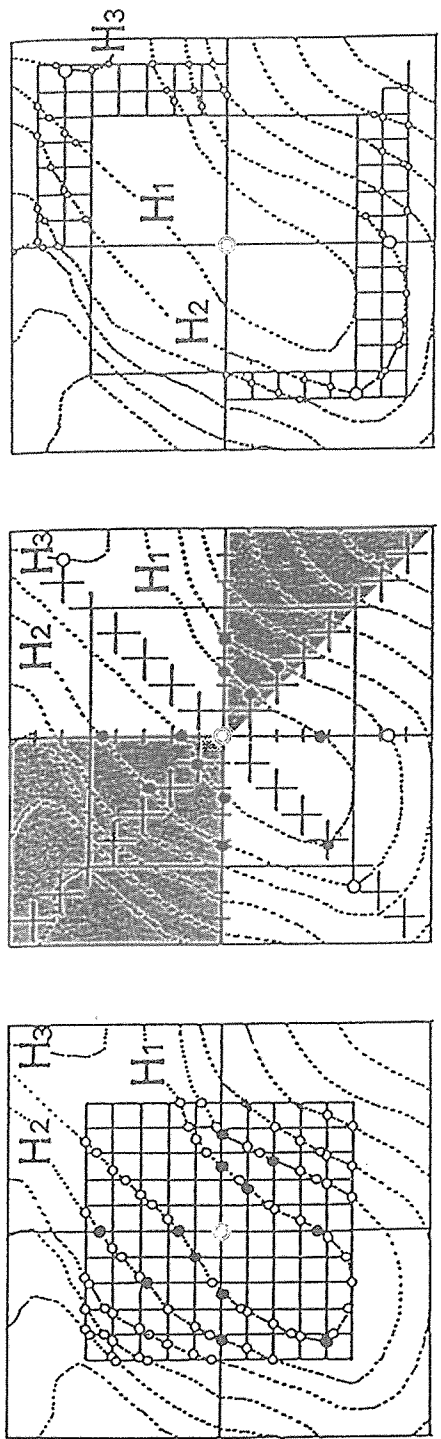
図-2.4.2(a)は粗探索の手順を表したもので、格子点 $P_0(I, J)$ を中心とする上下左右 4 方向で等高線データ点を探索する。値の隣りあった 2 種類の高さの等高線が抽出できれば、それが格子点 $P_0(I, J)$ を挟む 2 本の等高線である。地形条件が悪いと、粗探索の段階では、1 種類の等高線しか求まらない場合が多い。

図-2.4.2(b)は中探索の手順であり、まず $P_0(I, J)$ に最も距離の近い等高線点列データ点を抽出し、そのコード L に対応する高さ H_1 を調べる。次に、 H_1 の値に隣接する上下 2 本の等高線 H_2 と H_3 を探索し、両等高線上で格子点 $P_0(I, J)$ に最短距離となる点列データ点 Q_2 と Q_3 を、それぞれ抽出する。粗探索の段階で 2 本の等高線が確定している場合には、この段階で 3 本目の等高線を定める。また、等高線 H_1 が間曲線で、格子点 $P_0(I, J)$ への H_1 上の至近点が端点の場合、 H_2 と H_3 を格子点 $P_0(I, J)$ を挟む 2 本の等高線とし、この 2 つの標高値を用いて内挿法により格子点の標高を算出する。 H_2 か H_3 が間曲線で、しかも格子点 $P_0(I, J)$ へのその等高線上の至近点が端点である場合には、 H_1 から見て同じ側にある最寄りの外側等高線に変更する。

図-2.4.2(c)は精探索の手順で、2 本の等高線 H_2 と H_3 上の格子点に最も近い点列データ点 Q_2 と Q_3 のうち、格子点 $P_0(I, J)$ と結ぶ線分上に等高線 H_1 との交点を持たない方が、格子点 $P_0(I, J)$ を挟む求めるべき 2 本目の等高線上の点となる。地形条件が著しく悪いと、両線分とも H_1 との交点を持つ場合がありうる。これは、格子点 $P_0(I, J)$ に最寄りの等高線が格子点付近で複雑に折れ曲がっている場合などで、 H_2 なり H_3 なりへの格子点 $P_0(I, J)$ からの至近点を単純に求めては不都合であることを意味している。そこで、粗探索の結果を活用して、格子点 $P_0(I, J)$ に最寄りの等高線 H_1 上の点列データ点が存在する方向においては、 H_2 や H_3 のデータ点探索を制限するようにした。

4-3) データ点探索手順の改良

上記の点列データ点の中探索における大きな問題点は、粗探索で 1 種類の等高線しか探索されなかった場合、それが図-2.4.2(a)に示されているような、単にたまたま格子点付近の地形条件が悪いためのものか、それとも格子点が本当に最奥閉曲線の内部に存在しているためのものか、が一般には不明なことである。後者の場合には、点列データ点の探索範囲をいくら拡大しても、格子点を挟むもう 1 本の等高線は絶対に抽出できないのであるから、適当な段階で早めにデータ点の探索を打ち切らせる必要がある。この打ち切り条件をどのように設定するかが、全体としての DTM 作成時間の大小に大きく影響することになる。



(a) 第1次探索
First step (Sweeping-out of data within a small area)

(b) 第2次(粗)探索
Second step (Restriction of data detecting directions except for the skip directions in order to facilitate data detection)

(c) 第3次探索
Third step (Residual data detection)

図-2.4.3 改良型等高線データ探索法
Fig-2.4.3 Modified method for detecting digitized-contour-data

- 注) 二重丸：標高算出対象の格子点
 Note) Double circle : Objective grid point for the elevation calculation
- 白小丸：各段階の抽出点
 Small white circle : Contour data picked out in each step
- 黒丸・白大丸：8方向(対象格子点の上下左右と斜め)で出現する1, 2本目の等高線との交点
 Black circle & Large white circle : Contour data on the nearest contour and the second nearest one from the objective grid point which exist at the eight directions around the grid point of up-and-down, right-and-left and four diagonal directions
- 網掛け部：第2~3次探索が省略可能な方向
 Gray zone : The data detection in these areas can be omitted after the second step

そこで、プロトタイプを改良し、点列データ点の探索時間の短縮化を図った(図-2.4.3 参照)。その要点は、探索順序を改め、先ず、従来の中探索に相当する点列データ点の探索を、格子点 $P_0(I, J)$ を中心として上下左右方向で K 番目の格子点までの距離内 ($I-K \leq X \leq I+K, J-K \leq Y \leq J+K$) にある格子点位置の記憶場所を対象として実行する。格子点に近い側から上下左右に対称な格子枠内でのデータ点探索が終了するたびに、格子点の標高演算に必要な十分な種類の等高線データ点が抽出されたかどうかを判別する。条件を満たしていれば、そこでデータ点探索作業を終了する。普通、 $K=3$ 程度としておけばよい。等高線間隔が狭い部分(急傾斜地)では、大半の格子点がこの段階で点列データ点の探索を終了できる。任意の等高線上のデータ点は、格子点から最短距離のものが1個だけ抽出されればよいので、通常は等高線の標高コード番号のみを調べればよい。

次に、格子点 $P_0(I, J)$ を挟む H_1 の相手方となる等高線 H_3 上のデータ点の有無を確認するために、格子点を中心とした上下左右の X, Y 軸方向、およびそれと $\pm 45^\circ$ の斜め方向の、合わせて8方向に対する粗探索を、探索済み区域の外側にある格子点を対象として行なう。この粗探索で H_3 上のデータ点が抽出されたなら、その中で格子点 $P_0(I, J)$ から最も近いデータ点が現れた格子線までを探索区域上限値として、データ点の探索を行なう。また、もしも粗探索で1種類の等高線(すなわち、 H_1 のみ)上のデータ点しか抽出されなかったなら、各方向ごとにそれらの座標値と格子点からの距離を記録しておき、以下のように点列データ点探索の打ち切り条件を定める。

先ず、第一段階のデータ点探索結果に基づいて、格子点から最寄りの等高線 H_1 に至る最短距離 L_1 と、その垂線の足 P_1 から次の(格子点 $P_0(I, J)$ に2番目に近い)等高線 H_2 までの最短距離 L_2 、および、その比 $R(=L_1/L_2)$ を求めておく。 $R < 1$ であれば、格子点標高の演算に外挿法を適用することにして、それ以上のデータ点探索は行わない。 $R \geq 1$ であれば、粗探索で記録しておいたデータ点のうち、格子点から最も離れた点が見れる格子線までをデータ点探索区域の上限値とする。また、粗探索の各方向について、2本目の等高線が探索されたなら、その方向でのそれ以降のデータ点探索をスキップさせる。

斜め方向の粗探索は、 X, Y 軸方向のそれと比較して1格子点あたりで参照すべき格子線の数が4倍となり、それに伴って点列データ点を探索するアルゴリズムがやや複雑になる。しかし、演算対象の格子点が最奥閉曲線の内側にあるものか、そうではなく一般的な条件下にあるものかについて迅速に知る目的に対しては、上下左右の4方向のみを粗探索する場合に比べて格段に合理的な結果をもたらす点で、アルゴリズムの正確度と安定性が高い。

5) 格子点標高の算出方法

図-2.4.4に基づいて、格子点標高の各算出方法について説明する。図-2.4.4(b~c)は傾斜変換線を模式的に表したもので、等高線 H_1 が傾斜変換線であり、破線は等高線 H_3 と H_2 からの等距離線を示す。両図の斜線部に標高を求めるべき格子点 P がある場合、 P は等高線 H_1, H_3 に挟まれるが、 P からの距離は H_3 よりも H_2 の方が近い。

「標高比例配分内挿方式」とは、格子点 P の周辺に分布する等高線のデータ点をもとに、格子点を挟む2本の等高線 H_1, H_3 を決定し、両等高線に至る距離 L_1, L_3 で両等高線の高さ H_1, H_3 を比例配分して、格子点の標高 H を次式で内挿するものである。

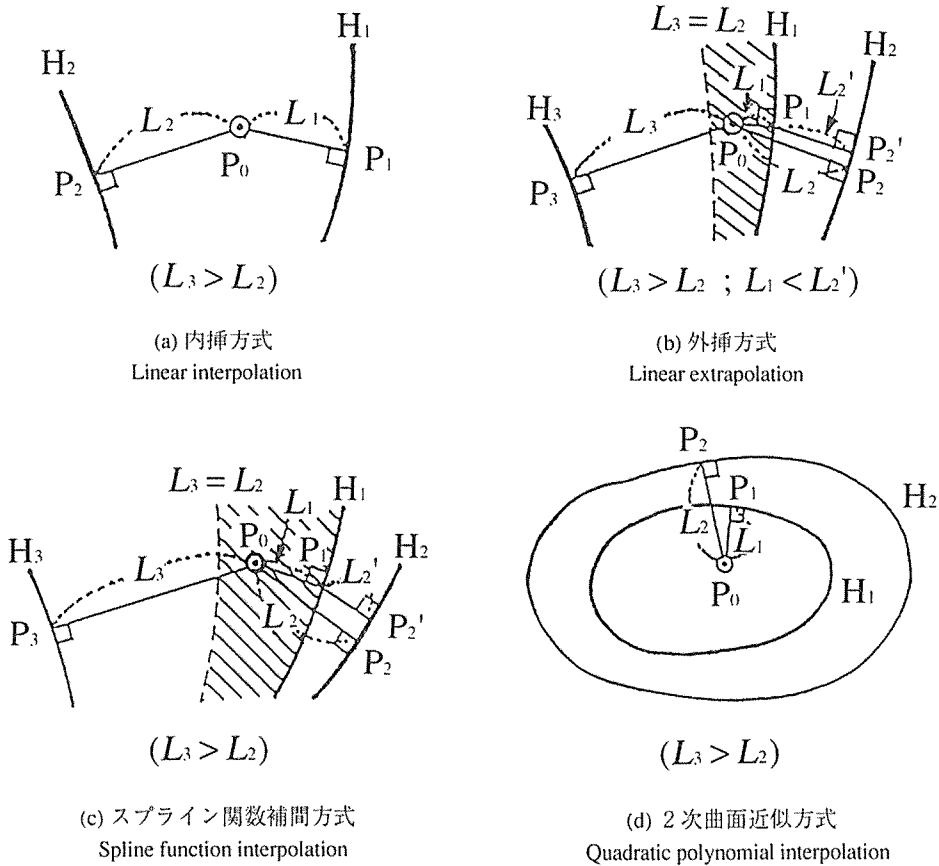


図-2.4.4 格子点標高算出方法の種別

Fig-2.4.4 Four methods of calculating the elevation on a grid point

$$H = (H_1 \cdot L_3 + H_3 \cdot L_1) / (L_1 + L_3)$$

「外挿方式」とは、格子点Pが2本の等高線H₁とH₂に挟まれておらず、しかも最寄りの等高線H₁からの距離L₁が(L₁ < L₂')である場合に、距離L₁とL₂'を用いて標高H₁とH₂を比例配分し、格子点の標高Hを次式で求めるものである。

$$H = \{H_1 \cdot (L_1 + L_2') - H_2 \cdot L_1\} / L_2'$$

「スプライン補間方式」とは、格子点Pが斜線部にあり、かつ外挿方式の対象外となる場合に、Pから等高線H₁, H₂, H₃上に下ろした3つの垂線の足P₁, P₂', P₃(ただし、P₂'はP₁からの至近点)とPで定まる最大傾斜線方向でスプライン関数による曲線のあてはめを行なうもの(44)である。図-2.4.4の斜線部を「スプライン補間の候補区域」とよぶ。この区域内にある格子点のうちで、隣接格子点との間の格子線上に等高線H₁との交点をもつ格子点Pについては、Pとその交点との距離が格子間隔の1/2以内である場合に限り、外挿方式を適用する。スプライン関数を適用する前提として、前節で述べたように次の2条件を仮定している。

①演算に用いるデータ点は H_1, H_2, H_3 からの各 1 個ずつ (P_1, P_2', P_3) とする。

②図-2.4.4 の斜線部にある格子点 P を通る最大傾斜線上で、 $L_3=L_2$ の点での微係数が P_3-P_1 を結ぶ勾配と、また P_1 点での微係数が P_1-P_2' を結ぶ勾配と一致し、かつ、この区間で単調増加（もしくは単調減少）となるように 3 次多項式で補間する。

「2 次曲面近似方式」とは、格子点近傍の 6 個以上の等高線データによって曲面（高さ Z ）を次の 2 次多項式

$$Z = a_1 \cdot x^2 + a_2 \cdot xy + a_3 \cdot y^2 + a_4 \cdot x + a_5 \cdot y + a_6 \quad \dots\dots(2.4.1)$$

で近似し、格子点の高さとなる係数 a_6 を求めるもので、独立標高点付近のように、閉曲線となる最奥等高線の内部にあって、原理的に内挿計算ができない格子点に対して適用する。この方式の場合、通常、格子点から半径 R の円内で抽出した各データ点には、格子点からの距離 r_i に応じた重み p_i をつける (75)。

$$p_i = 1 - (r_i/R)^n ; n = 2 \sim 3 \quad \dots\dots(2.4.2)$$

図-2.4.5 に、上記の格子点標高算出方法の各事例を図示しておいた。ここで「外挿方式-1」とは、図-2.4.4 の斜線部分に格子点がある場合であり、「外挿方式-2」とは、独立標高点付近のように閉曲線をなす最奥等高線の内部に格子点がある（すなわち、図-2.4.4 において等高線 H_3 が存在しない）場合である。データ点の探索に際して、プログラム上では基本的に、格子点を挟む 2 本の等高線が発見されるまでデータ探索域を自動的に拡大するようにしているため、一般に後者の方がデータ点の探索時間は長くなる。

(3) 適用例

本章第 2 節(3)で用いたものと同じ、名古屋大学稲武演習林月ヶ平地区（面積約 74 ha）の等高線地形図を対象として、本 DTM 作成システムを適用した結果を図-2.4.6 に示す。作成された DTM の格子点数は、境界線の外側周辺部を含む 8,198 点である。ここには原図の等高線と DTM に基づいて描かれた等高線（再現線）の両者を、重ね合わせて描いてある。両等高線の不一致部分がきわめて少ないことが、同図から読み取れる。本方式による DTM の作成精度についての検討は、次章で行う。

(4) 考察

1) 格子点標高の演算方式別区分

図-2.4.6 に示した対象地内にある全格子点について、標高演算に用いられた方式別に区分した結果は、次の通りである。

- (1) 内挿方式 : 6,106 点(75%)
- (2) 外挿方式-1 : 1,716 点(21%)
- (3) 外挿方式-2 : 80 点(1%)
- (4) スプライン方式 : 105 点(1%)
- (5) 2 次曲面近似方式 : 0 点(0%)
- (6) 格子点が等高線上 : 191 点(2%)

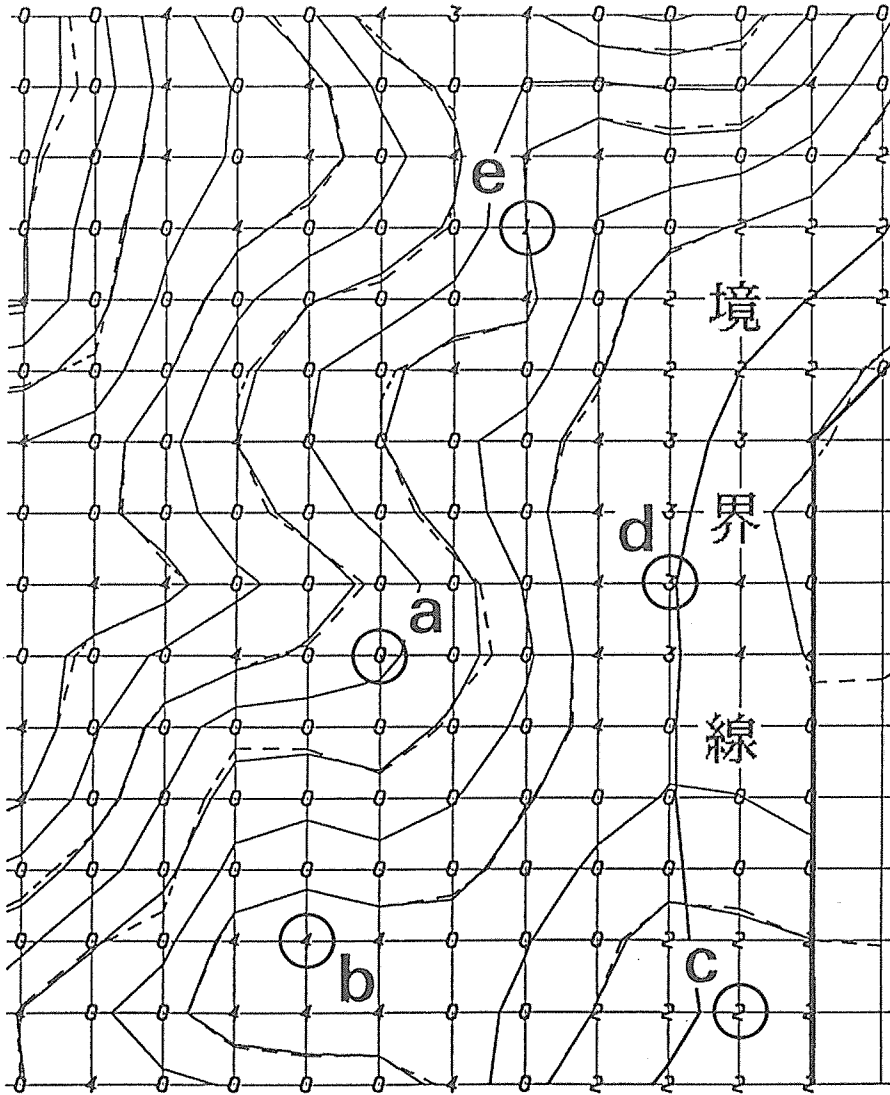


図-2.4.5 格子点標高算出方法の事例

Fig-2.4.5 Illustrations of four methods of calculating the elevation on a grid point

- 注 Note) a : 内挿方式 Linear interpolation
 b : 外挿方式-1 (格子点が2本の等高線で挟まれる場合)
 Linear extrapolation-1 (The case of the objective grid point being within two contours)
 c : 外挿方式-2 (格子点が最奥閉曲線内にある場合)
 Linear extrapolation-2 (The case of the objective grid point being in the most inner closed contour)
 d : スプライン関数補間方式 Spline function interpolation
 e : 格子点が等高線上 Grid point on a contour
 破線 Broken line : 原図等高線 Original contour line
 実線 Solid line : DTMに基づく再現等高線 Regenerated contour line through the DTM

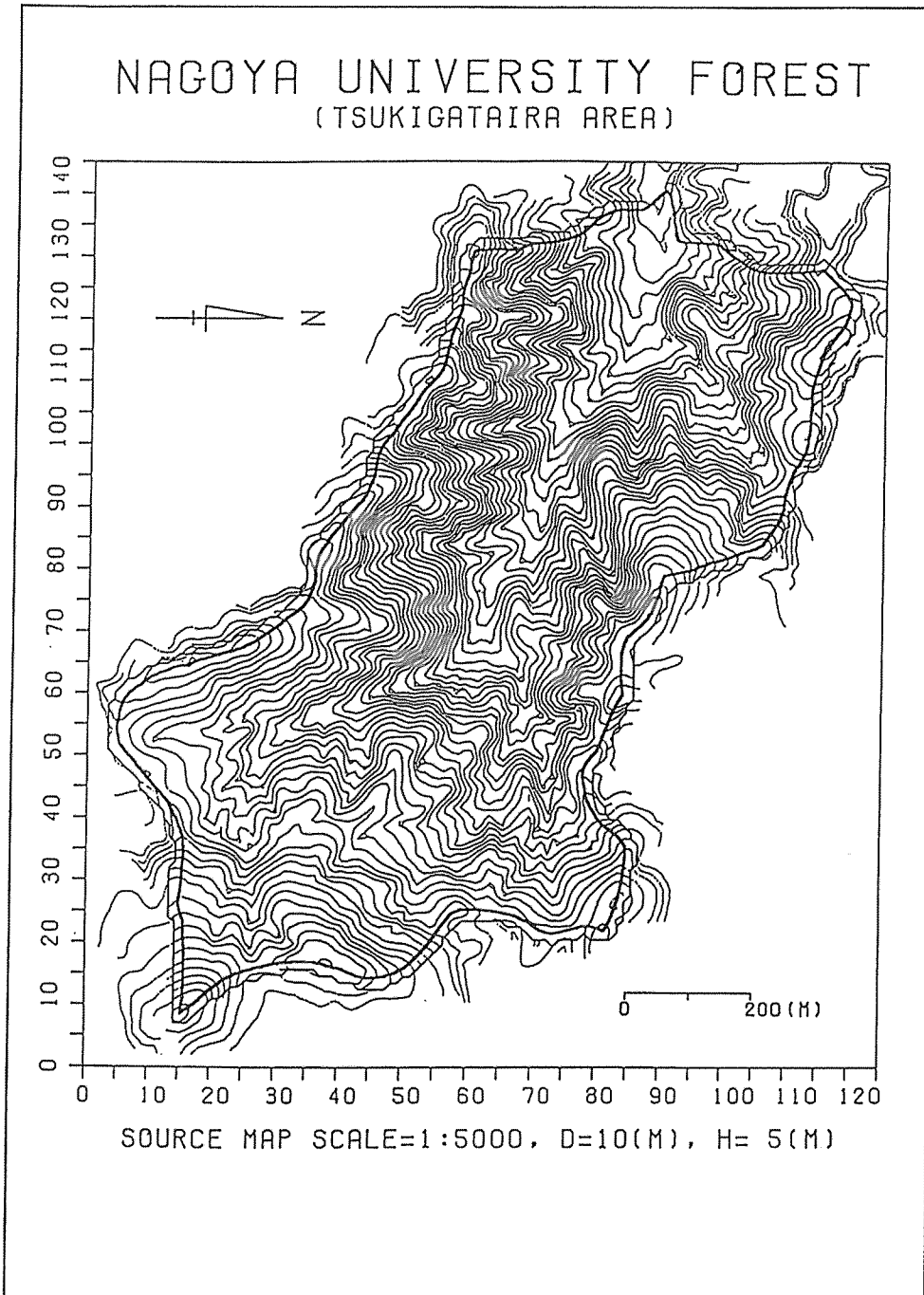


図-2.4.6 ハイブリッド方式によるDTM作成の適用例

Fig-2.4.6 A contour map regenerated through the DTM which was generated by the highly accurate DTM generation system using the hybrid method

注) 破線の原因等高線と実線の再現等高線とを重ね描きしてある。

Note) The regenerated contour lines through the DTM (Solid lines) were overlaid with the original ones (Broken lines).

今回の対象地は全体として急傾斜地であったため、曲面近似方式の適用例がなかった。この新方式は、次章で明らかにされるように、内挿方式等と比較して格段と“高精度”のDTMを作成するが、それは2割を占める「外挿方式-1」による改良効果であると判断される。

2) 他の数値地形モデル作成方式との演算時間の比較

図-2.4.6の対象地内にある全格子点, 8,198点を対象としたDTMの作成時間に関し、従来から使用されている他の主要なDTM作成方式と比較した結果は、次の通りである。

- ① 高精度方式 : 28 秒
- ② 内挿方式 : 24 秒
- ③ 3点平面近似方式 : 7 秒
- ④ 2次曲面近似方式 : 10 秒
- ⑤ 3次曲面近似方式 : 18 秒

いずれの場合も、データ点入力と高密度記憶方式によるデータ格納に0.5秒、演算結果の出力に0.2秒を要し、その他が標高計算にかかった時間となる。①による演算時間は平面近似方式や2次曲面近似方式の3~4倍に近いが、これはデータ点の探索個数が多いためと、格子点を挟む等高線の判別に時間がかかるためである。しかし、約8,000点の高精度DTMを計算するのにただか30秒程度で済むのであるから、この高精度DTM作成システムは、実用的にも十分満足しうるものである(演算は富士通のFACOM M-382を使用)。

なお、格子点から等高線までの距離を求める際に、本システムでは格子点に近い順に抽出した3個のデータ点で2次曲線を描く方法をとっている。これを、4個のデータ点抽出により3次スプライン曲線を描いて最短距離を求めてみた結果、作成されたDTMの地形再現精度は本システムによる場合とほとんど変化がないにもかかわらず、上記対象地のDTM作成時間は76秒となり、本システムによる28秒の2.7倍もかかった。この結果を踏まえるならば、離散型の等高線データを抽出した後の、等高線を復元するためにあてはめる曲線としては、3個のデータ点抽出による放物線近似で十分であるといえる。

3) 記憶領域の大きさ

先に、本システムでは点列データ点の格納用記憶領域の大きさについて、DTM作成対象格子点の大きさに対応した($M \times N$)の2次元配列を、X、Y両軸方向でそれぞれ2個ずつ確保すると記したが、その各記憶領域の使用頻度について、名古屋大学農学部附属稲武演習林の月ヶ平地区の地形図資料に基づいて調べた結果が、表-2.4.1である。同表において「MX、MY」は、それぞれX、Y軸方向の任意の格子線上に等高線との交点が最初に出現した時の点列データ点格納場所である。また、「MX2、MY2」は、同じく同一格子線上に2番目に出現した等高線との交点の格納場所であり、「ISPECX、ISPECY」は3番目以降に出現した交点の格納場所で、高密度方式ではなく普通の順編成ファイル型による点列データの順次格納・順次探索処理を行なうものである。実際のプログラムでは、「ISPECX」と「ISPECY」は区別せず、ひとつの記憶領域として確保している。図-2.4.7は、表-2.4.1の内容を見やすくするために図示したものである。

表-2.4.1の結果から、格子間隔が10mと小さい場合には、ひとつの格子線上に2個目の等高線点列データ点が登場する頻度はきわめてわずかであるが、格子間隔が広がるにつれて、

表-2.4.1 点列データ格納用記憶領域の使用頻度

Table-2.4.1 Frequency in use of the memory areas for storing the detected contour data

対象区域の大きさ Size of the objective area	125×145	63×73	32×37	16×19
格子間隔 Grid interval	10 m	20 m	40 m	80 m
入力データ点数 Number of input points	9,818	4,950	2,494	1,223
MX	48.02 %	36.86 %	25.89 %	19.95 %
MY	47.30	37.57	26.14	19.50
MX2	3.83	12.11	16.69	16.76
MY2	3.12	11.06	16.69	17.90
ISPECX	0.06	2.19	7.96	14.03
ISPECY	0.07	1.54	7.57	13.00
On Grid Point	2.42	1.34	0.94	1.14
合計 Total	100. %	100. %	100. %	100. %

注) MX等の記憶領域の内容については図-2.4.7の説明を参照のこと。

Note) See the explanations in Fig-2.4.7 for the meaning of memory area names, MX etc.

X, Y 両方向の合計で全入力データ点の 20%以上もが 1 格子線上への 2 個目の等高線データ点として出現していることがわかる。また、順編成方式の第 3 点目以上の点列データ点が登場する頻度も、格子間隔が 40 m 以上になると合計で 15%を超え、80 m の格子間隔では全入力データ点の 1/4 をも上回る。

以上の結果からみて、一般に DTM を作成しようとする際の格子間隔は任意の大きさのものが対象とならざるをえないから、等高線点列データの記憶場所として、本システムで採用したように DTM 作成対象格子点の大きさの 4 倍の記憶領域を確保したことは、等高線点列データの迅速な探索をどのような点列データ点に対しても保証するうえで有効であったと考えられる。

なお、本システムは 1 語が 32 ビットで構成されている大型計算機を対象として組み立てられている。今日、市販されている主要なマイクロ・コンピュータ(パーソナル・コンピュータ)は 1 語が 16 ビットで構成されていることと主記憶容量が小さいため、上述した必要記憶容量や高密度データ格納のアルゴリズム上の問題で、現段階では、マイクロ・コンピュータへのプログラム移植は困難である(43)。その移植は、将来、1 語が 32 ビットで構成されるパーソナル・コンピュータが一般に普及し、主記憶容量についても飛躍的に増大しうる状況になった時点で、はじめて可能になるであろう。

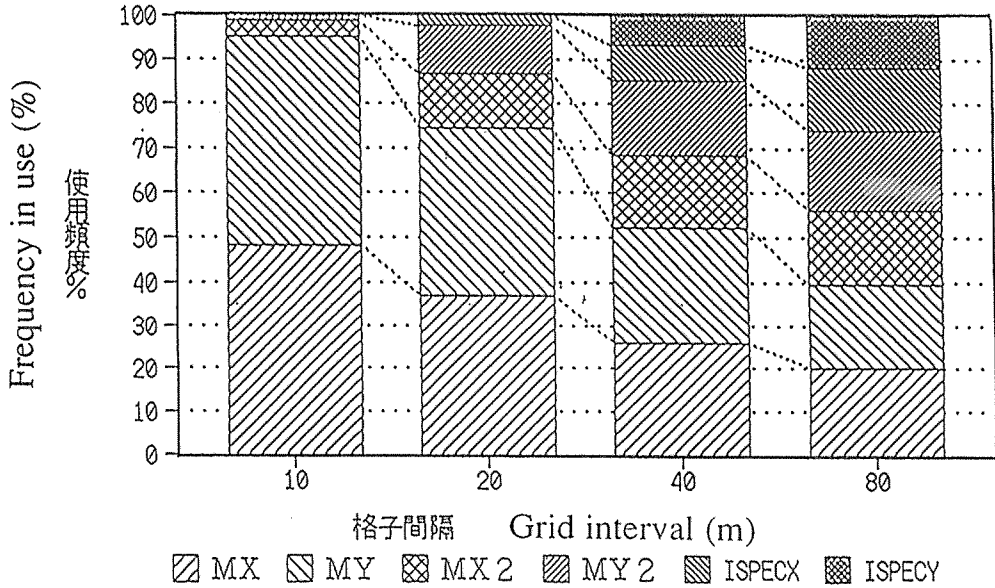


図-2.4.7 点列データ格納用記憶領域の使用頻度

Fig-2.4.7 Frequency in use of the memory areas on the computer for storing the detected contour data

注 Note)

MX, MY : X 軸, Y 軸方向の格子線と等高線との交点の座標値を格納するための、それぞれ 2 次元の配列

Two dimensional memory areas corresponding to the size of grid points on the objective area in which each element is available for storing the information of one first contour datum detected on a grid line between two neighboring grid points in the X- or Y-direction, respectively

MX2, MY2 : X 軸, Y 軸方向の格子線と等高線との 2 個目の交点の座標値を格納するための、それぞれ 2 次元の配列

Two dimensional memory areas available for the second contour datum detected on a grid line of X- or Y-direction, respectively

ISPECX, ISPECY : X 軸, Y 軸方向の格子線と等高線との 3 個目以上の交点の座標値を格納するための配列

Special memory areas available for sequentially storing the third or more contour data detected on a grid line in the X- or Y-direction, respectively

4) 本作成システムの特長と問題点

ハイブリッド方式による DTM 作成システムの特長をまとめると、次の通りである。

- ① DTM に基づいて再現される等高線は、原図等高線にかなり近い。すなわち、DTM による地形再現精度が高い。再現線は必ず原図線が通過する格子線と同一の格子線上を通過する。最奥閉曲線内部の格子点標高の精度も比較的高い。
- ② データ点の探索を迅速に行える。従って、DTM 作成に要する演算時間が短くて済む。
- ③ 等高線点列データの採取方法（等高線の順番、採取方向、その他）に関する制約が

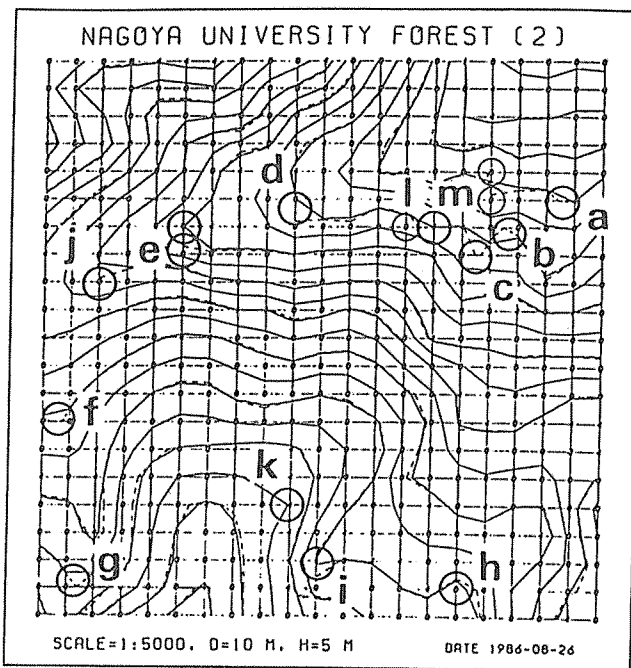


図-2.4.8 2本の等高線が著しく不一致となる事例

Fig-2.4.8 Some cases which the contour line regenerated through the "highly accurate DTM" did not confirm the original one

注 Note) 破線 Broken line : 原図等高線 Original contour line

実線 Solid line : DTMからの再現等高線 Regenerated contour line through the DTM

a ~ g : 等高線描画用ライブラリー・プログラムのもつ制約による事例.

Due to the weak point in the library program for contour drawing, the regenerated contour line through the DTM could not confirm to the original one when the latter turned on a grid line.

h ~ j : 至近のデータ点に基づく一方での最適な標高演算結果が、必ずしも他方の格子線での最適解にならない事例.

These cases show that the optimum elevation calculated by using the nearer contour data on one side of the objective grid point could not necessarily be the optimum one on the other side.

k : 原図の等高線から著しく離れた箇所での外挿方式適用の危険性を示す事例.

This is an irregular case which occurred when the regenerated contour was drawn around the place with no original, and implies that the linear extrapolation method must be carefully applied to the calculation of the elevation of a grid point.

l : 等高線が格子点上を通過する場合には、等高線描画用ライブラリー・プログラムのもつ制約により、その格子点を端点とする格子線の途中から折れ曲がる等高線の線分に追従できない.

Due to the weak point in the library program for contour drawing, the contour datum on a grid line could not be drawn in the case when the original contour line of the same elevation passed directly over a grid point.

m : 極めて複雑な地形の場合

Due to the complex nature of the terrain near the objective grid point, the regenerated contour line could not confirm to the original.

少ない。間曲線も取り扱える。

④ DTM 作成時点で、任意の格子間隔のものに変更できる。

次に、ハイブリッド方式の抱える問題点についても見ておこう。図-2.4.8は、本システムで作成したDTMに基づいて描いた等高線（再現線）が原図の等高線と大きくかけ離れる事例を示したものである。図中の(a)~(g)は、今回使用した等高線描画用のプログラム（名古屋大学大型計算機センターのライブラリー・プログラム‘CTLKTL’）の持つ欠点と関連しているもので、等高線が格子線で折り返すような場合には、再現線は原図線に追従することができないため、両等高線の見かけ上の不一致が大きく表現されている。

(h)~(i)は、至近のデータ点に基づく一方向での最適な標高演算結果が、必ずしも他方の格子線での最適解にならないことを示している。(k)は原図の等高線データ点がない間曲線を描画する際に現れたもので、格子点の位置に対する考慮なしに、やみくもに外挿方式を適用することの危険性を暗示している。格子点が最寄りの等高線から一定距離以上離れた場合（図-2.4.4で $L_1 \geq L_2'$ となる場合や、 $L_1 < L_2'$ であっても $L_1 = L_2'$ 付近の場合）に外挿方式を適用すると、最寄りの等高線の再現精度は高くなるものの、局所的に等高線の滑らかさが失われる結果を生ずることがある。

(l)は等高線が格子点上を通過する場合で、‘CTLKTL’プログラムが格子点間の高さを両格子点の標高に基づいて線形近似で内挿するアルゴリズムを用いているため、原理的に再現線は原図線に追従することができない。(m)は、隣接する2つの格子点のそれぞれすぐ近傍で等高線が折れ曲がり、とりわけ片方では(a)~(g)と同様、等高線が折り返しているという、きわめて複雑な地形の場合である。

以上、総じて沢筋、尾根筋等の傾斜変換線付近に、両等高線の相対的に大きな不一致箇所が現れていることがわかる。しかし、DTM作成の対象とした格子点全体の中で、これらの点の占める割合はごく少数であり、また、従来の各種DTM作成方式により作成されたDTMが持つ誤差と比較した場合には、ほとんど問題にならない程度の誤差である。

(k)の難点を解消するためには、今後、等高線の入力データが存在しない場所でのDTMに基づく再現等高線が滑らかになることを評価基準に加えた、より柔軟な処理法が必要である。等高線描画プログラムに由来する難点は別の問題として、今後、(h)~(k)の事例についてさらに一層の改良を加えるためには、作成されたDTMに基づく等高線の再現線と原図線とをグラフィック画面上で重ね合わせて表示し、コンピュータとの会話型方式でDTMの微調整を行うようなシステムを開発する必要があるだろう。

5. まとめ

林業工学分野では微地形の傾斜把握が重要な意味をもつことが多いため、DTM作成方式については、できる限り高精度で原図の持つ地形特性を再現しうるものであることが望ましい。高精度のDTMを簡便に作成するには、データ採取が比較的容易な等高線の点列データがもつ地形情報のうち、最大傾斜線の情報を活用するのが有効と考えられる。

そのためにまず、等高線点列データを2次元配列の記憶場所に2種類の高密度記憶方式を用いて効率的に格納する方法を検討した。その結果、任意の格子点の周辺で局所的に、複数

本の等高線の点列を正確に、かつ迅速に探索・抽出できるようになった。この高密度データ格納方式は、従来の点列データ探索方法と比較して、格子間隔を小さくするほど、あるいは等高線点列データの採取密度を高くするほど、点列データ探索の1点あたり平均探索時間が減少し、データ探索効率が著しく増すことが確かめられた。

次に、この点列データの高密度格納・探索方式を用いて、高精度DTM作成方式の開発に関する諸問題について検討した。格子点標高を求める従来からの方法のうちで、内挿方式は作成されるDTMの精度が比較的高く、また精度的に安定しているが、やせ尾根の張り出し部や傾斜変換線付近などにおいて等高線の再現精度が劣る難点を持つ。これを改良する目的で、部分的に3次スプラインによる補間の導入を検討した。しかし、採取すべき点列データ数を格子点周辺で3等高線から各1個づつとする条件のもとでは、全体として予期した程度の精度向上は得られなかった。そこで、新たに外挿方式を取り入れたところ、やせ尾根の張り出し部など、傾斜変換線付近の地形を、原図にかなり近い形で再現できるようになった。この結果から、DTMの作成精度を高めるためには、内挿方式、外挿方式、スプライン関数補間方式の3つを有機的に組み合わせる必要があることが明らかになった。

以上の検討結果に基づき、内挿方式、外挿方式、スプライン関数補間方式、および独立標高点付近の最奥閉曲線内部に存在する格子点に適用するための、2次曲面近似方式の4つを組み合わせ、ハイブリッド方式による高精度DTM作成システムを開発した。このシステムを名古屋大学稲武演習林内の1流域に適用した結果、内挿方式のみによる場合よりも原図に近い等高線図を再現しうるDTMが作成できた。格子点標高の演算方式別区分結果は、内挿方式が75%、外挿方式22%、スプライン方式1%、格子点上2%という割合で、外挿方式の導入による精度向上が大きいことがわかった。

ただし、隣接する格子点で異なる標高演算方式が用いられる場合に、その両格子点間で再現等高線が滑らかさを失う事例が見られるので、今後、等高線の入力データが存在しない場所でのDTMに基づく再現等高線が滑らかになることを評価基準に加えた、より柔軟な処理法が求められる。

DTM作成方式の良否を判別するうえでの評価因子として重要な高精度化と迅速化の両者が、データ格納構造の高密度化を図ることによって同時に実現できたことは、興味深い。

III 格子状数値地形モデルの作成精度の分析

格子状数値地形モデル (DTM) の精度の検討は、従来、主として DTM の利用目的に対する地形特性把握の程度を調べるという問題意識に立ち、データ採取密度や格子間隔の大きさと、標高など地形因子に関する DTM からの推定値との関係を調べる、という方法をとるものが多かった (13, 37, 58, 106)。作成方式の異なる DTM 間の精度的な優劣を直接、相互に比較した検討例は、文献 (45) 以外には見受けられない。

コンピュータの性能が従来と比較して飛躍的に高度化した今日においても、地形解析の精度を高める目的で等高線点列データの採取密度を少し高めたり、あるいは格子間隔を少し小さくしたりしようとするときに、コンピュータの記憶容量の制約によって、それが不可能となる場合がある。コンピュータを用いて系統的に地形解析を行おうとする場合、地形解析の対象とする地域の大きさや地形データ点の採取密度は、コンピュータの性能 (主として記憶容量) との関係で、大きな制約を受けているのが現状である。DTM の格子間隔を一定とした場合、ユーザーがその用いる DTM に対して、原図の持つ地形特性を可能な限り正確に再現しうるものであることを望むのは当然であろう。

他方で、土木工学分野では曲面近似方式による DTM 作成が今日の主流となっている事情があり、林業工学分野における山地の傾斜因子の正確な把握という必要性に照らして、多数の DTM 作成方式のうちから、どれを選択したら良いのかが、初心者にはわかりにくい状況となっている。

以上のように、DTM を作成する方式自体についての精度的な検討、および各種作成方式間の比較を行なう必要性が、現実の問題として生じている。そこで本章では、DTM の作成精度の評価方法を提案し、それを用いて従来からの各種 DTM 作成方式の相互間と、および前章で提起したハイブリッド方式の作成精度について、比較検討した結果について述べる。

1. 格子状数値地形モデルの作成精度の評価方法

(1) 作成精度の評価指標

等高線の点列データに基づいて作成された DTM を用いて、等高線描画プログラムにより新たな等高線を描くとき、描画プログラムの機能が一定の水準にあるとすれば、その再現された等高線 (再現線) が原図の等高線 (原図線) に近いほど、その DTM の精度は高いものとみなすことができる。DTM による再現線を原図線と同一の図面上に重ね合わせ、再現線が原図線からズレた部分の面積 a_i と、それに接する原図線の曲線長 l_i を計測して、

$$w_i = a_i / l_i$$

を求めると、 w_i は再現線が原図線からズレた区域 (誤差区域) に関し、 l_i を一辺とする矩形として表した場合の横幅、すなわち誤差区域の平均ズレ幅 (誤差平均幅) に相当する (図-3.1.1 参照)。同様にして、ある対象地域内で、原図曲線の総延長距離 L と両線がズレた部分の面積総計 $\sum a_i$ とを計測し、

$$w = \sum a_i / L \quad \dots\dots(3.1.1)$$

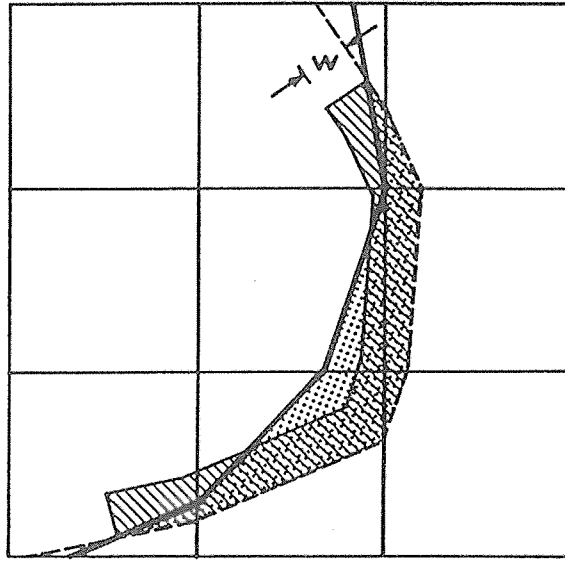


図-3.1.1 誤差区域

Fig-3.1.1 Discrepant area lain between an original contour line and the one regenerated through the DTM

注 Note) 破線 Broken line : 原図等高線 Original contour line
 実線 Solid line : 再現等高線 Regenerated contour line through the DTM
 ドット部 Dotted area : 誤差区域 Discrepant area lain between the two contour lines
 w : 誤差平均幅 Mean width of the discrepant area

を求めれば、 w は当該対象地域内において再現線が原図線からズレた誤差区域面積の総計に関する、平均幅を表すものとなる。この誤差平均幅 w の値が小さいほど再現線は原図線に近いことを意味するから、 w は等高線データに基づいて作成される DTM の作成精度を評価する指標となりうる。

w を用いれば、同一の作成方法によって作成された、等高線の総延長距離が異なる図面間の比較も可能である。DTM 作成方式間の作成精度の比較を目的とする以上、等高線総延長距離の異なる図面間で作成方式も異なるもの同士を比較することは普通ありえないから、わざわざ (w/L) を求める必要はない。

(2) 誤差区域面積の簡易算出法

原図線と再現線で挟まれる誤差区域の数が大量の場合、等高線長と誤差面積の計測をディジタイザ等により手作業で行なうのは、データの収集・整理の面で大変な労力を要する。そこで、計算機を用いてこれらの値を簡易に算出するプログラムを作成した。そのアルゴリズムの概要は、以下の通りである。

ステップ 1 : X, Y 方向のどちらか一方の各格子点間(測地座標系による距離 : D)を N 等分し、 N 本の走査線を配置する (図-3.1.2 参照)。

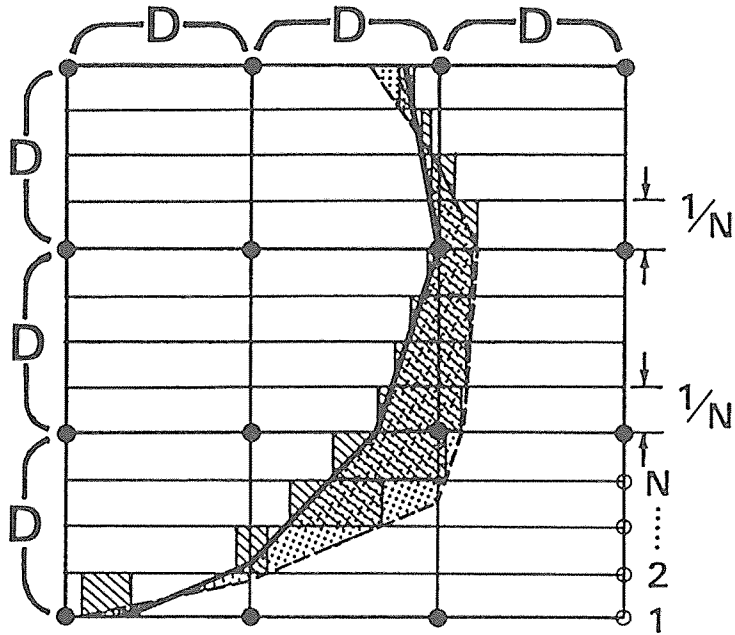


図-3.1.2 走査線

Fig-3.1.2 Scanning lines for systematically measuring the discrepant area lain between the two contour lines

- 注 Note) 破線 Broken line : 原図等高線 Original contour line
 実線 Solid line : 再現等高線 Regenerated contour line through the DTM
 ドット部 : 誤差区域
 Dotted area : Discrepant area lain between the two contour lines
 斜線部 : 走査線に基づく区分面積
 Shaded area : Divided areas based upon scanning lines for the quadrature by parts

- ステップ 2 : 各格子線と走査線との交点に対応する 2 次元配列の記憶場所 (交点制御行列) に、走査線と原図線の交点の有無をビット・プレーン方式で記録する。
 ステップ 3 : 原図線の点列データを読み込む際に、対象地域内の原図線の累加距離 Σl (格子座標系) を演算し、蓄積する。
 ステップ 4 : 走査線と原図線、再現線との交点位置 P_o, P_r を 1 語内詰め込み方式で、走査線の格子点位置に対応する 2 次元配列の記憶場所に格納する。
 ステップ 5 : 走査線と原図線、再現線との全交点が確定したら、走査線方向での両等高線のズレ幅の延長 G を次式で算出する。

$$G = \Sigma (|P_{o,jk} - P_{r,jk}|) \quad \dots\dots(3.1.2)$$

ただし、 j : 走査線の番号

k : j 番目の走査線上にある k 番目の誤差区域。

- ステップ 6 : 誤差面積 S を次式で算出する。

$$S = D^2 \cdot G / N \quad \dots\dots(3.1.3)$$

交点記憶場所には、第II章第2節で取り上げた点列データ格納構造により、計算機の記憶の基礎単位である1語(=Kビット)のなかに、標高コードと格子座標系による走査線と原図線、再現線との交点位置を格納する。格子座標系による位置は8ビットで格納するから、その精度は、 $2^{-8}=3.9 \times 10^{-3}$ となる。これは、格子間隔10mの場合の位置の誤差が4cm以内ということで、走査線方向の位置の分解能が非常に高いことがわかる。走査線上の1単位内(2格子点間)に原図線との交点が2個以上存在する場合、交点制御行列内の1ビットをその制御用に用いて、出現順に他の特別な記憶場所へ格納する。

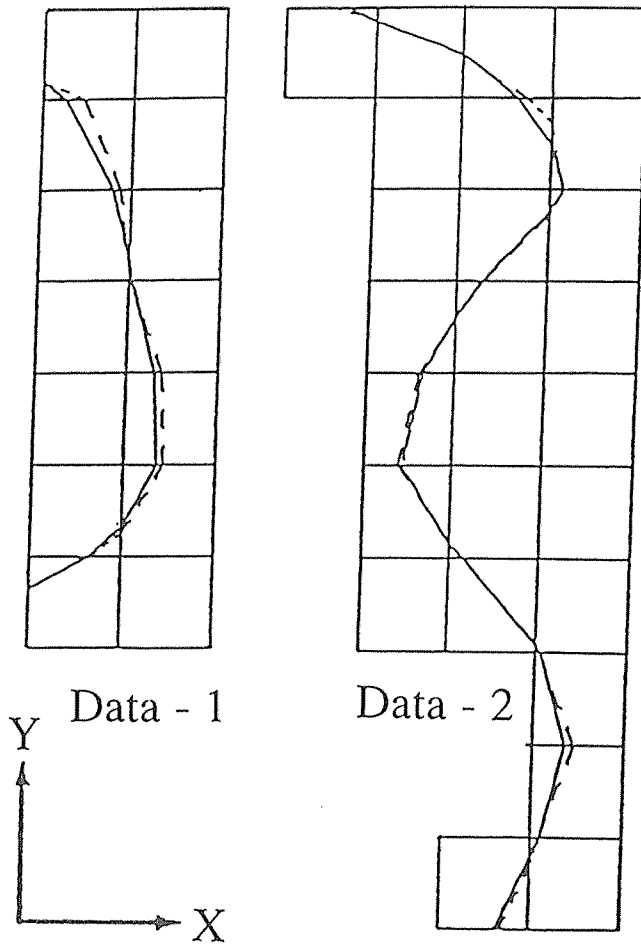


図-3.1.3 モデル等高線

Fig-3.1.3 Model contour lines for measuring the discrepant area lain between the two contour lines

注 Note) 破線 Broken line : 原図等高線 Original contour line
 実線 Solid line : 再現等高線 Regenerated contour line through the DTM
 X, Y : 走査線の方向 Scanning directions, respectively

(3) 走査線本数と簡易面積算出法の精度

簡易法による面積算出の原理は積分法に基づくものであるから、当然、走査線の本数が多くなるほど誤差は小さくなる。著しい偏りのない図形が対象であれば、普通、誤差率は $100 \cdot (D/N)$ (%) 以内になると期待される。

簡易法による面積算出の実際の精度を確かめるため、モデル等高線を設定(図-3.1.3参照)して、走査線の本数と面積算出値の誤差の関係を調べた。その方法は、原図線と再現線で挟まれる多角形の面積について、頂点の各座標値を用いて幾何学的に求めた値を真値とし、簡易法で格子間隔の分割数 N を変化させて算出した各値と比較するものである。

表-3.1.1に、モデル等高線を用いて簡易法による面積算出値の誤差を検討した結果を示した。表中の「基準誤差率」とは、ちょうど格子間隔に等しい高さをもつ任意の図形(基準図形)の面積を簡易法で算出する場合に、幾何学的にみて発生しうる最大の誤差率を意味する。各面積値は(3.1.3)式で $D=1$ として換算したものである。走査線方向の違いが面積算出値に及ぼす影響をみるため、同一等高線について X 軸と Y 軸の2方向に平行な走査線をそれぞれ別個に設定し、各々について計測した。

表-3.1.1では、「データ1-Y」の走査線本数 $N=4$ における誤差率が唯一、基準誤差率を超えている。これは、図-3.1.3のモデル等高線が Y 軸に平行な走査線方向に細長くのびた形をしており、走査線間隔が粗いために両等高線と走査線との交点が過少となり、(3.1.2)式に乗せるべき両等高線間距離 G が実際の図形からかけはなれたことによる。その他の場合

表-3.1.1 簡易法による面積算出値の誤差
Table-3.1.1 Error by the summary method in the area estimation

No	分割数 Divided number (N)		4	5	8	10	16	20	32	40
	基準誤差率 Standard error rate		25(%)	20(%)	12.5(%)	10(%)	6.25(%)	5(%)	3.125(%)	2.5(%)
<1>	計測値 Measured value (A)	0.4082								
	算出値 Estimated value (B)	0.4221	0.4118	0.4146	0.4103	0.4116	0.4103	0.4106	0.4099	
	誤差 Error (C)	0.0139	.0036	.0064	.0021	.0034	.0021	.0024	.0017	
	誤差率 Error rate (%)	3.4	0.9	1.6	0.5	0.8	0.5	0.6	0.4	
<1>	計測値 Measured value (A)	0.4082								
	算出値 Estimated value (B)	0.2891	0.3962	0.4379	0.3957	0.4111	0.4102	0.4092	0.4074	
	誤差 Error (C)	-0.1191	-0.0120	.0297	-0.0125	.0029	.0020	.0010	-0.0008	
	誤差率 Error rate (%)	-29.2	-2.9	7.3	-3.1	0.7	0.5	0.2	-0.2	
<2>	計測値 Measured value (A)	0.4499								
	算出値 Estimated value (B)	0.4474	0.4441	0.4386	0.4475	0.4451	0.4479	0.4483	0.4488	
	誤差 Error (C)	-0.0025	-0.0058	-0.0113	-0.0024	-0.0048	-0.0020	-0.0016	-0.0011	
	誤差率 Error rate (%)	-0.6	-1.3	-2.5	-0.5	-1.1	-0.4	-0.4	-0.2	
<2>	計測値 Measured value (A)	0.4499								
	算出値 Estimated value (B)	0.4931	0.4687	0.4593	0.4477	0.4548	0.4541	0.4527	0.4516	
	誤差 Error (C)	.0432	.0188	.0094	-0.0022	.0049	.0042	.0028	.0017	
	誤差率 Error rate (%)	9.6	4.2	2.1	-0.5	1.1	0.9	0.6	0.4	

注) 各面積値(A,B,C)は(3.1.3)式で格子間隔を $D=1$ として換算したものの、

Note) Each value of A, B and C was calculated in the case of a unit grid area.

No 欄の <> 内数字: 図-3.1.3 中のデータ番号 Number held by angle brackets <> in the column of No: Model number corresponding to Figure-3.1.3

X, Y: 走査線の方向がX軸, Y軸にそれぞれ平行な場合 Scanning direction parallel to the X and Y axes.

分割数(N): 2格子点間(片側格子点を含む)に等間隔で配置する走査線の本数

Divide number (N): Number of scanning lines arranged in equal intervals between two neighboring grid points.

基準誤差率: 分割数の逆数の百分率(=100/N (%))

Standard error rate (%): Reciprocal of the divide number N multiplied by 100 (=100/N (%))

誤差率: 誤差区域を多角形として算出した値(B)に対し、形測値(A)を真値としたときの誤差を $(C=B-A)$ として $(100 \cdot C/A)$ により算出。

The error rate is calculated by the equation $100 \cdot C/A$ (%), where A is the measured true value of the discrepant area and C is calculated by the equation $C=B-A$. B is the estimated discrepant area obtained by integrating rectangles along the scanning lines.

には、いずれも基準誤差率を大幅に下まわり、特に、 $N=20$ 以上の分割数では、1%以下の誤差率となっている。

以上の結果に基づき、今回の実験では1格子間隔当りの走査線本数を、 $N=20$ とした。

2. 各種作成方式による格子状数値地形モデルの精度分析

(1) 在来の各種格子状数値地形モデル作成方式

格子点の標高を内挿する方法としては、(a)全領域を一関数であてはめる方法、(b)小領域ごとに関数をあてはめる方法、(c)格子点ごとに内挿する方法等がある(III)。(c)はさらに、(i)重みつき平均法、(ii)関数あてはめ法に分けられる。ここでは、「離散型の等高線データ点に基づいて、できる限り精度の高いDTMを作成する」という目的に照らして、(c-ii)が最適と考えられる。

格子点ごとにあてはめる関数としては、①3個のデータ点に基づく三角形の平面近似、②2次曲面近似、③3次曲面近似の3種類が通常、よく用いられる。いま、求めるべき格子点の高さを Z 、格子点から等高線データまでの距離を $r(x, y)$ で表わすとき、①は格子点から最寄りの2本の等高線上で、格子点に近い順に採取された3個の等高線データ点によって平面を近似するもので、次の1次式

$$Z = a_1 \cdot x + a_2 \cdot y + a_3$$

の係数 a_3 が格子点標高を表わす。

②は第II章第4節で取り上げたものと全く同じで、格子点近傍の6個以上の等高線データによって曲面を(2.4.1)式と同じ2次多項式

$$Z = a_1 \cdot x^2 + a_2 \cdot xy + a_3 \cdot y^2 + a_4 \cdot x + a_5 \cdot y + a_6 \quad \dots\dots(3.2.1)$$

で近似し、求めるべき格子点の高さとなる係数 a_6 を求めるものである。③は同じく10個以上の等高線データにより曲面を3次多項式

$$Z = a_1 \cdot x^3 + a_2 \cdot x^2y + a_3 \cdot xy^2 + a_4 \cdot y^3 + a_5 \cdot x^2 + a_6 \cdot xy + a_7 \cdot y^2 + a_8 \cdot x + a_9 \cdot y + a_{10} \quad \dots\dots(3.2.2)$$

で近似して、格子点の高さとなる係数 a_{10} を求めるものである。②と③の場合、通常、格子点から半径 R の円内で抽出した各データ点には、格子点からの距離 r_i に応じた重み p_i をつける((2.4.2)式参照)。

これらとは別に筆者は、すでに述べたように、大型計算機の高密度記憶方式を用いて、④標高比例配分内挿方式によりDTMを作成するシステムを開発している(38, 42)。これは標高を求めるべき格子点から至近な等高線データ点を局所的に探索した上で、格子点を挟む2本の等高線 H_1 、 H_2 を決定し、両等高線に至る距離 L_1 、 L_2 で等高線の高さ H_1 、 H_2 を比例配分して、格子点の高さ H を内挿する方式である。

$$H = (H_1 \cdot L_2 + H_2 \cdot L_1) / (L_1 + L_2) \quad \dots\dots(3.2.3)$$

ただし、独立標高点付近のように、閉曲線となる最奥等高線の内部にある格子点については原理的に内挿計算ができないので、2次曲面近似方式を援用する。

(2) 比較実験の方法と資料

各種 DTM 作成方式の比較実験の対象地域として、第II章第2節の比較実験で用いたものと同じ、名古屋大学稲武演習林月ヶ平地区（面積約 74 ha）を選定し、縮尺 1 : 5,000 の地形図上に格子間隔 2 mm (実長 10 m)、大きさ 125×145 の格子をかぶせ、前項で取り上げた各種方式によって DTM を作成した。この対象地の中で、1箇所当たり 11×11 (=121) 個の格子

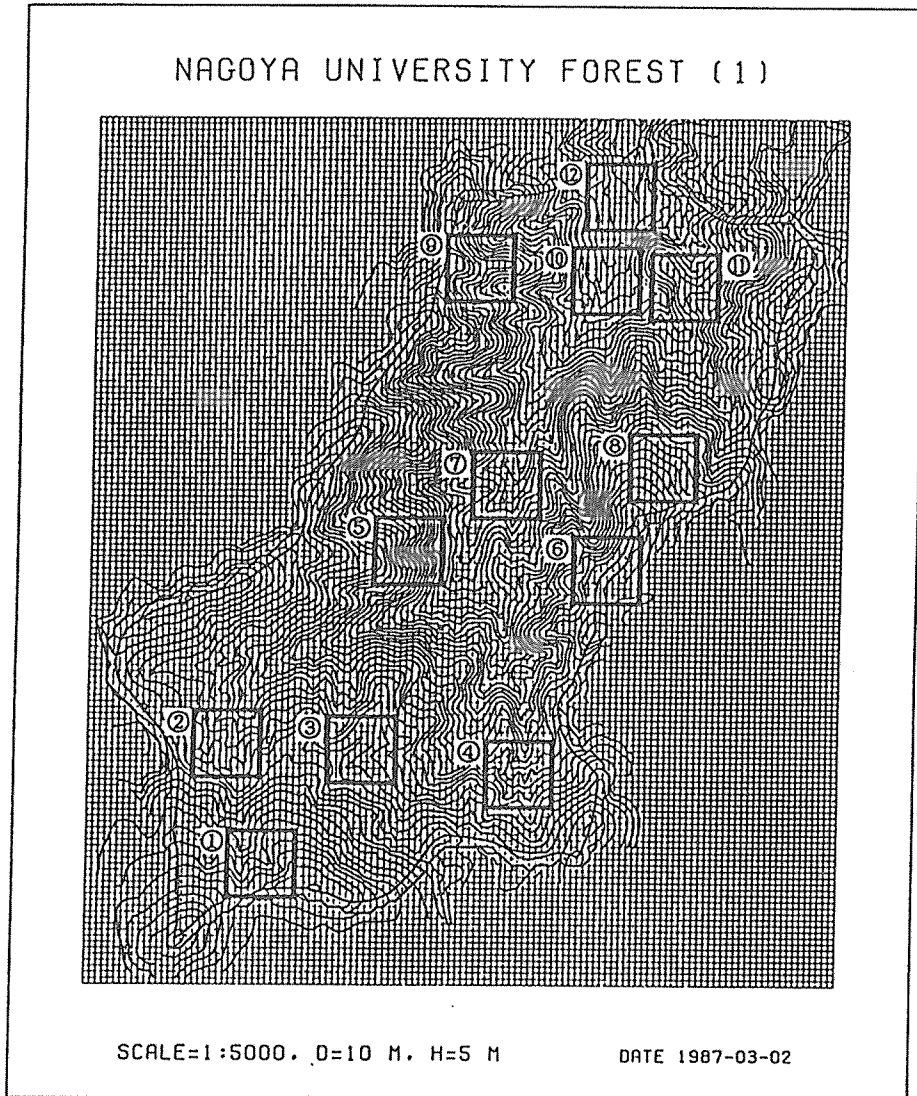


図-3.2.1 実験対象地

Fig-3.2.1 Objective areas for comparing with several DTM generation systems from the point of view of the discrepancy between the original contour lines and the ones regenerated through the DTM

注 Note) 名古屋大学農学部附属稲武演習林月ヶ平地区（愛知県北設楽郡稲武町）
Tsukigataira area of the Inabu Experimental Forest, Nagoya University, Aichi Prefecture
丸数字 Digital number in a circle : 実験プロット Experimental plot number

点を含む12箇所の実験プロット(実長100m×100m:実面積1ha。ただし、うち1箇所(プロット番号6)のみ、境界線外を除く68格子点)を、緩・中・急の3区分ごとに各々複数個となるよう考慮しながらランダムに取り出し(図-3.2.1参照:丸数字はプロット番号)、各作成方式によるDTMから再現された等高線と原図線とを各図ごとに重ね合わせた。その各図ごとに、原図線と再現線間の誤差区域の面積総計を簡易法で算出し、同時に、原図曲線の総延長距離を求めた。

なお、DTMに基づく等高線の描画には、名古屋大学大型計算機センターのライブラリー・プログラム、'CTLKTL'を使用した。これは、隣接する2格子点の標高から格子線上で一定の高さをもつ位置を1次式により求め、ある標高をもつ座標点の近隣の格子線上で同一標高となる座標位置を探索し、その間を直線で結んでいく方式に基づくものである。

(3) 結果と考察

1) 曲面近似方式とデータ点の抽出数

各種作成方式によるDTMの誤差の計測結果を表-3.2.1, 表-3.2.2, および図-3.2.2にとりまとめた。表中の「制約値」とは、格子点標高の演算に用いるデータ点を探索する際の打ち切り上の必要条件を意味する。

まず、2次と3次の曲面近似方式における、格子点標高の演算に用いるデータ点の個数とDTM作成精度の関係をみてみよう。表-3.2.1の④~⑦と⑧~⑫では、制約値が小さいほど当然、データ点の平均抽出数は少なくなるが、それに伴い誤差平均幅 w とその分散も小さくなっている。また、表-3.2.2では④と⑥, ⑦, ⑩~⑫との間や、⑧と⑫との間で t 検定による有意差が認められた。さらに、④と⑧の比較では、データ点の平均抽出数の少ない④の方が、 w とその分散は小さい。以上のことから、統計学的な予期に反して、演算に用いるデータ点の個数が少ないほど、作成されるDTMの精度は高くなることわかる。従って、(3.2.1)式、(3.2.2)式の演算に用いるデータ点探索の「制約値」も、抽出データ点の個数が必要最少限に近くなるように設定する必要がある(いまの場合、④と⑧がそれぞれ最適)。

標高演算結果を個々の格子点ごとにさらに詳細に調べてみると、抽出されたデータ点が必要最少限に近い場合、データ点の特殊な配置具合が原因で、異常な標高値を算出(誤計算)したり、連立一次方程式を解く段階で桁落ちエラーを発生したりすることがある。このように、曲面近似方式は標高演算のデータ点使用個数に関し、演算結果の精度と演算の安定性という点で二律背反的な性格を持っているので注意を要する。

次に、表-3.2.1中の⑥と⑦, および⑪と⑫を比較することにより、(3.2.1)式と(3.2.2)式に対する「重みづけ」の効果の有無をみてみよう。「重みづけ」とは、標高を内挿すべき格子点に近いデータ点の影響を重視し、遠いデータ点の影響を少なく見積ることである。実験の結果は2次と3次のいずれの曲面近似方式でも、「重みづけ」の有る方が w とその分散は小さくなっている。これは、標高を内挿すべき格子点からの距離が近いデータ点ほど、作成されるDTMの精度向上に貢献する、という常識的な考え方の妥当性を裏付けるものである。ただし、表-3.2.2の t 検定結果をみると、⑥と⑦, および⑪と⑫の間には、5%水準での有意差が認められなかった。従って、DTMの精度向上に対する「重みづけ」の効果については、

表-3.2.1 作成方式別DTMの誤差の比較

Table-3.2.1 Comparison of errors based upon each DTM generation system

DTM 作成方式 DTM generation system	重み Weight	制約値 Threshold		平均抽出数 Average number of detected points		合計 Total			
		C	P	C	P	Σa	L	w	S.D.
<1> 高密度 High-accuracy	×	3	-	3.4	29.6	41.931	806.06	0.052	0.015
<2> 内挿式 Linear interpolation	×	3	-	3.4	29.6	70.990	806.06	0.088	0.029
<3> 3点平面 Triangle plane int.	×	2	3	2.0	3.0	76.568	806.06	0.095	0.046
<4> 2次曲面 Quadratic Polynomial	○	2	6	2.9	14.6	82.986	806.06	0.103	0.035
<5> 2次曲面 Quadratic Polynomial	○	2	7	3.2	17.5	92.895	806.06	0.115	0.037
<6> 2次曲面 Quadratic Polynomial	○	3	9	3.9	27.0	136.755	806.06	0.170	0.071
<7> 2次曲面 Quadratic Polynomial	×	3	9	3.9	27.0	171.341	806.06	0.213	0.089
<8> 3次曲面 Cubic polynomial	○	2	10	3.6	21.7	99.435	806.06	0.122	0.044
<9> 3次曲面 Cubic polynomial	○	2	12	3.8	24.5	105.782	806.06	0.131	0.042
<10> 3次曲面 Cubic polynomial	○	2	15	4.1	28.5	114.705	806.06	0.142	0.043
<11> 3次曲面 Cubic polynomial	○	3	15	4.2	31.6	133.313	806.06	0.165	0.062
<12> 3次曲面 Cubic polynomial	×	3	15	4.2	31.6	162.086	806.06	0.201	0.077

注 Note) 重み Weight : ○ -- あり Weighted × -- なし Not weighted

ただし、当該格子点を中心とする半径 R の円内で抽出されたデータ点 (x_i, y_i) に至る格子点からの距離 r_i に対する重み p_i を $p_i = 1 - (r_i/R)^2$ で求めた。

When an arbitrary coordinate point (x_i, y_i) is detected in a circle with its center at the objective grid point and with a radius of R , the weight p_i of the point (x_i, y_i) is defined by the equation $p_i = 1 - (r_i/R)^2$, where r_i is the length between the objective grid point and the coordinate point (x_i, y_i) .

制約値：格子点の標高を演算するうえで最低限必要なデータの個数

Threshold : Minimum number for collecting data necessary for calculating the elevation of a grid point.

C : 等高線の本数 Number of contour lines
 P : データ点の個数 Number of coordinate points on contour lines
 平均抽出数 : 1 箇所あたり $11 \times 11 = 121$ 個の格子点を含む 12 箇所 (ただし 1 箇所だけは境界線外を除く 68 格子点) での合計 1,399 個の格子点を対象としたもの。
 Average number of detected coordinate points : Each value shows the mean of several computing tests for 1,399 grid points in twelve test plots. Eleven out of the twelve plots contain grid points of size 11×11 and the remaining one contains the 68 objective grid points within the border line.
 Σa : 誤差面積 Total error area L : 等高線総延長距離 Total length of all contour lines
 w : 誤差平均幅 Mean width of the integrated discrepant area ($= \Sigma a / L$)
 S. D. : w の標本標準偏差 Standard deviation of w (標本数 Number of samples : $n = 12$)
 ただし, Σa , L , w は格子間隔 $D = 1$ として換算した値。
 Each value of Σa , L and w is calculated in the case of a unit grid interval.
 DTM 作成精度の比較実験に用いたデータは, 縮尺 1:5,000 の地図上に格子間隔 2 mm (実長 10 m) の格子をかぶせて採取した (1 箇所あたりの面積 : 1 ha)。
 The data used for the error comparison tests among the DTM generation system were captured from a map on a scale of 1:5,000 with a grid on which an interval of 2 mm was set to correspond to a real length of 10 m on the ground. Therefore, the objective area per plot was 1 ha.

表-3.2.2 DTM 作成方式間の差異の判定

Table-3.2.2 Significance test of the difference between various DTM generation systems

②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	作成方式
**	*	**	**	**	**	**	**	**	**	**	①高精度方式
				**	**	*	**	**	**	**	②内挿方式
				**	**			*	**	**	③3点平面方式
				*	**			*	**	**	④2次曲面(2-6)
				*	**			*	**	**	⑤" (2-7)
											⑥" (3-9)
						**	*	*			⑦" (3-9')
DTM 作成方式										**	⑧3次曲面(2-10)
DTM generation system										*	⑨" (2-12)
										*	⑩" (2-15)
高精度方式	Hybrid (High-accuracy)										⑪" (3-15)
内挿方式	Linear interpolation										⑫" (3-15')
3点平面方式	Triangle plane interpolation										
2次曲面	Quadratic polynomial interpolation										
3次曲面	Cubic polynomial										

注) 12枚の図面に関する各誤差平均値に基づく《t検定》結果。

Note) This table was obtained as a result of t-tests based upon each mean discrepant width of twelve plots in Fig-3.2.1 and Tab-3.2.1.

() 内の数字は, 表-3.2.1 中の C と P の閾値。

Numerical values in parentheses are the thresholds of C and P presented in Table-3.2.1.

*, ** : 5%, 1% 水準でそれぞれ誤差幅の平均値間に有意差あり。

Mean that the difference between two mean discrepant widths is significant in the level of 5% and 1%, respectively.

表中の太枠内は5%水準で分散の差に有意差あるもので、「ウェルチの検定」を適用した結果である。

The combinations surrounded by a frame of bold line in the table are significant in the level of 5% between the variances based upon different DTM generation systems. These results are based upon application of the Welch's test.

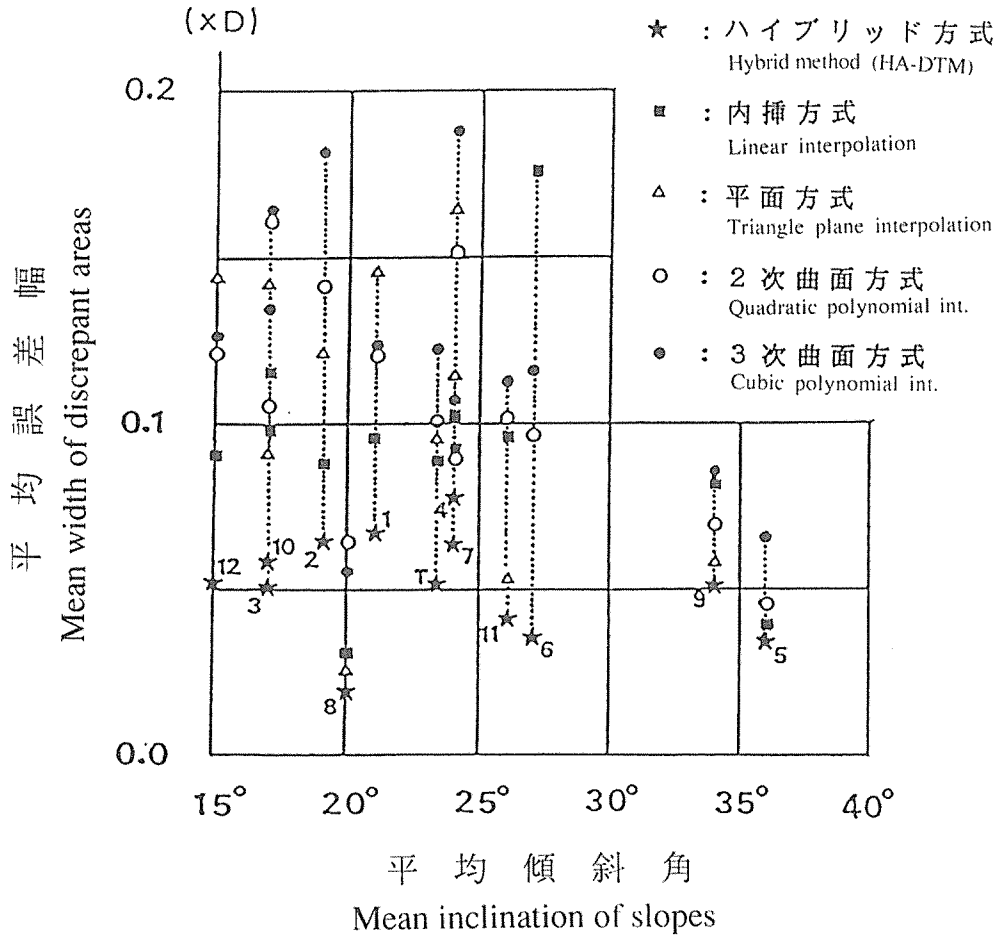


図-3.2.2 作成方式別DTMの誤差

Fig-3.2.2 Discrepancies according to some DTM generation systems

注 Note) 星印の近くの数字：図-3.2.1 の各実験プロットに対応

Digital number near a star mark : Experimental plot number corresponding to Fig-3.2.1

D: 格子間隔 Grid interval

T: 12箇所の実験プロット全体の平均値 Mean value of the twelve experimental plots

過大な期待をかけない方が無難であるといえよう。

2) 各種作成方式の比較

表-3.2.1の②, ③, ④, ⑧の各作成方式を比較すると, 誤差平均幅 w とその分散は, ③の分散を除いて, この順に大きくなっている。従って, 作成精度は②が最も高い。しかも, ②は曲面近似方式にみられる桁落ちや誤計算のような心配がなく, 演算結果の安定性も高い。

③の w は④や⑧より小さいが, これは格子点標高の計算に用いるデータ点の数が, 後者では少なくとも6点もしくは10点以上, 平均的には10数点づつ必要なのに対し, 前者では格子点に近い3点だけで済むことによると考えられる。最小自乗法に基づく曲面近似方式よりも, 3個のデータ点で定まる平面近似方式の方が(格子点近傍におけるデータ点の配置に偏りがなければ)原図の地形をより良く表現することがわかる。

ただし, ③の分散については④, ⑧よりも大きく, 演算結果の信頼性の面でやゝ問題がある。実際, 格子点近傍で2本の等高線上にある3個のデータ点を系統的に抽出する過程に意外と困難な問題点が含まれている。格子点が3個のデータ点で形成される三角形の外側になる場合, 異常な標高値を算出することがある。特に沢筋など, 地形の複雑な緩傾斜地でのDTM作成精度は, 他の各方式と同様に著しく悪い(図-3.2.2において平均傾斜25°以下の場合の三角記号を参照)。

傾斜変換線付近では, ③の方が②よりも高精度になる場合がある(図-3.2.2のプロット番号6, 9, 11を参照)。その際の格子点から2番目に近い等高線は, 最も近い等高線の外側となり, 格子点は2本の等高線で挟まれない。この場合, 基本的には2本の等高線に至る距離から外挿方式で格子点標高を求めるのと同じ原理になる。

②の場合, 格子点を挟む2本の等高線を決定する必要上, ある程度, 数多くデータ点を抽出しておかなければならないので, データ点の平均抽出数こそ増すが, (3.2.3)式の L_1, L_2 を決定するために用いるデータ点は, 2本の等高線上での3点づつである。しかも, 原理的には格子点から2本の等高線に下ろした垂線の足となる2点だけが標高決定に意味を持つ。この2つの垂線は, 格子点を通る最大傾斜線を意味する。②が③よりDTM作成精度が高いのは, 前者が基本的には線近似であって, 平面近似である後者よりも原図地形の変化に対応しやすいためと考えられる。

以上の結果から, DTM作成精度は, 格子点近傍の地形の近似方式によって規定されることがわかる。地形の近似方式として考えられる曲面近似, 平面近似, 線近似のうち, 線近似によるDTMの作成精度が最も高く, 曲面近似によるものが最も劣る。このことは同時に, 標高演算に用いるデータ点(ただし, 線近似の場合は格子点から等高線に下ろした垂線の足となる点とする)の個数が少ないほど, DTMの作成精度が高くなることを意味している。また, 傾斜変換線付近の格子点の事例が示すように, 標高の演算に用いる等高線の選択に際しては, 格子点を挟む位置にあるかどうかよりも, 格子点への近さを基準とすべきである。格子点に近い等高線データを用いるほど, DTMの作成精度は高くなる。

3) ハイブリッド方式で作成された格子状数値地形モデルの精度

ハイブリッド方式によって作成されたDTMの作成精度の検討結果は, 表-3.2.1および表-3.2.2中の「①高精度方式」として示してある。表-3.2.1では, ①による誤差平均幅 w

の計測結果が、他の諸方式に比べて著しく小さい値となっており、表-3.2.2では①の結果が他の諸方式に対して1%もしくは5%水準で有意の差を持っている。また、図-3.2.2中の星印は①による結果であるが、平均傾斜の緩急にかかわらず、どの実験プロットでも安定して高精度を保っており、この方式によって作成されたDTMが文字通り「高精度」であることがわかる。以上の結果から、DTMの精度を高めるにはハイブリッド方式にする必要があるという、前節の推論の正しさが立証されたといえる。

3. まとめ

コンピュータを用いて系統的に地形解析を行おうとする場合、対象とする地域の大きさや地形データ点の採取密度は、コンピュータの性能（主として記憶容量）の関係で、大きな制約を受けることがある。格子間隔をある程度以下に小さくすることは現実的に不可能となるため、一定の格子間隔のもとでより高精度の地形再現精度をもつDTM作成方式を求める声が高まりつつある。それに伴い、DTM作成方式自体についての精度的な検討、および各種作成方式間の比較を行う必要性が生じている。

本章では、等高線データに基づいて作成されるDTMの作成精度を定量化するうえで、原図の等高線とDTMから再現される等高線との間のずれに着目し、ずれた面積の合計を等高線総延長で除した(3.1.1)式の誤差平均幅 w を、評価指標として提起した。この指標を用いて従来の各種DTM作成方式を比較検討した結果、DTMの作成精度にかかわる要因として、①統計学的な予期に反して、格子点標高の演算に用いるデータ点の個数が多くなるほど、精度は低くなること、②格子点近傍での地形の近似方式は（3次曲面近似<2次曲面近似<平面近似<線近似）の順に精度が高くなること、③格子点により近い等高線データを演算に用いるほど高精度になること、④曲面近似方式、平面近似方式とも、標高演算の精度的な安定性に欠けること、等が明らかとなった。以上のことから、高精度のDTMを作成するためには、標高を求めるべき格子点の周辺で必要最少限の等高線点列データを抽出し、それらから格子点を通る最大傾斜線を定め、この最大傾斜線上で、基本的には線近似の標高比例配分内挿方式と外挿方式に基づいて格子点の標高を計算すればよいことが明らかになった。

前章で提起したハイブリッド方式によるDTM作成システムは、以上のDTM作成精度の分析に関する結論に沿ったアルゴリズムが採用されている。ハイブリッド方式で作成されたDTMは、従来の各種DTM作成方式によるものと比較実験した結果、安定した高精度で原図の等高線を再現できることが定量的に確かめられた。

IV 数値地形モデルによる山地の地形計測とその精度

1. 山地の地形計測の自動化の意義

地形の特徴を表わす数値には、標高、傾斜角、方位角などのように個々の地点のごく近傍で定義される量（局所地形量）と、接峰（谷）面高度、起伏量、開折度、地形のきめ（テクスチャー）を表わす各種指標（きめの細かさ、階層性、方向性など）などのように広がりを持った地域の代表値として定義される量（地域地形量）とがある。局所地形量は個々の算出位置と切り離せない性格の数値であるが、ある対象地域中での空間的配列を無視し、単なる数値の集合（統計標本）として取り扱った場合に算出する統計量（統計地形量）は、格子状数値地形モデル（DTM）を対象とする場合、面積を尺度とする統計量となり、その種類や定義、計算法は一般的な統計学のそれと同じである。統計地形量は、当然、標本点の数と密度、および地形のきめの細かさに関係する（83）。

地形図等に基づき手作業で行われてきた従来の「地形解析」のほとんどは、膨大な量の地形データを処理するうえでの、主として労力面での制約のため、上記のうち統計地形量に関するものにとどまってきた。しかし、近年、コンピュータを用いた系統的な地形計測方法が導入されるようになってきたのに伴い、地形の空間的配置に関する相互関係や構造を解明する、文字通りの「地形解析」が、今日、ようやく実現可能になりつつある。地形計測作業をコンピュータを用いて系統的に行うことは、単に労力軽減に役立つばかりでなく、地形データの採取、処理の過程で発生しやすい人為に基づくミスを防ぎ、また、同過程で必要となる何らかの判別作業に関して、個人差に基づく恣意性を排除する点でも有効である。このことは、手作業による地形計測作業の抱える精度的な面での限界を克服することにも通ずる。さらに、コンピュータを用いた地形計測作業では、局所地形量の算出と、それ以後の地形解析や林業土木・森林作業計画等に関する種々の演算処理を、連続的に容易に行えるから、計画手法自体の飛躍的な革新をも期待しうる。この点に関しては、地理学や水文学、砂防学などの分野でも同様の関心が持たれているようで、近年、DTMを手段とした研究が数多く行われている（6, 18, 19, 53, 84, 122, 123, 125）。

山地の地形量を定量化する方法には、「地形」の定義の仕方に対応して幾通りもの方法が考えられる。地形の定義として代表的なものに、①3次元で表わされる座標点の無限集合、②均一の特徴をもつ微小な斜平面の集合、の2つが挙げられる。前者の立場から、山地地形を曲面で近似して地形変動量を計量化する試みが、芝ら（97～99）や山本ら（124）によって行われている。林業土木・森林作業計画においては、後者の考え方の方がコンピュータを用いた系統的な計画手法に適用し易いと考えられるので、筆者はこの考え方をとることとする。その場合、前提となる微小斜面に対する計測手法の精度を明らかにしておくことが、地形計測・解析結果の信頼性を高めるうえで不可欠の要件となる。

そこで、本章では、DTMを用いて任意の地点や区域における山地の局所地形量の計測を行う代表的な手法を対象として、そのアルゴリズムの特徴と精度について検討を行った。先ず、任意の座標点における傾斜因子を等高線の点列データから直接、系統的に算出するアルゴリ

ズムについて取り上げ、次にDTMに基づき個々の地点における傾斜因子を推定する各種方法を精度の面から比較検討し、さらにDTMによる山地平均傾斜の推定方法に関しても、格子間隔の大きさと関連させて検討した。

2. 等高線の点列データに基づく傾斜因子の算出

本節では、高密度記憶方式による点列データ処理法を活用して任意の位置における傾斜因子（斜面の方位角と傾斜角）を、等高線の点列データから直接、系統的に求める方法について検討する。これは、従来の手作業による地形計測手法の考え方をコンピュータによる解析作業に置き換えるものといえる。ここでの具体的な課題は、等高線点列データを座標点に対応した2次元配列の記憶場所に、2種類の高密度記憶方式を用いて効率的に格納し、任意の格子点の周辺で局所的に必要な本数の等高線の点列を正確、迅速に探索しうる、点列データ高密度格納・探索方式を設計することである。

この目的を実現するためには、以下のようなデータ処理上の要件がある。①任意の座標点 $P(X, Y)$ を挟む2本の等高線 H_1, H_2 と、 $P(X, Y)$ に最も近い等高線 H_1 に隣り合う2本の等高線のうちで、 H_2 とは反対側に存在する H_3 を正確に、かつ迅速に抽出すること、② $P(X, Y)$ の周囲で離散的に抽出された3本の等高線 H_1, H_2, H_3 上の各データ点の並びを元の曲線の順序と一致するように復元すること、③尾根や沢付近の最大傾斜線を、手作業による場合に比較して著しく精度を劣化させないで表現すること。

以上のうち、①の課題については、前章で述べたハイブリッド方式によるDTM作成システムの一環として、演算処理するためのプログラムを作成済みである。②の課題は、第II章第2節で述べたデータ格納構造を適用することにより、容易に達成できる。そこで、本節での検討課題は、③に対応したアルゴリズムを構築することに絞られる。以下でそのアルゴリズムについて述べる(47)。説明を簡略化するため、計測対象位置を格子点とするが、本アルゴリズムは本来、任意の座標点位置に適応しうるものである。

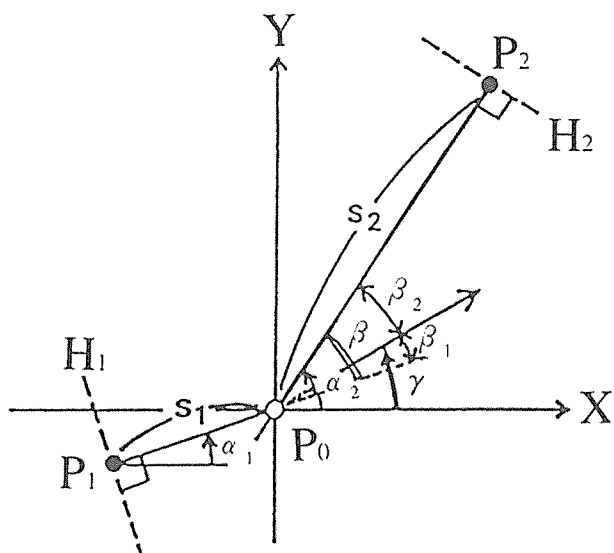
(1) 格子点における傾斜因子の把握方法

1) 方位角の把握方法

格子間隔 D (測地座標系における実長) の格子上で、任意の格子点 P_0 が2本の等高線 H_1, H_2 (その標高 H_1, H_2) に挟まれるものとし、 P_0 から H_1, H_2 に至る最短距離の点を P_1, P_2 、その格子座標系における距離を $s_1, s_2 (s_1 \leq s_2)$ とする(図-4.2.1(a)参照)。このとき $H_1 > H_2$ であれば、 $P_1 \rightarrow P_0 \rightarrow P_2$ は P_0 を通る最大傾斜線を意味する。同図において、 P_0 から X 軸に向かう方向を地形図の東方向と一致させ、これを方位算出の際の基準とする。また、格子点 P_0 からの距離が短い方の s_1 を持つ線分 $\overline{P_1 P_0}$ が X 軸方向となす角度を α_1 、同じく長い方の距離 s_2 を持つ線分 $\overline{P_0 P_2}$ がなす角度を α_2 とし、両角度の差 β を距離 s_1, s_2 に比例した β_1, β_2 の2つに区分するものとする(角度の単位: いずれも正接)。

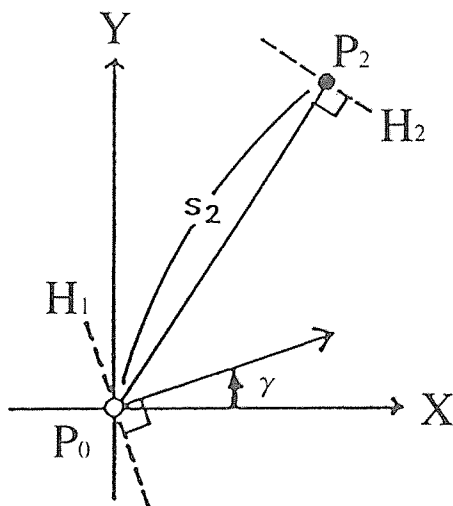
$$\beta = \alpha_2 - \alpha_1 = \beta_1 + \beta_2$$

$$\beta_1 : \beta_2 = s_1 : s_2$$



(a) 点 P_0 が 2 本の等高線に挟まれる場合

Usual case based upon two perpendicular lines to the neighboring contour lines from the point P_0



(b) 点 P_0 が等高線上にある場合

Special case of a contour line passing directly over the point P_0

図-4.2.1 等高線データに基づく任意の点における方位角の算出

Fig-4.2.1 Concept of the method of systematically calculating for a slope aspect at an arbitrary coordinate point based upon the two contour lines next to the point

注 Note) γ : 任意の点 P_0 における方位角 Slope aspect at an arbitrary coordinate point P_0

α_1 と β_1 の合計を γ とすると、 γ は図-4.2.1(a)において、短い方の距離 s_1 に対応して区分された β_1 を α_1 寄りにとることを意味し、次式で表わされる。

$$\gamma = \alpha_1 + \beta_1 = \frac{\alpha_1 \cdot s_2 + \alpha_2 \cdot s_1}{s_1 + s_2} \quad \dots\dots(4.2.1)$$

ただし、 $0 < s_1 \leq s_2$ 。

格子点 P_0 における方位角 θ° は、(4.2.1) 式の γ に基づき、 $-180^\circ < \theta \leq 180^\circ$ の範囲で、次のように定めることができる。

$$\theta = \begin{cases} \tan^{-1} \gamma & ; H_1 > H_2 \\ (\tan^{-1} \gamma) \pm 180^\circ & ; H_1 < H_2 \end{cases}$$

上式において $H_1 < H_2$ の場合に 180° を加減するのは、傾斜の低い方向にむけて方位を定めるための措置である。(4.2.1) 式の γ は、格子点 P_0 が H_1 と H_2 のちょうど中間にあるとき ($s_1 = s_2$)、 β の 2 等分線が X 軸方向となす角と一致し、逆に P_0 が H_1 に近づくにつれて α_1 に近づいていく。

格子点 P_0 が等高線 H_1 上にある場合 ($s_1 = 0$) には P_1 点がとれないから、 P_0 において H_1 に対する法線方向が X 軸方向となす角度 α_1 を γ とする (図-4.2.1(b)参照)。これは、(4.2.1) 式において $s_1 = 0$ とした場合に相当するものである。

さらに、格子点 P_0 が独立標高点付近のように最奥閉曲線の内部にあって、 P_0 を挟む相手方となる等高線 H_2 が存在しない場合には、 P_0 から最寄りの等高線 H_1 に下ろした垂線の方向を、 P_0 点での方位とする。

2) 傾斜角の把握方法

格子点 P_0 の標高が不明の場合、 P_0 における傾斜角 ϕ は、図-4.2.2(a)の関係に基づいて次式で定義する。

$$\phi = \frac{|H_2 - H_1|}{(s_1 + s_2) \cdot D} \quad \dots\dots(4.2.2)$$

これは、通常の手作業による地形解析の場合と全く同様の考え方に基づくものであるが、また、 P_0 での標高 H_0 が、 P_0 を挟む 2 本の等高線 H_1 、 H_2 の高さ H_1 、 H_2 と、それに至る距離 s_1 、 s_2 とで内挿方式によって求められた場合にも、当然、そのまま適用できる。

格子点 P_0 の標高 H_0 が外挿方式、スプライン関数補間方式等によって求められた場合には、(4.2.1) 式の考え方を準用して、 P_0 における傾斜角 ϕ を次のように定義することができる (図-4.2.2(b)参照)。

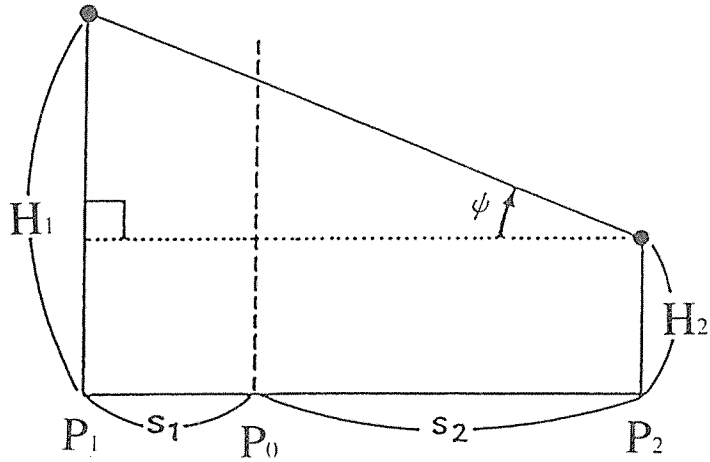
$$\phi = \frac{\phi_1 \cdot s_2 + \phi_2 \cdot s_1}{s_1 + s_2} ; (0 < s_1 \leq s_2) \quad \dots\dots(4.2.3)$$

ただし、 $\phi_1 = |H_0 - H_1| / (s_1 \cdot D)$

$\phi_2 = |H_2 - H_0| / (s_2 \cdot D)$

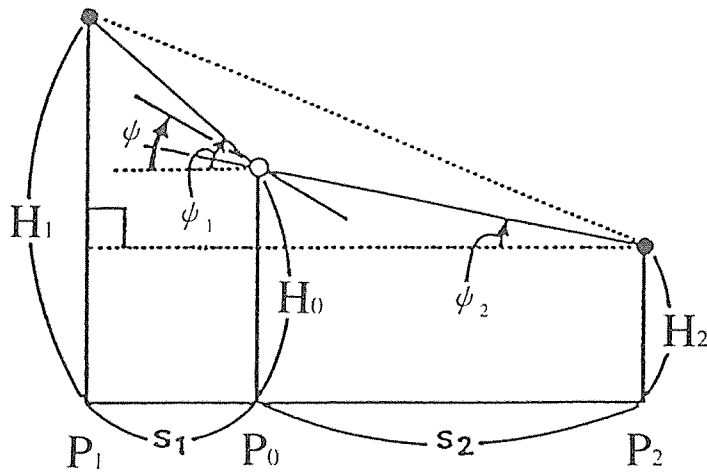
格子点 P_0 が等高線 H_1 上にある場合 ($s_1 = 0$) には、標高が H_1 と隣り合う等高線のうちで、 H_2 と反対側の H_3 に至る、 P_0 からの最短距離 s_3 を持つ傾斜 ϕ_3 を次のように定義し、その ϕ_3 を用いて、 P_0 における傾斜角 ϕ を定める。

$$\phi_3 = |H_3 - H_1| / (s_3 \cdot D)$$



(a) 点 P₀ が 2 本の等高線に挟まれる場合

Usual case based upon two perpendicular lengths to the neighboring contour lines from the point P₀



(b) 点 P₀ が等高線上にある場合

Special case with the contour line passing just on the point P₀

図-4.2.2 等高線データに基づく任意の点における傾斜角の算出

Fig-4.2.2 Concept of the method of systematically calculating for a slope inclination at an arbitrary coordinate point based upon the two contour lines next to the point

注 Note) ψ : 任意の点 P₀ における傾斜角 Slope inclination at an arbitrary coordinate point P₀

$$\psi = \frac{\psi_3 \cdot s_2 + \psi_2 \cdot s_3}{s_2 + s_3} ; (s_2 \neq 0, s_3 \neq 0)$$

さらに、P₀ が最奥閉曲線の内部にある場合については、最寄りの等高線 H₁ に至る P₀ からの至近距離 s₁ が H₁ の外側の等高線 H₃ と H₁ との距離 s₃ より短いかどうかに応じて、傾斜

角 ϕ を次のように定める。

$$\phi = \begin{cases} \phi_3 ; S_1 < S_3 \\ 0 ; S_1 \geq S_3 \end{cases}$$

(2) データ処理方法

等高線の (X, Y) 点列座標データは、データ点探索時間を出来る限り短くするために、採取されたデータを内挿法によって X, Y 方向の格子線との交点の数値に変換したうえで、先に第II章第2節で述べたように、格子点位置に対応した2次元配列の記憶場所へ、①点列上の前方向の隣接点位置、②同後方向の隣接点位置、③格子内座標値、④曲線のコード番号、の4情報を高密度記憶方式（1語内詰め込み方式）で格納する。

(3) 結果と考察

上述の傾斜因子算出アルゴリズムの地形図に対する適合性を検討するため、第II章第2節の実験で用いた名古屋大学稲武演習林月ヶ平地区（面積約74 ha）の縮尺1:5,000の地形図を対象として、ディジタイザにより2 mm 方眼の格子（実長10 m）を機械的に発生させ、等高線をトレースする際に X, Y 両方向の格子線と交わる位置の等高線点列データを採取した。

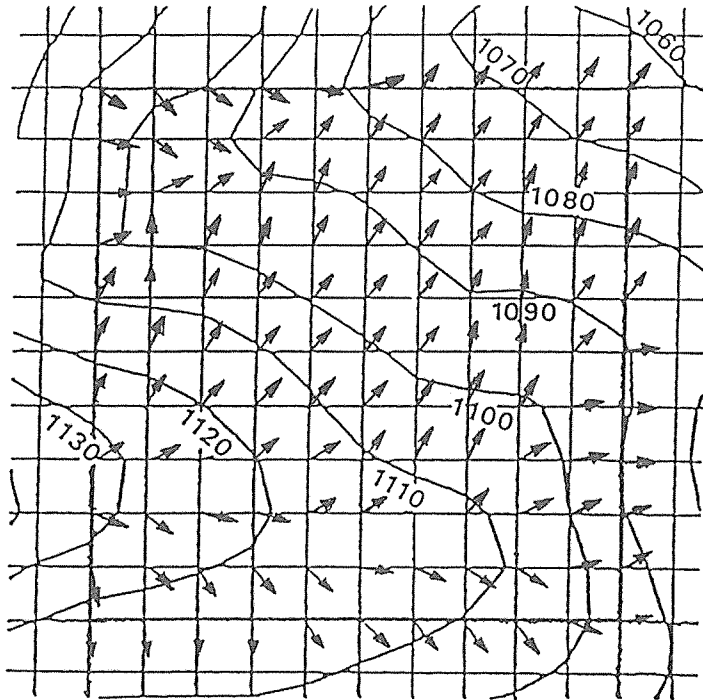


図-4.2.3 等高線データに基づく方位角算出の適用例
Fig-4.2.3 Example of the aspect calculation based upon discrete contour data

59本の等高線データの読み込みと高密度記憶方式による格納に要した時間は0.3秒、また、大きさ125×145の格子内で、演習林とその周辺部の8,198点の格子点についての傾斜因子算出に18.1秒の時間を要した。図-4.2.3は、そのうちの1例として11×11の格子(面積1ha)を選定し、格子点の方位角を矢印で表示したものである。

同図を一見して明らかのように、方位角算出のアルゴリズムの地形図に対する適合性はかなり高く、少なくとも手作業並みには、十分機能していることがわかる。これは、(4.2.1)式が格子点 P_0 を通る最大傾斜線上での、 P_0 点における最大傾斜線に対する仮想的な接線に近い値をとるためと考えられる。従来の手作業による地形解析においては、データ収集作業の精度面での制約のために、方位角の把握は、主として8方位区分などの区分型で行われてきた。これに対し、本アルゴリズムを用いれば、たやすく「度」単位など、任意の単位で角度を把握できるから、方位角に関する検討の精度を、従来よりも格段に高めることが可能となると予測される。

(4.2.2)式を用いて算出した格子点の傾斜角の結果は、手作業による結果とほぼ等しい値となった。両者の結果には最大5°程度の違いがみられたが、これは、手作業で格子点から2本の等高線に至る距離を測定する際の、読定値の精度に影響されたものと考えられる。このように、(4.2.2)式の傾斜角算出のアルゴリズムは、手作業による結果と本質的には何ら変わるところがないが、作業労力面の簡便さの点で、本アルゴリズムを用いる場合、手作業に比べて格段の優位性を持つことは、明らかである。また、ディジタイザによる等高線のトレース誤差は、各格子点ごとに手作業で格子点から2本の等高線に至る最短距離を測定する際に含まれる測定誤差の合計と比べて、少なくとも同程度、一般的にはそれ以下と考えられるから、本アルゴリズムを用いる方が手作業による場合に比べて、精度的にも高くなると推測される。

3. 格子状数値地形モデルによる傾斜因子の推定精度

地形が急峻で複雑な山岳林地を対象にして、林業工学分野における各種計画立案のための地形計測をDTMを用いて系統的に行おうとする場合、山腹のひだや傾斜変換線などを始めとする微地形の特徴をDTMがどの程度把握・再現し得るものであるかが、まず第一に問題となる。従って、DTMによる傾斜因子の推定精度を知ることは、系統的な地形計測法に対する信頼性を高めるうえで不可欠の課題である。

DTMによる傾斜因子の推定精度については、地理学分野(27)や林学分野(37, 78, 101, 103, 110)等においていくつか検討例がある。その他、DTMから再現された等高線(106)や任意の標高点の位置(104)についての検討例がある。山岳林を対象として林業土木計画を行なう場合のような、微地形を対象とした地形計測においては、DTMの傾斜推定精度として、傾斜近似方式、格子間隔、地形図の縮尺などとの関係が明らかにされる必要があるが、そのような問題意識にたって行われた研究例は、文献(37)以外には見受けられない。

そこで本節では、DTMによる傾斜因子の推定精度の把握を主眼として、①傾斜近似方式の違いによる影響、②格子間隔の違いによる影響、③縮尺別適正格子間隔の3点を解明することを目的として、各種縮尺の地形図をもとに実験を行った結果(37)について記すことにす

る。

(1) 傾斜近似方式の種類

DTM では、任意の地点 (x, y) の標高を Z_{xy} とすると、最大傾斜角 $\tan \theta$ は一般に次式で表される。

$$\tan \theta = \sqrt{\left(\frac{\partial Z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial y}\right)^2} \quad \dots\dots(4.3.1)$$

この最大傾斜角が示す方位角は、X 軸の正方向を基準にとると、それから α の角度(単位：ラジアン)となる。

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{\partial Z}{\partial y} / \frac{\partial Z}{\partial x}\right) \quad (4.3.2)$$

表現を単純にするため、X 軸方向の勾配を R 、Y 軸方向の勾配を S とする。

$$R = \frac{\partial Z}{\partial x}, \quad S = \frac{\partial Z}{\partial y}$$

格子間隔を D 、格子座標を (I, J) とするとき、X-Y 座標系における任意の位置 (x, y) は格子単位の座標 (u, v) に変換すると、第 II 章第 2 節に記した (2.2.1) 式の関係に従う。すなわち、

$$I = [X/D]$$

$$J = [Y/D]$$

$$u = X/D - I; (0 \leq u < 1)$$

$$v = Y/D - J; (0 \leq v < 1)$$

ただし、 $[]$ はガウスの記号で、小数部分を切り捨て。

この格子座標 (I, J) の位置を P_{ij} 、標高を Z_{ij} で表わすことにする。DTM によって傾斜因子を推定する場合、その近似方式には様々なタイプが考えられる (75) が、正方形格子を前提とすると、①連続格子点による方法、②曲面近似による方法、③平面近似による方法の 3 種類に分類できる。このうち③は、4 格子点の高さから最小二乗法によって回帰平面を求めるもので、そのときの傾斜表示式は座標軸を 45°回転させて考えれば、基本的には①のうちの 2 次式近似と同じもの (ただし、格子間隔は元の $1/\sqrt{2}$ 倍) になる。

1) 連続格子点による方法

この方法は、格子に平行な連続する 3～5 点の高さをもとに 2～4 次曲線をつくり、その接線を算出して X、Y 軸方向の勾配 R 、 S とするものである。

(a) 2 次式近似

$$\begin{aligned} R_{ij} &= (Z_{i+1,j} - Z_{i-1,j})/2D \\ S_{ij} &= (Z_{i,j+1} - Z_{i,j-1})/2D \end{aligned} \quad \dots\dots(4.3.3)$$

これは、X 軸方向についてみるなら $P_{i-1,j}$ 、 P_{ij} 、 $P_{i+1,j}$ の 3 点で定まる 2 次式

$$Z_x = a_2 \cdot x^2 + a_1 \cdot x + a_0$$

の点 P_{ij} における接線を意味し、 $a_1 = R_{ij}$ となっている。Y 軸方向についても同様である。以下では、特にことわらない限り X 軸方向についてのみ記すことにする。

(b) 3次式近似

$(I-1, J), (I, J), (I+1, J), (I+2, J)$ の4つの連続する格子点の高さから, 3次曲線

$$Z_x = a_3 \cdot x^3 + a_2 \cdot x^2 + a_1 \cdot x + a_0 \quad \dots\dots(4.3.4)$$

の係数を次式で求め, このときの a_1 の値を R_{ij} とする。

$$\begin{pmatrix} a_3 \\ a_2 \\ a_1 \\ a_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 & 1 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 8 & 4 & 2 & 1 \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} Z_{i-1,j} \\ Z_{ij} \\ Z_{i+1,j} \\ Z_{i+2,j} \end{pmatrix}$$

$$R_{ij} = a_1 = (6Z_{i+1,j} - 2Z_{i-1,j} - 3Z_{ij} - Z_{i+2,j}) / 6D \quad \dots\dots(4.3.5)$$

(c) 4次式近似

$(I-2, J), (I-1, J), \dots\dots, (I+2, J)$ の5点で定まる4次曲線を考え, 3次式の場合と同様にして R_{ij} を求める。

$$Z_x = a_4 \cdot x^4 + a_3 \cdot x^3 + a_2 \cdot x^2 + a_1 \cdot x + a_0$$

$$R_{ij} = \partial Z_x / \partial x = a_1$$

$$= \{(Z_{i-2,j} - Z_{i+2,j}) + 8(Z_{i+1,j} - Z_{i-1,j})\} / 12D \quad \dots\dots(4.3.6)$$

(d) その他

3次式近似の場合, 係数の決定のために用いる4連続点の一つづつずらすか, あるいは逆向きに格子点を抽出して格子点 (I, J) での勾配を求めると, 一般には(4.3.5)式の結果とは異なってしまふ。自然地形での傾斜はごく特殊な場所を除けば連続的に変化すると考えられるから, ある地点での傾斜が幾通りにも値を取り得るといふのは, はなはだ不都合である。そこで, その矛盾を解決するための一方法として, (4.3.5)式の結果を 3_0 とし, 格子点の一つづつずらし $(I-2, J), (I-1, J), (I, J), (I+1, J)$ の4点から求められる3次曲線

$$Z_x = a'_3 \cdot x^3 + a'_2 \cdot x^2 + a'_1 \cdot x + a'_0 \quad \dots\dots(4.3.7)$$

の (I, J) 点での勾配を 3_1 とし, 3_0 と 3_1 の平均値を求めることが考えられる。しかし, その平均値を展開してみると, 結局のところ, (4.3.6)式の4次式近似と全く一致してしまうので, これは除外しても差し支えないことになる。

2) 曲面近似による方法

これは, 地形を一定の曲面式で表現し, その X, Y 方向の微分値をもって R_{ij}, S_{ij} とする方法である。

(a) 1次内挿方式

(u, v) を格子単位の座標系における任意の位置とすると, この点の高さは比例配分法に基づく次式で示される。

$$Z_{uv} = (1-u)(1-v)Z_{ij} + u(1-v)Z_{i+1,j} + (1-u)vZ_{i,j+1} + uvZ_{i+1,j+1} \quad \dots\dots(4.3.8)$$

この式から, 例えば X 方向の勾配 R_{uv} は次式で求められる。

$$R_{uv} = \partial Z / \partial u = \{(Z_{i+1,j} + Z_{ij}) + v(Z_{ij} - Z_{i+1,j} - Z_{i,j+1} + Z_{i+1,j+1})\} / D$$

(b) 2次多項式方式

6点以上の格子点の標高に基づいて最小二乗法により, 第II章第4節で記した(2.4.1)式

と同じ2次多項式

$$Z_{uv} = a_1 \cdot u^2 + a_2 \cdot uv + a_3 \cdot v^2 + a_4 \cdot u + a_5 \cdot v + a_6 \quad \dots\dots(4.3.9)$$

の係数を求め、上式の X, Y 方向への偏微分値を R_{uv} , S_{uv} とするものである。

$$R_{uv} = \partial Z_{uv} / \partial u = (2a_1 \cdot u + a_2 \cdot v + a_4) / D$$

この方式の場合、普通、第II章第4節で記した(2.4.2)式により、内挿高や傾斜を推定しようとする場所から半径 R 以内に存在する格子点を抽出する際に、利用する格子点までの距離 r_i に対応して重み p_i をつける。

(c) 3次多項式(1)

10点以上の格子点の高さから最小二乗法により、第III章第2節の(3.2.2)式と同じ次の3次多項式

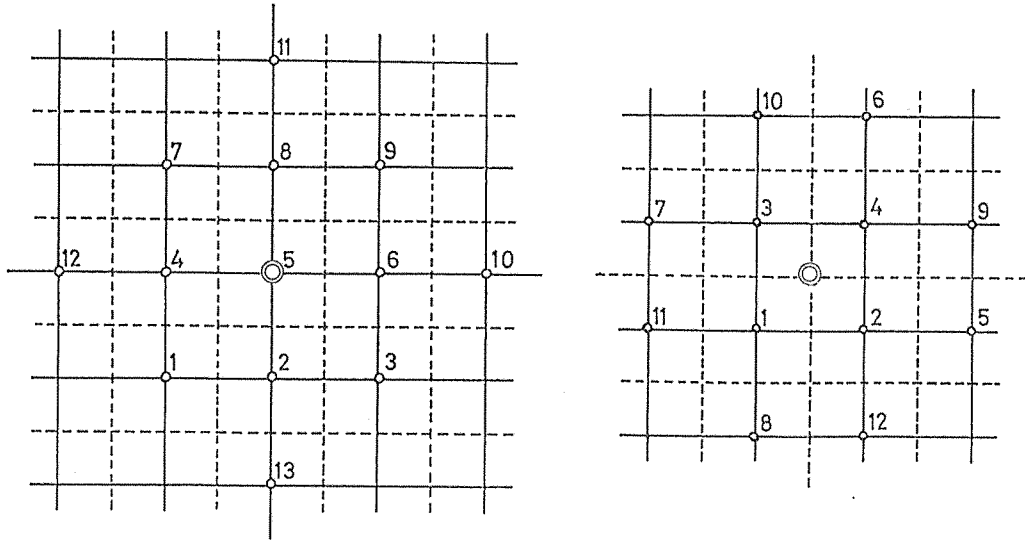
$$Z_{uv} = a_1 \cdot u^3 + a_2 \cdot u^2 v + a_3 \cdot uv^2 + a_4 \cdot v^3 + a_5 \cdot u^2 + a_6 \cdot uv + a_7 \cdot v^2 + a_8 \cdot u + a_9 \cdot v + a_{10} \quad \dots\dots(4.3.10)$$

の係数を求め、2次多項式の場合と同様にして R_{uv} , S_{uv} を求める。

$$R_{uv} = \partial Z_{uv} / \partial u = (3a_1 \cdot u^2 + 2a_2 \cdot uv + a_3 \cdot v^2 + 2a_5 \cdot u + a_6 \cdot v + a_8) / D \quad \dots\dots(4.3.11)$$

この方式で格子点位置の傾斜を推定しようとする場合、推定値の一意性を確保するには、図-4.3.1(a)のように13個の格子点を規則的に抽出するのが有効である。このときの傾斜角は(4.3.11)式で $u=v=0$ と置いた値であるから、

$$R_{ij} = a_8 / D$$



(a) 格子点位置での推定

For estimating at the central grid point

(b) 格子中心位置での推定

For estimating at the center of a grid cell

図-4.3.1 多項式による地形推定のための格子点の配置

Fig-4.3.1 Arrangement of grid points for estimating the terrain by a polynomial

注 Note) 二重丸 Double circle : 推定点 Estimating point

となる。これを最小二乗法を用いて定まる係数行列によって展開してみると、前項で取り上げた4次式近似の結果である(4.3.6)式と一致する。重みづけを行なっても係数行列のなかでその効果がうち消され、結局上式と一致することになる。以上の点から考えて、格子点位置で傾斜を比較するに際して、この3次多項式は除外して差し支えない。

なお、(4.3.9)式の2次多項式方式により図-4.3.1(a)において9個の格子点をNo. 1~9のように抽出し、中心の格子点位置で傾斜を推定する場合には、 R_{ij} の決定にX軸上の格子点以外の4格子点に関与するので、1)の方式とは異なった値となり、重みづけの影響も現われる。また、(4.3.9)式の2次多項式および(4.3.10)式の3次多項式(1)によって格子点中心位置で傾斜を推定する場合は、図-4.3.1(b)のように格子点を抽出する。2次多項式であれば、同図においてNo. 1~8のように抽出しても差し支えない。

(d) 3次多項式方式(2)

この方式は土木工学の分野で比較的良好に用いられており、次式で地形を近似する。

$$Z_{uv} = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 a_{ij} \cdot u^{i-1} v^{j-1} \quad \dots\dots(4.3.12)$$

上式において、16個の未知の係数 a_{ij} は、対象区域の四隅の点 $P_1(0, 0)$, $P_2(1, 0)$, $P_3(0, 1)$, $P_4(1, 1)$ に対応する地形高 Z , X方向の勾配 R , Y方向の勾配 S , 面のねじれ T の合計16のデータおよび条件式から、連立1次方程式を解いて求められる。 R と S の値は、格子点位置における傾斜推定精度の検討結果に基づいて、適当な近似式で求める。面のねじれ T は次式で近似する。

$$T_{ij} = \partial^2 Z / (\partial u \partial v) = \{(Z_{i+1,j} + Z_{i-1,j-1}) - (Z_{i+1,j-1} + Z_{i-1,j+1})\} / 4D$$

16個の係数が決まれば、(4.3.12)式を u , v について偏微分することにより、真中の格子点内の任意の位置における R , S が求められる。

(2) 実験方法と資料

DTMの精度は、標高測定の精度、格子間隔および中間点の内挿方法によって左右されるものであるが、本節では格子間隔と内挿方法による誤差に注目することにし、格子点の標高は正しいものとして取り扱った。ところで、一般に等高線の高さや位置には図化の際の誤差が含まれている(87, 90)ため、格子間隔があまり小さすぎると無意味な格子点標高を含んでしまう危険性がある。そこで、西村(82)に従い表-4.3.1のように最小格子間隔を定めた。

実験方法は、傾斜因子として傾斜角と方位を取り上げ、手作業による測定値を真値としてDTMによる推定値と比較する方法、および、最小格子間隔の格子点位置における推定値を真値とみなして、他の拡大した格子間隔を用いた場合の推定値とを比較する方法の両者によって検討した。傾斜角の読定は、格子点での最大傾斜角を正接値で与える松井法(82)により、その際の方位をX軸正方向を基準とする16方位に区分して読み取った。

格子間隔の大小による近似精度の差異を検討するには、同一の格子点群について比較する必要がある、またその際、最大の格子間隔を用いたときに推定点として抽出可能な格子点が、一定の個数以上なければならない。そこで、31×31の正方形格子の網目をモデル地区にかぶせ、そのX, Y方向ともそれぞれ中央1/3ずつ11×11の格子点群を抽出することにした。こ

表-4.3.1 モデル地区の平均傾斜と最小格子間隔
Table-4.3.1 Mean inclination and the smallest grid interval of each model area

縮尺 Scale	平均傾斜 Mean inclination		最小格子間隔 Smallest grid interval		モデル地区の大きさ Size of model area	
	緩 Gentle	急 Steep	図上 Reduced (mm)	実長 Real (m)	図上 Reduced (mm ²)	実長 Real (m ²)
	1: 1,000	20°	35°	5	5	15×15
1: 2,000	10	40	2.5	5	7.5×7.5	150×150
1: 5,000	15	40, 30	2	10	6×6	300×300
1: 10,000	-	35	2	20	6×6	600×600

の場合、最大格子間隔は最小格子間隔の5倍までとれる。傾斜因子の近似精度を検討する場合、任意の位置における推定値について比較するのが望ましいが、本実験では、格子内の任意の地点の傾斜は四隅の格子点での傾斜値からベクトル演算と同様に導きうるとみなし、格子点位置での推定と格子中心位置での推定に絞ることにした。

後者については、座標軸を45°回転させて考えてみれば、格子間隔が元の $1/\sqrt{2}$ 倍の新しい格子の格子点に相当する。従って、精度を検討する位置は、結局、格子点位置に絞って差し支えないことになる。

林業分野で用いられる地形図は、森林基本図をはじめとして1:5,000以上の大縮尺のものが多く、そこで本実験では、縮尺による特性についても検討するために1:1,000, 1:2,000, 1:5,000, 1:10,000の4種類の縮尺を取り上げた。さらに、傾斜の緩急別による特性を検討

表-4.3.2 等高線間距離の平均計測値
Table-4.3.2 Mean value of measured width between two contours for each model

モデル 番号 Model number	縮尺 Scale	平均等高線間距離 Mean width between two contours		等高線 高度差 Contour interval (m)	平均傾斜 Mean inclination
		計測値 Measured (mm)	実長 Real (m)		
		1	1: 1,000		
2	1: 1,000	4.4	4.4	3	34
3	1: 2,000	6.8	13.5	2	8
4	1: 2,000	4.0	8.0	6	37
5	1: 5,000	7.6	38.0	10	15
6	1: 5,000	3.8	19.0	10	28
7	1: 5,000	2.6	13.0	10	38
8	1: 10,000	1.6	16.0	10	32

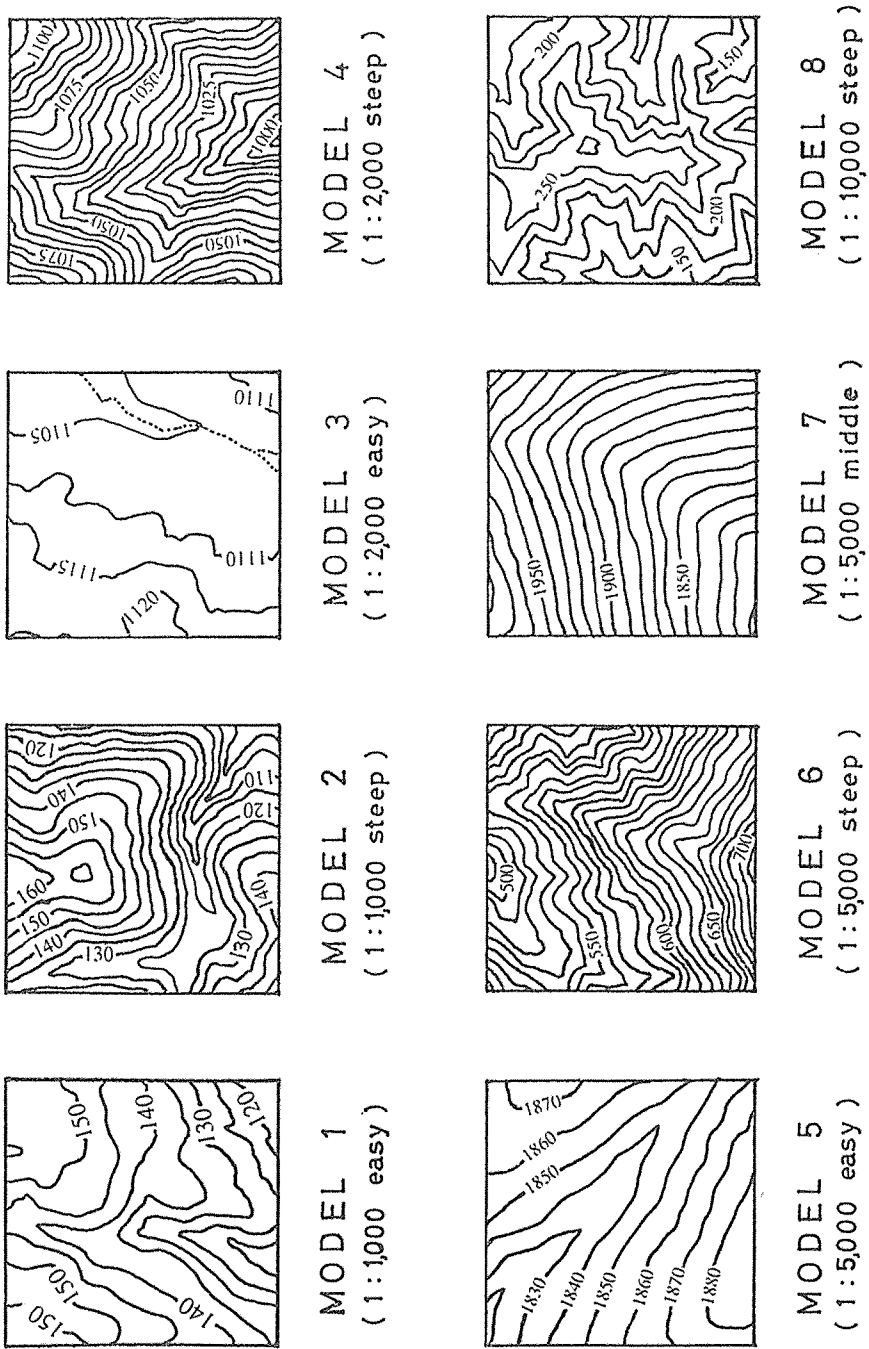


図-4.3.2 モデル地域の概念図

Fig-4.3.2 Outline maps of eight model areas

するために、それぞれの縮尺ごとにその典型地区を選定して、図-4.3.2に示すような8個のモデル地区を設定した。モデル地区の実際の大きさは表-4.3.1の通りである。また、表-4.3.2に各モデルの等高線高度差と等高線間距離の平均計測値を示しておく。

(3) 結果と考察

1) 傾斜近似方式別にみた精度の比較

表-4.3.3は、格子間隔が最小の場合に格子点位置で推定した、傾斜角の誤差平均値を傾斜近似方式別に示したものである。ここでは、真値として地形図での読定値を用いている。

ここでの比較検討に際して、前節2)の曲面近似による方法の大半が除外されたのは、以下の理由による。すなわち、(a)1次内挿方式は、格子中心位置では平面近似法によるものと同値となるので、連続格子点による場合の2次式近似の(4.3.3)式と本質的には変わらない。格子中心位置を外れた場所でも、平面近似法との差は微々たるものである。次に、3次多項式(1)((4.3.10)式)で格子点位置の傾斜を推定するには、図-4.3.1(a)のように13点の格子点をシンメトリックな配置で抽出する場合に精度は最も高くなるが、そのときの推定値は、連続格子点を用いる場合の4次式近似による結果と同値になる。さらに、3次多項式(2)((4.3.12)式)による傾斜角推定は、連続格子点による2次式近似の(4.3.3)式を前提としているので、格子点での推定値は(4.3.3)式そのものである。従って、曲面近似による方法のうちでは2次多項式方式((4.3.9)式)だけが、連続格子点による方法に対して独自性を持つことになるのである。

表-4.3.3において、連続格子点による4種類の近似方式について、精度の高い順に順位を付してある。この順位は、格子間隔を最小のときの2～5倍に増したときにもほぼ同様の結果となり、方位推定の精度に関する順位ともほぼ一致する。標準偏差はほぼ誤差平均値と同程度の大きさである。以上のことから、近似方式の違いによる傾斜角推定精度の差異をみるには、誤差平均値の大小で判断して差し支えないといえる。

表-4.3.3から読み取れることを列挙すれば、次の通りである。

- ① 全体に、近似方式の違いによる精度の差は小さい。
- ② 総じて連続格子点による方法の方が2次多項式方式より精度は高い。
- ③ 連続格子点による方法のうち、総じて4次式近似が精度は最も高い。
- ④ 2次式近似は、ほとんど4次式近似と精度が変わらず、緩傾斜地や単調斜面では最も精度が高くなる。
- ⑤ 3次式近似(3₀と3₁)の精度はどちらも総じて他の方式より低い。

最初の①に関して、2次式近似と4次式近似による差を格子間隔ごとに求めてみると、ほとんど1°未満であった。中縮尺のモデル8だけは格子間隔が増すにつれて両者の差が拡大し、5°近い値にまでなった。これらの結果は、大縮尺の場合、実質的な意味では近似方式の違いによる精度の差があまり無いことを意味している。3次式近似(3₀や3₁)よりも4次式近似の方が精度が高くなったことから、シンメトリックな配置となるように格子点を抽出するのが、傾斜因子の推定精度を高めるうえで望ましいと考えられる。

次に、表-4.3.4は格子の中心位置もしくはその近辺における傾斜角推定の誤差を検討し

表-4.3.3 近似方式別傾斜角推定の誤差 (1)
(最小格子間隔で格子点位置の場合)

Table-4.3.3 Mean error of inclinations estimated by each approximate method (1)
(Estimated at grid point on the smallest grid interval)

モデル 番号 Model number		傾斜角近似式の次数 Order of approximate equation of inclination				2 次多項式 Quadratic polynomial
		2	3 ₀	3 ₁	4	
1	平均 Mean	(3) 0.060	(2) 0.059	(4) 0.067	(1) 0.059	0.065
	S.D.	.062	.060	.065	.057	.067
2	平均 Mean	(3) 0.075	(2) 0.068	(4) 0.085	(1) 0.070	0.080
	S.D.	.085	.071	.082	.071	.096
3	平均 Mean	(1) 0.022	(3) 0.024	(4) 0.026	(2) 0.023	0.022
	S.D.	.037	.035	.039	.035	.040
4	平均 Mean	(2) 0.075	(4) 0.091	(3) 0.085	(1) 0.071	0.093
	S.D.	.082	.094	.091	.070	.096
5	平均 Mean	(1) 0.040	(3) 0.053	(4) 0.054	(2) 0.048	0.036
	S.D.	.052	.062	.058	.058	.043
6	平均 Mean	(1) 0.086	(4) 0.109	(3) 0.094	(2) 0.090	0.094
	S.D.	.090	.126	.103	.099	.094
7	平均 Mean	(1) 0.038	(3) 0.042	(4) 0.045	(1) 0.038	0.040
	S.D.	.033	.039	.036	.033	.034
8	平均 Mean	(4) 0.186	(2) 0.180	(3) 0.182	(1) 0.170	0.207
	S.D.	.185	.172	.159	.164	.193

注 Note) 単位 Units: 正接の真数 Tangent value

S.D.: Standard deviation 標準偏差

3₀, 3₁: (4.3.4), (4.3.7) 式に基づく推定値

Estimations from the equations (4.3.4) and (4.3.7) respectively

括弧内の数字: 近似精度の順位

Numbers in parentheses: The orders corresponding to the accuracy of approximation for each model

たものである。これは、格子間隔が最小格子の2倍の場合について、地形図からの読定値を真値として算出した誤差平均値である。この場合は、格子間隔が最小格子の奇数倍になると、推定すべき格子点位置が想定している格子の中心からずれるため、格子抽出の都合上、前節の曲面近似による方法しか適用できない。この結果についても、近似精度の高い順に順位を

表-4.3.4 近似方式別傾斜角推定の誤差 (2)
 (最小格子間隔で格子中心位置の場合)

Table-4.3.4 Mean error of inclinations estimated by each approximate method (2)
 (Estimated at the center of grid on the smallest mesh)

モデル 番号 Model number	傾斜近似方式 Approximate method of inclination					
	1 次式 Linear	2 次多項式 Quadratic polynomial	3 次多項式 (1) Cubic polynomial (1)		3 次多項式 (2) Cubic polynomial (2)	
			With 12 points	With 10 points		
1	平均 Mean	(2) 0.072	(4) 0.116	(1) 0.067	(5) 0.120	(3) 0.078
	S.D.	.072	.120	.067	.091	.071
2	平均 Mean	(2) 0.088	(4) 0.119	(1) 0.087	(5) 0.160	(3) 0.095
	S.D.	.105	.144	.096	.185	.099
3	平均 Mean	(2) 0.025	(4) 0.029	(1) 0.024	(5) 0.033	(3) 0.026
	S.D.	.044	.049	.041	.050	.040
4	平均 Mean	(2) 0.110	(4) 0.139	(1) 0.107	(5) 0.205	(3) 0.119
	S.D.	.112	.137	.103	.225	.103
5	平均 Mean	(1) 0.037	(3) 0.043	(2) 0.042	(5) 0.072	(4) 0.049
	S.D.	.042	.043	.048	.091	.055
6	平均 Mean	(2) 0.109	(5) 0.156	(1) 0.108	(4) 0.151	(3) 0.123
	S.D.	.106	.145	.106	.123	.114
7	平均 Mean	(3) 0.045	(5) 0.059	(2) 0.042	(4) 0.055	(1) 0.042
	S.D.	.035	.044	.035	.043	.037
8	平均 Mean	(3) 0.230	(5) 0.296	(2) 0.207	(4) 0.267	(1) 0.200
	S.D.	.199	.237	.185	.245	.167

注 Note) 単位 Units : 正接の真数 Tangent value

S.D. : Standard deviation 標準偏差

括弧内の数字 : 近似精度の順位

Numbers in parentheses : The orders corresponding to the accuracy of approximation for each model

付してある。これは、方位推定の精度の順位ともほぼ対応している。

表-4.3.4 から次のことがわかる。

- ① 全体として、近似方式の違いによる近似精度の差は小さい。
- ② 総じて近似精度の高い順位は、3次多項式(1)((4.3.10)式) > 1次内挿方式((4.3.8)

式) $>$ 3次多項式(2) ((4.3.12)式) $>$ 2次多項式 ((4.3.9)式)となる。

最初の①に関して確かめるために、2次多項式近似を除く3方式について相互の誤差の差を検討したところ、おおむね連続格子点による方法における結果と同様の傾向が示された。近似方式の違いによる精度の差が実用的な意味ではほとんど無視しうるものである以上、格子の中心位置もしくはその近傍での傾斜近似方式としては、最も単純な1次内挿方式で十分である。ところで、この方式は格子中心位置において平面近似方式の値と等しくなるが、4格子点による平面近似方式というのは、本質的には、その4格子点を用いた、連続格子点による場合の2次式近似と同一である。従って、ある格子点における傾斜近似方式としては、結局最も単純な2次式近似の(4.3.3)式を用いれば十分だということになる。近似の次数を3以上にしても、傾斜推定の精度はあまり高まらない。

以上の結果は、最小格子間隔の場合の傾斜角推定値を真値とみなして検討した結果とも合致している。なお、2次式近似より近似精度を高めることを目的として(4.3.4)式の3次式近似を用いる(60)ことは、今回の実験結果からみて、一般的には逆効果であると考えられる。さらに付け加えていうなら、(4.3.3)式の2次式近似法が優れている点は、最小単位の格子(面)の4隅の格子点標高のみを用いてその格子(面)内部の傾斜因子を演算できることにある。

以上の結論を踏まえて、これ以後の傾斜近似の検討においては、近似方式として(4.3.3)式の2次式近似を採用することにした。

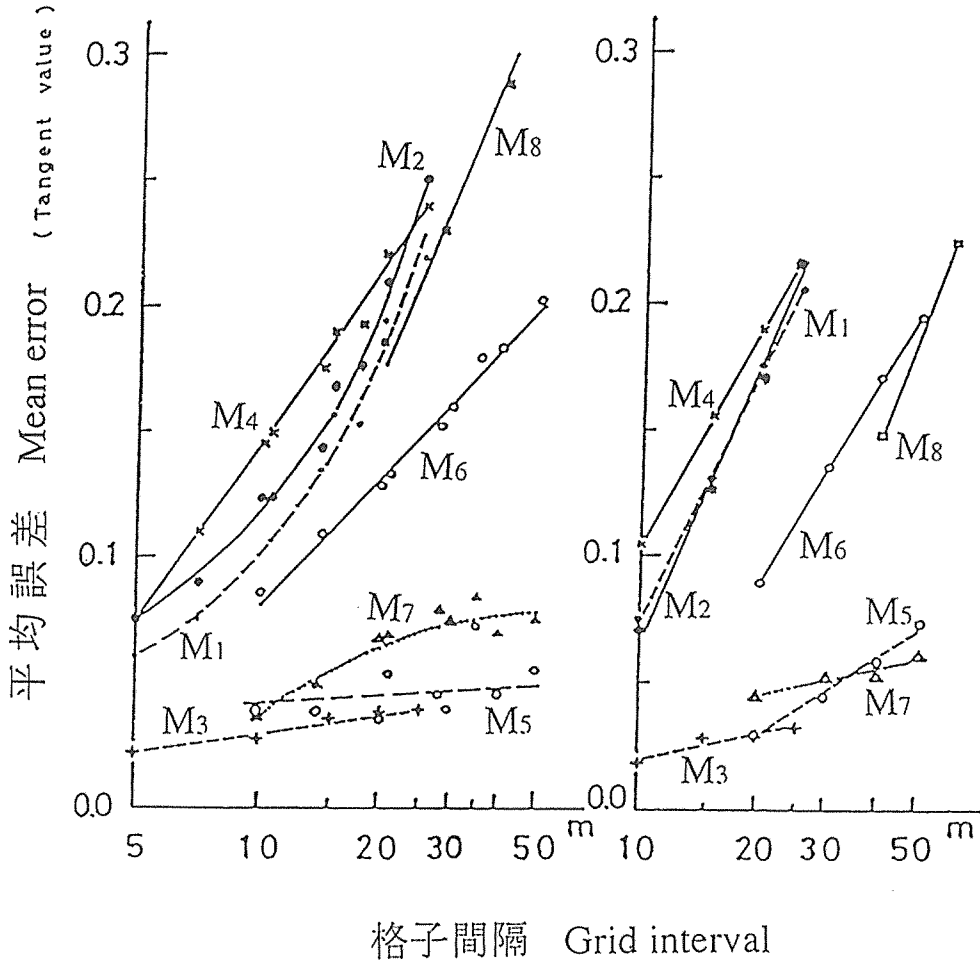
2) 格子間隔の相違と傾斜角の推定精度

図-4.3.3は、2次式で近似した傾斜角の誤差平均値を示したもので、(a)は真値として地形図からの読定値をあてたもの(絶対誤差とよぶ)、(b)は同じく最小格子を用いた傾斜角推定値をあてたもの(相対誤差とよぶ)である。格子中心位置での推定値も、その位置から周囲の格子点までの距離を格子間隔として同一図上にプロットしてあるが、格子点位置での点群と比較的なめらかに接続している。このことから、座標軸を45°回転させて傾斜角を推定しても、座標回転による影響はあまりないといえよう。

図-4.3.3の(a)と(b)を比較すると、一般に相対誤差の方が、同一格子間隔での誤差を小さく表現している。この相違は、相対誤差を求める際の真値自体に誤差が含まれているために生じたと考えられるが、両者の差はたかだか2°~3°程度であり、実用的な意味では無視してさしつかえない。従って、相対誤差をもとに傾斜角の誤差を検討する方法も、一定の有効性を持つわけである。

図-4.3.3から、単調な地形(モデル3, 5, 7)での誤差は小さく、格子間隔が増しても誤差はあまり変化しないこと、また、複雑な地形での誤差は、格子間隔が増すにつれてほぼ一様に単調増加することがわかる。ただし、格子間隔の大きさと誤差との関係は、必ずしも一様ではない。

最小格子間隔を1としたときの格子間隔の比と傾斜角推定の誤差比との関係を検討してみると、図-4.3.4のようになる。急傾斜地のモデル2, 4, 6が、格子間隔があまり大きくないうちは、縮尺の違いを超えてほぼ似たような誤差比増加傾向を取ることがわかる。しかし、誤差比という考え方では緩傾斜地の特性を把握するのが困難であることも、あわせてこの図



(a) 絶対誤差 Absolute error

(b) 相対誤差 Relative error

図-4.3.3 傾斜角推定の平均誤差

Fig-4.3.3 Mean error in estimated inclinations

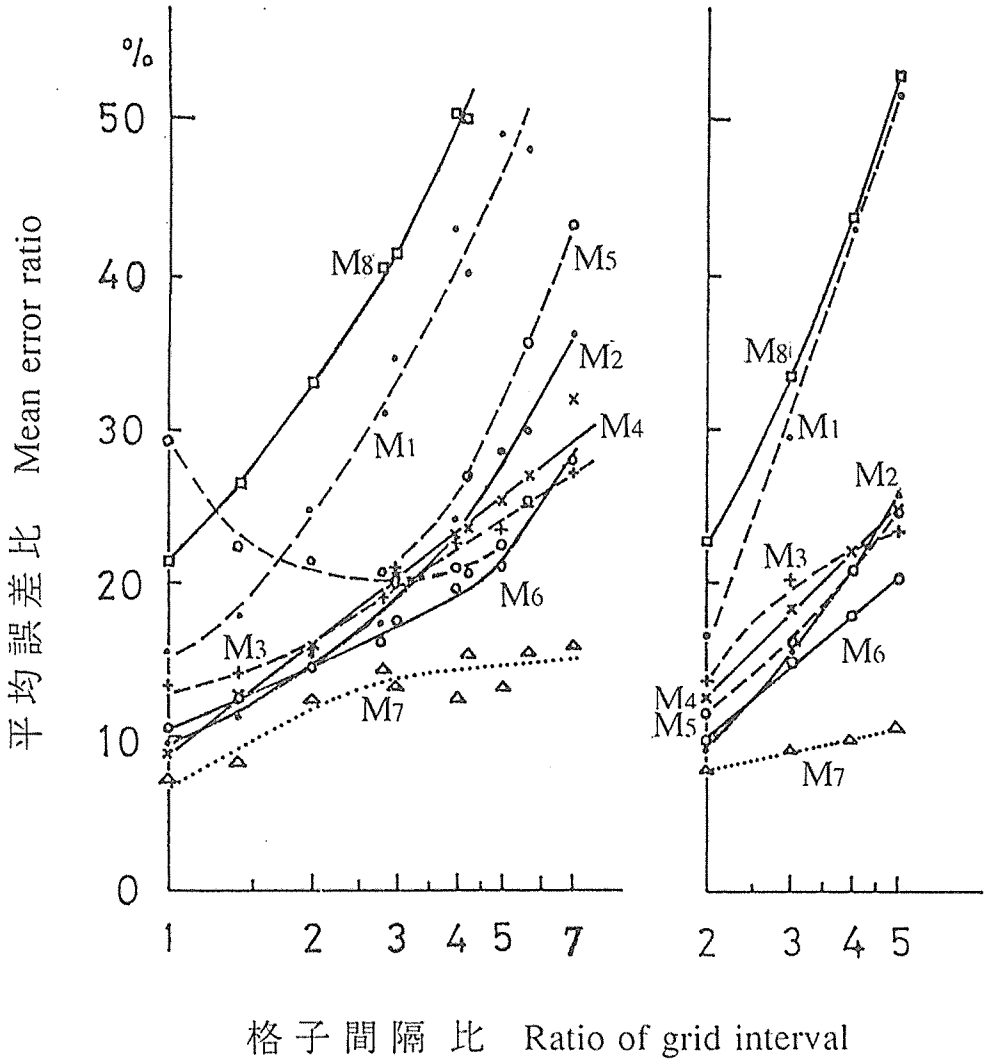
注 Note) M1~M8: 図-4.3.2 のモデル地区番号に対応

Corresponding to the model area numbers in Fig-4.3.2

から読み取れるであろう。

図-4.3.3において、緩傾斜地のモデル1が高い誤差を示し、他方、急傾斜地のモデル7が低い誤差を示すことから、傾斜角推定の誤差は単に傾斜の緩急によるというよりも、むしろ沢や尾根の入り組み具合等の「地形の複雑さ」というものによって左右される、と考えた方が妥当であろう。

傾斜角を推定するうえでの許容誤差を、経験的な基準で定めて図-4.3.3にあてはめると、各縮尺に対する格子間隔の上限値を求めることができる。緩・急両モデルのうち、大きい誤差を示す曲線の方から、求めるべき限界値が与えられる。傾斜角を推定するうえでの許容誤



(a) 絶対誤差 Absolute error

(b) 相対誤差 Relative error

図-4.3.4 傾斜角推定の誤差比

Fig-4.3.4 Error ratio of estimated inclinations

注 Note) M1~M8: 図-4.3.2 のモデル地区番号に対応

Corresponding to the model area numbers in Fig-4.3.2

差を 5° (8.7%) ~ 10° (17.6%) 程度が実際的と考え、これらの値に対し格子間隔の上限値を求めた結果が表-4.3.5 である。

縮尺 1 : 10,000 の場合については、許容誤差を上記の範囲に限定すると、実用的な範囲内では適当な格子間隔が得られない。このことは、1 : 10,000 以下の中小縮尺の地形図では、傾斜因子を含む微地形の判読、解析に不適であることを意味するものである。

表-4.3.5 傾斜角，方位および標高の許容誤差別・縮尺別の格子間隔上限値
 Table-4.3.5 Upper values of grid intervals corresponding to permissible margin of errors of inclination, aspect and elevation for each map scale

因子 Factor	許容誤差 Permissible error	縮尺 Scale			
		1: 1,000 (m)	1: 2,000 (m)	1: 5,000 (m)	1: 10,000 (m)
傾斜角 Inclination	5° (8.7%)	5	5	10	-
	5° 45′ (10 %)	5	5	10	-
	8° 30′ (15 %)	10	10	25	-
	10° (17.6%)	15	10	30	-
方位 Aspect	0.5 (11.25°)	8	10	15	20
	0.65 (15.°)	10	15	35	25
標高 Elevation	0.75 m	10	(10)	(10)	-
	1.0 m	15	10	(15)	-
	1.5 m	20	15	20~25**	(20)

注) *:()内の数値は図-4.3.6 からの推定値

Note) Values in parentheses are estimations from Fig-4.3.6

**：急峻地以外での許容値

Permissible value excluding very steep area

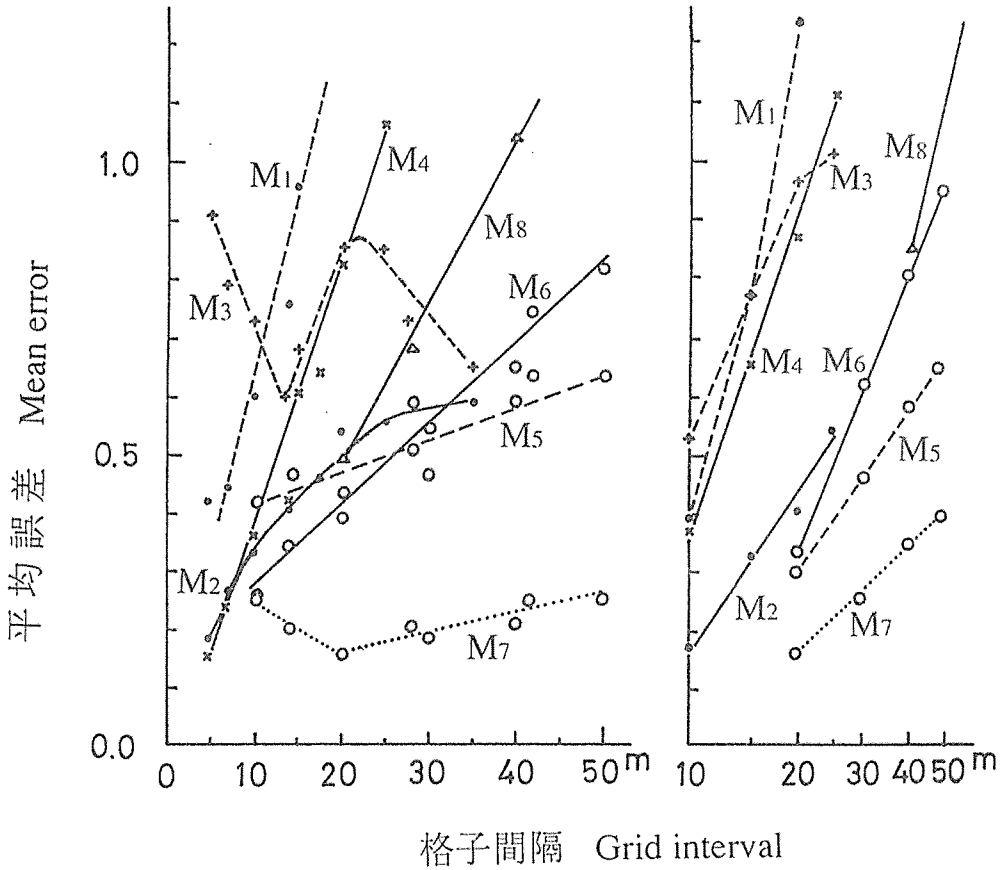
なお，格子内の任意の位置における傾斜角を推定するには，周囲の4格子点での傾斜角推定値から(4.3.8)式と同じ比例配分法によって求めればよいことが，付随して行なった実験で確かめられた。格子間隔を最小格子の2～5倍としたときに，元の最小格子の格子点位置の傾斜角を比例配分法で求め，相対誤差を算出したときの真値と比較したところ，格子間隔が最小格子の4倍のときでも誤差平均値の差はたかだか1°～2°程度であり，3倍のときにはモデル1，8を除いてその差は実用的にはほとんど無視しうる大きさだった。(4.3.12)式に基づいて算出した結果との比較でも，実用的な観点からみた場合の両者の違いはあまり問題にならないことも確かめられた。

3) 格子間隔の相違と方位の推定精度

方位の推定精度をみる場合，16方位に区分した読定値に対する推定方位のずれの量を誤差とした。このとき，多数の格子点での方位推定誤差の平均値が1であったとすると，その誤差は平均的には22.5°のずれを意味するわけである。

図-4.3.5は，格子点位置における斜面の方位の誤差平均値を示したもので，真値として(a)図では地形図からの読定値を，(b)図では最小格子間隔の場合の推定値を，それぞれ用いている。標準偏差は一般に傾斜角推定の場合よりもさらにバラツキが大きく，各点とも誤差平均値の0.8～1.5倍程度である。

図-4.3.5の(a)と(b)ではやや異なる部分もあるが，一般に，格子間隔が大きくなると，相対誤差の方が絶対誤差よりも大きくなる。図-4.3.5(a)では，格子間隔が小さいところで，緩



(a) 絶対誤差 Absolute error

(b) 相対誤差 Relative error

図-4.3.5 方位推定の平均誤差
Fig-4.3.5 Mean error in estimated aspects

注 Note) M1~M8: 図-4.3.2 のモデル地区番号に対応
Corresponding to the model area numbers in Fig-4.3.2

傾斜のモデルほど誤差が大きくなっている。その原因としては、①小起伏が存在することにより (4.3.3) 式に代入する X, Y 方向の勾配の符号が変化しやすいこと、②方位の境界値付近では読定の際に判定しにくいものが多いため、真値自体に誤差が含まれる可能性が強いこと、などがあげられる。

方位を8区分にした結果では、総じて図-4.3.5よりも僅かずつ誤差が大きくなる。これは、8方位区分では誤差平均値1に対して平均的には45°のずれが対応することになり、16方位の場合よりも境界値付近の値に対するずれの量が実際よりも大きく評価されてしまうためと考えられる。

複雑な地形のモデル1, 2, 4, 6, 8では、方位推定の誤差はほぼ格子間隔に比例して

いる。単純な地形のモデル5, 7が互いに似た誤差増加傾向を示すこととあわせて、これらの傾向には、地形の複雑さの度合いが反映していると考えられる。

傾斜角の場合と同様にして、図-4.3.5に基づいて方位推定の面からの格子間隔上限値を表-4.3.5のように求められる。誤差が0.5(11.25°)以下ということは、境界値付近の値が誤差を持つ確率が1/2以下とみなしうるから、一応満足しうる推定の水準と考えて差し支えないであろう。ただし、縮尺1:2,000については、許容誤差を0.5としたときの格子間隔上限値は急傾斜地の値をもとにして求めた。

4) 傾斜因子と標高の誤差の関係

傾斜は2点間の距離と高低差によって表わしうるものであるから、DTMで推定される傾斜因子の精度は、もともと標高推定の精度と密接な関連をもっている。従って、この関連についても、あわせて検討しておくのが妥当であろう。

近似方式別に標高推定の精度を検討してみると、近似方式の優劣は必ずしも確定的ではなく、むしろ地形の複雑さの度合いや格子間隔の大小によって異なることがわかる。モデル7のように著しく単調な地形では(4.3.8)式で十分であり、縮尺が1:5,000以下であるとか、格子間隔が最小格子の3倍以上の場合は(4.3.10)式、また、大縮尺で格子間隔が相対的に小さい場合は(4.3.12)式を用いると有効であることが、実験結果から示された。

図-4.3.6は、(4.3.10)式で推定した標高の誤差の平均値と格子間隔の関係を示したもので、次の諸点が指摘できる。

- ① 標高推定の誤差は、格子間隔が増すにつれてほぼ直線的に単調増加する。
- ② 誤差の大きさは、傾斜の緩急の違いよりも、むしろ「地形の複雑さ」の度合いによって左右される。

標高推定位置を沢、尾根、山腹の三つに区分し、それぞれの地形区分ごとに近似精度を検討した結果、①山腹での誤差は著しく小さいこと、②沢付近での誤差は著しく大きいこと、③沢での推定値は真値より高く、実際より上に浮き上がって推定され、尾根ではその逆になることが確かめられた。

図-4.3.7は、傾斜角、方位および標高のそれぞれの誤差の相互関連を示したもので、各図とも、格子間隔が大きくなるにつれてグラフは一般に右上方へ移動している。この図から次のことがいえる。

- ① 傾斜角および方位の誤差は、全体として標高誤差が増すにつれてやや直線的に増加する。
- ② 標高誤差が傾斜角および方位の誤差に与える影響は、格子間隔が小さいほど相対的に大きい。
- ③ 格子間隔が増すにつれて概して、方位誤差の方が傾斜角誤差よりも大きくなる傾向にある。
- ④ 傾斜因子の誤差特性は、全体としてモデルごとにかなり異なり様ではない。今回の実験結果だけではこれらを地形の縮尺、緩急別、複雑さの度合い等により区分できない。

5) 傾斜因子を考慮した適正格子間隔

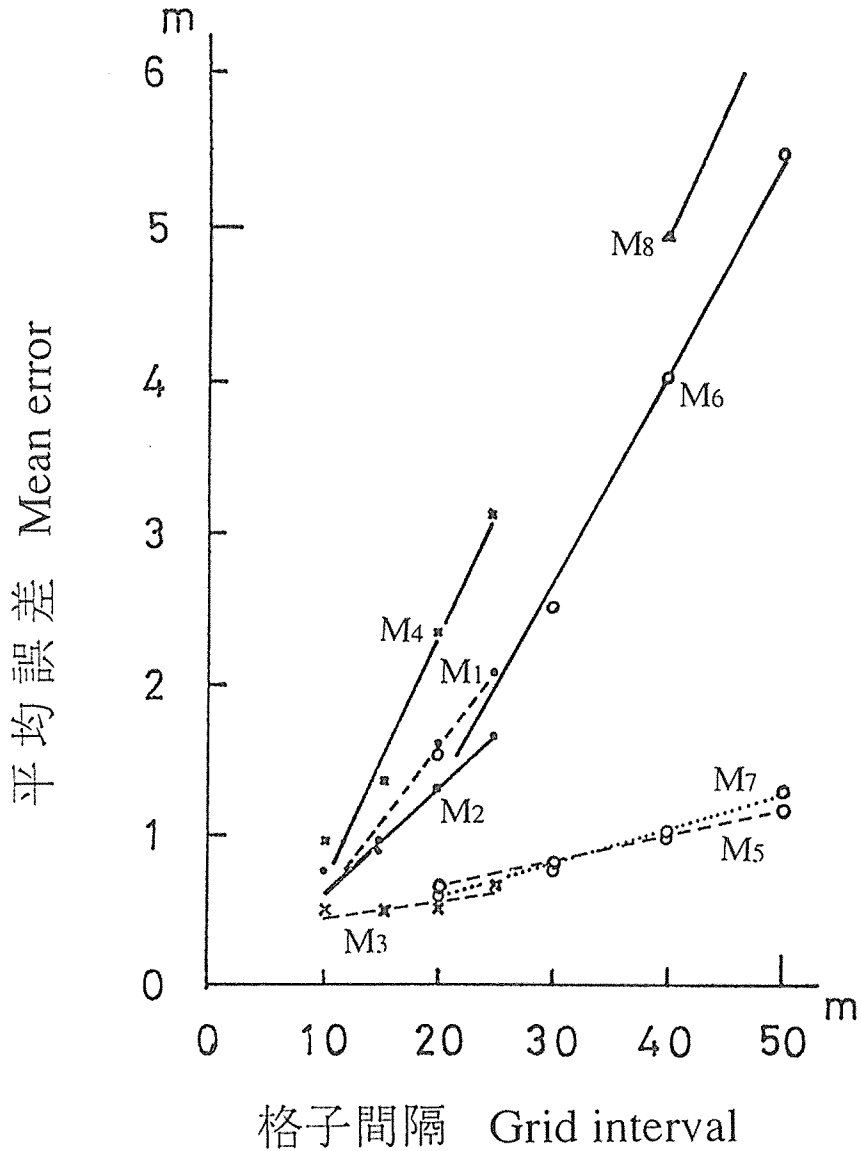
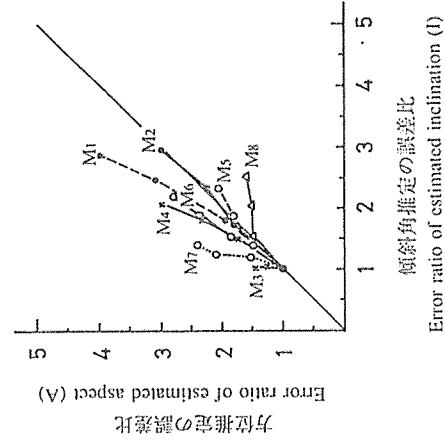


図-4.3.6 標高推定の平均誤差
Fig-4.3.6 Mean error in estimated elevations

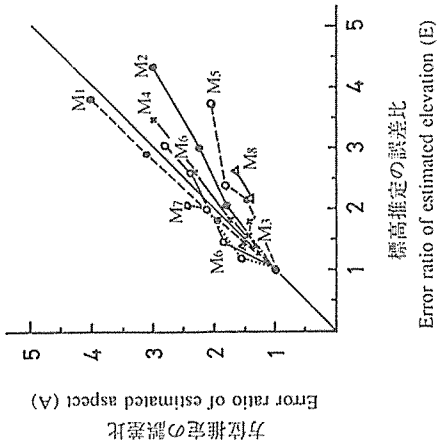
注 Note) M1~M8: 図-4.3.2 のモデル地区番号に対応
Corresponding to the model area numbers in Fig-4.3.2

傾斜角, 方位および標高の推定精度の面から得られる, それぞれの縮尺別にみた格子間隔上限値を表-4.3.5 に示す。標高推定の面からの上限値は図-4.3.6 から求めた。

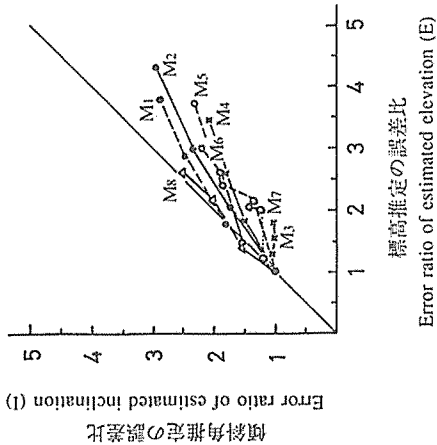
表-4.3.6 は, 表-4.3.5 から求めた各縮尺にたいする適正格子間隔である。これによると, 縮尺が 1:2,000 以上では傾斜が制限要因となり, 1:5,000 では標高が制限要因となってい



(c) 傾斜角と方位 Inclination and aspect



(b) 標高と方位 Elevation and aspect



(a) 標高と傾斜角 Elevation and inclination

図-4.3.7 標高、傾斜角および方位の誤差の相関関係
Fig-4.3.7 Co-relations among errors in elevation, inclination and aspect
注(Note) M1 ~ M8 : 図-4.3.2 のモデル地区番号に対応

Corresponding to the model area numbers in Fig-4.3.2

表-4.3.6 縮尺別・許容誤差別適正格子間隔

Table-4.3.6 Optimum grid intervals with permissible margin of errors for each map scale

適正格子 間 隔 Optimum grid interval	縮 尺 Scale		
	1: 1,000	1: 2,000	1: 5,000
5 m	I : 5° (8.7 %) A : 0.5 (11.25°) E : 0.75 m		
10 m	I : 8° 30' (15 %) A : 0.65 (15°) E : 0.75 m	I : 8° 30' (15 %) A : 0.5 (11.25°) E : 0.75 ~ 1 m	
15 m			I : 6° 45' (12 %) A : 0.5 (11.25°) E : 1 m
20 m			I : 7° 40' (13.5 %) A : 0.55 (12.5°) E : 1.5 m
25 m			* { I : 8° 30' (15 %) A : 0.58 (13.05°) E : 1.5 m

注 Note) I : Permissible error of inclination 傾斜角の許容誤差

A : Permissible error of aspect 方位の許容誤差

E : Permissible error of elevation 標高の許容誤差

* : 急峻地以外での許容値 Permissible value excluding very steep area

て、縮尺による特性が現われている。

許容誤差内で傾斜因子を把握しうるための傾斜因子を考慮した標準的な適正格子間隔は、縮尺 1 : 1,000, 1 : 2,000, 1 : 5,000 に対してそれぞれ 10 m, 10 m, 20 m という値になる。これらの値は、航空写真をもとに標高推定精度の面から検討して得られた適正格子間隔(75)よりも、さらに小さい値となっている。このことは、傾斜因子をできる限り正確に把握しようとするなら、標高推定のみを目的とする場合よりもさらに格子間隔を小さくする必要があらることを意味している。

4. 格子状数値地形モデルによる山地平均傾斜の推定精度

山地の全体的な地形状況を表わす指標として、「平均傾斜」は最も普遍性を持つものであり、伐出作業をはじめ各種の森林作業計画などの立案に際してきわめて重要な意義を持っている。林業工学分野においては、森林利用学的地形分類法 (20, 21, 23) の評価指標である地

形指数を求めるうえで、縮尺 1 : 50,000 の地形図に基づく、面積約 1,000 ha 程度を対象とした集運材地域に対する平均傾斜の算出法が提案されている。そこでは、地形図上での同心円を用いた等高線の読み取りによる方法とあわせて、図上もしくは野外で等高線長を計測することにより平均傾斜を決定する方法についても取り上げられている。しかし、これらは時代的な制約により、いずれも手作業を前提としており、地形要素の計測に要する労力はきわめて多大なものである。DTM に基づいて前節の方法によって平均傾斜を求めることにすれば、地形計測作業を効率化できる。本節では、DTM による平均傾斜の推定精度について検討した結果について述べる。

(1) 平均傾斜の推定方法

DTM に基づいて平均傾斜を把握しようとする場合、格子間隔の如何が本質的な重要性を持つので、本節では、格子間隔の大小が平均傾斜の値に及ぼす影響を把握するための実験を行った。

DTM に基づいてある対象地域内の平均傾斜(平均傾斜角 I , 平均方位角 A)を求めるには、その地域内に含まれる全ての格子点もしくは格子面(その総個数 N)における各傾斜角 I_i と方位角 A_i から、次式により算出すればよい。

$$I = \sum_{i=1}^N I_i / N \quad \dots\dots(4.4.1)$$

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^N \cos A_i \neq 0 : A = \tan^{-1} \frac{\sum_{i=1}^N \sin A_i}{\sum_{i=1}^N \cos A_i} \\ \sum_{i=1}^N \cos A_i = 0 : \sum_{i=1}^N \sin A_i > 0 ; A = \frac{\pi}{2} \\ \sum_{i=1}^N \sin A_i < 0 ; A = \frac{-\pi}{2} \\ \sum_{i=1}^N \sin A_i = 0 ; A = \infty ; (\text{平坦地の場合}) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots(4.4.2)$$

格子点位置での傾斜因子算出値に基づく平均傾斜の推定においては、その算出値が格子点周辺で単位格子の面積分に相当する区域を代表するものと考えられる。ある程度以上の面的な広がりを持つ対象地域においては、格子点位置と格子面のそれぞれに基づく平均値相互の違いは無視しうるものになると期待される。

(2) 実験方法と資料

今回の実験では、単位となる傾斜因子を本章第 3 節の (4.3.3) 式に基づき、格子面について求めることとし、前節で用いた、名古屋大学稲武演習林月ヶ平地区の、実長 10 m の最小格子間隔を持つ DTM を実験対象とした。実験方法は、境界線内に含まれる格子点のみを演算対象として格子間隔を順次 10 m づつ拡大していき、各格子間隔における 4 格子点内の回帰平面に関する傾斜角と方位角を求めたうえで、(4.4.1) 式と (4.4.2) 式により平均傾斜角と平均方位角を求めるものである。

(3) 結果と考察

表 4.4.1 は、格子間隔別に算出した平均傾斜角と平均方位角を取りまとめた結果である。また、図-4.4.1 に同表の平均傾斜角 (θ) と平均方位角 (α) を格子間隔別に図示した。

1) 格子間隔と平均傾斜角

表 4.4.1 および図-4.4.1(a) から、格子間隔 D が広がるに連れて平均傾斜角 θ は全体として単調減少していることがわかる。格子間隔が大きくなると、最小値は大きくなり、最大値は小さくなる傾向があり、その結果として値域が小さくなる。傾斜角の標準偏差は、格子間隔が 10~40 m の範囲でやはり単調減少するが、70 m 以上ではほぼ一定の値域におさまる。図-4.4.1(a)における θ と D との関係を指数関数と仮定し、最小二乗法を用いて近似した場合の結果は、下記の通りであった。

$$\theta = 25.13 \cdot \exp(-0.003295 \cdot D); \text{相関係数 } r = 0.947$$

図-4.4.1(a)の結果を、本章第 3 節の 8 個のモデルについての平均傾斜と重ね合わせて描いた結果を図-4.4.2 に示す。同図には格子間隔が 10~50 m の範囲しか描かれていないが、各モデルとも格子間隔が拡大するに伴って平均傾斜角が漸減する傾向を持ち、名古屋大学稲武演習林月ヶ平地区(縮尺 1:5,000)の平均傾斜は 8 モデルのほぼ中庸にあることがわかる。

格子間隔が大きくなるに伴って平均傾斜が減少するのは、ある区域内で標高値がランダムに分布しているときに一定の割合で標高点が間引かれたとすると、ある 2 点間に存在していた傾斜変動の大きな部分が除去されて平滑化されてしまい、2 点間の高低差に基づく傾斜が平均して緩になると似た理由によるものと考えられる。

格子間隔が大きくなると平均傾斜角が単調減少するという、表-4.4.1 および図-4.4.2 の結果を踏まえるならば、縮尺が小さい地形図を対象としてある格子間隔で計測した平均傾斜角は、縮尺の大きい地形図において格子間隔を広げたのと同じ効果を持つはずであるから、微地形の持つ傾斜情報がかなり失われてしまっていることになる。例えば、森林利用学的地形分類法では、通常、1:50,000 の地形図を対象として半径 500 m と 250 m の同心基円を用いているが、この長さを機械的に格子に基づく平均傾斜計測法に適用するとすれば、微地形の持つ傾斜角の真値よりもかなり小さい値(図-4.4.1(a)の場合では、少なくとも 3/4 以下)になると推測される。従って、平均傾斜角の計測に際しては、原図として用いる地形図等の縮尺如何では、計測結果にかなりの真値からの食い違いが含まれうることを、十分銘記しておく必要がある。

2) 格子間隔と平均方位角

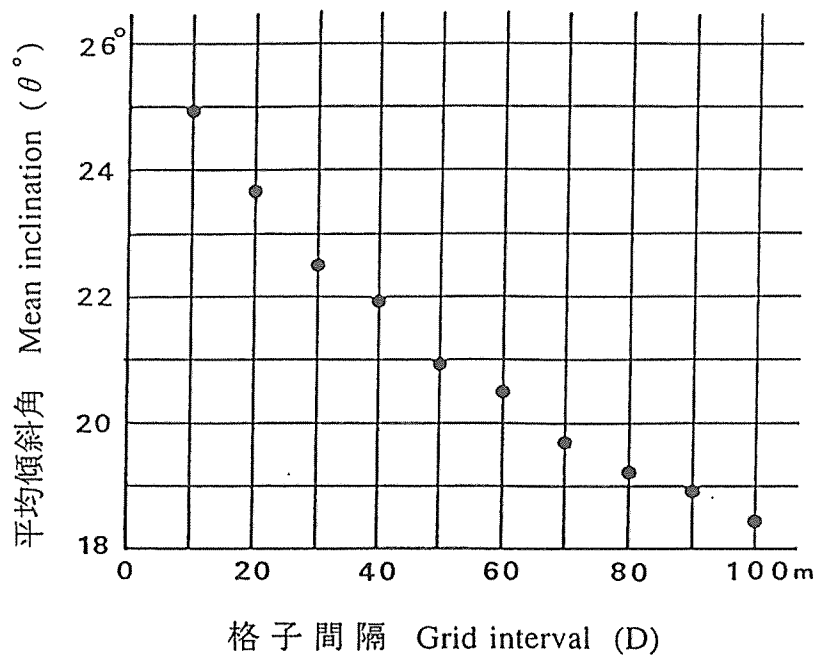
表-4.4.1 および図-4.4.1(b)を見ると、平均方位角 α は、格子間隔が 10~50 m の範囲内ではほぼ一定しており、50 m 以上になると平均値が徐々に大きく変動していくことがわかる。格子間隔が 100 m になると平均値の変動幅が 6°を越す。しかし、全体として、格子間隔の拡大に伴う平均方位角の変動幅は、傾斜角の変動幅に比して小さい(格子間隔が 10 m~100 m とを比較すると、前者と後者の差は 3.6°)。

表-4.4.1 格子間隔別平均傾斜の推定値
Table-4.4.1 Estimation of the mean slope inclination according to the grid interval

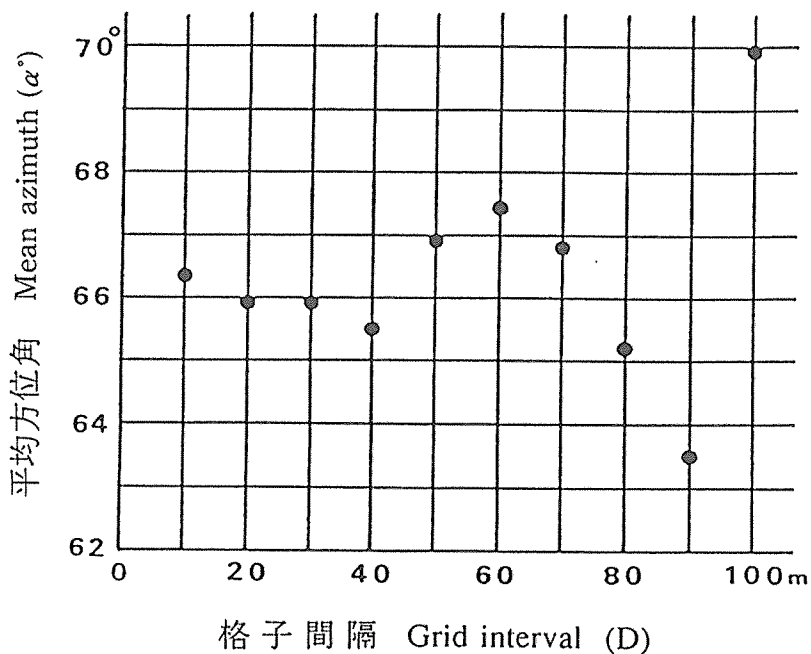
格子間隔 Grid interval D (m)	格子数 Size of grids	演算対象 格子点数 Number of the objective grid points	単位格子 の面積 Area of the unit mesh (m ²)	傾斜角 Inclination			平均方位角 Mean azimuth α °	
				平均値 Mean θ °	最小値～最大値 Minimum～ Maximum (°)	標準偏差 Standard deviation (°)		変動係数 Coefficient of variation
10	124×144	7,928	100	24.9	0.6～55.5	10.0	0.403	66.3
20	62×72	1,917	400	23.7	0.7～46.7	9.1	0.384	65.9
30	41×48	824	900	22.5	1.6～44.2	8.2	0.365	65.9
40	31×36	447	1,600	21.9	2.6～44.4	7.5	0.341	65.5
50	24×28	277	2,500	20.9	2.2～40.0	7.5	0.358	66.9
60	20×24	188	3,600	20.5	2.4～35.8	6.9	0.338	67.4
70	17×20	132	4,900	19.7	5.4～31.7	5.8	0.296	66.8
80	15×18	100	6,400	19.2	3.2～32.5	6.2	0.322	65.2
90	13×16	73	8,100	18.9	6.4～30.0	5.9	0.311	63.5
100	12×14	58	10,000	18.4	6.7～29.1	6.2	0.335	69.9

注) 傾斜角, 方位角等の算出値は, 回帰平面方式によるもの。

Note) Values of the inclination and aspect were calculated by the regression plane method.



(a) 平均傾斜角
Mean inclination



(b) 平均方位角
Mean azimuth

図4.4.1 格子間隔別・平均傾斜角と平均方位角

Fig-4.4.1 Mean inclinations and mean azimuths according to grid intervals in the objective area

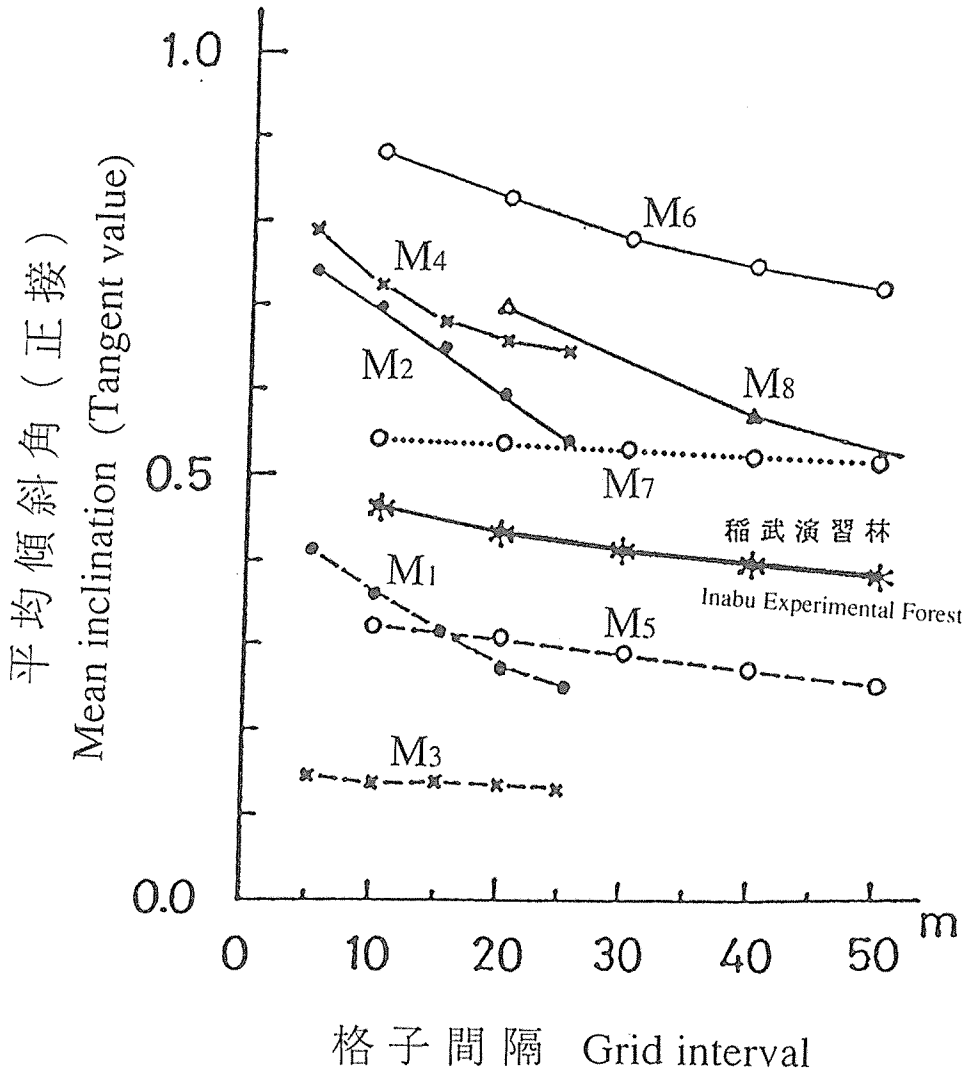


図-4.4.2 平均傾斜と格子間隔との関係

Fig-4.4.2 Co-relation between the grid interval and the mean inclinations

注 Note) M1~M8: 図-4.3.2 のモデル地区番号に対応

Corresponding to the model area numbers in Fig-4.3.2

5. まとめ

山地の地形は、均一の特徴をもつ微小な斜平面の集合と考えることができる。その場合、微小斜面に対する計測手法の精度を明らかにしておくことが、地形計測・解析結果の信頼性を高めるうえで不可欠の要件となる。そこで本章では、DTM を用いて任意の地点や区域における山地の局所地形量の計測を行なう代表的な手法を対象として、そのアルゴリズムの特徴と精度についての検討を行った。

先ず、格子点を挟む2本の等高線の点列データから直接、格子点での傾斜因子を算出するためのアルゴリズムを提起し、その算出結果の地形図に対する適合性を検討した。手作業の場合でも判断するのが困難な、沢筋で等高線が著しく屈曲している部分を除けば、本アルゴリズムを用いて算出した方位角は、等高線図ときわめてよく対応しており、また、2本の等高線に至る距離に基づいて算出した傾斜角は、手作業による場合とはほぼ等しい値が得られた。作業労力の面を考えあわせれば、本アルゴリズムを用いる方が、手作業によるよりもはるかに簡便であり、また人為に基づく誤差の入り込む可能性が相対的に少ないから、精度の点でも手作業よりは優位性をもつことになる。

次に、格子状DTMに基づく傾斜因子の推定精度の把握を目的として、傾斜近似方式の違いによる影響、格子間隔の違いによる影響、縮尺別適正格子間隔の3点を解明するため、各種地形図を用いて実験を行った。その結果、傾斜の近似方式としては、格子の4隅にある格子点の標高のみを用いる最も単純な2次式近似の(4.3.3)式を用いれば実用上は十分であること、および、傾斜因子をできる限り正確に把握する目的の場合、一般土木工学におけるような標高推定のみを目的とした場合よりも、さらに格子間隔を小さくする必要があることが明きらかになった。そして、実験結果を踏まえて、格子状DTMを用いて傾斜因子を把握する際に有用な、傾斜因子の推定精度を考慮した縮尺別の適正格子間隔を求めた。

山地の全体的な地形状況を表す指標として、平均傾斜は最も基本的なものであるが、従来の森林利用学的地形分類法で用いられてきた平均傾斜の計測法は、小縮尺の地形図を対象として手作業でデータ採取を行なうことを前提としたものであり、そのDTMによる系統的な方法への置き換えは急務となっている。山地の平均傾斜角については、格子間隔が大きくなるに連れて漸減傾向を持つこと、それに対して平均方位角に関しては、格子間隔が10~50mの範囲ではほぼ一定しており、それ以上の格子間隔では変動が大きくなるが、格子間隔の拡大に伴う平均方位角の変動幅は、平均傾斜角の変動幅よりも小さいことが確かめられた。

小縮尺の地形図に基づいて平均傾斜を求める場合には、微地形の持つ傾斜情報が最初からかなり失われているので、微地形の真値よりも大幅に低い値となっていることに留意する必要がある。

V 格子状数値地形モデルに基づく山地流域の構造解析法の開発

1. 林業工学分野における山地流域の構造解析の意義

山地流域の地形構造は、小流域を単位とするネットワークと見なすことができる(102, 105, 107)。山地小流域の分布特性や流域構造内での位置関係などを示す情報は、従来から水文学分野においてよく用いられているが、林業工学分野における各種計画を立案するうえでも林班、小班などの境界線データと並んで基礎的な情報となりうるものであり、地形解析の一環として重要な意義を持つ。たとえば、林道網計画の立案に際して、林道路線の通過候補地点ごとの排水処理の必要性の有無やその規模などを推定する情報を引き出したり、あるいは、地形の局所的な複雑さを直接的に把握したりできる可能性がある。後者が実現すれば、森林作業の場としての林地の地形解析・地形評価を行ううえでの、新たな指標を得ることも可能となるであろう。

水系や尾根線の抽出方法には、周囲の格子点標高との相対的な関係に基づき、①ある格子点での直交する2軸、もしくはそれを45°ずらして設定したもう1組の直交する2軸の計4軸方向で、傾斜変化率が凹型か凸型かを基準として判別する方法(84, 114)と、②ある格子点からその周囲で標高の一番低い格子点に向けて水系を発生させる方法(48, 51, 62, 123, 125)の2種類が、通常、よく用いられている。ここでは、物理的な意味がより明確であると考えられる後者に基づくことにする。

数値地形モデル(DTM)を用いて小流域を区分する場合、従来は、①小流域の境界線データを個々に採取しておいて「面処理」(第II章第4節を参照)を行うか、②水流の合流点位置に順次ラベルを追加入力していく(62)か、のどちらかの方法をとることが多かった。しかし、これらの方法ではデータ入力方法が繁雑になりすぎるきらいがあり、また、最初に入力したデータによって小流域の大きさや区画等の取り扱い方が固定化してしまうため、小流域の区分の仕方自体について再検討しにくい、などの難点がある。

地理学や水文学の分野においては、近年、水系網をコンピュータ処理によって系統的に抽出するための処理プログラムが作成されるようになった(123, 125)。しかし、それらのプログラムの作成精度の実態は、林業工学分野での微地形までも読定したいという要求からは、かなりかけ離れているように見受けられる。

そこで、本章では、手作業を要するデータ処理工程を極力少なくすることを主眼として、格子状DTMに基づき山地の小流域を自動的に区分する方法について、検討した(49, 52)。

2. 流域構造解析の基本的アルゴリズム

(1) アルゴリズムの概要

山地の流域構造を解析するための基本的なアルゴリズムの概念図を図-5.2.1に示す。

(2) 方位図の作成

1) 方位図(原図)の作成

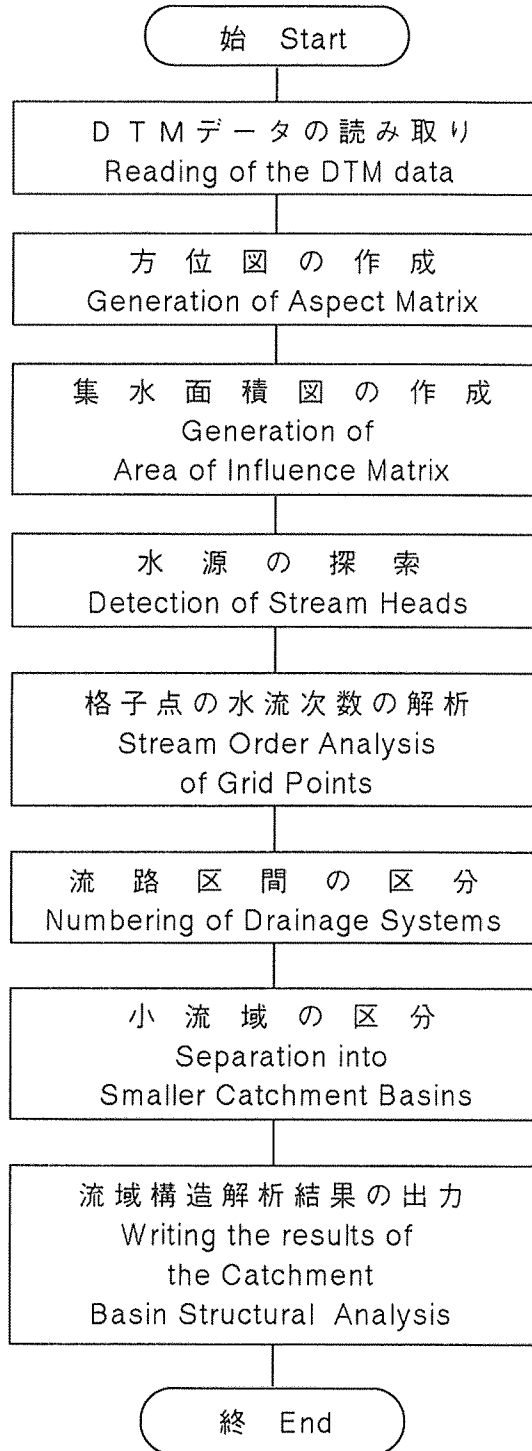


図-5.2.1 流域構造解析のアルゴリズムの概要

Fig-4.2.1 Flow chart of the algorithm for analysing the structure of the catchment basin in mountainous forest areas

先ず、DTM に基づいて 8 方位を基準とした方位図を作成する。任意の格子点 P_0 における方位は、その周囲にある 8 個の格子点のうちで P_0 よりも標高が低く、最急勾配をなす格子点に向かう方向とする。 P_0 の周囲にある格子点の番号を図-5.2.2 に示すように $P_i (i=1\sim 8)$ とし、 P_0 と P_i との間の結合番号を i とする。 P_i 点の高さを $H(P_i)$ と表わすことにすれば、 P_0 点での方位 $A(P_0)$ は次式で表わせる。

$$H(P_i) = \min \{ H(P_j) \mid j=1, 2, \dots, 8 \}$$

$$A(P_0) = \begin{cases} i : H(P_0) > H(P_i) \\ 9 : H(P_0) \leq H(P_i) \\ 0 : P_i \text{ が対象地域外} \end{cases} ; 1 \leq i \leq 8$$

実際の演算においては、上式の P , H , A はそれぞれ 2 次元配列の記憶場所をとるものである。上式で $A(P_0)=9$ となる点は、局部的な窪地等を意味するものであるが、その周囲の状況を勘案して個々に処理する必要があるため、今回の検討の対象からは除外した。

2) 方位図 (原図) の修正

沢の合流点付近などでは、図-5.2.3 に示すように隣りあった 2 点の方位が真正面からぶつかりあうことがある。これは、DTM が格子点の標高により構成されているために発生し、本来ならばそれら 2 つの格子点間に合流位置が定まるはずのものである。これをそのままにしておくと、後述の集水面積図を作成する段階で、計算機の演算上、無限ループを構成

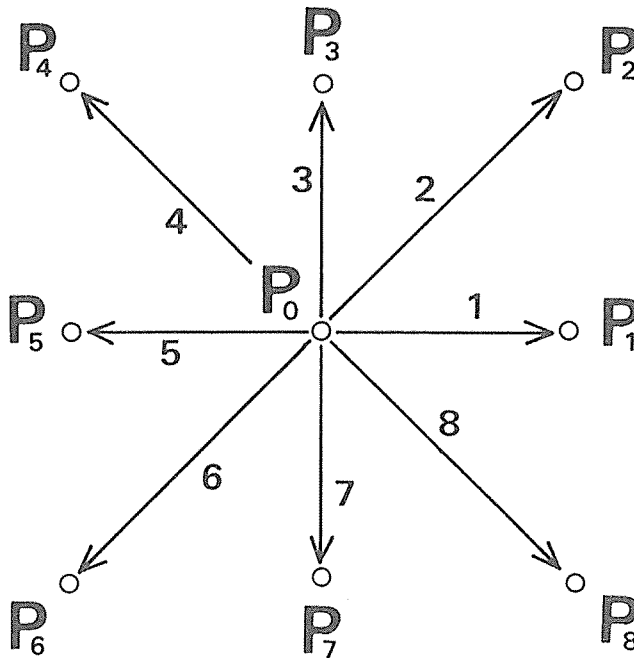


図-5.2.2 8 方位区分
Fig-5.2.2 Aspect classification into eight groups

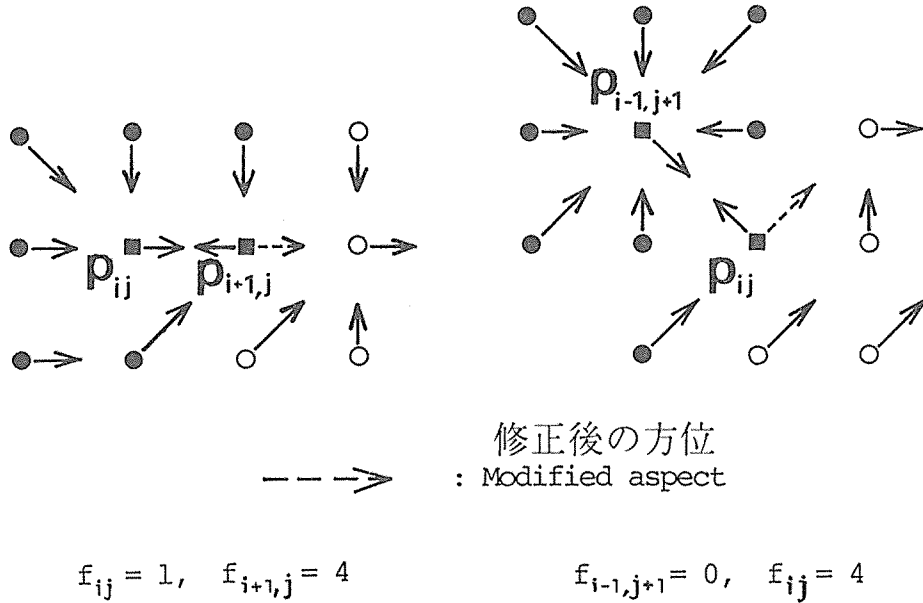


図-5.2.3 ぶつかりあう方位の修正

Fig-5.2.3 Concept of the correction for one of the aspects which collide with each other at two neighboring grid points

注 Note) f : 方位修正の自由度 Degree of freedom of the aspect modification in a grid point

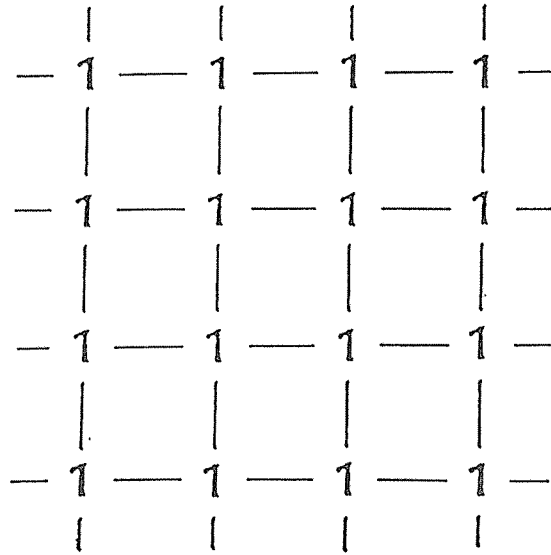
してしまうことになって不都合であるから、局部的に方位を修正しなければならない。従って、集水面積図の作成に先だって、方位図の原図について、ぶつかりあう方位となる隣接格子点同士の組合せがあるかどうかを、必ずチェックする必要がある。

さて、ある任意の格子点 P_0 の周囲にある点 P_i の方位が P_0 に向かっているとき、 P_i を P_0 の上流点、 P_0 を P_i の下流点と呼ぶことにする。 P_i の上流点 P_i' 、またその上流点 P_i'' 等々も、当然 P_0 の上流点となる。 P_i を P_i' 、 P_i'' 等々と区別する必要がある場合には、 P_i を P_0 の隣接上流点とよぶ。いま、 P_0 と P_0' の方位がぶつかりあっているとき、 P_0 の周囲にある 8 格子点中で P_0 および P_0' に関する非上流点の数をもって、 P_0 における「方位修正自由度」と定義する。図-5.2.3 において黒丸が上流点を、白丸が非上流点を表わす。

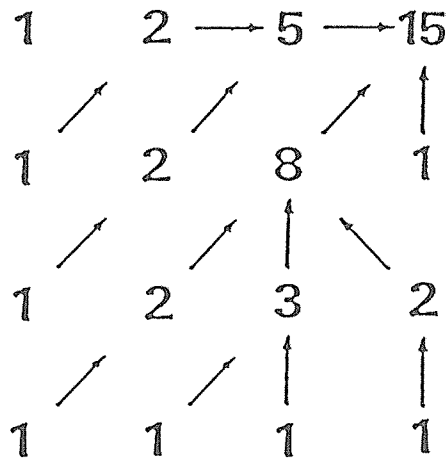
方位修正の手順は、①方位の向き合う 2 つの格子点 P 、 P' について、それぞれ「方位修正自由度」 f の値を求め、② f 値の大なる方の格子点 P_a の方位を、 P_a に隣接する非上流点のうちで標高が最低の点に向かうように修正すればよい。

(3) 集水面積図の作成

方位図に基づき集水面積図を作成する。各格子点に 1 単位ずつの面積を与えることにすると、任意の格子点 P_0 における集水面積 $W_0 (= W(P_0))$ は、 P_0 自身の面積と P_0 の上流点の総面積を合計したものとなる (図-5.2.4 参照)。



(a) 初期値設定
Setting of initial values



(b) 集水面積値の加算
Addition of the catchment area values to the neighboring lower grid point according to an aspect at each grid point

図-5.2.4 集水面積図の作成
Fig-5.2.4 Concept of the catchment-area-matrix generation

$$W_0 = 1 + \sum_{i=1}^8 W_i ; W_i = \begin{cases} W(P_i) : P_i \text{ は } P_0 \text{ の隣接上流点である} \\ 0 : P_i \text{ は } P_0 \text{ の隣接上流点ではない} \end{cases}$$

以上の演算をスムーズに実行するためには、各格子点において周囲の8格子点との方位の向きに関する相互関係が検索しやすくなっていることが望ましい。そこで、あらかじめ「面制御行列」(第II章第4節を参照)を用いて、方位図のデータ変換を行っておく。

(4) 水系図の作成

方位図と集水面積図に基づいて、対象流域における集水面積の大きい水流の順に番号をつけ、水系図とよぶ2次元配列の記憶場所に水流番号で水流の経路を記録する。そのために先ず、水源位置の決め方が問題となる。

1) 水源位置の確定

集水面積図において、一定の大きさ以上の面積値を持つ格子点を機械的に水源とみなした場合、均整な長い斜面で平行に落水線が走るようなところへ適用すると、それらすべての落水線が独立した水流とみなされてしまう(これを疑似水流と呼ぶことにする)危険性がある。そこで、図-5.2.5(a~d)に示すように水源位置の発生パターンを定めることにする。

この図の考え方の基本は、ある格子点の位置で等高線が120°以内の内角で折れ曲がっていれば、そこは水系の延長線上の点であるとみなすこととし、模式的に破線で描いた等高線に対して隣接の格子点を持つべき方位のパターンをあらかじめ定めておき、それに合致したなら水源として確定するものである。

内角が120°の場合、当該格子点の周りで等高線が通りうる主要な型は図-5.2.5(a~d)の4つになる。水源となるべき二重丸の当該格子点は、一定の集水面積値 W_0 以上であることを大前提とし、その上流側にある3つの連続した黒丸印の格子点のうち、少なくともまん中の点は隣接上流点を持っていることを条件とする。黒い矢印は必ずその方位を持つべきことを、また白い矢印はどちらの方位を持っていても差し支えないことを意味する。水源位置を各水流の上端とする。水源探索を容易にするため、あらかじめ集水面積図上で一定の面積値 W_0 以上を持つ格子点を、高密度記憶方式による「面制御行列」内の1つのビット・プレーンを用いて印を付けておく。

2) 水系網の抽出

「面制御行列」内で印をつけられた格子点のうちで、走査順に抽出した任意の点から、「水源」であるか否かの判別を開始する。このとき同時に、方位図の情報を手がかりにして隣接する下流点の位置を決定する。抽出された格子点が水源であれば、「面制御行列」内の1ビット・プレーンを用いて「水源」であることを、また他の1ビット・プレーンに「水流上」であることを記録する。その格子点が水源でなければ、隣接下流点に移って同様の判別を行う。

「水源」の格子点が探索されたなら、その下流格子点にも「水流上」の印をつけ、順次、対象とする流域の最下流端点まで同様の操作を繰り返す。2番目以降の「水源」から下流格子点を探索する場合には、既に抽出されている「水流上」の点に到達したら、そこで水流の探索を中止する。

3) 水系網の等級区分方法

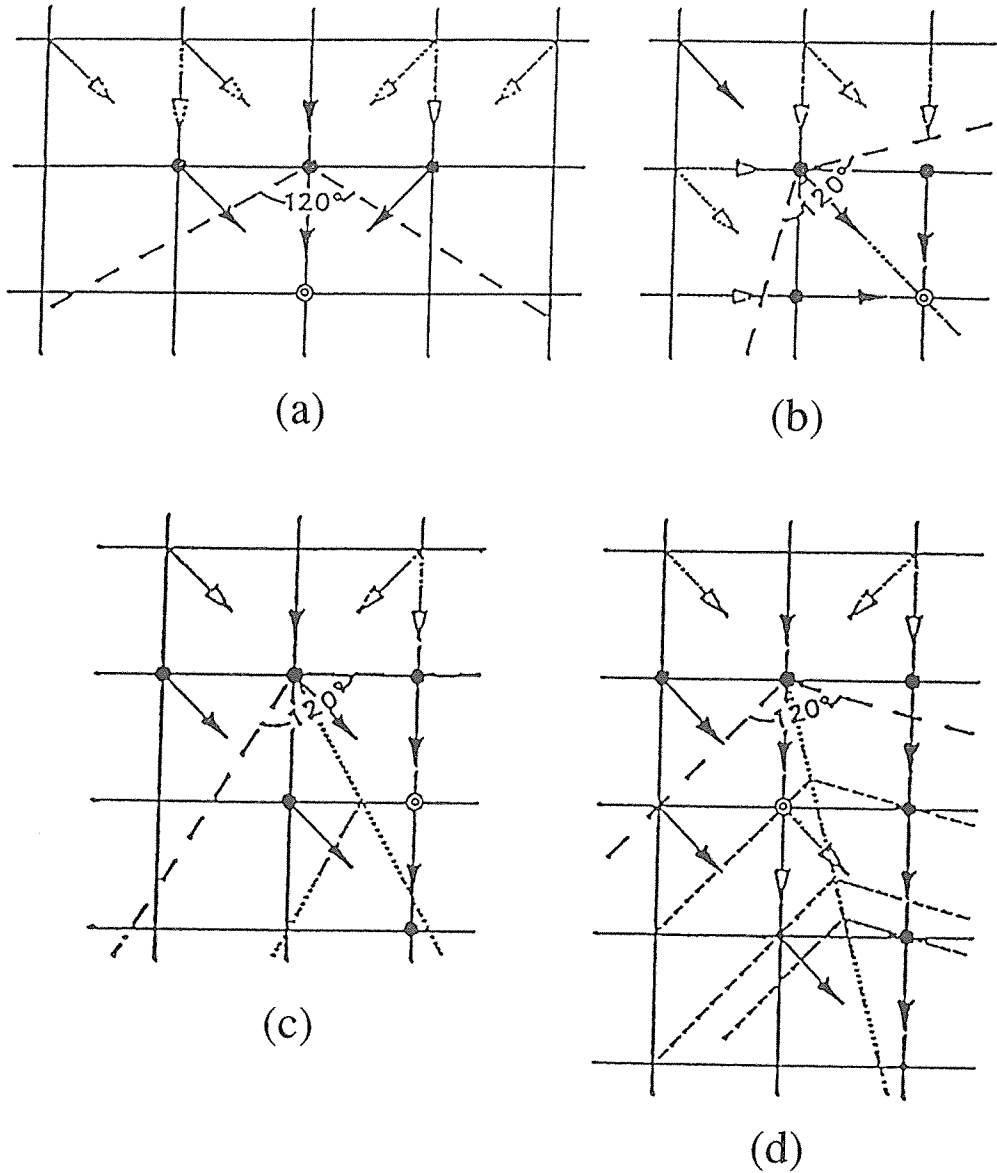


図-5.2.5 水源発生 の 4 パターン
 Fig-5.2.5 Four patterns of the streamhead generation

- 注 Note) 二重丸：水源となる格子点
 Double circle : Grid point to become the streamhead
 矢印：落水線の方向
 Arrow : Direction of the maximum slope inclination at each grid point
 破線：等高線
 Broken line : Contour line
 点線：等高線の内角の二等分線
 Dotted line : Bisector of the interior angle of a contour line

今日、地理学分野でもっとも普及している水系網の格付け方法は、ホートンが提唱し、ストラーラーが改良した水流次数の区分である(108)。これは水流の流路を、合流点から合流点まで、最上流部では水源から合流点まで、最下流部では合流点から流域最下流端点までの流路区間に分割したうえで、水源から発生する細流を1次水流とし、2本の1次水流が合流すると2次水流の区間になる、とするものである。一般的には、次数の等しい ω 次水流が2本合流すれば $(\omega+1)$ 次水流になるが、低次の水流が合流しても次数は変わらない。

ここでの課題は、先に抽出された水流上の格子点に対して、系統的に次数区分を行う方法を開発することである。

4) 格子点の系統的な次数区分方法

各格子点を水流上の点とみなした場合の、格子点における水流次数を記録・管理するための「次数行列」を2次元の配列として確保し、各格子点に初期値0を与えておく。

この「水源」位置から1次流が始まるものとする。走査順に抽出した任意の「水源」の水流次数を1とし、水流上にある下流格子点と同じ水流次数を与える。流域最下流端点まで到達したら、走査順に次の「水源」位置を抽出し、既出の水流に合流するまで同様の操作を行う。

既出の水流に合流したら、合流点とそのひとつ手前の流出点の位置を2つのビット・プレーンを用いて記録する。ストラーラー方式においては、「合流点」位置が上流側にある複数の流路区間と下流側にある流路区間との節点になるのであるが、DTMに基づき系統的に格子点の水流次数を決定しようとする場合、1つの格子点に対してはただ1つの水流次数を割り当てることが望ましい。そこで、合流点を流路区間内の上流側の端点、流入点を下流側の端点として取り扱うことにする。

さて、いま探索中の水流の次数を ω 、既出の水流のそれを μ とすると、合流点における水流次数の演算は、次の手順に従って行えばよい。

- ① $\omega < \mu$: 水流下流点の探索を中止し、次の「水源」を走査する。
- ② $\omega > \mu$: 合流点の水流次数を ω 次に修正する。順次、既出水系上の下流格子点の次数を ω 次に修正する。
- ③ $\omega = \mu$: 既出水系上の隣接上流点の水流次数 ν を調べる。
 - (③-a) $\nu = \omega$: 合流点の水流次数を $(\omega+1)$ に修正する。順次、既出水系上の下流格子点の水流次数を $(\omega+1)$ に修正する。
 - (③-b) $\nu = \omega - 1$: 水流下流点の探索を中止し、次の「水源」を走査する。

この③のチェックは、現在探索中の流路区間の次数が一段階前に $(\omega-1)$ 次であって、しかも当該の合流点で ω 次に次数が変化している場合に、現在の次数が ω 次であることから、単純に合流点の次数と比較したのでは、合流点の次数を誤って $(\omega+1)$ 次に変化させてしまう危険があるので、それを防ぐためである。

以上の手順において、合流点の上部には水流次数の変更の影響は及ぼされないから、抽出される「水源」の走査順位がどのように変化しようとも、一意的に水系上にある各格子点の水流次数を確定することができる。

図-5.2.6に、流路区間の次数が系統的に変化する過程を模式的に示した。図-5.2.7は、

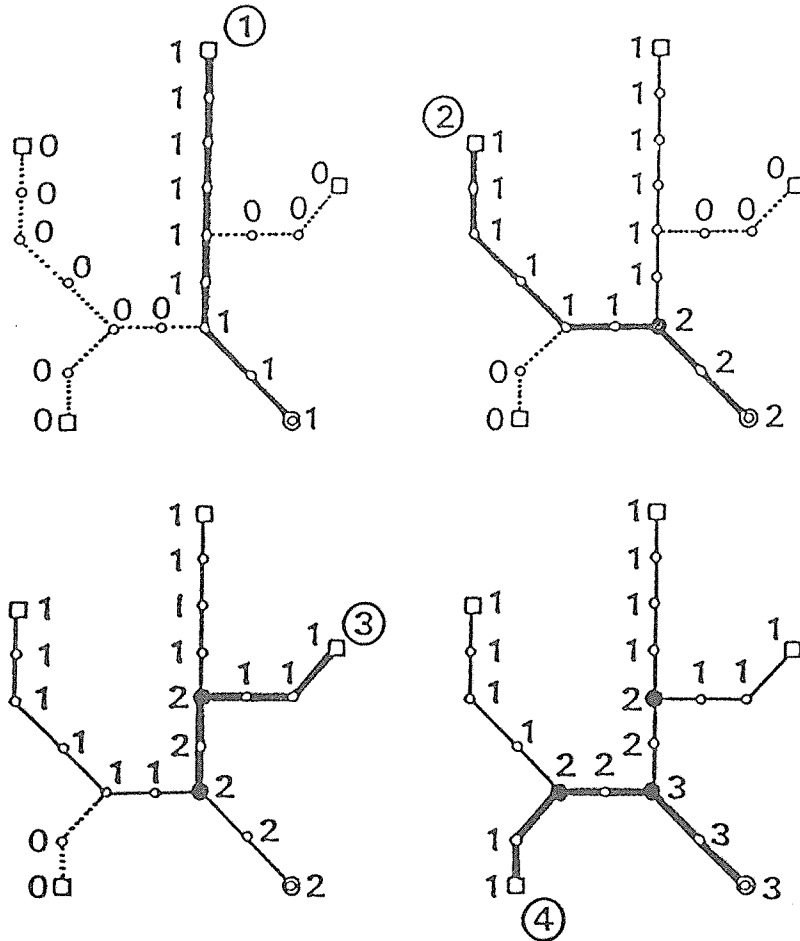


図-5.2.6 格子点の水流次数の決定方法

Fig-5.2.6 Concept of the determination method of the stream order of grid points

注 Note) 四角印の点 Square : 水源位置 Streamhead
 丸内の数字 : 水源が抽出された順番
 Digital number in a circle : Detected order of the streamhead
 その他の数字 : 格子点の水流次数
 The other digital numbers : Stream orders of grid points

水系として抽出された格子点の水流次数を模式的に示したものである。星印のついた格子点は「水源」を、白丸は水流上の点を、また黒丸は合流点をそれぞれ意味する。

5) 流路区間の番号付け

流域最下流端点を出発点として、流路区間の探索を行う。流路区間番号は、1から始まる通し番号を付ける。水系上の隣接上流点を探索して、合流点に至るまで、抽出された格子点の下流点と同じ流路区間番号を付ける。

合流点にきたら、まずその座標位置を記憶させておき、水流次数の小さい方の隣接格子点

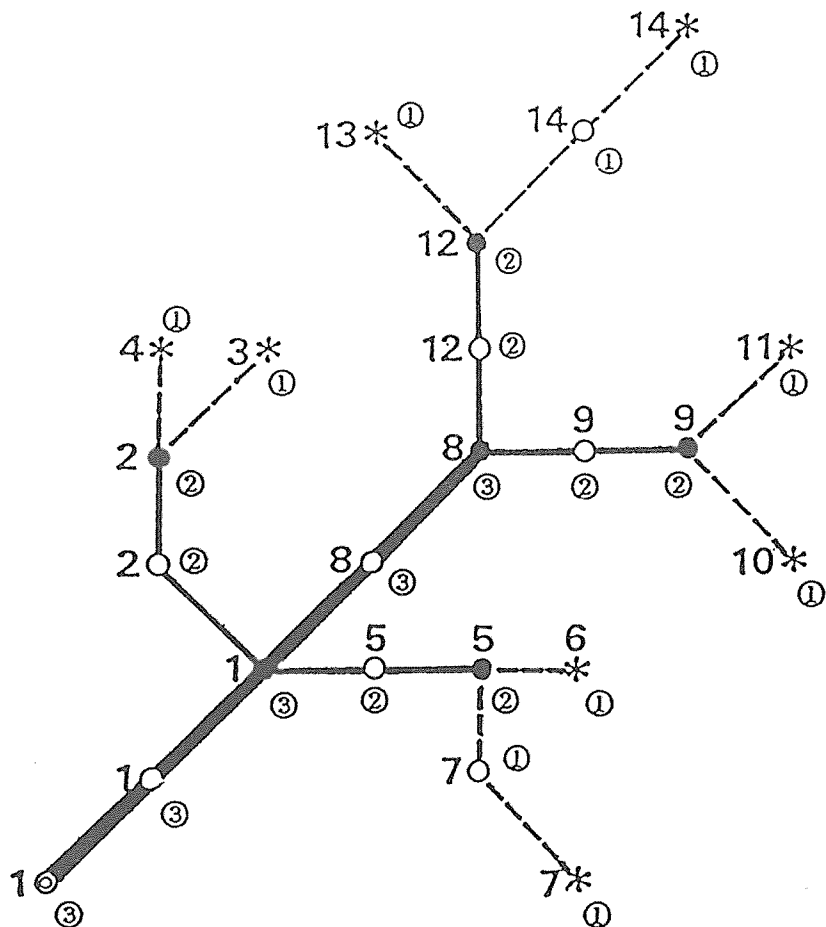


図-5.2.7 格子点の水流次数区分と流路区間の番号付け
 Fig-5.2.7 Stream order classification of grid points and numbering of drainage sections

注 Note) 丸印内の数字 Digital number in a circle: 水流次数 Stream order
 その他の数字 The other digital numbers: 流路区間番号 Drainage segment numbers

を次に探索する流路区間として抽出し、1つ大きい通し番号を付ける。水流次数の等しい複数の水流が合流する場合、集水面積値に相違があるなら面積値の小さい方の格子点を選択する。水流次数も集水面積値も等しい複数の水流が合流する場合には、合流点のもつ方位となす合流角度が大きくなる方の格子点を選択する。それもまた等しい場合、走査順にどちらかを選択する。

上流の合流点までたどりついたなら、その合流点の座標位置を先に取り上げた合流点とは別の記憶場所に記憶させておき、上記と同じ手順で水流の流路区間の探索を繰り返す。

流路区間の番号付けの探索が「水源」位置まで到達したなら、その流路区間の下流にある合流点位置までもどる。そこで未探索の隣接上流点があるかないかを探索して、もし存在す

るなら、そこから先と同様にして、新たな上流側流路区間の探索を行う。未探索の隣接上流点の一つもなければ、もう一段下流の合流点位置までもどり、そこで未探索の隣接上流点の有無を調べる。以下、同様にして主流の最上流部にある「水源」に到達するまで、流路区間の探索を行う。

合流点の座標位置を記憶させる場所の数は、最大でも（水流次数の最大値－1）である。この座標位置を記憶させておくことにより、流路区間の番号付け探索作業は極めて短時間内に、能率的に実行できる。図－5.2.6に、流路区間の番号付けされた結果を模式的に示しておいた。

(5) 小流域区分の方法

水流として抽出された格子点に流入する方位をもつ”非水流の格子点”に対して、流出先の各流路区間と同じ番号をつけ、その上流側にある非水流の格子点についても、集水面積値1をもつ最上流部の格子点に至るまで皆、順次、流出先の流路区間と同じ番号を付けることにより、対象流域の基礎単位としての小流域を区分することができる。

ここで、合流点に向かって直接流出する非水流の格子点に対する番号付けの仕方が問題となる。この場合、単純に合流先の流路区間番号と同じ番号を付けたのでは、実際の地形図との対応がおかしくなる。特に、複数の上流側の流路区間の間に挟まれる非水流の格子点について、このことは明白である。非水流の格子点は、基本的には、水流への流入角度が小さくなる方の流路区間に所属させることにする。複数の上流側流路区間となす流入角度が等しくなる場合には、走査順にどちらかの流路区間に含ませる。

3. 適用例

小流域区分の考え方とそれに対応したアルゴリズムの流れを理解しやすくするために、縮尺1：10,000のモデル流域（図－5.3.1参照）を対象に格子間隔50mのDTMを作成し、流域を小区分した例を図－5.3.2～5.3.4に示す。それぞれ、方位図、集水面積図、および目的とする小流域区分図である。水源の基礎条件として、水源パターンに合致することとあわせて、集水面積値が10（単位面積：実面積は0.25haに相当）以上の大きさを持つようにさせた。

適用例（図－5.3.4）を見ると、水源の数が11個、小流域の区分数が19個になっており、原図（図－5.3.1）の対象流域内を系統的に細かく区分するという点で、前節で述べたアルゴリズムが十分に機能を発揮しているといえよう。

ただし、前項で記したアルゴリズムは水流の合流点を区切りとして水流の流路区間を機械的に分けているため、図－5.3.4における区分番号14の区域に見られるように、本来、12番区域と同一の斜面として区分されて当然と思われる箇所でも、必要以上に細かく区分されてしまう部分が見られる。合流する支流と反対側にある流域間狭窄部が必要以上に細かく区分され過ぎないようにするためには、今後さらに、水流の右岸、左岸の区別等を取り入れた、アルゴリズムの一層の改良を図る必要があると考えられる。

以上のモデル流域とは別に、第II章第4節で作成した名古屋大学稲武演習林月ヶ平地区の

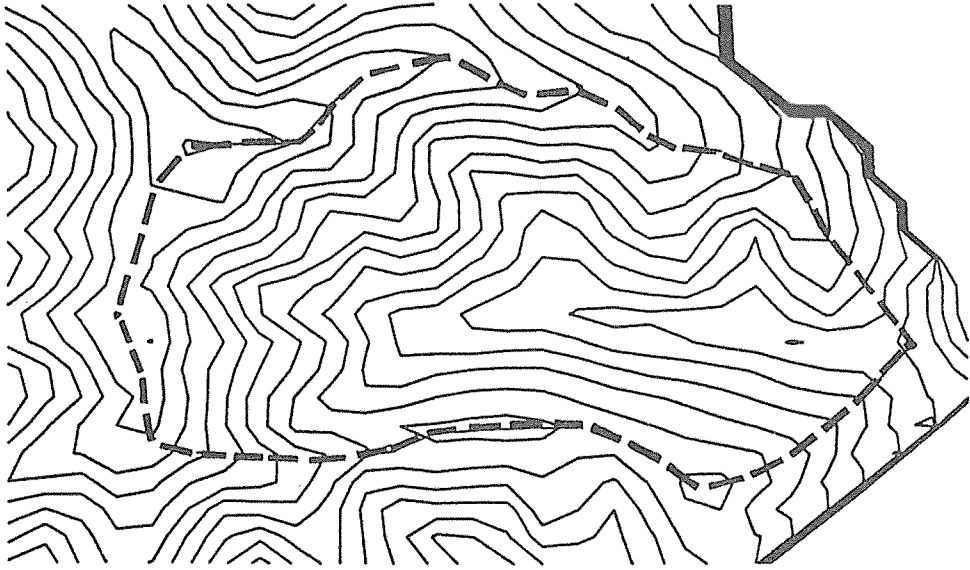


図-5.3.1 モデル流域の地形図

Fig-5.3.1 Contour map of the model catchment basin

注 Note) 原図縮尺 Scale of the original map 1 : 50,000

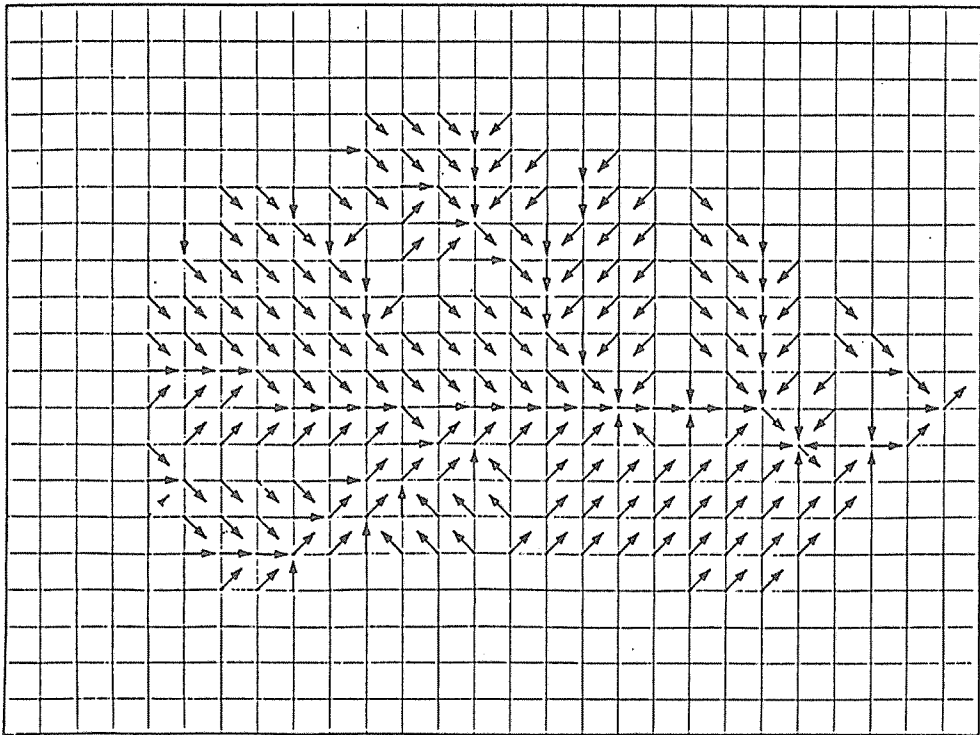


図-5.3.2 モデル流域の方位図

Fig-5.3.2 Aspect map of the model catchment basin

注 Note) 格子間隔 (実長) Grid interval on the ground = 50 m)

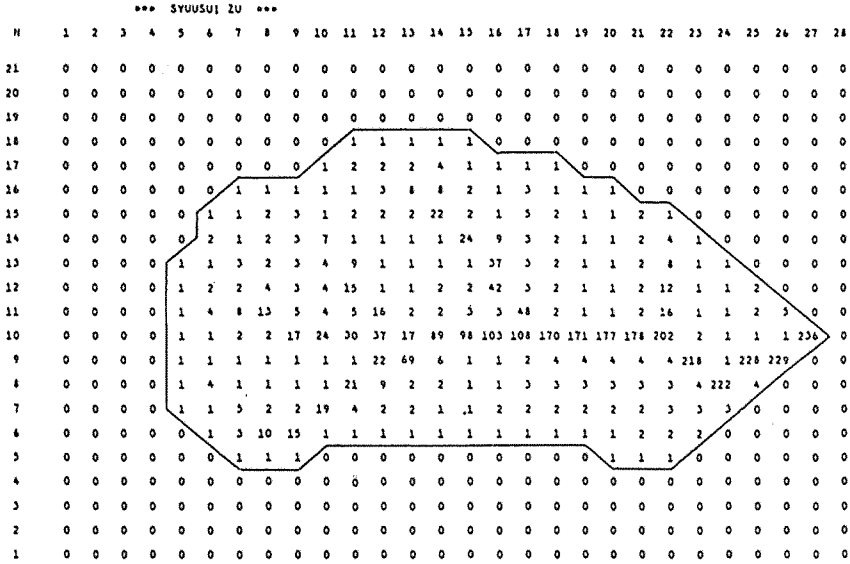


図-5.3.3 モデル流域の集水面積図

Fig-5.3.3 Catchment area map of the model catchment basin

注 Note) 単位集水面積値 Unit size of a grid cell in the catchment basin area = 0.25 m)

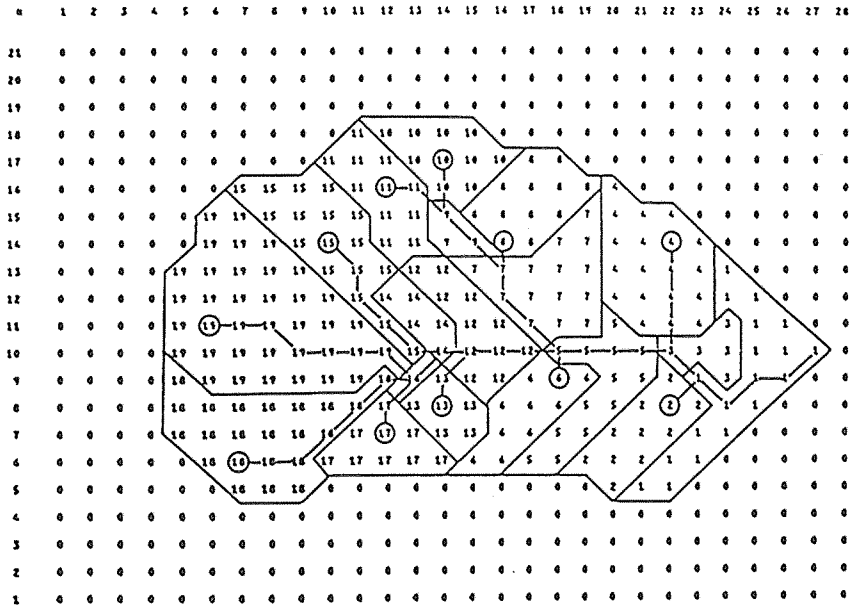


図-5.3.4 モデル流域の小流域区分図

Fig-5.3.4 Smaller catchment basins automatically divided into

注 Note) 丸印 Circle: 水源位置 Streamhead position
 数字 Digital number: 小流域番号 Number of divided smaller catchment basin
 格子間隔 Grid interval on the ground: 50 m

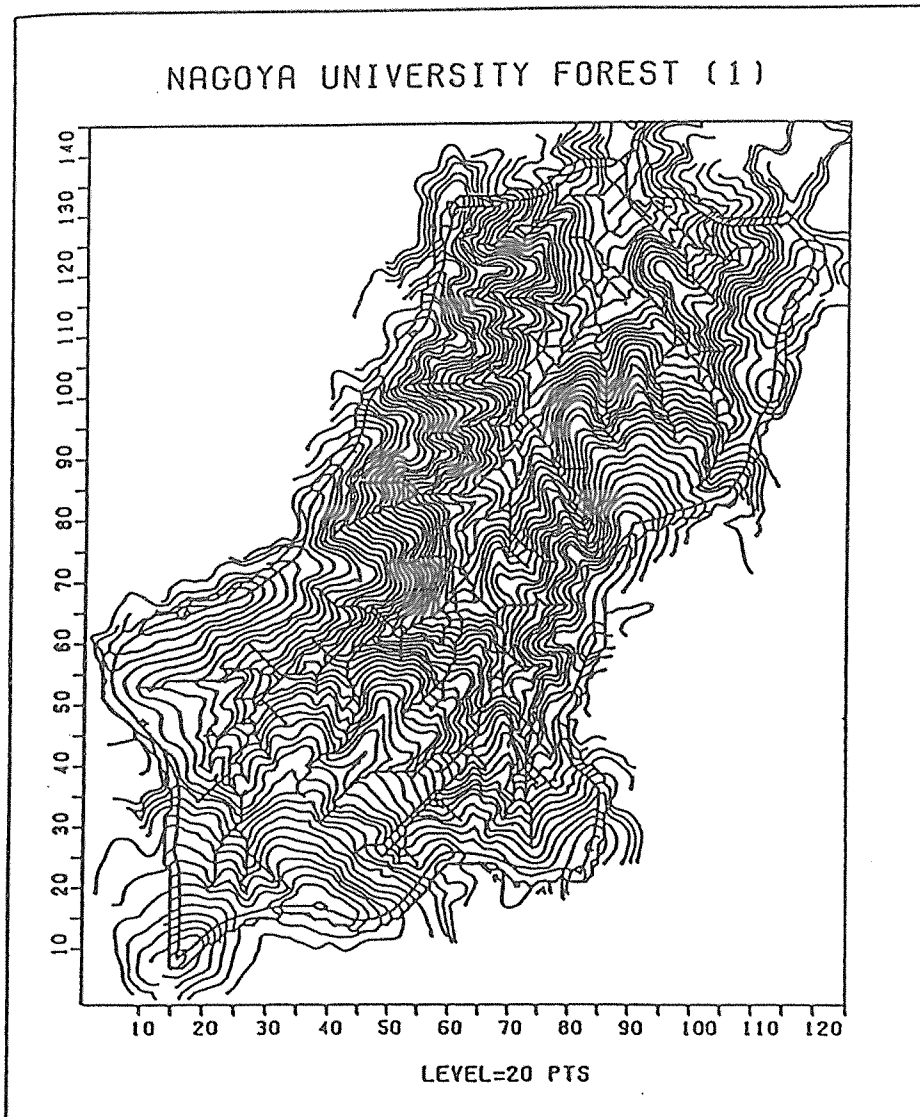


図-5.3.5 水系図 (集水面積値レベル=20)

Fig-5.3.5 Stream network map

注 Note) 名古屋大学農学部附属稲武演習林月ヶ平地区 Tsukigataira area of the Inabu Experimental Forest, Nagoya University, Aichi Prefecture

水流発生 の 最小限度 : 20 格子面

Threshold value of the smallest catchment area as a streamhead : 20 unit areas

原図縮尺 Scale of the original map 1 : 5,000

格子間隔 (実長) Grid interval on the ground = 10 m

単位集水面積値 Unit size of a grid cell in the catchment basin area = 0.01 ha

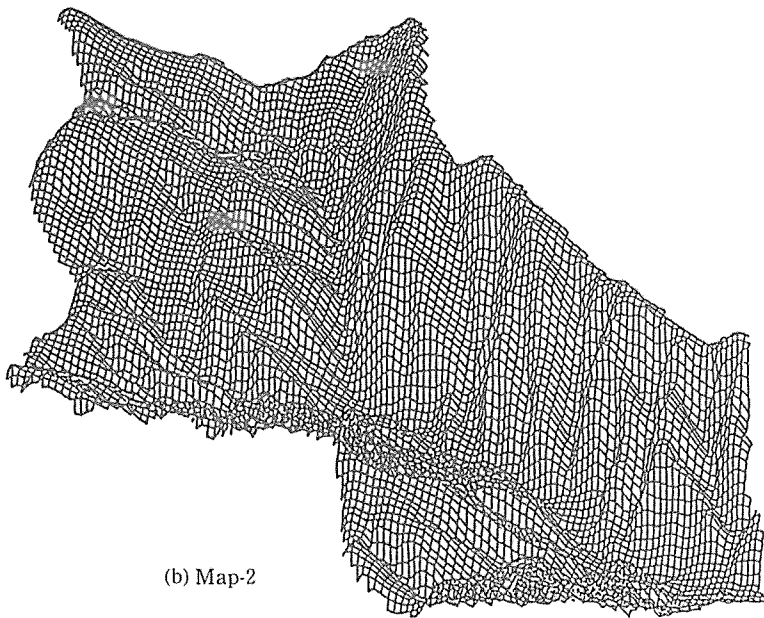
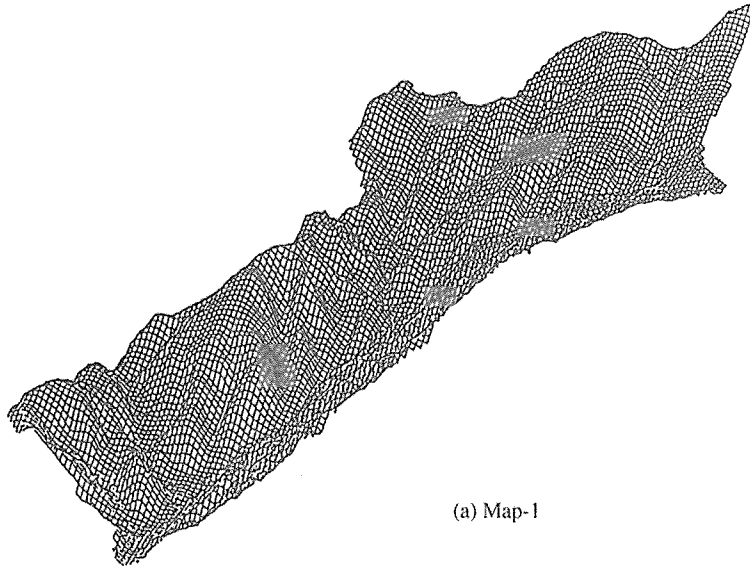


図-5.3.6 立体水系図

Fig-5.3.6 Three dimensional stream network maps

注 Note) 名古屋大学農学部附属稲武演習林月ヶ平地区 Tsukigataira area of the Inabu Experimental Forest, Nagoya University, Aichi Prefecture
水流発生 of 最小限度 : 30 格子面
Threshold value of the smallest catchment area as a streamhead : 30 unit areas
原図縮尺 Scale of the original map 1 : 5,000
格子間隔 (実長) Grid interval on the ground = 10 m
単位集水面積値 Unit size of a grid cell in the catchment basin area = 0.01 ha

DTM (縮尺 1 : 5,000, 格子間隔 2 mm (実長 10 m), 面積約 74 ha) を対象として本アルゴリズムを適用した結果が, 図-5.3.5 である。3次元の透視図による水系図も参考までに図-5.3.6(a), (b) に示しておく。ただし, 立体図描画プログラムの持つ制約のため, 格子線方向での水系表示とせざるを得なかったため, このモノクロ図では水系位置が見ずらくなってしまっている。

4. 考 察

(1) 方位区分の適合性

DTM に基づく 8 方位区分の結果を地形図と対比してみると, 両者があまり良く合致していない事例がところどころで見受けられる。その理由として, ① DTM の原理的弱点に基づく場合(窪地型の DTM データ点配置), ② DTM の精度が低い場合, ③ 方位区分方法の原理的難点に基づく場合, の 3 つが考えられる。

先ず, ① については, ある格子点から周囲の格子点のいずれへも流出方向を持たない場合が典型的であるが, これは当該格子点が窪地(型)の中央になるような DTM データ点の配置に由来するものである(図-5.4.1 参照)。名古屋大学稲武演習林の境界線内にある 7,361 格子点のうち 35 点(約 0.5%) が, このケースに該当する。これへの対処は, 強制的に周囲 8 格子点内で標高が最も低い格子点に流出させることとした。この処理で, それ以後の水系図作成の自動処理が可能となる。アルゴリズム中であえて窪地のタイプ分けを含めたのは, 湖沼等を解析する必要がある場合にも対応しうるように汎用性を持たせたためであるが, 中部地方における通常の中岳山地地形であれば, 一般には窪地を分類する必要性はさほどないと

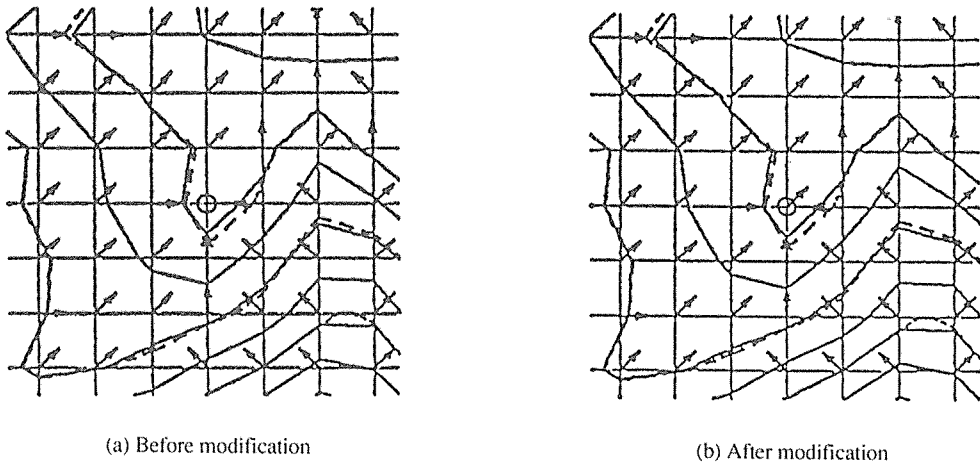


図-5.4.1 方位区分の誤りの事例(1) -- DTM データ点が窪地型配置の場合

Fig-5.4.1 Error in the aspect classification (1) -- Due to the hollow-typed arrangement of DTM data

注 Note) 破線 Broken line : 原図等高線 Original contour line
 実線 Solid line : 再現等高線 Regenerated contour line through the DTM
 矢印 Arrow : 格子点における斜面方位 aspect of the slope at a grid point

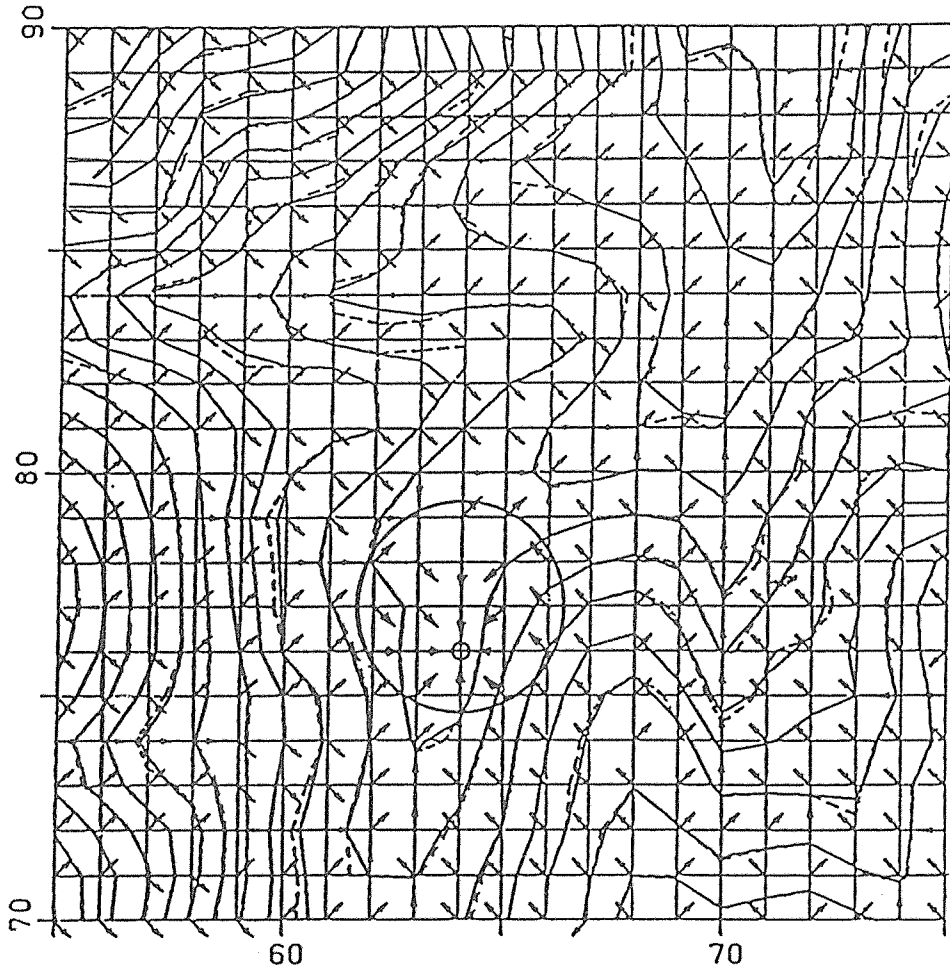


図-5.4.2 方位区分の誤りの事例(2)--DTMデータ点の精度が低い場合
 Fig-5.4.2 Error in the aspect classification (2) -- Due to the less accurate DTM

注 Note) 破線 Broken line : 原図等高線 Original contour line
 実線 Solid line : 再現等高線 Regenerated contour line through the DTM
 矢印 Arrow : 格子点における斜面方位 aspect of the slope at a grid point
 格子間隔 Grid interval on the ground : 10 m
 等高線標高差 Contour elevation interval : 5 m
 大円 Large circle : 観察区域 Observing area

考えられるから、このタイプ分けは無視して差し支えないであろう。

次に、②の事例を図-5.4.2に示す。同図において大きな丸印の中の下方の小丸印がついた格子点(座標 $I=64, J=76$)に周囲8格子点から方位が向かっている。すなわち、周囲の8格子点がすべて当該格子点の直接上流点となる。しかも、本来ならその下流となるべき格子点のまた下流側の格子点も、上流側に向かう方位を持っている。

そこで、この周辺の地形状況をより詳しく知るために、DTM データに 1m 間隔の等高線を

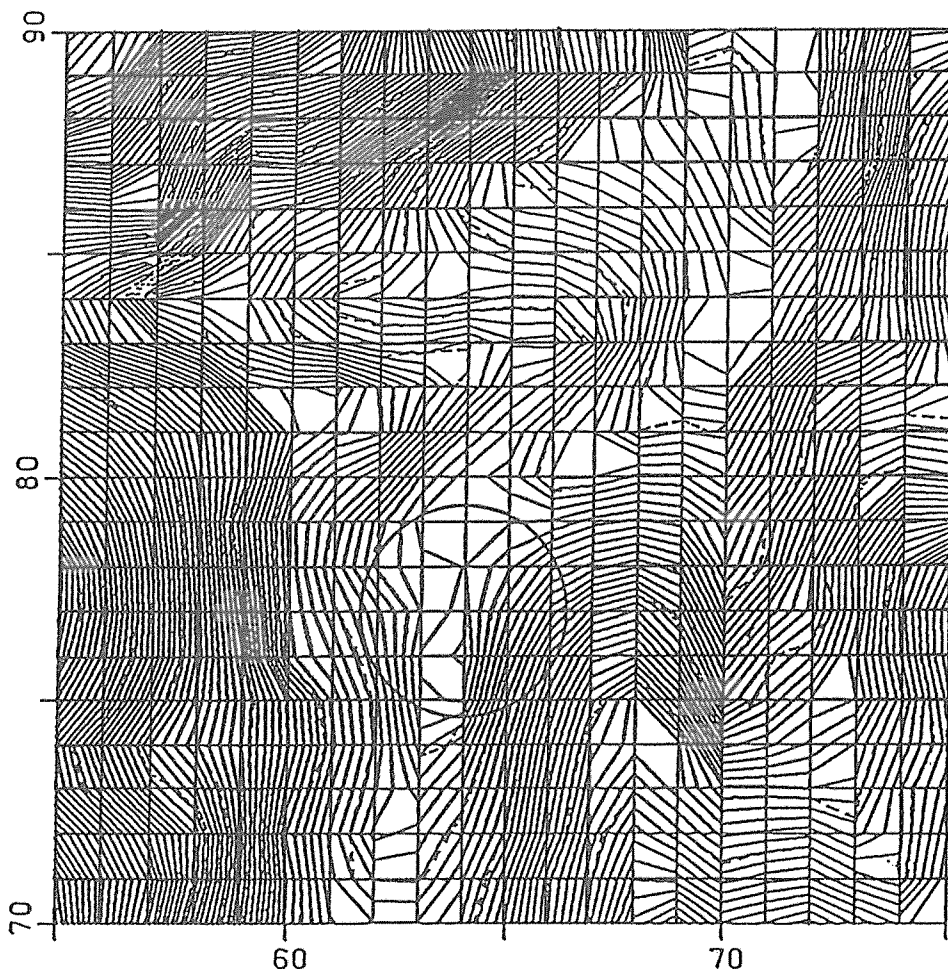


図-5.4.3 修正前のDTMデータに基づく等高線図
Fig-5.4.3 Contour map generated through the non-modified DTM

注 Note) 破線 Broken line : 原図等高線 Original contour line
 実線 Solid line : 再現等高線 Regenerated contour line through the DTM
 矢印 Arrow : 格子点における斜面方位 aspect of the slope at a grid point
 格子間隔 Grid interval on the ground : 10 m
 等高線標高差 Contour elevation interval : 1 m
 大円 Large circle : 観察区域 Observing area

描いた結果が図-5.4.3である。この図から、当該格子点が山腹斜面と沢との傾斜変換線のきわめて近くに存在し、下流側2点先の格子点付近で等高線が島状にくびれていることが分かる。実は、この格子点付近は、第II章第4節のハイブリッド法によるDTM作成方式のうちで、内挿方式を適用して標高を決定したところであった。これは明らかにDTMの精度が低いために、本来は水系となるべきところに窪地ができてしまい、当該格子点から下流への「流出」を発生させられなくなってしまったものである。このような事例は、境界線内の7,361点

中で4点あった。この原因は、沢に近い傾斜変換線付近における格子点の標高演算が、隣接点間で異なった方式を用いて行われ、標高値の精度にアンバランスが生じたためと考えられる。

そこで、表-5.4.1(a)のDTMデータのうちで、座標($I=64, J=76$)付近の太線で囲んだ下流側3格子点(座標: $I=64, J=77\sim 79$)について、この表の数値と地形図を参照しながら、会話型で同表(b)のように修正した。その結果が図-5.4.4の修正等高線図である。沢筋の不自然さがきれいに解消している。修正されたDTMデータに基づく方位図が図-5.4.5である。当該格子点の下流側格子点の方位が適正化していることが分かる。

最後に、③についてであるが、図-5.4.5の方位図において、たとえば座標($I=60, J=74$)およびその付近にある格子点の方位が、等高線に直交する方向からかなりずれているのが、その事例として挙げられる。これは、周囲8格子点のうちで最低標高をもつ格子点に向かう

表-5.4.1 方位図修正のためのDTMデータの修正

Table-5.4.1 DTM data modification for modifying the aspect matrix

(a) 修正前のDTMデータ (太線内)

The DTM data before modification (the objective grid points are in the area surrounded by bold line)

(単位 m)

J	I	61	62	63	64	65	66	67
81		1021.25	1020.31	1014.75	1010.00	1007.86	1004.83	1002.96
80		1017.47	1014.83	1009.71	1007.50	1006.49	1003.90	1003.95
79		1014.76	1010.47	1007.50	1007.90	1007.89	1008.13	1009.51
78		1013.84	1009.68	1008.28	1007.98	1009.67	1012.69	1014.49
77		1015.32	1012.27	1008.96	1007.50	1011.77	1016.40	1020.45
76		1016.95	1013.08	1007.89	1006.70	1013.75	1020.16	1025.44
75		1018.77	1014.38	1008.12	1007.91	1016.00	1022.76	1028.61
74		1019.40	1014.72	1009.49	1011.69	1017.92	1024.68	1030.57
73		1018.01	1014.09	1011.44	1014.09	1018.90	1025.95	1031.74

(b) 修正後DTMのデータ (太線内)

The DTM data after modification (the objective grid points are in the area surrounded by bold line)

(単位 m)

J	I	61	62	63	64	65	66	67
81		1021.25	1020.31	1014.75	1010.00	1007.86	1004.83	1002.96
80		1017.47	1014.83	1009.71	1007.50	1006.49	1003.90	1003.95
79		1014.76	1010.47	1007.50	1006.55	1007.89	1008.13	1009.51
78		1013.84	1009.68	1008.28	1006.60	1009.67	1012.69	1014.49
77		1015.32	1012.27	1008.96	1006.65	1011.77	1016.40	1020.45
76		1016.95	1013.08	1007.89	1006.70	1013.75	1020.16	1025.44
75		1018.77	1014.38	1008.12	1007.91	1016.00	1022.76	1028.61
74		1019.40	1014.72	1009.49	1011.69	1017.92	1024.68	1030.57
73		1018.01	1014.09	1011.44	1014.09	1018.90	1025.95	1031.74

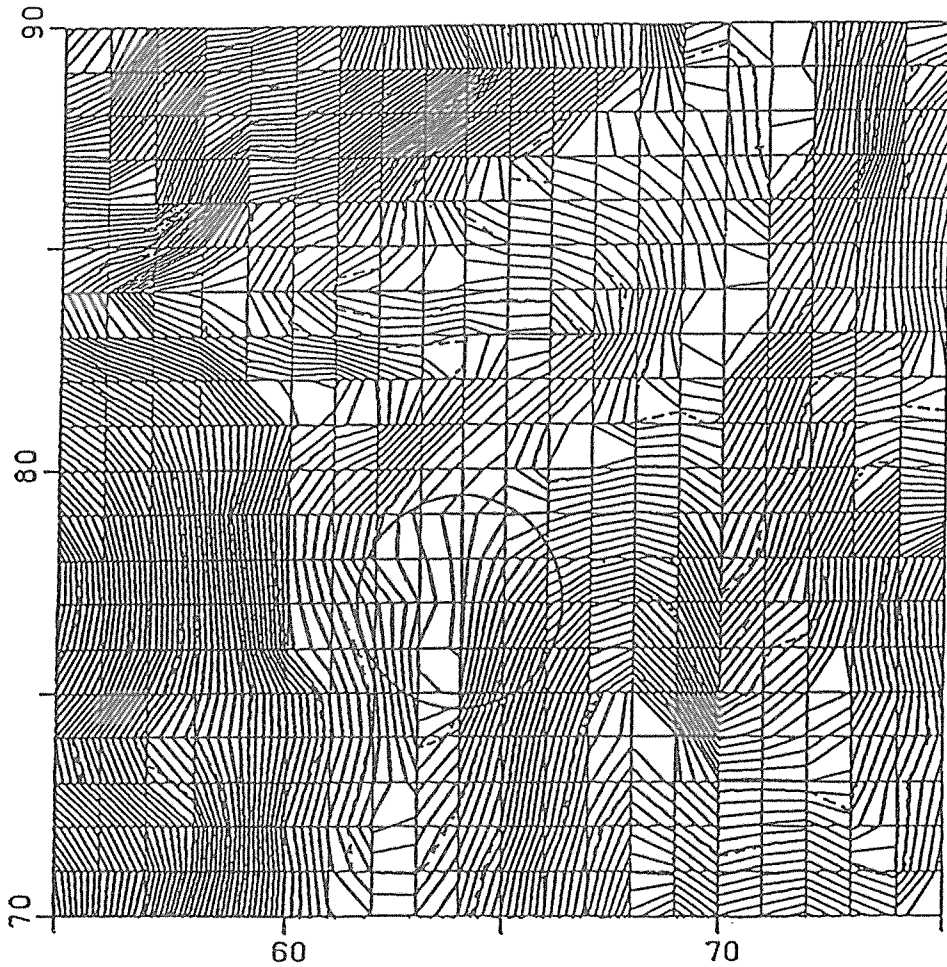


図-5.4.4 修正後のDTMデータに基づく等高線図
Fig-5.4.4 Contour map generated through the modified DTM

注 Note) 破線 Broken line : 原図等高線 Original contour line
 実線 Solid line : 再現等高線 Regenerated contour line through the DTM
 矢印 Arrow : 格子点における斜面方位 aspect of the slope at a grid point
 格子間隔 Grid interval on the ground : 10 m
 等高線標高差 Contour elevation interval : 1 m
 大円 Large circle : 観察区域 Observing area

方向を「方位」として機械的に採用しているためである。これらの場合には、第IV章第2節でとりあげた方法((4.2.1)式参照)で等高線データから直接方位を求め、それを8方位に丸めて用いることにすれば、ズレの幅を少なくすることが可能になると考えられる。ただし、図-5.4.5の方位図において座標($I=64, J=76$)のような傾斜変換線付近の格子点では、すぐ近くの等高線に直交する方向の成分が強く影響し過ぎ、かえって混乱を生ずることも予測

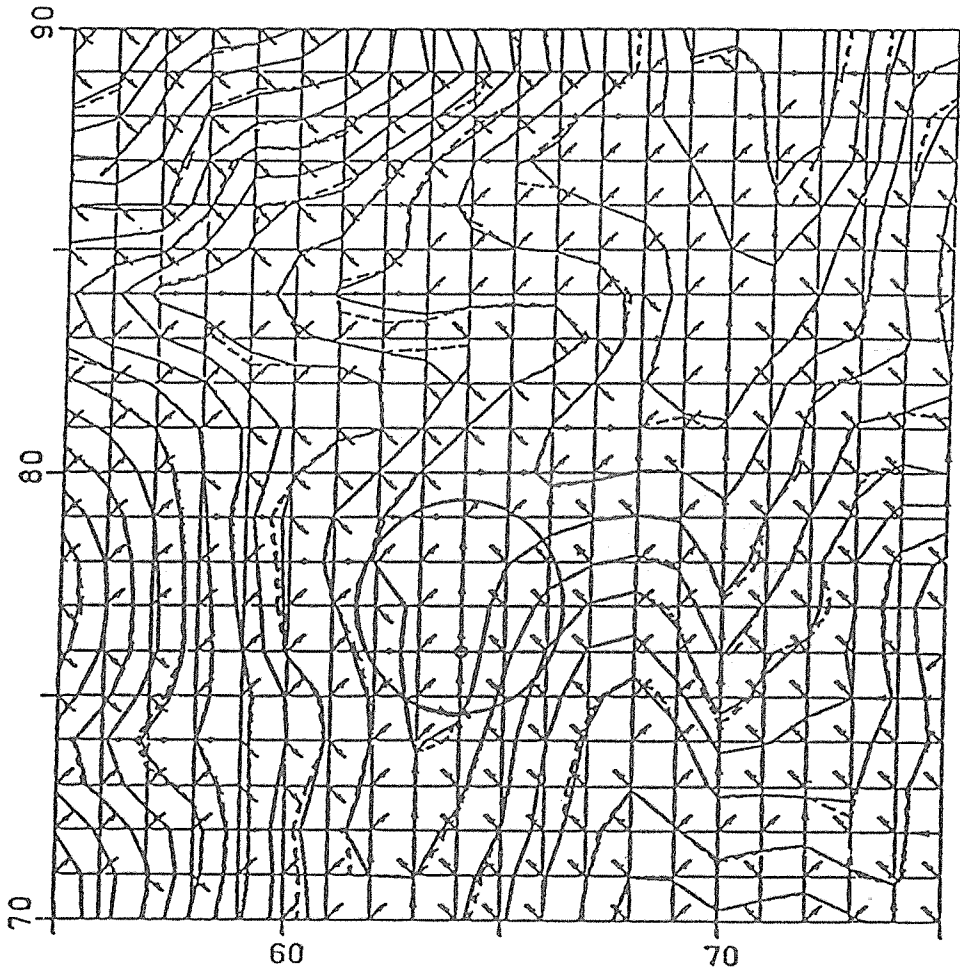


図-5.4.5 修正されたDTMデータに基づく方位図
Fig-5.4.5 Aspect map generated through the modified DTM

- 注 Note) 破線 Broken line : 原図等高線 Original contour line
実線 Solid line : 再現等高線 Regenerated contour line through the DTM
矢印 Arrow : 格子点における斜面方位 aspect of the slope at a grid point
格子間隔 Grid interval on the ground : 10 m
等高線標高差 Contour elevation interval : 5 m
大円 Large circle : 観察区域 Observing area
大円内の白丸がついた格子点の方位が、DTMの修正を通じて正される。

されるから、今後、周囲の格子点標高を基準とする方位区分方法と、等高線に至る距離を求めて比例配分で算出する(4.2.1)式に基づく方法の組合せ方について、十分検討する必要がある。

2) 水源位置および水流径路の適合性

図-5.3.5の水系図の作成に際しては、水源発生条件の一つとして、集水面積値のレベル

(格子点数)を20以上であることとした。これは、同図の場合、格子間隔が実長10mであるから、1格子点が0.01haに相当するので、実集水面積値として0.2haを与えたことになる。同図において、主要な沢筋のかなり上端近くまで水系を表わす線が入り込んでいること

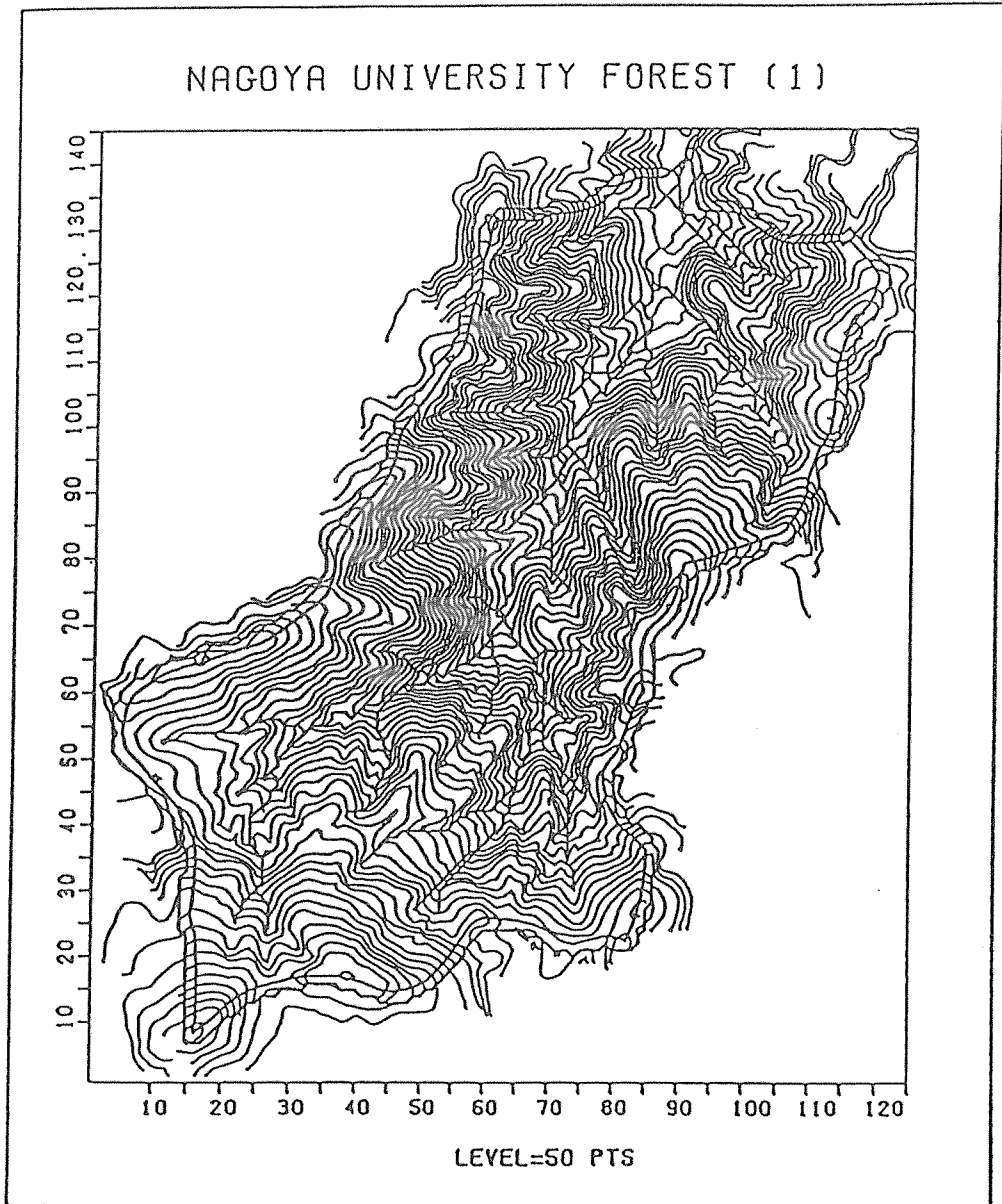


図-5.4.6 水系図 (集水面積値レベル=50, 図-5.3.5 に対応)

Fig-5.4.6 Stream network map (Corresponding to Fig-5.3.5)

注 Note) 水流発生 の 最小限度 : 50 格子面

Threshold value of the smallest catchment area as a streamhead : 50 unit areas

がわかる。ただし、詳細に検討していくと、等高線図において肉眼では小さい谷と識別される箇所まで水系線が十分入っていないところや、逆に山腹斜面的な部分を水系線が走っている箇所が、ごく僅かながら散見される。これらは、プログラム上の問題点としてより詳細に検討する必要があることを意味している。

図-5.4.6は、集水面積値レベルを50以上とした場合の水系図であり、これは実集水面積値を0.5 haとしたことに相当する。図-5.3.5と対比して明らかなように、各沢筋ともかなり水系の下側に水源位置が下がっている。集水面積値を大きくとりすぎると、真の水源位置から下流側に遠ざかることがわかる。今回の場合、水源パターンの設定については特に問題がなかったと考えられるので、今後、基準となる集水面積値の設定について0.2 haより小さい値を当てはめて、地形図との対応具合を詳細に検討する必要がある。

水流径路については、水系線はおおむね沢筋の中央部を通過しており、良好であるといえる。ただし、一部X、Y軸と45°方向で一直線にまっすぐ連続する水系線の箇所、2本の水系が平行して走る結果が出現している。この原因は、ある格子点での方位を周囲8格子点中で最低標高をもつ格子点に向かう方向とした、8方位区分の仕方自体に基づくもので、X、Y軸に関して斜めに並んだ2格子点にとって、それぞれの標高最低点が高いに平行な斜め方向にある場合、相互に干渉されずに同じ方位値が選定され得るためである。こうした現象の解消や、小流域に区分された区画が地形図上の区画線とどれほど対応しているかについてのチェック等は、今後の重要な検討課題である。

3) 格子間隔の大きさと水系図

DTMの格子間隔が大きくなるにつれて、一般に再現される地形の精度が劣化することは、第IV章第3節で確かめた通りであり、水系図にも何らかの影響が出るものと予測される。この点を確かめるために、図-5.4.4のDTMの格子点を間引いて、図-5.4.7に示すような、格子間隔を2倍にした場合の方位図を描画させた。図-5.4.8は図-5.4.7に対応した等高線図である。

表-5.4.2 格子間隔の変化に伴う方位推定のズレ
Table-5.4.2 Deviation of aspects evaluated by an enlarged grid interval

方位のズレ Deviation of aspect	格子点数 Number of grid points	割合 Percentage
0°	68	62 %
45°	33	30
90°	8	7
135°	0	0
180°	1	1
合計 Total	110	100 %

図-5.4.7において、図-5.4.5の最小格子間隔の場合と同一の格子点位置における方位区分値を、最小格子間隔の場合の方位区分値と比較した結果は、表-5.4.2の通りであった。

比較の対象にした格子点のうちで6割強が最小格子間隔の場合と一致し、3割が1方位分のズレであった。45°のズレとは、格子点の数が1/4に減少したことに伴う、ある意味では必然的なズレと考えられる。90°のズレが発生した箇所は、山腹斜面が沢筋に接する傾斜変換線

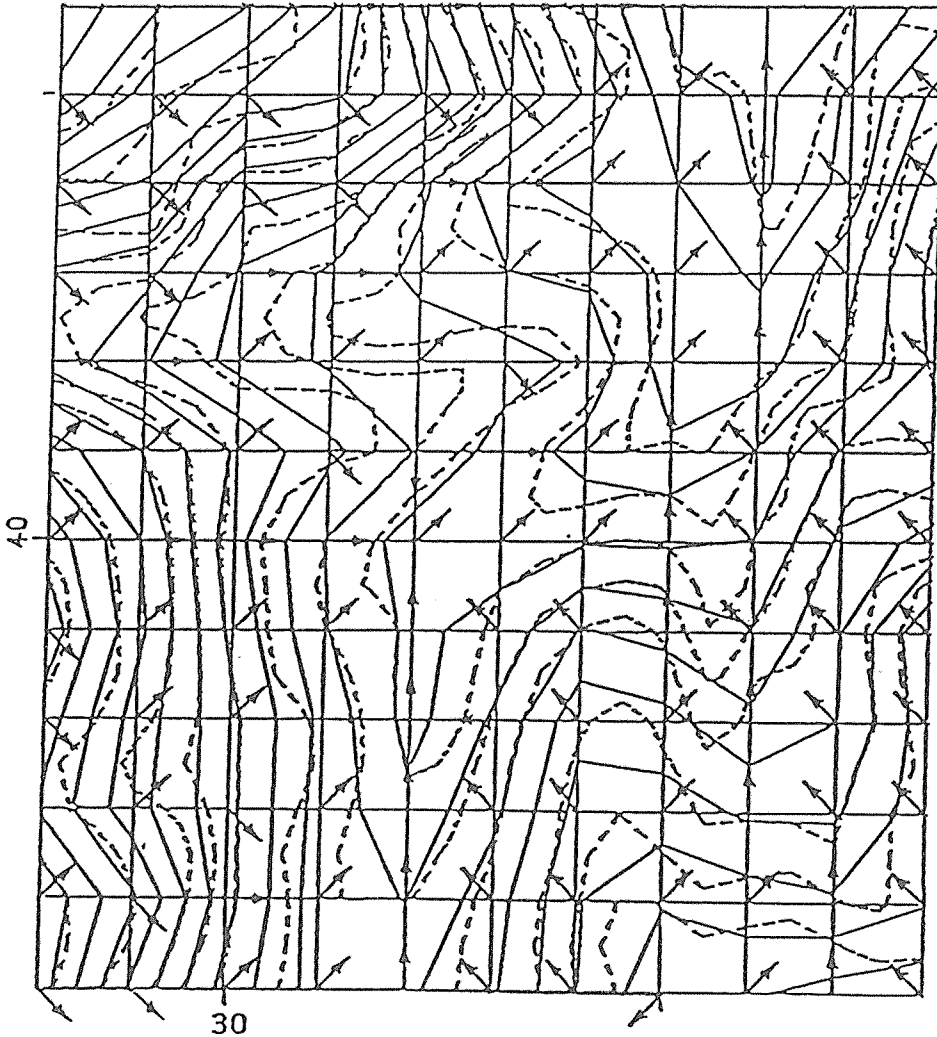


図-5.4.7 2倍の格子間隔に対する方位図 (図-5.4.5 に対応)

Fig-5.4.7 Aspect map generated through the DTM with a double grid interval of the original DTM (Corresponding to Fig-5.4.5)

注 Note) 破線 Broken line : 原図等高線 Original contour line
 実線 Solid line : 再現等高線 Regenerated contour line through the DTM
 矢印 Arrow : 格子点における斜面方位 aspect of the slope at a grid point
 格子間隔 Grid interval on the ground : 20 m
 等高線標高差 Contour elevation interval : 5 m

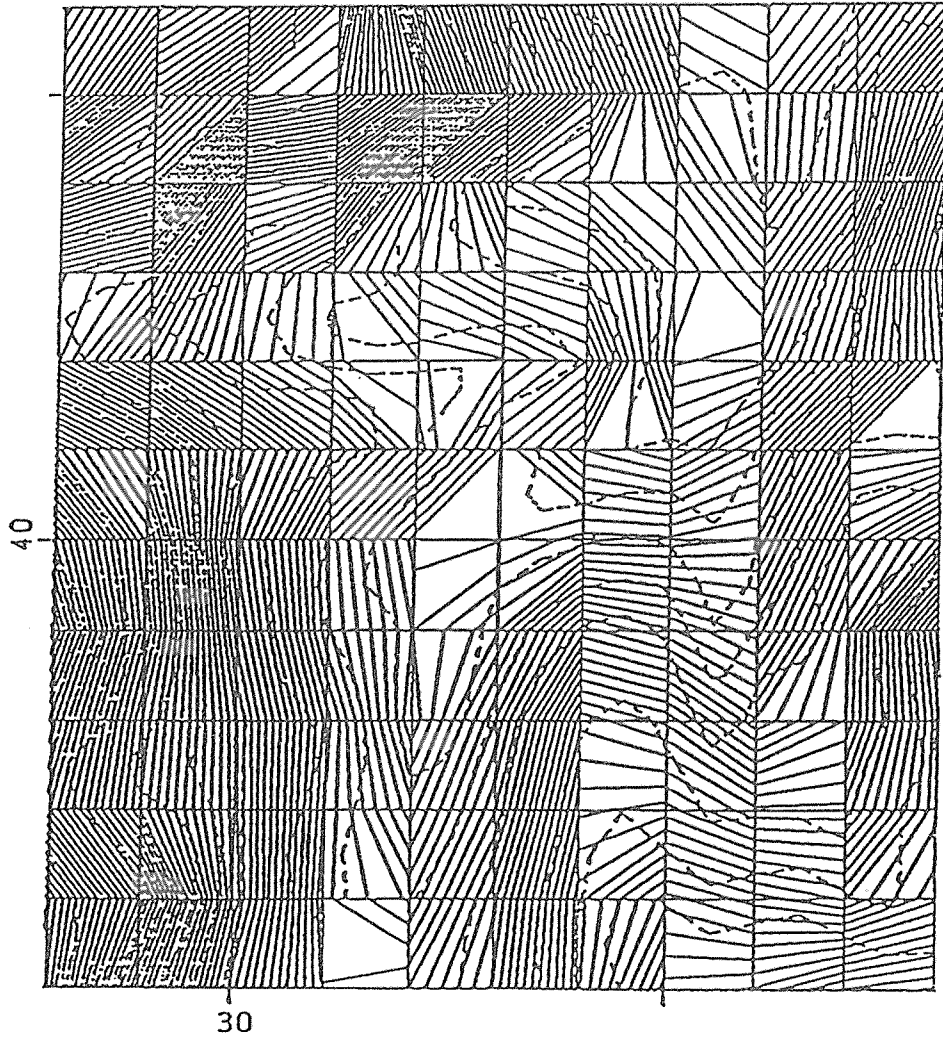


図-5.4.8 2倍の格子間隔に対する等高線図 (図-5.4.4 に対応)

Fig-5.4.8 Contour map generated through the DTM with a double grid interval of the original DTM
(Corresponding to Fig-5.4.4)

注 Note) 破線 Broken line : 原図等高線 Original contour line
実線 Solid line : 再現等高線 Regenerated contour line through the DTM
格子間隔 Grid interval on the ground : 20 m
等高線標高差 Contour elevation interval : 1 m

の近く、および小尾根や小沢の近くに分布していた。また、180°のズレは小尾根の張り出し部
に出現した。格子間隔を2倍にした場合の水流径路は、最小格子間隔の場合の径路の1格子
間隔分のズレ以内となっている。

以上を総合してみると、格子間隔を拡大したことに伴う水系図作成への影響は、少なくと

も格子間隔を2倍にした範囲内では、さほど大きくないと結論づけられる。

5. まとめ

山地流域の地形構造は、小流域を単位とするネットワークと見なすことができるが、この構造を系統的に区分できれば、森林作業の場としての林地の状況をより詳細に、また動的に把握できるようになるから、林業工学分野における各種計画の立案に際して、山地防災や林地保全などの配慮を加味しやすくなると考えられる。本章では、手作業を要するデータ処理工程を極力少なくし、小流域の区分単位に柔軟性をもたせることを主眼として、DTMとホートンの水流次数解析の考え方に基づき、山地の流域構造を系統的に区分・解析する方法を開発するための問題点について検討した。

8方位区分に基づいて作成した方位図と集水面積図が水系図作成の基礎となるが、隣接する8格子点のうち最も標高の低い点に向かう最大傾斜線の方法を当該格子点での方位とする、土木工学分野で普通に用いられている方位に対する定義の仕方は、等高線図にその方位をベクトル表示させて重ね描きしてみると、誤差の大きく表れる箇所がかなり見受けられるので、今後、第IV章第2節で取り上げた(4.2.1)式を基礎にして方位を算出する方法へ切り替えていく必要があると考えられる。

集水面積図に基づいて水系図を作成する段階で、単純に処理すると単調な広い斜面などで疑似的な水流が発生してしまう。これを防ぐために、「水源発生」の4パターンを提起し、名古屋大学農学部附属稲武演習林内の1流域を対象として適用した結果、大半の疑似水流を除去できた。

その他、ホートンの水流次数の考え方による1次流が水源位置から始まるものとし、水流上となる格子点の迅速な抽出、複数の水流の合流点を境とする流路区間の区分と次数決定、および各流路区間への自動的な番号付け、その結果に基づく小流域の自動的な区分法などのアルゴリズムを検討し、迅速な流域構造解析を可能とするシステムを開発した。水流径路の適合性については、適用例を詳細に検討して、等高線図とおおむね良く合致することを確かめた。

一般に格子間隔が大きくなるにつれて、DTMから再現される等高線の精度は劣化するが、格子間隔を2倍に拡大した場合の水系図作成への影響について検討した結果では、比較対象の格子点のうち6割が最小格子間隔の場合と一致し、3割が1方位分のズレにとどまった。その際の水流行路は、最小格子間隔の場合の径路に対して1格子間隔分のズレ以内となっていた。従って、格子間隔を2倍に拡大した場合でも、水系図作成への影響はさほど大きくないことが明らかになった。

VI 山岳林数値地形解析システム

前章までに記した、数値地形モデル (DTM) に基づく地形計測および地形解析の各方法を総合して、「山岳林数値地形解析システム」を構築した。このシステムは、今後さらに補充や改良を加えるべき点を多々含んでいるが、林業工学分野における各種計画の立案に際して求められる地形解析作業のうち、基本的な必要性のあるものについてはほぼ対応しうる内容となっている。このシステムのうち、高精度の格子状 DTM 作成システムの部分は、名古屋大学大型計算機センターのライブラリー・プログラムとして登録済みである。本章では、上記システムの概要と、それを名古屋大学農学部附属稲武演習林月ヶ平地区を対象とした小流域区分に適用した結果について述べる。

1. システムの概要

図-6.1.1 に山岳林数値地形解析システムの概要を示す。図中で太線枠はデータを、二重線枠はプログラムを意味する。なお、「MT」は磁気テープを表わす。プログラムの一つにある点列データの「基準化」とは、内挿もしくは間引き処理を通じてオリジナル点列データを全て、点列の曲(直)線と格子線との交点データとなるようにデータ変換することを意味する。

このシステムは、基本的には、地形解析の手段・道具としての DTM を作成するための基礎的な地形データ処理部分と、DTM を用いて各種の地形解析を行うための応用部分から構成されている。前者には、研究室レベルでディジタイザを使って等高線の点列データを採取するための、パーソナル・コンピュータを対象とした「点列データ採取システム」も含まれているが、「点列データ基準化プログラム」や「高精度 DTM 作成システム」、および後者の「流域構造解析」と「微地形解析」は、少なくとも現在のところ、32 ビットの大型計算機の利用を前提としており、プログラムはいずれも FORTRAN 言語で書かれている。後者の「基本地形解析」については、大型計算機用とパソコン用の 2 種類を用意してある。

2. 適用例

地形解析の対象地として、前章までに用いてきた名古屋大学稲武演習林月ヶ平地区を選び、「山岳林数値地形解析システム」を適用して小流域区分を行った例を、図-6.2.1~6.2.2、および表-6.2.1~6.2.2 に示す。解析に用いた DTM は、前章までに用いてきたものと同一である。

図-6.2.1 は水流次数別水系図で、ここでは水源発生条件の一つとして集水面積値のレベル(格子点数)を、前章の場合よりも細かい「10(実集水面積値=0.1 ha)以上」としてある。小流域区分結果は大小さまざまな面積をもち、かなり大きく拡大しないと見づらいので、図-6.2.2 には典型的な箇所を抽出して拡大図として示した。

また、表-6.2.1 は水流次数別の小流域区分結果、表-6.2.2 は水流次数別小流域解析結果である。両表で「0次」として分類した 8 箇所は、その区分区画内に 1 次以上の水流が通過する格子点を 1 点も含まないものである。これは、小流域区分法のアルゴリズムが内包して

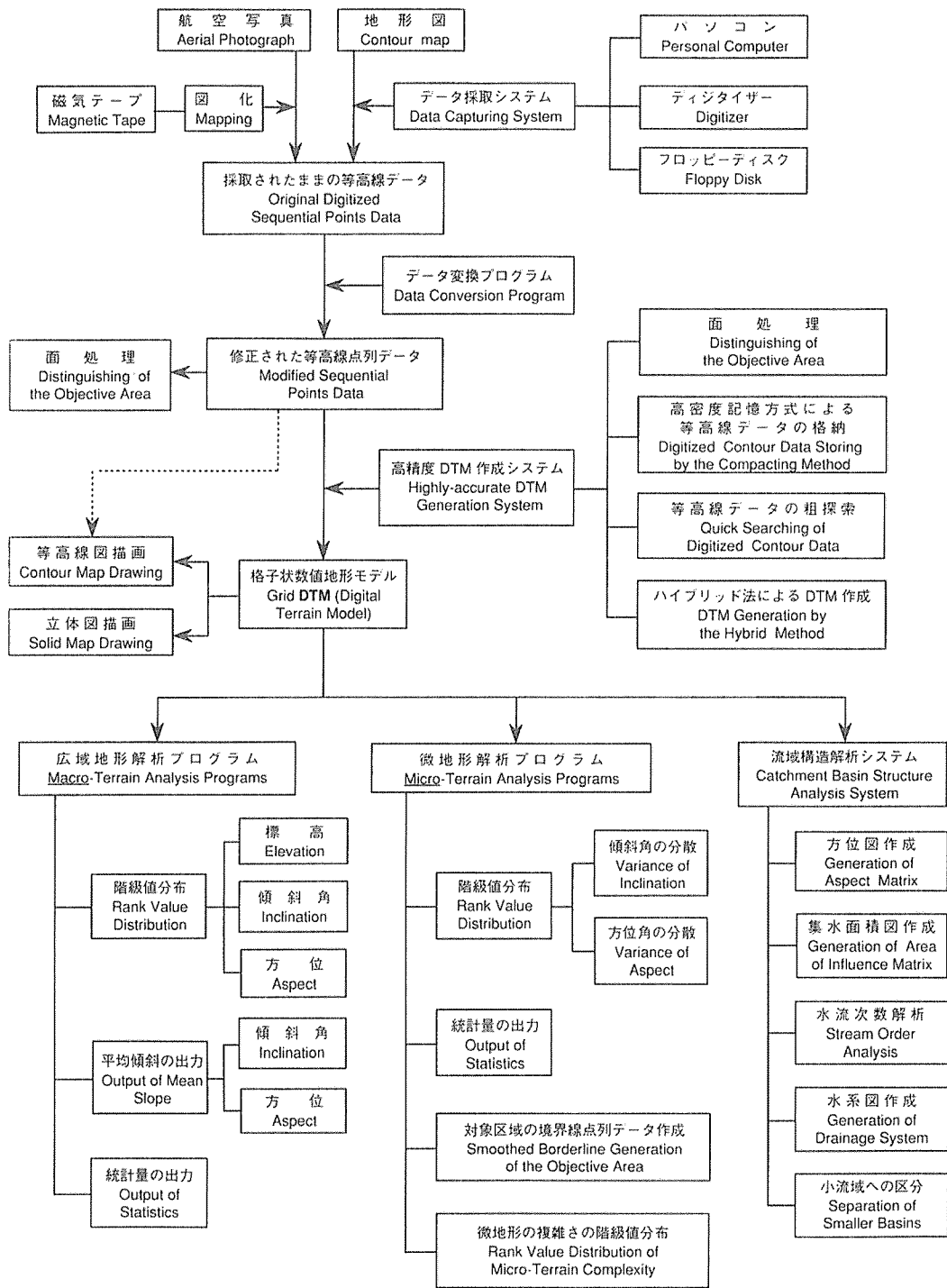


図-6.1.1 山岳林数値地形解析システムの概要

Fig-6.1.1 Outline of the digital terrain analysis system in mountainous forest areas

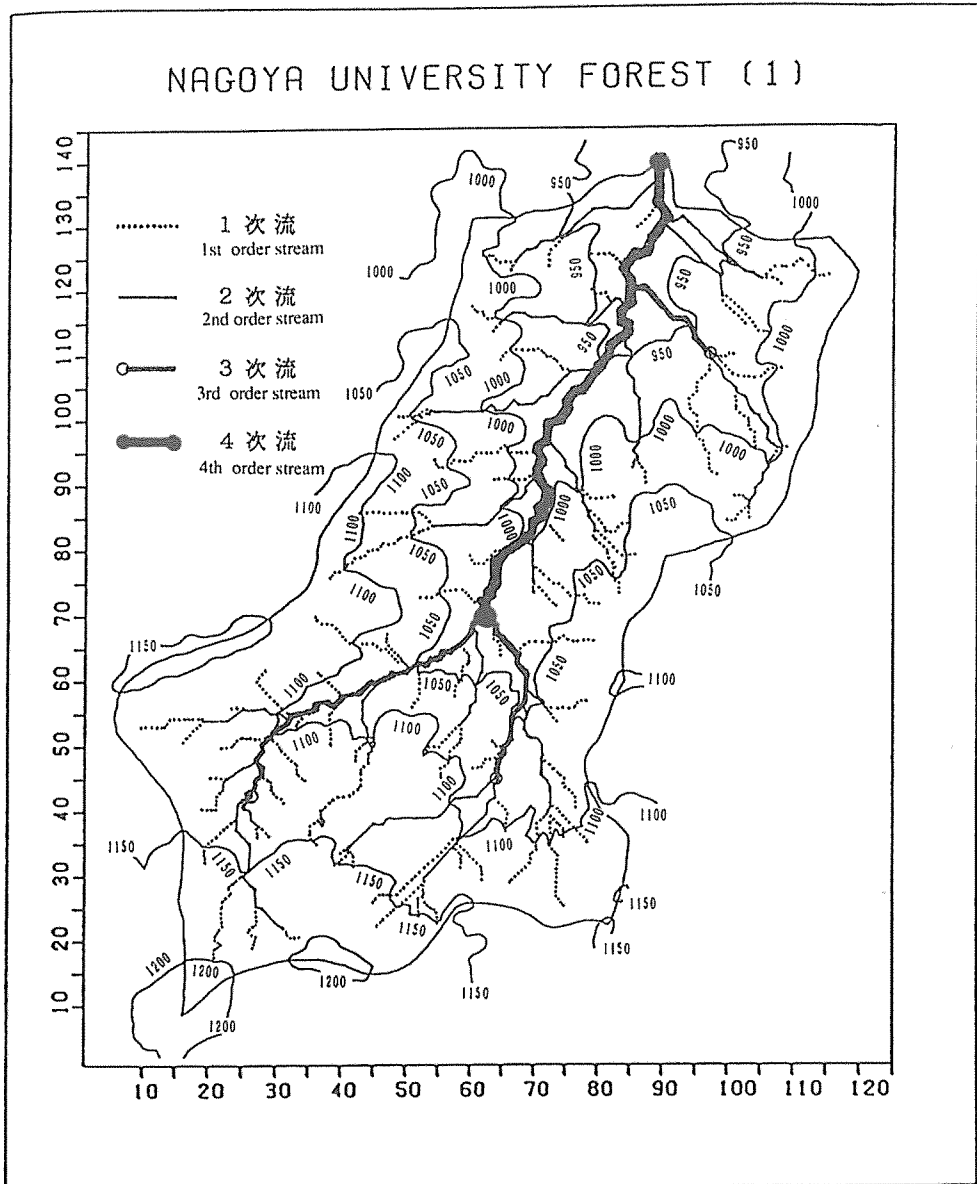


図-6.2.1 水流次数別水系図

Fig-6.2.1 Stream network map with four kinds of stream order

注 Note) 名古屋大学農学部附属稲武演習林月ヶ平地区 Tsukigataira area of the Inabu Experimental Forest, Nagoya University, Aichi Prefecture
 水流発生の最小限度：10 格子面
 Threshold value of the smallest catchment area as a waterhead : 10 unit areas
 原図縮尺 Scale of the original map 1 : 5,000
 格子間隔 (実長) Grid interval on the ground = 10 m
 単位集水面積値 Unit size of a grid cell in the catchment basin area = 0.01 ha

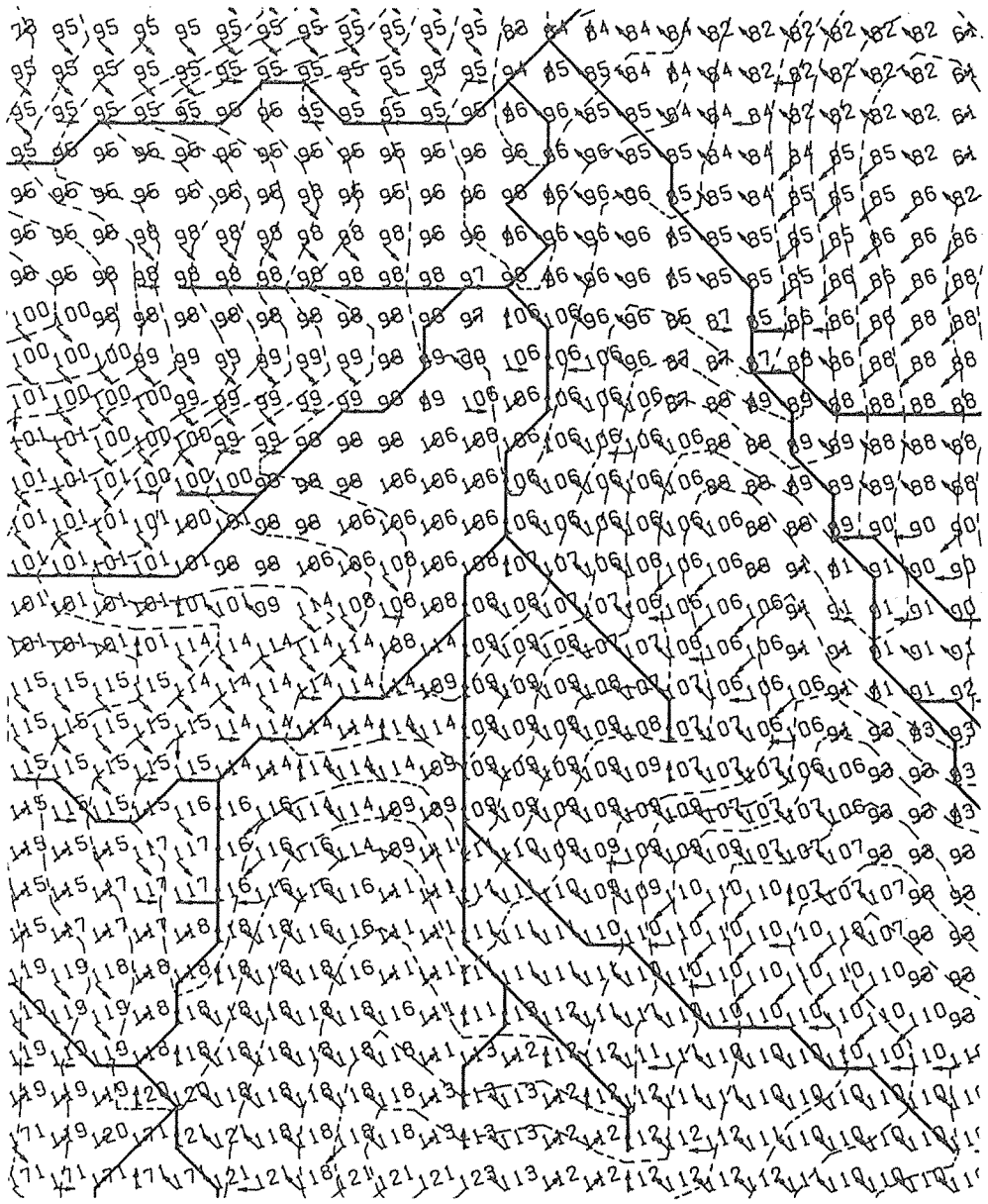


図-6.2.2 小流域の区分結果

Fig-6.2.2 Smaller catchment basins automatically divided into

注 Note) 名古屋大学農学部附属稲武演習林月ヶ平地区の一部分 A part of the Tsukigataira area of the Inabu Experimental Forest, Nagoya University, Aichi Prefecture

表-6.2.1 水流次数別小流域区分結果
 (名古屋大学農学部附属稲武演習林月ヶ平地区)
 Table-6.2.1 Result divided into smaller catchment basins according to the stream order
 (Tsukigataira area of the Inabu Experimental Forest, Nagoya University)

水流次数 Stream order	小流域区分数 Number of smaller divisions	比率 Percentage	格子点数 Number of grid points							合計 Total	比率 Percentage		
			1~9	10~19	20~29	30~39	40~49	50~74	75~99			100~	
1次 First order	98	49.5	21	29	9	10	16	6	7	11~139	42.2	4,139	56.2
2次 Second order	50	25.3	15	8	3	4	6	8	6	1~207	41.6	2,080	28.2
3次 Third order	23	11.6	9	6	2	2	3	1	1	1~86	21.4	492	6.7
4次 Fourth order	19	9.6	6	4	4	2	1	1	1	2~130	25.4	483	6.6
(0次) Zero order	8	4.0	7	1						2~26	6.1	49	0.7
対象外 Exceptional area	-	-								<2~6>*	<3.3>*	<23>*	
合計 Total	198	100.0 %	37	39	17	17	28	7	14		37.2	7,361	100 %
											<36.6>***	<7,243>***	

注 Note 1) 1格子点は0.01 haの面積をもつ。Each grid point had an area of 0.01 ha.
 2) 「0次」とは、「水流」を含まない区分区画。The zero order area means a division with no streams.
 < >*内の数値は、特別大きい1区画を除いた他の7区画のみについての値。
 The numerical value in the angle brackets with asterisk < >* was the result of seven divisions except for the special large catchment basin.
 3) 「対象外」とは、落水線が対象流域の外側に向かう格子点。
 The "exceptional area" means the grid point whose aspect faces the outside of the objective catchment basin.
 4) 「合計」行の「平均値」等に関する上側の数値は、境界線内の全格子点に対する単純計算値であり、< >*内の数値は「対象外」格子点を除いた場合の計算値である。
 The numerical value in the angle brackets with double asterisks < >*** was obtained by calculations excluding grid points in the exceptional area.

表-6.2.2 水流次数別小流域解析結果
(名古屋大学農学部附属武演習林月ヶ平地区)
Table-6.2.2 Result of smaller catchment basins analysis according to the stream order
(Tsukigataira area of the Inabu Experimental Forest, Nagoya University)

水流次数 Stream order	小流域 区分数 Number of smaller divisions	格子点数 Number of grid points	格子点数 の比率 Percentage of number of grid points	1小流域当り 平均格子点数 Average number of grid points per smaller catchment basin	水流上の 格子点数 Number of grid points on the stream	合計 水流長 Total length of streams (m)	水流長 の比率 Percentage of total length of streams	平均 溪床勾配 Mean inclination of the stream bed Sr(%)	水流数 Number of streams Nr	平均 水流長 Mean length of a stream Lr(m)	1 水流当り面積 (格子点数) Mean area of a stream (Number of grid points) Ar		流出先の水流次数 The stream order of the stream into which the objective stream flows	
											2次 Second order	3次 Third order	4次 Fourth order	
1次	98	4,139	56.2	42.2	559	6,746	54.7	36.3	98	68.8	42.2	74	14	10
First order					<5.7>	<68.8>						(22+52)		
2次	50	2,080	28.2	41.6	310	3,709	30.0	25.6	22	168.6	94.5	27	14	9
Second order					<6.2>	<74.2>							(3+11)	
3次	23	492	6.7	21.4	82	1,011	8.2	18.8	3	337.0	164.0	20	3	3
Third order					<3.6>	<44.0>							(1+2)	
4次	19	483	6.6	25.4	74	876	7.1	11.5	1	876.0	483.0	18		18
Fourth order					<3.9>	<46.1>								
(0次) (Zero order)	8	49	0.7	6.1								3	3	2
対象外 Exceptional			1.6											
合計 Total	198	7,361	100.0 %	37.2	1,025	12,342	100 %	29.9	124	99.5	59.4	104	51	42

注 Note 1) 1格子点は0.01 ha の面積をもつ。 Each grid point had an area of 0.01 ha.
 2) 「0次」とは、「水流」を含まない区分区画。 The zero order area means a division with no streams.
 3) 「対象外」とは、落水線が対象流域の外側に向かう格子点。 The "exceptional area" means the grid point whose aspect faces the outside of the objective catchment basin.
 4) 数値欄の下側 < > 内の数値は1床流域あたりの平均値。 The numerical value in the angle brackets < > is the mean for a single stream.

いる制約と関連して発生したもので、ある水流上の1点に複数個（大概是3個以上）の水流が合流する場合に、それら合流してくる水流に挟まれた区域が中途半端な状態で残されてしまうためである。しかし、8個のうち1個を除けばいずれもきわめて小さく、周辺の区画のどれかに合併されるべき性格のものであって、塚本ら(115)のいう「0次谷」とは全く性格が異なる。

境界線内に含まれる全格子点(7,361点)のうち118点(1.6%)が、落水線が流域の外側に向かう「対象外」となった。これらの格子点の大半は、周囲8格子点のうちで最低の標高をもつ点に向かう方向を「方位」とするという、土木工学や地理学の分野で従来からよく用いられてきた方位図作成アルゴリズムが内包する欠陥に由来するものである。

3. 考察

(1) 水系図の精度

図-6.2.1に描かれた水系図は、水源発生に必要な集水面積値レベルを図-5.3.5の場合(20格子点)の半分(10格子点)として作成したものである。図-6.2.1では水流次数別に表示する必要上、等高線は標高差50mごとに描いてあるが、水系図のおおよその状況は(水源部を別とすれば)図-5.3.5と同じで、水流径路は等高線図ときわめて良く対応している。

水源は98個発生した。図-5.2.5の水源発生のパターン別にみると、大半の94個がパターン(a)で、残り4個が変形のパターン(c)であった。「変形(c)パターン」とは、(c)パターンにおいて水源格子点の上流部に位置する横並び3格子点(黒丸印)のうち、まん中の格子点のさらに上流部にある格子点からの(黒矢印で示してある)流入パターンに柔軟性を持たせたものである。この変形(c)パターンは、大きな谷に隣接して小さな谷が派生している場合に見られた。逆にいえば、このパターンを採用した結果、これまでは抽出されることのなかった小さな谷を拾い上げることが可能となった。単純な集水面積値のみに基づいて水源を発生させたのでは疑似水流が生じてしまう平行斜面でも、水源発生パターンが機能した結果、地形図との対応がかなりよくとれた水系図となっている。

ここで注意すべきは、水源発生条件を変化させれば、当然、水系の先端部が変化し、水流長なども変わってくる点である。今回、集水面積値レベルを10として抽出した水流長の合計は12,342mであった。この場合の水系密度は168(m/ha)となる。今回抽出した水系線は、地形図上に水系線が引かれている部分だけでなく、さらにその上部の、等高線が凹部をもつと判別しうる限界近くまで延びているものが大半であった。水源がこの98個ですべて抽出し尽くされているかどうかを調べるために、コンピュータによる算出結果を拡大等高線図上に描いた結果、ほとんどの谷頭が抽出されていることがわかった。しかし、等高線図に基づいて手作業で解析した場合にはパターン(b)の水源が発生していると判別しうる部分で、平行斜面的な扱いがされているところが数箇所見受けられた。

これは、ある格子点での方位を、その周囲8格子点中で最も標高の低い点に向かう方向として求めるという、土木工学や地理学の分野で従来用いられてきた方位算出のアルゴリズムがもつ欠陥に由来するものである。このような箇所については、等高線の点列データを用いて(4.2.1)式によって厳密に方位角を算出し、その結果に基づいて8方位区分すれば、等高線

図に対する方位の誤差が小さくなり、より等高線図に適応した水系図を系統的に抽出することが可能になると考えられる。

なお、森林利用学的地形分類法(20, 23)では、地形指数を算出するうえでの重要な一因子として「谷密度」をとりあげている。これは縮尺1:50,000の地形図上で、水系の先端部において目読しうるかぎりの等高線の凹部を「谷」として、その出現個数を数え上げるものである。今回の解析実験では、縮尺1:5,000の地形図を用いており、図面の精度がそもそも異なる点は留保しなければならない。しかし、ディジタイザの読み取り精度を同一にして両縮尺の図面を計測し、かつ他方で同じ判別基準に基づいて手作業で両縮尺の図面を計測するとすれば、ディジタイザと手作業の読み取り精度の差に関しては、原理的には両図面の場合とも、今回と同じ(ほとんど大差がない)傾向が得られるはずである。従って、上記の地形指数の1因子である谷密度を、DTMを用いて系統的に算出することも可能であると考えられる。

(2) 小流域区分結果

図-6.2.2から、対象流域を系統的に小区分するアルゴリズムが、基本的には有効に機能していることがわかる。

表-6.2.1の水流次数別小流域区分結果を見ると、198個の小流域区分区画のうち、30格子点未満のものが115個で約60%を占める。水流次数別に見ると、1次水流に属するものが個数で約5割、面積(格子点数)では56%になる。2次水流に属するものでは個数、面積とも1/4強で、3次水流および4次水流に属するものは、個数、面積ともきわめて少ない。2次水流の一部を除けば、いずれの水流次数とも、小さな区分面積に区画されたものの割合が多くなっている。

1次水流で10未満の格子点数となる小流域が出現しないのは、そもそも水源発生条件の一つとして集水面積値レベルを10以上としたためである。それに対して、2次~4次水流とも、最頻値が10未満の欄に表れていることは注目に値する。しかも、「値域」欄を見ると、2次~4次水流に属する小流域の最小値は1もしくは2となっている。これは、水流の合流点を基準として流路区間を区分する方法論を採用していることに由来するものであり、ある水流上において、きわめて近い距離内で複数の水流合流点が出現していることを意味している。1次水流に区分される小流域は、概して流域の最上流部に位置するものであるため、水流の合流に伴う流路区間の細分化の影響を2次水流以上のものようには受けない。そのため、平均面積も大きくなるものと考えられる。

羽田野ら(16)は、愛知県小原村にある矢作川上流の小流域(面積約11ha)を対象として、縮尺1:500、等高線等間隔1mの地形図に基づき、手作業により128区域に区分している。その区域分け方法は、①隣接ないし相対する斜面について最大傾斜線(またはその延長部)の交角(上流側)が90°より大きい場合、その斜面間の最低凹線を「谷線」とする、②「谷線」の上流端での集水域を「源頭域」とし、それより下流の谷線の両側を「側方流域」、そのうち左岸側を「左岸域」、右岸側を「右岸域」とする、というものである。

今回の名古屋大学稲武演習林を対象とした区分結果を、羽田野らの区分結果と対比してみ

ると、今回のコンピュータによる系統的な区分法による結果の特徴として、特に緩傾斜の山腹斜面における1次水流の小流域において、短冊状の細長い区分区域が比較的多く出現していることが挙げられる。また、1次水流の径路のうち、ごくわずかの例であるが、等高線図との対応が乱れているものがある。これは、先に述べた方位図作成のアルゴリズムの制約によるものと考えられる。2次以上の高次の水流によって区分される、それぞれ低次の小流域を包含した大区域になると、等高線地形図との対応はきわめて良好である。

以上の結果から、山腹斜面を小流域単位に区分する目的に対しては、通常、土木工学や地理学の分野で用いられている方位図作成のアルゴリズムでは精度的に不十分である、といえる。従って、今後、等高線情報に基づくより正確な方位図作成のアルゴリズムの開発が重要な課題となる。

(3) 水流次数の解析結果

表-6.2.2 に示されているように、今回の名古屋大学稲武演習林月ヶ平地区(面積約 74 ha)

表-6.3.1 水流次数解析結果の総括表
(名古屋大学農学部附属稲武演習林月ヶ平地区)

Table-6.3.1 Summary of the stream order analysis
(Tsukigataira area of the Inabu Experimental Forest, Nagoya University)

水流次数 Stream order	(1)	(2)	(3)	(4)
	分岐比 Branch ratio	流長比 Length ratio	勾配比 Inclination ratio	面積比 Area ratio
	R_b	R_l	R_s	R_a
$r \dots (r+1)$	N_r / N_{r+1}	L_r / L_{r+1}	S_r / S_{r+1}	A_r / A_{r+1}
1 --- 2	4.45	2.45	1.42	2.24
2 --- 3	7.33	2.00	1.36	1.74
3 --- 4	3.00	2.60	1.63	2.95
平均 Mean	4.93	2.35	1.47	2.31

注 Note 1) 対象流域をホートン水系網とみなして算出した結果で、丸印内の数字はホートンの法則番号に対応。

This table was made on the assumption that the HORTON's laws would hold in the objective catchment basin. The numerical values in angle brackets correspond to the number of the HORTON's laws concerning to the stream order.

2) N_r , L_r , S_r , A_r はそれぞれ水流次数別の水流数, 平均水流長, 平均溪床勾配, 平均面積を表し, 表-6.2.2 の値を適用。

The variables N_r , L_r , S_r and A_r denote the number of streams, the mean stream length, the mean inclination of the stream bed and the mean area per stream according to the stream order respectively. The values of these variables were the same ones in Table-6.2.2.

における水系の最高次数は4次となった。1次水流98本の1水流当たり平均水流長は68.8m、平均溪床勾配は36.3%、平均面積は0.42haであった。次数別にみた平均溪床勾配の大きさは、1次>2次>3次>4次の順に低くなっていくことがわかる。この流域の主流長は1,712mであった。

一般に、水系網には規則性があり、水流の次数の増加につれて、水流の本数・長さ・傾斜・面積が幾何級数的に増大または減少するような法則性のなりたつ水系網を、ホートン網とよぶ(31, 108)。今回抽出した水系網がホートン網であると仮定して、ホートンの第1～第4法則に関する各比例定数を算出した結果が表-6.3.1である。算出に用いた各値は表-6.2.2のものを適用した。

表-6.3.1の評価としては、一応、ホートンの法則が成り立っていると見て差し支えないであろう。ただし、同表において、2次-3次の場合についての①分岐比と④面積比の2つが、平均値から大きくかけ離れている点が目につく。今回の解析結果では、3次水流の抽出数は3本であったが、これが仮に5本であったとすると、①～④の2次-3次についての算出値がそれぞれ変化し(2次水流に区分されたものの中から、一部が3次水流に移行する)、それは当然1次-2次および3次-4次についての算出値にも影響するものであるため、全体として3つの算出値とも平均値に近づき、その結果として、各比例定数はより安定した値をとることになると期待される。今後、方位図作成アルゴリズムが高度化されれば、水系網の作成精度はより高まると期待されるから、作成される水系網のホートン網としての規則性は一層高まるものと考えられる。

(4) 流域構造解析の林道網計画等への応用の可能性

わが国のような温暖多雨地帯にある山地では、林業工学分野の各種計画の立案に際し、降雨に伴って発生する斜面表層崩壊についての対処を、計画の中に何らかの形で取り入れておくことは、きわめて重要である。たとえば、地形が複雑で急傾斜の山地を対象とする林道網計画の場合、単に経済効率面からの配慮だけでなく、林地の保全、すなわち山腹斜面の“崩れにくさ”をも評価基準に組み込んだ路網配置を行えば、作設される林道網は、林業の基盤としての役割を發揮しつつ、維持・管理面での経費はあまりかからずに済むはずであるから、結局、全体としては経費節減にもつながることになると期待される。

筆者は、格子状DTMの各格子点位置に対応した林地の崩壊危険度を何らかの方法で評価しておき、その評価値を他の多くの基準と同時に配慮させつつ路網の通過地点を系統的に選択していく方法が、今後の林道網配置計画法として重要であると考えている。

その場合、羽田野(15~17)が提案した「地形的滑動力示数」 F が、斜面崩壊の危険性を予知する指標としては最も有望であろう。これは、ある地点における傾斜角 $S(=\tan\theta)$ とそこでの上流集水面積 (A) の平均奥行き $a(=A/W)$ ；ただし、 W は崩壊地であれば崩壊源下端幅、未崩壊地では $W=5\text{m}$ と仮定する)とを、次式のように組み合わせて求める指標で、この値がある値以上では崩壊が発生しやすいことが確かめられている(15)。

$$F=S \cdot a^{1/3}$$

沖村ら(84)は格子状DTMに基づいてこの指標値 F を系統的に算出し、その結果を用い

て斜面が崩壊しやすいか否かを推定する崩壊危険斜面予知手法を示している。

林道網計画にこの「地形的滑動力示数」 F を取り入れるには、計画に先だち、DTMに基づき流域構造を解析して、その結果から S と a を各格子点について求め、格子点ごとの F 値を決定しておく必要がある。具体的な計画手順は、伐出作業など森林作業の面から大局的な路網のおおよその通過区域を決定した後、山腹斜面の“崩れにくさ”を基準として局所的に路線通過適地についての最適選点を行うという、二段階の計画法をとるのが实际的であろう。

上記の課題は、本章で述べた流域構造解析システムを適用すれば、比較的容易に実現可能と考えられる。林地の環境保全の問題を、水処理問題と関連させて把握することは、きわめて有効であるし、また重要である。これは、多分に日本の持つ自然環境に規定された課題であると考えられるから、わが国の林業工学分野で、今後、是非とも発展させる必要がある。

その他の研究課題として、林道網配置の評価指標としての林内到達距離(24, 25, 96)や各種森林作業に対する路網開設の必要度(40, 51)、林地の地表条件(22)などの把握方法も、DTMを用いることにより、山地流域の構造解析を踏まえた3次元的な取り扱いが可能になると思われる。それらは、計画手法の発展をもたらすことにも通じるであろう。

以上のように、DTMを用いた山岳林の地形解析手法、とりわけ流域構造の解析手法は、林業工学分野において今後、林道網計画をはじめ、多くの応用の可能性を持っている。

4. まとめ

基礎的な地形データ処理法である高精度の格子状DTM作成システムとDTMを応用した各種の地形計測・解析手法を総合して、「山岳林数値地形解析システム」を構築した。このシステムは、主に1語32ビットの大型計算機を対象としたもので、FORTRAN言語を使用している。

本章では、山岳林数値地形解析システムが、山岳林における地形解析、特に流域構造の系統的な解析を迅速かつ簡便に行ううえで有効であることを、名古屋大学稲武演習林内の1流域をを対象とした小流域区分の適用例によって実証した。その事例では、面積約74haの流域を全部で198個の小流域に区分した。ホートン流の水流次数区分結果は、最大次数が4であった。

水源は98個発生したが、「水源発生パターン」の考え方を水系図作成段階で導入した結果、これが有効に機能し、疑似水流の発生をほぼ完全に防いだ。2次以上の次数の水流によって包含される、低次の小流域を含んだ流域区分の結果は、地形図との対応がきわめて良好である。対象とする流域でホートンの水流4法則が成立するかどうかを検討した結果、流長比と勾配比は成立しているものの、分岐比と面積比は一部で不安定な値となった。これは、小流域区分の結果に一部、不十分な面があることを示唆するものと考えられる。

隣接する8格子点のうち標高が最低の点に向かう方向を「方位」として作られた方位図は、等高線図との対応が不十分であり、小流域区分の系統的な処理を行なううえで、部分的に不正確さや、いろいろな不都合をもたらしている。これの早急な革新は、地形解析分野における今日的な、重要な検討課題である。

最後に、山地の流域構造解析法を、今後、林道網計画等へ応用することの可能性について、

斜面表層崩壊の発生危険度の予知指標である羽田野（15～17）の「地形的滑動力示数」を活用する方法を例として考察した。

VII 総 括

本研究は、林業工学分野を対象とした山岳林における地形解析を、コンピュータを用いて系統的に、高精度で、迅速に、かつ簡便に行うための、「山岳林数値地形解析システム」を確立することを目的として、数値地形モデル(DTM)に基づき山岳林における地形特性を、可能な限り原図に近く高い精度で再現するための条件に関し、格子状DTMの作成方法と基本的なDTMの応用方法の両面から基礎的な検討を行ったものである。具体的な検討課題として、林業工学の立場から見て必要な精度をもつ格子状DTMの作成方法の開発、同DTMを用いた山地地形計測の傾斜因子に関する精度分析、同じく同DTMに基づく山地流域の系統的な構造解析法の開発、および山岳林数値地形解析システムの構築を取り上げた。

第I章では、林業工学分野における地形解析の意義と、DTMをこの分野で適用するうえでの要件、および本研究の位置づけについて明らかにした。

わが国の森林は一般に地形が複雑で急峻な山地に成立している割合が多いため、山岳林における地形解析は、林業工学分野の各種計画立案に際して不可欠な作業である。近年、コンピュータの発達に伴い、地形を3次元の座標値で表わすDTMが、系統的な地形解析を実行するための有効な手段として広く各分野で脚光を浴びつつある。山岳林を主な計画対象とするわが国の林業工学分野にDTMを適用するうえで、山地の傾斜因子に関する精度の把握や山地の流域構造の系統的な解析法の確立は不可欠であるが、これらの問題について一般土木工学等における従来の検討例では満足のいく結果が得られていない。本研究は、この点に着目し、DTMを林業工学分野に適用するに際して検討が不可避の、最も基礎的な課題について解明を試みたものである。

第II章では、高精度の格子状DTMを作成するためのシステムの開発に関する諸問題について解明した。

格子状DTMの作成に際し、林業工学分野で重要な因子となる微地形を高精度で再現し、かつ簡便に作成しうる系統的な方法を実現するためには、データ採取が比較的容易な等高線の点列データが持つ最大傾斜線情報を活用するのが最も有効であるが、それには、等高線点列データの機能的な処理方法の開発が不可欠である。

そこでまず、等高線点列データを座標点に対応した2次元配列の記憶場所に、2種類の高密度記憶方式を用いて効率的に格納し、任意の格子点の周辺で局所的に必要な本数の等高線の点列を正確、迅速に探索・抽出しうる、点列データ高密度格納・探索方式を設計した。この方式は、格子間隔を小さくしてデータ点採取密度を高くするほど、従来の方法よりもデータ探索効率が著しく増す、という特徴を持つことを定量的に確かめた。

次に、この点列データ高密度格納・探索方式を用いて、高精度の格子状DTMの作成方式を開発するための検討を行った。格子点から2本の等高線に至る距離で等高線標高を比例配分する内挿方式では、やせ尾根の張り出し部や傾斜変換線付近などで等高線の再現精度が劣る難点を持つ。これを克服するため、部分的に3次スプライン関数補間を導入した改良法を検討したが、採取すべき点列データ数を格子点周辺で3本の等高線から各1個づつとする条件のもとでは、全体として予期した程の精度向上は得られなかった。そこで、新たに外挿方

式を導入した結果、上記の地形を原図に比較的忠実に再現できるようになった。独立標高点付近のように等高線点列データの配置条件が著しく悪い箇所での格子点標高の演算については、2次曲面近似方式も必要となる。以上の検討結果から、DTMの作成精度を高めるためには、内挿方式、外挿方式、スプライン関数補間方式、2次曲面近似方式の4つを有機的に組み合わせる必要があることが明らかになった。

この4者を組み合わせたハイブリッド方式による格子状DTM作成システムを開発し、名古屋大学農学部附属稲武演習林内の1流域に適用した結果、内挿方式単独による場合よりも原図に近い等高線図を再現しうるDTMを作成できた。演算方式別格子点標高の検討結果から、この精度向上は主として外挿方式の導入効果によるものであることがわかった。

第III章では、DTMの作成精度の分析を行い、ハイブリッド方式の優位性を実証した。

系統的な地形解析を行う場合、対象とする地域の大きさや地形データ点の採取密度は、コンピュータの記憶容量によって制約される。格子間隔を一定とした条件のもとでは、地形をより高精度で原図に近く再現しうるDTMが必要となる。そこで、DTMの精度を検討する目的で、原図の等高線とDTMから再現される等高線との間のズレに着目し、ズレた面積の合計を等高線総延長で除した誤差平均幅を評価指標として提起した。

この指標を用いて従来の各種格子状DTM作成方式を比較した結果、①格子点標高の演算に用いるデータ点の個数が多くなるほど精度は低くなること、②格子点近傍での地形の近似方式では、3次曲面近似<2次曲面近似<平面近似<線近似の順に精度が高くなること、③格子点により近い等高線データを演算に用いるほど高精度になること、④曲面近似方式、平面近似方式とも精度が不安定になることを明らかにした。この実験結果から、高精度の格子状DTMを作成するためには、標高を求めるべき格子点の近傍で必要最少限の等高線点列データから格子点を通る最大傾斜線を定め、その線上で線近似の標高比例配分内挿方式と外挿方式を主体とした格子点標高の演算を行えばよいことがわかった。ハイブリッド方式にはこの結論に沿ったアルゴリズムが採用されており、この方式で作成された格子状DTMは安定した高精度で原図の等高線を再現できることを、他方式との比較実験の結果により実証した。

第IV章では、DTMによる山地地形計測手法の精度について定量的な分析を行い、高精度で傾斜因子を推定するための条件を解明した。

山地の地形を均一な特徴を持つ微少な斜平面の集合と考え、DTMを用いて山地の局所地形量を計測する代表的な手法の、アルゴリズムの特徴と精度について考察した。まず、格子点を挟む2本の等高線の点列データから直接、格子点での傾斜因子を算出するためのアルゴリズムを提起し、地形図に対する適合性を検討した。沢筋で等高線が著しく屈曲している部分を除けば、本アルゴリズムを用いて算出した方位角は、等高線図ときわめてよく対応しており、また2本の等高線に至る距離に基づいて算出した傾斜角は、手作業による場合とほぼ等しい値となった。手作業に比べて本法は、はるかに簡便であり、また人為による誤差の入り込む可能性も少ないから、精度の面でも優位性を持つことになる。

次に、格子状DTMに基づく傾斜の推定精度の把握を目的として、縮尺や平均傾斜角の異なる各種地形図を用いた実験により、傾斜近似方式および格子間隔の各影響を検討した。そ

の結果、傾斜の近似方式としては、格子の4隅にある格子点の標高のみを用いる最も単純な2次式近似を用いれば実用上十分であること、傾斜因子の正確な把握が目的の場合、一般土木工学における標高推定のみを目的とした場合に対して、格子間隔をより小さくする必要があることを明らかにした。この結果に基づき、傾斜の推定精度を考慮した縮尺別の適正格子間隔を求めた。

さらに、格子状DTMによる山地の平均傾斜の推定精度について検討し、平均傾斜角は格子間隔が大きくなるにつれて漸減傾向をもつが、平均方位角は格子間隔が10～50mの範囲ではほぼ一定していることを明らかにした。

第V章では、DTMに基づき山地の流域構造を系統的に解析する方法を開発するための問題点について検討した。

水系図作成の基礎は、8方位区分に基づいて作成する方位図と集水面積図であるが、後者に関して「水源発生」の4パターンを提起し、この考え方をアルゴリズムに採用することによって、従来の水系図に見られた疑似水流の発生を防げることを実証した。また、ホートンの水流次数の考え方に基づく1次流が水源位置から始まるものとし、水流上となる格子点の迅速な抽出法、複数の水流の合流点を境とする流路区間の系統的な区分と次数決定法、および各流路区間への自動的な番号付け方法、その結果を踏まえた小流域の自動的な区分法などのアルゴリズムを追求し、迅速な流域構造解析を可能とするシステムを開発した。このシステムによって抽出された水流径路は、等高線図とおおむね良く合致することを確かめた。さらに、格子間隔が大きくなるにつれて、DTMから再現される等高線の精度は一般に劣化するものであるが、格子間隔を2倍に拡大しても、水系図作成への影響はさほど大きくないことを確かめた。

第VI章では、「山岳林数値地形解析システム」を提起し、このシステムにより、DTMに基づく山岳林の流域構造の自動的な解析が迅速、かつ簡便に行え、山岳林における地形解析を行ううえで有用であることを実証した。

あとがき

本研究では、林業工学分野を対象とした系統的な山岳林の数値地形解析手法を確立することを目的として、①高精度の格子状数値地形モデル (DTM) 作成システムの開発、② DTM の作成精度の分析、③ DTM による山地の地形計測とその精度の分析、④ DTM に基づく山地流域の構造解析法の開発、および⑤山岳林数値地形解析システムの構築に関する検討を行った。

高精度の格子状 DTM 作成方式の開発に関連した 2 つの章では、主として効率的な地形データ処理方法の設計・開発にかかわる諸問題を取り上げ、本研究で述べた点列データの高密度格納・探索方式の優位性について実証した。本研究で示した、ハイブリッド方式で高精度の格子状 DTM を作成するためのアルゴリズムは、名古屋大学大型計算機センターのライブラリー・プログラムとして既に登録されている。

本研究では、また、DTM を応用した基本的な数値地形計測・解析手法、および山地流域の構造解析法について、その精度の面に着目して検討を行った。これらの検討結果は、今後、DTM の応用範囲を拡げていく際に、DTM の可能性と限界に対する理解を深めるうえで、一定の意義をもつものと思う。山岳林数値地形解析システムについては、今後、その内容を系統的に充実させて行く予定である。

本研究は、地形データを数値的に処理する手段としての地形解析を、研究室のレベルで可能な限り簡便化することを意図して取り組み始めたものであるが、地形解析の道具として不可欠な高精度の格子状 DTM を簡便に作成するための検討にこれまで大部分の時間を割かれたため、その利用面、応用面に関する検討については、ごく一部を除き、今後の課題とせざるをえなかった。

近年、林業工学分野における DTM の応用例は著しく増えている。その一例として巻末の引用文献リストから拾い上げてみると、①林道関係 17 件、②架線集材関係 5 件、③森林作業関係 4 件、④その他 2 件となっており、林道関係の研究の多いことがわかる。興味深いことに、ドイツで出版された林道関係の文献 (4) に、わが国での DTM を用いた林道路線配置計画に関する研究 (54) が、先駆的な例として紹介されている。

以上の例からも推測されるように、今後、林業工学分野における各種計画の立案に際して、DTM がその応用範囲を一層拡げていくようになると考えられる。DTM を用いた各種の手法を発展させるには、その大前提として、DTM そのものを誰でも簡便に作成できる条件の整備が必要であるが、本研究の成果の一部であるハイブリッド方式による高精度な格子状 DTM 作成システムは、そのための手段を提供するものといえる。また、DTM を用いた計画手法が発展するに伴い、そのための基礎作業を行う山岳林における系統的な地形解析作業も需要が増すことは必然であり、本研究の成果として提起した山岳林数値地形解析システムは、今後、その有用性をおおいに発揮するものと期待される。

謝 辞

本研究をとりまとめるにあたり、終始懇篤なる御指導と御批判を賜った東京大学農学部南方康教授（現・同名誉教授）に対し、心からの謝意を捧げる。また、有益な御助言と励ましの言葉を頂いた東京大学農学部 小林洋司助教授（現・同教授）、ならびに多大の便宜と激励を賜った名古屋大学農学部 森岡昇教授および長嶋郁博士、そして山岳林地域における地形の数値化に関する研究に興味を抱く最初の機会を与えて下さった元農林水産省林業試験場中島巖博士にも謹んで御礼申し上げる。

そのほか、資料のとりまとめに際し御協力頂いた、元名古屋大学農学部林学科文部技官 安達久章氏、および、名古屋大学農学部林学科の近藤稔教官はじめ、多くの教職員、学生各位にも深く感謝の意を表す。とりわけ、元名古屋大学農学部林学科大学院生の倉地奈保子氏（現農林水産省森林総合研究所）、梶本卓也氏（現農林水産省森林総合研究所）、および同学科学生の寺田秀樹君（1988年卒業、現岐阜県庁）、三宅史朗君（1989年卒業、現愛知県庁）、四本圭介君（1990年卒業、現同学科大学院生）、加藤一郎君（1991年卒業、現名古屋大学工学部情報工学科大学院生）、丸本和博君（1992年3月卒業予定）の皆さんには、資料作成の点で大変お世話になった。

なお、本論文は「東京大学審査学位論文」であり、本研究における演算処理は、名古屋大学大型計算機センターのFACOM M-382およびM-782を利用したことを付記しておく。

ささやかながら本論文を、父 北川弘造と亡き母 北川 峰に捧げる。

引用文献

- 1 Blakemore, M. J. & Lloyd, P. E. : Interactive digitalizing and display procedures for a computer-based industrial information. Harvard Library of Computer Graphics/1979 Mapping Collection 2 : 11-20, 1979.
- 2 Boyle, A. R. : Scan digitalization of cartographic data. In : Map data processing. (Freeman, H. & Pieroni, G. G., Eds.) Academic Press, New York : 27-46, 1980.
- 3 Corcoran, T. J. : Computerized mapping and wood transportation. Proc. IUFRO S4.04 Sympo. on Forest management planning and Managerial Economics, Tokyo, Japan : 343-352, 1984.
- 4 Dietz, P., Knigge, W., & Loeffler, H. : Walderschliessung. Paul Parey, Hamburg : 164-168, 1984.
- 5 Duerrstein, H. : Computer-aided network planning and road design — Needs and possibilities in European Alpine areas. Proc. Improving mountain logging planning, Techniques and Hardware, Vancouver, Canada : 45-49, 1985.
- 6 海老塚正朗・平野昌繁 : 数値地図に基づく和泉山脈西部の地形数値解析. 地形 9 : 179-192, 1988.
- 7 福嶋義宏・小橋澄治・川村 誠・酒井徹朗・和田茂彦 : 芦生演習林の地形・植生情報のデータベース化. 京大演報 61 : 110-115, 1989.
- 8 Grist, M. W. : Digital Ground Models : An account of recent research. Photogrammetric Rcd. 7 : 424-441, 1972.
- 9 後藤純一 : 山岳林施業に対する数値地形図の応用 (I) ——数値地形図および傾斜分布図について. 高知大演報 9 : 1-13, 1982.
- 10 後藤純一 : 山岳林施業に対する数値地形図の応用 (II) ——林道の概略設計と林内到達時間に基づく林道配置の評価. 高知大演報 10 : 59-76, 1983.
- 11 後藤純一 : 数値地形図を用いた地形分類. 高知大演報 14 : 57-63, 1987.
- 12 Guptill, S. C. : A digital cartographic data base for land use and land cover and associated maps. Harvard Library of Computer Graphics/1979 Mapping Collection 2 : 99-106, 1979.
- 13 萩原靖之・味生 威・出水田勉・吉田隆光 : 計画設計のシステム化へのアプローチ. 写真測量とリモートセンシング 15(1) : 1-11, 1976.
- 14 浜田修弘 : 森林地図情報システムについて. 森林計画研究会会報 326 : 58-62, 1989.
- 15 羽田野誠一 : 崩壊性地形 (その2). 土と基礎 22(11) : 85-93, 1974.
- 16 羽田野誠一・安仁屋政武 : 斜面微地形の計測と解析(2)——矢作川右支吾妻川源流の小流域での事例. 日本地理学会春季大会予稿集 10 : 9-10, 1976.
- 17 羽田野誠一・他 : 斜面災害の発生しやすい場所 (場所の予測). (高橋博・他編「斜面災害の予知と防災」白亜書房, 東京) : 95-221, 1986.

- 18 平野昌繁：六甲山地の数値地図と斜面発達モデルにもとづく地形変化速度の一評価法。地形4：241-249, 1983.
- 19 平野昌繁・横田修一郎：西南日本に例をとった電子計算機による地形数値解析。地理評49：440-454, 1976.
- 20 堀 高夫：路網計画のための図上地形判定について。日林誌47：168-170, 1965.
- 21 堀 高夫：集運材地域の平均傾斜判定法（II）——等高線長の測定により判定する方法。日林誌50：231-237, 1968.
- 22 堀 高夫：車が林内不整地を走行する際に遭遇する地表障害物の出現頻度に関する考察。日林誌52：58-61, 1970.
- 23 堀 高夫・菊地政泰：集運材地域の平均傾斜判定法。日林誌47：337-341, 1965.
- 24 堀 高夫・北川勝弘：点格子法による平均到達距離推定値の誤差。日林誌69：146-151, 1987.
- 25 堀 高夫・北川勝弘・長谷川好正：林内到達距離の分布に関する研究。日林誌53：355-358, 1971.
- 26 細田 豊：砂防計画における地形学の応用に関する研究。高知大農紀要36：1-56, 1980.
- 27 福田正巳：Digital Terrain モデルによる地形解析について。日本地理学会春季大会予稿集：62-63, 1974.
- 28 市田浩二・吉本富士市：スプライン関数とその応用。教育出版，東京，220p., 1979.
- 29 Ikeda, S. : "Data-map system" for forest management. Proc. IUFRO S4.04 Sympo. on Forest management planning and managerial economics, Tokyo, Japan : 318-321, 1984.
- 30 池田俊雄：建設側から見た地形判読の意義。地形6：153-161, 1985.
- 31 石水照雄・奥野隆史編：計量地理学。共立出版，東京：62-81, 1975.
- 32 上飯坂実：森林利用学序説。地球出版，東京，180p., 1971.
- 33 上飯坂実・他：新林業土木学。朝倉書店，東京：1-4, 1988.
- 34 上林徳久：豪雪地帯造林地に発生した表層崩壊地の分布傾向について——数値地形モデルを用いた分析。35回日林中支論：217-220, 1987.
- 35 木立正嗣：林業技術者のための地形。日本林業技術協会，東京，128p., 1973.
- 36 北川勝弘：林道の路線選定の自動化に関する研究（I）——均一な縦断勾配の場合。83回日林講：420-423, 1972.
- 37 北川勝弘：数値地形モデルによる傾斜因子推定の精度。日林誌58：202-213, 1976.
- 38 北川勝弘：高密度記憶方式を用いた数値地形図の作成。日林誌62：184-189, 1980.
- 39 北川勝弘：林道網探索のための結合行列。日林誌62：468-472, 1980.
- 40 Kitagawa, K. : A new logical system for forest road network planning. Proc. IUFRO S4.04 Sympo. on Forest Management Planning and Managerial Economics, Tokyo, Japan : 353-362, 1984.
- 41 北川勝弘：森林の地理情報処理システムの設計。96回日林論：694-651, 1985.

- 42 北川勝弘：等高線データに基づく高精度数値地形図の作成. 1回 AUTOCARTO JAPAN 論文集：48-51, 1985.
- 43 Kitagawa, K. : Research methodologies that can or have successfully used micros in forest engineering. Proc. 18th IUFRO World Congress, Div.3, Ljubljana, Yugoslavia : 344-355, 1986.
- 44 北川勝弘：数値地形図作成へのスプライン関数の導入. 35回日林中支論：159-162, 1987.
- 45 北川勝弘：高精度数値地形モデル作成システムの開発に関する研究. 地図 25(3)：1-10, 1987.
- 46 北川勝弘：高精度数値地形モデル作成システムの概要. 98回日林論：681-684, 1987.
- 47 北川勝弘：等高線データに基づく傾斜因子算出のアルゴリズム. 36回日林中支論：149-152, 1988.
- 48 Kitagawa, K. : Production of the highly accurate digital-terrain-model and its application to the topographic analysis. Inter. Arch. Photogrammetry and Remote Sensing, Kyoto, Japan, 27/B3 : 377-386, 1988.
- 49 北川勝弘：数値地形モデルによる山地の流域構造の解析手法（I）——プロトタイプ
の解析アルゴリズム. 37回日林中支論：127-130, 1989.
- 50 北川勝弘・安達久章：境界線データに基づく面処理に関する一考察. 38回日林中支論
：127-130, 1990.
- 51 北川勝弘・森岡 昇：森林作業の面からみた林道開設必要度の評価. 94回日林論：699
-702, 1983.
- 52 北川勝弘・李 永浩：数値地形モデルによる山地の流域構造の解析手法（II）——水
流の次数解析をとり入れた解析システムの改良. 100回日林論：777-778, 1989.
- 53 小橋澄治・平野昌繁：砂防学と地形情報——六甲山系土砂害対策のためのデータベ
ースの構築. 地形 6：205-224, 1985.
- 54 小林洋司：山岳林における林道網計画法に関する研究. 宇大農学報 38：101p., 1983.
- 55 Kobayashi, H. : Planning system for road-route locations in mountainous forests.
J. Jpn. For. Soc. 66 : 313-319, 1984.
- 56 木平勇吉・松井正人：森林の鳥瞰図の作成. 信大農紀要 14(1)：49-54, 1977.
- 57 木平勇吉・松井正人：森林資料のファイリングの研究（I）——地図の重ね合わせ.
信大農演報 14：45-55, 1977.
- 58 葛巻修治・横山隆三：各種補間法によるデジタル標高データの精度に関する一検討.
2回 AUTOCARTO JAPAN 論文集：73-78, 1986.
- 59 丸安隆和・村井俊治：土木設計システムにおける地形情報処理. 土木学会誌 55(10)：29
-37, 1970.
- 60 丸安隆和・村井俊治：地形情報の抽出とその自動処理. カラム 34：31-35, 1970.
- 61 丸安隆和・村井俊治：シミュレーションモデルを用いた宅地造成の事前評価に関する
研究. 写真測量 10(2)：30-36, 1971.

- 62 丸安隆和・村井俊治：地形情報処理による流出解析の手法に関する研究。土木学会論文報告集 197：21-31, 1972.
- 63 丸安隆和・杉本幸治・田中総太郎：大規模な住宅市街地の開発のための写真測量の系統的利用に関する考察。写真測量 10 (3)：32-47, 1971.
- 64 丸安隆和・杉本幸治・田中総太郎：大規模な住宅市街地の開発のための写真測量の系統的利用に関する考察（承前）。写真測量 10 (4)：7-15, 1971.
- 65 松崎 健・北川勝弘・鈴木正登：数値地形図の自動的作成方法。24 回日林中支講：93-98, 1976.
- 66 McGaughey, R. J. & Twito, R. H. : SIMYAR : a cable-yarding simulation model. Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-205., Portland, OR : U. S. D. A., For. Serv., Pacific N. W. Res. Stn., 28p., 1987.
- 67 McGaughey, R. J. & Twito, R. H. : VISUAL and SLOPE : perspective and quantitative representation of digital terrain models. Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-214., Portland, OR : U. S. D. A., For. Serv., Pacific N. W. Res. Stn., 26p., 1988.
- 68 Miller, C. L. : The impact of the new highway program on photogrammetry. Photogrammetric Engineering 22 : 834-837, 1956.
- 69 Miller, C. L. : Digital terrain model approach to highway earthwork analysis. Cambridge, MA : Massachusetts Institute of Technology, 17p., 1957.
- 70 Minamikata, Y. : Effective forest road planning for forest operations and the environment. Proc. Improving Mountain Logging Planning, Techniques and Hardware, Univ. of B. C., Canada : 219-224, 1985.
- 71 三宅八郎：林道全体計画調査におけるデジタルマップの応用。16 回林道研論：9-23, 1981.
- 72 三宅八郎：林道全体計画調査への電子計算機処理導入について——特にデジタルマップの応用をめぐって。森林航測 137 : 3-9, 1982.
- 73 水谷武司：防災地形（第二版）——災害危険度の判定と防災の手段。古今書院，東京，193p., 1987.
- 74 森 忠次・大塚岩男：土木区間の路線選定法の研究。土木技術 28 : 24-39, 1973.
- 75 村井俊治：地形の数量化。土木学会誌 58 : 93-99, 1973.
- 76 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) : 1-7, 1974.
- 77 村井俊治・大林成行・篠田 徹：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) : 17-22, 1973.
- 78 中島 巖：林分地形の数量解析について。79 回日林講：30-32, 1968.
- 79 Nakamura, F. : The method to make three dimensional view of land configuration from contour map with micro-computer. Res. Bull. College Exp. For., Hokkaido Univ. 52 : 523-538, 1985.
- 80 中村太士・新谷 融・東 三郎：斜面形態区分による侵食微地形の抽出手法。96 回日

- 林論：597-598, 1985.
- 81 中村英夫・村井俊治：Digital Terrain Model ——地形の数値的表現の方法。生産研究 20：410-415, 1968.
- 82 西村蹊二：地図の利用法。朝倉書店，東京，212p., 1970.
- 83 野上道男：数値地形分析のための処理システム。地形 6(3)：245-246, 1985.
- 84 沖村 孝・中川雅勝：数値地形モデルを用いた表層崩壊発生危険度の予測法。土木学会論文報告集 358：131-138, 1983.
- 85 大石道夫：目でみる山地防災のための微地形判読。鹿島出版会，東京，267p., 1985.
- 86 大川畑修・南方 康・上飯坂実：集材架線の最適架設位置に関する研究。東大演報 67：135-157, 1975.
- 87 尾崎幸男：等高線の精度。写真測量 12(4)：29-34, 1973.
- 88 Reutebuch, S. E.： ROUTES — a computer program for preliminary route location. Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-216., Portland, OR：U. S. D. A., For. Serv., Pacific N. W. Res. Stn., 19p., 1988.
- 89 Reutebuch, S. E. & Evison, D. C.： The cable hauler planning package：user's guide. FRI Bull. 46., Rotorua, New Zealand：New Zealand For. Serv., For. Res. Inst. 81p., 1984.
- 90 Richardus, P.： The precision of contour lines and contour intervals of large- and medium-scale maps. Photogrammetria 29：81-107, 1973.
- 91 酒井徹朗：シミュレーションモデルを用いた林道計画に関する研究。京大演報 53：162-171, 1981.
- 92 酒井徹朗：数値地形図を用いた林道の概略設計について。92回日林論：533-536, 1981.
- 93 酒井徹朗：林道の配置計画について（I）——端点除去法。京大演報 54：172-177, 1982.
- 94 酒井徹朗：林道の配置計画について（II）——集材距離・開設長による最適配置。京大演報 55：222-229, 1983.
- 95 Sakai, T.： Studies on planning method of forest roads network. Proc. IUFRO S4. 04 Sympo. on Forest management planning and managerial economics, Tokyo, Japan：363-370, 1984.
- 96 Segebalden, G.： Studies of Cross-country Transport Distances and Road Net extension. Stud. For. Suec. 18：11-25, 1964.
- 97 芝 正己：山岳地域の地形特性の計量化に関する基礎的研究。宮崎大演報 12：1-176, 1986.
- 98 芝 正己・広部伸二・佐々木功・沼田邦彦：地形解析に対するスペクトル概念の応用（I）——地形縦断波のスペクトル分析結果についての若干の考察。90回日林論：511-514, 1979.
- 99 Shiba, M. & Sasaki, I.： Quantification of terrain variation in mountainous regions

- based upon numerical map analysis by means of electronic computer (II). Bull. Kyoto Univ. For. 54 : 140-163, 1982.
- 100 Shiba, M., Ziesak, M., & Loeffler, H. : Der einsatz moderner informations-technologie bei der forstlichen erschliessungsplanung. Forstarchiv 61 : 16-21, 1990.
- 101 柴田信明：地形解析に関する研究——斜面方位ならびに傾斜角の推定(Ⅰ)。岩手大演報 11 : 89-99, 1972.
- 102 Shreve, R. L. : Variation of mainstream length with basin area in river network. Water Resources Research 10 : 1167-1177, 1974.
- 103 Skidmore, A. K. : A comparison of techniques for calculating gradient and aspect from a gridded digital elevation model. Int. J. Geographical Information Systems 3 : 323-334, 1989.
- 104 Skidmore, A. K. : Terrain position as mapped from a gridded digital elevation model. Int. J. Geographical Information Systems 4 : 33-49, 1990.
- 105 Sprunt, B. : Digital simulation of drainage basin development. In "Spatial analysis in Geomorphology" (Chorley, R. J. ed.), Methuen & Co., London : 371-389, 1972.
- 106 鈴木芳郎：数値地形モデルを通じた等高線の比較実験。地図 18(2) : 1-7, 1980.
- 107 高棹琢馬・椎葉充晴：河川流域の地形構造を考慮した出水系モデルに関する研究。土木学会論文報告集 248 : 69-82, 1976.
- 108 高山茂美：河川地形。共立出版，東京：1-74, 1974.
- 109 竹田泰雄・清水 全：傾斜変換帯における崩壊の発生状況に関する一考察。34 回日林中支論 : 133-136, 1986.
- 110 竹下敬司：数値地形図による山腹崩壊危険要素の計測(予報)。治山研究発表会論文集 11 : 20-22, 1972.
- 111 建石隆太郎：ランダム配置データから格子データへの変換。写真測量とリモートセンシング 24(3) : 3-13, 1985.
- 112 田浦秀春・田村 斉：数値地形を用いた改良山成り計算の一方法。写真測量 12(2) : 26-29, 1973.
- 113 鳥脇純一郎：画像処理の方法の解説(Ⅰ)。名大大型計算機センターニュース 6 : 181-208, 1975.
- 114 鳥脇純一郎：濃淡画像の構造情報抽出に関する基礎実験。名大大型計算機センター研究開発部研究報告 2 : 58-77, 1976.
- 115 塚本良則・平松伸二・篠原斉四郎：侵食谷の発達様式に関する研究(Ⅲ)——0次谷と山崩れとの関係。新砂防 89(11) : 14-20, 1973.
- 116 Twito, R. H. & McGaughey, R. J. : Computer aided timber harvest planning : an example. In : Proc. the mountain logging symposium, 1984, Morgantown, WV : West Virginia University Press : 150-159, 1984.

- 117 Twito, R. H., McGaughey, R. J. & Reutebuch, S. E. : The SKYTOWER and SKYMOBILE programs for locating and designing skyline harvest units. Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-215., Portland, OR : U. S. D. A., For. Serv., Pacific N. W. Res. Stn., 35p., 1988.
- 118 Twito, R. H. & Mifflin, R. W. : Computer assisted evaluation of skyline thinning opportunities. In : Proc. the small tree resource : a materials handling challenge. 1982 ; Portland, OR. Madison, WI : For. Prod. Res. Soc. : 73-79, 1982.
- 119 Twito, R. H., Mifflin, R. W., & McGaughey, R. J. : The MAP Program : building the digital terrain model. Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-200., Portland, OR : U. S. D. A., For. Serv., Pacific N. W. Res. Stn., 22p., 1987.
- 120 Twito, R. H., Reutebuch, S. E., & McGaughey, R. J. : The HIGHLEAD program : locating and designing highlead harvest units using digital terrain models. Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-206., Portland, OR : U. S. D. A., For. Serv., Pacific N. W. Res. Stn., 22p., 1987.
- 121 Twito, R. H., Reutebuch, S. E., McGaughey, R. J., & Mann, C. N. : Preliminary logging analysis system (PLANS) : overview. Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-199., Portland, OR : U. S. D. A., For. Serv., Pacific N. W. Res. Stn., 24p., 1987.
- 122 藁谷哲也 : 複合メッシュマップを用いた山地地形の表現. 地図 19(1) : 14-19, 1981.
- 123 八尋康雄・足立昭平 : 斜面勾配を利用した河道網の作成について. 土木学会中支研講演概要集 : 69-70, 1977.
- 124 山本俊明・斉藤克郎・芝 正己・佐々木功 : 電算機を用いた数値地形解析による山岳地域の地形変動の計量化について. 京大演報 53 : 184-204, 1981.
- 125 吉田 昭 : 数値地図による流域解析. 3回 AUTOCARTO JAPAN 論文集 : 103-110, 1987.
- 126 Young, G. G. : The Application of digital terrain simulators to the planning of forest operations. Inter forest 78, Univ. of B. C., Canada, 20p., 1978.
- 127 国土庁計画・調整局編 : 国土情報——国内・海外の動向. 大蔵省印刷局, 東京, 136p., 1986.

山岳林地帯における地形解析に関する基礎的研究

北川勝弘

要 旨

本研究は、林業工学分野を対象とした山岳林地帯の地形解析を、コンピュータを用いて系統的に、高精度で、迅速に、かつ簡便に行う山岳林地帯の数値地形解析システムを確立することを目的としている。即ち、数値地形モデル (DTM) を用いて山岳林地帯の地形特性を可能な限り原図に近い状態で再現するためには、格子状の DTM の作成方法をどのようにすれば最も高い精度が得られるのか、また、DTM の基本的な応用方法は如何にあるべきかについて基礎的な検討を行ったものである。このために、林業工学の立場から見て必要な精度をもつ格子状 DTM の作成方法を開発し、DTM を用いた山地地形計測の傾斜因子に関する精度の分析を行うとともに、同じく DTM に基づく山地流域の系統的な構造解析法を開発し、さらにそれらの検討結果を踏まえて、山岳林地帯の数値地形解析システムの構築を行った。

第 I 章では、地形が複雑で急峻な山地を対象とするわが国の林業工学分野において、地形解析が重要な意義をもち、DTM をこの分野で適用するうえで、山地の傾斜因子に関する精度の把握や山地の流域構造の系統的な解析法の確立が重要であることを明らかにした。

第 II 章では、高精度の格子状 DTM を作成するためのシステム開発に関し、等高線のもつ最大傾斜線情報の活用が DTM の作成労力軽減と精度向上に有効であり、高密度記憶方式を用いた点列データ格納方式の開発により、2次元配列の記憶領域に格納された等高線点列データを任意の格子点の周辺で局所的に迅速に探索し、等高線点列を正確に復元させることを示した。次に、この等高線点列データ格納・探索方式を用いて、格子点標高の演算方法として内挿方式、外挿方式、スプライン関数補間方式、2次元曲面近似方式の4つを有機的に組み合わせた、ハイブリッド方式による格子状 DTM 作成システムを開発した。

第 III 章では、各種 DTM 作成方式のもつ作成精度の優劣を相互に比較するため、DTM に基づいて描かれる等高線と原図等高線間のズレた区域の面積に関する誤差平均幅で定義される評価指標を提起し、これを用いて各種 DTM 作成方式で作成された DTM に対する精度分析を行った。その結果、高精度の格子状 DTM を作成するためには、標高を求める格子点の近傍で、必要最少限の等高線点列データから格子点を通る最大傾斜線を定め、その線上で線近似の標高比例配分内挿方式と外挿方式を主体とした格子点標高の演算を行えばよいこと、従ってこの原理に従うハイブリッド方式の格子状 DTM 作成方式が作成精度の点で優位性をもつことを、定量的に実証した。

第 IV 章では、DTM を用いて山地の地形計測を点と面について行う 2、3 の手法の精度について定量的な分析を行い、高精度で傾斜因子を推定するための条件を解明した。まず、任意の位置 (点) における傾斜因子を、複数本の等高線の点列データ (線状 DTM) に基づいて直接算出する方法を提起し、この方法による方位算出値が従来の手作業等よりも精度的に優れ、

より詳細な地形解析が可能となることを示した。次に、格子状DTMに基づく格子面の傾斜推定精度について検討し、傾斜近似方法としては格子の4隅の標高を用いる2次式近似で実用上十分であり、傾斜因子を正確に把握するには、標高推定を目的とする場合に比べて格子間隔を一層小さくする必要があることを明らかにした。この結果に基づき、傾斜の推定精度を考慮した縮尺別の適正格子間隔を求めた。

第V章では、DTMに基づいて山地の流域構造を系統的に解析するシステムの開発に関し、先ず、水系図作成に際して疑似水流の発生を防ぐための「水源発生の4パターン」を提起し、次にホートンの水流次数の考え方に基づき小流域を自動的に区分するための諸アルゴリズムについて検討した。このシステムを用いることにより、2次水流以上の流域構造解析結果については、原図等高線図と良く合致する水系構造図を作成しうることを確かめた。

第VI章では、DTMに関する以上の総合的な検討結果に基づいて、山岳林地域の数値地形解析システムを提起し、このシステムが山岳林地域の局所的もしくは広域的な地形構造についての迅速、簡便な解析を可能ならしめ、山岳林地域の地形解析を行ううえで有効であることを実証した。

Fundamental studies on the terrain analysis in mountainous forest areas

Katsuhiro KITAGAWA

Summary

The aim of this paper is on the whole to establish the "digital terrain analysis system for mountainous forest areas" (DTAS) which is able to analyze the topographic characteristics of mountainous forest areas for forest operational planning and forest engineering use with a high degree of accuracy, systematically, rapidly and easily by using a large frame computer. At first this paper deals with some fundamental investigations on the condition that the topographic characteristic of mountainous forest areas would be reproduced accurately, as similar to an original map as possible through the digital terrain model (DTM) which expresses the landform by an aggregation of three-dimensional coordinate values. Secondly, it treats about how the fundamental and effective application of the DTM to forest engineering use is. Finally the DTAS is proposed as a basic tool for forest engineering use.

This paper consists of four main subjects ; 1) Development of the new generation system of the grid DTM with a high accuracy adequate for forest engineering use, 2) Accuracy analyses of slope factors estimated through the DTM in mountainous areas, 3) Development of the new system analyzing the catchment basin of a mountainous area into more fundamental and smaller catchment basins, and 4) Establishment of the DTAS based upon results of the above-mentioned subjects.

In Chapter I, the significance of the terrain analysis for forest engineering in Japan was discussed because many research subjects in forest engineering were connected with mountainous areas of the complicated and steep topography. It was also emphasized that to estimate the accuracy of slope factors and to develop the systematic method of analyzing the catchment basin structure were both very important on applying the DTM for forest engineering use in Japan.

Chapter II threw light on some requirements for development of the generation system of the highly-accurate grid DTM. At first it was discussed that the use of digitized contour data was a good labour-saving device for generating the grid DTM, and that it was effective for improving the accuracy of the DTM generated to make use of the information of the maximum slope (a water falling line) through each grid point estimated by contour data picked up locally around the grid point.

Next, the new contour data storing method in the two dimensional array on the computer buffer was developed based upon two kinds of the high-density data packing

methods. The comparative examination between the new data storing method and the ordinary one revealed that the new method was superior to the ordinary one. This was because the former brought about a quicker way of searching for contour data necessary for calculation of the grid point elevation and also brought about the correct reconstruction of the contour data just as they were captured in the local area around each grid point.

Based upon the above-mentioned method for contour data storing and searching, the new generation system of the highly accurate grid DTM was developed by combining the four methods for calculating a grid point elevation ; the linear interpolation, the linear extrapolation, the Spline function interpolation, and the quadratic polynomial interpolation. The new system was named "Hybrid system" after combination of the four elevation calculating methods.

Chapter III compared the above-mentioned Hybrid system with other DTM production systems in the accuracy of the landform reconstructed through each DTM. The new index for estimating the accuracy of each DTM was proposed as the mean areal discrepancy width between contour lines of the original map and the ones regenerated through the DTM within the objective area.

The comparative experiments revealed that the highly-accurated DTM should be generated in the following way ; Firstly, a minimum and requisite digitized contour data should be searched for calculation of the grid point elevation in the local area around the grid point. Secondly, the maximum slope line through the grid point should be determined based upon the contour data picked up. Finally, the grid point elevation should be calculated mainly through the linear interpolation and the linear extrapolation on the maximum slope line. The Hybrid system was based on the above-mentioned theory, so it was quantitatively demonstrated that the Hybrid system was superior to the others with respect to the accuracy of the DTM generation.

Chapter IV analyzed quantitatively the accuracy of slope factors estimated through the DTM, and proved the conditions of the slope factor estimation with high accuracy. At first, the method of estimating slope factors at an arbitrary coordinate point was proposed. This was directly based upon digitized contour data on plural contour lines picked up in the local area around the point. It was shown that this new method was superior to the traditional manual operation with respect to the accuracy of the azimuth estimation, and would make a more detailed analysis of the terrain possible.

Next, through numerical investigations on the accuracy of the slope factor estimation in grid cells, it was found out that it was practically sufficient to adapt the simple quadratic equation based upon four elevation values in corners of a grid cell as the slope approximation. It was also found out that the grid interval of the DTM needed for the accurate slope estimation must be shorter than that of the usual way of estimating

elevation. Based upon the above-mentioned results, the optimum grid intervals corresponding to a map scale and an accuracy needed in slope estimation were proposed.

In Chapter V, some subjects on developing a system for analyzing the structure of catchment basins of mountainous forest areas through the DTM were studied. The first subject was about how to avoid the occurrence of pseudo-streams at the systematic stream-network-map generation through the DTM. For this subject, the four occurrence patterns of a streamhead based upon the DTM were proposed after critically observing the real map with overdrawn contour lines reconstructed through the DTM and grid lines. Secondly, in order to systematically dividing the catchment basin into smaller ones, some algorithms were proposed based upon the HORTON's law on the stream order. It was confirmed that the application of these algorithms to the test area's catchment brought about a good stream-network-map generation which corresponded well to the original contour map, at least in the case of second or higher order streams.

Chapter VI proposed the digital terrain analysis system for mountainous forest areas (DTAS) based upon all the above-mentioned investigations. It was confirmed that the DTAS made it possible to analyze the terrain structure of mountainous forest areas rapidly and with ease. The DTAS worked well with both smaller and larger areas, and was also found useful for the terrain analysis for mountainous forest areas.