

分布型流出解析のための谷(尾根)筋を考慮した グリッド型 DEM 作成法の開発

Computation of Hydrologically Sound Grid-based DEM from Contour Lines
Considering the Position of Valleys and Ridges

陸 旻皎*・小池俊雄**・早川典生***・市波克洋****・石平 博†

By Minjiao LU, Tosio KOIKE, Norio HAYAKAWA, Katsuhiko ICHINAMI and Hiroshi ISHIDAIRA

Abstract

The objective of this study is to develop an algorithm to compute hydrologically sound, grid-based digital elevation model(DEM) from contour line data. Three commonly used methods, profiling method, bivariate interpolation and inverse distance method, are compared with respect to not only the interpolation accuracy but also occurrence of the spurious pits which make hydrological modeling difficult. From the result of this comparison, a new method is developed based on the profiling method by taking into account the position of valleys and ridges. In delineation of channel network and development the distributed hydrological models, the DEM derived by using this new method reduces the spurious pits significantly.

KeyWords. Digital elevation model, runoff analysis, distributed runoff model, geographic information system

1. はじめに

地理情報システム (GIS, Geographical Information System) やリモートセンシング技術から得られる各種水文情報の充実により、河川地形を始めとする河川流域の諸特性をより忠実に反映した流出解析が可能となってきた。現在開発されている多くの分布型流出モデル^{1),2),3),4),5)}において、デジタル標高モデル(DEM :Digital Elevation Model) は河川地形を表現する基本的な手法として用いられている。特に、グリッド型 DEM (Grid-based DEM) による地形表現に基づく分布型流出モデル^{1),2),3),5)} が、リモートセンシングデータと GIS データとの整合性の良さ、効率的なデータ管理およびモデルの柔軟性から広く使われている。

流域斜面全体を三角形要素の集合体としてモデル化し、流域を斜面要素群に分割するシステムは、高樟らにより提案されているが⁴⁾、等高線を入力とし、水文学的に極めて重要な意味を持つ流出場を規定する尾根筋、水の流下経路である谷筋を考慮にいたったグリッド型 DEM の作成法が無い。本研究ではこれらの情報を考慮した等高線からのグリッド型 DEM

作成法を開発する。

本研究では、日本で用いられている3つの代表的な補間法を用いて、仮想地形(既知の三次元曲面)、チベット高原タングラ雁石坪流域と裏筑波山口流域を対象に、補間を行ない、水文学的視点から補間精度を検討する。さらにこれらの検討結果に基づき、分布型流出解析に適した、谷(尾根)筋を考慮したグリッド型 DEM 作成法を開発し、その精度評価を行なうと同時に、分布型流出モデルの構築および運用への影響を明らかにする。

2. 各補間法の概略と補間結果

(1) 各補間法の概略

- Profile 法⁶⁾ 図-1(a) に示すように、等高線と、求めようとするあるメッシュ点を通り X 軸に平行な線との交点を探し出して、これをもとに標高の X 方向プロファイルを作成し、このプロファイルに対し補間を行い、メッシュ点における補間値をメッシュ点標高とする。さらに、プロファイル方向と等高線が平行となる場合(図-1(a) x_1-x_1) におこるデータ欠損を防ぐために、同様の計算を Y 方向にも行う。このようにして作った2つの標高マトリックスを重ね合わせることで DEM を作成する。この手法は、計算において読み込んだ等高線情報を線として扱う点で他の2つの手法と異なる。本研究で

* 工博 長岡技術科学大学建設系助手
(〒940-21 新潟県長岡市上富岡町1603-1)

** 工博 長岡技術科学大学建設系助教授

*** Ph.D. 長岡技術科学大学建設系教授

**** 長岡技術科学大学大学院

† 工修 長岡技術科学大学大学院

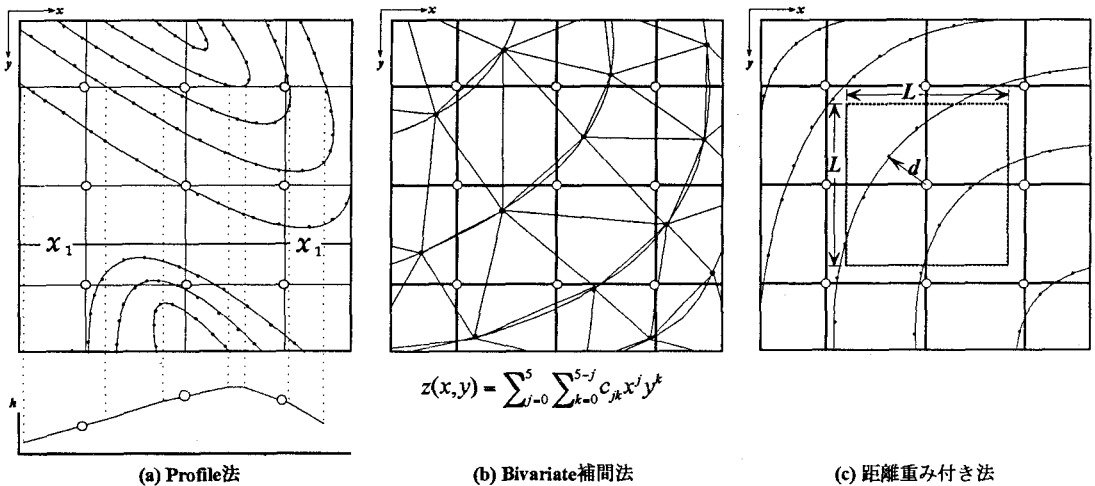


図 1 各補間法の概略

はプロファイルの補間法として、線形補間とスプライン補間を用いた2つのケースについて計算を行う。

- Bivariate 補間法⁷⁾ データ同士を、最小内角がなるべく大きくなるように結んで三角形を作り、この三角形の集合体として地形を表現する方法(図-1(b))である。それぞれの三角形要素では5次多項式

$$z(x, y) = \sum_{j=0}^5 \sum_{k=0}^{5-j} c_{jk} x^j y^k \dots\dots\dots (1)$$

を用いて補間を行う。上式に含まれている21個の係数は、三角形の頂点での標高、一次微係数と二次微係数、そして三角形の各辺の直交方向での標高の微分係数が、端点との距離の三次以下の多項式で表すという拘束条件から求められる。メッシュ点の標高値はこの多項式を用いて計算される。点データをもとに計算を行うため尾根や谷などの地形変曲点情報を計算結果に反映させることができる利点を持つ。

- 距離重み付き法⁸⁾ 補間するメッシュ点を中心に縦横が $L \times L$ の枠を設定し、データの中からこの枠に入るものを選び出し、その標高値に対して対象メッシュ点からの距離に応じて重み付けを行い平均したものをそのメッシュ点の標高とする方法(図-1(c))で、先の Bivariate 補間法と同様、点情報をもとに計算を行う手法である。本研究では、 L がグリッドサイズの12倍と20倍の2ケースについて計算を行う。

(2) 補間の対象領域

本研究で用いた対象領域は以下に示す仮想地形、実地形2流域(チベット高原タングラ雁石坪流域と裏筑波山口流域)である。

- 仮想地形 仮想地形とする3次元曲面は、

$$f(x, y) = 100(x-1)^2 + 10(x^2 - y^2)^2$$

$$0 \leq x \leq 4 \quad 0 \leq y \leq 4 \dots\dots\dots (2)$$

で表される。10, 20, 30, 40, 50, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500, 4000 の等高線を抽出し、 $1 \leq x \leq 3, 1 \leq y \leq 3$ の領域で、0.1 刻みで補間を行なう。

- 雁石坪流域 流域面積が4500km²で、20万分の1地形図から200m間隔の等高線をディジタイジングしたものをデータとし、500mメッシュのDEMを作成する。
- 山口流域 流域面積が3.12km²の小さい実験流域で、1万分の1地形図から25m間隔の等高線をディジタイジングしたものをデータとし、20mメッシュのDEMを作成する。

(3) 計算結果の評価

上記の3つの対象領域に対して行なった補間計算の結果について、以下の4つの指標

1. 平均誤差 真値と補間結果との差の絶対値の平均である。仮想地形の場合に式(2)の値、実地形の場合には標高が既知であるメッシュ点の標高値を真値として用いる。
2. データ欠損数 補間されない、または非現実的な補間値を有するメッシュ点の数である。
3. 窪地数 回りの8点よりも低く、水が流れないメッシュ点の数である。
4. 平坦地数 回りの8点と同じ標高を持つメッシュ点の数である。

表 1 補間計算の結果

対象流域	評価項目	profile 法		Bivariate 補間法	距離重み付き法	
		線形補間	spline 補間		L=12 注1	L=20 注1
仮想地形	平均誤差 $\sum h-h_i /n$	12.20	2.55	0.20	148.55	293.04
	平坦値	22	0	0	0	0
	窪地	0	0	1	8	11
	データ欠損	0	0	0	0	0
チベット Grid Size =500m	平均誤差 $\sum h-h_i /n$	52.1	130.7	57.3	70.4	75.2
	平坦値	4227	377	1394	2781	705
	窪地	71	688	527	190	215
	データ欠損	81	508	14	406	0
筑波 Grid Size =20m	平均誤差 $\sum h-h_i /n$	3.2	19.5	4.9	8.5	10.9
	平坦値	25	0	0	0	0
	窪地	1	91	49	16	18
	データ欠損	0	0	2	0	0

注1：Lは枠の大きさ。L=12はグリッドサイズの12倍、L=20は20倍。

を用いて、補間法の評価を行なう。この中で、指標1と2は一般に良く使われるものであるが、指標3と4には水の流下経路である河道網の抽出、そして河道網における洪水追跡の阻害要因となる窪地と平坦地の数をそのまま用いている。表-1に、各補間法の3つの対象領域での補間計算の結果を示す。

表-1から、距離重み付き法では、すべての計算領域において、平均誤差が他の方法に比べて、かなり大きいことがわかる。枠の大きさLを小さくすることによりある程度誤差を小さくすることができるが、データ欠損が急増するという問題がある。また、Bivariate補間法は、いずれの領域でも平均誤差は小さいものの、高次多項式を用いているため、多くの窪地とデータ欠損が生じている。スプライン補間を用いるProfile法もほぼ同様な傾向にあり、実地形での平均誤差がかなり大きい。線形補間を用いるProfile法は線形補間の性格上、谷部と尾根近辺に多くの平坦値を発生させているが、誤差が小さく、窪地とデータ欠損も少なく、これをベースに流出解析に適したDEM作成法を開発することにする。

3. 谷(尾根)を考慮したDEM作成法

本研究では等高線データから谷筋と尾根筋に関する情報を抽出し、線形補間を用いるProfile法の問題点である谷部と尾根近辺の平坦地の発生を解消し、分布型流出解析に適したDEM作成法を開発する。山口流域から切り出したテストエリア(縦横30グリッド×30グリッド:メッシュサイズ20m)においてアルゴリズムを開発し、山口流域全域に対し、前節と同様な精度評価を行なう。

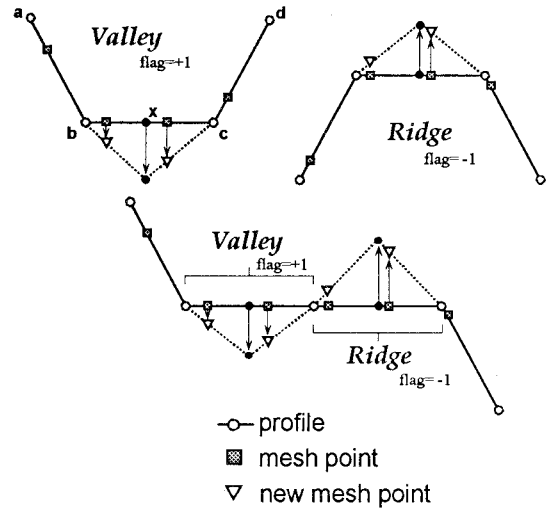


図 2 谷(尾根)の平坦補間部

(1) 方法の概略

線形補間を用いたProfile法において平坦地形成の一番の原因と考えられるのは、図-2で示されるように、谷(尾根)といった地形変曲点付近において、等高線データがないことから、線分bcのように平坦補間されることである。本研究では、谷(尾根)筋を等高線データから抽出することにより、谷(尾根)筋の標高プロファイルを作成し、その谷(尾根)方向の標高プロファイルに対し補間を行い、谷(尾根)筋の情報をDEM

表 2 新旧 DEM 作成法の比較

	平均 誤差	$\sum h'-h $ n	平坦地	窪地	データ 欠損
改良前	3.45		574	0	0
改良後	3.25		241	10	0

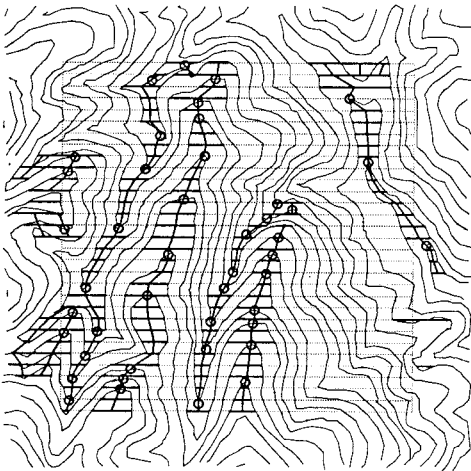


図 3 谷（尾根）筋の抽出

に反映させることにより、平坦地の数を減らすものである。

(2) 谷（尾根）の抽出

図-2の線分bcで示される平坦補間部（横方向の太線）を図-3のように、読み込まれた等高線データから抽出し、中点xを谷筋とする。次に、抽出した平坦補間部それぞれに、谷、尾根の判別のために、flagという変数を用意し、図-2に示すように、平坦補間部の前後2点を含み、下に凸なら（谷なら）+1、上に凸なら（尾根なら）-1とし、判別不可能な場合、更に前後2点を増やし、谷、尾根を判別し、それでも判別不可能なものは0とすることで、個々の平坦補間部に対して谷、尾根を明確にすることとした。

(3) 谷（尾根）方向標高プロファイルの抽出法

図-3のように、同じ谷（尾根）に属するものを1本の谷（尾根）筋に連結し、その連結した1本の谷（尾根）について等高線と交わっている点を探す（図-3の白丸）。このようにして得られた1本の谷（尾根）筋と等高線の交点により、図-4の黒四角で示される谷（尾根）方向の標高プロファイルが得られる。このプロファイルから、線形補間法で谷（尾根）筋の標高を求める。図-4には、等高線との交点の他に、改良前の補間値、そして改良後の補間値を示してある。x軸は連結された谷（尾根）筋の端点からの距離を示しており、y軸はメッシュ点、等高線の標高を示したものである。これにより、階段状に補間されていた谷（尾根）方向のプロファイルが、精度良く再補間されているのが分かる。

(4) 谷（尾根）部の再補間

(3)で求めた谷（尾根）筋の標高を用いて、図-2のように谷（尾根）部の平坦補間されているメッシュ点について、線形補間により補間し直す。これにより、既存のProfile法では表現が難しかった谷（尾根）筋の表現が可能となった。

(5) DEM の精度評価

山口流域において作成されたDEMは、グリッドサイズが20mで、158×176メッシュのもので、流域境界内に位置するメッシュが7609点のものである。

表-2は、改良前と改良後の計算結果である。表-2により、平均誤差、平坦地の項目について、改良によって良い結果を得ることができ、本改良のアルゴリズムの妥当性が確認できた。わずかに窪地が増えたことについては、谷（尾根）筋の合流部の処理や、谷（尾根）筋の端点での補間が行われていないことなどが原因と考えられる。

4. 擬河道網の構築による DEM の評価

改良した方法により作成したDEMから擬河道網を構築し、改良前のものと比較検討し、さらに擬河道網から構築した分布型流出モデルを用いて、流出現象のシミュレーションを行った。

(1) 擬河道網の構築に及ぼす影響

擬河道網とは、流域内各メッシュにおける流出の流域出口までの集中経路を示すもので、流出場の地形情報を表す重要な役割を演じている。擬河道網の構築には陸ら⁵⁾の方法を用いた。この方法では、各メッシュ点において、勾配の一番急な方向に水が全部流れると考え、3×3メッシュの中心点の水の流れの方向は周囲8点との間に勾配が一番大きい点を示すものとする。ただし、8方向の勾配が全て0以下である点は窪地である。ここでの窪地というのは、前述の平坦地と窪地を合わせたものである。このような窪地が多数存在すると、擬河道網の作成が困難になる。

この方法では、3×3メッシュを基本として、一次処理と二次処理を繰り返し施すことによって、自動的に窪地をなくしていく処理を行う。ここで、一次処理は窪地に対し、その回りの点の平均標高を、その点の標高とする処理で、二次処

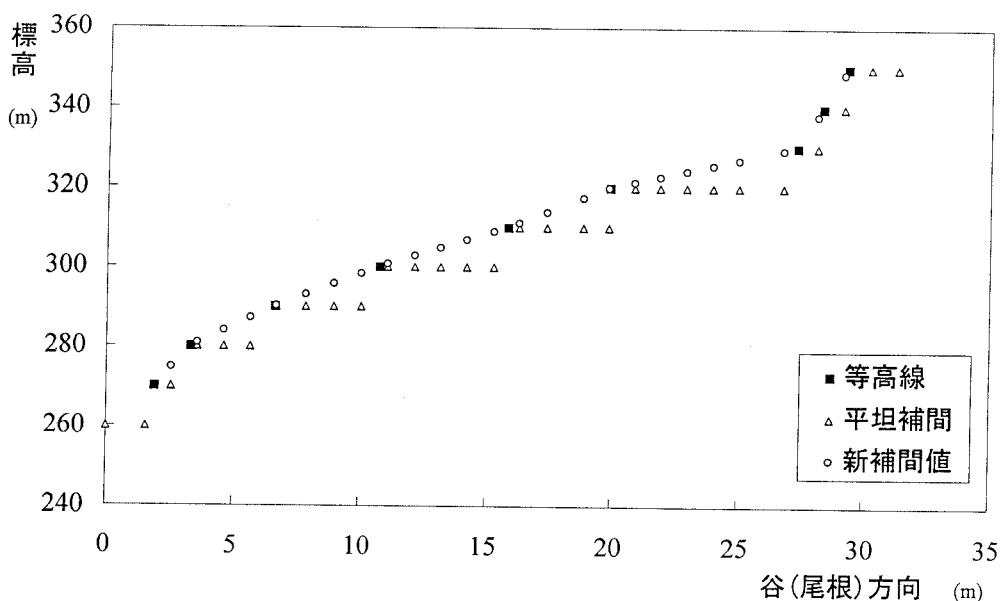


図4 谷(尾根)筋の標高プロファイル

理は窪地に対し、いくつかの経路が考えられる場合に、実河道に最短距離で辿りつくような方向を与える処理である。なお、擬河道網の構築に関する詳細は陸ら^{5),6)}の論文を参照されたい。

改良前と改良後のDEM作成法による2つのDEMにより擬河道網を構築し、比較検討を行った結果、窪地に関する処理を施す前の段階で、改良前と改良後の窪地の数(阻害要因)が、それぞれ574個と251個となり、半分以上に減少したことが分かった。これにより、本改良が、処理を施す必要のあるメッシュ点を大幅に減少させ、擬河道網の算出に良い影響を与えることが明らかになった。

擬河道網を流出計算に用いる場合、メッシュ点間の勾配が重要となる。擬河道網を構築した後、メッシュ点間の勾配を計算する際、窪地あるいは平坦地では、勾配が0以下となり、人為的に勾配を与えなければならない。本研究では、このような場合、ある一定の勾配を与える処理を行っている。

今回、改良前と改良後の擬河道網で、窪地において人為的に与える勾配を $\frac{1.0}{\text{length}}, \frac{2.0}{\text{length}}, \frac{5.0}{\text{length}}, \frac{10.0}{\text{length}}$ (length:メッシュ点間の距離)の4種類にし、その流出解析への影響を調べることにしている。なお、勾配の最大を $\frac{10.0}{\text{length}}$ としたのは、DEM作成に用いた等高線が25m間隔なのでその半分以上とした。

(2) 分布型流出解析に及ぼす影響

流出のシミュレーションは陸ら^{5),6)}のモデルにより行った。このモデルは、DEMにより作成した擬河道網を介して、以下の仮定のもとで、kinematic wave法により流域出口まで追跡計算されるものである。

- 流れ方向は擬河道網で定められた最急勾配方向であり、メッシュ点間は広幅矩形断面の仮想流路で結ばれている。
- 流路への入力はそのメッシュ点のみで考え、そのメッシュからの直接流出成分と上流流路からの流入が入力となる。
- 仮想流路での伝播はkinematic waveである。

今回は、対象流域に降雨強度 $i=0.2\text{mm/min}$ 、降雨時間1時間の降雨を与え、その後9時間で10分のタイムステップ、全10時間のシミュレーションを行った。

図-5は、人為的に与えたメッシュ点間の勾配別に、改良前のDEMにより作成した擬河道網と、改良後のDEMにより作成した擬河道網によるシミュレーション結果である。

これにより、与えた勾配が、緩やかな場合は、改良後のハイドログラフが早いのにに対し、急な勾配の場合は、改良後のハイドログラフが遅れているのが分かる。これらの結果から、本方法により作成されたDEMが地形(特に谷(尾根)近辺の地形)を忠実に表現して、人為的に与えた勾配の影響を小さくしていることが分かる。

5. 結論

本研究では、現在広く使われている3つのDEM作成法を、標高の平均誤差のみならず、流出解析の観点から仮想地形および実地形に対する適用性を比較検討した上で、分布型流出解析に適したグリッド型DEMの作成法を開発した。実流域においてDEMを作成し、精度評価を行い、従来の方法と比較して良い結果を得ることができた。さらに、本方法と従来の方法で得られたDEMから構築した分布型流出モ

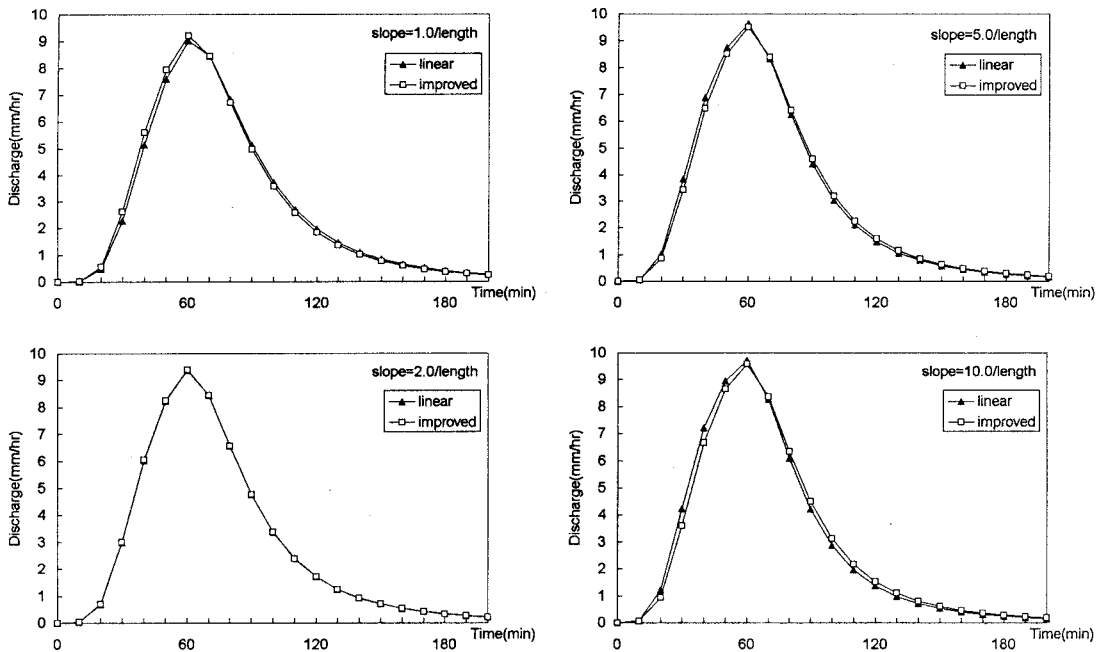


図 5 数値シミュレーションの結果

デルで数値シミュレーションを行い、擬河道網の構築、そしてモデルの運用に際し、本方法が良い影響を及ぼしている事を明らかにした。

謝辞

本研究の一部は文部省科学研究費「最先端GISを用いた水文環境の解析手法の確立に関する研究」(代表:宝馨)の援助を受けた。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) Abbott, M. B., Bathurst, J. C., Cunge, J. A., O'Connell, P. E. and Rasmussen, J.: An introduction to the European Hydrological System— Systeme Hydrologique European, 'SHE', 2: structure of a physically-based distributed modelling system, J. Hydrol., 87(1986)45-59
- 2) Fortin, J. P., Villeneuve, J. P., Guilbot, A. and Seguin, B.: Development of a modular hydrological forecasting model based on remotely sensed data, for interactive utilization on a microcomputer, IAHS Publ. no. 160, 1986.
- 3) Kouwen, N.: WATFLOOD: a micro-computer based flood forecasting system based on real-time weather radar, Canadian Water Resources Journal, Vol. 13, No. 1, 62-77, 1988.
- 4) 高橋琢馬・椎葉充晴・立川康人: 流域微地形に対応した準3次元斜面要素モデルと流域規模モデルの自動作製, 第33回水理講演会論文集, pp. 139-144, 1989.
- 5) 陸 旻蛟・小池俊雄・早川典生: 分布型水文情報に対応する流出モデルの開発, 土木学会論文集, 第411号/II-12, pp. 135-142, 1989.
- 6) 陸旻蛟: 分布型水文情報に対応する流出モデルの開発, 学位論文, 1991
- 7) H. Akima, A method of bivariate interpolation and smooth surface fitting for irregularly distributed data points, ACM, Transactions on Mathematical Software, Vol. 4, page 148-159, 1978.
- 8) 嶋田啓一・山田 正・藤田睦博・洪 延芳: 流域の地形特性が降雨流出に及ぼす影響について, 土木学会第32回水理講演会論文集, pp. 43-48, 1988.

(1994年11月17日 受付)