

河川流域地形の新しい数理表現形式

椎葉充晴・立川康人・市川 温・榊原哲由*

*大豊建設

要 旨

流出現象をモデル化するという観点に立ち、DEM (Digital Elevation Model) を出発点にして、流域斜面地形を山頂から河道に至る多数の斜面群に分解する手法を提案する。これにより、流域地形の統計的解析を可能にして、その特徴を抽出した上で流れの追跡モデルと結合するという方法をとることができるようになる。地形解析を容易にするために、地形の一般的な表現形式として、ノードとエッジによる表現を採用する。

キーワード：流域地形、DEM、流出モデル

1. 序論

河川流域は、流域界から河道に至る斜面と河道により構成されている。流域斜面は、谷型や尾根型などさまざまな形状をとり、その形状は降雨や土砂の流出形態に大きな影響を与える。たとえば、谷型の斜面では、地形による集水効果のために斜面の下部で地表面流が発生しやすい。また、河道網の形状も流出形態に影響を与える。河道網が放射状であれば出水形態は急激である。したがって、流出現象をモデル化する場合、これらの流域の地形による効果を考慮することが重要である。

本研究では、数値地理情報をもとに流域場を実際の地形形状に即した形で表現し、流れの追跡モデルと結合して分布型のモデルを構成できるような流域場のモデルを構成することを試みる。

近年、地球規模の水循環を把握するために、気象モデルとの結合を念頭においた上で、地域スケール・大陸スケールを対象として陸面水文過程を表現するモデルの開発が重要な課題となっている。一般に、大規模な流域の流出モデルを構成する場合、実地形に即して流れを追跡していくのは実際的でない。流域地形が影響するとしても、個々の地形の影響を考慮のではなく、地形形態のマクロな影響を考慮できるようにしなければならない。そのための一つの方法として、まず最初に、流域地形をを統計的に解

析し、統計的に解析された結果に対応した流域モデルを構成するという方法が考えられる。このような方法をとれば、流域地形と流出モデルを直接結合するのではないので、水文過程のシミュレーションのための計算量はそれほど大きくはならないであろう。

そのために、本研究では、単に流域地形を数値的に表現するのではなく、流出現象をモデル化するという観点に立つて、流域地形の分析を進められるような形式を考察する。流域地形を数値的に表現するだけなら、地表面の標高を数値で表して流域の地形を表現する数値地形モデル (Digital Elevation Model, DEM) で十分であるが、本研究では、DEM を出発点にして、流域斜面地形を山頂から河道まで至る多数の斜面群に分解する手法を提案する。そうすることによって、地形の統計的解析を可能にして、その特徴を抽出し、流れの追跡モデルと結合することが可能になる。また、その解析を容易にするために、ノードとエッジによる表現形式を採用する。

2. 流域地形の数理表現

2.1 数値地形モデル

地表面の標高を数値で表して流域の地形を表現する数値地形モデル (Digital Elevation Model, DEM) は、大別すると、次の3つに分類される。

- グリッドモデル (Grid based DEM)

- 等高線図モデル (Contour based DEM)
- 三角形網モデル (Triangular Irregular Network DEM, TIN - DEM)

グリッドモデルは、流域にかけられたメッシュの格子点の標高によって地表面を表現する方法である。国土数値情報のような数値化された地理的情報データは、メッシュ形式で整備されることが多い。グリッドモデルによる方法は、これらのデータを行列形式で取り扱うことができるため、電子計算機による処理が容易であるという利点がある。欠点としては、流れを1次元的に取り扱う場合、流れ方向が4方向または8方向に限定されること、格子点の間隔が種々の解析結果に影響を及ぼすことなどが挙げられる。

等高線図モデルは、等高線上の点の標高によって地表面を表現する方法である。この方法は、等高線をもとに最急勾配線を追跡することにより、流れ方向に即したモデル化が可能である。しかし、データ量が膨大となること、流域規模でのデータ取得に非常に多大な作業を要するなどの欠点をもつ。

三角形網モデルは、流域を三角形要素網で覆い、三角形の頂点の標高によって地表面を表現する方法である。この方法は、複雑な地形形状をしている部分では三角形網を密に設定するなど流域地形に即した地形の数理表現ができる。しかし、単に流域を三角形網で覆うだけでは、三角形網間での雨水の授受の取り扱いが難しく、雨水の流れを考慮した形で三角形網を構成する必要がある。

これら数値地形モデルと数値地形モデルを用いた流出シミュレーションモデルの分類については、立川 (1995) に詳しい。

2.2 流域地形の新しい数理表現手法の提案

(1) 雨水の流れの表現手法

本研究の目的は、流域地形を実地形に即した形で表し、地形の特性の抽出など地形分析もできるような形で数理表現することである。流域を実地形に即した形で表現し、斜面長、斜面勾配など流出に影響を与える諸状態量を抽出できる地形モデルとして、Tachikawa et. al. (1994) の開発したBGIS (Basin Geomorphic Information System) がある。BGISは、国土数値情報のメッシュ形式の標高データと河道網の位置データから TIN - DEM (三角形網モデル) データセットを作成して、流域場をモデル化するシステムである。流域を三角形網で覆う場合、雨水の流れを考慮した形で三角形網を構成する必要がある。BGISでは、三角形要素の最急勾配方向をもとに、各三角形要素で雨水が流出する辺、雨水が流入する辺がそれぞれ1つになるように三角形要素を構成すること

によって、雨水の授受の取り扱いを表現している。このような方針のもとで流域を三角形網で覆っていくとき、その過程において、谷となる辺が発生する。このとき、Fig. 1 のように非常になめらかに収束している地形においても、谷として扱われてしまう場

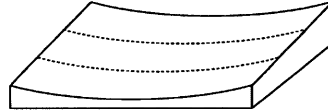


Fig. 1 Mild converging slope

合がある。また、谷の下端から最急勾配方向に下っていった結果、河道に到達すれば、その谷および河道網に至るまでの経路をあらたに河道とみなさざるをえない、という問題がある (Fig. 2)。

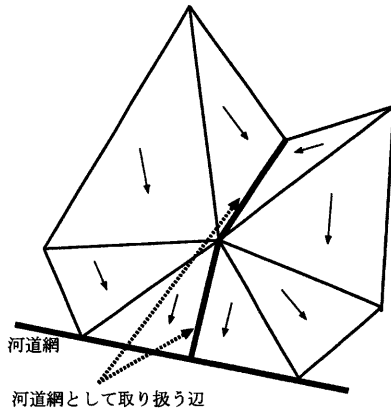


Fig. 2 Treatment of valleys

次に、例として、Fig. 3 のように山頂から発散するような地形と標高データがあったとする。各点において、周りの点の中で最急勾配で下る方向にある点へ雨水流下方向をとり、その点同士を結んだ線を流水線とする、という最急勾配方向に下るといった処理だけを考える方法をとったとき、本来山頂から流れてくるはずの水が途中の山腹から発生してしまうかのような点が発生する場合がある。

以上で挙げた

1. 谷の取り扱いについての問題
2. 発散する地形に対する処理の問題

の2つの問題点を解決するために以下のように考えることにする。

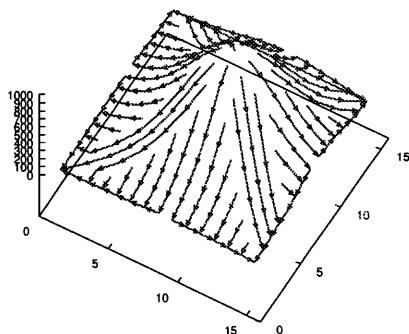


Fig. 3 Streamlines generated by descending in the steepest downward direction

まず、1の谷の取り扱いについての問題の解決方法を述べる。標高データなどから得られる標高値の示された各点とその周りの点を結んだ線分を雨水の流れる線(以下、流水線と呼ぶ)となりうる可能性のある線分とし、その線分が流水線である場合、流水線を実際には線としてではなく、斜面素片として、すなわち、面として取り扱うことにする。詳しく言うと、線分の両端の各点は、自身が頂点となっている図形の面積の一部を受け持つことにする。つまり、点は自身が頂点となっている各図形の面積の一部の合計により構成される面を代表するものとする。例として、Fig. 4の場合、点A、点Bはそれぞれ自分が頂点である4辺形の面積の各4分の1の合計を代表として受け持つ。以下「点のもつ面積」や「面積を

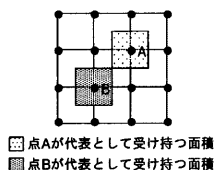


Fig. 4 Area allocated to a point

もつ点」という表現を用いた場合は、この意味で用いるものとする。点と点を結んだ線分により流水線は作成される。この線分の両端の点があつ面積の一部を線に与えることによって、線としてではなく面

(斜面素片)として取り扱うことが可能になる。Fig. 5の場合は、点Aに流入してくる流水線が2本、点Aから流出する流水線が1本の計3本の流水線があるから、各流水線に点Aのもつ面積の3分の1ずつを割り振り、点Bに関しては流入する流水線、流出する流水線各1本ずつの計2本の流水線があるから、各流水線に点Bのもつ面積の2分の1ずつを割り振る。よって、線分ABにより構成される流水線は、実際は線ではなく、(点Aのもつ面積の3分の1)+(点Bのもつ面積の2分の1)の面積をもつ斜面素片として、すなわち、面として取り扱われることになる。こうすることによって、谷を河道網の一部として河道と同様の扱いをする必要がなくなり、斜面流のモデルを適用することも可能になる。

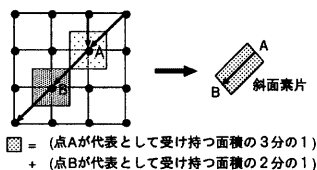


Fig. 5 A piece of slope

次に、2の発散する地形に対する処理の問題について述べる。発散する地形に対応するために、本研究では、「最急勾配方向に下る」だけでなく、「最急勾配方向に上る」という処理も加えることにする。先に挙げたFig. 3について、最急勾配方向に上る処理を加えた図がFig. 6である。最急勾配方向に上る処理を加えたことにより、山頂からの雨水の流れが、Fig. 3より自然形で表されるようになっている。

(2) グリッド形式で標高が与えられる形のモデルを基礎とした表現の採用

格子を基礎として三角形網を作成し、それをもとに本研究で提案する手法を用いた場合、Tachikawa et. al. (1994)のBGISは、三角形の面を雨水の流れる面として取り扱うが、本研究では、三角形の辺をもとに流水線を作成し、流水線を、実際には、面(斜面素片)として取り扱うことにより、雨水の流れる面を作成することとなる。格子を基礎として三角形網を作成し、本研究で提案する手法を用いたとき、Fig. 7のような単純な矩形斜面において、点Aの地点で流水線を作成しようとした場合、点Aの雨水の流れる方向は、点線でつながれた4方向だけである。点Aからの雨水の流れは左側の図の矢印方向に流れるのが自然と考えられるのに、右側の図のように、点Bもしくは点Cの方向へしか流水線を作成す

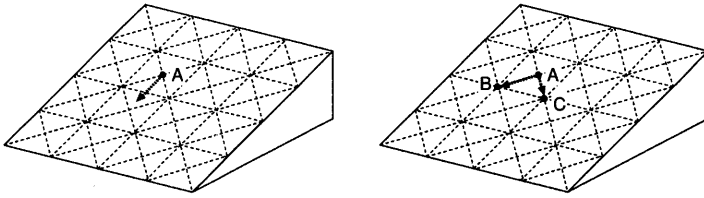


Fig. 7 Flow on a plane

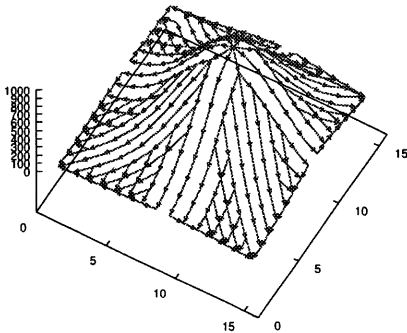


Fig. 6 Streamline generated by adding the operation of ascending in the steepest upward direction

ることができず、雨水の流れ方向を決めるうえで不自然になる。以上の、三角形網を本研究で提案する手法を用いた場合に雨水の流れ方向が不自然になる場合があるという理由と、国土数値情報などの数値地形情報がメッシュ形式で整備されていることが多いこと、格子点を行列形式で取り扱うことができるため、電子計算機上での処理が容易であること、の理由により、本研究では、グリッド形式で標高が与えられる形のモデルを基礎とした表現をおこなうこととする。

従来、グリッド形式で標高が与えられる形のモデルを基礎とした河川流域地形表現としてこれまでに提案されている方法は、落水線による方法である。この方法は、各格子点からの雨水流下方向は、周りの8格子のうち最急勾配で下る方向の格子へ向かうとして、雨水流下方向を決めるものである。このようにして、落水線を流域の出口まで連ねたものは、

落水線図と呼ばれている。この落水線図に適当な間値を定めることにより、地形図の河道網に類似する擬河道網を抽出することができる。しかし、対象とする流域の流路位置データが存在する場合、この流路位置データを、流域場を表現するモデルの中に取り入れることができれば、実際の河道網に類似した河道網をもとにした流域場の表現が可能となる。流路位置データは、国土数値情報の一つとして整備されている。また、南(1997)の開発した河道網データセットの生成をおこなうシステムでは、地形図をスキャナで読みとり、地形図の画像から河道網を追跡することによって流路位置データを得ることができる。よって、本研究では、流路位置データを取り入れることができるようにする。

(3) ノード及びエッジについて

流域場をモデル化するために、ノード、エッジという概念を導入する。

ノードとは、流域上に配置された点のことである。

エッジとは、両端がノードである、つまり、ノードとノードを連結している線(面)のことを意味する。

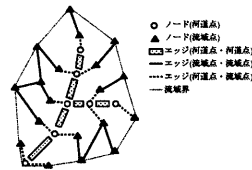


Fig. 8 Nodes and edges

ノードとエッジにはそれぞれタイプ(属性)の異なるものがあるとする。

ノードについては、河道網を構成している点(以下河道点と呼ぶ)、斜面を構成する点(以下流域点と呼ぶ)などのタイプのノードを考える。

エッジについては、河道点と河道点を結ぶエッジ、河道点と流域点を結ぶエッジ、流域点と流域点を結ぶ

エッジ(斜面素片)のタイプ(属性)のエッジを考える。

流域場は、それぞれ属性の異なるノードとこれらノードとノード同士を結んだエッジの集合により表されることになる(Fig. 8)。こうすることで、より詳細な河道網情報を得たい場合などにノードやエッジの属性を変えることにより対応できるようにしておく。

3. 流域場モデルの実現手法

3.1 語句の定義

本研究で用いる語句を次のように定義する。なお、本研究では、水平面上に x 軸、 y 軸、鉛直上向きに z 軸をとった右手座標系を用いる。

河道点 河道網を流路位置を示す点列によって表現した場合、河道網を構成している点のことを表す。

斜面要素 山頂から河道までの斜面(Fig. 9)。

流域点 格子点上の斜面要素を構成するための点。流域点は、実際には自分周りの4辺形それぞれの面積の4分の1を合計した値を持つ面として取り扱う。

斜面素片 流域点を結んだ流水線に、流域点の面積を配分することにより、流水線に面積を持たせたもの。合流あるいは分流する斜面素片を細分することによりつくられる、山頂から河道までの1列の斜面素片の鎖の集合が斜面要素となる。

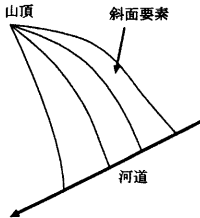


Fig. 9 Slope element

3.2 流域場を表現するためのデータとそのデータ構造

流域場を表現するために、最終的に生成されるデータセットは次の2つである。

1. ノードに関する情報を記録するデータセット
2. エッジに関する情報を記録するデータセット

1のノードの情報を記録するデータセットには、ノード番号、ノードの属性番号、属性ごとのノードの情報が記録される(1)。ここで、ノード属性とは、ノードがどのような特性をもっているかを示すもの

Table 1 Dataset recording information about nodes

ノード番号	ノード属性	ノードの個別情報			
1	1	65	20	84	2500
2	1	70	10	80	1250
3	1	85	21	95	750
4	1	92	25	105	1000
5	1	90	15	90	1500
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
100	2	70	10	80	
101	2	80	15	90	
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

ある。具体的には、本研究において、ノードがもつ属性の種類は、流域点、河道点の2種類である。あるノードに1という属性番号が与えられていた場合、このノードは流域点であることを示し、2という属性番号が与えられていた場合、このノードは河道点であることを示す。属性ごとのノードの情報とは、そのノードの属性により記録される内容が異なる。ノードの属性が流域点を表していた場合、属性ごとのノードの情報部分には、 x 座標、 y 座標、 z 座標、そのノード(流域点)が代表する面積が記録され、ノードの属性が河道点を表していた場合には、 x 座標、 y 座標、 z 座標が記録される。河道点は、代表する面積をもたないことにし、河道網は、河道点とそれを結ぶ線分によって構成されることとする。

2のエッジに関する情報を記録するデータセットには、エッジ番号、エッジを構成するノードの番号(2つ)、エッジの属性番号、属性ごとのエッジの情報が記録される(2)。ここで、エッジ属性とは、ノード属

Table 2 Dataset recording information about edges

エッジ番号	エッジを構成するノードの番号		エッジ属性	エッジの個別情報	
1	1	2	1	75	2750
2	3	5	1	60	1500
3	4	5	1	62	1750
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
51	2	100	2	⋮	⋮
52	5	101	2	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
113	101	100	3	88	
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

性と同様に、エッジがどのような特性をもっているかを示すものである。本研究において、エッジがもつ属性は、流域点と流域点を結ぶエッジ、流域点と

河道点を結ぶエッジ、河道点と河道点を結ぶエッジの3種類である。流域点と流域点を結ぶエッジは斜面素片である。流域点と河道点を結ぶエッジは、斜面を流れてきた雨水が河道に流れ込むための、斜面と河道の接続を表すエッジである。河道点と河道点を結ぶエッジは、その集合により河道網構造を表現するものである。流域点と流域点を結ぶエッジ(斜面素片)の属性番号には1を、流域点と河道点を結ぶエッジの属性番号には2を、河道点と河道点を結ぶエッジの属性番号には3を与えることにする。属性ごとのエッジの情報を記録する部分には、流域点と流域点を結ぶエッジ(斜面素片)の場合は、その斜面素片の長さや斜面素片がもつ面積を記録する。流域点と河道点を結ぶエッジの場合については、流域点と河道点は、同一のx座標、y座標をもつことにする¹。よって、このエッジは、斜面を流れてきた雨水が河道に流れ込むときの斜面と河道との接続関係を表すだけで距離0、面積0のエッジとなるため、何も記録しない。河道点と河道点を結ぶエッジの場合は、そのエッジの長さを記録する。

1と2に記したノードとエッジの関係を表す模式図をFig. 10に示す。

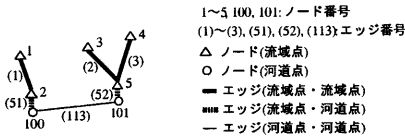


Fig. 10 Nodes and edges

3.3 入力とするデータとそのデータ構造

グリッド形式で与えられる標高データと流路位置データから、流域場を表現する基礎となるデータファイルを生成する。必要となるデータファイルは、

1. グリッドの頂点(格子点)を記録するデータファイル
2. グリッドボックスの情報を記録するデータファイル
3. 流路位置の点の情報を記録するデータファイルの3つである。

(1) グリッドの頂点(格子点)を記録するデータファイル

グリッドの頂点(格子点)を記録するデータには、頂点の番号、x座標、y座標、z座標が1つの頂点について1行ごと記録される(3)。頂点の番号については

¹ 流域点と河道点を結ぶエッジは河道横流域点と河道点を結ぶ。

Table 3 Data file recording information about grid points

点の番号	x座標の値	y座標の値	z座標の値
1	10	20	30
2	60	50	40
6	70	80	90
9	40	20	100
⋮	⋮	⋮	⋮

必ずしも一連番号でなくてもよいことにする。

(2) グリッドボックスの情報を記録するデータファイル

グリッドボックスの情報を記録するデータファイルには、グリッドボックスの番号、グリッドボックスの位置、グリッドボックスを構成する頂点の番号が1つのグリッドボックスについて1行ごと記録される(4)。

Table 4 Data file Data file recording information about grid boxes

グリッドボックスの番号	グリッドボックスの位置	グリッドボックスを構成する頂点の番号
1	(1,1)	1 5 6 2
2	(1,2)	2 6 7 3
4	(1,3)	3 7 8 4
6	(2,1)	5 9 10 6
⋮	⋮	⋮

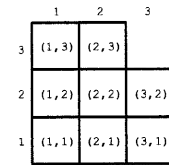


Fig. 11 Position of a grid box

グリッドボックスの位置は、Fig. 11のように、グリッドボックスが何行何列目にあるかを表す。グリッドボックスの番号も一連番号でなくてもよいことにする。

(3) 流路位置の点の情報を記録するデータファイル
 流路位置の点の情報を記録するデータファイルには、流路位置の点1つに対して、図郭番号、河道区分の始終点の情報、x座標、y座標、z座標が1行に記

Table 5 Data file recording information of stream points

図郭番号	図郭番号	始終点の情報	x座標の値	y座標の値	z座標の値
1	1	-1	10	5	15
1	1	0	11	6	14
1	1	0	12	7	13
1	1	2	13	8	12
1	1	-2	13	8	12
1	1	0	15	10	10
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

録される (Fig. 5)。このデータファイルのデータ構造は、南 (1997) の開発した河道網データセットの生成をおこなうシステムの河道網データセットのデータ構造と同じである。ここで河道区分とは、水源または合流点から、合流点または流域下端までの河道網の一部分を表す。Table 5 の最初の2つの数字は、図郭番号である。ここで、図郭番号とは、南の河道網データセット生成システムで河道網データセットを作成した場合、地図のある領域を切り取るときに設定される番号である。河道網データセットを作成するために切り取られる地図の領域と、標高データによって表されるグリッドの領域は必ずしも一致しない。この図郭番号は、先に述べたグリッドの情報を記録するデータファイルのグリッドの位置を表す数字とは無関係である。1つのデータファイル内の流路位置の点は全て、同じ図郭番号をもつことにする。2番目の数字は、河道区分の始終点の情報である。正の数字は河道区分の上流端を表す。負の数字は河道区分の下流端を表す。ゼロは河道区分の中間の点であることを表している。ゼロを除くそれぞれの数字は、河道区分の接続状況も表している。例えば、河道区分 R_1 の上流端に2、河道区分 R_2 の下流端に-2 という数字が与えられていた場合、河道区分 R_1 と河道区分 R_2 は、下流側に河道区分 R_1 、上流側に河道区分 R_2 という接続状況になる。3、4、5番目の数字は、流路位置の点の x 座標、 y 座標、 z 座標である。

3.4 河道網データセットの再構成

前節で述べた3つのデータファイル(グリッドの頂点を記録するデータファイル・グリッドの情報を記録するデータファイル・流路位置の点の情報を記録するデータファイル)を用いて、グリッドをもとに河道網を再構成する。流路位置データから得られる流路位置を表す点(河道点)の位置は、必ずしもグリッド形式で得られる標高データの格子点の位置と一致し

ているわけではない。河道点が格子点上にないと、河道点とグリッドの頂点との接続関係を決めることが難しい。河道点を元にグリッドを再分割する方法も考えられるが、再分割したことによる影響が大きく、新たに作成される格子点に標高を設定するなど多大な作業が必要になると考えられる。そこで、河道網を構成している流路位置の点が格子点上になるように流路位置の点を再設定することにより、河道網を再構成する。言い替えると、流路位置の点が格子点上を通るように位置を調整した流路位置の点の情報を記録するデータファイルを新たに作成する、ということである。

流路位置の点の情報を記録するデータファイルにより得られる河道網は、グリッドの頂点を記録するデータファイルとグリッドの情報を記録するデータファイルによって表現されるグリッドの領域の外部を流れる場合も考えられる。グリッドをもとにした河道網への再構成作業については、このような場合にも対応できるようにする。河道網は各河道区分により構成されているものし、河道網の再作業は各河道区分ごとにおこなわれる。一つの河道区分は、河道区分の両端の点(以下節点と呼ぶ)と内部の点(以下中間点と呼ぶ)により構成されている。以下河道区分を構成する節点と中間点を河道点と呼ぶ。各河道区分ごとに新しい河道区分が生成され、新しい河道区分はグリッドで構成される領域の内部に生成される。新しい河道網は新しい河道区分により構成される。

元の河道区分から新しい河道区分を生成するとき、以下の3つの場合が基本として考えられる。

- 一つの河道区分がグリッドで構成される領域内にある場合
- 一つの河道区分がグリッドで構成される領域の外から領域内に入ってくる場合
- 一つの河道区分がグリッドで構成される領域内から領域外に出ていく場合

その他の場合として、一つの河道区分がグリッドで

構成される領域内から領域外に出ていき、また領域内に入って河道区分が終る場合などが考えられるが、上の3つの場合を組み合わせることにより対応できる。この場合は元の一つの河道区分から新しい河道区分が2つ生成されることになる。上の3つの場合におこなわれる作業を以下に述べる。

case A) 一つの河道区分がグリッドで構成される領域内にある場合

(work 1)

元の河道区分の始まりの節点が含まれるグリッドの4つの頂点のなかで、最も河道点に近い頂点を新しい河道区分の始まりの節点として設定する。Fig. 12において、河道区分の始まりの節点である河道点 R_0 は、 R_0 が含まれるグリッドの頂点のなかで、点 P_0 の近くにあるので、点 P_0 を新しい河道区分の始まりの節点とする。

(work 2)

各河道点を直線で結ぶことにより得られる線分と、グリッドの辺を用いて新たな河道点を設定する。Fig. 12において、線分 R_1R_2 は、河道点 R_1 、 R_2 を結んだものであり、線分 P_1P_2 は、グリッドの1辺である。ま

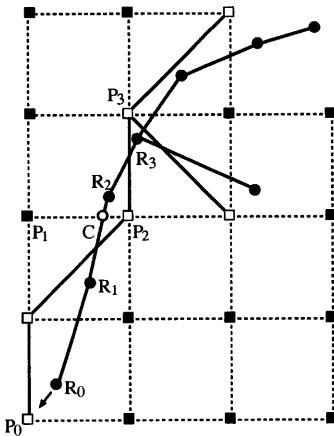


Fig. 12 Generation of a new stream network <case A>(work 2)>

ず、 P_1P_2 と R_1R_2 の交点 C を求め、点 C が点 P_1 と点 P_2 のどちら側に近いか(線分 CP_1 と線分 CP_2 の長さを比較)を調べる。Fig. 12の場合は、点 C は点 P_2 寄りであるから、点 P_2 を新しい河道点とする。次に、線分 P_2R_2 について考える。線分 P_2R_2 はグリッドと

点 P_2 でしか交わっておらず、点 P_2 は既に新しい河道点として登録されているので、対象とする線分を次の線分 R_2R_3 に移す。線分 R_2R_3 と線分 R_2R_3 について同様の作業を行う。この場合、交点は点 P_3 寄りであるから、新しい河道点は点 P_3 となる。この作業を元の河道区分の終りの節点まで繰り返す。

(work 3)

元の河道区分の終りの節点が含まれるグリッドの4つの頂点のなかで、最も河道点に近い頂点を新しい河道区分の終りの節点として設定する。Fig. 12の□を結んだ実線は、再構成された河道網である。

case B) 一つの河道区分がグリッドで構成される領域の外から領域内に入ってくる場合

(work 1)

一つの河道区分がグリッドで構成される領域外から始まる、つまり、河道区分の始まりの節点グリッドで構成される領域の外にある場合、河道区分の次の河道点についてグリッドで構成される領域内に含まれるかを調べ、グリッドで構成される領域内に含まれるまで河道点を順に移していく。

(work 2)

河道点がグリッドで構成される領域内に入ったので、新しい河道区分の始まりの節点の設定をする。グリッド内部にある河道点と領域外にある河道点による線分を考え、その線分と領域外と接するグリッドの領域外に接する辺との交点を求め、その交点が辺の両端の頂点のどちらに近いかを調べ、近い方の頂点を

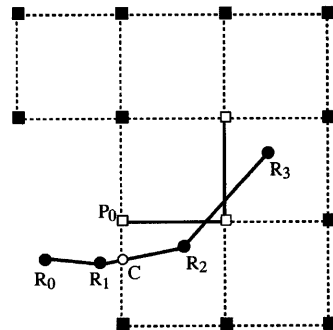


Fig. 13 Generation of a new stream network <case B>(work 2)>

新しい河道区分の始まりの節点として設定する。例として、Fig. 13の場合は、線分 R_1R_2 とグリッドの

辺との交点Cを求め、点Cが辺を構成する頂点のどちら側に近いかを調べる。点P₀の方が近いので、点P₀を新しい河道区分の始まりの節点とする。

(work 3)

case A) の(work 2)へ移る。

case C) 一つの河道区分がグリッドで構成される領域内から領域外に出ていく場合

(work 1)

グリッド内部にある河道点と領域外にある河道点による線分を考え、その線分と領域外と接するグリッドの領域外に接する辺との交点を求め、その交点が辺の両端の頂点のどちらに近いかを調べ、近い方の頂点を新しい河道区分の終りの節点として設定する。Fig. 14の場合、線分R₁R₂とグリッドの辺との交点Cを求め、点Cが辺を構成する頂点のどちら側に近いかを調べる。点P₂の方が近いので、点P₂を新しい河道区分の終りの節点とする。

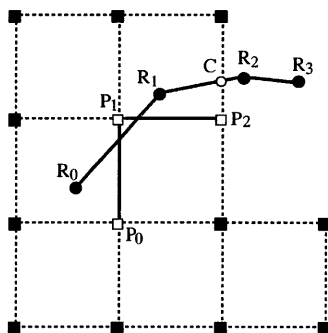


Fig. 14 Generation of a new stream network <case C>(work 1)>

case A)~case C)を組み合わせた元の河道区分から新しい河道区分を生成する流れを Fig. 15 に示す。

この作業終了後に作成されるデータファイルは、

1. グリッドの頂点を記録するデータファイル
2. 流路位置の点の情報を記録するデータファイルの2つである。グリッドの頂点を記録するデータファイルは、もとの入力データファイルの情報に、新たに格子座標の情報を加えるようにした(6)。格子座標とは、各点の位置を1の幅で格子に区切った座標で表したものである。こうすることで、各流域点、河道点の位置の参照が容易になり、電子計算機上で各

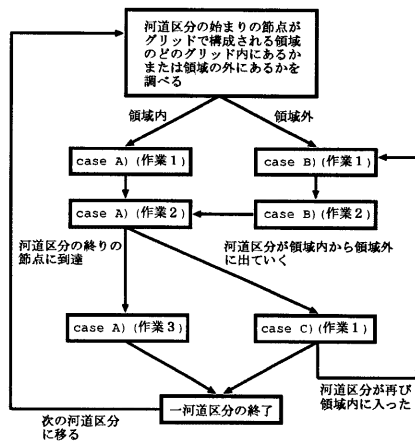


Fig. 15 Flowchart of generation of new stream networks

点の間の処理がしやすくなる。流路位置の点の情報を記録するデータファイルは、点の位置が格子点上になるよう調整され、格子座標の情報も加えられている(7)。

4. 斜面素片の生成

格子座標が記録された2つのデータファイル

1. グリッドの頂点を記録するデータファイル(Table 6 参照)
2. 流路位置の点の情報を記録するデータファイル(Table 7 参照)

をもとに斜面素片を生成する手法について述べる。

4.1 流域点の仮接続

流水線を作成するためには、各流域点がどの流域点と接続しているかを知っておく必要がある。そこで、各流域点とそれに隣接する流域点を結んだ線を、流水線となる可能性のある線として仮接続し、その情報をファイルに出力する。

(1) 入力とするデータ

流域点の仮接続作業において、入力とするデータは、グリッドの頂点を記録するデータファイル(Table 6 参照)と流路位置の点の情報を記録するデータファイル(Table 7 参照)の2つである。

(2) 出力されるデータとそのデータ構造

この流域点の仮接続作業により、出力されるデータファイルは以下の2つである。

Table 6 Data file recording information about grid points

点の番号	x座標の値	y座標の値	z座標の値	格子x座標	格子y座標
1	10	20	30	1	2
2	60	50	40	6	5
6	70	80	90	7	8
9	40	20	100	4	2
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

Table 7 Data file recording information about stream points

始終点の情報	x座標の値	y座標の値	z座標の値	格子x座標	格子y座標
-1	10	10	15	1	1
0	10	20	14	1	2
0	20	30	13	2	3
2	30	30	12	3	3
-2	30	30	12	3	3
0	60	50	10	6	5
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

- 流域点の情報を記録するデータファイル
- 河道点の情報を記録するデータファイル

流域点の情報を記録するデータファイルには、点番号、x座標の値、y座標の値、z座標の値、流域点が代表する面積、河道横流域点²かどうかの判別数、仮接続数、仮接続している流域点の点番号が記録される (Table 8)。河道横流域点かどうかの判別数には、河道横流域点でなければ0が記録され、河道横流域点ならば、河道横流域点と同じ位置にある河道点の番号が記録される。河道点の情報を記録するデータ

Table 9 Data file recording information about stream points

点番号	始終点の情報	x座標	y座標	z座標
1	-1	10	10	15
2	0	10	20	14
3	0	20	30	13
4	2	30	30	12
5	-2	30	30	12
7	0	60	50	10
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

ファイルには、点番号、始終点の情報、x座標の値、y座標の値、z座標の値が記録される (Table 9)。

(3) 作業手順

- グリッドの頂点同士の仮接続

² p.31 (3) 河道横流域点の導入 参照

グリッドの頂点を記録するデータファイルから得られる情報をもとに、各グリッドの頂点において、隣接する頂点が存在する場合、頂点同士を仮接続する (Fig. 16)。

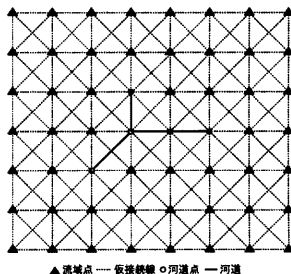


Fig. 16 Tentative connection of grid points

(2) 河道網周りのグリッドの頂点同士の仮接続の切断
河道点と河道点を結んだ線が4辺形の対角線をなすとき、もう一方の対角線が仮接続されていても、その仮接続された線が流水線となることはあり得ない (Fig. 17 の線分 AB)。また、河道点と同じ座標をもつグリッドの頂点における仮接続関係は、河道網を考慮せずに接続されているため、河道の右岸側の流域点の仮接続関係と左岸側の流域点の仮接続関係が明確ではない。流水線を求めるとき、河道の右岸

Table 8 Data file recording information about basin points

点番号	x 座標	y 座標	z 座標	面積	河道横流域点判別数	仮接続数	仮接続流域点番号
1	10	10	15	10	0	4	2 10 11 18
2	10	20	14	10	0	3	8 9 1
3	20	30	13	20	0	1	20
4	30	30	12	30	3	2	6 8 9
6	30	30	12	30	0	4	4 21 34 25
8	60	50	10	60	5	4	2 11 38 73
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

側の流域点の仮接続関係と左岸側の流域点の仮接続関係が個々にわかっていると、右岸側からの雨水の流れと左岸側からの雨水の流れを考慮することができる。そこで、河道網周りのグリッドの頂点同士の仮接続を一旦切断する。流路位置の点の情報を記録するデータファイルから、河道点の情報を読み取り、河道点の格子座標と同じ格子座標をもつグリッドの頂点とそれに隣接するグリッドの頂点との仮接続を切断する (Fig. 18)。

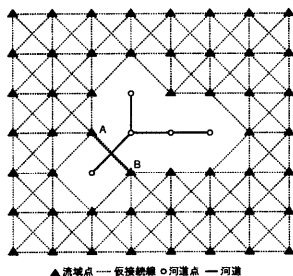


Fig. 17 Line which cannot be treated as a stream line

(3) 河道横流域点の導入

河道の右岸側と左岸側において、流域点の接続関係を明確にするために、グリッドの頂点上に新たに設定された各河道点の右岸側と左岸側に河道点と同じ x 座標、 y 座標をもつ2つの流域点を設ける。合流点には、河道に挟まれたそれぞれの岸に合流点と同じ x 座標、 y 座標をもつ流域点を設ける。最下流点、最上流点 (以下、端点と呼ぶ) については、河道点と同じ x 座標、 y 座標をもつ3つの流域点を設けることにする。これら河道点と同じ x 座標、 y 座標をもつ流域点を河道横流域点と呼ぶ。河道横流域点には、河道によって分割された面の、それぞれの受け持つ割合に応じて面積を配分する。河道横流域点は次の

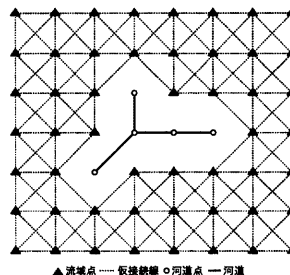


Fig. 18 Cutoff tentative connections surrounding the stream network

ようにして作成した。

- 1) 作成した河道横流域点を登録するためのリスト³を用意する。
 - 2) 対象とする河道網の最下流点を出発点とし、常に河道区分を左に見ながら河道区分のまわりを河道区分に沿って移動し、各河道点において、進行方向をみて右側に河道横流域点を作成する。
 - 3) 作成した河道横流域点をリストに登録する。
 - 4) 対象とする河道網の最下流点に到達したら終了。
- 以上のようにして、作成した河道横流域点の模式図が Fig. 19 である。

(4) 河道横流域点と流域点の仮接続

河道横流域点が登録されたリストから、河道横流域点を取り出し、河道横流域点に隣接する流域点と仮接続していく (Fig. 20)。ここで、端点については、河道点の右岸側と左岸側に作成された河道横流域点は隣接する河道に沿う河道横流域点とだけ仮接続し、残り1つの河道横流域点を河道に沿う河道横流域点以外の流域点と接続することにする。

これらの作業終了後、結果をファイルに出力する。

³ データ部とポイント部からなるデータを鎖状につなげたデータ構造

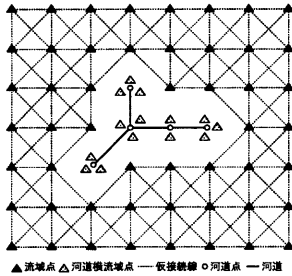


Fig. 19 Basin point accompanying the stream point

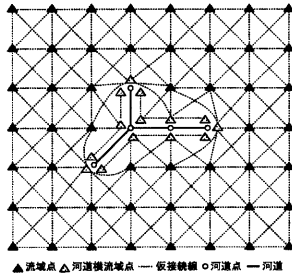


Fig. 20 Tentative connection of basin points

4.2 窪地の処理

窪地とは、周りのどの流域点よりも標高値の低い流域点のことである。河道横流域点とグリッド領域の境界に位置する流域点を除く流域点において、窪地がある場合は、隣接する流域点の標高の中で最も低い標高値より標高が高くなるように窪地の標高値を調整し、窪地が無くなるまでこの作業を繰り返す。入力データファイルは、流域点の情報を記録するデータファイルであり、この作業により、出力されるデータファイルは、流域点の情報を記録するデータファイルと同じデータ構造である。

4.3 斜面素片の生成

流域点を仮接続したときに出力されるデータファイル

- 河道点の情報を記録するデータファイルと窪地の標高値を調整したあとの
- 流域点の情報を記録するデータファイルを入力データファイルとして、斜面素片を生成する作業をする。また、出力データファイルは次の2つである。

1. ノードに関する情報を記録するデータセット
 2. エッジに関する情報を記録するデータセット
- 斜面素片を生成する作業終了後に、ノードとエッジによって、流域場を表現するデータセットが生成される。

斜面素片を生成する作業は、実際には、各流域点において、隣接する流域点との仮接続情報をもとに、流水線を登録していく作業である。データファイルに出力するときに、流水線を構成する両端の流域点のもつ面積を流水線に割り振って、その面積をエッジのもつ情報とすることにより、流水線は、面積をもつ斜面素片となる。

また、流水線を最急勾配で下る方向と最急勾配で上る方向をもとに作成したとき、河道に沿う流水線が登録される場合がある (Fig. 21)。河道に沿った流

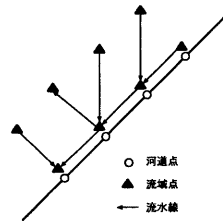


Fig. 21 Basin stream line which lies along a stream

水線が連なると、河道に平行して雨水が流れていくことになる。この場合を解消するため、河道に沿う流水線は連なることはなく、一流水線が河道に沿う場合、流水線の流入してくる方向の点の位置に新たに流域点を設けて、新たに設けた流域点を河道に沿う流水線の流入してくる方向の点として、そこから河道に流れ込むようにする (Fig. 22)。

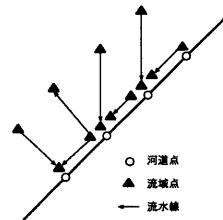


Fig. 22 Addition of new basin points

また、河道横流域点に関しては、将来、河道網の抽出の観点から、ノードの属性を流域点から河道点

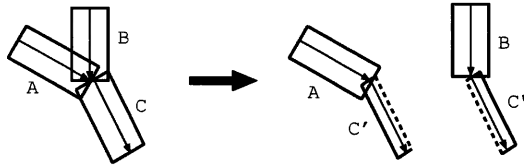


Fig. 23 Confluence of slopes

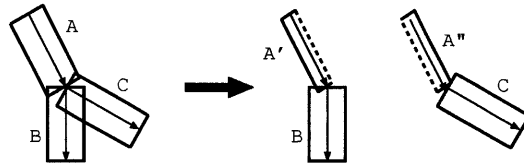


Fig. 24 Diversion of a slope

に変更する場合も考慮し、ある河道横流域点に流入して来る流水線と流出する流水線がある場合には、流入して来る流水線を受け持つ流域点と流出する流水線を受け持つ流域点に分割することにする (Fig. 22)。こうすることにより、流入して来る流水線の属性、流水線を構成する流域点を河道点に変更することにより、実河道網に即した河道網の抽出の道を開いておく。

斜面素片は次のような流れで作成される。

- 1) 各流域点から、隣接する流域点の中で最急勾配で下る流域点に至る流水線を登録する。
- 2) 各流域点から、隣接する流域点の中で最急勾配で下る方向にある流域点を取り、そこから考えている流域点に向かう流水線を登録する。
- 3) 各河道横流域点が、流入する流水線だけあるいは流出する流水線だけになるよう調整する。
- 4) 河道点、流域点の情報をノードに関する情報を記録するデータセットに出力。流水線に面積をもたせ斜面素片とし、斜面素片の情報と流域点と河道点の接続情報、河道点と河道点の接続情報をエッジに関する情報を記録するデータセットに出力する。

5. 合流あるいは分流する斜面素片の細分手法

山頂から河道に至るまでの雨水の流下経路は斜面素片の組合せにより表現される。

合流の場合、Fig. 23 を例にとると、流出する面 C を面 A より上流部分の流域面積と面 B より上流部分

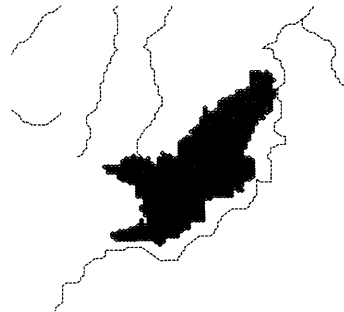


Fig. 25 Extraction of the Daido River basin

の流域面積の比により分割 (面 C'、面 C'') し、それぞれを流入する面 A、面 B に割り当てる。1 つの点に対し、3 本の流入する面と 1 本の流出する面がある場合には、流出する面を流入する面の上流側の流域面積の比に応じて 3 つに分割し、それぞれを流入する面に割り当てることになる。

分流の場合、Fig. 24 を例にとると、流入する面 A を単純に 2 分の 1 ずつに分割 (面 A'、面 A'') し、それぞれを流出する面 B、面 C に割り当てる。1 つの点に対し、1 本の流入する面と 3 本の流出する面がある場合には、流入する面を 3 分の 1 ずつに分割し、それぞれを流出する面に割り当てる。

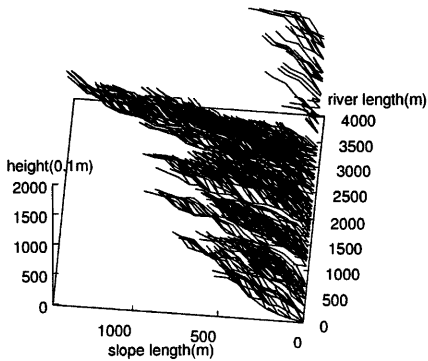


Fig. 26 Relation between the heights and the lengths of the slopes in the Daido River Basin

以上のように、斜面素片を細分していくことにより、流域斜面を多数の斜面群に分解する。

6. 実流域への適用

本研究で提案した流域場モデルを大戸川流域に適用し、斜面特性の抽出を試みた。標高データは、50mメッシュの数値地図を用いた。流路位置データは、国土数値情報 KS-272 をもとに作成した。大戸川上流部の1河川流域を抽出した図を Fig. 25 に示す。Fig. 25 に示した大戸川上流部流域を対象に、斜面長ささと河道下流端からの高さの関係を示した図が Fig. 26 である。得られた斜面要素の総数は、961 であった。

7. 結論

本研究では、グリッド形式で与えられる標高デー

タと流路位置データをもとにした河川流域地形表現を新たに提案した。発散地形に対応するために、雨水の流れ方向の決定に際し、最急勾配方向に上るという処理を加えた。雨水流下線に面積を配分して、線としてではなく面として取り扱うことにより、斜面流のモデルと組み合わせることができるようにした。流域場をノードとエッジの集合で表現することにより、流域の抽出や斜面要素の抽出をして、地形の特徴の抽出や統計的解析ができるようにした。今後の課題としては、今回提案した流域場モデルを流れのモデルと結合することや、地形の統計的解析を試みる事が挙げられる。

参考文献

- 立川康人 (1995) : 分布型流出予測システムの構成とリモートセンシング情報による流域場特性の取得に関する研究, 京都大学学位論文.
- Tachikawa, Y., M. Shiiba, and T. Takasao (1994) : Development of a basin geomorphic information system using a TIN-DEM data structure, Water Resources Bulletin, vol.30, No.1, pp.9 - 17.
- 南裕一 (1997) : 河道網データセットの新たな表現形式とその生成手法について, 京都大学卒業論文.

A New Numerical Representation Form of Basin Geomorphology

Michiharu SHIIBA, Yasuto TACHIKAWA, Yutaka ICHIKAWA and Tetsuyoshi SAKAKIBARA
* Daiho Corporation

Synopsis

Representation of natural landscapes is fundamental to construct a rainfall-runoff model. This paper describes a topographic model of a river basin using Grid-based DEMs and a method of distributing basin slopes into slope elements for a statistical analysis of basin slopes.

Keywords: basin geomorphology, DEM, runoff model