

流域地形構造を考慮した流域場モデルの自動生成

高棹 琢馬・椎葉 充晴・立川 康人・山口 昌利

AUTOMATIC BUILDING OF A RUNOFF MODEL OF A NATURAL BASIN TAKING ACCOUNT OF ITS TOPOGRAPHY

By *Takuma* TAKASAO, *Michiharu* SHIIBA, *Yasuto* TACHIKAWA
and *Masatoshi* YAMAGUCHI

Synopsis

This paper describes the way to build a runoff model automatically taking account of topography of a natural basin by using digital geometrical data and to calculate runoff height by this runoff model.

To get such a runoff model, we take two steps. The first is covering a basin with a mesh. The second is dividing every mesh into triangular elements. By these elements the topography of the watershed can be represented. We divide this basin covered with triangular elements into slope elements and calculate runoff height of every slope element. We regard total of these runoff heights as real runoff height of this basin.

These methods are applied to the Ara river experimental basin and the Ina river basin. By the results the availability of these methods can be confirmed.

1. 序 論

本研究は、数値化された地理的情報を利用して、流域地形構造に即した雨水の流動場を電子計算機を用いて自動的にモデル化し、実地形に即した雨水の流れのモデル化を行うことにより、実地形に即した雨水の流出計算法を確立することを目的とする。

1960年以降、京大の水文研究者らは出水問題の解明に務め多くの成果をあげてきた。特に石原・高棹が、出水過程の本質が雨水の流動であるという観点にたち、山腹斜面を主な対象として中間流出理論¹⁾²⁾³⁾を展開し、降雨から流量への変換系を統一的に表現³⁾⁴⁾したことは非常に意義深い。これらの研究はその後に発表された“variable source area concept”(たとえば Betoson & Marius⁵⁾・Dunne & Black⁶⁾)を説明することをすでに可能としていた。以後、これらの研究を基礎として斜面・河道網の流出系に関する多くの研究が発表されてきた。たとえば高棹・椎葉による可道網構造を考慮した河川流域の出水解析⁷⁾⁸⁾、Kinematic Wave法に基づく流出計算法の総合化⁹⁾、流域地形効果を導入した雨水流モデル¹⁰⁾¹¹⁾等の研究はその例である。

これらの研究はいずれも雨水の流動場である流域斜面を一定勾配の矩形または一様円錐面として取り扱っており、雨水流を流域実地形に即して追跡するためにはさらに場のモデル・流れのモデルともに改良する必要がある。今日の電子計算機の発展と国土数値情報等のデジタル化された地理的情報の充実ぶりを

考えれば、流域規模で実地形に即した流れの場のモデルを考えることも不可能ではない。

そこで本研究は、冒頭でも述べたように、数値化された地理的情報（メッシュ格子点の標高値と流路位置）を利用して、流域地形構造に即した雨水の流動場を電子計算機を用いて自動的にモデル化し、実地形に即した雨水の流れのモデル化を行うことにより、実地形に即した雨水の流出計算法を確立することを目的とする。次章以降の内容は以下のとおりである。

2. で、流域地形構造を考慮した流域場モデルの自動生成システムを提示する。

3. で、このシステムを実流域に適用する。適用した流域は、滋賀県野洲川支川荒川西流の最上流部に位置する荒川試験地梅ヶ谷流域と長野県木曾川上流の伊奈川流域である。梅ヶ谷流域では、デジタイザを使用してメッシュ標高データと流路位置データを作成し、伊奈川流域では国土数値情報を使用してメッシュ標高データと流路位置データを作成する。

4. で、3. で得た伊奈川流域の斜面要素一つ一つを準三次元斜面要素モデル¹²⁾の特別な場合である円錐面で近似する。斜面要素一つ一つについて流出計算を行い、斜面要素下端からの流出量を合算したものを流域全体からの流出量と考え、実測の流量ハイドログラフと比較する。

最後に 5. で本研究の結論を述べる。

2. 流域モデル自動生成システム

2.1 概説

雨水流モデルでは、雨水の流動場のモデル化と雨水の流れのモデル化が基本である。本節では、実地形に即して雨水流を追跡するために、流域地形構造に即した雨水の流動場を電子計算機を用いて自動的にモデル化するシステムを提案する。自動生成システムは次の過程からなる。

- ① デジタイザによって読み取った地形図上の等高線と可道、または国土数値情報の標高データファイル（KS 110-1）・流路位置ファイル（KS 272）のデータを入力として、メッシュ標高データと流路位置データを作成する。
- ② メッシュ標高データ・流路位置データをもとに有限要素法における要素構成法を援用して、対象とする流域斜面全体を三角形要素の集合体としてモデル化する。
- ③ 計算機内部で流域内の山頂と峠を探索し、山登り線（上り方向の最急勾配線）を用いて、自動的に流域界を決定する。山登り線を追跡するとき、Palacios-velez ら¹³⁾の最急勾配方向の計算法を取り入れる。
- ④ 河道上の点から山登り線を追跡し、河道・隣合う山登り線・流域界で囲まれた領域を斜面要素と考え、流域を斜面要素群に分割する。システムの流れを Fig. 1 に示す。

2.2 自動生成システムへの入力データの構成

(1) 概要

流域モデル自動生成システムへの入力となるメッシュ標高データと流路位置データを作成する。メッシュ標高データは、流域にメッシュをかけ各格子点の位置と標高を記録したものであり、流路位置データは河道の位置を表す点列の座標、合流点・上下流端の標高、河道区分（水源または合流点から合流点または流域下流端までの河道部分）の接続関係を記録したものである。

本研究では、デジタイザ（座標読み取り装置）を利用してメッシュ標高データと流路位置データを作成する前処理プログラムと、国土数値情報（標高データファイル・流路位置ファイル）¹⁴⁾¹⁵⁾を利用してメッシュ標高データと流路位置データを作成する前処理プログラムを用意した。数km²以内の流域を対象とする場合はデジタイザを利用し、数十km²以上の流域を対象とする場合は国土数値情報を利用することを

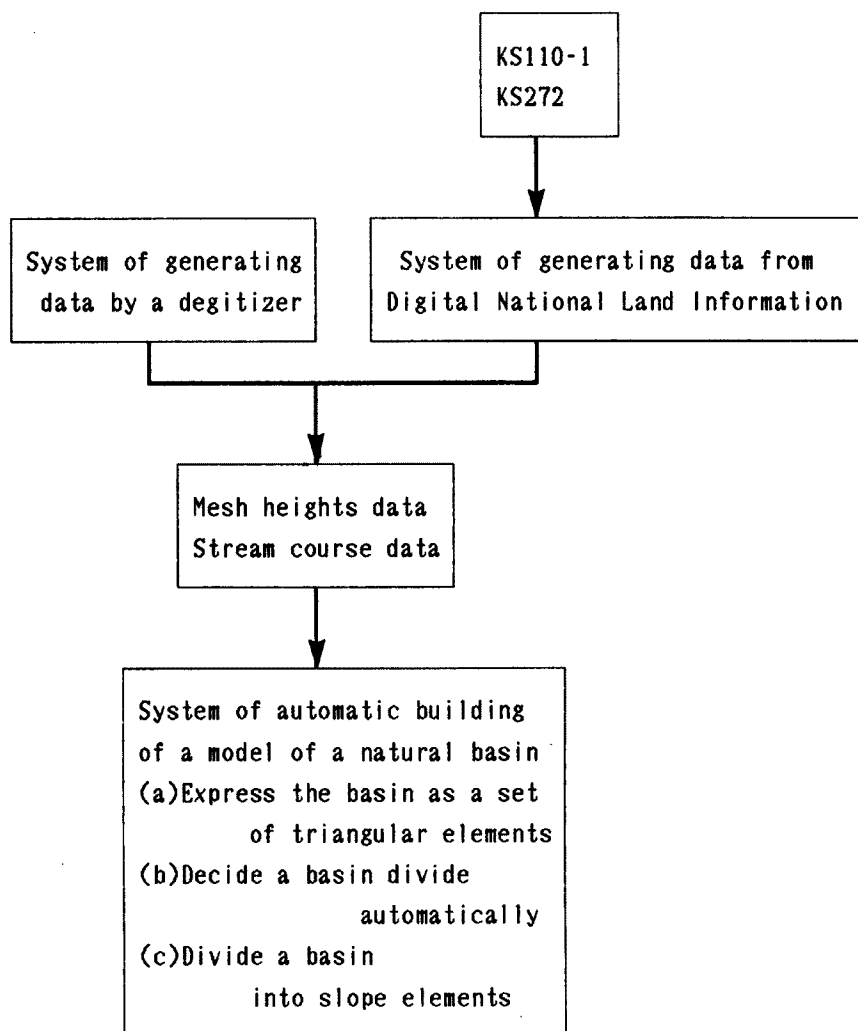


Fig.1. Flow diagram of automatic building of a runoff model.

想定している。

(2) デジタイザーによる入力データの構成

デジタイザーによって地形図上の等高線と河道を読み取り、対象とする流域にメッシュをかけて格子点の標高を求め、メッシュ標高データと流路位置データを作成する。Fig. 2は、国土地理院発行の2万5千分の1地形図をもとに、荒川試験地梅ヶ谷流域付近¹⁶⁾の等高線と河道をデジタイザーを用いて電子計算機に入力したデータを電子計算機で再現したものである。

(a) メッシュ標高データ

メッシュ格子点の標高を

$$z = \sum_{d_i < D} \frac{c_i}{d_i^2} / \sum_{d_i < D} \frac{1}{d_i^2} \dots\dots\dots (1)$$

により算定した。ここで z は格子点の標高、 c_i は等高線の標高値、 d_i は格子点から等高線データの点まで

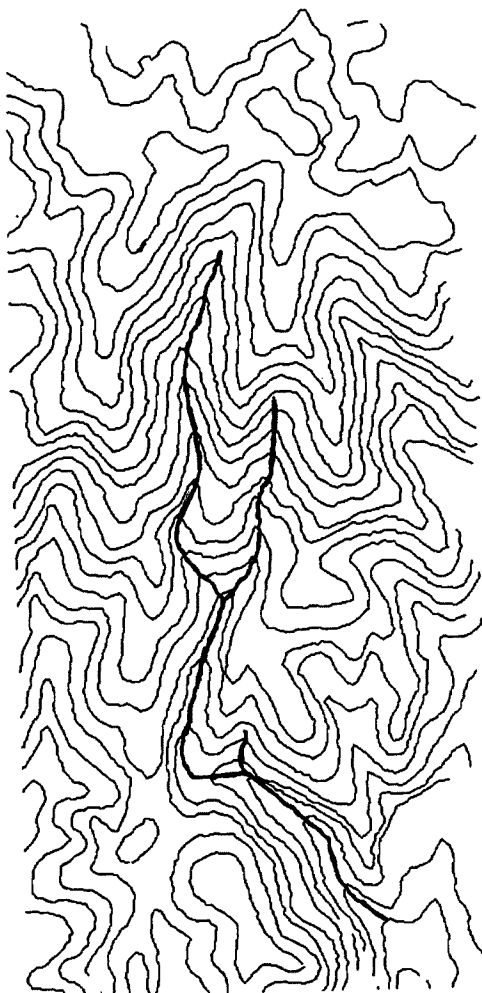


Fig. 2. Data of the Ara river experimental basin imputed by a digitizer.

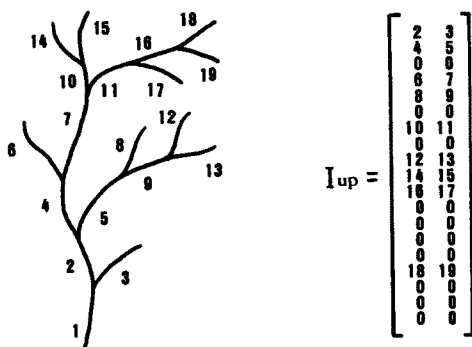


Fig. 3. Connection of a stream segments.

(a) Stream network

(b) Expression of a stream network by a procession

の距離である。距離 D_0 を設定しておき、 $d_i < D_0$ となる等高線データが 10 点以上あれば $D = D_0$ 。そうでなければ D を増やし、算定に用いる等高線データが 10 個以上となるように調整した。

(b) 流路位置データ

流路位置データは河道の位置を表す点列の座標、合流点・上下流端の標高、河道区分の接続関係を記録したデータである。河道区分の接続関係の記述は椎葉の研究¹⁷⁾を参考にした。以下にその方法を示す。

① 最下端の河道区分から順に、高さが同じときは最下端の河道区分を中心に時計回りに若い番号をつける。

② 河道区分の総数を n_c 、番号 i の河道区分を $L(i)$ とするとき、 $n_c \cdot 2$ 次の行列 I_{up} を用意し、 $L(i)$ に流入する河道区分が $L(i_1), L(i_2)$ のとき

$$I_{up}(i, 1) = i_1, I_{up}(i, 2) = i_2$$

$L(i)$ に流入する河道区分が無いとき

$$I_{up}(i, 1) = I_{up}(i, 2) = 0$$

とする。

河道網構造に対する番号の付け方と河道区分の接続関係を表す行列 I_{up} を Fig. 3 に示す。

(3) 国土数値情報による入力データの構成

近年、国土に関する地理的情報を数値化した国土数値情報が整備されるようになってきた。国土数値情報とは、地形、土地利用、公共施設、道路、鉄道、行政界、都市計画区域等の国土に関する地理的情報を数値化（デジタル化）し、磁気テープ等に記録したもの、即ち地図に表現されている内容を数字や符号に変換したものである。本節では国土数値情報（標高データファイル・流路位置ファイル）を利用してメッシュ標高データと流路位置データを作成する方法を述べる。

(a) 位置表示方法

国土数値情報では、原則として標準地域メッシュにより位置を表している。標準地域メッシュには、①全国の地域を、1度ごとの経線と、40分ごとの緯線によって縦横に分割した1次メッシュ（20万分の1地勢図の区画に相当）、②1次メッシュの縦横をそれぞれ8等分した2次メッシュ（2万5千分の1地形図一枚分に相当）、③2次メッシュの縦横をそれぞれ10等分した3次メッシュ（約1km四方）がある。各メッシュにはメッシュコードがつけられ、このコードによって各メッシュの位置を知ることができる。メッシュ内の流路位置等の各点の位置は2次メッシュ単位での正規化座標を用いて表されている。

(b) 座標系と変換式

国土数値情報では、計測座標から変換した2次メッシュ単位での正規化座標によって位置を表す。正規化座標とは2次メッシュの左下隅を(0, 0)、右上隅を(1, 1)として、メッシュ内の位置を表す座標系である。

正規化座標は現実の長さや面積と直接関係がないので、正規化座標値から距離・面積を求める場合は、正規化座標系から地理座標系(経度・緯度)、さらにUTM(Universal Transverse Mercator)座標系¹⁸⁾¹⁹⁾への座標変換を行って投影座標系で距離・面積を計算する。

(c) データ加工

標高データファイルをもとにメッシュ標高データを作成する。標高データファイルには、各3次メッシュ毎の3次メッシュコード・資料年記及び縦横4等分する方眼(約250 m四方)の格子点での標高値の情報が格納されている。

原データは正規化座標系で表されメッシュ区画は矩形であるが、UTM座標系では矩形にならないため原データの標高値をそのまま採用することはできない。そのため、等高線データからメッシュ標高データを作ったのと同様に、標高は近傍の標高値の距離の重みつき平均値とする。

次に、流路位置ファイルをもとに流路位置データを作成する。流路位置ファイルには、各2次メッシュ毎の、2次メッシュコード・河川コード・単位流域コード・河川区間種類番号・始終点タグ・流路位置の正規化座標・水系コード及び河床標高値の情報が格納されている。単位流域コードとは本研究でいう河道区分につけられた番号であり、始終点タグとは2次メッシュ毎に格納されている河道のデータを連結するためにつけられた番号である。

始終点タグをもとに河道が連続となるように流路位置座標をならべかえ、座標系を正規化座標系からUTM座標系に変換しておく。また、単位流域コード・始終点タグをもとに河道区分の接続関係を求め2.2.2(b)で示したデータと全く同じものを作成する。Fig. 4は流路位置データをもとに描いた木曽川上流伊奈川流域である。



Fig. 4. The Ina river basin based on the file KS-272.

2.3 三角形要素網モデルによる流域地形の表現

(1) 概要

デジタイザーまたは国土数値情報から作成したメッシュ標高データ・流路位置データをもとに有限要素法における要素構成法を援用して、対象とする流域斜面全体を三角形要素の集合体としてモデル化する。

(2) 三角形要素への分割

Fig. 5に流域を三角形要素で表した模式図を示す。(a)は流路位置データを表示したものであり、(b)は流路位置データをもとに流域を三角形要素で表したものである。流域を三角形要素で表現するアルゴリズムは次の通りである。

- ① 流域を覆うメッシュ標高データと流路位置データを電子計算機に入力する。
- ② 河道とメッシュ区画との交点(以下簡単のため、対象とするメッシュ区画に流入するときの交点を流入河道点・メッシュ区画から流出するときの交点を流出河道点と呼ぶことにする)を求める。河道点の標高は、上流から順に、河道点のある辺の両端の格子点の標高と一つ上流の河道点・上流端

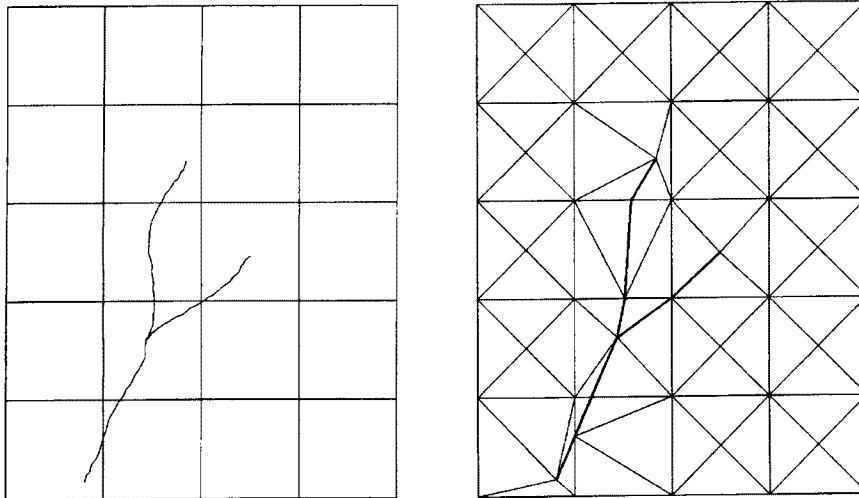


Fig. 5. Triangular element network model of a basin.

(a) Representation of stream course data

(b) Expression of a basin by stream course data

または合流点よりも低くなるように定める。ここで、上下流端と合流点での標高値は測定されているものとする。

- ③ 格子点と河道点をもとにメッシュ区画を三角形要素に分割する。分割方法はメッシュ区画内に河道が存在するかどうか、さらにメッシュ区画内に河道上流端・下流端または、河道合流点が存在するかどうかによって異なる。三角形要素への分割方法を Fig. 6 に示す。図中 (a) はメッシュ区画内に河道が存在しない場合であり、メッシュ区画の中央に新たに点を設け四つの三角形要素に分割する。その標高はメッシュ区画の四つの頂点の標高の平均値とする。(b) はメッシュ区画を河道が通過する場合であり、流入河道点・メッシュ区画の頂点を流出河道点と結び三角形要素に分割する。(c)(d)(e) はそれぞれメッシュ区画内に上流端・下流端・合流点が存在する場合で、いずれも上流端・下流端・合流点を中心としてメッシュ区画の頂点と流出河道点・流入河道点とを結び三角形要素に分割する。

以上はメッシュ区画を三角形要素に分割する基本的なアルゴリズムである。しかし、Fig. 7 に示すように上述のアルゴリズムだけではメッシュ区画を三角形要素に分割できない場合がある。すなわち、メッシュ区画の同一辺に流出入河道点がある場合、メッシュ区画内に合流点が二つ以上ある場合、メッシュ区画内に流出河道点が複数ある場合は対応することができない。

そこで、メッシュ区画を細分割して Fig. 6 の分割パターンに持ち込むことを考える。細分割によって Fig. 6 のいずれかのパターンに当てはまるまで、メッシュ区画を構成する線分の中点を結び細分割していく。新しくできた格子点の標高はすでにある格子点の標高から内挿する。このようにすれば、どのようにに河道がメッシュ区画を通過しても流域を三角形要素で表現することができる。メッシュ区画を細分割することをとりいれた最終的なアルゴリズムを Fig. 8 に示す。Fig. 9 は流域を三角形要素で表現する場合に細分割を必要とした例である。

(3) データの格納方法

全ての頂点に一連の番号を付け、一つの三角形要素について、その3つの頂点と隣接する三角形要素とを反時計回りに登録した配列を作成する。ここで河道点である頂点と、河道を構成する辺を共有する隣接した三角形要素には負の符号をつけることにした。Fig. 10 にその例を示す。

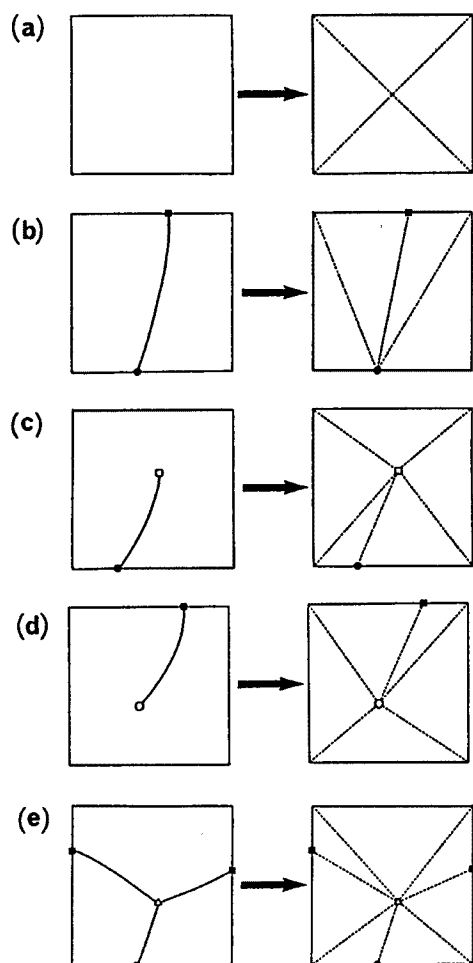


Fig. 6. Division of a mesh into triangular elements.

- (a) The mesh has no river
 (b) A river goes through the mesh
 (c) The mesh has a upstream end
 (d) The mesh has a outlet of a basin
 (e) The mesh has a junction

2.4 山登り線による流域界の自動決定

(1) 概要

本節では、計算機内部で流域内の山頂と峠を探索し、山登り線（上り方向の最急勾配線）を用いて、自動的に流域界を決定するアルゴリズムを提案する。流域界を決定し流域斜面を斜面要素に分割するとき、山登り線を追跡することが基本となる。本研究では、Palacios-velez ら¹³⁾の最急勾配方向の計算を取り入れて山登り線を追跡する。

(2) 山登り線の計算法

山登り線を求める準備として、三角形 abc の辺 ac 上の点 $A(u, v, w)$ から辺 ac を通る直線 L 上で最急勾配となる点 $P^*(x^*, y^*, z^*)$ を求めることを考える (Fig. 11 参照)。直線 L は、 t を媒介変数として

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 - c_1 \\ b_2 - c_2 \\ b_3 - c_3 \end{bmatrix} t + \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2)$$

と表される。

L 上の点を $P(x, y, z)$ とすると直線 AP の勾配 g は、

$$g = (z - w) / \sqrt{(x - u)^2 + (y - v)^2} \dots\dots\dots (3)$$

であたえられる。式(2)を式(3)に代入し、式(3)を t で微分したものを 0 とすると、

$$t^* = t_1 / t_2 \dots\dots\dots (4)$$

$$t_1 = (b_3 - c_3) \{ (c_1 - u)^2 + (c_2 - v)^2 \} - (c_3 - w) \{ (b_1 - c_1)(c_1 - u) + (b_2 - c_2)(c_2 - v) \} \dots\dots (5)$$

$$t_2 = (b_3 - c_3) \{ (b_1 - c_1)(c_1 - u) + (b_2 - c_2)(c_2 - v) \} - (c_3 - w) \{ (b_1 - c_1)^2 + (b_2 - c_2)^2 \} \dots\dots (6)$$

となり、式(2)に t^* を代入して $P^*(x^*, y^*, z^*)$ が求められる。また、 t_2 は三角形の座標と点 A の座標によって定まる定数である。ここで

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} g = (b_3 - c_3) / \sqrt{(b_1 - c_1)^2 + (b_2 - c_2)^2} \dots\dots\dots (7)$$

$$\lim_{t \rightarrow -\infty} g = -(b_3 - c_3) / \sqrt{(b_1 - c_1)^2 + (b_2 - c_2)^2} \dots\dots\dots (8)$$

$$df/dt = t_2 \dots\dots\dots (9)$$

であることを考慮すると、 t_2 の正負により勾配 g の概形は Fig. 12 のようになる。Fig. 12 より P^* は、 $t_2 > 0$ のとき勾配が最小となる点（この場合勾配が最大になる点はない）、 $t_2 < 0$ のとき勾配が最大となる点である（この場合勾配が最小になる点はない）ことがわかる。また $t_2 = 0$ のときは t^* の絶対値は無限大となり、点 A からの最急勾配方向は直線 L と平行になることがわかる。以上を基礎として、山登り線は次のアルゴリズムで求められる。

- ① 山登り線の開始点 A の座標とその点を含む三角形要素番号を与える。点 A が頂点である場合は④へ行く。
- ② 点 A が属さない 2 つの辺のどちらかを選び t_2 、 t^* を計算する。

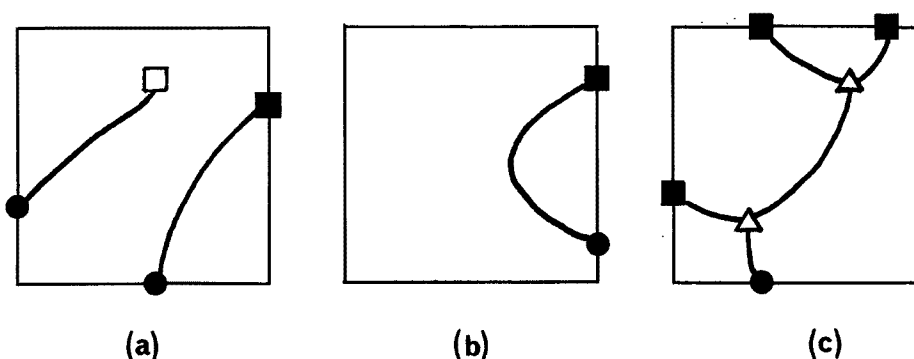


Fig. 7. The mesh that needs dividing again.

- (a) More than two streams go out the mesh
- (b) A stream comes into and goes out the mesh through the same side
- (c) The mesh has more than two junctions

(1) $t_2 < 0$ のとき,

(a) $0 \leq t^* \leq 1$ であればその点を B とする。

(b) $t^* < 0$ または $t^* > 1$ であればその点に最も近い頂点を B とする。

(2) $t_2 \geq 0$ であればもう一つの辺を選び t_2 , t^* を計算して (1) へ行く。(この場合, 必ず $t_2 < 0$ となる。)

③ 点 B が頂点であれば点 B を A として④に行く。点 B が辺上であれば点 B を A とし, 2.3.3 で作成した配列を用いて三角形要素番号を更新して②に行く。

④ 頂点 A を共有するすべての三角形要素の対辺について, 最急勾配を計算し, そのうちで最も大きな登り勾配となる点を B として, ③へ行く。

⑤ ④で登るべき点が存在しなければその点は山頂であり, 計算を終える。

(3) 流域界自動決定アルゴリズム

流域内に存在する全ての山頂と峠をさがしだす。対象とする頂点が, 隣接する全ての頂点よりも高ければその頂点は山頂であり, まわりに高い頂点と低い頂点が交互に存在するならばその頂点は峠と考えることができる。峠である頂点から, その頂点を共有するすべての三角形の対辺について最急勾配を計算する。その勾配が正であれば山頂または峠に至るまで山登り線を追跡する。各頂点(山頂または峠)について, これらの山登り線で結び付けられる山頂または峠の番号を記憶する。たとえば Fig. 13 で, 峠 2 には山頂 1, 3, 4 が, 山頂 4 には峠 2, 5, 7 が接続している。流域界は, 一連の山頂または峠とこれらをつなぐ山登り線からなる。次の手順で流域界を描く。

① 流域下流端から左岸側に出発し, 山頂または峠に至るまで山登り線を描く。Fig. 13 の例では 1 番の山頂に登る。

② すでに到達した流域界上の頂点または峠から, これに接続する山登り線のうち一番左側にある山登り線をたどり, 次の山頂または峠に行く。Fig. 13 の例で, 4 番の山頂からは, 7 番の峠へ行く。

③ 行き止まりになったら戻る。Fig. 13 の例で, 11 番の山頂に来たら, 10 番の峠へ戻る。

④ 到達した頂点が, 流域下流端から右岸側を登って到達した山頂または峠ならば, 計算を終える。

①から④で描いた山登り線を結んだものが, 流域界である。

2.5 山登り線による流域斜面の分割

河道上の点から山登り線を追跡し, 河道・隣合う山登り線・流域界で囲まれた領域を斜面要素と考え, 流域を斜面要素群に分割する。その模式図を Fig. 14 に示す。流域斜面の分割は次の順序で行う。

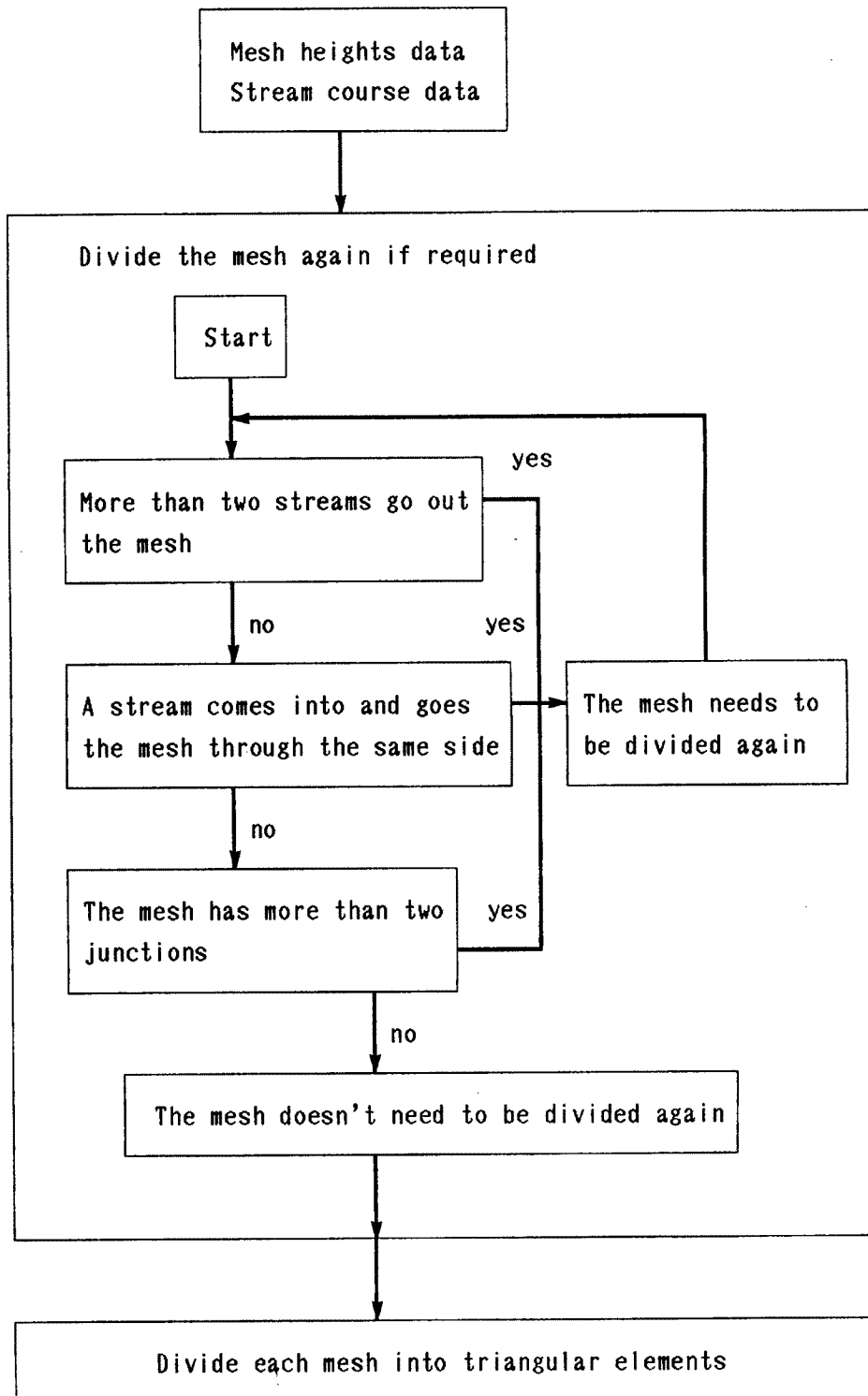


Fig. 8. Algorithm of building a triangular element network model.

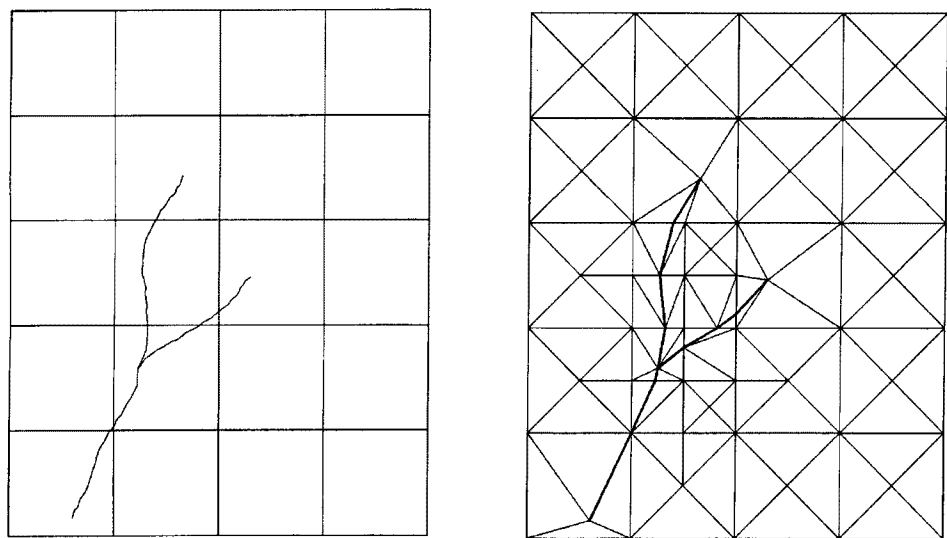
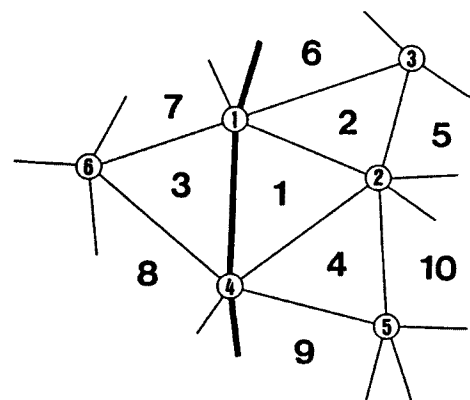


Fig. 9. Triangular element network model of a basin.

(a) Representation of stream course data

(b) Expression of a basin by stream course data



No. of Triangle	No. of Vertices			No. of Adj. Triangles		
1	-1	-4	2	4	2	-3
2	3	-1	2	1	5	6
3	6	-4	-1	-1	7	6
4	-4	5	2	10	1	9

Fig. 10. Expression of connection of slope elements and a stream network by a matrix.

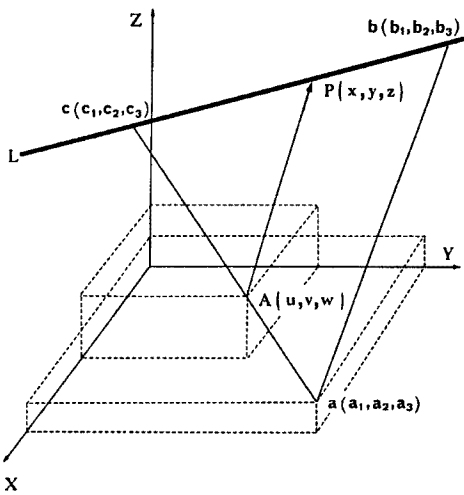


Fig. 11. Calculation of slope from point A to line L.

- ① 下流端から河道を構成する辺上に一定の距離ごとに分点を設定する。
- ② これらの分点から河道の両側の斜面をさかのぼる山登り線（最急勾配線）を描く。
- ③ 隣合う山登り線と河道および流域界に囲まれた斜面を1つの斜面要素とする。

次章で本システムを実流域に適用し、その有効性を確認する。

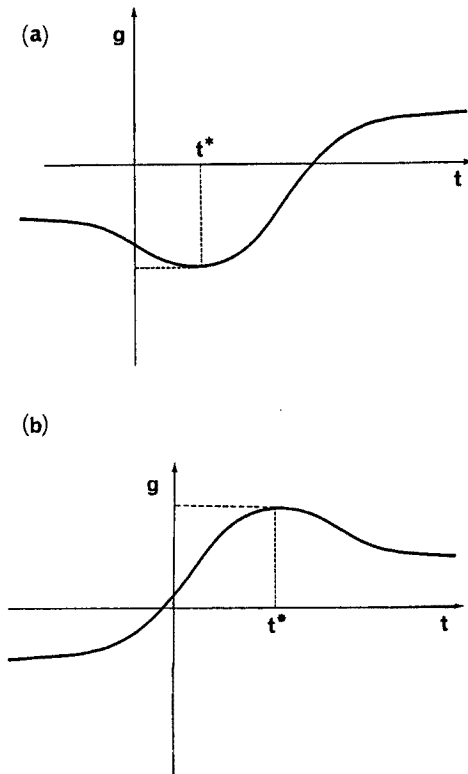


Fig. 12. Relation of slope g and parameter t .
 (a) $t_2 > 0$
 (b) $t_2 < 0$

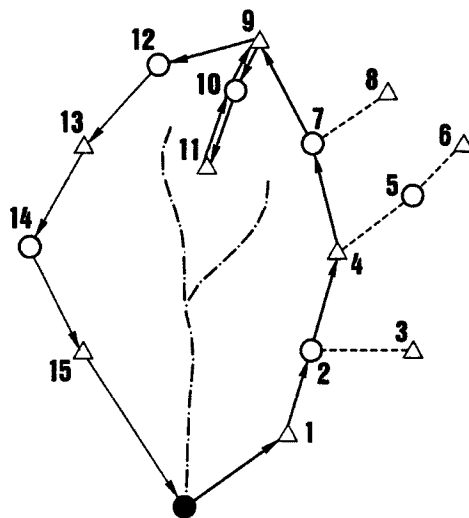


Fig. 13. Algorithm of deciding a basin divide.
 ● : Basin outlet
 △ : Mountain peak
 ○ : Mountain path

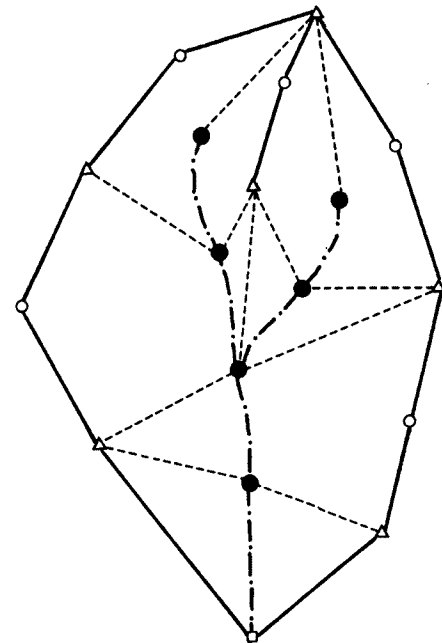


Fig. 14. Division of a slope by the path of the steepest slope.

△ : Mountain peak
 ○ : Mountain path
 □ : Basin outlet
 ● : Dividing points on a stream
 — : Basin divide
 --- : Stream
 - - - : The path of the steepest slope dividing a basin

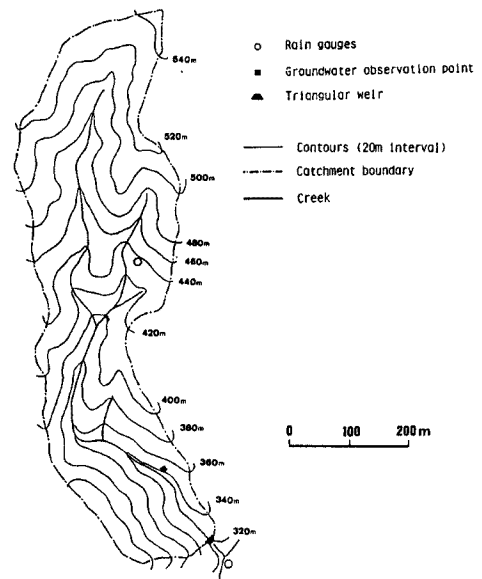


Fig. 15. The Ara river experimental basin.

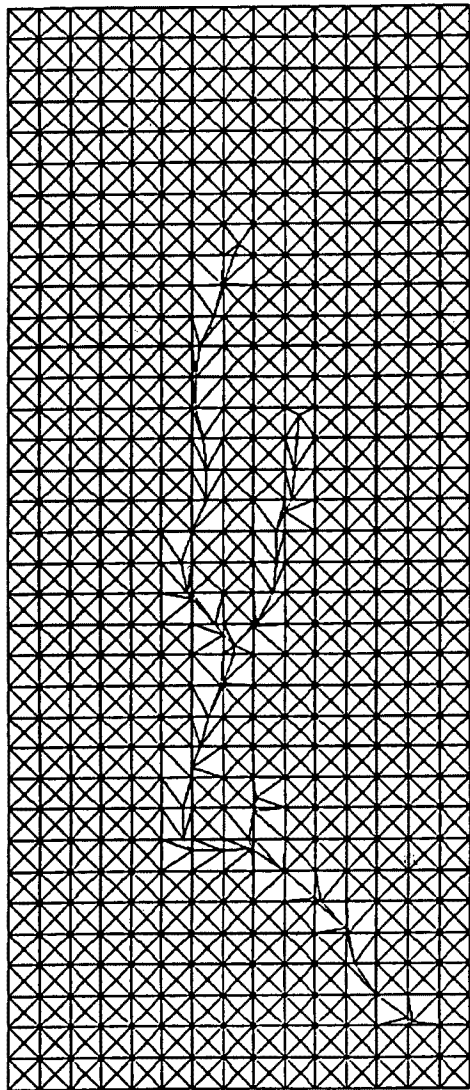


Fig. 16. Plane figure of triangular element network model of the Ara river basin.

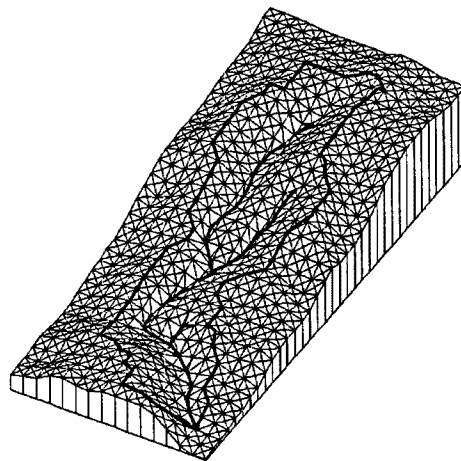


Fig. 17. Three dimensional view of triangular element network model of the Ara river basin.

3. 流域モデル自動生成システムの実流域への適用

3.1 概説

荒川試験地梅ヶ谷流域（流域面積 0.184 km^2 ）¹⁶⁾ と木曽川上流域の伊奈川流域（流域面積 54.0 km^2 ）を対象流域として流域モデル自動生成システムを適用した。梅ヶ谷流域はデジタイザーによって入力データを構成し、システムへの入力とした例であり、伊奈川流域は国土数値情報によって入力データを構成し、システムへの入力とした例である。

3.2 デジタイザーによって入力データを構成した適用例—荒川試験地への適用—

(1) 対象流域の概要

荒川試験地は野洲川の支川荒川西流の最上流部に位置し、その中で梅ヶ谷流域は流域面積 0.184 km^2 の山間地小流域である。その形状を Fig. 15 に示す。国土地理院発行の2万5千分の1地形図をもとに等高線と河道をデジタイザーを用いて読み取りメッシュ標高データと流路位置データを作成した。

(2) 適用

梅ヶ谷流域に本システムを適用した。約15 m間隔でメッシュをかけ流域を三角形要素群で表現した。Fig. 16 は三角形要素で表した梅ヶ谷流域を二次元的に示したものであり、Fig. 17 は立体的に示したものである。流域界を自動的に決定した結果と山登り線による流域の斜面要素への分割の結果を Fig. 18, Fig. 19 に示す。本システムによって得た流域界は実流域をよく表現している。

3.3 国土数値情報によって入力データを構成した適用例—伊奈川流域への適用—

(1) 対象流域の概要

伊奈川は木曽川の上流域に位置し、関西電力の所有する伊奈川ダムが伊奈川中流部に存在する。伊奈川

ダム上流域の流域面積は54.0 km²であり流域内三ヶ所で時間雨量を計測している。流域はヒノキやスギの森林におおわれ、北には宝剣岳(2933 m)、東には南駒ヶ岳(2841 m)があって、伊奈川上流端の標高が約2800 m、伊奈川ダム地点の標高が790 mの急峻な山間地流域である。国土地理院発行の5万分の1地形図より切り取った伊奈川流域周辺をFig. 20に示す。図中の太線は、流路位置ファイルに登録されている伊奈川流域のデータを示している。

(2) 適用

伊奈川流域に本システムを適用した。500 m間隔でメッシュをかけ流域を三角形要素群で表現した。Fig. 21は三角形要素で表した伊奈川流域を二次元的に示したものであり、Fig. 22は立体的に示したものである。流域界を自動的に決定した結果と山登り線による流域の斜面要素への分割の結果をFig. 23, Fig. 24に示す。実測の流域面積は54.0 km²であり、本システムによって得た流域面積は53.29 km²であった。流域界・流域面積ともに実流域をよく表現している。

本章の結果は、筆者らの準三次元斜面要素モデル¹²⁾と組み合わせることにより、4.で流出計算を行う

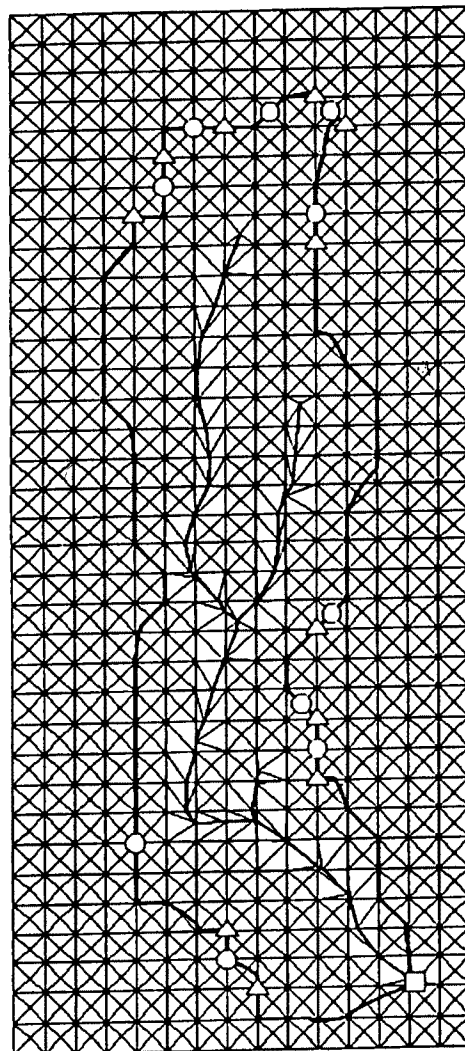


Fig. 18. Divide of the Ara river basin.

- △: Mountain peak
- : Mountain path
- : Basin outlet
- : Basin divide

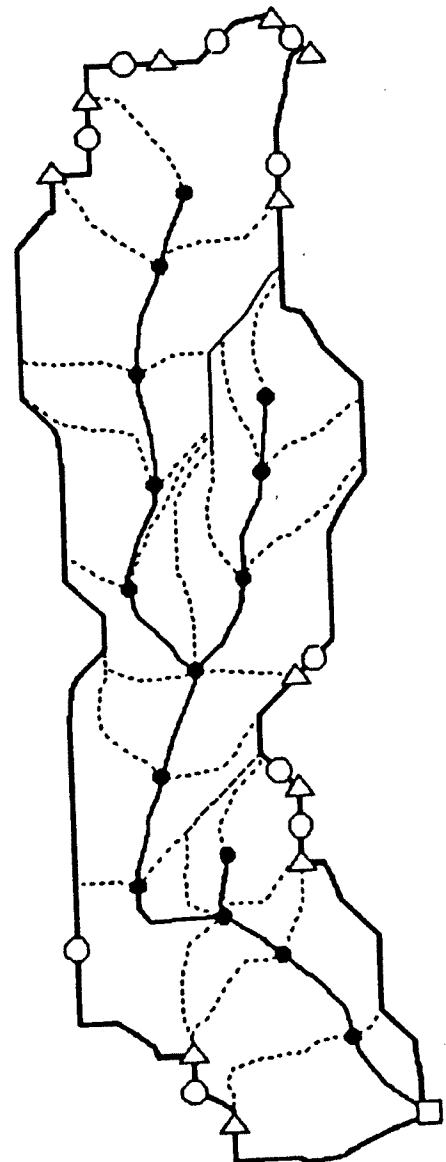


Fig. 19. Division of the Ara river basin into slope elements.

- △: Mountain peak
- : Mountain path
- : Basin outlet
- : Dividing points on a stream
- : Basin divide
- - - : Stream
-: The path of the steepest slope dividing a basin

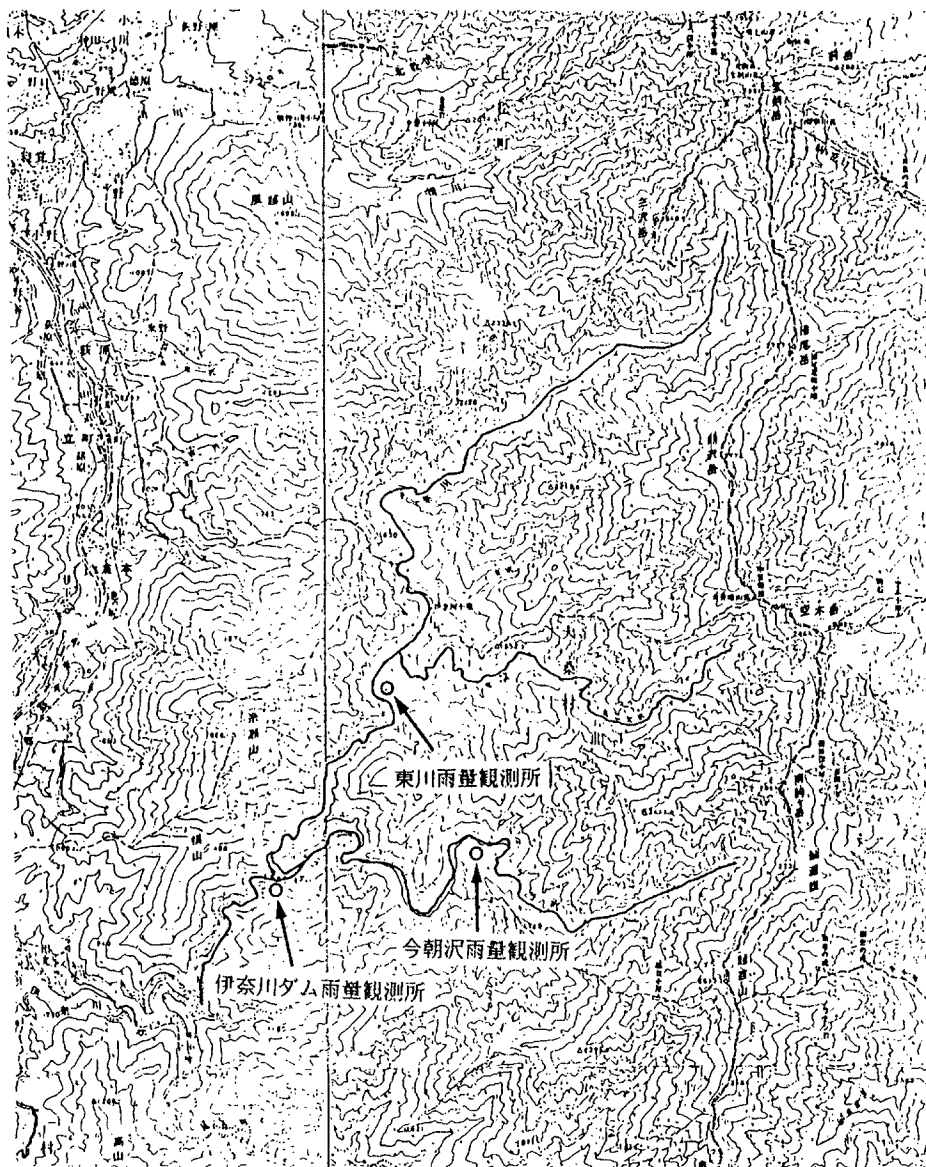


Fig. 20. The Ina river basin.

ときに使われることになる。

4. 実流域での流出計算結果と考察

4.1 概説

3. で得た伊奈川流域の斜面要素一つ一つを準三次元斜面要素モデル¹²⁾の特別な場合である円錐面で近似する。一般的な準三次元斜面要素を取り扱うためには、流域モデル自動生成システムによって分割した斜面要素の内部のデータ（斜面幅・標高の分布）を算出する必要があるが、現時点ではそのためのシステムが未完成である。よって現システムで得られる情報によって構成できる円錐面で斜面要素を近似する。その一つ一つについて流出計算を行い、斜面要素下端からの流出量を合算したものを流域全体からの流出

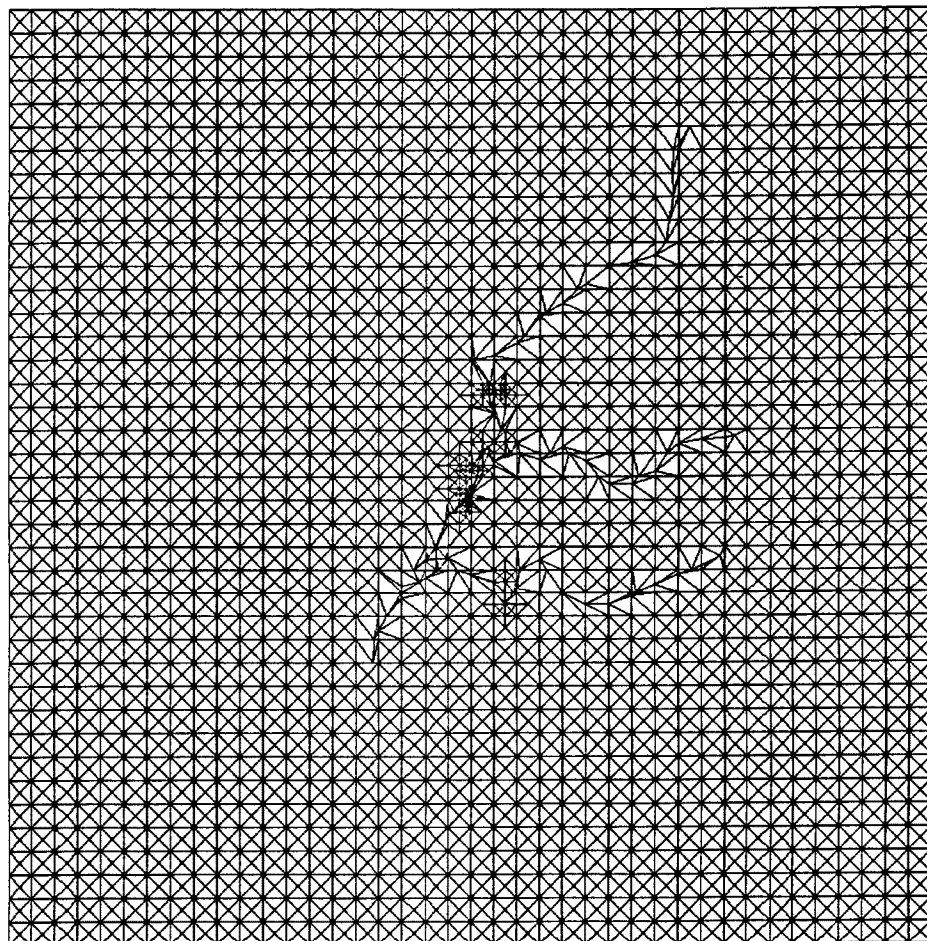


Fig. 21. Plane figure of triangular element network model of the Ina river basin.

量と考え、実測の流量ハイドログラフと比較する。本節では流域全体からの流出ハイドログラフを計算するときに河道効果を考慮していない。高棹は流域特性の代表値を定義して、その値による河道効果の有無を議論しており、通常数百 km^2 以内の流域では河道効果を考慮する必要が無いことを指摘している⁴⁾。したがって本節で対象とした流域(53.3 km^2)では河道効果を考える必要がないと考えて流出計算を行った。

4.2 斜面要素の近似方法

準三次元斜面要素モデルは任意の斜面要素の地形データを組み入れて、実地形に即した斜面形状を表現することができるが、ここでは簡単に一つの斜面要素を一つの円錐面で近似する。河道上にある山登り線の出発点間の距離を l 、隣りあった山登り線が交わるまでの実際の斜面長をそれぞれ l_1 、 l_2 、面積を S とする。近似後の円錐面の半径方向

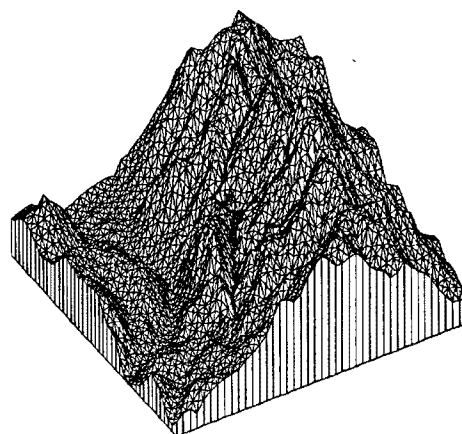


Fig. 22. Three dimensional view of triangular element network model of the Ina river basin.

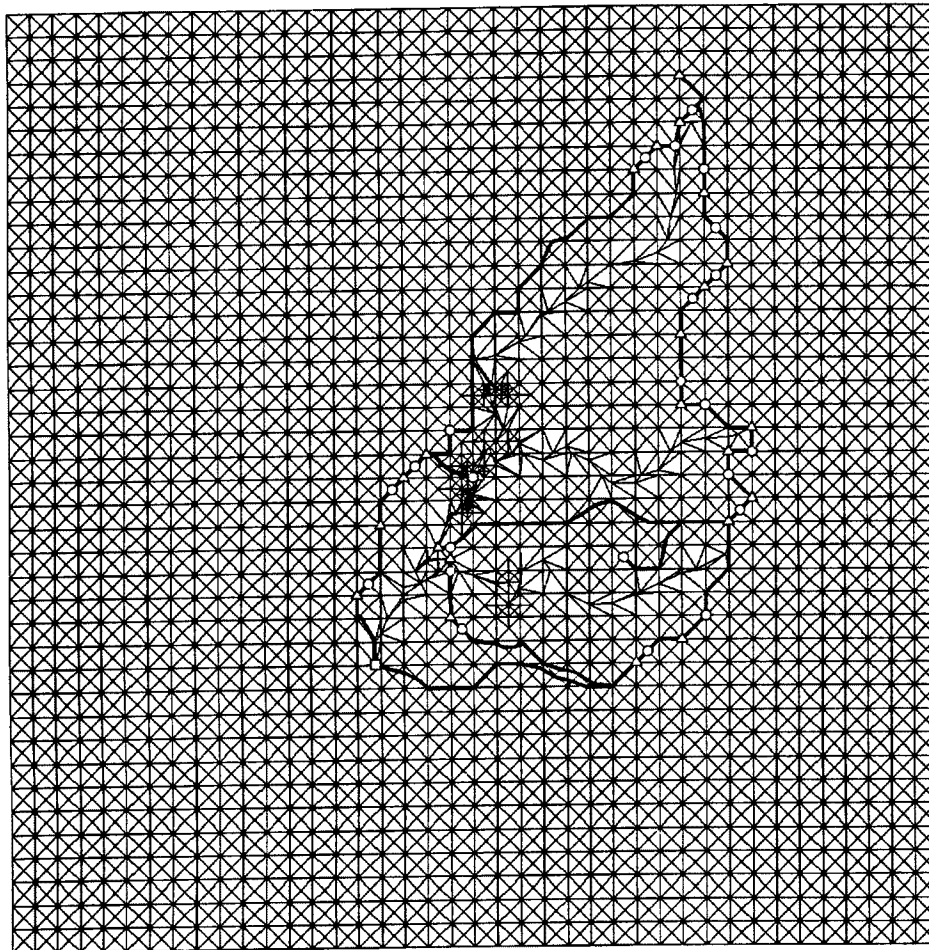


Fig. 23. Divide of the Ina river basin.

- △ : Mountain peak
 ○ : Mountain path
 □ : Basin outlet
 — : Basin divide

の長さ ℓ を $(\ell_1 + \ell_2) / 2$ とし, 斜面要素をそれぞれ $b\ell > S$ のとき発散する円錐面, $b\ell < S$ のとき収束する円錐面, $b\ell = S$ のとき矩形平面で近似する。Fig. 25 に (a) 発散型, (b) 収束型のそれぞれの場合の模式図を示す。

流出計算に必要な諸量は次のようにして求める (θ, x, y については Fig. 25 参照)。

(a) 発散型

$$\theta = 2s/\ell^2 \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$x = \ell\theta = 2s/\ell \quad \dots\dots\dots (11)$$

(b) 収束型

$$\theta = 2(S - b\ell)/\ell^2 \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$y = b/\theta = b\ell^2/2(S - b\ell) \quad \dots\dots\dots (13)$$

斜面下端の標高値は, 隣合う山登り線の出発点の標高値の平均値とする。斜面上端の標高値は, 山登り線が隣合う山登り線と交わる点, または山登り線が流域界と交わる点の標高値の平均値とする。

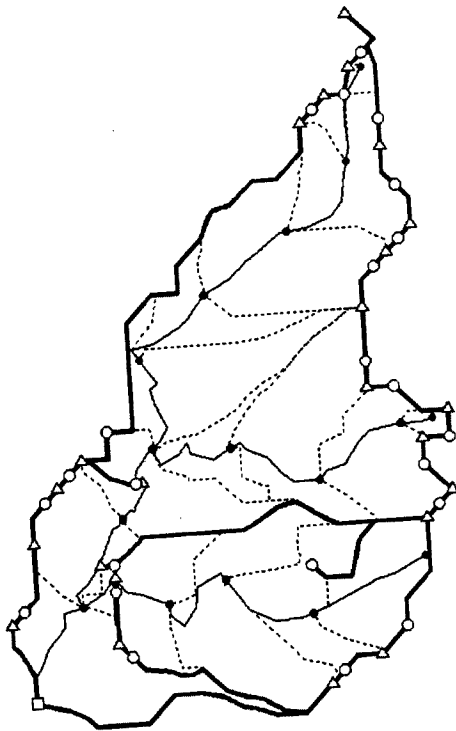


Fig. 24. Division of the Ina river basin into slope elements.

- △: Mountain peak
- : Mountain path
- : Basin outlet
- : Dividing points on a stream
- : Basin divide
- : Stream
-: The path of the steepest slope dividing a basin

Table 1. Parameters used in calculating runoff height of the Ina river basin

Distance between two dividing points on a stream	2000.0
Number of slope elements	32
Apparent depth of the A-layer	35.0
Water deficit which needs to be filled before producing subsurface flow	3.0
Velocity in the A-layer	27.8
Manning's roughness efficient	0.5
Area of the basin	53.29

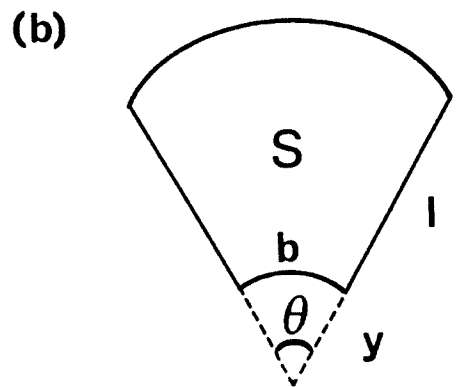
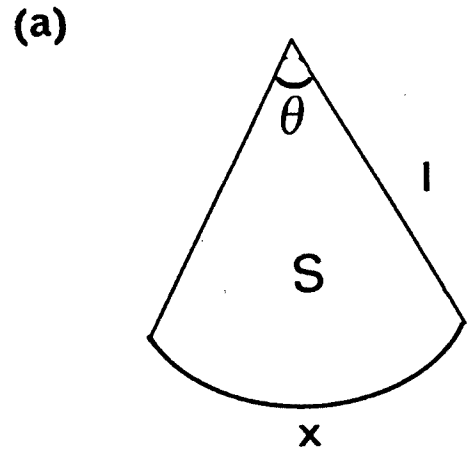


Fig. 25. Approximation of a slope element by a cone.

- (a) Diverging type
- (b) Converging type

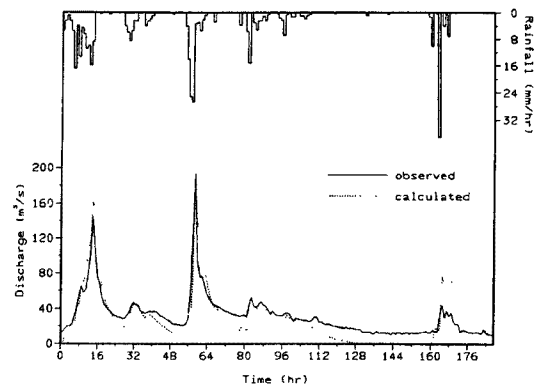


Fig. 26. Simulation of a runoff height in July, 1983.

4.3 流出ハイドログラフの再現

円錐面で近似した斜面要素一つ一つについて流出計算を行い、斜面要素下端からの流出量を合算したものを流域全体からの流出量と考え、実測の流量ハイドログラフと比較した。雨水の流れ式中の定数は高棹・椎葉の研究⁹⁾を参考に定めた。その値を **Table 1** に示す。**Fig. 26** は出水を再現したものである。

雨水の流れ式中の定数は過去の研究を参考に適当に定めていること、流れのモデルは A 層底からの浸透を考慮していないこと、流出計算開始時の流域内の雨水の分布状態は全く考慮していないことという不備があるものの、本研究で提案した流出計算法のハイドログラフの再現性はおおむね良好である。浸透を考慮していないため、流出ハイドログラフは観測ハイドログラフよりも大きな値を示している。また地下水流出を考慮していないため、降雨終了後流出ハイドログラフは急速に減少している。しかし、ハイドログラフの全体的な形状は似たものとなっている。

流域の地形構造を考慮してモデルに組み込んでいるので、雨水の流れ式中の定数の値、流出計算開始時の流域内の雨水の分布状態をいかに把握するかによって流出現象の再現性の良否が決まる。流れ式中の定数は流域の土地利用形態・地質・植生等の場の性質および過去の研究を参考にして定めるとして、初期の流域内の雨水の分布状態を決定することができれば、流量資料のない流域での出水特性、土地利用の変化による流出特性の変動等を把握するうえで本研究で提示した手法は有効であると考えられる。

5. 結 論

雨水流モデルでは、雨水の流動場のモデル化と雨水の流れのモデル化が基本である。本研究では、実地形に即して雨水流を追跡するために、流域地形構造に即した雨水の流動場を電子計算機を用いて自動的にモデル化するシステムを提案し、実地形に即した雨水の流れのモデル化を行った。

2. では、流域地形構造を考慮した流域場モデルの自動生成システムを提示した。2.2 で、デジタイザーによって読み取った地形図上の等高線と河道、または国土数値情報の標高データファイル・流路位置ファイルのデータを入力として、メッシュ標高データと流路位置データへ変換する過程を述べた。2.3 では、メッシュ標高データ・流路位置データをもとに有限要素法における要素構成法を援用して、対象とす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た。2.4 では、山登り線の追跡法と自動的に流域界を決定するアルゴリズムを提示した。2.5 では流域斜面を斜面要素群に分割した。

3. で、このシステムを荒川試験地と伊奈川流域に適用した。荒川試験地では、デジタイザーを使用してメッシュ標高データと流路位置データを作成し、伊奈川流域では国土数値情報を使用してメッシュ標高データと流路位置データを作成して、流域界の自動決定・流域の自動分割を行った。本システムを用いて流域モデルを自動的に生成することが可能であることを確認した。

4. で、伊奈川流域において、流出計算を行い実測の流量ハイドログラフと比較した結果、本研究で提案した実地形に即した雨水の流出計算法の妥当性を確認した。

デジタイザーまたは国土数値情報を利用し、本手法を用いることにより、全国のあらゆる流域で、流域モデルを自動的に作成し流出計算を行うことが可能である。雨水の流れ式中の定数は過去の研究を参考に適当に定めていること、流れのモデルでは浸透を考慮していないこと、流出計算開始時の流域内の雨水の分布状態は全く考慮していないなどの不備があるものの、本研究で提案した流出計算法によるハイドログラフの再現性はおおむね良好である。

本研究で提案した手法では、流域の地形構造を十分考慮してモデルに組み込むことが可能であり、また空間的に分布する降雨をそのまま流出モデルへの入力とすることができる。流域の土地利用形態・地質・植生等の場の性質および過去の研究をもとにして雨水の流れ式中の定数の値を定めることができるため、流出計算開始時の流域内の雨水の分布状態を与えることができれば、流量資料のない流域での出水特性、

土地利用の変化による流出特性の変動等を把握することが可能であり、本研究で提示した手法は有効である。

参考文献

- 1) 石原藤次郎・高棹琢馬：中間流出現象とそれが流出過程に及ぼす影響について，土木学会論文報告集，第79号，pp.15-21，1962.
- 2) 高棹琢馬：出水現象の生起場とその変化過程，京大防災研究所年報，第6号，pp.166-180，1963.
- 3) 金丸昭治・高棹琢馬：水文学，朝倉書店，1975.
- 4) 石原藤次郎・高棹琢馬：洪水流出過程の変換系について，京大防災研究所年報，第7号，pp.265-279，1964.
- 5) Betson. R.P. and J.B. Marius: Source Area of Storm Run off, Water Resources Research, Vol.5, No.3, pp.574-582, 1969.
- 6) Dunne. T. and R.D. Black: Partial Area Contribution to Storm Runoff in a Small New England Watershed, Water Resources Research, Vol.6, No.5, pp.1296-1311, 1970.
- 7) 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，第248号，pp.69-82，1976.
- 8) 高棹琢馬・池淵周一・椎葉充晴：河道網構造を考慮した河川流域の出水解析法に関する研究，京大防災研究所年報，第20号B-2，pp.185-199，1977.
- 9) 高棹琢馬・椎葉充晴：Kinematic Wave 法に基づく流出計算法の総合化について，京大防災研究所年報，第22号B-2，pp.225-236，1979.
- 10) 高棹琢馬・椎葉充晴：Kinematic Wave 法への集水効果の導入，京大防災研究所年報，第24号B-2，pp.159-170，1981.
- 11) 高棹琢馬・椎葉充晴・宝馨：流域地形効果を導入した雨水流モデル，水資源研究センター報告，第2号，pp.23-29，1982.
- 12) 高棹琢馬・椎葉充晴・立川康人：流域微地形に対応した準3次元流出モデル，京大防災研究所年報，第31号B-2，1988.
- 13) Palacios-Velez, O and Cuivas-renaud, B: Automated river-course, ridge and basin delineation from digital elevation data, J. Hydrology, 86, pp.299-314, 1986.
- 14) 井上のぼる：コンピュータ地図，森北出版，1986.
- 15) 国土庁計画調整局・建設省国土地理院：国土数値情報，大蔵省印刷局，1987.
- 16) 京都大学防災研究所水文学部門：荒川試験地水文観測資料，1976.
- 17) 椎葉充晴：流出系のモデル化と予測に関する基礎的研究，京都大学博士論文，1983.
- 18) 中野尊正：地図学，朝倉書店，pp.75-76.
- 19) 森忠次：測量学1基礎編，丸善，pp.9-13，1979.