

# 土木設計システムにおける地形情報処理

丸 安 隆 和\*  
村 井 俊 治\*\*

## 1. 土木設計のシステム化への発展

“用地の確保ができればその工事の半分は完成したと同じだ”などとよくいわれる。どのような土木計画を立てる場合でも、用地を確保することを最優先に考えねばならなくなった。公共事業の重要性和個人の利益の重要性は、土地の取得をめぐる、ますます断絶を大きくする傾向すら見受けられる。土木事業が公共事業であるという名のもとに緑を破壊し、文化遺跡をつぶし、住民感情を無視して容認された時代はすぎた。

緑のベールをはがし、茶色の地肌をむき出し、そこに丈夫で長持ちのする構造物を安くつくり出しさえすればよいという考え方は、もう適用しなくなった。土木工事は自然の環境をこわさないように設計され施工されるだけではなく、快適で美しい環境をつくり出すという積極さがのぞまれるようになった。一度変更された自然を再び取り戻すことはできない。わが国の美しい自然を大事にしようというのである。

土木工事が自然環境の形質を変更せざるを得ないとすれば、われわれ土木技術者は計画・設計にあたって常に変更される前の環境と、変更されたあとの環境の変化を的確にとらえている必要がある。

今日のように土木工事の規模が大型化し、しかも社会機構が複雑化してくるにつれ、その工事を計画し設計するとき、考慮に入れなければならない要素が急激に増大し、しかもそれが影響する範囲も急速に広がってきた。

したがって、局地的に見て最適である計画が全体的に見ると必ずしも最適でないことが多い。そして、ときにはそれが思いもかけない欠陥となることさえ起こるのである。土木における計画・設計がシステムとして組織工学的に考えてゆかなければならなくなった所以である。

それでは、数多くの要素とその影響するところを、ど

のように考慮しながら土木設計をすすめたらよいのであるらうか。

まず最初に要求されることは、建設前の環境に関する情報と設計される構造物に関する設計の情報とを対応づけ、その相互作用を考察することである。環境に関する情報のうち最も基本的なデータは、地形、地質、植生、土地利用など、土地に関連した情報であり、それが土木工事に与える影響力はきわめて大きい。

このような観点から、この論文はまず土地の情報を能率よく土木設計に取り入れることができるような処理システムを提案することにした。

すなわち、①地形、地質、水系、植生、土地利用など設計に必要な土地に関する情報を能率よく抽出できること、②これらの情報を適当に処理することによって設計者の構想を具体化できるようにすること、③設計者の構想に基づく設計が、もとの地形をどのように変更するか数量的および図解的に迅速に表現できること、④設計者がこれらの結果を見て判断し、修正しようとする場合、それがただちにもとの設計過程にフィードバックされることが、確立されていなければならない。

収集すべき土地に関する情報が広域にわたり、多量である場合、デジタルに表現して電子計算機の助けを必要とするし、また設計者の意志決定がスムーズに行なわれるためには情報を視覚化することが必要である。すなわち、すべての情報はデジタル⇄アナログの変換が自由に行なわれることが望ましいのである。計算機を有機的に結合された近代写真測量技術の進歩は以下に説明するように、土地情報の収集および処理の技術として、きわめて重要な役割をもつようになった。

## 2. 地形情報の抽出

### (1) 地形情報の抽出システム

土地に関する情報を大きく分類すると次の2つにな

\* 正会員 工博 東大教授 生産技術研究所

\*\* 正会員 東大講師 生産技術研究所

る。

① 地形の幾何学的形状に関する情報（狭義の地形情報）、地盤高、地形勾配、斜面方向、等高線、最急勾配線（流線）、谷線、尾根線、流域など。

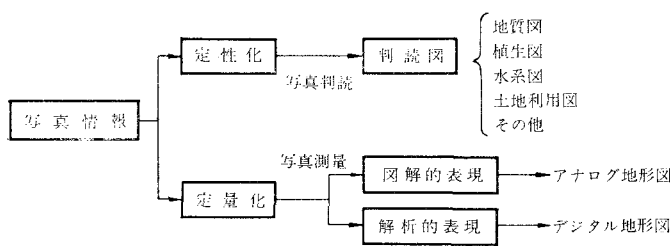
② 地形表面の定性的な情報（判読資料とよぶことがある）、地質、土質、植生、土地利用、地物など。

両者をあわせて広義の地形情報と呼ぶこともある。

地形情報を正確かつ迅速に抽出する最も有効な方法は航空写真を利用することであろう。写真は撮影時の地形、地物を黒から白までの無限の色調差で再現すると同時に地物の三次元空間像を写真フィルム上に正確な平面座標の形で中心投影変換して記録する。すなわち、航空写真は地表面に関する定性的ならびに、定量的な情報の記録なのである。定性的な情報の抽出は、いわゆる写真判読によるのである。航空写真に含まれる情報から地形情報を抽出するシステムは図-1のようになる。

最近の写真測量図化機械は、一対の実体航空写真から任意の点の地盤高を（点名、 $x, y, z$ ）の形でデジタルに磁気テープ、紙テープまたはカードに自動的にアウトプットしてくれる。地質、植生、土地利用などの判読資料は A, B, C……などと記号化しておいて、地形点の座標のアウトプットにひきつづきマニュアルでキーボ

図-1 航空写真を利用した地形情報の抽出



ードから入力するようしなければならない。

土木設計に際して常に航空写真あるいは写真測量図化機械ができるとは限らない。このような場合、等高線地図から地形情報を抽出することになる。現在つくられる等高線地図のほとんどは航空写真からつくられているから、地図を利用する場合にくらべ精度が低いこと、情報量が過少であることはやむを得ない。

等高線地図を利用する場合は、等高線に沿った点の平面座標群を座標読取装置を用いて紙テープにアウトプットすることが最も能率のよい抽出方法となる。

## (2) 地形情報を抽出する際に考慮すべきこと

多量の地形情報を土木設計に有効に利用するためにはデジタルな形で地形情報を抽出し、処理しなければならない。地形情報の抽出から処理までをシステムとして

取り扱う場合には、次に示す項目を考慮したうえで地形情報の抽出方法を考慮すべきである。

① 利用できる情報源：航空写真であるか等高線地図であるかによって、抽出方法とその後の処理方法が異なる。

② 地形情報を抽出する装置：航空写真を利用する場合には写真測量図化機が必要であり、地図の場合、座標読取り装置が必要である。

③ 設計の目的および所要精度：地形情報をどのくらいの密度で抽出したらよいかが決まる。

④ 内挿方法：抽出された点以外の点に対応する地形情報を内挿する方式を決めておかなければならない。抽出点の配置、および抽出された点のデータ構造によって内挿方法が決められ、大きくわけて曲面内挿と点内挿とがある。

⑤ 計算機の能力：コア記憶容量および外部記憶装置の大きさによって、地形情報を処理できる量や範囲の限界が与えられる。

## (3) 地形情報の抽出方法

地形情報を抽出する場合には、第一に能率的に抽出できること、第二に所要の精度を保って、もとの地形に近似できること、第三に計算処理が容易であること、を考慮して抽出点の選択をすべきである。地形情報をできるだけ密に抽出することが望ましいが、その後の処理作業が増加する。

地形情報を抽出する点の選び方には、実用的に次のような方法が考えられる。

### a) 横断線上に点を選ぶ方法

これは地形を横断面の集合で近似しようとする場合に用いられる。この方法では得られた地形情報から横断面の間にある点の地形情報を内挿する手法の開発が面倒になる。この方法は路線設計などに用いられることが多いが、路線が変更されると、そのつど新しい横断線上の点の地形情報を抽出しなければならないのが欠点である。

### b) 規則正しく点を選ぶ方法

三角形または四角格子状に点を配置する方法で、抽出する作業は機械的に行なえる。三角形に点を選ぶ方法はスウェーデンで試みられ、三角形頂点以外の点は三角形平面上の点として近似された。この方法は、地形の起伏が激しいところでは、地形近似の精度のうえで好ましくない。

四角格子状に抽出点を選ぶ方法は、抽出作業が簡単でその後の情報処理が便利である点ですぐれている。急傾斜地でも 10~20 m 間隔に格子点を取り、その格子区域を三次曲面で近似する方法をとると、約 ±30 cm 程度で

任意の点の高さが補間できることが確かめられている。

c) 等高線に沿って点を選ぶ方法

等高線地形図を用いて地形を数値化する場合、等高線に沿った点の平面座標を抽出するのが便利である。この方法は谷筋に沿う地形が必要な場合などに有効である。ただし、任意の点の高さを計算機内で求めるアルゴリズムが多少やっかいである。

d) 不規則に点を選ぶ方法

不規則に選んだ点の  $(x, y, z)$  を用いて任意の点の高さを求めようとする方法である。この方法は、抽出点の密度の管理、点の探索、曲面のあてはめに他の方法より多くの時間がかかるので普通の目的には使いにくい。

### 3. 地形情報の表現

抽出された地形情報は、その目的に応じて処理し、その結果は適当な方法で表現される。一般に人間の判断決定のためにはアナログ表現がよく、機械による計算処理のためにはデジタル表現が望ましい。そしてそれらが

自由に変換できることが望ましい。地形情報の表現の方法には、次のような方法がある。

(1) 自動製図機による地形情報の表現

一般に技術的な設計図は、専門家にはよく理解できても、多くの専門家以外の人達には理解できにくいものが多い。多くの人達との意志の交換を容易にするには、いわゆる visual design が、非常に有効である。visual communication とよばれるものである。この方法の一つとして透視図が用いられてきた。しかし透視図は、理解の助けとなっても、その中で行なわれた変更を設計過程の中にフィードバックするには大変不便であるという欠点がある。等角投影法による立体表現は、この点で透視図の欠点を補い、きわめて有効である。

図-2 はダムサイトの地形を 25 m 間隔の格子に分割し、コンピュータの中に数値地形モデルを作成したのち、ロックフィルダムの姿と地形の対応を四方向から眺めた姿を等角投影の図として自動製図させたものである。

図-2 ダムサイトにおける利用例

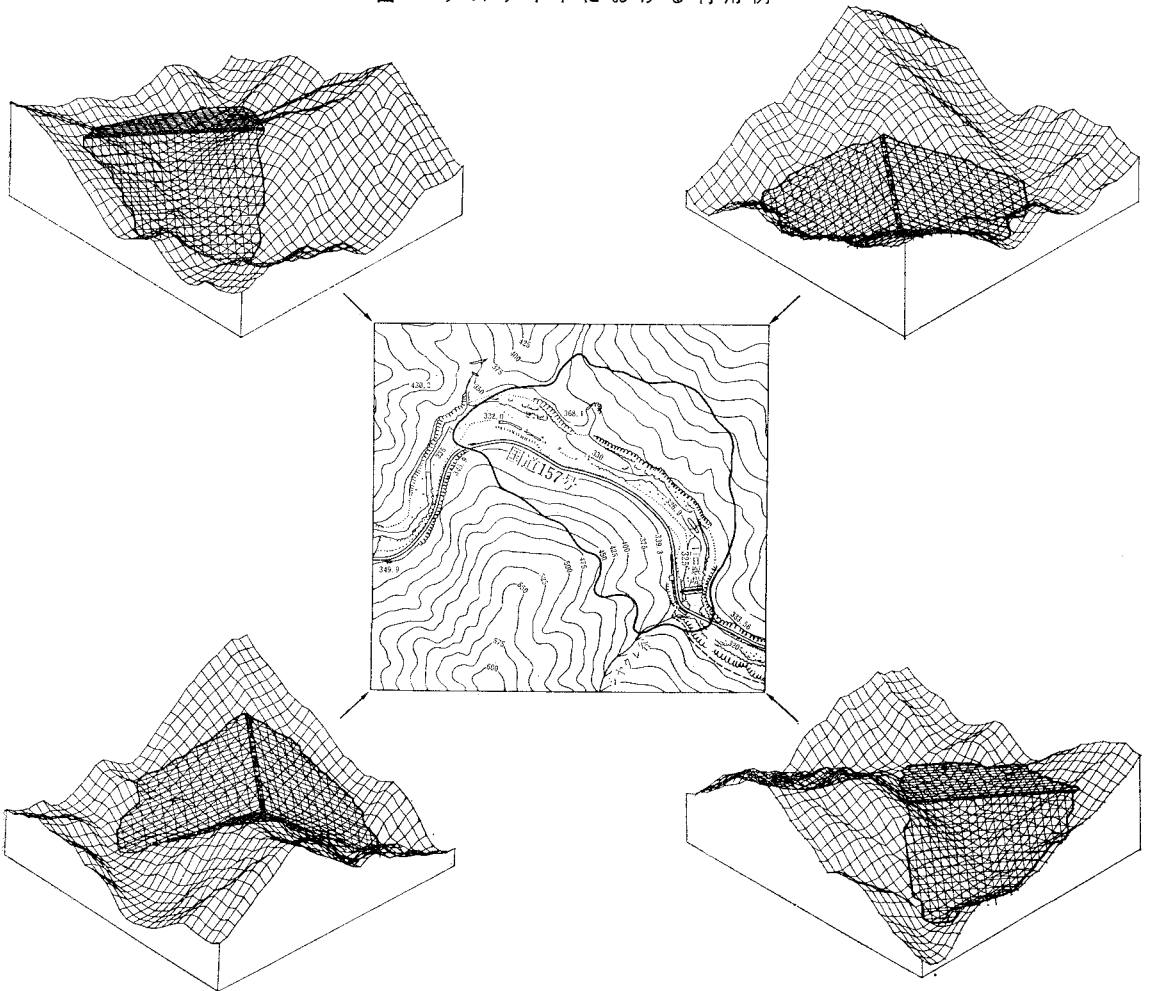
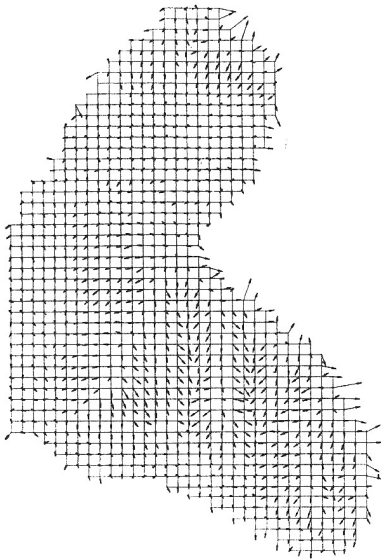


図-3 格子メッシュを重ね焼きした立体航空写真



図-4 ベクトル地形図

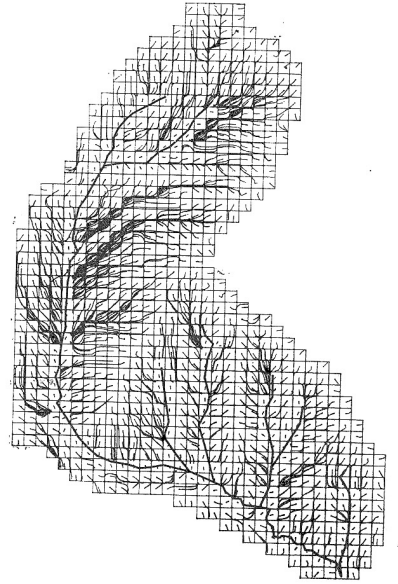


格子メッシュ状に抽出された地形情報を、もとの情報源である航空写真の中に焼きつけると、地形を立体的に眺められるとともに、定量的な尺度を知ることができるので写真判読を行なう場合きわめて有効である。図-3は40m格子のメッシュ格子点の空間座標を、航空写真撮影時の中心投影状態に交換したものを自動製図し、航空写真と重ね焼きしたものである。

土木計画では、地形の最急勾配とその方向が必要な場合がある。最急勾配の大きさとその方向を矢印の長さや向きによってベクトル表示すると、図-4に示すようにベクトル地形図が得られる。これは、水の流れを解析したり地形の斜面状態を見るのに便利である。

地形の最急勾配の方向を連続して逐次追跡してゆくと地形の最急勾配線、すなわち流線が得られる。図-5は計算機の中で求められた流線を自動製図機を用いて自動

図-5 流線図



製図したものである。

## (2) ラインプリンターによる地形情報の表現

計算機の出力装置として付属しているラインプリンターは、数字、英文字、特殊記号(+, -, \*, /, =など)の印刷が可能である。これらの記号を用いて簡単なプロットや濃淡の表現が安価にできる。

ラインプリンターは点の集まりとしての図形表示方法であるから、図形に点の位置と意味の二次元表現を行なわせることができる。ラインプリンターの記号印刷時の記号間隔および行間隔が一定であるので縦横方向の記号間隔の縮尺を統一したいときには、上記の記号および行間隔の比率に応じた縮尺変換をすることが必要である。

一つの記号を用いて一つの点を代表させるのであるから位置の精度がよいわけではないが、非常に迅速にデジタルマップが得られるのが、この方法の特徴といえよう。

格子点としての地盤高が計算機に記憶されていると、これからいろいろな地形情報が計算され、以下に示すようなデジタルマップが印刷される。

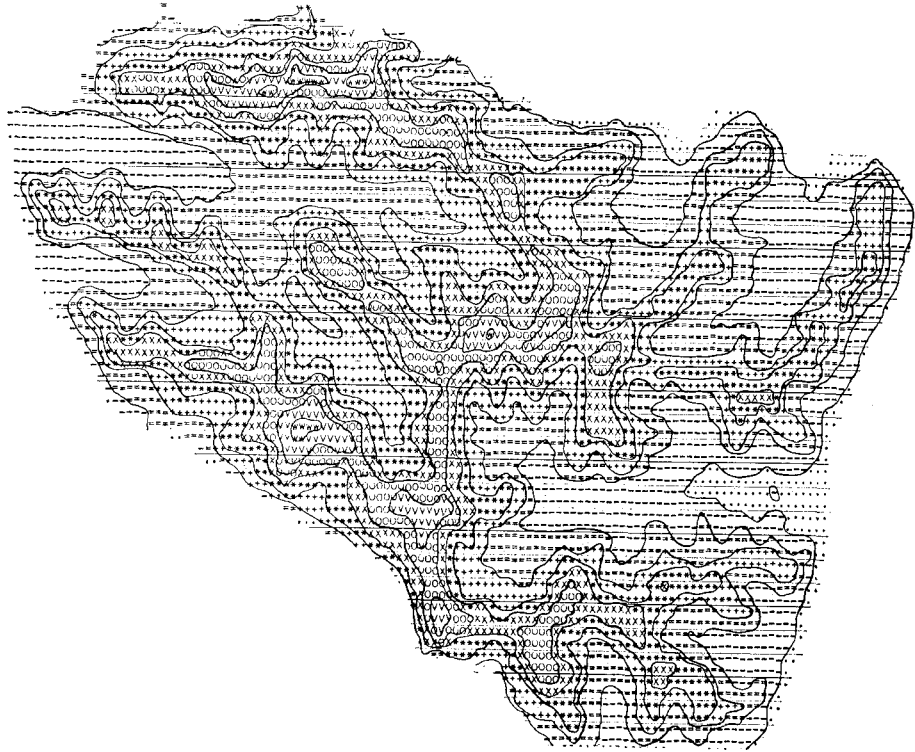
表-1 地盤高の階級分類

地盤高(m)	縮尺統一
0~5	.
5~10	-
10~15	=
15~20	+
20~25	*
25~30	×
30~35	○
35~40	∨
40	W

### a) 地形図

図-6はある住宅団地予定地を10m間隔の格子に区切り、その地盤高を100×127のマトリックス内に収めた数値地形モデルを縦横の縮尺を統一するために縦方向を約0.6倍に縮小した点の地盤高を内挿計算してラインプリンター

図-6 等高地形図



で作成したものである。記号の意味は表-1 に示す階級の地盤高をあらわしている。等高線を求めようとすれば記号の境界を結んでゆけば、同じ記号を同じ色で塗り分けると明瞭になる。

b) 斜面方向図および地形勾配図

地形曲面の最急勾配と、その方向を同時にラインプリンターで表現できないので、2つに分けて表現する。斜面方向図は大きく八方位（北、北東、東、東南、南、南西、西、西北）に分類し、それぞれに対応する記号を印刷すればよい。地形勾配も同様にして4~5階級程度に分類して、それぞれの記号を印刷するようにすれば容易にそのデジタルマップが得られる。

c) 流域面積図

土木計画において考慮しなければならないものに雨水の流れの問題がある。自然災害の直接の誘因として常に重要な役割を果すからである。

降雨とその流れに関する情報をとらえるには、任意の点に、どの範囲の水が集まるかを、いわゆる流域面積を示す図として表現すると便利である。

図-7 は上記地域のおおのの格子点における流域面積を表-2 に示す階級に分けて作成した流域面積図である。格子間隔が10mであるから1という単位の流域面積は100m<sup>2</sup>に相当する。また、図-7 から尾根線と谷

線が明瞭となる。

e) 流域図

どの地点に降った雨がどの河川に注ぎ込むかを知れば河川流出の解析に、きわめて有効である。図-8 は図-5 に示した流線の計算を利用して、小流域ごとの流域図をラインプリンターで作成したものである。

図-8 流域図

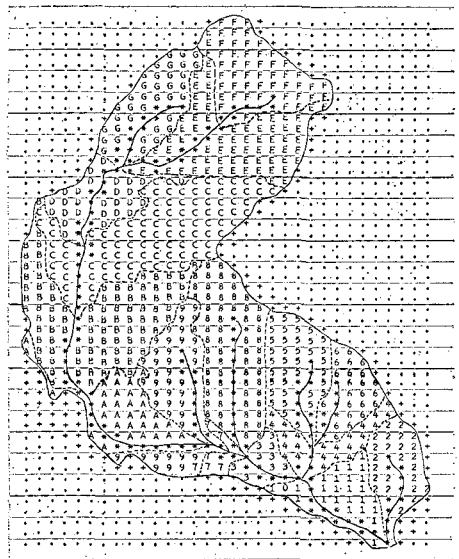
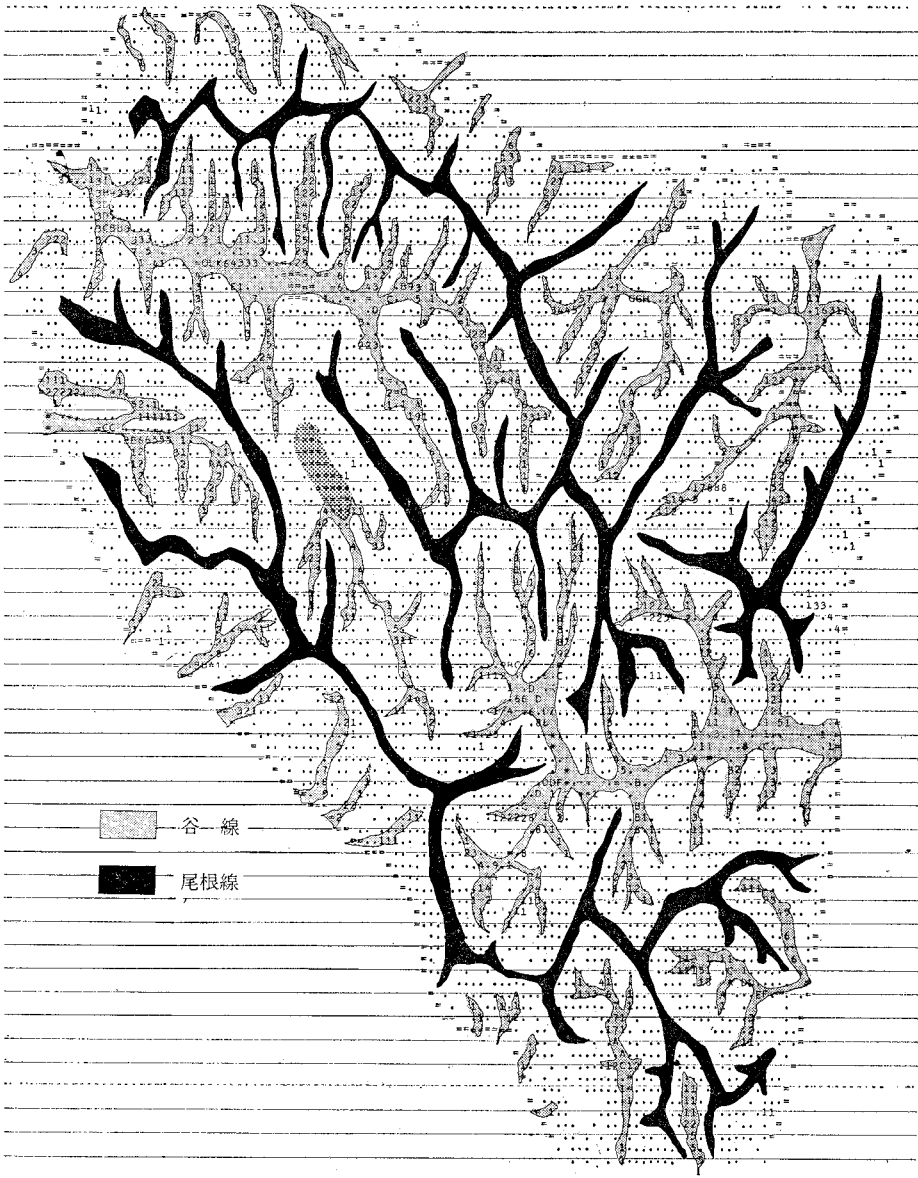


図-7 流域面積図



谷線  
 尾根線

表-2 集水面積の階級分類

集水面積	記号
1	BLANK
2 ~ 9	.
10 ~ 19	1
20 ~ 29	2
:	:
:	:
90 ~ 99	9
100 ~ 109	A
110 ~ 119	B
:	:
:	:
340 ~ 349	Y
350 ~ 359	Z
360 以上	*
停留点	=

#### 4. 土木計画における地形情報処理

##### (1) アースデザインへの応用

住宅団地、飛行場、ゴルフ場、フィルダム、台地など大規模な地形の変更を必要とする土工中心の土木設計（アースデザイン）においては、その構造物の形状や建設位置が目的とする諸機能を満足するものであるとともに、土工量（築堤材料）が少ない、計画区域内で土工がバランスする、あるいは周囲の環境と美しく調和する、などが要求される。

したがって、設計初期案を入力するとともに地形と設計により変更されるべき地形との対応を数量的かつ図解的に迅速に応答してくれるシステムを準備しておく、きわめて有効

である。なぜならアースデザインでは、数量的あるいは技術的な検討のほかに視覚技術的検討がきわめて重要であるからである。

以下に航空写真を利用して地形データを抽出し、計算機および図形処理装置を用いて一貫して地形情報の処理を行ない、アースデザインに応用した例を示そう。

##### a) 誘導路台地の設計

科学観測のための気球打上げ誘導路が、**図-9**に示す地形に計画された。**図-10**に示す土工定規に基づいて25m×190mの帯状の台地が必要であった。切土量と盛土量がバランスするという条件のもとに、土工量が最も少ない位置が計算機のなかで求められた。**図-11**はもとの地形と整地後の台地の比較を自動製図機を用いて図化したものである。

##### b) 宅地粗造成計画

大規模な住宅団地の設計においては、平面計画と同時に断面設計が重要な関心事である。断面構造の決定の良否は直接造成工事費に影響するし、それが大規模であれ

ばあるほど、よい設計をすることがむずかしくなる。最適とはいかなくても、かなりよい設計案をたてることさえわからない場合が多い。

造成に要する費用が安いことのほかに、造成後の安全性が確保される条件を満足する方法として、その地形が自然に変形してゆく過程を考えた。すなわち、自然界では位置エネルギーと摩擦力が平衡状態である限り安定状態であるが、雨が降ったり地震が起きたりして平衡状態が破れると変形運動が起こる。この変形は重力と地形曲面に束縛されるから、地形の最急勾配方向に変形運動が行なわれる。すなわち、変形に要する全エネルギーが最小であるような変形が行なわれる。

うえに述べた地形の変形過程を人工的につくりだしたものとすると、変形後の地形は安定したものになるといえる。このようなことを可能にするために、計算機のなかで現在地形がもっている摩擦力を減少させ地形の平衡状態を破ってやり、平衡状態になるための運動を起こさせる。すなわち、人工地すべりを起こしてやる。

ある時間ごとの地形の変形過程を求めてゆけば

図-10 気球打上げ誘導路の土工定規

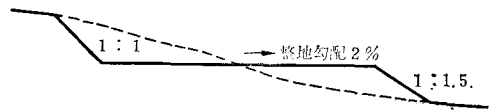
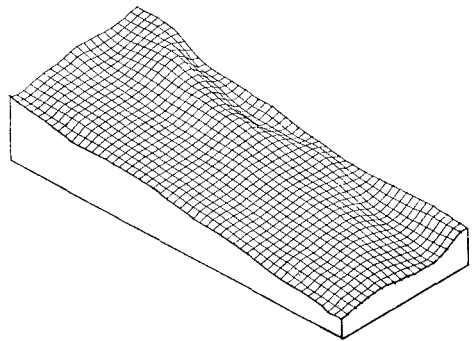
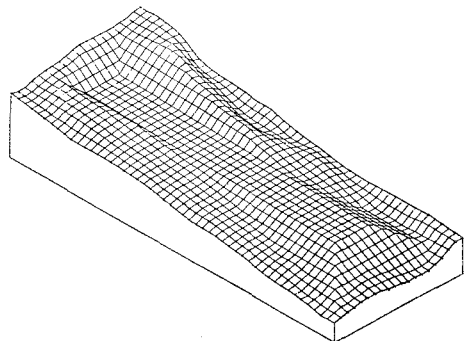


図-11 整地前後の比較

(1) もとの地形



(2) 整地され台地



- 1) 変形すべき土をどの方向に運べばよいかわかる
- 2) 変形に伴う土の総量が一定であるから、切盛土量は常にバランスする。
- 3) 変形に要するエネルギーが最小である。
- 4) 安定した宅地が得られる。

などの特徴をもった宅地粗造成計画の指針が得られる点で、きわめて有効である。

図-12は、まえに示した住宅団地はこの考え方を適用したときのある断面における変形過程を調べたものである。

最初、急峻であったところが時間がたつにつれてゆる

やかな勾配になってゆく過程がわかる。

図-13は、このようにして得られた変形後の地形をもとの地形と比較して切土であるか盛土であるかを示したものである。

#### c) ロックフィルダム建設位置の選定

ロックフィルダムは、地形に接する底面積が大きいいため、建設位置の地形がダムの築堤体積に支配的な影響を及ぼす。ロックフィルダムの建設費に築堤土工費が占める比率が大きいため、水力学的な考慮をはらったうえでできるだけダム築堤体積の少ないダム建設位置を探したい。このために、航空写真から地形データを抽出し、ダ

図-12 A-A断面の地形変形の過程

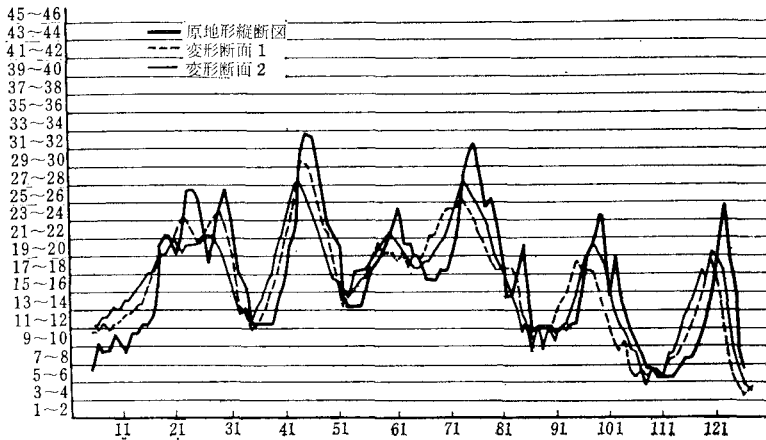
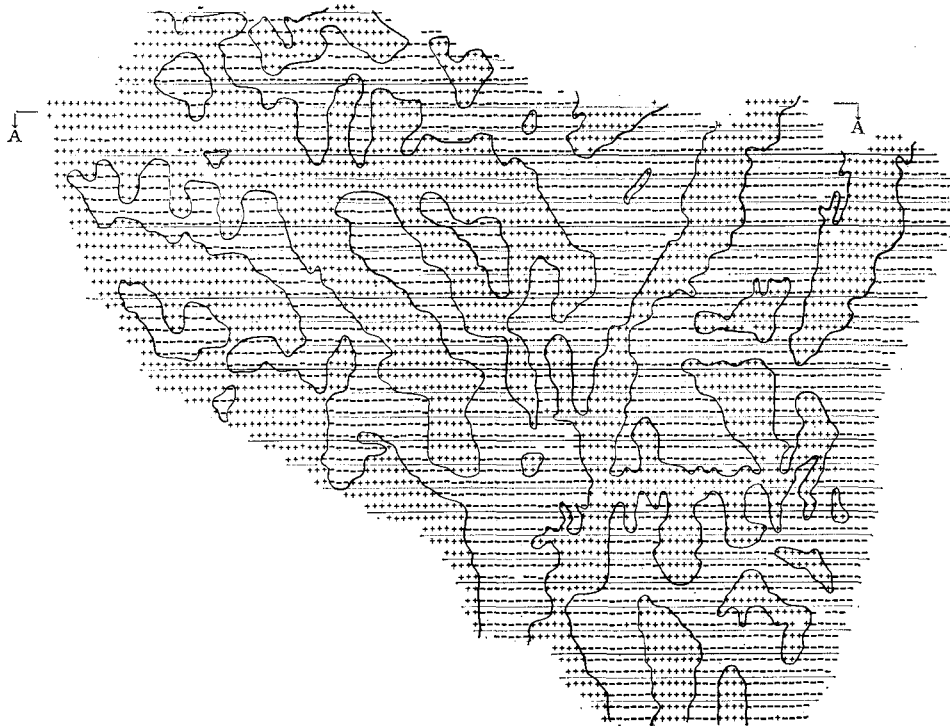


図-13 切土(-)と盛土(+ )の領域を表わした図



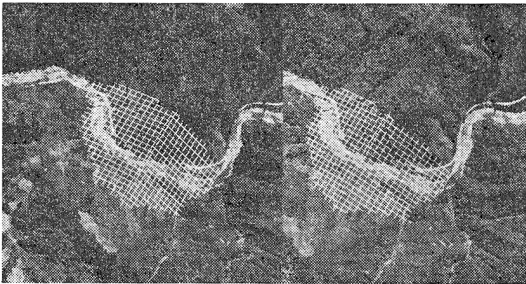


ムサイトの数値地形モデルを作成した。

次にダム標準断面を与え、ダム軸の位置を与えると上記の数値地形モデルを利用してダム築堤体積が自動的に求められるプログラムを作成した。したがって、ダム天端高に相当する兩岸の等高線上の点を結ぶ線分をダム軸として動かしてみれば、ダム築堤体積の最小となるダム建設位置が求められる。

図-14 は上記のプログラムに基づいて得られたダム建設位置にロックフィルダムが、どのような姿で地形の中に現出するかを航空写真の中に重ね焼きしたステレオモニター写真である。

図-14 ダムのステレオモニター写真



## (2) 防災計画への応用

崖くずれやなだれなど、地形あるいは地形に密着しているものの崩壊、および雨水の流出など地形曲面に束縛されるものの運動の機構を解明するには、地形の詳細な情報を考慮に入れなければならない。自然災害をもたらすこれらの運動は、いずれも重力と地形曲面に拘束されているから、地形の最急勾配およびその軌跡(流線)を知りたい。

地形の流線網が得られれば、たとえば降雨があったとき、雨水がどのような経路をたどって河に到達するかがわかる。したがって流域内の1本1本を計算機の中で克明に求めておくと、あるパターンの降雨があったとき、河のどの地点で、どのような流出量となるかを求めることが可能となる。

図-16 はま先に 図-5 に示した流線モデルを利用して 図-15 に示す降雨パターンのときに、ま先に 図-8

に示した河川流域の終端地点の時間-流量グラフをライプリンターで打ち出したものである。

図-15 降雨データと流量記録

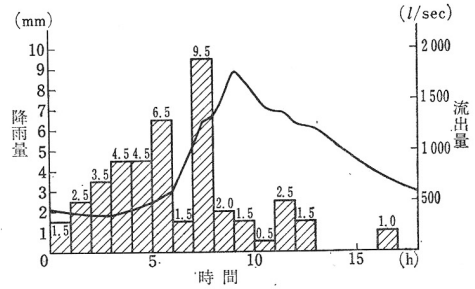
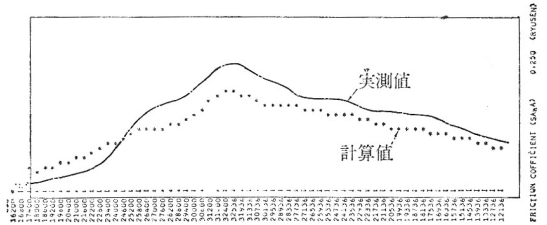


図-16 計算値と実測値



## 5. 結 論

電子計算機および自動図形処理装置と有機的に結合された近代写真測量学の発展は、土木事業の調査、計画、設計までを一貫したシステムとして取り扱うことを可能にしている。現代社会の要求を満たすには、多くの要素を考慮しなければならないことは先にのべた。本文は、その要素の中で特に重要な地形情報の処理とその表現の方法について提案した。これが新しい土木設計システムのなかで活用されるようになれば幸いである。

### 参 考 論 文

- 1) 中村英夫・村井俊治: Digital Terrain Model-地形の数値的表現—生産研究, Vol. 20, No. 8, 1968
- 2) 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, No. 34
- 3) Jiri Sima: Analysis of some existing DTM systems, Conference of ISP Working Group IV, Oct. 1969
- 4) 丸安隆和・村井俊治: 土木計画, 設計における写真情報とその自動処理, カラム, No. 36

(1970.7.13・受付)

日本道路公団編・土木学会発行

# 東名高速道路建設誌

新刊発売中・カタログ申込次第送呈・限定出版

B 5・1024・只絵写真(カラー含む) 48ページ・折込付図2枚 11500 円/会員特価 9500 円(〒300)