

## シミュレーションモデルを用いたアースデザイン に関する研究(第一報)

A Study on the Earth Design by using Simulation Model

丸安 隆和\*・村井 俊治\*・平井 憲・\*高橋 永次\*

Takakazu MARUYASU, Shunji MURAI, Akira HIRAI and Eiji TAKAHASHI

### 1. 大規模土工計画の問題点

多摩ニュータウン計画や成田空港計画などのように広大な面積にわたる地形を大規模に変更する土工計画が増加している。これらの計画または工事のなかには、もとの自然地形が想像できない程にまで地形が大改変されるものもある。

自然地形の改変はきわめて数多くの自然環境の変化をもたらす。変更される環境の要素の主なものをあげると次のものがある。

- (1) 地形標高、地形勾配、斜面方向などの形状
- (2) 排水系統など水の流れに関する系
- (3) 地表面近くの地質など材料の質
- (4) 植物生態系などの生物環境

人間活動の機能を満足するためにこのような自然環境の改変が行われるのであるが、改変された環境がわれわれの生活に少なからぬ悪影響を与えることがある。それらの主なものには

- (1) 改変された地形が不安定なために生じる崩壊
- (2) 排水系の処理の不適切からくる土砂流出や氾濫
- (3) 地盤の変更に伴なう不等沈下や地下水の枯渇
- (4) 有機質の表土がなくなったため生じる植樹の立

枯や植物生態系の変化による周辺森林の衰退  
などがある。

自然環境の変更にあたっては、このような建設開発による公害を出さないように留意すべきことは、計画者の当然の義務である。また環境の破壊のおそれがある場合には、自然環境の復元の計画を立てるべきである。この場合建設後の環境は少なくとも建設前の環境より悪くなってしまうはならない。このためには、地表近くの形質の変更による影響を幅広い見地から評価すべきであって、単に建設工費や建設工事上の便宜さからのみ計画を決定してはならない。なぜならば、一度変更された地形はほとんど半永久的に再変更されることはないからである。ましてもとの自然にもどされることとは不可能に近い。

特に土木技術者が考慮すべきことは、変更された地形

の安全性であろう。現在の土木技術はかなりの急斜面でも土留擁壁で支えることを可能にしている。住宅地に見うけられるこのような高い土留は、地形学的にいって不自然であり不安定でもある。豪雨時にかけ崩れが生じるのはこのような箇所に起きる危険率が高い。このような“不自然”な住宅環境が生まれる原因のなかに、地形という立体的な構造を十分詳細に考慮しないで立案された平面計画が指摘される。都市計画者が丘陵地に計画するニュータウンの構想のなかで描かれる住宅、道路、その他施設は、必らずしも現状の地形とこれから改変されるべき姿との詳細な対応の結果生まれてきたとはいえない場合がある。

面的に広大なひろがりをもち、しかも起伏に富む地形での自然環境変更の問題では、どのような計画にも先だって、まずこの地形はどのような姿に変更しうるかあるいは変更したらよいかという問題から解決しはじめなければならない。なぜなら地形変更の初期解さえ得られないままに平面的な次元で計画が立案され、あとで地形との対話がなされていないことに気づく場合があまりも多いからである。宅地開発などのように面状にひろがりをもつ地形の変更問題は、道路のルート選定など大体の初期解が得られる問題と比較して格段にその難易度が異なることに注目すべきである。

本研究は、大規模な土工を必要とする計画において、その地形はどのような姿に変更しうるかをコンピュータを用いてつくり出し、各種の見地からの評価によりどのような変更を行なうべきかの初期解を見出すことを目的としている。

土木技術者が真剣に取りくまねばならない問題の一つに緑の保存がある。開発か保存かの議論で開発側に立たざるを得ない土木技術者は、たとえどのような目的が設定されたにしろ自然の破壊者であってよいはずはない。土木技術者なりに緑の復元に技術的に援助することができるはずである。まず可能な限り、原地形を残す努力をすべきである。原地形を変更せざるを得ない場合には緑の復元力の関数となる有機質分の表土を大切にする注意を払うべきである。植物学者によれば、有機質の表土が

\* 東京大学生産技術研究所 第5部

## 研究速報

1cm堆積するのに約千年かかるという。ブルドーザで無配慮にばらまかれた無機質土からなる住宅団地には、草花は育っても、いこいの象徴になる程の樹木が育つ可能性は1,2世紀ないといってよい。

本研究は、緑の復元力のある開発地をつくるために、表土を有効に再分配するような地形変更問題を解くことによりまで発展させることを目標としている。

## 2. シミュレーションによるアースデザイン

アースデザインをすすめるにあたっては、まずその地形をどのように変更したらよいかという基本的な問題から出発すべきことをのべた。このとき重要なことは、改変すべき状態に対して評価をどのように行なうかという問題であろう。改変すべき状態に対する評価基準として次のものがあげられる。

(1) 建設工費: 全体の土工量がわかれば大体の建設工費が推定できる。

(2) 快適度または安全度: 造成勾配のパターンでほぼ表わせる。

(3) 日照、日射量(健康度): 造成斜面の方位で代表させることができる。

(4) 排水処理系: 造成後の最急勾配の方向とそのパターンおよび流域面積で評価できる。

(5) 景観: 人間が目で見て評価した方が適確であるのでいろいろな方向からの地形の投影図をつくる。

(6) 緑の保存: 緑の保存を表土の保存と見なし、改変すべき地形がもとの地形とプラスマイナス50cm以内しか高低差がないところがどのくらいあるかを見る。

上にあげた評価基準のなかには定量化の可能なものとそうでないものがある。したがって総合された評価を最大にするような地形変更問題を数学的な最大値問題におきおして解くことができない。

そこでアースデザインの解を得る過程を次に示すような段階に分ける(図1参照)。

(1) 数量的に表現できる制約条件を設定する。たとえば、造成勾配が平均6パーセント以内にするとか、全体の土工の切土量と盛土量をバランスさせるなどという条件をもうける。

(2) 数量化できる評価を最適にするような解を求める。たとえば、上記の制約条件をまもり、全体の土工量が最小になるような地形変更の解をもとめる。

(3) 上記の解に対応する数量的評価を行なう。

(4) 非数量的評価を行なう。

(5) 総合的評価を行なう。

図1に示した過程からもわかるように非数量的評価は数量的評価を最大にするような解に対して行なわれるか

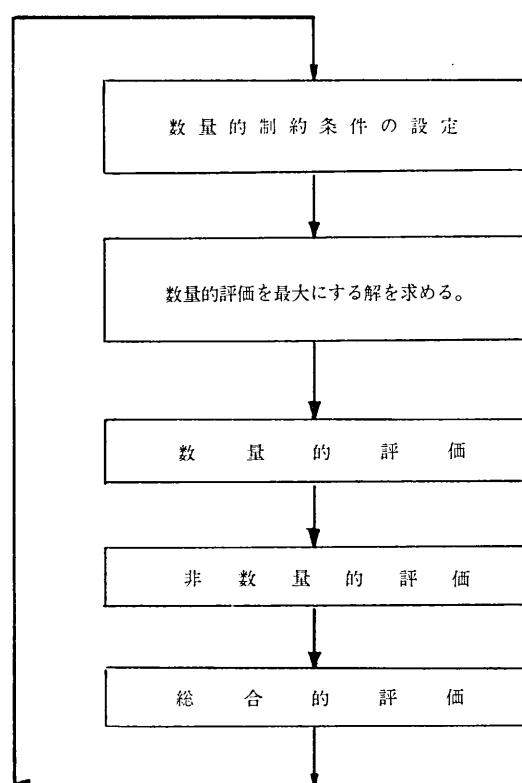


図1 シミュレーションによるアースデザインの過程

らこの解が総合的評価を最大にする保証はない。したがって、数量的な制約条件を変更して、それに対応する非数量的評価をするというようなシミュレーションをくりかえして行なう必要がある。

特にアースデザインの構想段階では、数多くの解をもち、どのような事情の変化にも対応しうるような態勢を整えておくことがきわめて重要なのである。詳細な調査が完了しない前に、ただ一つだけの解しかもっていないようなアースデザインは柔軟性に欠けるといえる。このような意味で、制約条件を種々変更するシミュレーションはきわめて有効なアースデザインの技法といえる。

## 3. アースデザインにおける地形情報処理

非数量的な評価は技術者あるいはその他の関与者の判断にまかせられる。したがってその判断が正確に行われるためには、判断資料をわかりやすい図式表現にしておかなければならない。

改変すべき地形を評価するために図式表現しておくべきものには次のものがある。

(1) 地形標高図: もとの地形がどのくらいの標高で計画すべき整地高がどのくらいになるかがわかるよう等高図を作成する。

(2) 地形景観図: 横から見た地形の景観がわかるよ

うに等角投影図などを作成する。

(3) 地形勾配図：最急勾配の大きさがわかるような勾配図をつくる。

(4) 斜面方向図：斜面の向きが大きく分けてどの方位を向いているかの図をつくる。

(5) 流域面積図：任意の点がどのくらいの流域面積をもっているかの図をつくる。これは排水系統を検討するのに役立つ。

(6) 土工区分図：改変する計画高がもとの地形に対して切取りになるか盛土になるか、またもとの地盤とプラスマイナス 50cm 以内ですむところはどこかということがわかるような土工区分図をつくる。

以上に示したような地形に関する情報は、写真測量をもとにして得られた原地形を計算機に入力して処理してやることによって自動的に得られるようにすることが可能である。

#### 4. 造成勾配の制約条件を設定した場合のシミュレーションモデルの作成

いまアースデザインに課せられる数量的制約条件が次のように与えられたとしよう。

(1) 全体の土工量のなかで、切土量と盛土量がバランスしている。

(2) 造成勾配がある勾配以下である。

このような制約のもとに土工量を最小にしたい。この問題を厳密に解くためには、線形計画法を用いれば可能であるが、実際には、タブローが莫大な大きさになるため実用的でない。このため上記の問題を近似的に次のようにおきなおすことにする。

「計画区域をメッシュに分割し、(i, j) 点の地盤高を  $h_{ij}$ 、造成すべき整地計画高を  $z_{ij}$  とするとき、

(1) 土工バランス条件:  $\sum z_{ij} - \sum h_{ij} = 0$  (1)

(2) 造成勾配条件:  $\sum (z_{ij} - z_{ki})^2 = mt^2$  (2)

の制約条件のもとに、土工量を表わす目的関数

$$f = \sum (z_{ij} - h_{ij})^2 \quad (3)$$

を最小にするような整地計画高  $z_{ij}$  を求める問題」

ここで、 $z_{ij}$  と  $z_{ki}$  は隣り合う 2 点の地盤高であり、 $m$  は隣り合う 2 点の組み合わせの個数、 $t$  は造成勾配である。したがって、造成勾配の条件は確率的に造成勾配の分散が  $t^2$  になることを表わしている。この問題は、制約条件つきの最小自乗法の問題と考えることができます。

簡単な例として、 $m \times n$  の点をもつ長方形の区域を造成するものとする。 $x$  方向の造成勾配の制約に  $t = t_x$  をとり、 $y$  方向の造成勾配の制約に  $t = t_y$  をとるものとすると、上記の問題は次のような式で表わされる。

$$\text{制約条件: } \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n z_{ij} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n h_{ij} \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m (z_{ij} - z_{i-1,j})^2 = n(m-1)t_x^2 = k_x t_x^2 \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (z_{ij} - z_{i,j-1})^2 = m(n-1)t_y^2 = k_y t_y^2 \quad (6)$$

$$\text{目的関数: } f = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (z_{ij} - h_{ij})^2 \rightarrow \text{最小} \quad (7)$$

上記の問題を制約つきの最小自乗法と見なし、 $\lambda_x$ ,  $\lambda_y$  なる未定係数を導入して次のような問題におきなおす。

$$\begin{aligned} F = & \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (z_{ij} - h_{ij})^2 + 2\lambda_x \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (z_{ij} - h_{ij}) \\ & + \lambda_x \left\{ \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m (z_{ij} - z_{i-1,j})^2 - k_x t_x^2 \right\} \\ & + \lambda_y \left\{ \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (z_{ij} - z_{i,j-1})^2 - k_y t_y^2 \right\} \end{aligned} \quad (8)$$

を最小にするような  $z_{ij}$  を求める。

したがって、 $z_{ij}$  は次に示す正規方程式の解として得られる。

$$\frac{\partial F}{\partial z_{ij}} = 0 \quad i=1, m; j=1, n \quad (9)$$

$$\frac{\partial F}{\partial \lambda_x} = \frac{\partial F}{\partial \lambda_y} = 0 \quad (10)$$

(10)式は(4), (5), (6)式そのものである。

(9)式によれば、 $(i, j)$  点においては次の式がなりたつ。

$$\begin{aligned} (z_{ij} - h_{ij}) + \lambda_1 \{ (z_{ij} - z_{i-1,j}) - (z_{i+1,j} - z_{ij}) \} \\ + \lambda_2 \{ (z_{ij} - z_{i,j-1}) - (z_{i,j+1} - z_{ij}) \} = 0 \end{aligned} \quad (11)$$

すべての点について、(11)式を用いて正規方程式をたて迥々加えると

$$\lambda_h = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (z_{ij} - h_{ij}) / mn = 0$$

となる。したがって上記の問題を解いて得られる解では常に土工量がバランスしていることになる。よって(4)式の制約条件式は考慮しなくてよい。

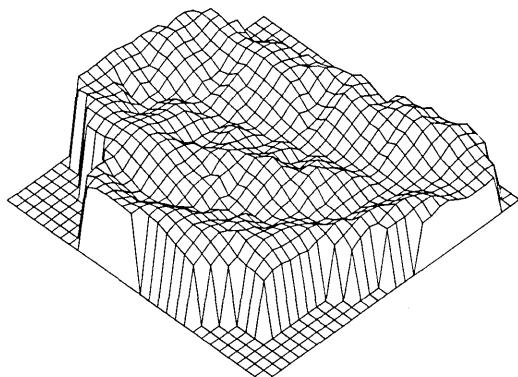
結局、(5), (6)式および

$$\begin{aligned} (z_{ij} - h_{ij}) + \lambda_x \{ (z_{ij} - z_{i-1,j}) - (z_{i+1,j} - z_{ij}) \} \\ + \lambda_y \{ (z_{ij} - z_{i,j-1}) - (z_{i,j+1} - z_{ij}) \} = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

からなる  $(mn+2)$  の非線形連立方程式から、 $\lambda_x$ ,  $\lambda_y$  および  $z_{ij}$  を求めればよい。(12)式では  $\lambda_x$ ,  $\lambda_y$  の値が与えられれば、 $z_{ij}$  に関して連立一次方程式になるから、 $z_{ij}$  は  $\lambda_x$ ,  $\lambda_y$  の関数として求まる。そのとき(5), (6)式から求まるよう

$$E_x(\lambda_x, \lambda_y) = \sum \sum (z_{ik} - z_{i-1,j})^2 - k_x t_x^2 = 0 \quad (13)$$

## 研究速報



(a) 等角投影図(ただし $z$ 方向(高さ)の縮尺を2倍にした)  
図2 整地前の地形

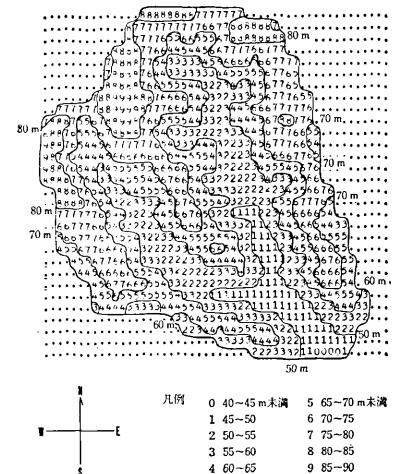
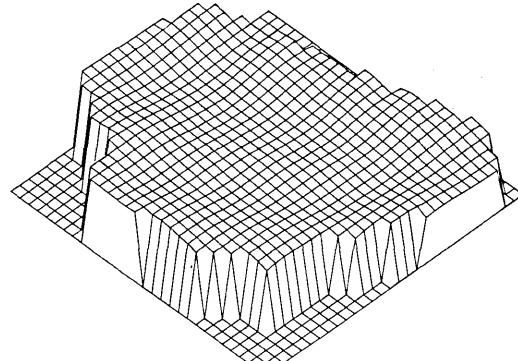


図2(b) 地形標高図



(a) 等角投影図(ただし $z$ 方向(高さ)の縮尺を2倍にした)  
図3 整地後の地形  $t_x=t_y=0.08(8\%)$

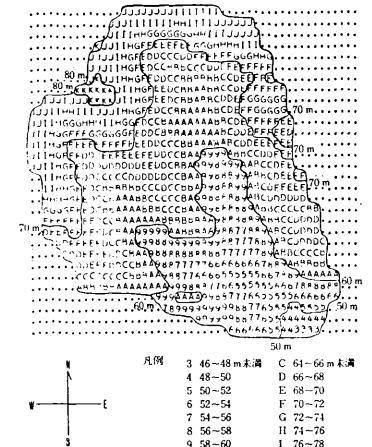
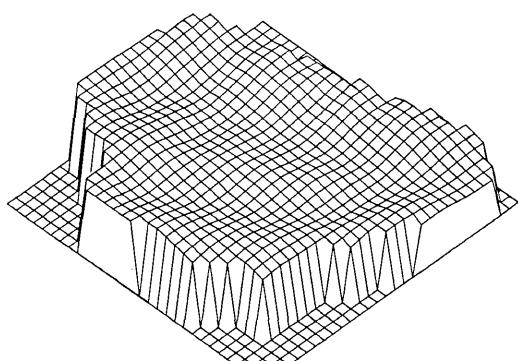


図3(b) 地形標高図



(a) 等角投影図(ただし $z$ 方向(高さ)の縮尺を2倍にした)  
図4 整地後の地形  $t_x=t_y=0.04(4\%)$

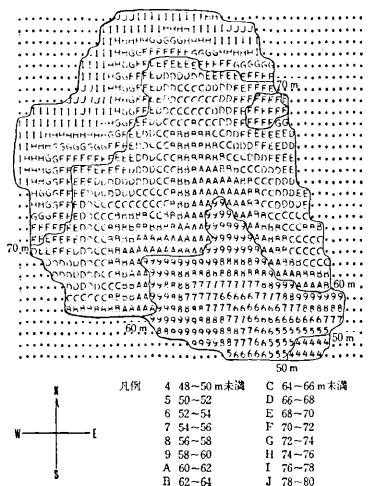


図4(b) 地形標高図

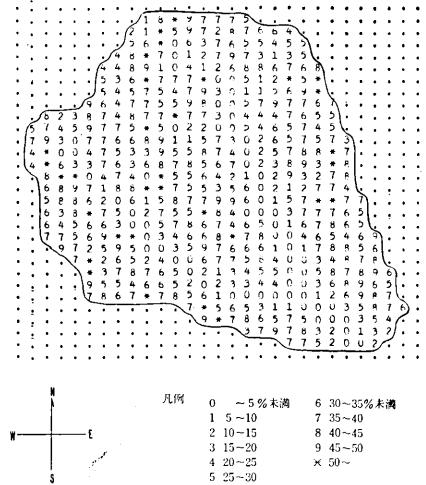


図2(c) 斜面勾配図

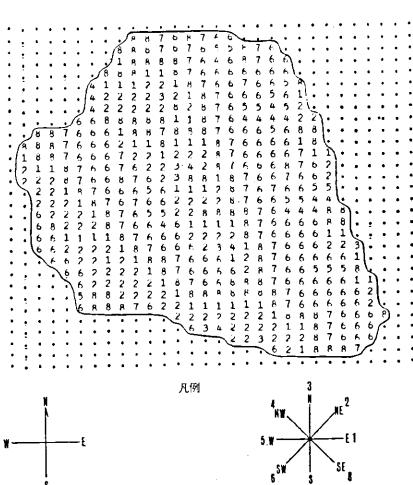


図2(d) 斜面方向図

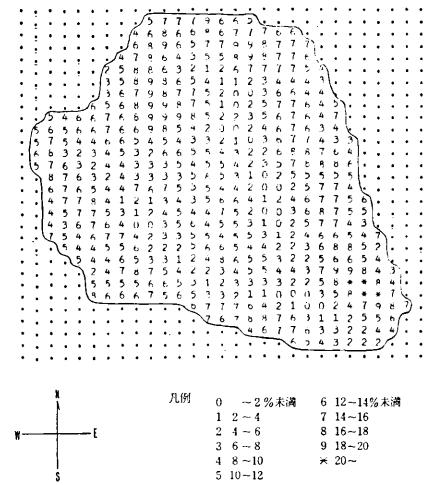


図3(c) 斜面勾配図

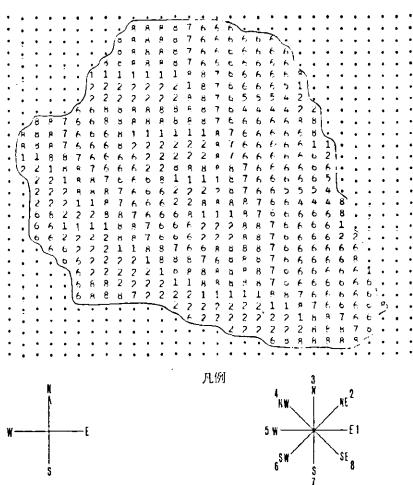


図3(d) 斜面方向図

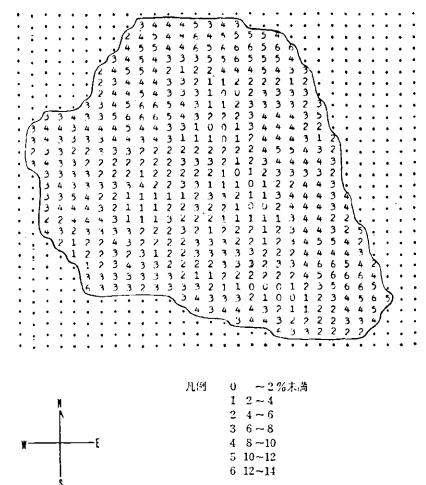


図4(c) 斜面勾配図

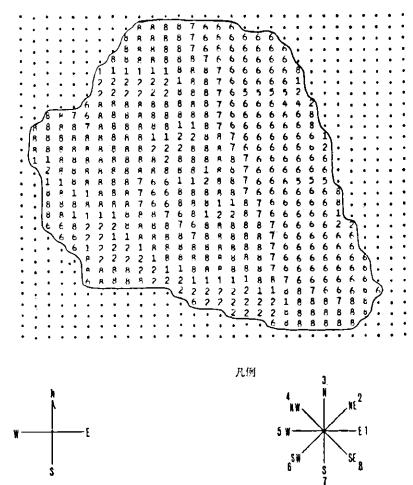


図4(d) 斜面方向図

表1 地形変更に伴う数量的評価

	もとの地形	$t_x=t_y=0.08$ (8%のとき)	$t_x=t_y=0.04$ (4%のとき)
平均 勾配	28.15(%)	10.64(%)	6.85(%)
東 向 斜 面	12 (%)	9 (%)	9 (%)
北 東 "	19	19	12
北 "	1	0	0
北 西 "	4	2	0
西 "	4	2	1
西 南 "	29	33	29
南 "	11	8	7
南 東 "	20	27	42
切土量あるいは盛土量		$1,210.7 \times 20^2 (\text{m}^3)$	$1,571.0 \times 20^2 (\text{m}^3)$
地盤高と計画高との差の二乗和		13,313.2(m <sup>2</sup> )	22,108.3(m <sup>2</sup> )

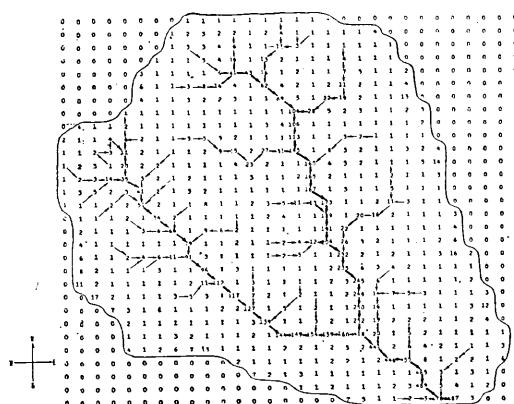


図2(e) 流域面積図

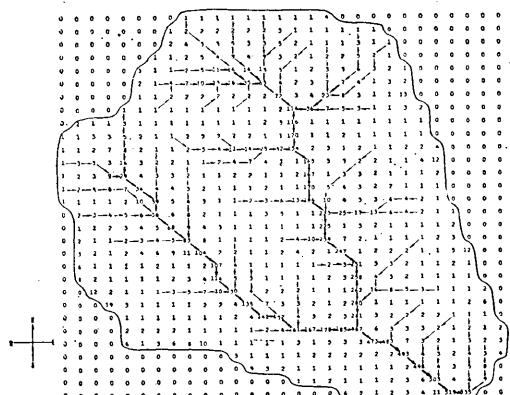


図3(e) 流域面積図

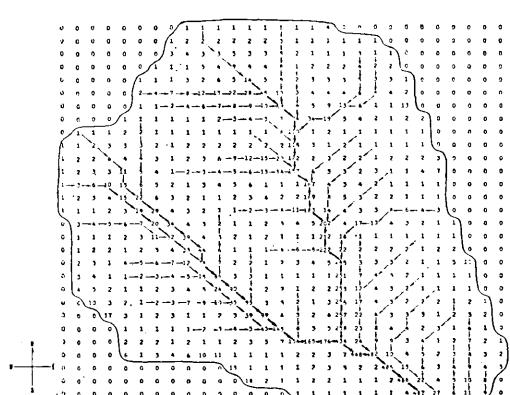


図4(e) 流域面積図

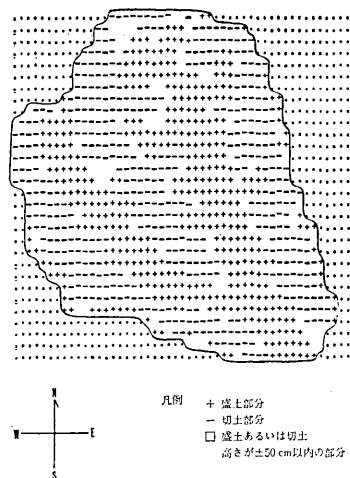


図3(f) 土工区分図

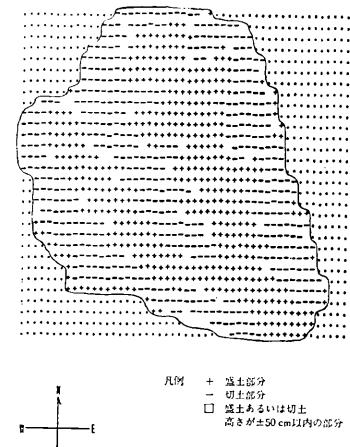


図4(f) 土工区分図

$$E_y(\lambda_x, \lambda_y) = \sum \sum (z_{ij} - z_{ij-1})^2 - k_y t_y^2 = 0 \quad (14)$$

がなり立てばよい。

したがって、上記の問題を解くには、(13)、(14)式がなりたつような  $\lambda_x, \lambda_y$  を逐次近似法によって求めればよい。実際には(13)、(14)式を近似値のまわりに線形化しその補正量  $\Delta\lambda_x, \Delta\lambda_y$  を求め逐次近似値を

$$\lambda_x^* = \lambda_x + \Delta\lambda_x$$

$$\lambda_y^* = \lambda_y + \Delta\lambda_y$$

と補正し、くりかえして計算をつづけ、(13)、(14)式を満足するような  $\lambda_x, \lambda_y$  を求める。

### 5. 宅地造成問題への応用

以上にのべてきた考え方にもとづいて、宅地造成問題にシミュレーションモデルを作成した。テストケースに用いた地域は全体の面積は約 20ha であり、南北東西方向にメッシュが切られた。メッシュは 20m 間隔に切り南北、東西方向とも最大辺は約 600m である。最高標高は 88.40m で最低標高が 44.40m の起伏をもった土地で

ある。

シミュレーションによって得られる結果は、すべて自動製図機あるいはラインプリンタで図形表示される。

ここでは、地形勾配の制約を

$$(1) \quad t_x = t_y = 0.08 \text{ (8 パーセント)}$$

$$(2) \quad t_x = t_y = 0.04 \text{ (4 パーセント)}$$

にした場合の宅地造成モデルを計算した。このとき、数量的評価は表 1 に示すとおりである。

図 2 から図 4 までの一連の図は、

(1) もとの地形

(2) 8パーセントの造成勾配のとき

(3) 4パーセントの造成勾配のとき

について、次の(a)から(f)までの六種類の図を示している。

(a) 等角投影図 (b) 地形標高図

(c) 勾配図 (d) 斜面方向図

(e) 流域面積図 (f) 土工区分図

(1971年1月25日受理)

## 東京大学生産技術研究所報告刊行予告

第 21 卷 第 1 号

棚沢一郎著

### 蓄熱式熱交換器の熱的特性について(和文)

### ON THE HEAT TRANSFER CHARACTERISTICS OF PERIODIC-FLOW TYPE HEAT EXCHANGERS

本論文は、蓄熱式熱交換器の熱的な特性を代表する二つの変数、すなわち、定常運転時における、熱通過有効度(Heat transfer effectiveness) および起動時における安定時間に関する計算結果をまとめたものである。

蓄熱式熱交換器の蓄熱体内での温度分布とその時間的变化を表わす連立偏微分方程式は、すでに何人かの研究者によって導かれているが、著者は電子計算機を使ってこれを数値的に解き、上記の二つの変数と他のパラメータ(伝熱単位数、蓄熱体の加熱側・冷却側の分割比、加熱側・冷却側の熱容量流量比など)との関係を広範囲に求め、結果を参照に便利な形にグラフ化した。

同様な試みは、これまでにも Lambertson などによって行なわれているが、従来のものにあっては、整理の方法とパラメータの範囲に不満がある。著者は、蓄熱式熱交換器の加熱・冷却周期の分割比に重点を置いた整理を行ない、これまでの結果の欠陥を補った。

なお、熱交換器の熱的特性を実際に測定する場合、最も重要なものは熱伝達率の測定であるが、その方法の一つである非定常法について本報告の最後で簡単に述べた。小型熱交換器の場合のように、流路の水力直径が極端に小さく、通常の直接測定法が使えないような場合には、この方法は有効なもの一つである。

(1971年5月発行予定)