

Elastic Surface Method による宅地造成設計の最適化

OPTIMIZATION OF LAND FORMATION USING
BY ELASTIC SURFACE METHOD

村 井 俊 治*

By *Shunji Murai*

1. 研究の目的

ここ数年の間に、大規模な土工を施す宅地造成工事が急増してきた。多摩ニュータウンの工事はこのような宅地造成工事として最大規模のものであった。これらの工事のほとんどは、自然の表土をはがし、山をけずり、谷を埋めるために、植物生態や雨水の流出機構そのほか多くの環境に多大の影響を与えている。

大規模土工を行なう宅地造成工事によって変更される自然環境の要素を大きく分けると次のものがある。

- (1) 地形：地形の姿、景観、色調、風向などが変わる。
- (2) 土質：表土がはがされ無機質の土が露出する。
- (3) 水系：地形の変化のために流域面積、排水系、地下水系、流出機構が変わる。
- (4) 植物生態系：被覆植生が変化する。

このような自然環境の変化はしばしば次のような悪影響を招くことがある。

- (1) 地形景観の破壊
- (2) 無理な切取や盛土のために生ずるがけ崩れ
- (3) 水系の変化に起因する氾濫、地下水の枯渇
- (4) 周辺森林の衰退

われわれは宅地造成設計にあたってはこのような弊害が生じないように十分考慮を払わなければならない。しかしながら、従来行なわれてきた設計手法のなかには次に示すような数多くの問題点があるために上に述べた事項を十分考慮し、これを設計の中に反映させることが必ずしも十分でなかった。従来の設計手法のもつ問題点には次のようなことが指摘できる。

- (1) 等高線地形図の上での設計構想を練ることが多いため、地形の立体的な姿を十分に把握した上で設計になっていない。

- (2) 平面計画が優先されることが多いために、縦横断の設計に無理が生じやすい。たとえば、高い土留めや大きな盛土を行わなければならないことが起きる。
- (3) 土工量算定に多くの労力が必要となるために数多くの比較検討を行なうことがむずかしい。
- (4) 宅地造成設計の評価に関連した地形情報の要素、たとえば、斜面方位、斜面勾配、集水面積、地形景観などを一貫して考慮できるような情報処理システムがなかったために、土工量などによる工事費の大小のみなどで宅地造成設計の評価が行なわれてきた。

ここでは、宅地造成設計が面的にひろがりをもった三次地形曲面をとりあつかわねばならないために、道路設計などのように初期解を見出すことが比較的容易なものと異なって、間違いのない初期解を見出すことが非常に困難であるとの見地に立って以下のような研究の目的を設定した。

- (1) 宅地造成の平面計画構想を立案する際に役に立つ資料として、計画地域の地形はどのように変更しうるか、またはどのように変更したらどのような姿になるかを容易に見出すことのできるようなシミュレーションモデルを作成する。
- (2) 数学的に評価しうるものに非数量的な評価をつけ加えられ得るようなシミュレーションモデルをつくり出す手法を開発し、数多くの比較検討が行なえるようにする。ここでは数学的に表現できる評価関数、たとえば土工量を最適化するための手法—Elastic Surface Method (著者が開発してこのように呼ぶことにした) を用いて求めた解の上に非数量的な評価を行なえるような地形情報処理システムを結合できるようにした。これによって前述の従来の設計手法のもつ問題点を解決しようとした。

- (3) 周辺境界またはたとえば高圧線などのような占有物件による制約を考慮した上で、宅地造成曲面が滑らかなものとなるようにする。
- (4) 南斜面ができるだけ多くなり、かつ土工量ができるだけ少なくするような数学的手法を開発する。Elastic Surface Method は(3)に述べた制約を考慮した上で(4)の目的を満たすような解を求めることを可能にする。

以下に Elastic Surface Method を宅地造成設計に導入する場合の基本的原理とその応用例を紹介する。

2. シミュレーションモデルによる宅地造成設計の考え方

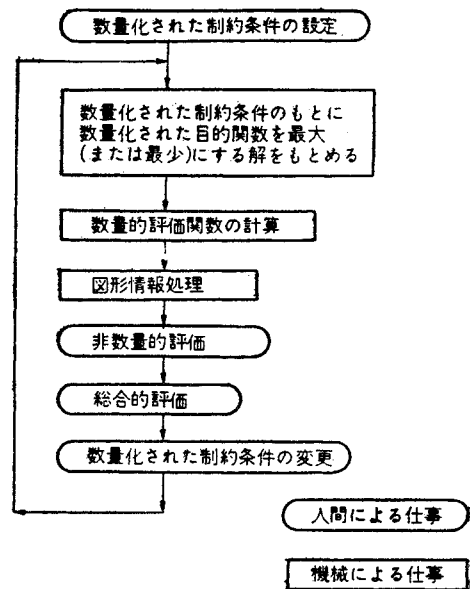
宅地造成設計の評価関数には数量的に表現できるものと非数量的なものがある。したがって、宅地造成設計問題を数学的モデルのみで解こうとすることはできない。たとえば、土工量を最小にするようなモデルを数学的に作り出すことは可能であるが、この解が全体として最適なものは必ずしもいえない。しかし、これらの数学的な解に非数量的な評価をつけ加えて総合的に評価することは可能である。

非数量的な評価は、相対的な評価差に基づいて行われるから系統的な比較案が作成されることのほうが望ましい。

以上に述べたことから、ここでは次に示すようなプロセスに従ったシミュレーションを行なうことを考えた。

- (1) 数学的に定義できる制約条件を設定する。たとえば、造成勾配の平均を 8% にすることなどをさす。
- (2) 上記の制約条件のもとに数量的に表現できる評価関数を最適にする解を求める。たとえば、土工量を最小にすることなどをいう。
- (3) 上記の解の数量的評価を行なう。たとえば、工事費を積算したり、便益を求めたりする。
- (4) 非数量的な評価を行なう。非数量的な評価は人間の感覚にたよって行なわれるので、判断のしやすいように図解的な表現を行なっておく。たとえば、斜面方位図、斜面勾配図、土工図、集水面積図、地形景観図などを地形情報処理システムとして一貫処理する。
- (5) 総合的評価を行なう。
- (6) 数学的制約条件を少し変更して(2)から(5)までの操作をくりかえす。たとえば、平均造成勾配を 7% にしたり 6% にしたりして、数量的および非数量的評価の挙動を比較する。

以上に述べたプロセスをフローチャートにすると図一



図一 非数量的評価を含む設計の最適化のためのシミュレーション

1 のようになる。このようなシミュレーションモデルは、系統的に比較案を作成し、それら进行评估する上できわめて有効である。

本研究では、(1) から (3) までの数量的な評価関数を最適にするところに Elastic Surface Method を応用している。

以下に Elastic Surface Method の原理について述べよう。

3. Elastic Surface Method の原理

宅地造成設計の際に考慮すべき数量的な制約条件および評価関数には次のものがある。

(1) 数量的に表現できる制約条件

- (i) 造成勾配の平均または最大をある勾配以下にする。
- (ii) 切取土量と盛土量をバランスさせる。
- (iii) 周辺境界、高圧線、排水処理口、計画街路などの制約高さに造成計画高をあわせる。

このほか、いくつかの制約条件があるが、造成計画の構想段階では上の 3 つの制約を考えれば十分である。

(2) 数量的評価関数

- (i) 建設費(または土工量)を最小にする。
- (ii) 利益(=便益-建設費)を最大にする。
- (iii) 利益率(=便益/建設費)を最大にする。

建設費は土工量から、便益は平均造成勾配や南斜面構成比などからある程度推定できる。

(3) 数量的に表わされる設計変数

宅地造成設計を地形変更問題としてとらえると、造成計画高を設計変数とする。

いま計画区域が間隔 d で $m \times n$ の正方メッシュで区切られているものとする。 (i, j) のメッシュに対応する地盤高を $h_{i,j}$ 、造成すべき計画高を $z_{i,j}$ とする。

このとき上にあげた制約条件および評価関数は次のようになる。

(1) 制約条件

造成勾配条件：

$$\left. \begin{aligned} |z_{i+1,j} - z_{i,j}|/d \leq t_x \quad i=1, m-1; j=1, n \\ |z_{i,j+1} - z_{i,j}|/d \leq t_y \quad i=1, m; j=1, n-1 \end{aligned} \right\} \dots (1)$$

ここで t_x, t_y はそれぞれ i 方向, j 方向の許容最大造成勾配を示す。

土工量バランス条件：
$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (z_{ij} - h_{ij}) = 0 \dots (2)$$

計画高制約条件：
$$z_{kl} = h_{kl}' \dots (3)$$

ここで (k, l) は計画高 z_{kl} を h_{kl}' にすべき位置で複数箇所あってよい。

(2) 評価関数

土工量 = 切土量 + 盛土量：

$$V = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |z_{ij} - h_{ij}| \dots (4)$$

造成された計画高の斜面構成から、たとえば南斜面の構成比がどのくらいで、勾配の構成がどのくらいで、有効宅地面積比がどのくらいなどから宅地としての便益を求めることはできるが、前もって便益を評価関数の中で変数表示をすることはむずかしい。したがって、土工量を最小にする解を求めた上で便益を求めるようにすることを考えればよい。

ところで、式 (1)、式 (2)、式 (3) の制約条件のもとに式 (4) で表わされる土工量を最小にする解を求めようとすると、絶対値を含む関数が出てくるので、線形計画法を用いることが必要になる。しかし、線形計画法を用いて上記の問題を解こうとすると、きわめて多くの計算機の記憶容量と計算量が必要になり、現実的に大きな地域の解を求めることができない¹⁾。

そこで、上記の問題を近似的に以下のように変更して微分可能な連続関数として取扱えるようにする。これは数学的なモデルのみによって得られる解が最終解として採用されるわけではないので数学的条件の設定に厳密性を要求する必要性がないことと、数学的に解きやすくなるためである。

(1) 制約条件

造成勾配条件：

$$\left. \begin{aligned} \sum_{j=1}^{m-1} \sum_{i=1}^{n-1} (z_{i+1,j} - z_{i,j})^2 = n(m-1)d^2 t_x^2 \\ \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=1}^{n-1} (z_{i,j+1} - z_{i,j})^2 = m(m-1)d^2 t_y^2 \end{aligned} \right\} \dots (5)$$

式 (5) のもつ意味は、 x 方向および y 方向の平均二乗造成勾配をそれぞれ t_x, t_y にすることを表わす。

土工量バランス条件：
$$\sum \sum z_{ij} = \sum \sum h_{ij}$$

計画高制約条件：
$$z_{kl} = h_{kl}'$$

(2) 評価関数

$$V = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (z_{ij} - h_{ij})^2 \rightarrow \min \dots (6)$$

この式のもつ意味は、計画高と地盤高の差すなわち土工量の二乗和であり、土工量そのものではない。しかし、図-2 に示すように、計画高と地盤高の差に対応する偏

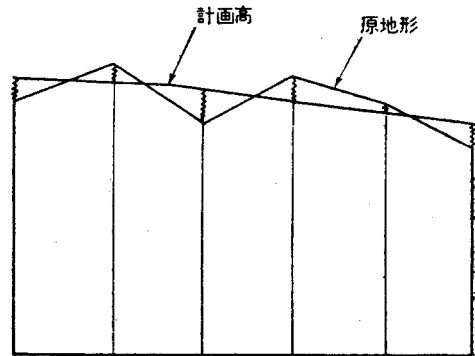


図-2 ばね問題に置換えられた地形変更問題

差の長さのばね変形にたくわえられるエネルギー量を最小にするような滑らかな造成曲面を求める問題であると解釈することができる。このような理由から上記の解を求める方法をここでは Elastic Surface Method とよぶことにしたのである。

Elastic Surface Method による解は以下に示す方法によって求められる。

4. Elastic Surface Method の解法

Elastic Surface Method は次の二つの場合に分けて用いられる。

- (1) 計画高に制約がなく、全点が自由点の場合
- (2) 周辺部またはその他に計画高の制約のつく固定点がある場合

以下に上記の2つの場合における解法を簡単に説明しよう。

(1) 計画高に制約がない場合

前にも示したが、もう一度整理する上で制約式および評価関数を示そう。

造成勾配条件：

$$G_r(z) = \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=1}^{n-1} (z_{i+1,j} - z_{i,j})^2 - n(m-1)d^2 t_x^2 = 0 \dots (7)$$

5. 傾斜地形モデルによる南斜面宅地の増加

わが国の宅地では南向きの宅地が日照および日射の上からきわめてよい宅地として扱われる。したがって、宅地造成をする場合にはできるだけ南向きの宅地が多くなるような造成計画高を求めることを考えなければならない。

ここでは、造成される宅地ができるだけ南向きになるようにするために、次に述べるような傾斜地形モデルを考える。

- (1) 図-3 に示すように、南北に対称な地形を Elastic Surface Method によって造成計画面を求めると、南北に対称な宅地ができる。したがって、造成によって勾配はゆるやかになっても、南斜面は増加していない。
- (2) この地形を図-4 に示すように、全体を北側に θ だけ傾斜させて、Elastic Surface Method により造成計画高を求める。すなわち、地形高 h を θ だけ南北に傾斜させると地形高は

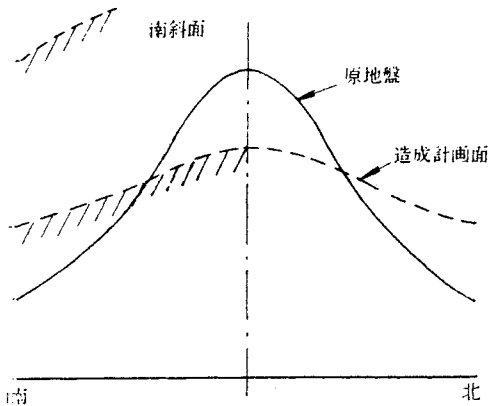


図-3 傾斜させないときの解 (南斜面は特に増加しない)

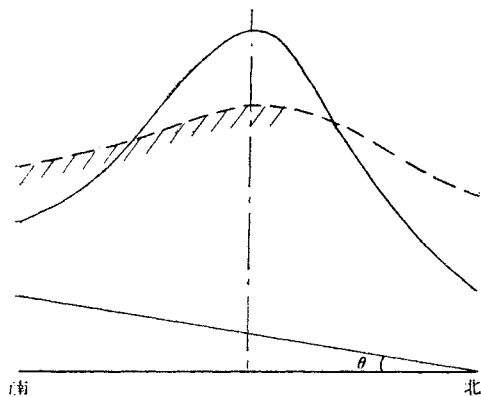


図-4 傾斜地形モデルによる解

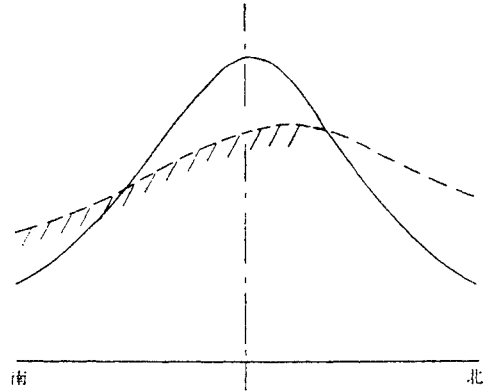


図-5 もともどしたときの解 (南斜面が増加する)

$$h' = h + dj\theta \dots \dots \dots (16)$$

となる。ただし j 方向のメッシュを南北方向とする。このようにすると原地形の北斜面は相対的に急になり、南斜面はゆるくなる。

- (3) 上で求めた造成計画面をもともどすと、図-5 に示されるように、南向きの造成斜面は相対的に増加する。

傾斜地形モデルの傾斜をどの程度傾けたらよいかについての経験は未だ十分でないが、著者の実験によると、約 10% 程度の傾斜を与えると 20% 程度の南斜面の増加が期待できる。この場合、宅地計画周辺部の計画高に制約をつけないと、周辺部近辺で南斜面を増すような解になることが多い。

6. 宅地造成設計における地形情報処理

非数量的な評価は人間の判断によって行なわれる。したがって、その判断が正確に行なわれるためには、判断資料をわかりやすい図式表現しておくことが必要である。

また写真測量による地形測量が、計画、設計、工事管理まで一貫して利用できるようにするためには、一貫して同じ正方メッシュの格子点を用いることが有効であると同時に、図式表現もこれらの格子点を利用することがよい。

改変すべき地形および造成計画された姿を事前に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わかるような等高図をラインプリンタで作成する。
- (2) 地形景観図：横から見た地形の景観がわかるように地形の等角投影図などを作成する。
- (3) 斜面方位図：斜面の向きがどの方向を向いてい

るかがわかるような方位図を作成する。特に南向きと北向きとの斜面の分布を知ることが重要である。

- (4) 地形勾配図：地形勾配または造成勾配の大きさを記号化して、斜面勾配の緩急の構成を見ることによって宅地の安全性や快適度を評価する。
- (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、また水がどのような経路で流れるかを示す図をつくる。これは宅地の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りになるか盛土になるか、またもとの地盤をほとんど切り取りや盛土をしなくてすむところはどこかがわかるような土工区分図をつくる。これは限られた宅地区域内で原植生を保存する際に役に立つ。

上に示した各種の地形情報は、いずれもメッシュ状に与えられた数値地形データをもとにして、計算機内でそれぞれ自動的に計算処理され、ラインプリンタまたは自動製図機で自動作図される²⁾。

7. Elastic Surface Method による宅地造成設計の応用例

以上に述べた考え方に基づいて実際の宅地造成の計画のあるモデル地形に Elastic Surface Method およびシミュレーションを応用した例を以下に示そう。

テストケースに用いた地域は、全体の面積が約 20 ha で南北、東西方向とも最大長さが約 600 m であり、20 m のメッシュ間隔で東西、南北方向に 30×30 のメッシュが切られた。原地形の最高標高は 88.4 m、最低標高は 44.4 m の起伏のある土地である。

ここでは、次に示す4つのケースについて Elastic Surface Method を用いた例を紹介する。

- ケース 1：周辺の境界に制約をつけないで自由端とする。ただし $t_x=t_y=8\%$ とする。
- ケース 2：周辺自由端であるが、 $t_x=t_y=4\%$ とする。
- ケース 3：周辺の境界をもとの地盤高と同じ高さになるように固定端とする。ただし $t_x=t_y=8\%$ とする。
- ケース 4：周辺を固定端とし、さらに南北方向に 10% の傾斜地形モデルにして南斜面が増すようにする。ただし、 $t_x=t_y=8\%$ とする。

図-6 から 図-17 まではそれぞれ、原地形、ケース 1, 3, 4 の場合における地形標高図、南斜面分布図、土工区分図、斜面分布構成図である。ただし、ケース 2 の $t_x=t_y=4\%$ に対応する図は紙数の都合で省略した²⁾。

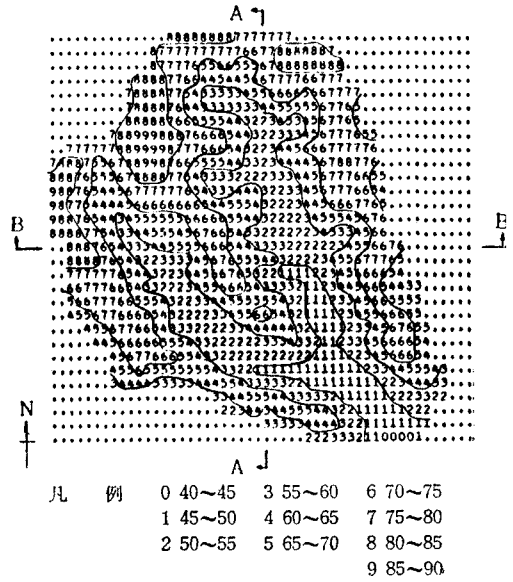


図-6 原地形図

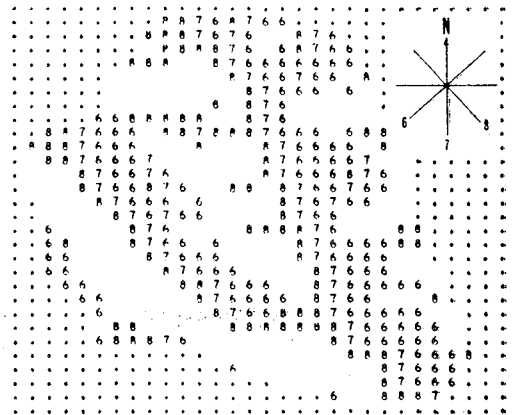


図-7 原地形図の南斜面分布図

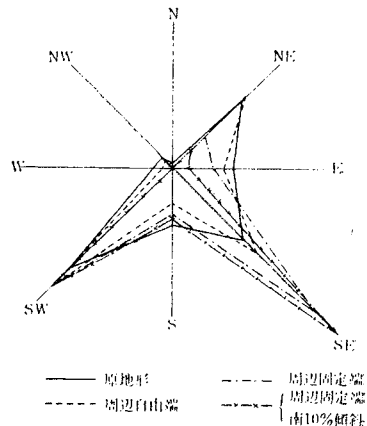
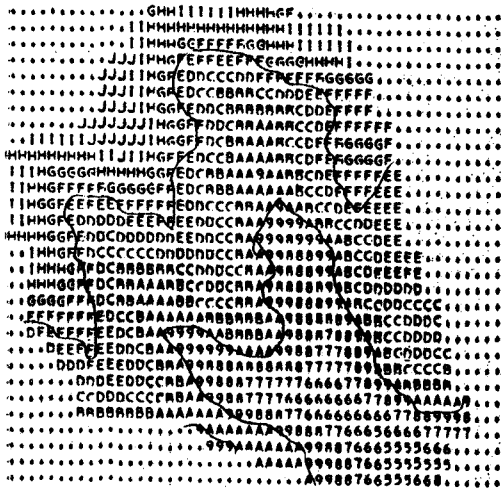
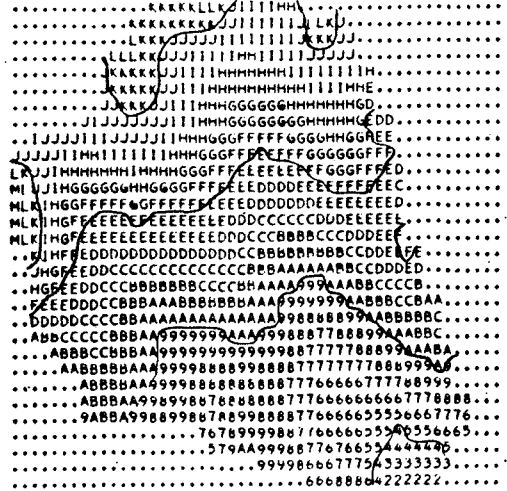


図-8 斜面構成分布図



凡例	8 56~58	C 64~66	G 72~74
	5 50~52	9 58~60	D 66~68
	6 52~54	A 60~62	E 68~70
	7 54~56	B 62~64	F 70~72
			J 78~80

図-9 周辺を自由端としたときの解



凡例	6 52~54	C 64~66	I 76~78
	7 54~56	D 66~68	J 78~80
	2 44~46	8 56~58	E 68~70
	3 46~48	9 58~60	F 70~72
	4 48~50	A 60~62	G 72~74
	5 50~52	B 62~64	H 74~76
			M 84~86

図-12 周辺を固定端としたときの解

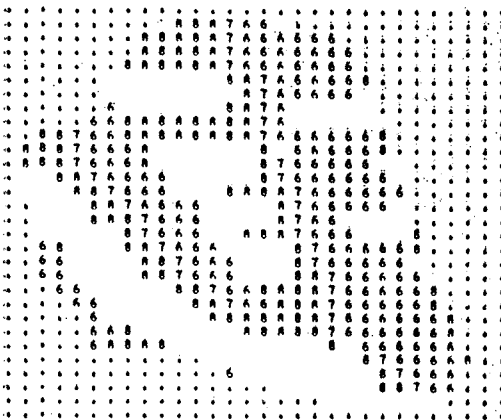


図-10 周辺を自由端としたときの南斜面分布図

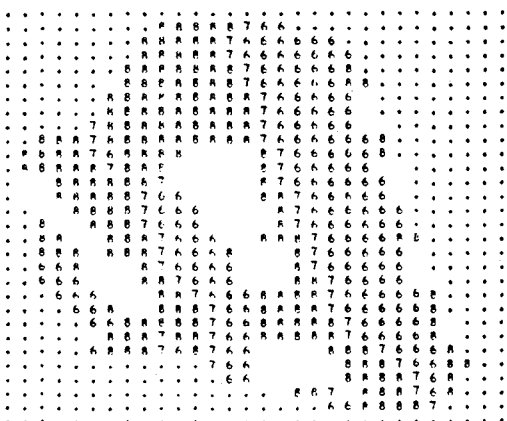


図-13 周辺を固定端としたときの南斜面分布図

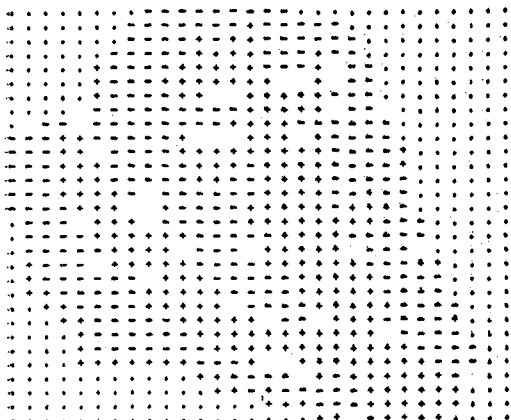


図-11 土工区分図(周辺自由端)

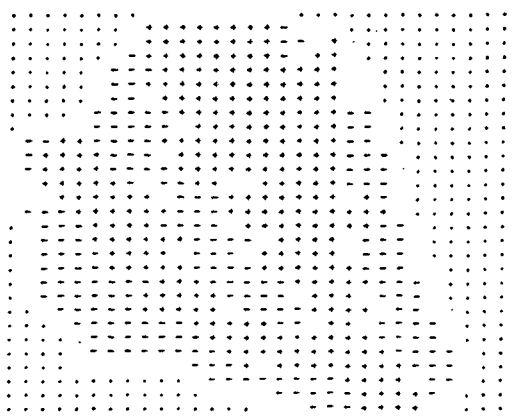
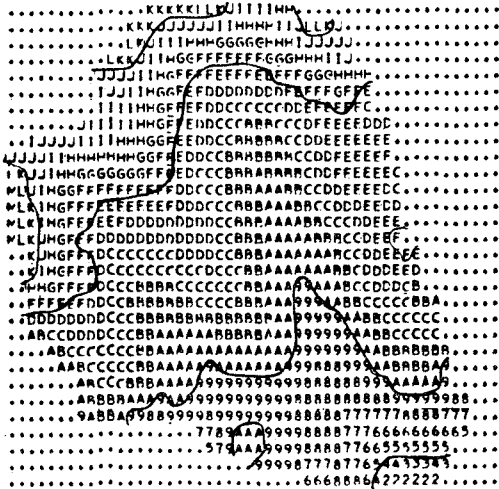


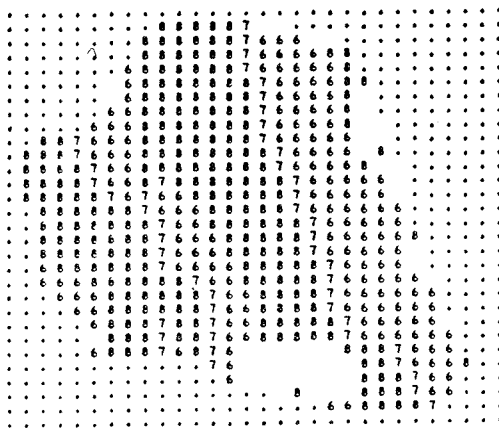
図-14 土工区分図(周辺固定端)



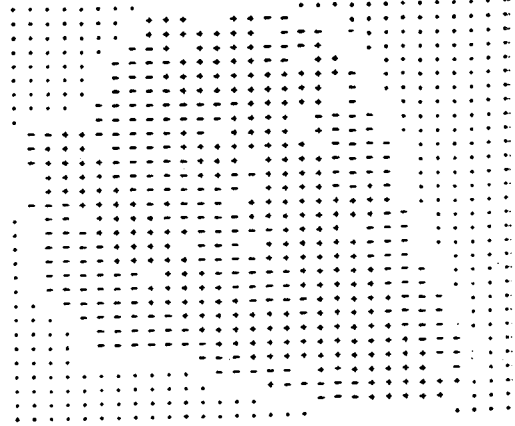
凡例

6 52~54	C 64~66	I 76~78	
7 54~56	D 66~68	J 78~80	
2 44~46	8 56~58	E 68~70	K 80~82
3 46~48	9 58~60	F 70~72	L 82~84
4 48~50	A 60~62	G 72~74	M 84~86
5 50~52	B 62~64	H 74~76	

図一15 周辺固定+南 10% 傾斜のときの解



図一16 南斜面分布図(周辺固定+南 10% 傾斜)



図一17 土工区分図(周辺固定+南 10% 傾斜)

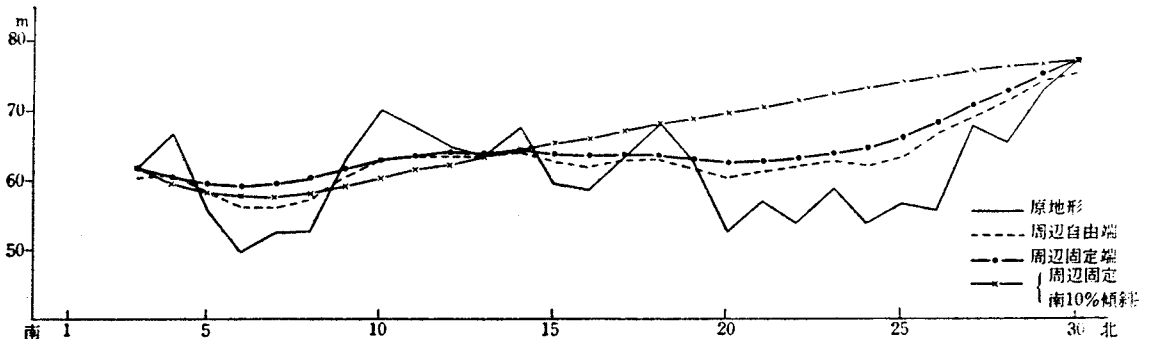
また造成勾配図, 流域面積図, 地形景観図なども同じ理由で省略した²⁾。

表一にはケース 1, 2, 3, 4 の場合の平均勾配, 最大勾配, 南斜面および北斜面の比率, 土工量などを示した。

図一18 および 図一19 はそれぞれ 図一6 の原地形図に示した南北方向断面 A-A と東西方向断面 B-B の断面図である。

表一 各種条件における宅地造成

制約条件	原地形	周辺自由端		周辺固定	周辺固定+南10%傾斜
		$t_x=t_y=8\%$	$t_x=t_y=4\%$	$t_x=t_y=8\%$	$t_x=t_y=8\%$
平均斜面勾配 %	28.2	10.0	6.9	8.1	7.8
最大勾配 %	75.0	22.0	13.0	35.0	35.0
南斜面比率 %	60.0	65.0	78.0	83.0	92.0
北斜面比率 %	23.0	22.0	12.0	9.0	6.0
南斜面増加率 %		8.3	33.3	38.3	53.0
土工量 (10 ⁴ m ³)		52.3	62.8	62.0	67.0



図一18 A-A 断面

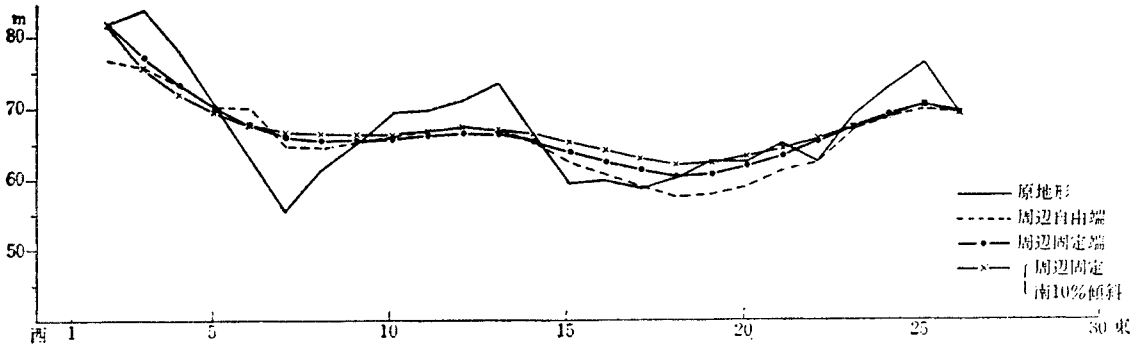


図-19 B-B 断面

8. ま と め

以上に示した結果から Elastic Surface Method の特徴をまとめると次のようになる。

- (1) 周辺を固定端としたときには、一般に中央部が平坦となる。全体の斜面構成は周辺地形に強い影響を受ける。この地形モデルでは周辺を固定すると南斜面が増加する。
- (2) 周辺を固定すると周辺自由端の場合より土工量が増加する。ただし、自由端の場合のように境界周辺で大きな土工をしなくてすむ利点がある。
- (3) 本手法によれば、境界周辺以外の任意の点の高さに制約をつけることも可能である。
- (4) 周辺を固定し、さらに南方向に傾斜地形モデルを作った場合には、南斜面の増加は著しい。ただし、土工量は増加するので、南斜面の増加による便益の増加と工事費の増加とをはかりにかけることができる。

- (5) この方法によってできる宅地は、きわめて滑らかであり、急激な起伏は生じない。
- (6) 本手法によれば、宅地造成計画の構想段階で、概略の工事費積算ならびに宅地計画に必要な計画のイメージを立案しやすい資料がただちに得られる。
- (7) 本手法は、非数量的評価を行なうためのシミュレーションの過程の中で機動的な数量的評価を行ない、非数量的評価を容易にするための図解的資料をつくる上できわめて有効である。

参 考 文 献

- 1) 中村・村井・田中：土地造成設計における最適化について、生産研究，No. 8，Vol. 20，1968
- 2) 丸安・村井・平井・高橋：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），生産研究，No. 4，Vol. 23，1971
- 3) 丸安・村井・栗原：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（第三報および第四報），生産研究，No. 7，Vol. 24，1972
- 4) 丸安・村井：土木設計システムにおける地形情報処理，土木学会誌，No. 10，Vol. 55，1970

(1972.7.19・受付)