

## 日照, 日射の効果に関する基礎的研究

A BASIC STUDY ON THE EFFECTS OF THE SUN  
BEAM AND ITS ENERGY

村 井 俊 治\*

By Shunji Murai

## 1. ま え が き

われわれは太陽からきわめて多くの恩恵をうけている。太陽光線のもつ効果には、(1) 光効果、(2) 熱効果、(3) 化学効果、の3つがある。光効果は日照の問題として、熱効果は日射の問題としてとらえられる。光効果および熱効果は代償しうが、化学効果は太陽光線でなければ得られない。(1) および (2) は物理学および幾何学の上から解明可能であり、(3) の効果は化学および医学の上から解明しなければならない。この論文では、日照および日射の効果についての基礎的研究を行なう。

従来日照問題では、日照時間の長さからのみ論じられることが多かったが、この研究ではさらに日射エネルギーの面からも考慮すべきであると考え、次に示すような日照、日射の基礎的研究を行なおうとした。

(1) 太陽光線をうける斜面の方位および勾配によって、受けとる日射エネルギーが、年、季節、月、日などの点から計算し比較する。これはどのような地形斜面、のり面、壁面などが、どのくらいの日射エネルギーを受けると知るのに役立つ。これは、適地選定や植生管理などに利用可能であろう。

(2) 地形の相互相対位置関係によって、地形が地形におとす影の影響を各季節の時刻ごとに知るべきである。これは、寒冷地帯における設備プラントの位置選定、路線の凍結問題、スキー場やゴルフ場の設計などに利用可能である。

(3) 構造物が建設されることによって、日照および日射の効果がどのくらい影響をうけるかを定量化する。すなわち新しい構造物がつくられる前と後で、既存の地形または物件がどのような差を生じるかを日照および日射の両面からとらえる。これは日照権問題の補償の査定

\* 正会員 工博 東京大学助教授 生産技術研究所

の一つのデータとなり得る。

上にあげた3つの研究目的からもわかるように、この研究では、広く太陽光線とそれをうけるものの挙動特性について基礎的にとらえた上で、その挙動のプラス面とマイナス面を解析する手法を開発した。

## 2. 斜面のうける日射エネルギー

ここではどのような方位と勾配の斜面が、どの季節にどのくらいの日射エネルギーをうけるかを求める。ここで扱う日射エネルギーは太陽の直接光による直達日射エネルギーであり、間接光や対流、伝導などによってうけるエネルギーは扱わない。

## (1) 太陽光の出す日射エネルギー

太陽光が大気圏外で出す単位時間および単位面積あたりのエネルギーを太陽定数  $J_0$  とよんでいる。この日射エネルギーは大気の透過率、太陽高度により弱くなる。透過率は季節によって、太陽高度は時刻によって異なる。

太陽光線と直角の面がうける日射エネルギーは次の Bouguer の式により求められる<sup>1)</sup>。

$$J_n = J_0 P^{\cos \theta} \dots \dots \dots (1)$$

ここで

$J_n$ : 太陽光と直角の面のうける日射量 kcal/m<sup>2</sup>/hr

$J_0$ : 太陽定数,  $J_0=1164$  kcal/m<sup>2</sup>/hr

$P$ : 透過率 (中央气象台で毎月観測しており、冬は大きく、夏は小さい)

$h$ : 太陽高度

## (2) 斜面のうける直達日射量

図-1 に示すように、太陽光線のベクトルを  $S$  とし、その方向余弦を ( $S_x, S_y, S_z$ ) とする。斜面の法線ベクトルを  $n$  とし、その方向余弦を ( $n_x, n_y, n_z$ ) とし、法

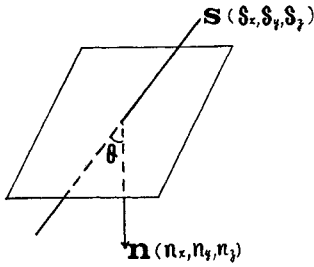


図-1 斜面のうける日射量

線ベクトルの正方向は  $n_z < 0$  となるようにとるものとする。

このとき太陽光線と斜面の法線のなす交角  $\theta$  は次のようになる。

$$\cos \theta = \frac{\mathbf{n} \cdot \mathbf{S}}{|\mathbf{n}| \cdot |\mathbf{S}|} = n_x s_x + n_y s_y + n_z s_z \quad \dots\dots (2)$$

したがって、斜面のうける直達日射量は次の式により求められる。

$$J = J_n \cos \theta = J_0 P \cos \theta \quad (n_x s_x + n_y s_y + n_z s_z) \quad \dots\dots (3)$$

ただし、 $\cos \theta > 0$  のときのみに有効で、 $\cos \theta < 0$  のときは  $J=0$  とする。

(3) 太陽位置の表示

太陽位置を表示するのに次の2つの方法がある。

a) 地平座標系 (A, h)

観測点の地平面を基準として、図-2 に示すように太陽の方位角 A と高度 h をもって、太陽位置の表示をする。ただし方位角 A は、真南方向を 0 とし、西側へ測るのを正とする。

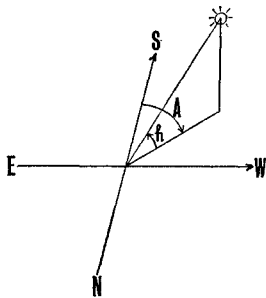


図-2 地平座標系

b) 赤道座標系 (赤緯時角方式) (t, delta)

地平座標系とは、観測点の地平と太陽の位置関係のみを示し、観測点が地球上のどこに位置しているかが考慮されていない。そこで赤道座標系では、図-3 に示すように、観測点の天球の赤道より的高度角すなわち赤緯 delta と、子午線からの偏差角 t をもって太陽の位置を表示する。赤緯 delta は季節を示し、delta = 0 のときは春分または秋

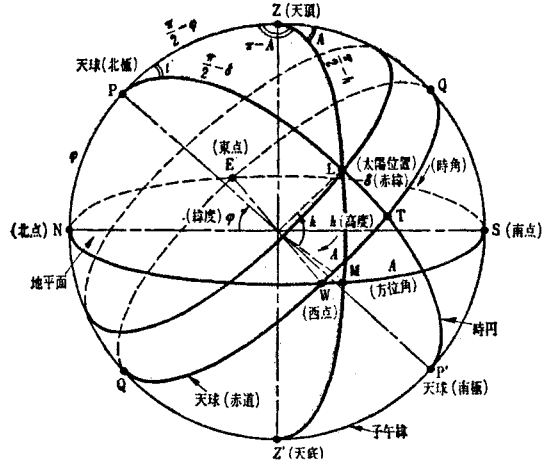


図-3 赤道座標系

分であり、夏至のとき最大値  $\delta = 23^\circ 27'$  をとり、冬至のとき最小値  $\delta = -23^\circ 27'$  をとる。t は太陽時角とよび、子午線の位置すなわち南中時を  $t=0$  とし、時計回りの方向に正をとる。t は 24 時間で  $360^\circ$  の日周運動をするので、時角  $t=1$  は  $15^\circ$  の角に相当する。したがって、時角 t は、 $-12 \leq t \leq 12$  の範囲をとる。

(4) 太陽位置の計算

上に記した地平座標系 (A, h) と赤道座標系 (t, delta) との間には次のような関係があり、季節をあらわす delta と、時刻を示す t, 観測点の緯度 phi を与えると、太陽光の方位 A とその高度 h が求まる。

$$\sin h = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos t \quad \dots\dots (4)$$

$$\sin A = \frac{\cos \delta \sin t}{\cos h} \quad \dots\dots (5)$$

季節に伴う赤緯、透過率、日照率の変化を図-4 に示す<sup>1), 2), 3)</sup>。

南中時すなわち  $t=0$  における太陽高度  $h_0$  は1日の最大値であり、その季節の delta に応じて次の値をとる。

$$\sin h_0 = \cos(\phi - \delta) = \sin(\pi/2 - \phi + \delta)$$

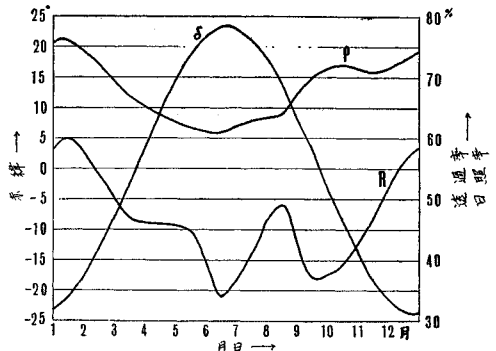


図-4 東京における赤緯 (delta), 透過率 (rho) および日照率 (R)

表一 東京 ( $\varphi=35^{\circ}41'$ ) における冬至, 春分 (または秋分), 夏至における太陽方位 ( $A$ ) および高度 ( $h$ )  
(カッコ内は日没時)

時刻	冬至 $\delta=-23^{\circ}27'$		春分(秋分) $\delta=0^{\circ}0'$		夏至 $\delta=23^{\circ}27'$	
	$h$	$A$	$h$	$A$	$h$	$A$
0 0	30°52'	0° 0'	54°19'	0° 0'	77°46'	0° 0'
0 30	30 26	7 59	53 38	12 43	76 8	30° 0
1 0	29 11	15 46	51 40	24 40	72 9	50 47
1 30	27 8	23 14	48 37	35 22	67 0	64 0
2 0	24 24	30 14	44 42	44 42	61 20	73 0
2 30	21 2	36 45	40 7	52 45	55 25	79 43
3 0	17 8	42 45	35 3	59 44	49 22	85 8
3 30	12 47	48 16	29 38	65 53	43 17	89 48
4 0	8 4	53 21	23 57	71 23	37 12	94 0
4 30	3 2	58 4	18 6	76 25	31 9	97 57
5 0	(0° 0')	(60°43')	12 8	81 7	25 8	101 46
5 30	(4 時 47 分)		6 5	85 36	19 13	105 34
6 0		(0° 0')	(90°0')	13 25	109 24	
6 30		(5 時 59 分)		7 45	113 22	
7 0				2 15	117 31	
7 30				(0° 0')	(119°17')	
				(7 時 12 分)		

$$\therefore h_0 = \pi/2 - \varphi + \delta \dots\dots\dots(6)$$

太陽の没時刻  $t_0$  と, 没方位  $A_0$  は, 式 (4), (5) において  $h=0$  とおいて得られる。

$$\cos t_0 = -\tan \varphi \tan \delta \dots\dots\dots(7)$$

$$\sin A_0 = -\sin \delta \cos \varphi \dots\dots\dots(8)$$

表一は東京, 北緯  $35^{\circ}41'$  の冬至, 春分または秋分および夏至における太陽光線の方位および高度である。

(5) 斜面のうける日射量の計算

以上に示してきた原理を利用して, 斜面のうける直達日射量を計算機を用いて計算した。計算は次に示すフローにしたがって行なわれた。

(1) 東京の緯度  $\varphi=35^{\circ}41'$ , 各月中旬の透過率  $P$ , 日照率  $R$ , 赤緯  $\delta$  を入力データとして読みこむ。

(2) 各月中旬の赤緯  $\delta$  に対応する日出時  $-t_0$  および日没時  $t_0$  を求める。

(3) 斜面の方位  $\alpha$  を  $16$  方位, 斜面勾配  $\beta$  を  $0^{\circ}$  から  $90^{\circ}$  ままで  $15^{\circ}$  おきに分けて, 各月中旬日における終日直達日射量  $Q_{day}$  ( $\text{kcal}/\text{m}^2/\text{day}$ ) を次に示す式により求める。

$$Q_{day} = \int_{-t_0}^{t_0} J_0 P \cos \delta \sec h (n_x S_x + n_y S_y + n_z S_z) dt$$

$$= \sum_{i=-t_0}^{t_0} J_0 P \cos \delta \sec h (n_x S_x + n_y S_y + n_z S_z) \Delta t$$

.....(9)

ここで

$$\left. \begin{aligned} n_x &= \sin \beta \sin \alpha \\ n_y &= \sin \beta \cos \alpha \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} n_z &= -\cos \beta \\ S_x &= \sin A \cos h = \cos \delta \sin t \\ S_y &= \cos A \cos h = -\sin \delta \cos \varphi \\ &\quad + \cos \delta \sin \varphi \cos t \\ S_z &= -\sin h = -(\sin \varphi \sin \delta \\ &\quad + \cos \varphi \cos \delta \cos t) \end{aligned} \right\} \dots(10)$$

$\Delta t = 30$  分

(4) 各月のうける日射量  $Q_{month}$  を,  $Q_{day}$  に各月の日数と, 日照率をかけて求める。ここで日照率とはその月の可照日照時間に対する実際の日照時間の観測値の比率である。

$$Q_{month} = Q_{day} \times (\text{日数}) \times (\text{日照率 } R) \dots\dots(11)$$

(5)  $Q_{month}$  を 1 年間加えあわせて年間日射量 ( $\text{kcal}/\text{m}^2/\text{year}$ ) を求める。なお四季を春 (3 月~5 月), 夏 (6 月~8 月), 秋 (9 月~11 月), 冬 (12 月~2 月) に分けて, 季節ごとの日射量を求める。

図一5 は以上の計算の結果をプロットしたものである。この図から次のような特徴をよみとることができる。

(1) 各季節を通じて南向きの斜面でその直達日射量が最大となる。

(2) 最大日射量をうける南向きの斜面の勾配は季節によって異なる。

(3) 冬における南向き, 勾配約  $59^{\circ}$  のときの最大日射量の方が夏における南向き, 勾配約  $12^{\circ}$  のときの最大日射量より大きい。すなわち, 冬は太陽光の方位, 高度の変化率が少なく特定の斜面を照らすのに対し, 夏は太陽光の方位, 高度とも変化が大きく, 万遍なく地表を照らしているからである。これによって冬の日だまりの現象が日射量の上からも証明できる。

(4) 北向き斜面と南向き斜面のうける日射量の差はきわめて大きい。のり面保護工として植える芝生や他の植物は, 好陽性や好陰性に依じてその種類を選択すべきである。また寒冷地における構造物や設備の位置選定を決定する際の良い参考資料とならう。

3. 地形の影の解析

ここでは, 起伏のある複雑な曲面をつくっている地形が地形におとす影を求める手法と, 地形がうける日射量を求める手法について述べる。これらの手法では, 地形を数値地形モデルとして記憶した上で, 計算機によって地形の影および地形のうける日射量が求められる。

(1) 地形の影を求める手法

太陽光の方位  $\alpha$ , 高度  $h$  のとき, 地形が地形におとす影は次の段階にしたがって求められる。

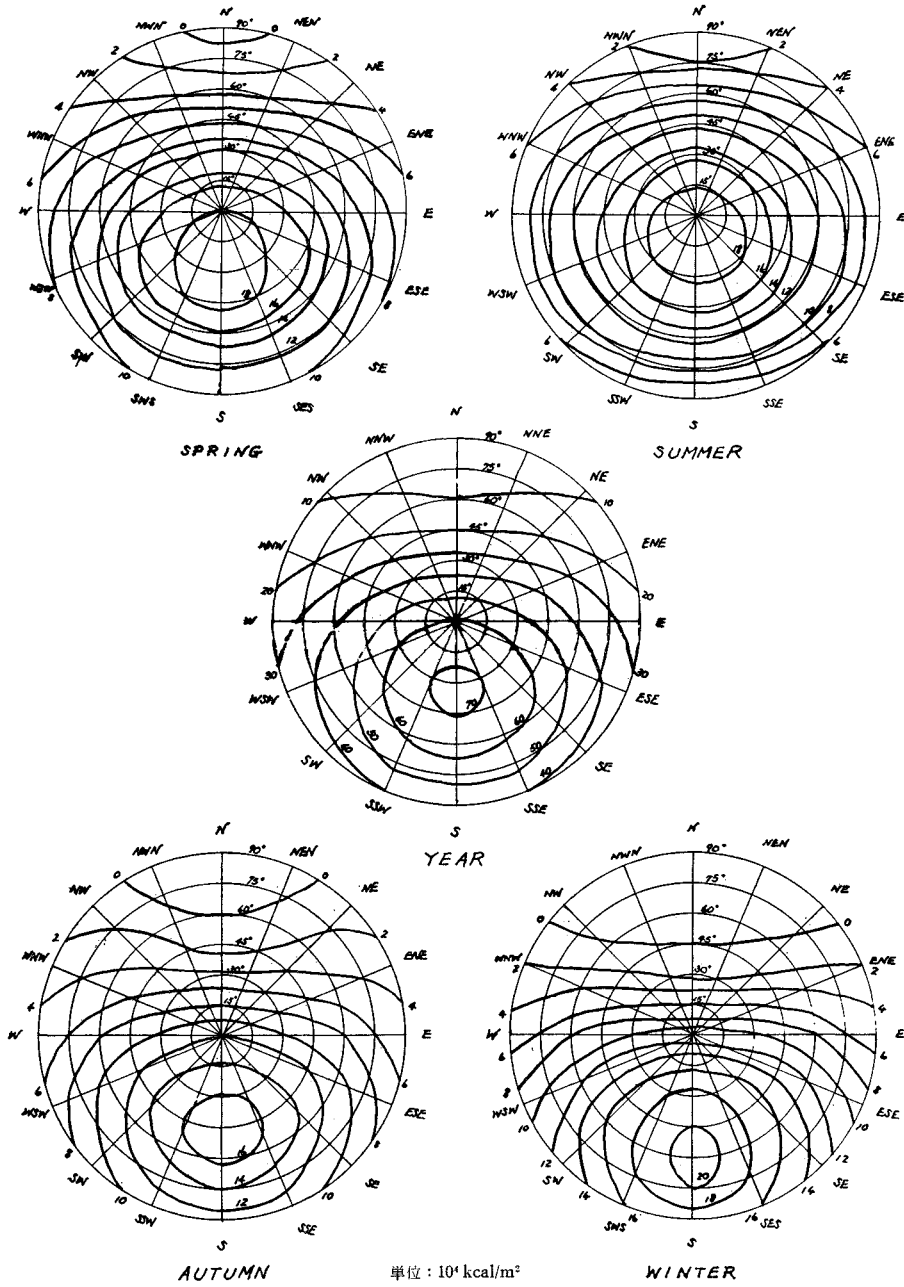


図-5 斜面の方位および勾配とその斜面のうける日射エネルギーの関係

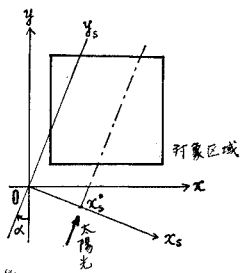


図-6 地形の影の解析

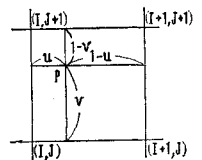
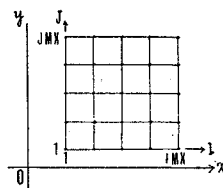
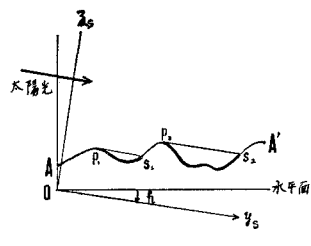
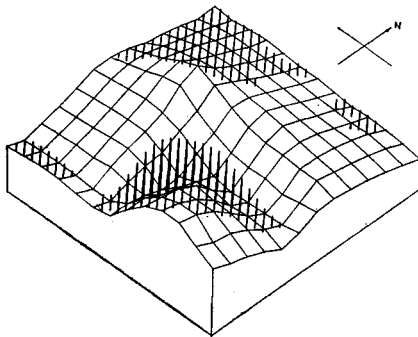


図-7 数値地形モデルの作成

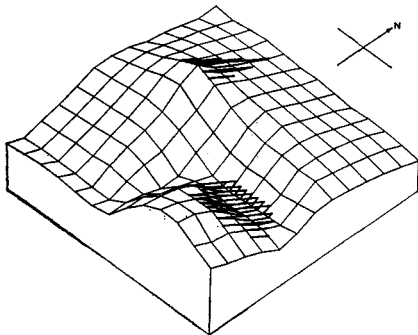
(1) 図-6に示すように対象区域の地形がxyz座標系のメッシュで与えられるものとする。このときxyz座標系をz軸のまわりにαだけ回転してx<sub>s</sub>y<sub>s</sub>z座標系とし、さらにx<sub>s</sub>軸のまわりにhだけ回転させてx<sub>s</sub>y<sub>s</sub>z<sub>s</sub>座標系に変換する。

(2) 図からもわかるように、太陽光線と平行なある断面における影の始点は、断面地形の極大値であり、影の終端は始点よりy<sub>s</sub>に平行な直線と断面との交点となる。任意の点(x, y)に相当する地形の高さzは図-7に示すように4つのメッシュ地形点から次に示す一次内挿式で求められる。

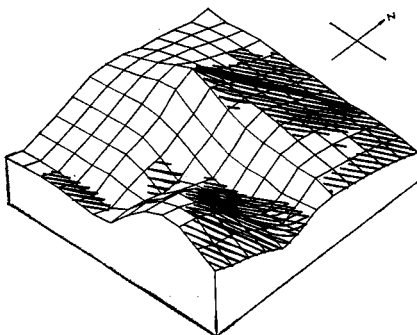
$$z = (1-u)(1-v)z_{ij} + (1-u)vz_{i,j+1} + u(1-v)z_{i+1,j} + uvz_{i+1,j+1} \dots\dots\dots(12)$$



(a) 午前9時のときの日影



(b) 正午のときの日影



(c) 午後3時のときの日影

図-8 冬至における影の自動作図

(3) あるメッシュ地形点がある時刻に影となっているか否かは、そのメッシュ地形点を通り太陽光線と平行な地形断面を切り(2)と同様の操作を行えば容易に求められる。

図-8はモデル地形において冬至のときの地形の影を計算機で求め、これを自動作図したものである。

図-8を見ると地形の影が、時刻によってうつり変わる状況がわかる。これらの地形の影の解析はスキー場やゴルフ場など太陽光と密接な関係をもつ施設の設計にきわめて役に立つ。

(2) 地形のうける日射量

地形が太陽光を受ける恩恵を単に日照時間だけでなく日射エネルギーの点からも考察したい。そこでここではある季節の1日に、地形がうける終日日射量 Q<sub>day</sub> を次の方法で求める手法を開発した。

- (1) 対象区域の緯度 φ, 赤緯 δ および地形のメッシュ標高データ z<sub>ij</sub> を入力する。
- (2) 日没時 t = ±t<sub>0</sub> を計算する。
- (3) 地形のメッシュ点全体について、終日日射量を次の式にしたがって積算する。

$$Q_{day} = \sum_{t=-t_0}^{t=t_0} Q_t \Delta t \dots\dots\dots(13)$$

ここで

$$Q_t = \begin{cases} J_0 P \cos \epsilon \cos h (n_x S_x + n_y S_y + n_z S_z) & \dots\dots\dots \text{地形点が影でない場合} \\ 0 & \dots\dots\dots \text{地形点が影になる場合} \end{cases} \dots\dots\dots(14)$$

地形曲面の法線ベクトル (n<sub>x</sub>, n<sub>y</sub>, n<sub>z</sub>) は近似的に次の値をとるものと考えてよい。

$$\left. \begin{aligned} n_x &= \frac{\partial z / \partial x}{\sqrt{(\partial z / \partial x)^2 + (\partial z / \partial y)^2 + 1}} \\ n_y &= \frac{\partial z / \partial y}{\sqrt{(\partial z / \partial x)^2 + (\partial z / \partial y)^2 + 1}} \\ n_z &= \frac{-1}{\sqrt{(\partial z / \partial x)^2 + (\partial z / \partial y)^2 + 1}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(15)$$

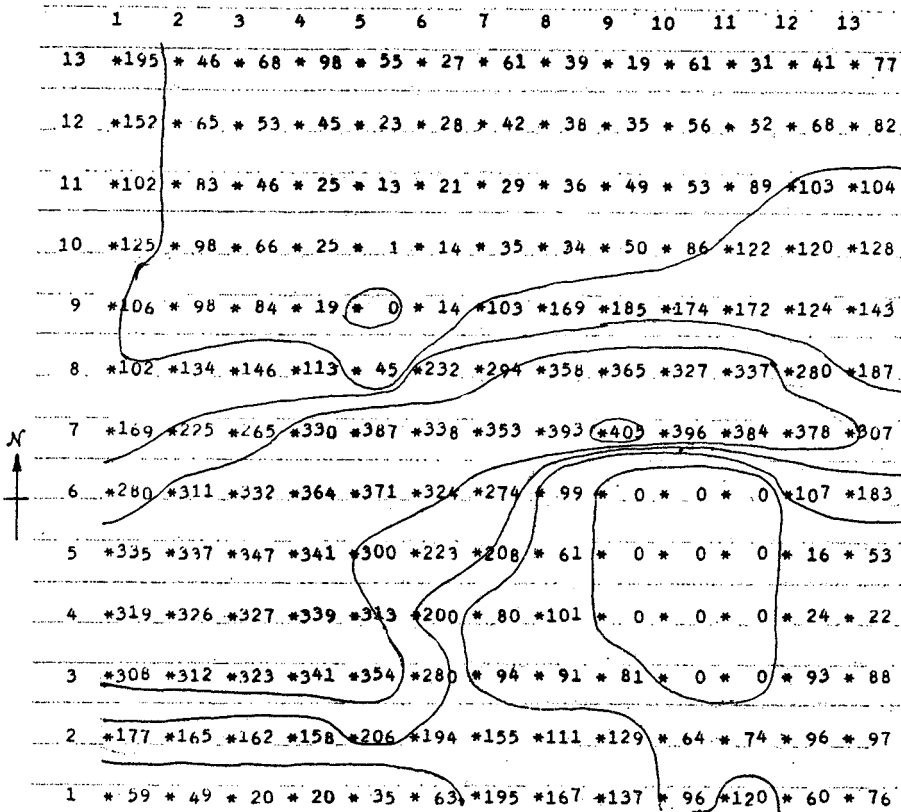
$$\left. \begin{aligned} \partial z / \partial x &\doteq \Delta z / \Delta x = (z_{i+1,j} - z_{i-1,j}) / 2d \\ \partial z / \partial y &\doteq \Delta z / \Delta y = (z_{i,j+1} - z_{i,j-1}) / 2d \end{aligned} \right\} \dots\dots(16)$$

ここでdはメッシュ間隔を表わす。

図-9は図-8に示したモデル地形が各季節の1日にうける終日日射量をラインプリンタで打出したものである。

この図を見ると、次のような特徴を見出すことができる。

- (1) 冬は地形によってきわめて大きい日射量の差が生じる。終日、影となるところは直達日射量が0となるのに対し、場所によって 4000 kcal/m<sup>2</sup>/day にのぼる日射量をうけるところが生じる



(a) 冬至のときの終日射量



(b) 春分または秋分のときの終日射量

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
13	*728	*678	*681	*700	*675	*652	*682	*665	*644	*682	*657	*665	*680
12	*694	*663	*674	*678	*658	*654	*669	*666	*661	*679	*674	*670	*685
11	*660	*663	*661	*654	*645	*654	*655	*658	*671	*675	*695	*689	*672
10	*669	*658	*663	*651	*636	*642	*660	*655	*669	*694	*704	*695	*690
9	*632	*643	*657	*618	*580	*633	*699	*723	*717	*715	*720	*697	*700
8	*650	*665	*656	*646	*714	*662	*653	*646	*663	*696	*693	*715	*706
7	*674	*702	*690	*671	*587	*583	*605	*599	*589	*621	*638	*637	*695
6	*716	*702	*684	*654	*625	*630	*602	*679	*684	*678	*706	*706	*604
5	*688	*688	*680	*682	*688	*635	*667	*622	*513	*554	*566	*609	*651
4	*701	*697	*695	*680	*698	*665	*588	*571	*552	*529	*542	*587	*632
3	*710	*707	*703	*687	*668	*689	*623	*551	*594	*609	*581	*607	*608
2	*728	*728	*729	*714	*682	*666	*598	*566	*637	*666	*613	*585	*572
1	*673	*666	*646	*627	*597	*639	*632	*572	*618	*685	*680	*576	*595

(c) 夏至のときの  
終日日射量

図-9 地形がうける日射エネルギー (単位: 10kcal/m<sup>2</sup>/day)

(2) 夏は約 5 000 kcal/m<sup>2</sup>/day から約 7 000 kcal/m<sup>2</sup>/day の間の日射量をうけ, 全体的には大きな差は生じない。

(3) 冬に寒いところが夏に特別涼しいわけではない, 冬に暖かなところが夏に特別暑いわけではない。

#### 4. 構造物の日照, 日射の効果に与える影響

ここでは簡単な例として直方体の構造物またはビルディングが建設された場合の日影線および日射量の損失を解析する方法について述べる。

##### (1) 長方体の地形におとす影の解析

ある時刻における長方体の地形におとす影は次に述べる方法によって行なわれる。

(1) 長方体の長辺, 短辺の長さおよび高さを与える。長方体の平面重心位置のおかれる点の座標と, その相対座標系の方位を与える。

(2) 長方体の 8 つの頂点の空間座標を求める。

(3) ある時刻 ( $\theta, t$ ) における太陽光の座標系  $x_s y_s z_s$  に上記の 8 点を変換する。

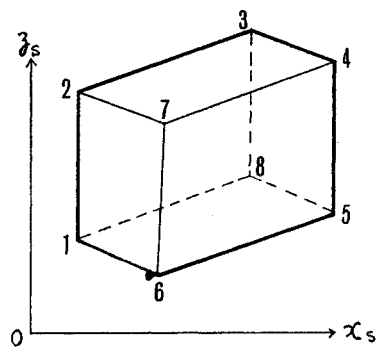


図-10 長方体の輪郭線

(4) 図-10 に示すように, 長方体の  $x_s z_s$  断面における輪郭線を求める。

(5) 輪郭線を構成する線上の点より太陽光線と平行な直線と地形との交点をつぎつぎに求めてゆく。これによって長方体が地形におとす影を求めることができる。

図-11 はビルを建てる向きによってその影がどのように異なるかを調べるために自動作図したのである。

図-12 は, 図-8 で与えられたモデル地形に長方体の構造物が建設された場合, 冬至のときに想定される影

季節：冬春または秋、夏  
 ビルの向き：東西方向から30°毎の回転角  
 日影線時刻：1時間毎の太陽時刻

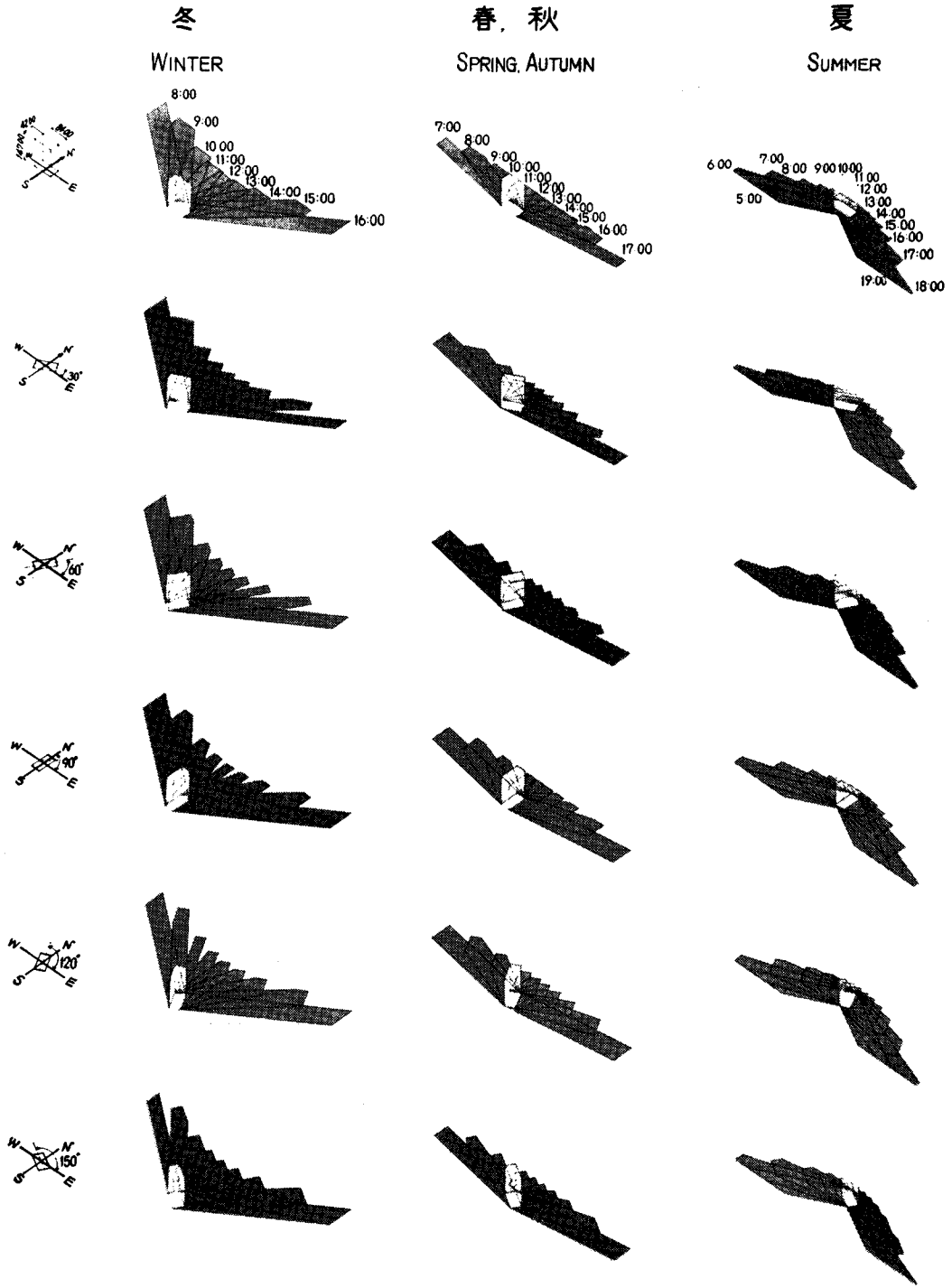


図-11 コンピュータによる高層ビルの日影線解析



をコンピュータによって求め、これを自動作図したものである。

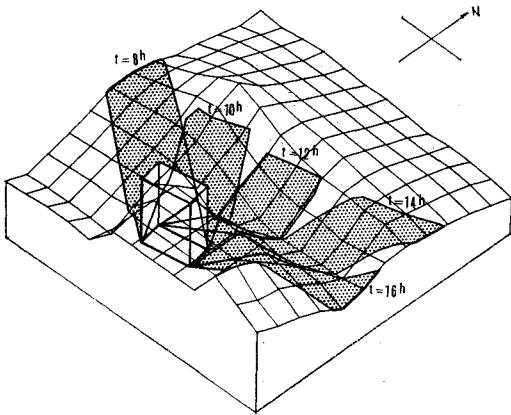


図-12 冬至のときのビル影の自動作画

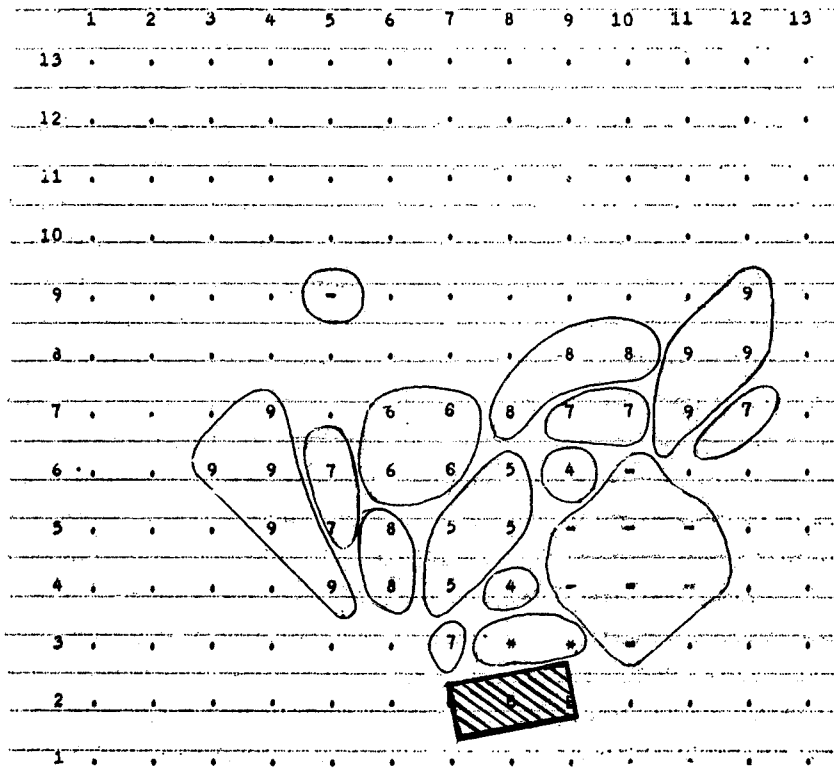
(2) ビルの建設による日射量の損失の計算

ビルの建設によってうける日照権の侵害を従来は日照時間の損失から論じられることが多かった。しかしながら、同じ2時間でも朝の2時間と昼の2時間または夕方の2時間では損失の重みが異なる。日照権の侵害を日射量の損失から論じると、きわめて明りょうな感度差であらわすことができる。

4.(1) ではビルの地形におとす影を求める手法を示したが、同じ手法によって、ある時刻に地形上のある点がビルの影内にあるか否かを判断することができる。

したがってある季節の1日にわたって地形がうける日射量をビル建設前後について積分することが可能となる。

著者は、ビルの建設による日射量の減少をあらわす一つの指標として次に示すような日射量損失率を求めてみ



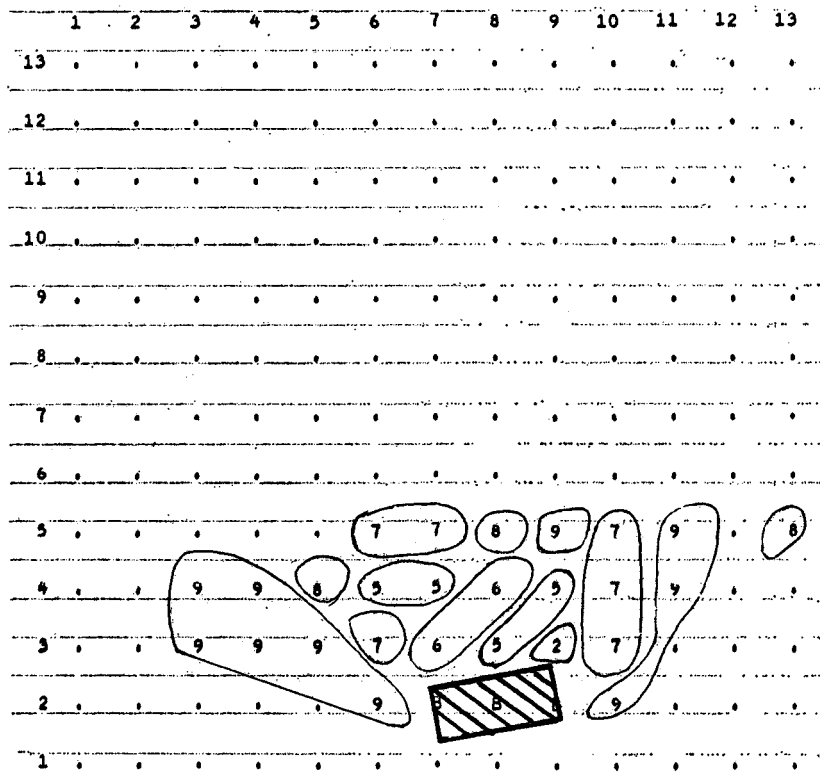
(a). SEASON DELTA = -23 \* 26



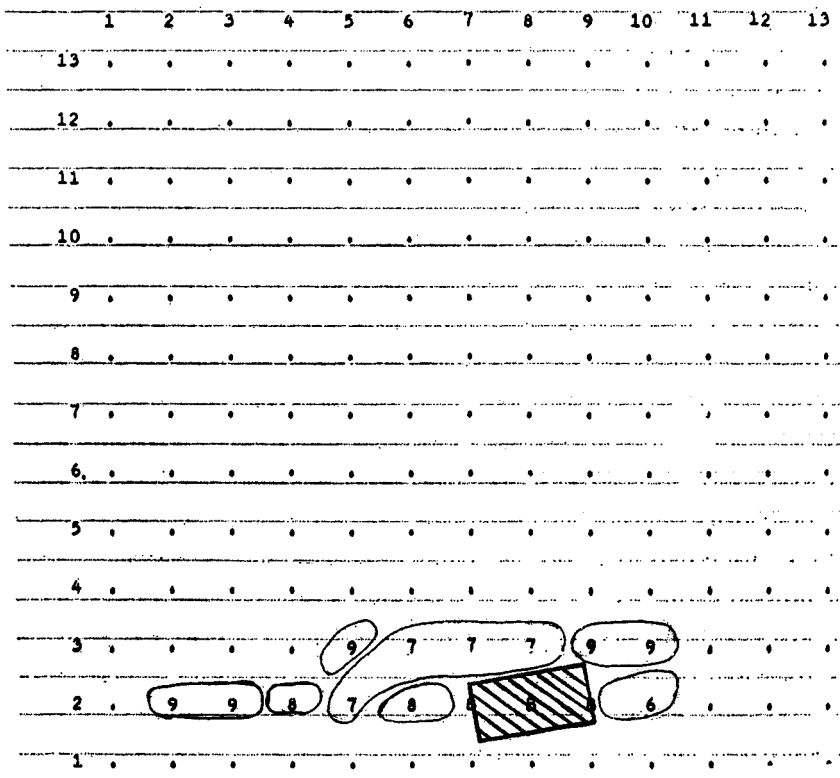
- 9 日照 9割
- 8 " 8割
- 7 " 7割
- 6 " 6割
- 5 " 5割
- 4 " 4割

- \* 建物による終日陰
- 地形による終日陰

(a) 冬至のときのエネルギー損失率



(b) SEASON DELTA= 0\*0 (b) 春分または秋分のときのエネルギー損失率



(c) SEASON DELTA= 23\*26 (c) 夏至のときのエネルギー損失率

図-13 建物による日射エネルギーの減少

た。

$$\text{日射量損失率} = \frac{\text{ビル建設後にうける日射量}}{\text{ビル建設前にうける日射量}} \dots (17)$$

図—13 (a), (b), (c) は 図—12 に示したビルにより，それぞれ冬至，春分または秋分，および夏至における日射量損失率をラインプリンタで打出したものである。図中のたとえば7 という数字は，ビルの建設によって，日射量が7割に減少することを意味する。

この図から次のような特徴を見出すことができる。

- (1) 冬ほど影響をうける面積が大きく，夏ほど小さい。
- (2) 冬に日影になって大きな日射量の損失を招くところでも春や夏には日影にならないところがある。
- (3) 逆に冬はビルの影響をうけないところでも，春や夏に日影になって涼しくなるところもある。
- (4) 地形の起伏の状況によって，ビルに近いところほど日射量の減少が大きいは必ずしもいえないところがある。

## 5. あとがき

本研究は，太陽が与えてくれるエネルギーを起伏のある地形曲面がどのようにうけているかを求めようとした

ところに最大の特徴がある。さらにビルが建設される場合，起伏のある地形にどのような影を落とすか，またビル建設前後における日射量損失率などをコンピュータで求める手法を開発した。これは著者らが近年研究を続けてきた地形情報処理の一つの応用分野を拓いたともいえる。

この研究の成果は，単に建築の分野だけでなく，土木工学，農業，林業など広い応用性をもっていることを示している。

最後に，この研究に出てくるプログラムの開発にあたっては昭和45年に東京大学大学院修士課程を卒業した大方茂君に負うところが大きく，謝意を表したい。

この論文は過去3年余にわたって行なってきた基礎的研究の一部であり，今後さらに応用性と実用性に関する研究を続けたいと考えている。

## 参 考 文 献

- 1) 建築学大系，第8巻
- 2) 建築学会：建築設計資料集成 No. 2
- 3) 気象ポケットブック，気象庁
- 4) 丸安・村井：土木設計における地形情報処理システム，土木学会誌 Vol. 52, No. 8, 1970
- 5) 小木曾定彰：都市の中の日照，コロナ社

(1972.9.21・受付)