

斜面の受ける太陽エネルギーに関する基礎的研究

A Basic Study on the Effect of Sun Energy upon the Terrain Surface

村井俊治*・大林成行*

Shunji MURAI and Shigeyuki OHBAYASHI

まえがき

太陽エネルギーは光効果, 熱効果, 化学効果を有している。最近太陽エネルギーは唯一の無公害のエネルギー源として再認識されてきた。太陽エネルギーはわれわれの日常生活, 農業, 林業, リクレーション, 都市などの問題できわめて密接な影響力をもっている。

太陽は何人にも等しくそのエネルギーを提供しているが, その受けとり方によって太陽エネルギーからうける恩恵には大きな差異が生じる。斜面が受ける太陽エネルギーはその斜面の方位, 勾配, 時間によって変化する。

このような背景から本研究では斜面の受ける太陽エネルギーに関する基礎的な研究として斜面の方位, 勾配, 季節および時間の変化による太陽エネルギー強度の基礎資料の作成とその考察を試みた。

本研究は将来, これらの基礎資料にもとずいて斜面の形状と太陽エネルギーとの関係を明らかにして, 太陽エネルギーと密接な関係にある宅地造成, 農地造成, ゴルフ場造成などのアースデザインに役立てることを課題としている。

1. 斜面が受ける太陽エネルギーに関する基本式

太陽光の法線面に与える単位面積, 単位時間あたりのエネルギー強度(日射量)を法線面日射量といい, つぎの式であらわされる。

$$I_n = I_0 \cdot P \cdot \cos \epsilon \quad (1)$$

ここで, I_0 : 太陽定数 (1164 kcal/m²·hour)

P : 透過率

h : 太陽高度

つぎに, 斜面の受ける日射量 I_θ は斜面の法線と太陽光がつくる角度を θ とするとつぎの式で求められる。

$$I_\theta = I_n \cdot \cos \theta \quad (2)$$

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 , 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 とすると, 太陽光線と斜面のつくる角 θ はつぎの式から求められる。

$$\cos \theta = \frac{N \cdot S}{|N| \cdot |S|} = \frac{N_x \cdot S_x + N_y \cdot S_y + N_z \cdot S_z}{\sqrt{N_x^2 + N_y^2 + N_z^2} \cdot \sqrt{S_x^2 + S_y^2 + S_z^2}} \quad (3)$$

ただし, 法線方向の正方向は $N_z < 0$ となるようにとるものとし, $\cos \theta \geq 0$ のときのみ(3)式がなりたつものと

する。

ここで, N_x, N_y, N_z は斜面の方位 α と勾配 β から, また S_x, S_y, S_z は太陽の方位 A と高度 h からつぎのような関係式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} N_x &= \sin \alpha \cdot \sin \beta \\ N_y &= \sin \alpha \cdot \cos \beta \\ N_z &= -\cos \alpha \\ S_x &= \sin A \cdot \cos h \\ S_y &= \cos A \cdot \cos h \\ S_z &= -\sin h \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

ゆえに, 斜面が受ける直達日射量 I はつぎのようになる。

$$I = I_0 \cdot P \cdot \cos \epsilon \cdot (N_x \cdot S_x + N_y \cdot S_y + N_z \cdot S_z) \quad (5)$$

ただし, $N_x \cdot S_x + N_y \cdot S_y + N_z \cdot S_z < 0$ のとき $I = 0$ とする。斜面がある季節の1日に受ける太陽エネルギーはつぎのように表わすことができる。

$$Q_{day} = \gamma \cdot \int_{t=-t_0}^{t=t_0} I_\theta \cdot \Delta t \quad (6)$$

ここで, I_θ : 斜面の単位面積が, ある時刻の太陽光から単位時間に受ける太陽エネルギー

t : 太陽時角; 日の出 ($-t_0$), 日没 (t_0)

γ : 日照率 (雲などのために直達日射量が減少する割合を日照率でおきかえるものとし, その季節の平均日照率を用いる)。

上式は微小時間 Δt を用いてつぎのような数値積分によって近似的に計算することができる。

$$\begin{aligned} Q_{day} &= \gamma \int_{t=-t_0}^{t=t_0} I_\theta \cdot \Delta t \\ &\approx \sum_{t=-t_0}^{t=t_0} I_0 \cdot P \cdot \cos \epsilon \cdot (N_x \cdot S_x + N_y \cdot S_y + N_z \cdot S_z) \cdot \Delta t \end{aligned} \quad (7)$$

ここで, 太陽光線の方位 A と高度 h は赤緯 δ , 時角 t , および緯度 φ によってつぎのように表わされる。

$$\left. \begin{aligned} \sin h &= \sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos t \\ \cos A &= \frac{\sin h \cdot \sin \varphi - \sin \delta}{\cos h \cdot \cos \varphi} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

(8)式において, $\cos h = 0$ とおくと日の出時刻 $-t_0$ または日没時刻 t_0 がつぎの式から求められる。

$$\cos t_0 = -\tan \varphi \cdot \tan \delta \quad (9)$$

* 東京大学生産技術研究所 第5部

表 1 東京における冬至の真太陽時と地方時の関係

	日 出 時					午 前					午 後					日 没 時	
真太陽時	-4.50	-4.00	-3.00	-2.00	-1.00	0.00	1.00	2.00	3.00	4.00	4.50						
地方時	6.51	7.41	8.41	9.41	10.41	11.41	12.41	13.41	14.41	15.41	16.31						

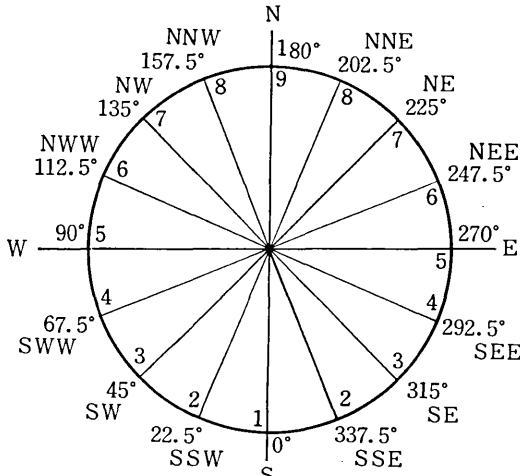


図 1 斜面の方位

ただし、この式から得られる t_i は真太陽時で表現されており地方時間とは異なる。東京における真太陽時と地方時との関係を表 1 に示す。

2. 斜面が冬至に受ける太陽エネルギーの基本量

(6)式を用いて、東京の冬至におけるつぎのケースに対

する太陽エネルギーの基本量を計算した。

- (1) 対象地域：東京 北緯 $\phi=35^{\circ}41'$
- (2) 季節：冬至 赤緯 $\delta=-23^{\circ}27'$
- (3) 透過率： $P=0.75$ (理科年表より)
- (4) 日照率： $\gamma=0.60$ (東京の冬至の日照率 理科年表より)
- (5) 斜面方位
斜面の方位は、図 1 に示す 16 方位を考える。
太陽エネルギーの計算では南北方位に対称な斜面は同じになるので 9 通りの方位について計算を行えばよい。
- (6) 斜面勾配
斜面の勾配は $0^{\circ}, 5^{\circ}, 10^{\circ}, 15^{\circ}, 20^{\circ}, 25^{\circ}, 30^{\circ}, 35^{\circ}, 40^{\circ}, 45^{\circ}, 60^{\circ}, 75^{\circ}, 90^{\circ}$ の 13 の勾配について計算を行う。
- (7) 単位時間：15 分毎の太陽エネルギーを求める。

図 2.1~図 2.9 は東京の冬至における斜面の単位面積が 15 分毎の太陽時刻にうける 1 分あたりの太陽エネルギー I (Kcal/m²·min) を 9 つの斜面方位毎に求めたものである。

図 3 は東京の冬至において、斜面が 1 日に受ける直達

表 2 東京における冬至の終日日射量

(単位 Kcal/m²·day)

斜面勾配 (度)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	60	75	90
斜面の方位													
S	1846.5 1024.8	1236.3 1185.6	2409.9 1337.5	2665.1 1479.1	2900.0 1609.5	311219 1727.7	3302.0 1832.6	3466.1 1923.7	3603.7 2000.0	3714.0 2061.3	3872.8 2149.4	3767.7 2091.1	3405.8 1890.2
SSW SSE	1846.5 1024.8	2113.7 1173.1	2364.9 1312.5	2598.0 1441.9	2811.3 1560.3	3003.3 1666.8	2172.4 1760.7	3317.4 1841.2	3437.1 1907.6	3530.7 1959.5	3648.3 2024.8	3517.3 1952.1	3146.6 1746.4
SW SW	1846.5 1024.8	2049.4 1162.4	2236.6 1241.3	2406.9 1335.8	2558.9 1420.2	2691.4 1493.7	2803.6 1556.0	2894.7 1606.6	2963.7 1644.9	3010.4 1670.8	3014.3 1672.9	2816.9 1563.3	2434.5 1351.1
WSW ESE	1846.5 1024.8	1953.1 1084.0	2044.9 1134.9	2122.0 1177.7	2184.7 1212.5	2232.9 1239.3	2266.7 1258.0	2285.5 1268.5	2291.1 1271.6	2281.8 1266.4	2169.2 1203.9	1938.6 1075.9	1610.6 893.9
W E	1846.5 1024.8	1839.5 1020.9	1819.5 1009.8	1789.8 993.3	1753.3 973.1	1711.2 949.7	1666.1 924.7	1617.3 897.6	1564.9 868.5	1509.1 837.6	1327.1 733.2	1105.5 613.6	868.5 482.0
WNW ENE	1846.5 1024.8	1726.0 957.9	1594.5 884.9	1459.3 809.9	1326.7 736.3	1201.2 666.7	1085.8 602.6	981.1 544.5	886.0 491.7	801.5 444.8	593.7 329.5	435.1 241.5	307.2 170.5
NW NE	1846.5 1024.8	1629.6 904.4	1402.8 778.6	1175.0 652.1	956.8 531.0	758.4 420.9	585.2 324.8	442.1 245.4	329.4 182.8	244.0 135.4	104.8 53.2	50.8 28.2	26.0 14.4
NNW NNE	1846.5 1024.8	1565.3 868.7	1273.0 706.5	977.4 542.5	690.3 383.1	425.7 236.3	203.3 112.8	48.2 26.8	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0
N	1846.5 1024.8	1542.6 856.1	1227.2 681.1	904.5 502.0	583.1 323.6	281.7 156.3	42.0 23.3	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0	0.0 0.0

{ 上段 直達日射量
下段 日照率 (0.6) を考慮した日射量

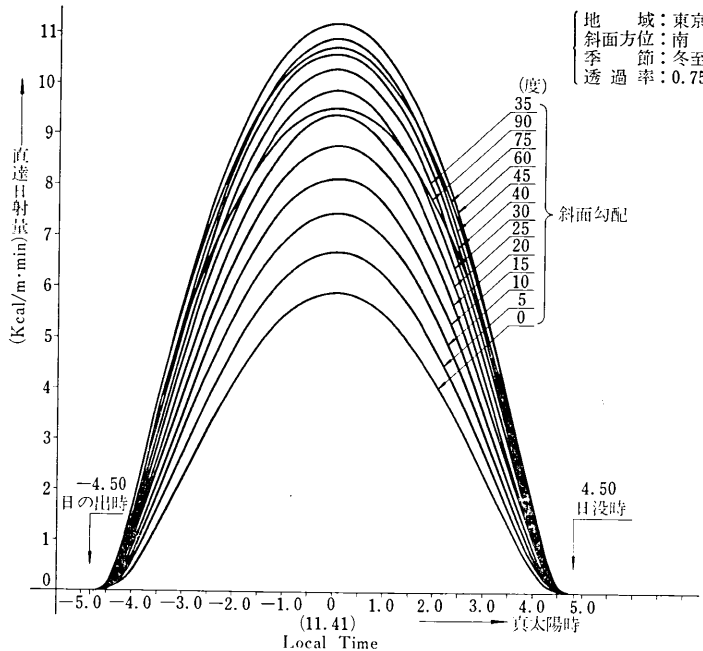


図 2.1 南斜面のうける日射量

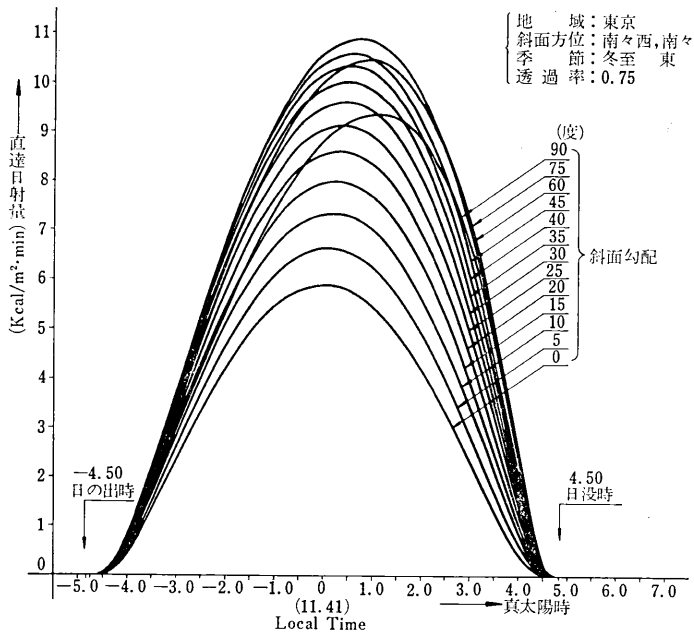


図 2.2 南南東または南南西斜面のうける日射量

日射エネルギー Q_{day} ($Kcal/m^2 \cdot day$) を斜面方位と斜面勾配に関連づけて図にしたものである。表 2 は直達日射量と日照率を考慮した日射量を求めたものである。また、図 4 は斜面が受ける日照時間を示している。

これらの図から以下のことが指摘できる。

- (1) 冬至においては南斜面がもっとも太陽エネルギーを多く受け、北斜面はもっとも少ない。
- (3) 斜面が 1 日の中で受ける太陽エネルギー強度の最

大値 I_{max} はつぎの勾配および時刻でおきる。

斜面方位	I_{max} ($Kcal/m^2 \cdot min$)	時刻	勾配
(1) S	11.25	時 分 0 00	60°
(2) SSE or SSW	10.95	0 45	60°
(3) SE or SW	9.95	1 15	60°
(4) SEE or SWW	8.35	1 45	60°
(5) E or W	6.20	1 45	40°
(6) NEE or NWW	5.92	0 00	0°
(7) NE or NW	5.92	0 00	0°
(8) NNW or NNW	5.92	0 00	0°
(9) N	5.92	0 00	0°

したがって、南斜面は約 60° 近くの斜面がよく、北斜面ほど平坦な斜面がよい。

- (3) 斜面が 1 日に受ける太陽エネルギー Q_{day} の最大値および最小値はつぎに示す勾配でおきる。

斜面方位	Q_{max} ($Kcal/m^2 \cdot day$)	勾配	Q_{min} ($Kcal/m^2 \cdot day$)	勾配
(1) S	3872.8	6.0°	1846.5	0°
(2) SSE or SSW	3648.3	60°	1846.5	0°
(3) SE or SW	3014.3	60°	1846.5	0°
(4) SEE or SWW	2291.1	60°	1610.6	90°
(5) E or W	1846.5	0°	868.5	90°
(6) NEE or NWW	1846.5	0°	307.2	90°
(7) NE or NW	1846.5	0°	26.0	90°
(8) NEE or NWW	1846.5	0°	0.0	40° (以上)
(9) N	1846.5	0°	0.0	35° (以上)

- (4) 斜面の受ける日照時間の最大値および最小値はつぎに示す勾配でおきる。

斜面	最大日照時間	勾配	最小日照時間	勾配
1	時 分 9 15	0°~90°	9 15	0°~90°
2	9 15	0°~90°	9 15	0°~90°
3	9 15	0°	7 45	90°
4	9 15	0°	6 30	90°
5	9 15	0°	4 30	90°
6	9 15	0°	3 18	90°
7	9 15	0°	1 33	90°
8	9 15	0°	0 00	40°~90°
9	9 15	0°	0 00	35°~90°

3. 冬至における斜面の評価

冬においては太陽エネルギーをより多く受ける斜面がよりよい斜面であるという評価関数を仮定したときに、

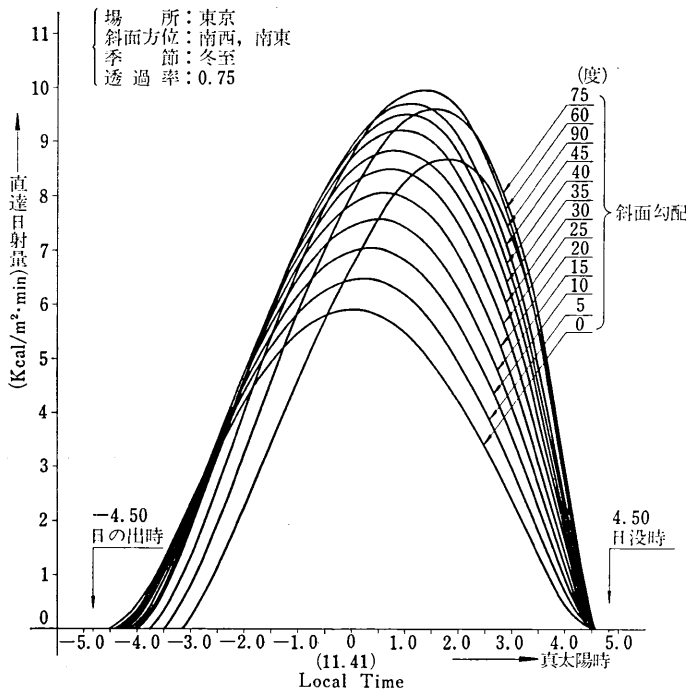


図 2.3 南東または南西のうける日射量

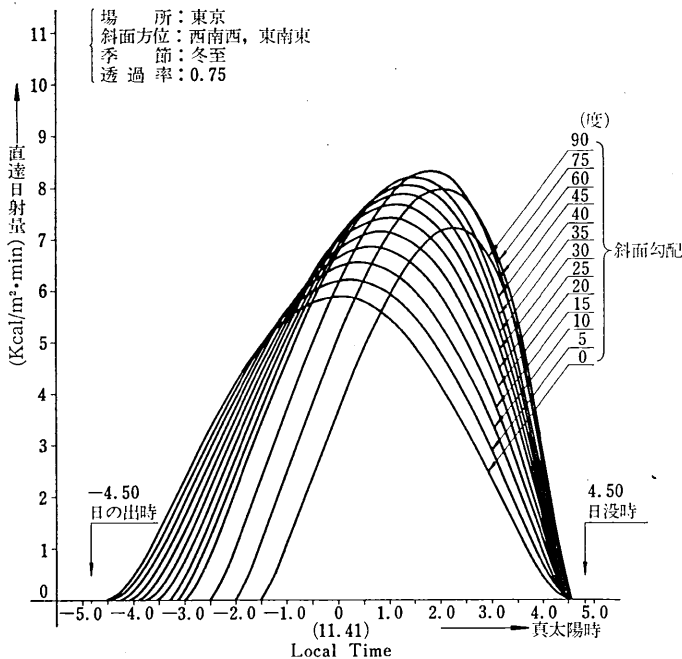


図 2.4 東南東または西南西斜面のうける日射量

表 3 斜面評価の評価基準値

	E (きわめて悪い)	D (悪い)	C (普通)	B (良い)	A (きわめて良い)
Q_{day} (Kcal/m ² ·day)	0~500	500~1500	1500~2500	2500~3500	3500以上
I_{max} (Kcal/m ² ·min)	0~1.5	1.5~4.5	4.5~7.5	7.5~10.5	10.5以上
T (hour)	0~2	2~4	4~6	6~8	8以上
I_4 (Kcal/m ² ·min)	0~1.0	1.0~3.0	3.0~5.0	5.0~7.0	7.0以上

総合的に見てどの方位のどの勾配の斜面がどの程度により斜面であるかを考えてみよう。

太陽エネルギーから斜面の評価を行う場合に、つぎに示すような評価要素を考えた。

(1) 終日日射量: Q_{day}

斜面が冬至の1日間に受ける太陽エネルギー量の総量を評価するのによい。ただし時刻毎の太陽エネルギー強度がわからない。

(2) 最大日射強度: I_{max}

単位時間あたりの太陽エネルギーの最大値 I_{max} で斜面を評価する。ただし、これだけでは持続時間がわからない。

(3) 日照時間: T

斜面の受ける日照時間で評価する。ただし、日照時間のみでは太陽エネルギー量や強度がわからない。

(4) 四時間継続日射強度: I_4

図5に示すように、4時間継続して I_4 以上の日射強度が受けられるような日射強度で評価する。四時間という数字は、最近の日照問題では、四時間の日照時間を確保することが一つの基準になることから選ばれた。

著者らは冬至における斜面評価の判断基準値を表3のように定めて各々の斜面総合評価を試みた。この表の基準値はそれぞれの評価要素の最大値を四等分した値のまわりに5階級の評価基準値となるように選ばれた。

これらの評価基準をそれぞれの方角と勾配の斜面にあてはめて、卓越する評価階級を求めると図6のようになる。

4. 地形曲面が受ける太陽エネルギー

一般に地形は多種多様の斜面のあつまりで構成されている。したがって、地形曲面が受ける太陽エネルギーは地形を構成する斜面が受ける太陽エネルギーを加え合わせればよい。しかし、地形はその起伏のために、時刻によって影になる部分があるので、ある地形が他の地形のために影になるか否かをしらなければならない。

地形曲面が受ける太陽エネルギーを計算するためにはつぎのような手順で行う。

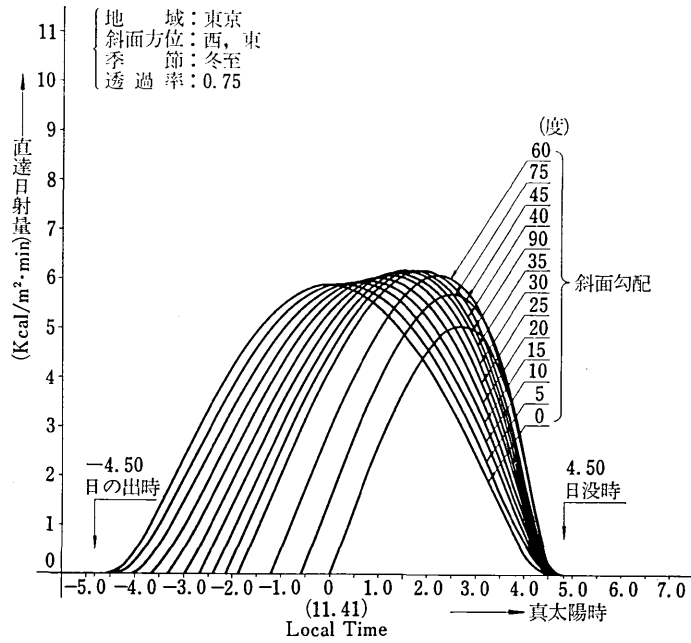


図 2.5 東または西斜面のうける日射量

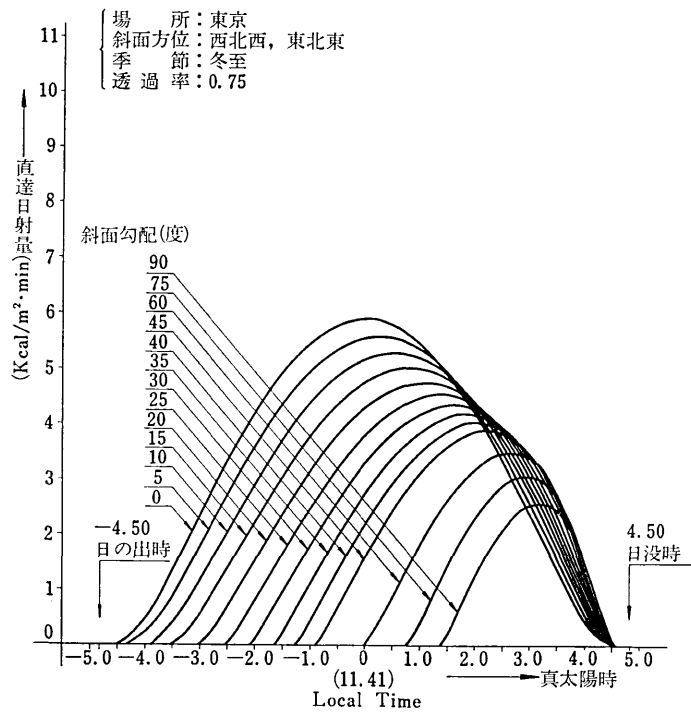


図 2.6 東北東または西北西斜面のうける日射量

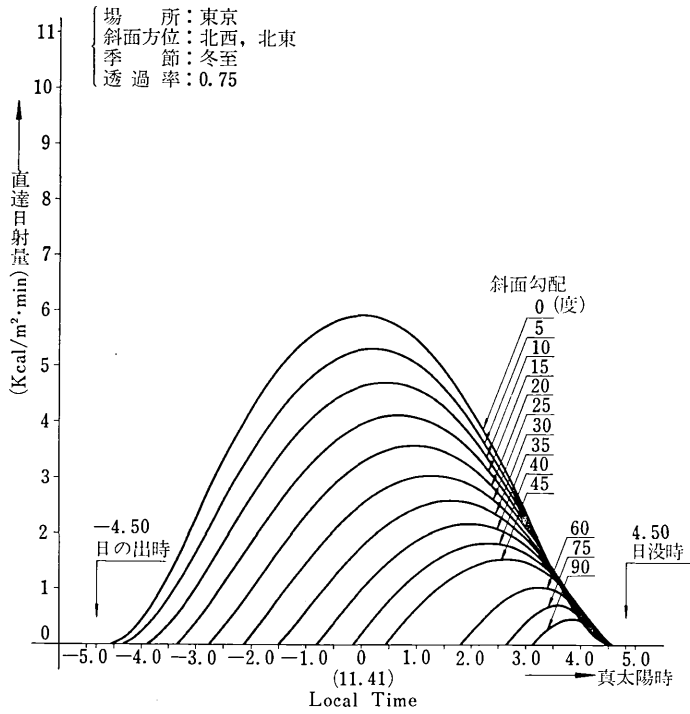


図 2.7 北東または北西斜面のうける日射量

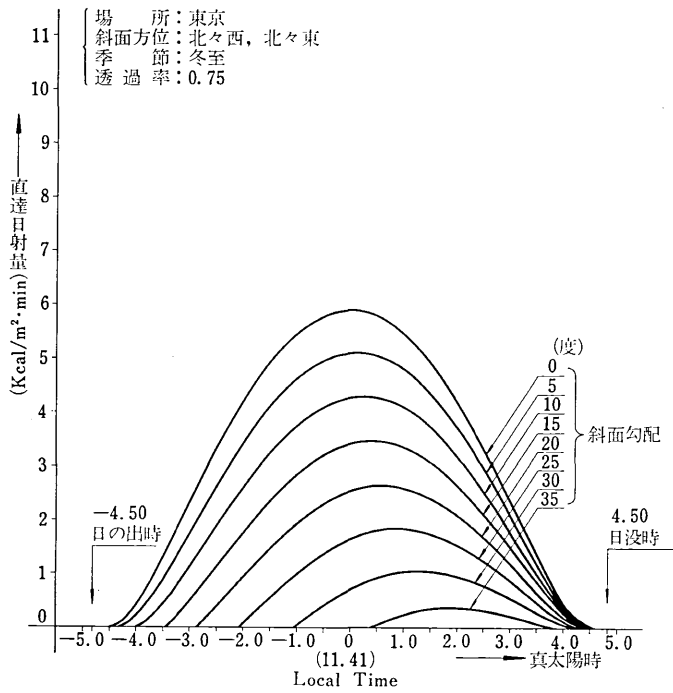


図 2.8 北北東または北北西斜面のうける日射量

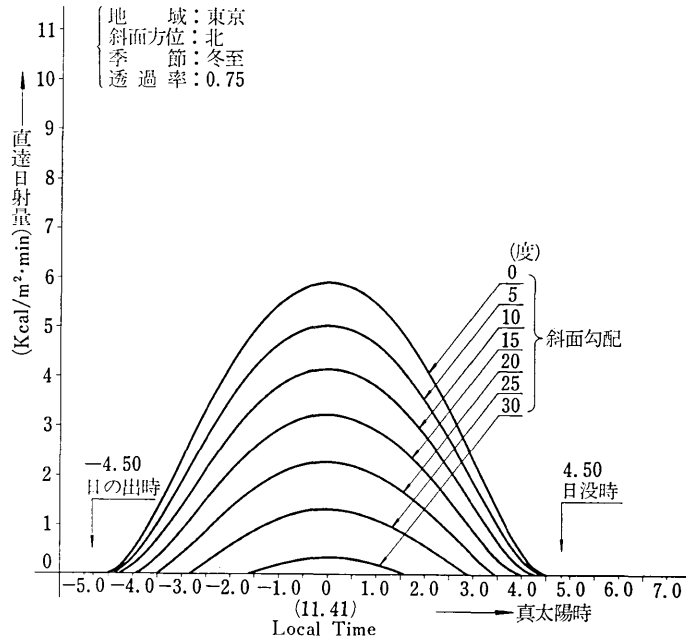


図 2.9 北斜面のうける日射量

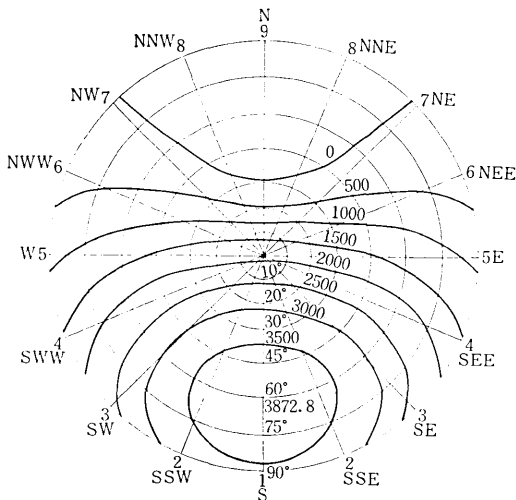


図 3 東京の冬至において斜面のうける終日日射エネルギー (透過率 0.75. 単位 Kcal/m²·day)

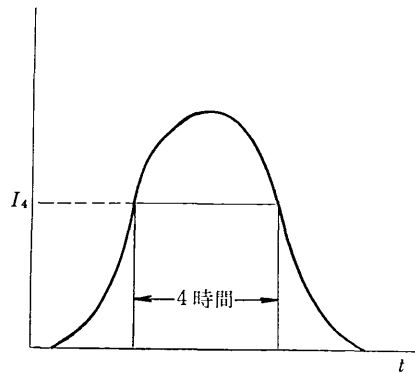


図 5 4時間継続日射強度

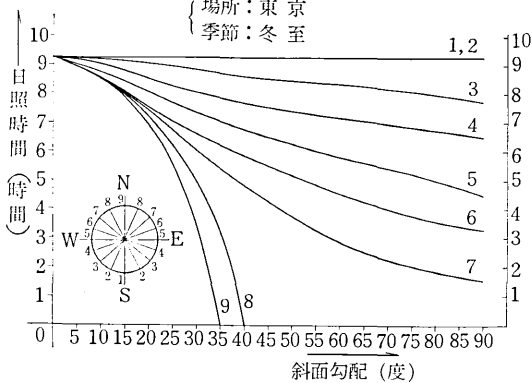


図 4 斜面方向, 斜面勾配による日射時間曲線

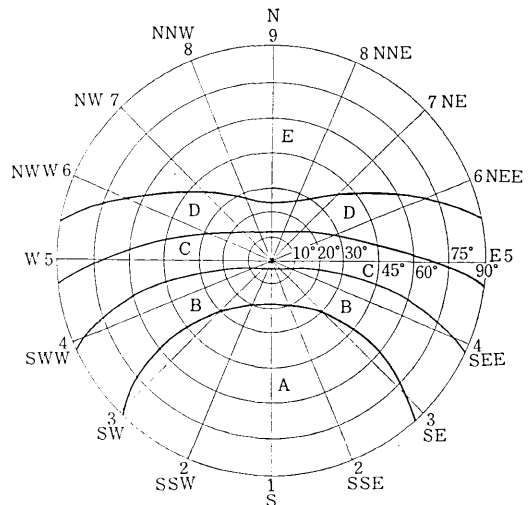


図 6 冬至における斜面の総合評価 (A: きわめてよい, B: よい, C: 普通, D: わるい, E: きわめてわるい)

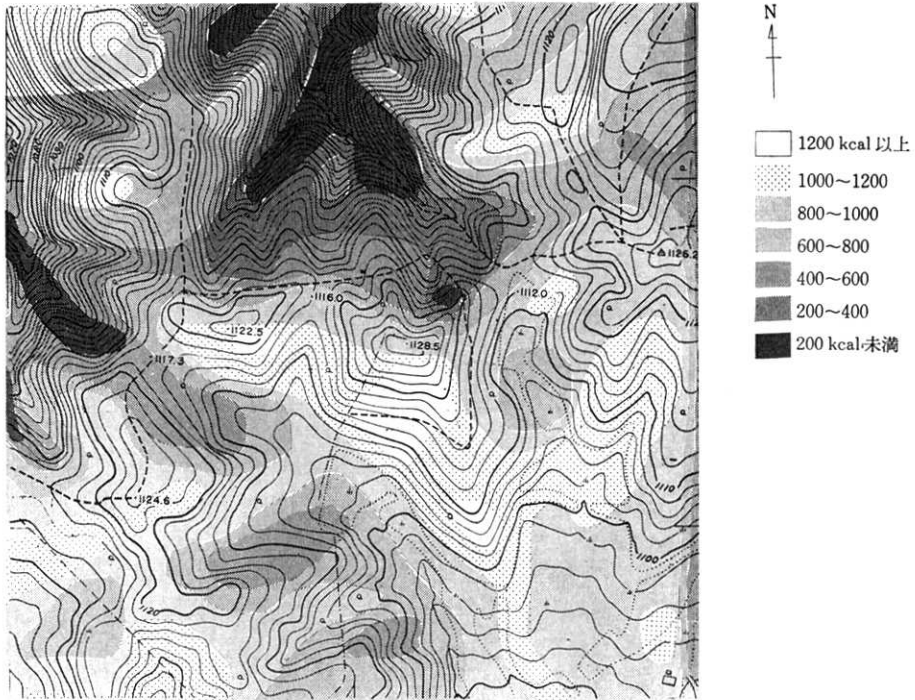


図7 冬至における1日の太陽エネルギー図

- (1) 地形標高 (Z_{ij}), 緯度 (ϕ) の入力.
- (2) 季節 (δ), 透過率 (P), 日照率 (r) の入力.
- (3) 日の出時刻 ($-t_0$) または日没時刻 (t_0) の算出.
- (4) $-t_0 \leq t \leq t_0$ における太陽光線の方位 A と高度 h の計算.
- (5) (i, j) の地形の斜面方位および斜面勾配の計算
- (6) (i, j) 点が影でなければ, その時刻の太陽エネルギーを計算する. もし影であれば零とおく.
- (7) すべての地形点およびすべての時刻について以上の計算を行い, 斜面が受ける1日の太陽エネルギーを求積する.

上記の手順に従って, ある任意の斜面について冬至における1日の太陽エネルギーを求め, 地形図と重ね合わせて濃淡図にしたものが図7である.

む す び

本研究は, 斜面が冬至にうける太陽エネルギーの特性を把握し, 斜面の評価を行おうとしたところに特色がある. 現在は, 都市建築の日照についての問題が多発しているが, 本研究はむしろ, 農業, 林業, ゴルフ場設計, 道路々面凍結などの問題に本手法を応用することを目標としている.

地形曲面が受ける太陽エネルギーの問題について, 今後さらに応用性と実用性の面で発展させてゆきたいと考えている.
(1973年5月25日受理)

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) 気象庁: 気象ポケットブック
- 4) 東京天文台: 理科年表, 丸善
- 5) 小木曾定彰: 都市の中の日照, コロナ社