

日本における月平均全天日射量および その年々の変動度のマップの作成*

吉田作松** 篠木誓一***

要 旨

従来の全天日射量マップが、精度、地点数、統計年数からみて不十分なので、これらを改善したマップの作成が試みられた。

まず、最近気象官署で使用されるようになったA型日射計データのうち、厳密なチェックのうえ、39地点における966ヶ月分のデータを用い、全天日射量に影響すると思われる各種因子について、気象学的考察、事例解析、統計解析を行ない、最終的に、独立変数として日照率、積雪日数および太陽高度を用いた全天日射量推定式が得られた。この式による全天日射量推定誤差は、4.5%である。

次に、上の式により、153気象官署における1941年～1970年の毎年毎月の全天日射量が計算され、これを用いて、全天日射量の平年値およびその年々の変動度のマップが作成され、最後に、各マップのパターンの特徴について、気候学的考察が行なわれた。

1. まえがき

☐ 全天日射量マップが、気候学や農業に重要なことは言うまでもないが、さらに最近、太陽エネルギー利用技術開発のため、いっそう精密なマップが必要になってきた。

これまでもいくつかの世界マップ(例えば、Löf・Duffie・Smith, 1966; Perrin de Brichambaut, 1968)や国別マップ(例えば、Black, 1960; Bennett, 1965)が作成されたが、データが質・量ともに不足のため、内容は一般に不十分である。

わが国においても、これまでに全天日射量マップが数回作成された(Sekihara, 1964; Kondo, 1967; 村井・山内, 1975; 日本気象協会, 1975)。しかし、これらもやはり、次の理由により、満足なものとは言えない。

(1) 最近まで使用されたロビッチ式日射計の精度が不安定で、数十%の誤差が見られることさえある。

(2) これまでのマップ作成に用いられた観測地点数

(60内外)は、たしかに諸外国の場合に比べて多いが、それでも、吉田・中西(1970)が示すように、気候分布が複雑なわが国にとって、決して十分ではない。

(3) 多くの観測点がそろっている年数は案外短かくて、日射量の平年値や年々の変動度についての、信頼できるマップを得ることは困難であった。

この研究は、上述の状況を改善することを目的として、1971年以降、一部の気象官署に設置された、精度の高い熱電対式A型全天日射計によって観測されたデータを用いて、実用的に十分な精度をもつ月平均全天日射量推定式を作成し、これにより全国気象官署153地点における1941年～1970年の30年間の毎年毎月の全天日射量を計算し、わが国における全天日射量の平年値ならびに年々の変動度のマップを作成したものである。

2. 研究の方針

月平均全天日射量の推定式の主なものとしては、次に示すように、Kimball(1919)とÅngström(1924)によって提案された(1)式、Black・Bonython・Prescott(1954)が初めて用いたと言われる(2)式、Savinov-Ångström公式(Kondratyev, 1969)と言われる(3)式、Black・Bonython・Prescott(1954)、Stanhill(1962)らによって用いられた(4)式などがある。

$$Q/Q_{cl} = a + b \cdot S/S_0 \quad (1)$$

* Preparation of the Maps of Monthly Mean Global Solar Radiation and its Year to Year Variability for the Japanese Islands.

** S. Yoshida, (財)日本気象協会研究所

*** S. Shinoki, 同上

—1977年9月5日受領—

—1978年4月3日受理—

$$Q/Q_0 = a + b \cdot S/S_0 \quad (2)$$

$$Q/Q_{cl} = 1 - (1-k)C_d \quad (3)$$

$$Q/Q_0 = a + bC_d + cC_d^2 \quad (4)$$

Q : 月平均全天日射量

Q_{cl} : 快晴日の月平均全天日射量

Q_0 : 大気外の月平均全天日射量

S : 月平均日照時間

S_0 : 月平均可照時間

C_d : 月平均雲量

a, b, c : 係数

本研究においては、梅雨や日本海側の冬の季節風のため、 Q_{cl} を四季にわたって定めることが非常に困難であること、また、 C_d は昼間雲量であるべきであるが、その算出には非常に手間がかかること、および、その代用としての日平均雲量と昼間雲量とは必ずしも等しくないことを考慮して、(2)式を用いることとする。

しかしながら、Glover・McCulloch (1958)、Bennett (1964) ならびに Löf・Duffie・Smith (1966) らの研究にみるように、(2)式の a, b は、気候および地理的各種因子に影響されると考えられる。

それゆえ、本研究においては、気象官署における観測要素など、入手が容易な因子を対象とし、(2)式の精度向上に有効な因子の有無について、事例解析および統計解析により、検討を行なう。

3. 解析に使用したデータ

3.1 地点

日射観測気象官署67地点のうち、気象業務法による普通気候観測が行なわれていない館野高層気象台、およびA型全天日射計の設置が遅れている宮古島地方気象台を除く65地点。

3.2 期間

A型全天日射計による観測開始から1976年2月まで。地点によって年数が異なる(2年~4年)。

3.3 収集したデータの種類

①月平均全天日射量 ②月平均日照率 ③月平均雲量 ④月平均蒸気圧 ⑤月間積雪日数(0 cm 以上, 10 cm 以上, 20 cm 以上) ⑥地点の緯度, 経度, 標高 ⑦地点の陸地率(半径 1 km 以内の陸地の割合) ⑧太陽赤緯(各月 15 日の値, 連続 4 年平均) ⑨大気外全天日射量の月平均値(仙台管区気象台, 1969)。

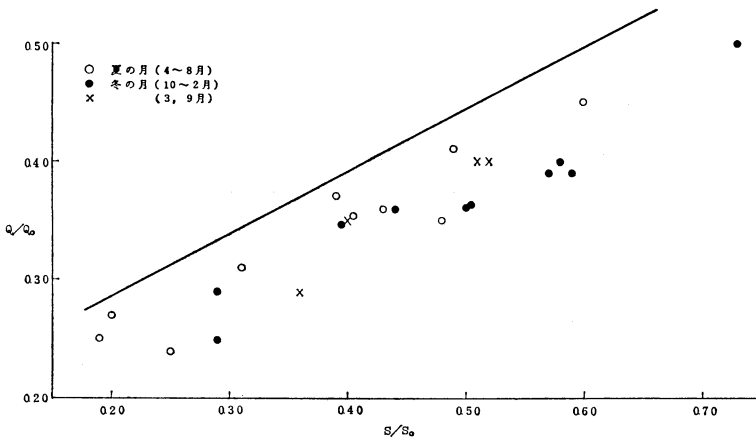
3.4 全天日射量データのチェック

A型全天日射計の精度は、±2.5% で、かなり高いとされている。しかし、現場で大量に使用されたのは1973年以後であって、まだ十分な試練を経していないし、途中で小改良を加えたりしており、これまでのデータに不安がないとは言えない。

本研究の第1段階は、できるだけ精密な推定式を作成することなので、その基礎となる全天日射量データについて、次のような処理ならびにチェックを行なった。

(1) 欠測日の処理

全天日射量が1カ月に4日以上欠測した月のデータは



第1図 Q/Q_0 に及ぼす大気汚染の影響を示す例。東京(気象庁), 1974年7月~1976年6月。直線は(6)式による全国平均を表わす。

使用しないこととした。月単位での気候値が歪むことを避けるためである。これに該当したのは、第1表の期間内で6件である。

全天日射量の欠測が3日以内の場合には、同じ日の日照時間を欠測扱いにし、両者とも同一日数について月平均値を算出して、使用した。

(2) $Q/Q_0 \sim S/S_0$ 関係によるチェック

観測状況が良好な地点における $Q/Q_0 \sim S/S_0$ 関係は、ほぼ直線的である。この性質を利用し、次の3種類のチ

ェックを行なった。

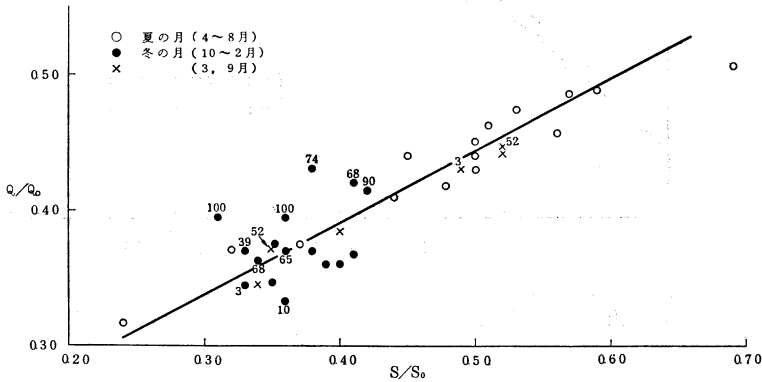
①経年変化：器械係数の変化が発見できる。

②地域比較：周辺に比べて著しくずれている地点のデータは、疑わしい。

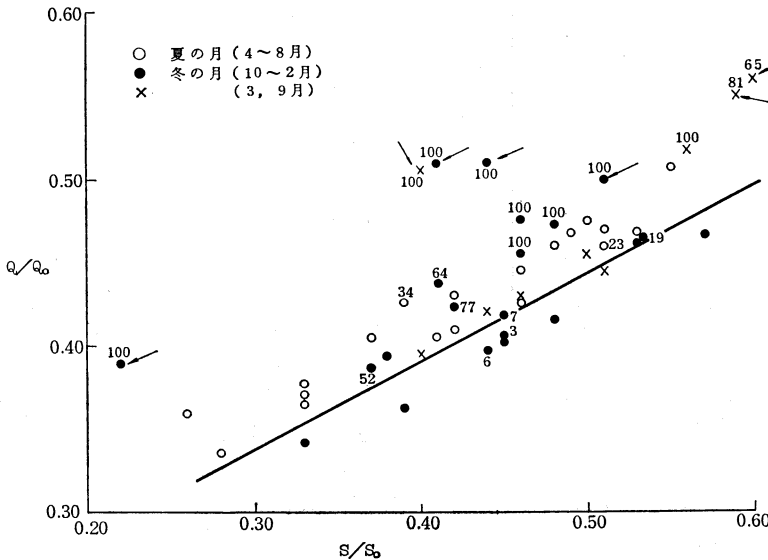
③太陽高度ごとの比較：太陽高度帯別（5° 間隔）の $Q/Q_0 \sim S/S_0$ 関係のプロットは、ばらつきが小さいので、異常データを発見しやすい。

(3) 大気汚染地域の取り扱い

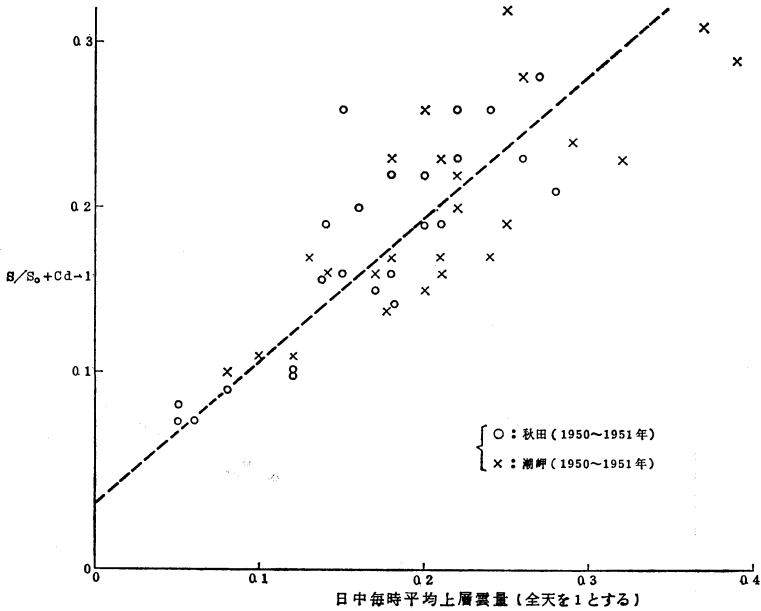
大気汚染が日射量に影響することは当然であるが、曇



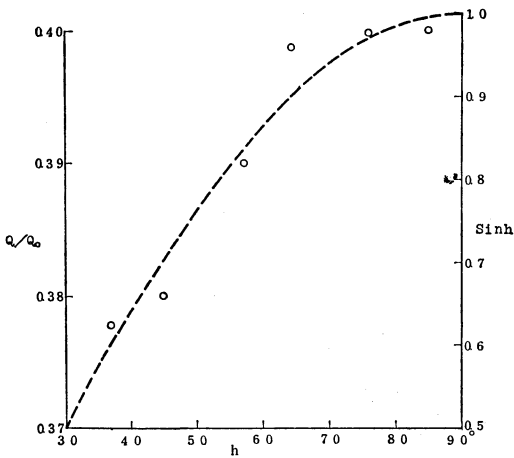
第2図 Q/Q_0 に及ぼす積雪の影響を示す例。山形，1973年7月～1976年7月。付記した数字は積雪10cm以上の日数の月中出現率(%)。直線は(6)式による全国平均を表わす。



第3図 Q/Q_0 に及ぼす積雪と流氷の影響を示す例。網走，1972年7月～1976年7月。付記した数字は積雪10cm以上の日数の月中出現率(%)。矢印は流氷が接岸した月。直線は(6)式による全国平均を表わす。



第4図 $S/S_0 + C_d - 1$ の月平均値と月平均上層雲量の関係。全雲量 (C_d) と上層雲量は昼間の毎時平均。1950年～1951年の秋田と潮岬。



第5図 $S/S_0 = 0.35 \sim 0.45$ に対する Q/Q_0 (白丸) と太陽高度 h (各月15日の南中時の値) の関係。点線は $\sin h$ を表わす。

この研究で使用したデータの期間では、東京は、第1図に示すように、大気汚染の影響がたしかに大きく、汚染の季節変化のため点のばらつきも大きいので、解析から除かれたが、大阪を含めた、その他の大都市では、その影響は認められなかった。

大阪については、最近、佐藤 (1976) により、1960年には年間160日にもなった濃煙霧日数が、1975年には終戦直後とほぼ等しい3日程度になっていることが指摘されている。

(4) 流水の影響

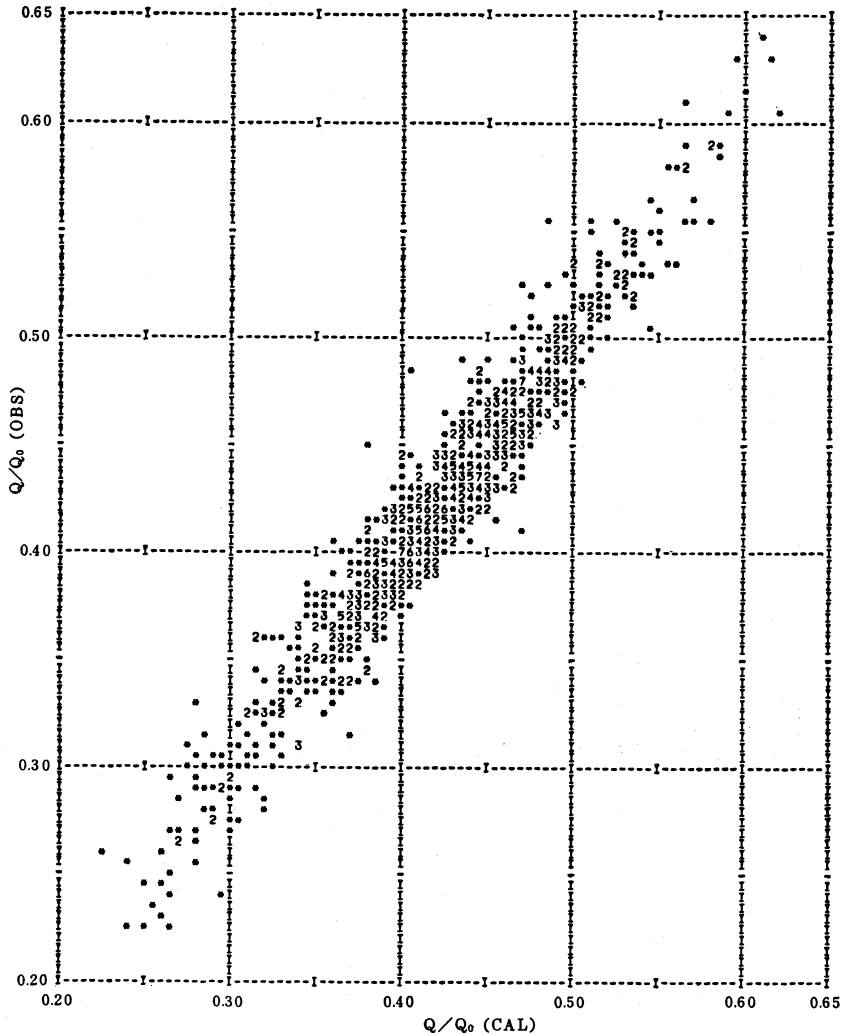
積雪地方の地点について $Q/Q_0 \sim S/S_0$ 関係をプロットすると、第2図に例示するように、積雪のある月の Q/Q_0 が大きいのが普通である。これは、地表と天空(雲)との多重反射により説明される(吉田, 1970 a)。

ところが、網走の場合を見ると(第3図), 少なくとも4個のプロット点で示される Q/Q_0 が異常に大きいことが分かる。この原因は、次の理由により、おそらく流水と考えられる。

すなわち、Konratyev (1969) や Hunn・Calafell (1976) によれば、氷と雪におおわれた水面のアルベドが約70%、開水面のそれが10%以下(月平均値)であるから、流水が接岸しているか否かが、沿岸における平

天日をも含む月平均全日射量に及ぼす影響を厳密に評価することは、容易ではない。

Kondo (1967) の見積もりによれば、1961年～1964年の期間には、東京と大阪で約20%の減、その他の大都市で0～10%の減となっている。



第6図 (5)式による Q/Q_0 の計算値 (CAL) と実測値 (OBS) との比較。
*印は点1個を示し、数字は、点が重なる場合の、点の数を示す。

均アルベドに大きく影響するに違いない。

第3図で、実際に流氷が接岸した月を矢印で示したが、同じ積雪日数の他の月に比べて、流氷接岸月の Q/Q_0 が大きいことが明らかに認められる。

以上により、 $Q/Q_0 \sim S/S_0$ 関係図と流氷記事を比較し、流氷の影響が大きいと判断される月を、解析対象から除いた。該当したのは、網走が6ヵ月、北見枝幸が1ヵ月である。

上述の各チェックを行なって、最終的に解析対象に採用したデータの地点、期間、ならびに関連資料を、ま

めて第1表に示す。延月数は966、このうち10 cm以上の積雪があった月数は121である。

4. 解析に使用した因子

Q/Q_0 の推定に役立ちそうな因子のうち、過去30年さかのぼっても容易に入手できるものを、重相関解析の対象として選ぶこととした。そのための考察結果を、次に述べる。

4.1 日照率 (S/S_0)

日照時間 (S) は、ジョルダン日照計による値である。日出・日没方向に山などの障害物があっても、 S/S_0 の

第1表 解析に使用したデータの地点、期間、関連気候値などの一覧表。

地 点	番 号	緯 度	経 度	標 高	海岸度 (半径1km)	月平均日照率 (平年値)の			月平均蒸気圧 (平年値)の			間積 日数 10cm 以上の 年	解析に用いた データ 期間		月 数
						平均	最大	最小	平均	最大	最小		始まり	終わり	
北見 枝 幸	402	44° 56'	142° 35'	6	53	0.36	0.46	0.25	8.6*	18.2*	31*	139	1974年 4月	1976年 2月	22
留 萌	406	43° 57'	141° 38'	22	80	0.36	0.48	0.11	9.6	20.8	3.5	120	1973年 5月	1976年 2月	34
網 走	409	44° 01'	144° 17'	38	33	0.45	0.51	0.40	8.8	19.3	2.9	100	1972年 7月	1976年 2月	38
札 幌	412	43° 03'	141° 20'	17		0.44	0.51	0.34	9.5	20.8	3.3	113	1974年 7月	1976年 2月	20
寿 都	421	42° 47'	140° 14'	16	60	0.38	0.48	0.14	10.1	21.8	3.7	98	1973年 5月	1976年 2月	34
室 蘭	423	42° 19'	140° 59'	43	25	0.42	0.52	0.29	10.0	21.5	3.6	23	1973年 5月	1976年 2月	34
浦 河	426	42° 10'	142° 47'	34	49	0.47	0.58	0.33	9.8	21.1	3.4	12	1974年 1月	1976年 2月	26
青 森	575	40° 49'	140° 47'	4		0.40	0.51	0.19	10.9	22.8	4.3	99	1975年 6月	1976年 2月	9
八 戸	581	40° 32'	141° 32'	27	40	0.46	0.52	0.38	10.7	22.7	4.0	23	1973年 7月	1976年 2月	32
秋 田	582	39° 43'	140° 06'	9		0.39	0.52	0.17	11.8	24.6	4.4	51	1974年 7月	1976年 2月	20
盛 岡	584	39° 42'	141° 10'	155		0.45	0.50	0.37	10.8	23.1	3.8	57	1974年12月	1976年 2月	15
酒 田	587	38° 54'	139° 51'	3		0.41	0.58	0.18	12.5	25.5	5.0	31	1973年10月	1976年 2月	28
山 形	588	38° 15'	140° 21'	151		0.41	0.50	0.27	11.7	23.7	4.6	63	1973年 7月	1976年 2月	32
仙 台	590	38° 16'	140° 54'	38		0.44	0.52	0.30	12.0	25.0	4.5	5	1974年 2月	1976年 2月	25
福 島	595	37° 45'	140° 29'	67		0.44	0.53	0.35	12.2	24.9	4.6	12	1973年 6月	1976年 2月	33
小 名 浜	598	36° 57'	140° 54'	3	40	0.48	0.64	0.35	13.0	25.8	4.9	1	1974年 3月	1976年 2月	24
輪 島	600	37° 23'	136° 54'	5	25	0.41	0.59	0.16	13.4	26.5	5.5	28	1975年 3月	1976年 2月	12
富 山	607	36° 42'	137° 12'	9		0.40	0.54	0.22	13.7	26.7	5.7	48	1973年 5月	1976年 2月	34
高 田	612	37° 06'	138° 15'	13		0.41	0.55	0.26	13.3	26.2	5.3	88	1973年 9月	1976年 2月	30
松 本	618	36° 15'	137° 58'	610		0.54	0.61	0.44	10.9	21.8	3.9	11	1972年 6月	1976年 2月	45
古 屋	636	35° 10'	136° 58'	51		0.50	0.59	0.37	14.1	27.1	5.5	1	1974年 1月	1976年 2月	26
前 崎	655	34° 36'	138° 13'	45	33	0.53	0.68	0.37	15.7	29.3	6.0	0	1975年 7月	1976年 2月	8
静 岡	656	34° 58'	138° 24'	14		0.49	0.67	0.33	14.2*	26.6*	5.4*	0	1973年 9月	1976年 2月	30
大 島	675	34° 46'	139° 23'	190		0.42	0.55	0.29	14.9	27.4	6.1	0	1972年 8月	1976年 2月	43
八 丈 島	678	33° 06'	139° 47'	79		0.40	0.55	0.27	17.6	29.4	8.5	0	1974年12月	1976年 2月	15
浜 田	755	34° 54'	132° 04'	20	27	0.44	0.61	0.23	14.1	26.8	5.9	1	1974年 6月	1976年 2月	21
下 関	762	33° 57'	130° 56'	46	47	0.44	0.57	0.29	14.9	28.0	6.2	0	1973年 6月	1976年 2月	33
広 島	765	34° 22'	132° 26'	29	53	0.50	0.58	0.40	14.4	27.4	5.8	1	1974年 3月	1976年 2月	23
大 阪	772	34° 41'	135° 31'	23		0.47	0.57	0.38	14.1	26.5	5.7	0	1974年12月	1976年 2月	15
潮 岬	778	33° 27'	135° 46'	73	33	0.53	0.63	0.38	16.0	29.5	6.4	0	1974年12月	1976年 2月	15
大 分	815	33° 14'	131° 37'	5		0.48	0.55	0.36	15.0	27.7	6.1	0	1973年 9月	1976年 2月	30
長 崎	817	32° 44'	129° 52'	27	33	0.46	0.60	0.34	15.7	28.6	6.7	1	1975年 5月	1976年 2月	10
鹿 児 島	827	31° 34'	130° 33'	4	25	0.48	0.57	0.34	16.6	28.7	7.5	0	1975年 4月	1976年 2月	11
高 知	887	33° 50'	132° 47'	32		0.49	0.60	0.40	14.6	26.9	6.1	0	1972年 5月	1976年 2月	46
高 知	893	33° 34'	133° 33'	1		0.51	0.63	0.36	15.5	29.5	5.9	0	1973年 6月	1976年 2月	29
清水(足摺)	898	32° 43'	133° 01'	31	53	0.52	0.63	0.37	16.5	29.8	6.8	0	1974年12月	1976年 2月	15
那 覇	936	26° 14'	127° 41'	35		0.47	0.67	0.33	21.9	30.9	13.0	0	1975年11月	1976年 2月	4
父 島	971	27° 05'	142° 11'	3	53	0.54*	0.69*	0.40*	22.8*	30.2*	14.0*	0	1974年 3月	1976年 2月	24
南 鳥 島	991	24° 18'	153° 58'	9	38	0.67*	0.77*	0.53*	25.0*	29.5*	18.0*	0	1974年 4月	1976年 2月	23
計															966

(1) 平年値は1941~1970年の30年平均値であるが、*印の欄のみは1971~1975年の平均値である。
 (2) データ期間中から、流水の影響、または1か月中の欠測日数が4日以上の月を除いてある。
 (3) 高度=100-陸地率

修正は行なわない。

4.2 うすい雲の量を示す指数 ($S/S_0 + C_d - 1$)

菊地原 (1962) および吉田 (1968b) は、太陽高度がある程度高い場合には、上層雲または薄い中層雲があっても、ジョルダン日照計が記録することを指摘した。

このような場合には、日照時間は同じでも、太陽面に雲がない場合に比べて Q が小さいはずである。したがって、日照計が記録する程度にうすい雲の量を因子にしたいのであるが、これについては、次のように取り扱った。

月平均の場合、 $S/S_0 + C_d - 1$ (C_d は全雲量) と上層雲量との関係を、秋田と潮岬を例にとって示したのが第4図で、これにより、 $S/S_0 + C_d - 1$ をうすい雲の量の指数とみなせることが分かる。

なお、解析に使用する C_d は、1日4回観測による月平均値で、昼間だけの平均値よりわずかに少ない傾向があるが、今回はこの点を無視する。

4.3 太陽高度指数 ($\sin h$)

第2図および第3図を注意深く見ると、積雪月を別として、同一の S/S_0 に対する Q/Q_0 が、冬半年より夏半年に大きいことが分かる。

これを端的に示したのが第5図である。図の白丸は、 S/S_0 が0.35~0.40の場合の Q/Q_0 の平均値を、太陽高度 (h , 各月15日の南中時の高度) の 5° 間隔ごとに求め、高度間隔3個ずつの移動平均をとったものである。点線は $\sin h$ を表わすが、この図により、 Q/Q_0 に対して $\sin h$ がきいてるとみなされる。

ただし、この関係は、Haurwitz (1948) やシュルギン (1970) などによって示された、太陽高度が高いほど全日射量が多いという現象のほか、全日射計の太陽光線入射角特性や温度特性による、日射量観測誤差の季節変化をも、あわせ示しているのかもしれない。

4.4 積雪指数 (G)

Chizhevskaja (1964), N. Robinson (1966), 吉田 (1970a) らが示すように、全日射量に対する積雪の有無の影響は大きい。

本研究においても、各地の $Q/Q_0 \sim S/S_0$ 関係に積雪の影響が明らかに認められた。第2図はその一例である。

したがって、積雪日数を解析用因子に採用する必要があるが、実際には、1か月の日数の不整をなくすため1か月の日数に対する割合で表わし、これを積雪指数 (G) とする。さらに、積雪0cm以上、10cm以上および20cm以上のそれぞれに対する G を、 G_{00} , G_{10} , G_{20} と

し、これらのうち最も有効な指数を選ぶこととした。

4.5 陸地率 (l)

全日射に対する水面のアルベドの月平均値は、10%以下である (Kondratyev, 1969)。したがって、前項で述べた積雪効果は、海岸に近い観測地点では弱められるに違いない。

しかしながら、どれだけ範囲のアルベドが全日射量に影響するのか、今のところよく分からないので、その範囲を仮に半径1kmとし、その範囲内の陸地の割合を陸地率 (l) とした。

そして、全日射量に対する積雪効果は $G \times l$ に比例するものとし、 l が有効な因子であるか否かを検討することとした。なお、解析用の39地点のうち、海岸度 (= $1 - l$) が30%以上の地点数は15である (第1表)。

4.6 大気蒸気圧 (e)

日射の吸収に大きな役割を演ずるので、解析対象因子とする。

4.7 緯度指数 ($\cos \varphi$)

全日射量推定式の因子の一つに、 $\cos \varphi$ を用いた例が二、三あるので、その有効性をチェックする。

4.8 その他

Bennett (1964, 1965) が、米国における全日射量推定式を作成する際には、標高を因子として用いる必要があった。標高2,000m~3,000mの高地が多いからである。しかし、わが国では松本の610mを除き観測地点の標高が低いので、標高を因子として考慮する必要はない。

また、大気汚染については、すでに述べたように、東京を除いて、その影響ははっきりしないし、大気汚染の程度を表わす適当な指数も得られないので、因子として取り上げない。

5. 全日射量推定式の作成

Q/Q_0 の推定式として (2) 式を用い、さらに、同式の a , b は、前節 4.2~4.7 の各因子の1次式で表わされるものとした。すなわち、

$$a = a_0 + a_1(S/S_0 + C_d - 1) + a_2 \cdot \sin h + a_3 \cdot lG + a_4 \cdot e + a_5 \cdot \cos \varphi$$

$$b = b_0 + b_1(S/S_0 + C_d - 1) + b_2 \cdot \sin h + b_3 \cdot lG + b_4 \cdot e + b_5 \cdot \cos \varphi$$

つまり、 $S/S_0 + C_d - 1$, $\sin h$, lG , e , $\cos \varphi$, S/S_0 , $(S/S_0 + C_d - 1)S/S_0$, $\sin h \cdot S/S_0$, $lG \cdot S/S_0$, $e \cdot S/S_0$, $\cos \varphi \cdot S/S_0$ の11個の因子を設定し、これらの中から、 Q/Q_0 の推定に有効な因子を重回帰分析によって選定し、それら有効因子による推定回帰式の作成を行なった。そ

第2表 Q/Q_0 の推定に有効な因子の順位, および因子の増加に伴う重相関係数と標準誤差の変化.

ステップ	1	2	3	4	5
因子	S/S_0	G_{10}	$\sin h$	$(S/S_0 + C_d - 1) \cdot S/S_0$	$S/S_0 \cdot \sin h$
重相関係数	0.9520	0.9606	0.9646	0.9654	0.9655
標準誤差 rms	0.0206	0.0187	0.0177	0.0175	0.0175
rms の減少		0.0019	0.0010	0.0002	0.0000

第3表 日本における a と b の値の例 ($Q/Q_0 = a + b \cdot S/S_0$).

地点	緯度	データの期間	a	b	文献
仙台	38°16'N	1958~1959年 1961~1964	0.16	0.60	関原・鈴木 (1967)
福岡	33°35'N	1960~1964	0.22	0.48	〃
鹿児島	31°34'N	1958	0.20	0.50	〃
札幌	43°03'N	1965~1969 (夏季のみ)	0.21	0.48	吉田 (1970 a)
仙台	38°16'N	1967~1969	0.18	0.53	吉田・中西 (1970)
日本の平均	24°~45°N	1973~1976	0.18	0.53	本研究の(6)式

の結果を次に述べる.

5.1 有効因子の選定

3種の積雪指数 (G_{00} , G_{10} , G_{20}) と2種の陸地率 ($l = 1$, $l = 1$) のすべての組み合わせのケースについて, 重相関解析 (要因増加法) を行なった結果, $G = G_{10}$, $l = 1$ の場合に最も相関が高いことが分かった.

この場合における選ばれた因子の順位 (表ではステップ), ならびに, 因子が増加するにつれて重相関係数が大きくなり, 標準誤差が小さくなる模様を, 第2表に示す.

表には, ステップ6以下を省略してあるが, Q/Q_0 の推定式の因子として, S/S_0 , G_{10} , $\sin h$ の3個を用いれば十分であることが知れよう.

積雪指数として積雪10cm以上をとる方がよいことについては, 次のように考えられる. すなわち, 降雪直後は, 観測所周辺はすべて積雪におおわれるが, 時間が経つにつれて, 融雪のため, 観測所の雪尺が示す積雪深と周辺の積雪状況との関係は複雑になる (吉田, 1953). そして, 付近一帯が積雪におおわれる状況に対応する観測所の積雪深は, 平均して約10cm以上であることを, 上の結果が意味している.

5.2 全天日射量推定式

前項において有効と認められた3因子による推定式を, 最小自乗法で求めた結果は, 次のとおりである.

$$Q/Q_0 = 0.146 + 0.534 S/S_0 + 0.047 G_{10} + 0.036 \sin h \quad (5)$$

(重相関係数=0.965, 標準誤差=0.018)

(5)式は, 積雪が Q/Q_0 を, 最大で0.047 (平均的 $Q/Q_0 = 0.40$ の12%) 増加させることを意味する. 同様に, 太陽高度については, わが国における h の最大 (石垣島6月の89°) と最小 (稚内12月の21°) の差は, Q/Q_0 に対して6%の変化を与える.

ただし, このような, Q/Q_0 に対する各因子の寄与割合の評価は, 純粋に統計的なもので, 物理的なものではない. すなわち, 上に取り上げた因子と相関のある他の (ここに取り上げない) 因子の効果も含むものである.

(5)式による Q/Q_0 の計算値と実測値の比較を, 第6図に示す. (5)式の標準誤差=0.018は, 平均的 Q/Q_0 である0.40に対して, 4.5%に相当する.

誤差の原因は, (1)全天日射量および関連因子の測定誤差 (2)他の因子 (大気汚染, 大気蒸気圧, 雲など) の無視 (3)回帰式が1次式であること, などにあると考えられる. それにしても, 誤差4.5%という精度は, Q/Q_0 の推定式として, 現在のところ最良に属する.

5.3 従来の結果との比較

これまでに, (2)式の a と b の値を求めた例は多い. 本研究のデータのうち, 積雪日を全く含まない676か月分を用いて, (2)式の係数を求めると,

$$a = 0.179 \quad b = 0.528 \quad (6)$$

となる.

わが国でこれまでに a , b を算出した例のうち, 全天

日射量としてエプリー型またはA型全天日射計による値を用いた例を、第3表に示す。

表の地点において最も出現度数の多い S/S_0 (0.35~0.50) の範囲について見れば、最後の2例に比べて、最初の4例の Q/Q_0 が2~5%多いことを、表の a , b が意味している。Kondo (1976) によれば、最初の4例で使用された Q の測定値がいくらか大きすぎたのかもしれない。

世界各地の a , b の例を de Jong (1973) がまとめている。しかし、日照計が必ずしもジョルダン日照計でなく、しかも、異種の日照計で観測された日照時間には、最大20%の差があり得るので (WMO, 1969), 比較を省略する。

6. 全天日射量およびその変動度のマップ作成

6.1 計算

(5)式を用いて、全国153の気象官署の1941年~1970年の30年間の毎年毎月の全天日射量が計算され、さらに、30年平均値(平年値)と年々の変動度が計算された。ここで、

$$\text{変動度} = \frac{\text{標準偏差}}{\text{平年値}} \times 100 (\%)$$

ただし、153地点の中には、観測年数が11年~29年の地点が58あり(10年以下の地点は、はじめから対象にできなかった)、これらの地点については、上の統計を行なうに際し、次のように処理した。

まず、30年間のデータがそろっている95地点の中から、気候特性を考慮して、13地点を選び出し、統計期間をいろいろ変えて Q の平均値を算出し、30年平均値と比較した。その結果、両者の差は、統計年数が24年以上の場合、2%以下であることが分かった。そこで、観測年数が24年~29年である23地点については、それぞれの観測年数のデータを用いて上の統計を行なうこととした。

次に、観測年数が11年~23年である35地点については、それぞれの地点に対して、気候的に類似しており、距離が近く、30年間のデータがそろっている地点を基準に選び、両地点の Q の間に1次回帰式を仮定して、無観測期間の Q を推定することにした。

6.2 マップへのプロット

全天日射量をマップにプロットするに際し、次の点を考慮した。

(1) 統計年数の短い地点

前述のとおり、3種類のデータ年数があるので、これを区別する。

第4表 全天日射量値をマップにプロットする場合に用いた記号。

ケース	記入した日射量値の説明		
	符号	例	説明
1	なし	316	データ期間が1941~1970年の30年間
2	*	316*	データ期間が24~29年間、これらの期間について平均を求めた
3	**	316**	データ期間が11~23年間、残りの欠測期間の値を隣接観測点の値から推定し、30年間の平均を求めた
4	M	(316) ^M	標高800m以上の山岳気象観測点
5	T	(316) ^T	地形の影響が顕著な地点

(2) 山岳観測点

標高800m以上の5地点(筑波山、伊吹山、剣山、阿蘇山、雲仙岳)の Q は、平地に比べて、明らかに小さい。おそらく、これらの地点が、雲や霧におおわれる機会が著しく多いためであろう。したがって、これらの地点を区別する。

(3) 地形障害地点

地形地物による日照障害があれば、当然 Q も小さく目に出算される。これらの地点を区別する必要がある。ただし、ジョルダン日照計は、太陽高度 3° 以下では記録しないこと(吉田, 1968a), および、太陽直達光が雲にさえぎられる機会は、太陽高度が低いほど多いから(吉田, 1970b), 障害の影響が Q に現われるのは、障害物の高度角がよほど大きい場合である。

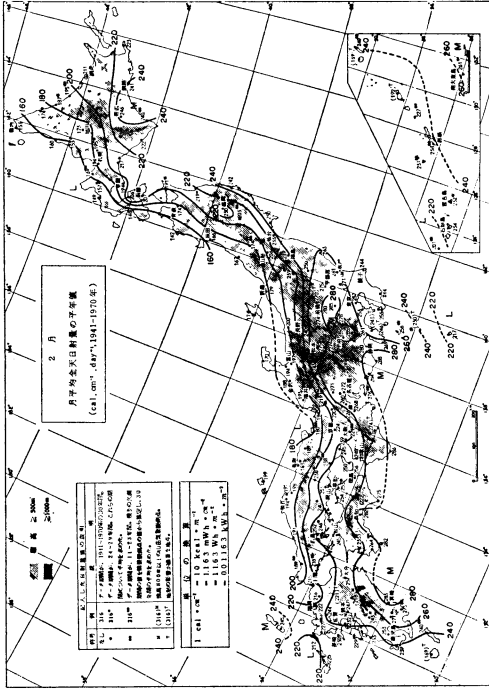
Q の地点間比較、地形図の検討、現地気象官署への問い合わせなどによって、明らかに地形障害ありと判断した地点は、日光、網代、大島、三宅島、尾鷲、宇和島、日田、屋久島、名瀬の9地点である。

以上述べた各ケースについては、第4表に示す記号をつけて、データをプロットした。

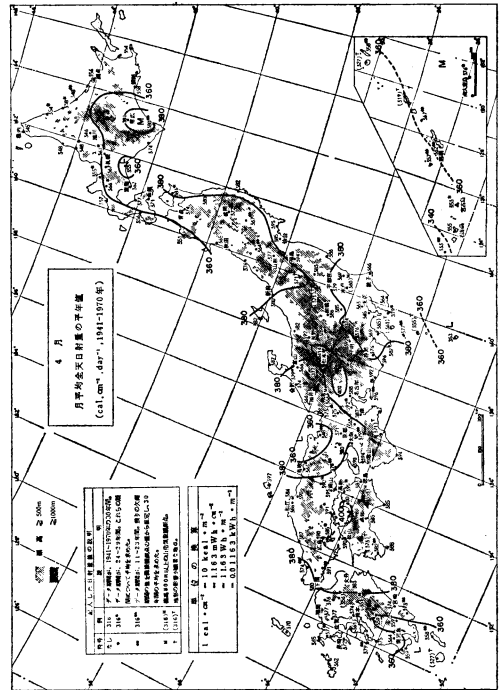
6.3 マップの描画

全天日射量平年値のマップ描画に際し、第4表のケース1~3は同質とみなし、ケース4と5は、プロットした値が小さく目であるという点だけを参考にした。また、 Q の誤差とマップのバランスを考慮して、等値線間隔を $20 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ とした。

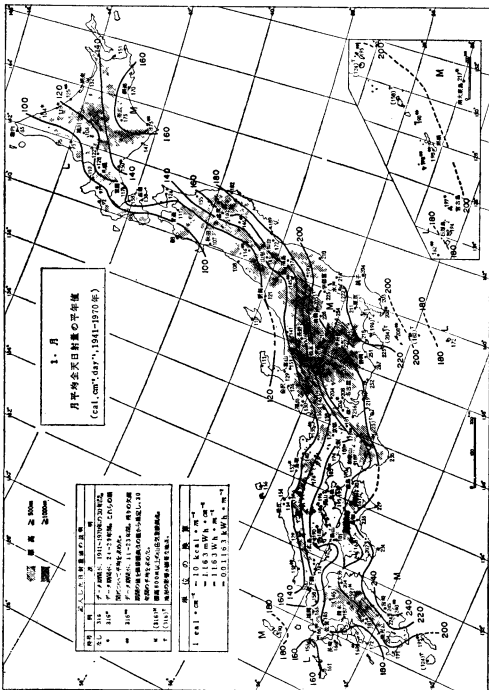
Q の年々の変動度のマップの描画に際しては、第5表



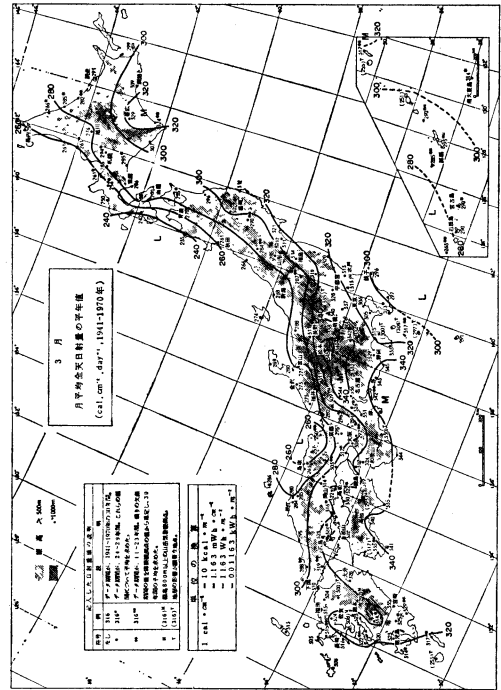
第7図の2



第7図の4

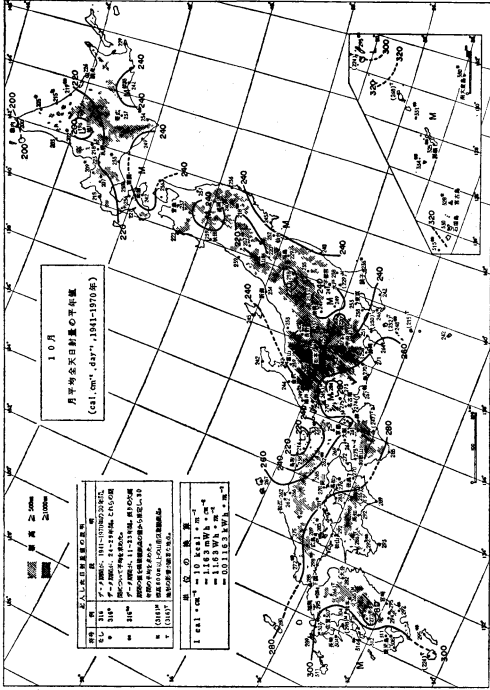


第7図の1

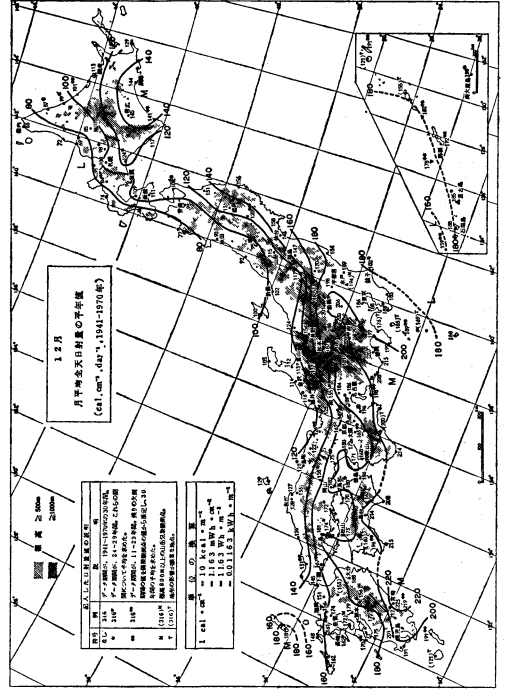


第7図の3

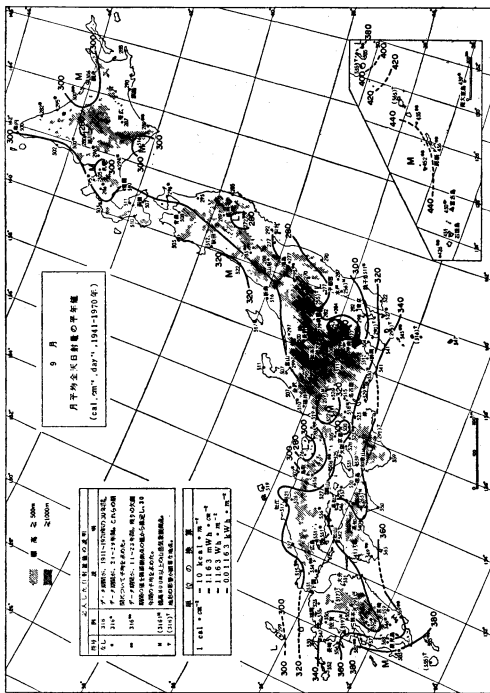
第7図 月平均全日射量平年値のマップ。



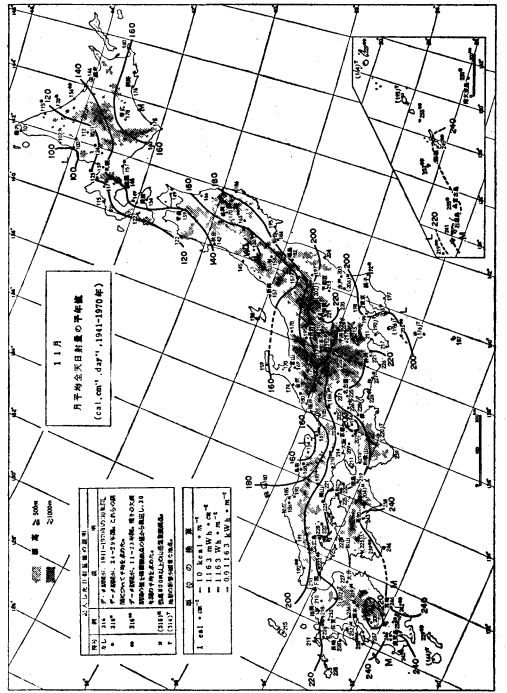
第7図の10



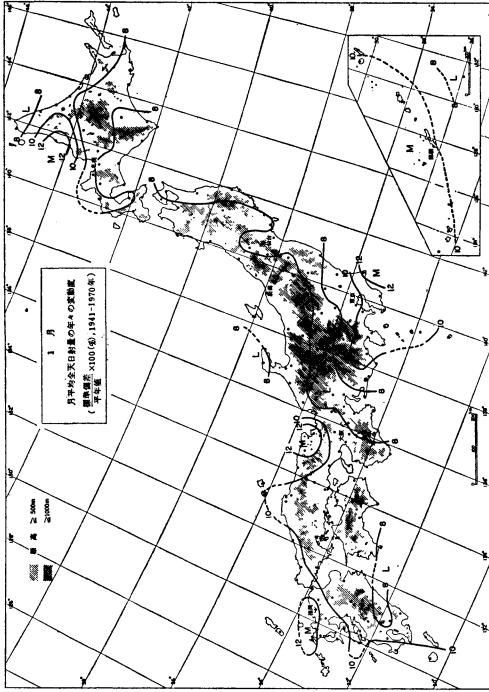
第7図の12



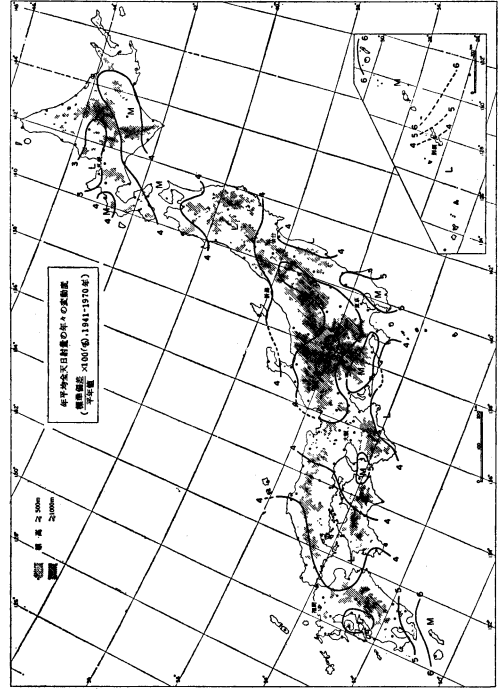
第7図の9



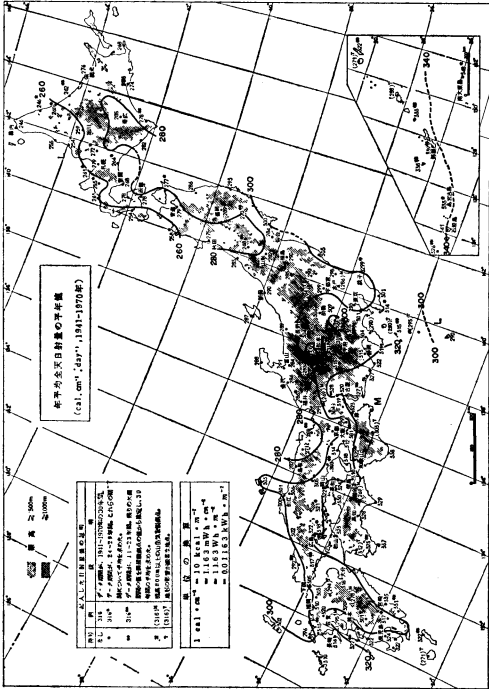
第7図の11



第8図の1

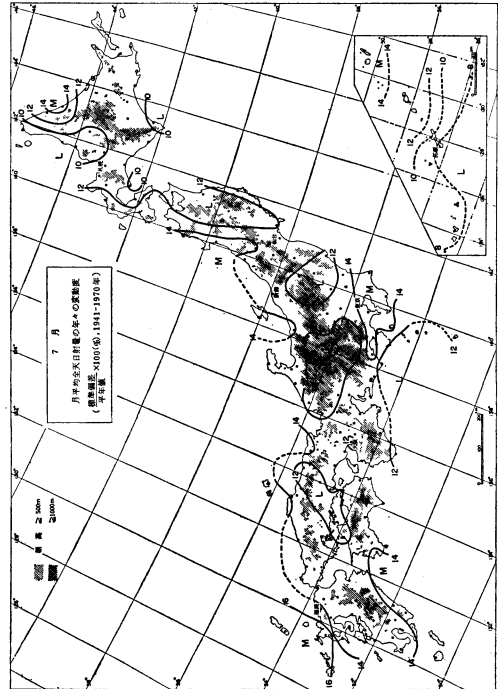


第8図の3



第7図の13

第7図 月平均全天日射量平均値のマップ。



第8図の2

第8図 月平均全天日射量の年々の変動度のマップ。

のケース4～5の大部分は、ケース1～3と併せて利用できた。

作成されたマップのうち、月別および年の全天日射量平年値のマップを第7図に、1月、7月および年の変動度のマップを第8図に示す。

6.4 マップ利用上の注意点

(1) 大気汚染の影響

3.4(3)項で述べたことから分かりますとおり、今回作成されたマップは、大気汚染による影響を除いたものである。大気汚染の程度は、産業活動や汚染対策によって変化するものであり、したがって、全天日射量の平年値とその自然な変動度を知るためには、大気汚染の影響は好ましくないと考えたからである。

しかし、大都市や工業地域には現実に大気汚染が存在し、全天日射量の月平均値に対する影響が大きくなって、特定の日には影響が大きいことがある。第7図と第8図の利用に際し、この点を留意する必要がある。

(2) 流氷の影響

3.4(4)で述べたとおり、今回作成されたマップでは、流氷の影響が除かれた。したがって、流氷が接岸する月における海岸地方の全天日射量は、マップの値より大きいはずである。

(3) 地点ごとの日射量値

マップには、利用の便を考慮して、地点ごとの全天日射量をプロットしてある。しかし、()^M と ()^T のついた値は、代表性が小さいから、その場所でしか利用できない。

(4) 等値線からの読み取り

データのない任意地点の全天日射量を、マップから内挿によって読み取る場合には、 $10 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ 単位で十分である。それ以上詳しく読み取っても、精度上無意味である。

読み取った値は、標高600m以下で、著しい地形障害のない地点を想定したものであることに留意する必要がある。

7. マップの特徴について

第7図および第8図のマップの特徴ならびにその気候学的意味の解明は、非常に興味あることであるが、紙数の都合上、それは他日にゆずり、次に、それらの概略だけに触れておく。

第7図の全天日射量マップを見ると、冬の季節風(11月～3月)、梅雨(5月～7月)、海霧(北海道南東部および北東部、6月～8月)をはじめ、各地域の卓越気候

に伴う日射量の特徴的分布がよく現われている。

なお、日本全体についての年平均全天日射量の面積平均値は約 $290 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ である。これを、Perrin de Brichambaut(1968)の世界マップと比べると、イタリア北部、スイス、フランス南部、スペイン、ポルトガル、カナダ南部とはほぼ等しい。アフリカ大陸の大部分、中近東、インド、ビルマ南部、タイ南部、オーストラリアの中部と北部、米国西部、南米太平洋側などは、日本の1.5倍である。

第8図の変動度のマップの場合には、梅雨の影響による変動度は大きいですが、冬の季節風による変動度は小さい、など、それぞれの総観パターンの年々の変動を示していると思われ、興味深い。

年を通して見ると、月平均全天日射量の変動度の幅は6～16%で、大部分は8～12%の幅の中に入る。しかし年平均値の変動度は、大部分の地域で3～5%で、小さい。

なお、これらの変動度の中には、データ誤差も含まれていると思われるが、(1)プロットした変動度の値が組織的に分布していること(2)かりに、データ誤差が5%で、変動度が10%とすれば、データ誤差を除いた変動度は約9% ($=\sqrt{10^2-5^2}$) であることから、データ誤差の影響はそれほど大きくないと推定される。

謝 辞

おわりに、本研究をすすめるに当たり、東北大学の田中正之教授、近藤純正助教授、館野高層気象台長 関原彊博士、気象庁観測部 関根正幸氏、気象研究所 村井潔三博士、(財)日本気象協会研究所長 大田正次博士 から貴重なご意見をいただき、また、当研究所の元職員 田嶋節夫、鈴木敏文両氏から種々ご協力いただいたことに對し、心から御礼申し上げる。

なお、この研究は、(財)日本気象協会が工業技術院から委託された昭和50年度および51年度サンシャイン計画気象調査の一部として行なわれたものである。

文 献

- 菊地原英和, 1962: 日照と雲量の比較調査, 気象庁研究時報, 14, 119-128.
 村井潔三, 山内豊太郎, 1975: 日本における全天日射量の分布と実効大気透過率について, 天気, 22, 557-562.
 日本気象協会, 1975: 全天日射量, 日照時間の資料, 太陽エネルギーシステム 気象資料, No. 3, 昭和49年度サンシャイン計画報告書, 193-199.
 佐藤 功, 1976: 大阪の空, たいふうん (近畿防災

- 気象連絡会機関誌), 80, 10-13.
- 関原 彊, 鈴木 正, 1967: 日射と日照の相関関係およびロビッチ日射計の観測値について, 気象庁研究時報, 19, 608-613.
- 仙台管区気象台調査課, 1969: 大気外水平面日射量の表, 東北技術だより(仙台管区気象台), 44, 27-56.
- シュルギン(内嶋善兵衛訳), 1970: 太陽光と植物, 東京大学出版会, 96.
- 吉田作松, 1953: 融雪季における積雪量と地面露出率について, 雪氷, 14, 1.
- , 1968 a: 日照時間について, 天気, 15, 255-258.
- , 1968 b: バイメタル日照計による観測値の性質—ジョルダン日照計との相違とその原因—, 気象庁研究時報, 20, 6-23.
- 1970 a: 水平面日射量に及ぼす積雪の影響, 気象庁研究時報, 22, 85-90.
- , 1970 b: 日照率に及ぼす地形地物の影響を補正する方法, 天気, 17, 63-68.
- 吉田作松, 中西秀二, 1970: 東北地方における月平均水平面日射量分布図の作成, 天気, 17, 273-280.
- Ångström, A., 1924: Solar Terrestrial Radiation, Quart. J. Roy. Met. Soc., 50, 121-126.
- Bennett, I., 1964: A Method for Preparing of Mean Daily Global Radiation, Arch. für Met. Geophys. und Bioklim., Ser. B, 13, 216-248.
- , 1965: Monthly Maps of Mean Daily Insolation for the United States, Solar Energy, 9, 145-158.
- Black, J.N., C. Bonython and J.A. Prescott, 1954: Solar Radiation and Duration of Sunshine, Quart. J. Roy. Met. Soc., 80, 231-235.
- Black, J.N., 1961: A Contribution to the Radiation Climatology of Northern Europe, Arch. für Met. Geophys. und Bioklim., Ser. B, 10, 182-192.
- Chizhevskaja, M.P., 1964: Zakonomernosti Summarnoj Radiatsii po Nabliudenijam v Voejkovo, Trans. Main Geophys. Obs., No. 160.
- de Jong, B., 1973: Net Radiation Received by a Horizontal Surface at the Earth, Delft Univ. Press, 51 p.
- Glover, J. and J.S.G. McCulloch, 1958: The Empirical Relation between Solar Radiation and Hours of Sunshine, Quart. J. Roy. Met. Soc., 84, 172-175.
- Haurwitz, B., 1948: Insolation in Relation to Cloud Type, J. Met., 5, 110-113.
- Hunn, B.D. and D.O. Calafell, II, 1976: Determination of Average Ground Reflectivity for Solar Collectors, Joint Conference, American Section of International Society of Solar Energy and Solar Energy Society of Canada, Inc., Aug. 15-20, 1976, Winnipeg, 1, 211-225.
- Kimball, H.H., 1919: Variations in the Total and Luminous Radiation with Geographical Position in the United States, Mon. Wea. Rev., 47, 769-793.
- Kondo, J., 1967: Analysis of Solar Radiation and Downward Long-wave Radiation in Japan, Sci. Rep. Tohoku Univ., Ser. 5, Geophysics, 18, 91-124.
- , 1976: Heat Balance of the East China Sea during the Air Mass Transformation Experiment, J. Met. Soc. Japan, 54, 382-398.
- Kondratyev, K. Ya., 1969: Radiation in the Atmosphere, International Geophysics Series, Academic Press, New York, San Francisco, London, 431-440 and 467.
- Löf, G.O.G., J. Duffie and C.O. Smith, 1966: World Distribution of Solar Radiation, Solar Energy, 10, 27-37.
- Perrin de Brichambaut, Ch., 1968: Cahiers de l'A.F.E.D.E.S., January, 1, No. 1. (de Jong, 1973 より引用).
- Robinson, N., 1966: Solar Radiation, Elsevier Publ. Co., Amsterdam, London, New York, 138-139.
- Sekihara, K., 1964: The Amount and Properties of Solar Radiation in Japan and the Instruments for its Measurement, New Sources of Energy, Proceeding of the Conference Rome, 4, Solar Energy, United Nations, New York, 451 p.
- Stanhill, G., 1962: Solar Radiation in Israel, Res. Council of Israel, 11, G No. 1. (de Jong, 1973 より引用).
- World Meteorological Organization, 1969: Guide to Meteorological Instrument and Observing Practices, 3rd ed., IX 31-32.