

回転式日照計観測値からの1時間積算全天日射量の推定*

馬淵和雄・佐藤信夫**

要 旨

毎時の日照時間から毎時の1時間積算全天日射量を推定する関係式を作り、その係数を日照計毎時観測値と日積算全天日射量観測値を用いて求めた1次回帰式により推定した。

係数の季節および地域依存性について検討した結果、係数には地域による差が若干あること、および地域によっては季節依存性も多少あることが認められた。

求められた関係式により、毎時の日照時間から1時間積算全天日射量を推定し、実際の観測値と比較した。その結果、RMS 誤差 $0.2 \text{ MJ m}^{-2}\text{hr}^{-1}$ 、相関係数0.97程度の精度で、1時間積算全天日射量を推定することができることがわかった。

また、関係式を独立データにより検証するため、1986年の観測値より推定した係数を用いた関係式で、1986年と1987年の1時間積算全天日射量を推定した結果を比較したところ、その誤差の程度はほぼ同じであった。

1. はじめに

地球環境調査、防災及びエネルギー利用等の面で地表面における熱収支、水収支を時間的及び空間的にきめ細かく推定することが、近年増々必要となって来ている。これらの過程を数値モデル等により推定するには、気温、降水量及び日射量等のきめ細かい観測値を必要とする。日本に限って見ると、幸い気温や降水量等の接地層にとって重要な物理量は、1時間単位でしかも多くの地点で実際の観測値が得られている。しかし、接地層が受けるエネルギーの重要な要素である放射に関する観測値としては、熱収支を推定する場合に直接的な量となる日射量より間接的な量である日照時間の形で観測されている場合の方が多い。現に、日本の場合、全天日射量は全国67気象官署で観測されているのに対し、日照時間は回転式日照計により155気象官署で毎時値が観測されており、日照計の形式が違うとはいえアメダス4要素地点な

ども加えると時間的にも空間的にも、他の気温等の要素と同程度の分解能でデータが得られている。この豊富な日照時間の観測値から、他の気象要素と同程度の時間分解能（1時間単位）で、数値モデルに与えるデータとして必要十分な精度の全天日射量を簡便に推定することができれば、時間的にも空間的にもきめ細かく地表面熱収支及び水収支過程を推定することができることになる。

ところで、日射量を日照時間から推定する試みは今までにも数多くなされてきた。最も良く目にするものとしては、Ångström 型と呼ばれる下式であろう。

$$F/F_0 = a + b \cdot S$$

F : 全天日射量

F_0 : 大気外水平面日射量

S : 日照率 = 日照時間/日照時間

しかし、今まで上式を用いる対象となった全天日射量は、大部分が月平均値及び日積算値である。また、これらの場合の係数 a 及び b についても、地理的及び季節的な差があることがしばしば指摘されている (Bennett, 1964; de Jong, 1973; Glover and McCulloch, 1958; Davies and McKay, 1989)。これを、一歩進めたものとしては、回帰式の因子として日照率の他に、積雪指数及び太陽高度指数を加えこれらの重回帰式により日本の

* Estimation of hourly global solar radiation from hourly records of sunshine

** Kazuo Mabuchi・Nobuo Sato, 気象庁予報部数値予報課。

—1990年6月26日受領—

—1990年9月21日受理—

月平均全天日射量を求めた例がある(吉田・篠木, 1978). しかしこれも全天日射量の気候値を求めることに主眼が置かれたもので, 時間単位で全天日射量を推定することまでは行われていない. 1時間積算全天日射量の推定に関する研究例は, Cotton (1977), Davies and Mckay (1982) などの例があるがその数は少なく, それらは大概, 雲の状態を表すパラメータを含んでいる. 日本の気象官署では, 通常雲の毎時観測は行われておらず, 雲の状態に関する観測データ量は日照時間の観測データ量に比べて格段に少ない. そこで, 本研究では, 日照時間のみを用いる方法を試みることにし, 日本の全天日射量観測地点で, 電気式全天日射計と回転式日照計で同時に観測されている全天日射量と日照時間の観測値を用い, 日照時間と全天日射量の関係式を新たに求め, それにより毎時の1時間積算全天日射量をどの程度の精度で推定できるか検証してみることにした.

2. 関係式を決定するために用いたデータおよび推定方法

用いたデータは, 気象庁観測部管理課統計室で計算機処理可能な形で整理されている, 以下のデータである.

全天日射量は, 普通気候観測資料時日別磁気テープに記録されている日積算全天日射量. 日照時間は, 地域気象観測資料時日別磁気テープに記録されている日照時刻別値(毎時の前1時間の日照時間観測値). これらのデータの中から, 全天日射量観測地点でかつ1986年から回転式日照計による日照観測を開始した61官署(第1表)の1986年の1年間のデータを使用することとした. なお, 那覇は日照時刻別値の欠測が多かったため除外した.

本来, 1時間積算全天日射量を求める関係式を決定するのであれば, 1時間積算全天日射量観測値をデータとして使用するのが普通であると考えられる. しかし, 現在その毎時観測値が計算機処理可能な形で整理されている全天日射量観測地点の数は十数地点で, その中に内陸の観測地点が少ない. そのため, なるべく多くの地点のデータを用いることにより地理的な影響を少なくすることを考え, 以下に記す方法により61官署の日積算値のデータから1時間積算値に関する関係式を導くことにした.

時刻 t_i における前1時間の積算全天日射量 F_{ti} は, 時刻 t_i における日照時刻別値 S_{ti} の一次関数として,

$$F_{ti} = I_0 \cos Z_{ti-0.5} (a + b S_{ti}) \quad (1)$$

と, 表現できるとした. ここで, I_0 は, 大気上端におけ

第1表 全天日射量対日照時間の関係式を決定するための観測値を使用した61気象官署, および1時間積算全天日射量の観測値と推定値を比較した官署(下線を付した13官署).

稚内, 旭川, 留萌, <u>札幌</u> , 寿都, 網走, <u>根室</u> , 帯広, 室蘭, 浦河, 函館, 青森, 八戸, 秋田, 盛岡, 宮古, 仙台, 酒田, 山形, 福島, 小名浜, 宇都宮, 前橋, 大島, 八丈島, <u>父島</u> , 銚子, <u>松本</u> , 甲府, 静岡, 御前崎, 名古屋, 新潟, 高田, 富山, <u>輪島</u> , 福井, 彦根, 舞鶴, 大阪, 奈良, 潮岬, 広島, 浜田, <u>米子</u> , 高松, 松山, 清水 (<u>足摺</u>), 下関, <u>福岡</u> , 大分, 厳原, 長崎, 佐賀, 熊本, 宮崎, <u>鹿児島</u> , 名瀬, 南大東, 宮古島, <u>石垣島</u>
--

る法線面日射強度である. また, $Z_{ti-0.5}$ は太陽天頂距離で, ϕ をその地点の緯度, δ を太陽赤緯, $\tau_{ti-0.5}$ を南中時からの時角とすると,

$$\cos Z_{ti-0.5} = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \tau_{ti-0.5}$$

である. I_0 , δ 及び $\tau_{ti-0.5}$ は, Spencer (1971) により求めた. なお, 上式において太陽天頂距離及び南中時からの時角の時刻 t_i から 0.5 を引いているのは, 太陽天頂距離の余弦を前1時間の中心時刻で計算するためである.

ここで, その日の $\cos Z_{ti-0.5} > 0$ である時間帯が t_i ($i=1, 2, \dots, H$) であるとして, 日積算値についての関係式,

$$\frac{\sum_{i=1}^H F_{ti}}{I_0 \sum_{i=1}^H \cos Z_{ti-0.5}} = a + b \frac{\sum_{i=1}^H S_{ti} \cdot \cos Z_{ti-0.5}}{\sum_{i=1}^H \cos Z_{ti-0.5}} \quad (2)$$

を作る.

上式の左辺は, 日積算全天日射量をその日の日積算大気外水平面日射量で規格化した量である. これを, 日平均晴天指数と呼ぶことにする.

また, 右辺の係数 b に掛かる量は, 日照時刻別値(最大値=1)を $\cos Z_{ti-0.5}$ で, 1日分加重平均した量で, 同じ日照時刻別値=1でも太陽天頂距離により1時間当たりの全天日射量が違わずであることを考慮した量である. これを, 加重日平均日照時間と呼ぶことにする.

観測値より加重日平均日照時間と日平均晴天指数を求め, 加重日平均日照時間が0でない日について, 最小自乗法により(2)式の係数 a 及び b を推定する. その際, 地形等の要因で計算上で $\cos Z_{ti-0.5} > 0$ と成る時刻とその地点で実際に日照が観測され得る時刻とが一致しない

第2表 1986年のデータによる(1)式および(2)式の係数, a, bおよびA, ならびにRMS誤差および相関係数の地域別, 季節別の値, RMS誤差①, 相関係数は日平均晴天指数の推定誤差, RMS誤差②は日積算全天日射量の推定誤差.

$$\text{RMS 誤差} = \sqrt{\frac{\sum(\text{推定値} - \text{真値})^2}{\text{サンプル数}}} \text{ である.}$$

		サンプル数	a	b	A	RMS 誤差①	RMS 誤差② (MJ m ⁻² d ⁻¹)	相関係数
日本 全国	1月~12月	19,711	0.241	0.428	0.141	0.044	1.30	0.941
	4月~11月	13,134	0.240	0.427	0.138	0.041	1.41	0.954
	1月~3月, 12月	6,337	0.247	0.427	0.147	0.048	1.03	0.939
北 海 道	1月~12月	3,621	0.265	0.428	0.175	0.045	1.24	0.948
	4月~11月	2,421	0.254	0.438	0.160	0.041	1.37	0.957
	1月~3月, 12月	1,200	0.288	0.409	0.206	0.049	0.91	0.934
九州 ・ 沖 縄	1月~12月	3,996	0.238	0.427	0.124	0.039	1.23	0.957
	4月~11月	2,676	0.241	0.421	0.129	0.038	1.35	0.957
	1月~3月, 12月	1,320	0.232	0.442	0.113	0.039	0.93	0.960

ことも考えられるが, その誤差は小さいものとして無視した. 係数 a 及び b が求まると, (1) 式により, 日照時刻別値 S_{ti} より全天日射量 F_{ti} が求まる.

日照時刻別値 S_{ti} が 0 の時の関係式は, (1) 式の右辺のかっこ内を定数 A で置き換え,

$$\frac{\sum_{i=1}^H F_{ti}}{I_0 \sum_{i=1}^H \cos Z_{ti-0.5}} = A \quad (3)$$

とする. 観測値より, 加重日平均日照時間が 0 の日の日平均晴天指数を求め, その平均値より A を決める.

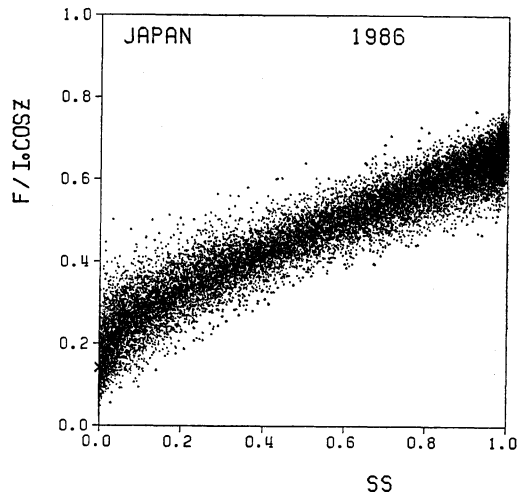
3. 結 果

前節の方法により, 1986年の1年間の観測データより係数, a, b 及び A を推定した. また, これらの係数を(1)式に適用し, 毎時の前1時間の積算全天日射量(以後, 単に1時間積算全天日射量と呼ぶ)の推定値を求め, 実際の観測値と比較した. 比較に用いた観測値は, 気象庁観測部測候課作成の日射観測業務磁気テープファイルに記録されているデータの内の13官署(第1表の下線を付した官署)の1986年と1987年のデータである.

3.1 係数の特性

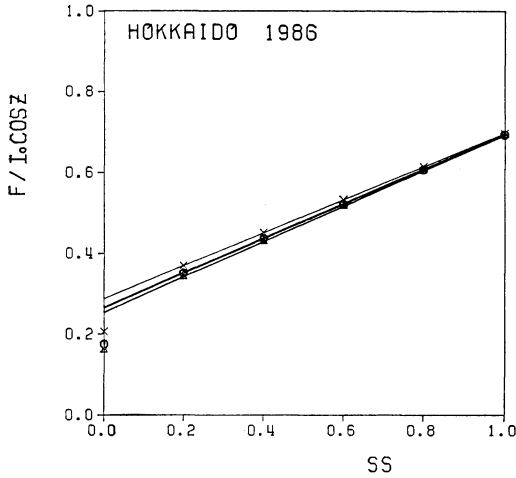
第1図に, 61気象官署のデータによる日平均晴天指数と加重日平均日照時間の, 1986年の1年間の全データをプロットした結果を示す. 両者の関係は, 日照時間が0の付近を除きほぼ直線で近似できることがわかる.

次に, 加重日平均日照時間と日平均晴天指数の関係

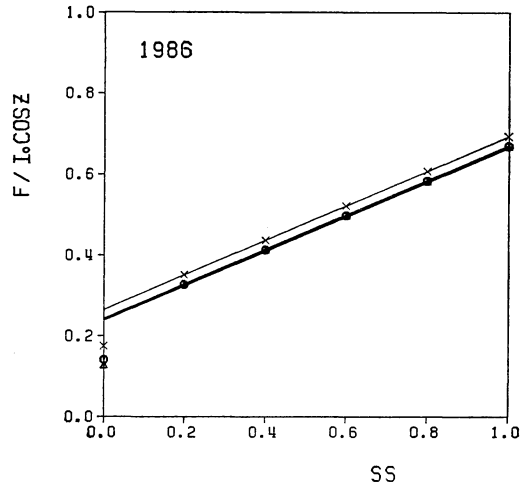


第1図 日平均晴天指数 ($F/I_0 \cos Z$) と加重日平均日照時間 (SS) の関係. 1986年1年間の61気象官署の全データをプロットした例

の, 季節及び地域依存性を検証した. 61官署の全てのデータを用いた場合, 北海道の官署のみを用いた場合及び九州・沖縄の官署のみを用いた場合に分け, さらにそれぞれを, 通年, 暖候期(4月~11月)及び寒候期(1月~3月, 12月)に分けて係数を求め比較した結果を第2表に示す. RMS 誤差②に示す日積算全天日射量に対する誤差は, 平均的な日積算全天日射量の約8%程度の値



第2図 北海道における季節別の回帰直線の比較。(1986年)
 通年……………○
 暖候期(4月~11月)……………△
 寒候期(1月~3月, 12月) ……×



第3図 地域別の回帰直線の比較. 1986年の通年のデータによる.
 全国……………○
 九州・沖縄……………△
 北海道……………×

で、相関係数も0.93~0.96といずれも良い相関を示している。

係数の季節についての差をみると、61全官署の場合、ほとんど季節による違いが出ていない。九州・沖縄の場合も、さほど大きな季節依存性はない。しかし、第2図にも示すように、北海道の場合は特に寒候期の日照時間の少ない場合に、同じ日照時間に対する日平均晴天指数が多い傾向を示している。

次に、係数の地域依存性であるが、第3図に通年のデータによる回帰直線の地域ごとの比較を示す。明らかに北海道は全体的に日平均晴天指数が多い。

これらのことは、以下の理由によると思われる。地上での全天日射量の大气上端の日射量に対する割合は、大气中の減衰成分が少ない場合、及び吉田(1970)が述べているように地表面アルベドが積雪等により大きい場合に大きくなる。北海道は、他の地域と比べて大气中の諸成分が少なく、特に寒候期は地表面がアルベドの大きい雪に覆われる時期が長いこと等を考えあわせると、上述の北海道における係数の特性が説明できる。

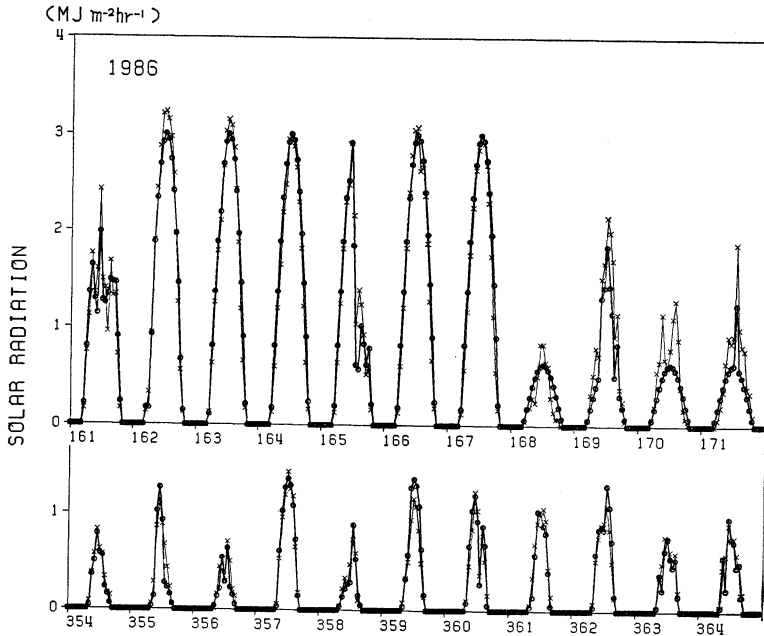
3.2 1時間積算全天日射量の推定値の精度

1時間積算全天日射量を推定するにあたって、前項の結果から、厳密に求めるとすれば特に北海道については別にその季節ごとの係数により求めるべきである。しかし、北海道の回帰直線の季節による差は、いずれも

RMS 誤差内に納まっていること、また第2表に示すごとく、通年の回帰直線の地域差は、係数bはほぼ同じで係数a、AともにはばそれらのRMS 誤差内に納まっていることから、61全官署による通年のデータで求めた係数を使用して1時間積算全天日射量を推定し、その精度を検証することとした。

第4図に1986年の札幌の毎時の1時間積算全天日射量の観測値と推定値をプロットした例を示す。傾向としては良く一致している。

第3表の上段に、観測値と推定値を比較した13官署の1986年の全データについての比較結果を示す。比較は、全天日射量の1時間積算値、及びそれらを積算して求めた日積算値と月積算値について行った。相関は0.97~0.99で非常に良く、1時間積算値から月積算値へと良くなっている。RMS 誤差を見ると、1時間積算値が0.2 MJ m⁻²hr⁻¹程度、日積算値が1.7 MJ m⁻²d⁻¹程度、月積算値では28 MJ m⁻²mon⁻¹程度で、これらはそれぞれの平均的な値の13%、8%及び6%程度の誤差である。日積算値のRMS 誤差の量は、第2表のRMS 誤差②に示した回帰直線の持つそもそもの誤差と比べて同程度であり、当然予測される誤差の量と言える。また、月積算値に対する6%の誤差は、日照率と共に積雪指数及び太陽高度指数も因子に加えた重回帰式による月平均



第4図 1時間積算全天日射量の観測値(×)と推定値(○)の時系列比較(1986年の札幌の例)。

上図：6月10日から10日間の毎時データ

下図：12月20日から10日間の毎時データ

縦軸が全天日射量(MJ・m⁻²・hr⁻¹)

横軸の数字は1月1日からの通算日数を表わす

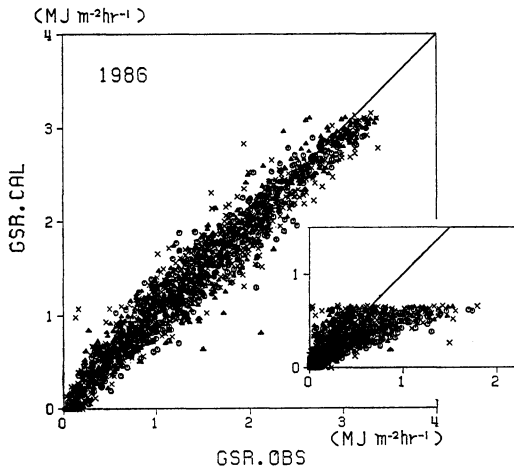
第3表 全天日射量の観測値と推定値を比較した結果。日積算値，月積算値は，観測値，推定値とも1時間積算観測値および推定値を積算して求めたものによって比較している。なお，1時間積算全天日射量観測値が欠測か日照時別値が欠測のため推定値が求められなかった場合は比較の対象から除外している。またその場合はその日の日積算値，その月の月積算値も欠測扱いとしている。
単純誤差平均 = $\sum (\text{推定値} - \text{観測値}) / \text{サンプル数}$ である。

		1時間積算値			日積算値			月積算値			
		サンプル数	RMS 誤差 (MJ m ⁻² hr ⁻¹)	単純誤差平均 (MJ m ⁻² hr ⁻¹)	相関係数	サンプル数	RMS 誤差 (MJ m ⁻² d ⁻¹)	相関係数	サンプル数	RMS 誤差 (MJ m ⁻² mon ⁻¹)	相関係数
13 官 署	1986年	56,335	0.23	-0.05	0.969	4,399	1.65	0.978	98	28.41	0.990
	1987年	59,531	0.22	-0.03	0.971	4,675	1.48	0.980	117	19.23	0.994

全天日射量推定式(吉田・篠木, 1978)の誤差5%と同程度である。単純誤差平均を見ると，推定値が観測値より多少少な目に見積もられている傾向があるように見えるが，これは，日射量対日照時間の回帰式を1次式としたため，日照時別値が1に近い時の1時間積算全天日射量を幾分少な目に見積もる傾向があり，日射量が多いと

きにその誤差も大きいため，誤差の単純な平均をとるとマイナスに偏った結果が出たものと思われる。しかし，この単純誤差平均の値は1時間積算全天日射量のピーク値の1~2%程度でありさほど大きな値ではない。

第5図は，札幌，米子，鹿児島島の1986年について，1月1日から5日目ごとの毎時の1時間積算全天日射量の



第5図 1時間積算全天日射量の観測値 (GSR.OBS) と推定値 (GSR.CAL) の比較。1986年の例。
札幌 (○) 米子 (△) 鹿児島 (×) について1月1日から5日目ごとの日の毎時データの比較。主図は日照時刻値が0でない時。右下の図が日照時刻値が0の時。

推定値と観測値の関係をプロットしたものである。

日照時刻値が0でない時の比較では、観測値が $3 \text{ MJ m}^{-2}\text{hr}^{-1}$ あたり以上で推定値がやや少な目になる傾向が見られるが、全体的には良い対応を示している。右下の図が昼間で日照時刻値が0の時の比較結果である。日照時刻値が0でない時に比べるとバラツキが大きくなっている。これは、昼間の日照時刻値が0の時は係数 A で推定値を求めており、南中時においては夏期で約 $0.6 \text{ MJ m}^{-2}\text{hr}^{-1}$ 、冬期で約 $0.3 \text{ MJ m}^{-2}\text{hr}^{-1}$ 程度と見積もっているが、実際には、日照時刻値が0でも1時間積算全天日射量が多い時は $1.0 \sim 1.5 \text{ MJ m}^{-2}\text{hr}^{-1}$ ある場合があることを示している。この原因は以下によるものと思われる。日照計が日照ありと判断するしきい値の基準は、直達日射量で 120 W/m^2 ($0.43 \text{ MJ m}^{-2}\text{hr}^{-1}$) $\pm 20\%$ となっている(気象庁, 1988)。その時の全天日射量は散乱光も含むので当然それより多い場合があるはずである。よって日照時刻値が0と観測された時の全天日射量はその時の雲の種類及び分布、大気混濁度によりかなりの幅を持つこととなる。従って、上述のバラツキは日照計と日射計という機能の違う測器により計測されたデータを使用していることが原因と考えられ、やむを得ぬ結果と言える。

3.3 独立データによる検証

1986年の観測値より推定した係数による関係式で、1987年の毎時の1時間積算全天日射量を推定し観測値と比較した。第3表の下段にその結果を示す。1時間積算値、日積算値及び月積算値いずれもその誤差は、1986年の場合の誤差と同程度である。

4. あとがき

今回の試みは、地表面熱収支、水収支数値モデルのために必要な全天日射量を、簡便に、しかも時間的に空間的になるべくきめ細かく得ることを目的として行った。その結果、日照時間のみを用いて、1時間積算全天日射量を、モデルに与えるデータとしては必要十分な精度 (RMS 誤差 $0.2 \text{ MJ m}^{-2}\text{hr}^{-1}$ = 平均的な値の13%) で、推定することができることが確認できた。積雪等の影響を考慮に入れ、地域別及び季節別の係数を用いればより精度が上がると考えられる。

本稿をまとめるにあたり、気象庁観測部測候課木村隆昭氏 (現仙台管区气象台)、廣瀬保雄氏 (現観測部高層課) 及び大堀新太郎氏には、資料の提供並びに貴重なご助言を頂いた。また、気象庁観測部管理課統計室には資料の提供等便宜を計って頂いた。ここに、謝意を表します。

参考文献

- Bennett, I., 1964: A Method of Preparing Maps of Mean Daily Global Radiation. Arch. Met. Geophys. und Bioklin., Ser. B., 13, 216-248.
- Cotton, G.F., 1977: ARL Model of Global Solar Radiation. SOLMET 2 Final Report, TD-9724, U.S. Department of Energy, 165-184.
- Davies, J.A. and D.C. McKay, 1982: Estimating Solar Irradiance and Components. Solar Energy, 29, 55-64.
- and ———, 1989: Evaluation of Selected Models for Estimating Solar Radiation on Horizontal Surfaces. Solar Energy, 43, 153-168.
- de Jong, B., 1973: Net Radiation Received by a Horizontal Surface at the Earth. Delft University Press, 51 pp.
- Glover, J. and McCulloch, J.S.G., 1958: The Empirical Relation between Solar Radiation and Hours of Sunshine. Quart. J. Roy. Met. Soc., 84, 172-175.
- 気象庁, 1988: 地上気象観測法, 107-124.
- Spencer, J.W., 1971: Fourier Series Representation of the Position of the Sun. Search, 2(5),

172 pp.

吉田作松, 1970: 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.

吉田作松・篠木誓一, 1978: 日本における月平均全天日射量及びその年々の変動度のマップの作成, 天気, 25, 375-389.



気候講演会「21世紀の気候はどうなる—地球温暖化を考える—」開催される

去る12月3日(月)(13時30分から17時), 気象庁講演会において, 気象庁主催, 日本気象学会後援, 気象会社3社の協賛により, 標記講演会が開催された。この講演会は, 昨年に続き2回目で, 今回は, 最近内外の活発な取り組みが進められている「地球温暖化問題」について, 一般の方々はその背景, 根拠, 重要性を理解してもらうことを目的に開催されたものである。

広く一般からの参加を募るため, チラシ, ポスターを作成し, 関連企業, 関係省庁, 報道機関等に配布するなど事前PRに努めた。当初, 昨年の入場者数200名程度の参加を見込んでいたが, 新聞に開催案内が掲載されたこともあり, 開演1時間も前に10数人の入場者があるなど, 予想以上の盛況振りであった。総参加者は約300名で, 内訳は気象会社関係22名, その他の民間会社91名, 関係省庁42名, 学校関係22名, 報道関係9名, 気象庁58名, その他・不明約50名であった。

講演会は気象庁気候変動対策室椎野室長の司会の下, まず, 気象庁長官より挨拶があり, 地球温暖化に対する最近の気象庁の気候変動対策業務の強化方策, 及び内外の活発な取り組みについて紹介がなされた。

次いで講演に入った。最初に東北大学田中正之先生より「地球温暖化と温暖化への対応」と題し, 政府の「地球温暖化防止行動計画」をはじめ各国で二酸化炭素の排出量安定化に向けた目標値が打ち出されている下で, 現在考えられている省エネや二酸化炭素の排出の少ないエネルギー源の導入等, 温暖化対応策とその各々に付随す

の問題点について講演がなされ, 総合的な対策の必要性が指摘された。

つぎに, お茶の水女子大学内嶋善兵衛先生より「環境と食糧生産への地球温暖化の影響」と題し, 地球の温暖化が大気中の二酸化炭素の増加という直接的な効果と, 気温, 降水量, 蒸発量等の変化を通じた間接的な効果により, 食糧生産の基礎である植物帯の分布や生産力にどのような影響を及ぼすか等について, 気候変動に関する政府間パネル(IPCC)の資料を用いた講演があった。

さらに気象研究所時岡達志室長より, 「地球温暖化の予測: 現状と問題点」と題し, 気象庁気候問題懇談会温室効果検討部会報告書及びIPCC第1作業部会報告書の中で述べられている, 温室効果気体の増加に伴う将来の気候変化予測に関する現在の科学的知見と問題点について講演がなされた。

以上三つの講演を受け, 最後に, 京都大学山元龍三郎先生より「気候変動研究の動向」と題し, 気候変化予測等の不確かさを縮小するための今後の研究課題について講演がなされた。とくに, 気候変化の予測について, 太陽活動やエーロゾルの影響など自然的要因の解明も重要であることが指摘された。

講演後の質疑応答では活発な意見交換があり, また講演後の参加者のアンケート回答でも, 約85%の人が当講演会は「役に立った」とし, 次回以降の期待する声も多く, この問題に対する関心の高さが伺えた。

(小沢芳郎)