

みずほ観測拠点の日射収支*

川口真男**・佐々木浩***

Solar Radiation Balance at Mizuho Camp, East Antarctica*

Sadao KAWAGUCHI** and Hiroshi SASAKI***

Abstract: The solar radiation balance on the ground surface at Mizuho Camp (70°42.6'S, 44°18.9'E, elevation 2,200 m) is discussed on the basis of the observations with two pyranometers carried out during the period from July to December 1972. The daily values of the global radiation around the summer solstice were 950 Ly under clear sky, and 640 Ly when cloudy, giving a monthly total of 25.6×10^8 Ly for December.

Averaged monthly values of the albedo varied from 0.86 to 0.83 in July to December, and the albedos under cloudy condition were somewhat larger than those under clear sky condition.

The decrease of the global radiation by cloud cover was small, about 30%, in comparison with the case in lower latitudes. This is partly due to the high transmissibility of clouds in Antarctica, and partly due to the multiple reflection of the solar radiation between the cloud bottom and the snow surface which has large albedos.

The monthly values of global radiation and albedo for January to June in 1972 were estimated; relations among the solar altitude, global radiation and albedo obtained in the observed months were taken into consideration, extrapolating the observed cloud amounts at Syowa Station (69°00'S, 39°35'E) to Mizuho Camp. The annual values of global radiation and the effective short-wave radiation were 114×10^8 Ly and 19×10^8 Ly, respectively.

* 第1回南極雪氷シンポジウムで発表.

** 国立極地研究所. National Institute of Polar Research, 9-10, Kaga 1-chome, Itabashi-ku, Tokyo 173.

*** 気象協会北海道本部. Hokkaido Office, Japan Weather Association, Sapporo 063.

1. ま え が き

1972年7月から1973年1月中旬までみずほ観測拠点(70°42.6'S, 44°18.9'E, M.S.L. 2,200 m)において実施した日射観測について佐々木(1974)は, その概要を報告しているが, ここではさらに詳細に解析した結果を報告する. すなわち全天日射量, 反射量と太陽高度角との関係を晴天時, 曇天時について求め, 日射観測値のない1月から6月について推定雲量と先に得た関係から日射量を算出し, 年間の全天日射量, 有効日射量を得た.

2. 観 測 結 果

図1に夏至近くの日, 太陽高度角と晴天日曇天日の全天日射量の日変化を示した. 北中時刻の太陽高度角は42.5度で, 真夜中の最も低い時刻で約4度である. 全天日射の1日量は晴天の場合約950 Lyになるが, これをRUSIN(1964)により示された南極各地の値と比較すると, Komsomolskaya (74°05'S, 97°29'W, M.S.L. 3,540 m)の1,050 Ly, Vostok II (78°27'S, 106°52'E, M.S.L. 3,420 m)の1,030 Lyより小さく, 沿岸基地のOasisの930 Ly, Mirnyの840 Ly, Little Americaの900 Lyより大きい. また昭和基地の1972年12月中の最大1日量は870 Lyであった.

曇天日における1日量は640 Lyであるが, 昭和基地の同じ時期の500 Ly前後に比較して非常に大きい. これは雪面での反射率の違いが原因と思われるが, 詳しくは後章で述べる.

太陽が地平線上に現れはじめ, 日射計に全天日射量が観測されはじめたのは, 7月30日

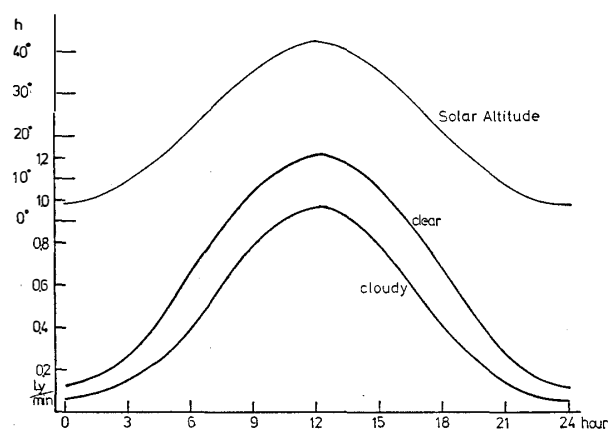


図1 夏至近くの全天日射量と太陽高度角の日変化

Fig. 1. The diurnal variation of the global radiation in clear and cloud sky, and the solar altitude around the summer solstice.

であった。これは同じ年の昭和基地が7月18日であったのに比べて12日遅かった。気差補正値を見積もるのに必要な気層の温度がわからないが、昭和基地と同じとすると7月23日頃には、日射計に感じられるはずである。26日から29日迄は晴天であったにもかかわらず、30日になってはじめて感ずるようになったのは、地ふぶきによる日射の減衰によるものと考えられる。

地ふぶきによる日射の吸収、散乱は、今後もっと詳しく調査されるべき問題であろう。

観測された全天日射量、反射量の月別総量は次の通りであった。

	7月	8月	9月	10月	11月	12月
全天日射量 (kcal/cm ²)	0.0	1.0	4.7	12.8	21.7	25.6
反射量 (kcal/cm ²)	0.0	0.9	4.0	11.0	18.3	21.2

3. 太陽高度と全天日射量

図2に太陽高度角と全天日射量の関係を示した。日射と同時に雲量の観測がなされている場合だけを使っている。雲量0~2/8の晴天の場合は、あまりばらつきがなく、曲線 S_G を

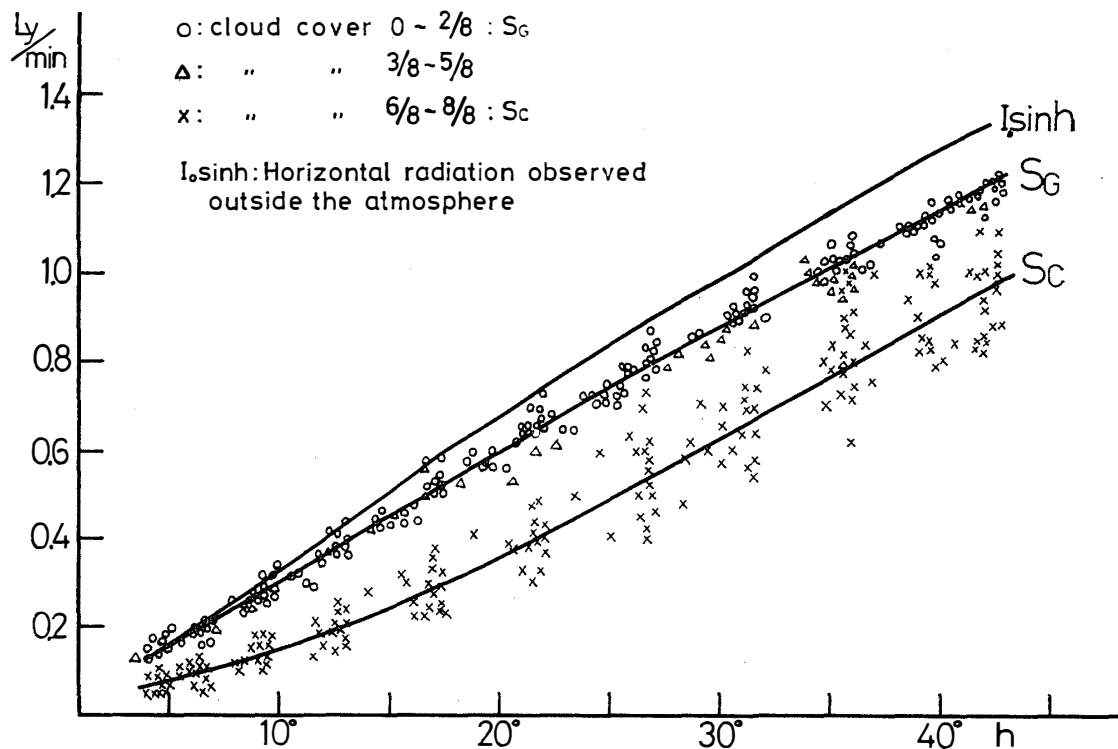


図2 太陽高度角による全天日射量の変化

Fig. 2. Global radiation versus the solar altitude for various conditions of cloudiness.

得た。

6/8~8/8 の曇天の場合はばらつきが大きい。日射量は、雲量だけでなく、雲の種類、厚さにも左右されるのであり、この様に雲量だけで考えた場合、ばらつきがあるのは当然の事であり、この程度のばらつきはむしろ非常に小さいと言える。

みずほ観測拠点の雲の種類、厚さがあまり多種多様でない事によるものであり、下層雲は層積雲にほとんど限られ、中層雲は低気圧に伴う高層雲と厚みの小さい高積雲であり、上層雲は低気圧が沿岸を通る場合しばしば観測されている。日射量が晴天時に近い値を示しているのは、上層雲が主であった場合であり、小さい値はブリザードの様な時であり、雲は割合に厚い高層雲が出ている事が多い。ばらつきはあるが、曇天時の全天日射量と太陽高度角の関係は S_G 曲線で表わされるものとする。雲量 3/8~5/8 と観測されている例は非常に少なく約 30 例であった。この時、日射量は、ほとんど晴天時に近い値を示しており、曇天の場合に近い値を示したのは少ない。

太陽面が雲に覆われているか否かによって、晴天時に近いもの、曇天時に近いものに分れるはずであるが、晴天時に近いものがほとんどである事は、むしろ雲の観測の困難さによるのかも知れない。みずほ観測拠点では、ほとんど休みなく地ふぶきが吹いており、視程が悪い。太陽面が出ていて明るい時には雲量は、地平線に近いところを除いて確認出来るが、太陽が雲に覆われている時には確認がむずかしく、雲量を過大評価する可能性がある。すなわち雲量 3/8~5/8 の場合で太陽面が雲に覆われている時には、これを 6/8~8/8 の中に入れていく事が多いのではないかと考えられる。ここでは図 2 が示す結果から 3/8~5/8 の場合は、晴天時の曲線 S_G で表されるものとする。

大気圏外に到達する日射の水平成分は、太陽常数を I_0 とすると、 $I_0 \sin h$ で表わされるが、これと S_G の比は、空気分子による散乱、オゾン、エアロゾル、水蒸気などによる吸収・散乱に左右される。太陽高度角 10 度で 0.87、40 度で 0.90 と非常に大きな値となった。みずほ観測拠点の高度が高く (2,200 m)、太陽光の通過する空気量が少ない、大気がクリーンでエアロゾルが少ない、低温のため大気柱に含まれる水蒸気量が少ない事などに起因している。

S_G と S_c の比は日射量に対する雲の影響を示すが、太陽高度角度 10 度で 0.50、20 度で 0.60、30 度で 0.71、40 度で 0.81 となり中低緯度での場合についてはもちろん南極の沿岸観測所と比較しても大きな値である。雲による日射の減衰は雲の種類、構成している粒子の性質などによって変わってくるが、この場合には、このほかに雪面反射が非常に大きく寄与してい

る。雲を通過し、雪面に到達した日射は、雪面で反射し上方に向かう。この日射の一部は雲の下面で反射し、再び雪面に戻る。このような雪面と雲下面の間の多重反射が全天日射量に寄与している。雲を通過し、はじめに雪面に到達した1次光の強さを I 、雪面反射率を R_s 、雲の反射率を R_c とすると2次光は、 $I \times R_s \times R_c$ となる。

後述するが、みずほ観測拠点の R_s は 0.82~0.86、 R_c は雲の種類などにより変わるが(有住他, 1959), 0.5 とすると2次光は1次光の約43%となる。

雲による吸収・散乱が同じとしても、土壌地帯や森林地帯など(反射率 0.1~0.3)に比較して30%程度の日射量の増大が見込まれる事になる。

夏期の昭和基地は露岩上の雪が消え、また海水域も表面が融け反射率が小さくなる。前記した夏至近くの晴天時日射量と曇天時日射量の比は、みずほ観測拠点で0.67、昭和基地で0.57となるが、これも地表面の反射率の差が影響しているものと考えられる。

4. 雪 面 反 射

南極の日射収支を扱う場合、雪面の反射率(albedo)は最も重要な問題となる。南極における年間の全天日射量は、中緯度帯とくらべて少ないけれども、それ程大きな差はない。しかし日射収支において状況は全く違って来る。その原因となっているのが、極めて大きな雪面の反射率である。

みずほ観測拠点での反射量は、1.5 mの高さで測定された(佐々木, 前出)。ここでの雪面に形成されるサスツルギーは、季節によっては数10 cmにも発達する。1.5 mの高さでは、このサスツルギーの影響があり、真の意味での反射量を測定していない可能性が大きい。特に太陽高度が低い時には影響が大きい。

図3は同時に観測した全天日射量と反射量の比(反射率)を100分率で表わし、太陽高度角に対してプロットし得たものである。夏を代表するものとして12月、冬と夏の中間の季節として10月をえらび、それぞれ曇天、晴天について示している。先に述べたように、サスツルギーの影響による反射量のデータの信頼性に問題があり、太陽高度角10度近辺以下の晴天の場合の

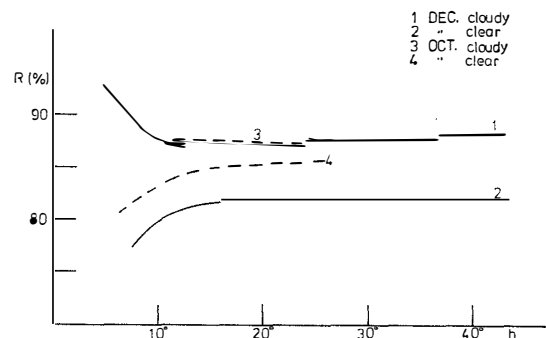


図3 太陽高度角による反射率の変化
Fig. 3. Albedo versus the solar altitude.

減少傾向，曇天の場合の増加傾向を断定するわけにはいかない。10月と12月を比較すると10月の方が反射率は大きく，特に曇天の時にきわだっている。雪の粒子状態，水分含有量，サスツルギーの状態など，反射率に関与するものが10月と12月で様相が違っているわけであるが，何がどの程度に寄与しているかは，さらに雪の状態を考慮に入れた観測によって調べられるべきである。両季節とも曇天の場合の方が晴天の時より反射率が大きい。LILJEQUIST (1956) は，太陽光の雪面反射率をいくつかのスペクトルに分けて観測し，赤外領域は可視光領域にくらべて反射率が小さい事を見いだしている。この事を曇天，晴天の反射率に考慮すると，雲は可視光よりも赤外域の光を多く吸収するので，曇天時に雪面に入射する光は相対的に赤外域の少ないものとなっており，雪面で吸収される量が少なく，その結果入射量に対する反射量の比が大きくなる。この事による反射率増加がどれ位になるのか，ほかにも原因が求められるべきなのかといった問題は，さらに詳しい観測，特に入射量，反射量のスペクトル観測によって解決されるべきものである。

5. 月別全天日射量，反射量

晴天，曇天の場合の全天日射量，反射量と太陽高度角の関係が得られたので，雲量分布と反射量に関与する雪面の状態がわかれば，太陽高度角は計算で求まるので，全天日射量，反射量，その結果としての有効日射量を計算する事ができる。雪面状態のうち何がどのように反射量に関与しているのかは，複雑な問題であり，またその関与している状態を1つ1つ比較する資料を持ち合わせてないが，雪面状態を規定するだろうと思われる温度，日射，降雪，風などの状況から1月，2月は12月型，3月，4月，5月は10月型と分類した。雲量分布は雲の観測値のある7月～12月と年間を通じて雲の観測値のある昭和基地と比較し，昭和基地の雲量の年間推移がみずほ観測拠点にもあてはまるものとして推定値を出した。1月は3.5日に1日の曇天日（雲量6/8～8/8）となり，2, 3, 4月は91日間に33日となりほぼ3日に1日の曇天日があり，5月は2.7日に1日の曇天日となった。4月，5月の曇天日がその後のみずほ観測拠点での観測と比較してやや少ないが，もし曇天日がこの2倍になったとすると，月間全天日射量に対して10%程度の差が出てくる。しかし4月，5月はもともと日射量の少ない時期であり，年間日射量に対してはほとんど効いてこない。表1に月別全天日射量，反射量，平均反射率有効日射量を示した。有効日射量とは全天日射量と反射量の差で，雪面における融解蒸発あるいはさらに雪中に進入し，雪温などに関与する。7～12月の全天日射量，反射量は観測値で，月間総量の比として反射率を出している。1月～5月は図2と

表 1 月別の日射収支

Table 1. Monthly values of the radiation budget at the surface.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Global radiation (kcal/cm ²)	24.1	14.0	7.7	2.2	0.1	—	0.0	1.0	4.7	12.8	21.7	25.6
Reflected radiation (kcal/cm ²)	19.6	11.6	6.5	1.9	0.1		0.0	0.9	4.0	11.0	18.3	21.2
Albedo (%)	81.5	83	84	86	86			86	86	86	84	83
Effective radiation (kcal/cm ²)	4.5	2.4	1.2	0.3	0			0.1	0.7	1.8	3.4	4.4

雲の推定値，計算から出した太陽高度角から全天日射量を出し，図 3 の反射率を使って反射量を出した．これらを総計して月間の全天日射量と反射量を求め，その比として反射率を求めた．

ORVIG (1970) が南極の数地点について示したものと比較すると，全天日射量については緯度高度を考慮してやや多目であり，RUSIN (前出) の示したものと良く合っている．また反射量の観測精度があまり良くないと思われるにもかかわらず，反射率については ORVIG の示したものとよく合っている．これは反射量測定において雪面のサスツルギーが問題になる太陽高度角の低い場合の反射量は，月間総計にはあまり効いてこないからかも知れない．

6. ま と め

年間の全天日射量は約 114 kcal となり，昭和基地の 92 kcal よりも大きく，日本国内の場合と比較すると札幌の全天日射量とほぼ等しい．

この様に大きな値となるのは，

- (1) 南半球の夏が太陽近日点にある事
- (2) 大気中の水蒸気量，エアロゾルが少ない事
- (3) みずほ観測拠点の高度が高い事

(4) 雪面での反射率が大きく，雲がある事による日射量の減衰が小さい事などがあげられる．夏至近くでの晴天日の 1 日全天日射量がみずほ観測拠点と昭和基地で 950 Ly, 870 Ly であったのは，主として (3) によるものであり，それぞれの基地の晴天時と曇天時の比，0.67 と 0.57 の差は主として (4) によるものである．反射率が大きい事は全天日射量を多くするが，ほとんどの日射は再び天空に戻り，雪面の有効日射量を少なくする．例えば，ほとんど雪に覆われていない Oasis の夏期の日射量は，晴天の場合については先に述べた様に，それ程大きな違いがないが，曇天の場合は非常に少なくなる．その結果，夏期の月間全天日

射量は約 18 kcal と少なくなる。しかし有効日射量は 14.7 kcal とみずほ観測拠点の倍以上にもなっている。

この事は、気候変化に及ぼす日射収支の影響を論ずる場合の重要な問題を提起する。すなわち雪面と日射収支の関係において、雪がつもると反射率が増し、融解するための有効日射量は減じ、雪面はますます発達するという正のフィードバック機構が成り立っているが、全天日射量は、地表面が雪で覆われているか否かによって変わる事を考慮しなければならない。氷床生成の数値実験などをする場合、現在、観測によって得られている日射量を地表面状態を考慮せずにそのまま使うわけにはいかない。

みずほ観測拠点での日射観測値が半年分しかないので、前記した方法から年間の日射量を算出したが、年間を通じての観測が望まれるのは勿論である。しかしそれとともに日射量、反射率とこれに関与する要素との関係を高い精度で求める様な研究を進める事が重要である。もしこの関係が得られるならば、日射観測が困難な地域についても、人工衛星によって得られる雲などの情報（現在はまだ南極氷床域の雲の情報は人工衛星からあまりよくとれないが）を用いて日射収支を知る事ができるようになるはずである。

文 献

- 有住直介編 (1959) : 気象学ハンドブック. 技報堂, 513.
- LILJEQUIST, G. H. (1956) : Energy exchange of an Antarctic snow-field. Short-wave radiation (Maudheim, 71°03'S, 10°56'W). Norw. -Br. -Swed. Antarct. Exped., 1949-52, Sci. Results, 2, Part 1 A, 109 pp.
- ORVIG, S. (1970) : Climates of the polar regions. World survey of climatology, Elsevier, New York, 14, 256-258.
- RUSIN, N. P. (1964) : Meteorological and radiational regime of Antarctica. Chapter 10, total radiation. Israel Program for Scientific Translations Ltd., Jerusalem, 227-249.
- 佐々木浩 (1974) : 東南極みずほ観測拠点における地上気象観測. 南極資料, 50, 21-28.

(1975年9月29日受理)