

ドームふじにおける放射観測

平沢尚彦^{1*}・藤田耕史²

Radiation observation at Dome Fuji Station, Antarctica

Naohiko Hirasawa^{1*} and Koji Fujita²

(2007年12月11日受付; 2008年5月7日受理)

Abstract: This paper reports radiation observations at Dome Fuji Station from February 1, 2003 to January 20, 2004, carried out by the 44th Japanese Antarctic Research Expedition team. The radiometers which measured the upward longwave radiation (LWu), the downward longwave (LWd) and the downward shortwave (SWd) were equipped with fans to avoid frosting on the surface of the radiometer dome by air circulation. The upward shortwave radiation (SWu) measured by a radiometer without fan needs correction, which we leave as a problem for the future. In addition, as for LWd and LWu in the polar night, a typical radiational cooling case and a suppressed radiational cooling one are shown.

要旨: 第44次南極地域観測隊により、2003年2月1日から2004年1月20日の地上放射観測（短波上向き・下向き、長波上向き・下向き）の結果を報告する。放射計ドームの着霜を回避する目的でファン付き放射計を用いた上向き、下向きの長波放射、及び下向きの短波放射は1997年の観測値と比較的近い値を示し、兩年の観測の妥当性を示唆した。しかし、ファンのない放射計を用いた上向き短波放射は、極夜前後の1-2カ月において下向き短波放射を上回るなど、異常値を示している。着霜がこの原因の候補の一つであるが、確かめられない。データの修正については今後の課題とする。また、極夜期の上向き・下向き長波放射について、典型的な地表面放射冷却時期と放射冷却が抑制される時期について、事例を示した。

1. はじめに

第44次南極地域観測隊により、2003年2月1日から2004年1月20日の期間にドームふじ基地（77°19'S, 39°42'E, 標高3810m）において地上放射観測を行った。観測項目は上向き、下向きの短波放射、及び上向き、下向きの長波放射である。ドームふじ観測拠点における放射観測は、第38次隊による1997年2月9日から1998年1月13日の観測（平沢, 1999,

¹ 情報・システム研究機構国立極地研究所. National Institute of Polar Research, Research Organization of Information and Systems, Kaga 1-chome, Itabashi-ku, Tokyo 173-8515.

² 名古屋大学大学院環境学研究所. Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, Furocho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8601.

* Corresponding author. E-mail: hira.n@nipr.ac.jp

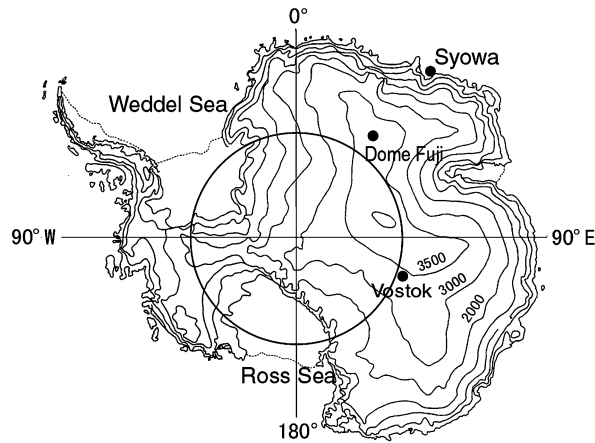


図 1 南極大陸とドームふじ基地の位置. 等値線は標高を示す.

Fig. 1. The Antarctic continent and Dome Fuji Station. The elevation is shown by contours.

Yamanouchi *et al.*, 2003) 以来 2 度目である. 図 1 に示すように, ドームふじ基地は東南極の稜線上にあり, 越冬観測基地としては標高が最も高い (観測当時). ロシアが内陸で運営するポストーク基地 ($78^{\circ}27'S$, $106^{\circ}52'E$, 標高 3420 m) は稜線から少し下った場所にあるためカタバ風の影響下であり, ドームふじ基地はカタバ風帯より上部に位置する唯一の越冬観測基地であった. 以前には, アメリカが運営したプラトー基地 (1966–68 年, $79^{\circ}15'S$, $40^{\circ}30'E$, 標高 3624 m) で 1967 年に放射観測が行われた (Kuhn *et al.*, 1977). Yamanouchi *et al.* (2003) は, 1997 年のドームふじ基地とプラトー基地の放射観測結果とを比較している.

寒冷地での放射計観測では, センサーを覆うドームへ付着する霜を回避することが重要となる. 一般に, 霜の付着はドーム表面の放射冷却が原因となる. その対策として, 送風ファン付きの放射計によりドーム表面の放射冷却を抑える. しかし, それまでのみずほ基地などの観測では, 地吹雪により送風ファンの部位に雪が詰まり, そのため反ってドームへの雪の付着を促進する場合があった. そうしたことから, 1997 年の観測では送風ファンを取り付けなかった. そこでは, 特に長波放射計では霜がつきやすく, 定期的に霜のふき取りを行ったとしても, ふき取ったそばからごく薄い霜が付き始める状態であった. 一方, ドームふじ基地の気象環境はみずほ基地とは異なり, カタバ風がなく地上風速は 7 m/s 程度で降雪量が少ないこともあり, 地吹雪は足元ほどの高さであった. そこで, 2003 年の観測では送風ファン付きの放射計を採用する方針とした. いくつかの事情から, 上向き短波放射だけは送風ファンのない測器となったが, その外の放射計においては送風ファンの部位に雪が詰まることはなく霜の付着を抑えられ, 1 年を通して良好なデータを取得した.

本論文では, 各放射強度の季節変化の概要を示し, 1997 年の結果との比較を行う. また, そこに現れた特徴的な現象について議論する.

表 1 放射計の機種と校正係数

Table 1. The radiometers and the calibration coefficient.

	短波放射計		長波放射計	
	下向(SWd)	上向(Swu)	下向(LWd)	上向(Lwu)
機種	MS801F	MS801	MS202F	MS202F
製造会社	英弘精機	英弘精機	英弘精機	英弘精機
製造年	1996	1986	1996	2001
感度定数(mV/(kW・m ²))	7.0	7.0	4.99	4.31
ドーム定数	—	—	3.71	3.14
測定データインターバル	1分(積分)	1分(積分)	1分(平均)	1分(平均)
霜除けファンの有無	○	—	○	○
ヒーターの有無	○	—	—	—

※有:○、無:—

2. 放射計とデータ

表 1 に放射計の機種と放射強度換算のための測器ごとの校正係数を示す。短波放射計は波長およそ 300 nm から 2800 nm, 長波放射計は波長およそ 3 μm から 50 μm の放射に対して感度をもつ。短波放射計は出力値 V (mV: ミリボルト) に対し, 表 1 の感度定数 S (mV/(kW/m²)) と下記の換算式 (1) を使って放射強度 R_{sw} (kW/m²) を得る。

$$R_{sw}(kW/m^2) = \frac{V(mV)}{S(mV/(kW/m^2))} \quad (1)$$

短波放射計の感度は一般に太陽直達光の入射角が大きくなる(太陽高度角が低くなる)に従って悪くなる。Yamanouchi *et al.* (1981) や Yamanouchi (1983) は, 機種によっては太陽高度角が 20° 以下で急激に感度が低下することを示している (20° で 0.9 程度, 10° で 0.75 程度など)。今回測定に使用した 2 機種のうち, 下向き放射を測定した MS801F は太陽高度角低下に伴う感度低下が比較的少ないが, もう一方の MS801 は感度低下が比較的大きい。また, MS801 にはファンが無かったため, 霜の付着を回避できなかった。これらに関連した測定誤差は明らかではないが, MS801 の測定値に現れた異常値について以下に述べる。

MS801 により測定された上向き短波放射は, 太陽光を源とした下向き短波放射の雪面からの反射であり, それを上回ることはない。しかし, 今回の測定値では, 極夜前後の 3-4 月及び 8-10 月に上向き短波放射強度が上回る。(1997 年の測定結果との比較 (第 4 章) から, 上向き短波放射の測定に異常があることが推察される。) 図 2 に 9 月 21-25 日, 10 月 21-25 日, 11 月 21-25 日の測定値を示す。9 月にはほぼすべての時刻で上向き放射が上回るが 11 月には逆にほぼすべての時刻で下向き放射が上回る。11 月の夜間は 9 月の昼間より放射強度が小さいにもかかわらず, 11 月の夜間の上向き放射が下向き放射を上回っていないことから, 単に太陽の高度角にのみ関連しているわけではないことが分かる。10 月は上向き放射と下向き放射がほぼ同程度の値を示す。太陽が沈まなくなる時期でもある。

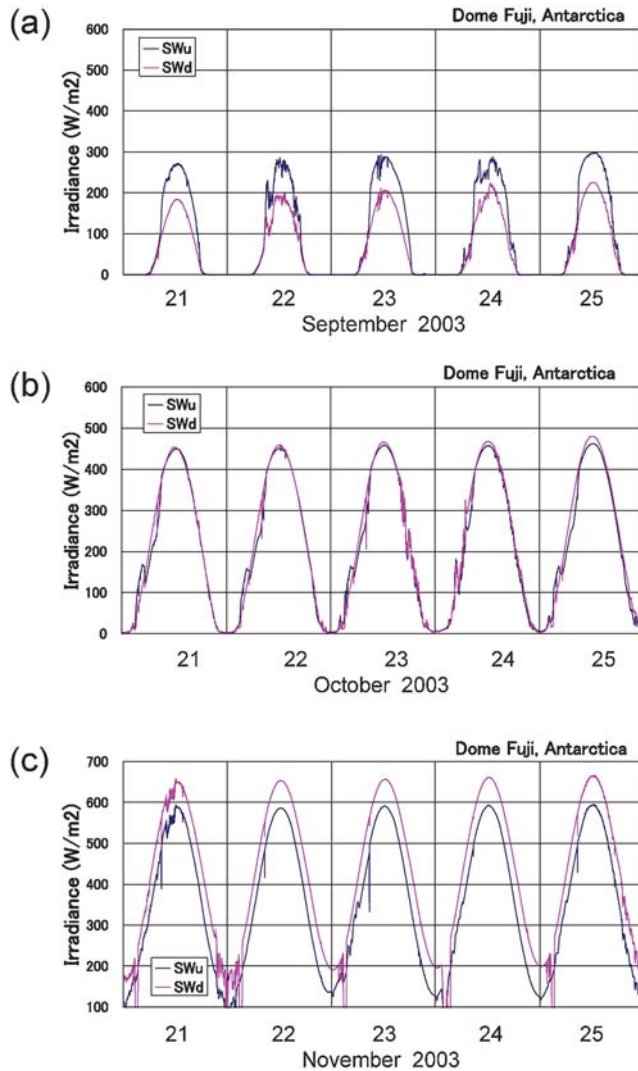


図 2 (a) 9月 21-25 日, (b) 10月 21-25 日, (c) 11月 21-25 日の短波放射強度測定値の時系列.

Fig. 2. Time series of shortwave radiation observed for (a) September 21-25, (b) October 21-25 and (c) November 21-25.

MS801 はファン付きではないため, 常時霜の影響を受けざるを得なかった. 霜は, 放射計ドームを通過する光を散乱させることで, 放射計感部に光を入れてしまう効果があり, 今回の異常値の原因の候補の一つである. これまでのところ有効な補正, あるいは修正アルゴリズムがなく, 今後の課題としている. 本稿では, 上向き放射は下向き放射の反射でありそれを上回ることはないという最低限の制限を設け, 上向き放射が下向き放射を上回る場合には上向き放射の値を下向き放射量と等しく置き換えるという簡易的な補正を施していくつかの計算

を行った。そのため、図2の9月21-25日のような期間では、常に、上向き放射量と下向き放射量は等しくなる。

これとは別に、11月の期間の毎日午前2時過ぎに放射量が減る時間帯は、放射計を設置したポールの陰に放射計が入ってしまうためである。太陽の直達光が遮られるために下向き放射はゼロを示すが、雪面からの反射を受ける上向き放射はゼロにはならないことが分かる。一方、11月24日の午前2時過ぎにはポールの陰になる直前の時刻に皆既日食が起っており、上向き放射もゼロを示す。このときの気象については亀田(2004)に記載されている。

一方、長波放射は放射計の出力値 V (mV) と表1の感度定数 S (mV/(kW/m²)) から、下記の換算式(2)により長波放射収支強度 R_{lw-net} (kW/m²) を求める。

$$R_{lw-net}(\text{kW}/\text{m}^2) = \frac{V(\text{mV})}{S(\text{mV}/(\text{kW}/\text{m}^2))}. \quad (2)$$

長波放射収支強度 R_{lw-net} は、放射計に入射する長波放射強度 R_{lw-in} と放射計感部から放射される長波放射強度 R_{lw-out} との差であり、 R_{lw-out} を放射計感部温度に対する黒体放射で表わせば R_{lw-in} は式(3)で得られる。

$$\begin{aligned} R_{lw-net} &= R_{lw-in} - R_{lw-out}, \\ R_{lw-in} &= R_{lw-net} + \sigma \cdot T_s^4. \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 T_s は放射計感部の測定温度、 σ はステファンボルツマン定数 ($5.6697 \cdot 10^{-8}$ Wm⁻²K⁻⁴) である。

式(3)から求められる R_{lw-in} は、放射計ドームが完全な長波放射フィルターではない影響、すなわち放射計ドームからの放射を受けている。通常その量は小さいが、低温環境では放射強度そのものが小さいため、ここでは表1のドーム定数 K を使ってその補正を式(4)に従って行った。

$$\begin{aligned} R_{lw-in-corr} &= R_{lw-net} + \sigma \cdot (T_s^4 + K \cdot (T_s^4 - T_D^4)) \\ &= R_{lw-net} + \sigma \cdot T_s^4 \cdot \left(1 + \frac{K \cdot (T_s^4 - T_D^4)}{T_s^4} \right). \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 T_D は放射計ドームの測定温度である。補正の程度として、補正率 (Correction ratio of dome effect: $(K \cdot (T_s^4 - T_D^4) / T_s^4) \cdot 100$ (%)) の1分値の時系列を図3に示す。日射がない5月下旬(図3a)には、放射冷却で冷え過ぎた放射計ドームの影響として放射強度を2-5%増す補正が施されている。後半には気象擾乱の影響で温度が上がり極夜期の5-7月の補正率の平均は、下向き放射は3.0% (標準偏差の平均は2.2%)、上向き放射は3.1% (同0.7%)であった。日射がある12月(図3b)には日中に日射で加熱された放射計ドームの影響として放射強度を減らす補正が施されている。夜間にはその逆(すなわち5月と同様)の補正が施されている。

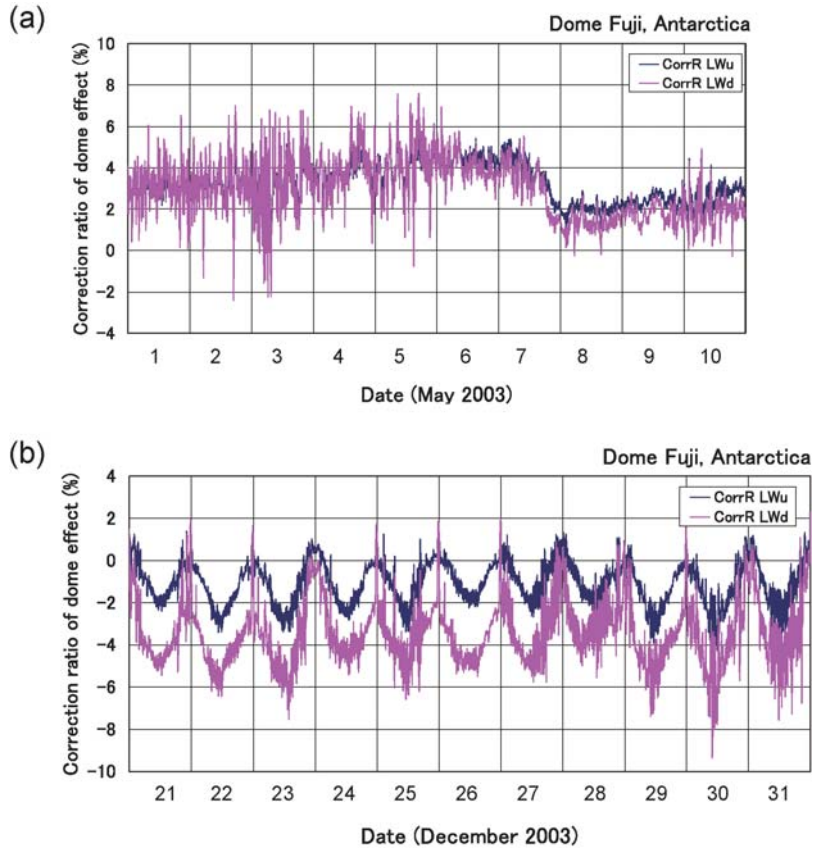


図 3 長波放射の放射計ドーム効果に対する補正率 (Correction ratio of dome effect: $100 \cdot K \cdot (T_s^4 - T_D^4) / T_s^4$) の 1 分値の時系列。(a) は極夜期の 5 月上旬, (b) は夏季の 12 月下旬を示す。

Fig. 3. Time series of correction ratio of dome effect ($100 \cdot K \cdot (T_s^4 - T_D^4) / T_s^4$). (a) for the first 10 days of May, (b) for the last 11 days of December.

以上のようなデータ補正を施し, 短波放射強度, 長波放射強度ともに 1 時間ごとに正時から 10 分間の平均値を基本データとして作成した. この論文では, この 1 時間値を用いて日平均値及び月平均値を求めた.

3. 季節変化

図 4 に放射各項の日平均値の観測全期間の時系列を示す. 章の前半で短波放射について, 後半で長波放射について記載する.

短波放射強度は赤線で示され, 4 月 25 日から 8 月 15 日までの極夜期間の計測はない. 第 2 章で議論したように, 極夜期間前後の 3 月後半から 4 月及び 8 月から 9 月の測定値は, 上向き短波放射強度 (SWu) が下向き短波放射強度 (SWd) を上回っており, データ修正の結果,

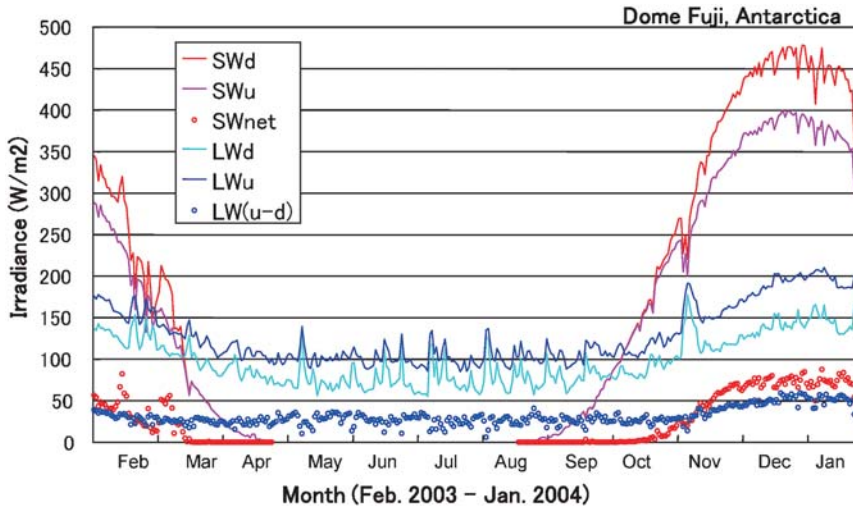


図 4 ドームふじ基地における放射各項の日平均値の観測期間中（2003年2月1日～2004年1月20日）の変化。下向き短波放射（赤色線）、上向き短波放射（桃色線）、正味短波放射（下向き正、赤丸）、下向き長波放射（水色線）、上向き長波放射（青色線）、正味長波放射（下向き正、青丸）を示す。

Fig. 4. Time series of daily mean values of radiation terms at Dome Fuji Station from the 1st of February, 2003 to the 20th of January, 2004. The downward shortwave (SWd: red line), the upward shortwave (SWu: pink line), the net shortwave (SWnet: red open circles), the downward longwave (LWd: sky blue line), the upward longwave (LWu: blue line) and the net longwave radiation (LWnet: blue open circles) are shown.

見かけ上、上向きと下向きの短波放射が等しくなってしまう。現状、この期間の下向き短波放射データの使用にあたっては注意を要する。

太陽高度が最も高くなる12月後半には、下向き短波放射の日平均値が最も大きく約470 W/m^2 になる。この頃の上向き短波放射強度の日平均値は約400 W/m^2 である。概して雲量が少なく、太陽光が長期にわたって遮られることは少ない。それでも、2月20日、25日及び10月31日から11月2日には下向き短波放射強度が顕著に減っている。これらの期間には厚い雲がドームふじ基地付近を覆い、下向き長波放射強度（青い太線）の増加も顕著である。

日平均としての短波放射の反射率（ SWu/SWd ）を図5に示す。反射率は、太陽高度の高い2月と12月、1月には約0.85の一定値を示す。それ以外の季節には上向き放射の異常が影響し、大きい値を示す。

図4に戻って、長波放射について述べる。長波放射強度の日平均値は雪面からの上向き放射強度（ LWu ）が常に下向き放射強度（ LWd ）を上回っている。上向き放射強度の最大は夏至を含む12月後半から1月前半で、約200 W/m^2 である。極夜期を含んで4-9月には100 W/m^2 前後で推移する。上向き放射と下向き放射の差（ $\text{LWu}-\text{LWd}$ ）は雪面の放射冷却強度

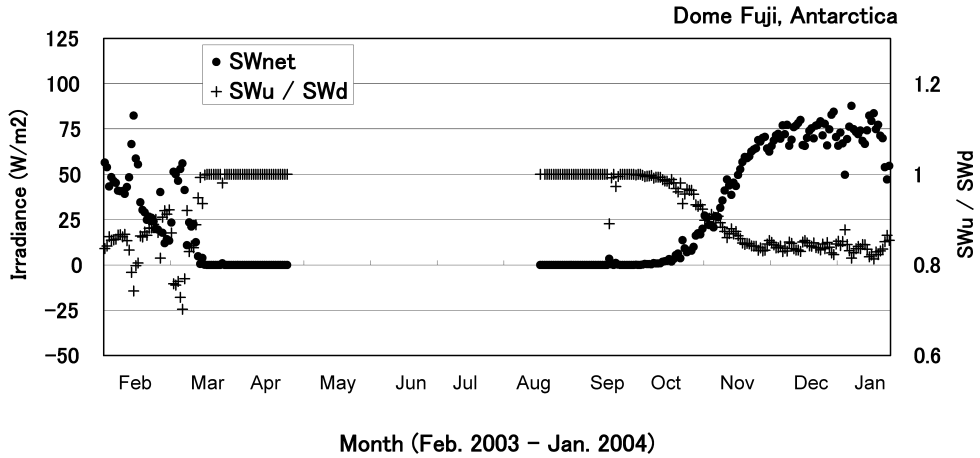


図 5 短波放射の反射率 $((SWu/SWd) \times 100)$ (%) の時系列.

Fig. 5. Time series of reflectivity of shortwave radiation $((SWu/SWd) \times 100)$ (%).

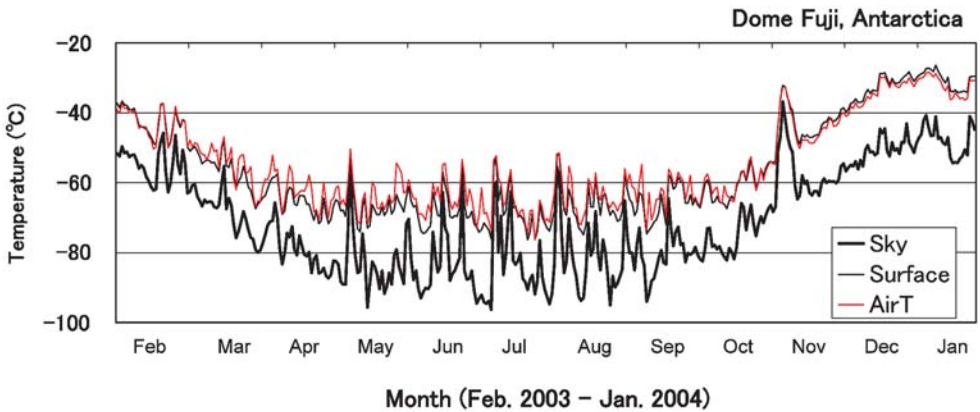


図 6 長波放射強度から計算した黒体相当温度と地上気温の時系列.

Fig. 6. Time series of TBB of LWu and LWd, and surface air temperature.

と対応し、日射により雪面温度が高くなる夏季に大きく ($\sim 50 \text{ W/m}^2$)、冬季に小さい ($\sim 25 \text{ W/m}^2$)。冬季には数日程度の変動が顕著で、特に、Hirasawa *et al.* (2000) などに指摘される気象じょう乱の影響による雲量増加に関連し、下向き放射の変動が上向き放射の変動よりも大きい。

図 6 に、長波放射強度から計算した黒体相当温度と地上気温を示す。上向き長波放射強度は雪面の温度に対応する。3月初めから10月初めの期間には気温が上回っており、接地気温逆転層の形成を反映している。11-1月にかけては雪面温度の方が高く、雪面から大気への顕熱輸送を示唆している。

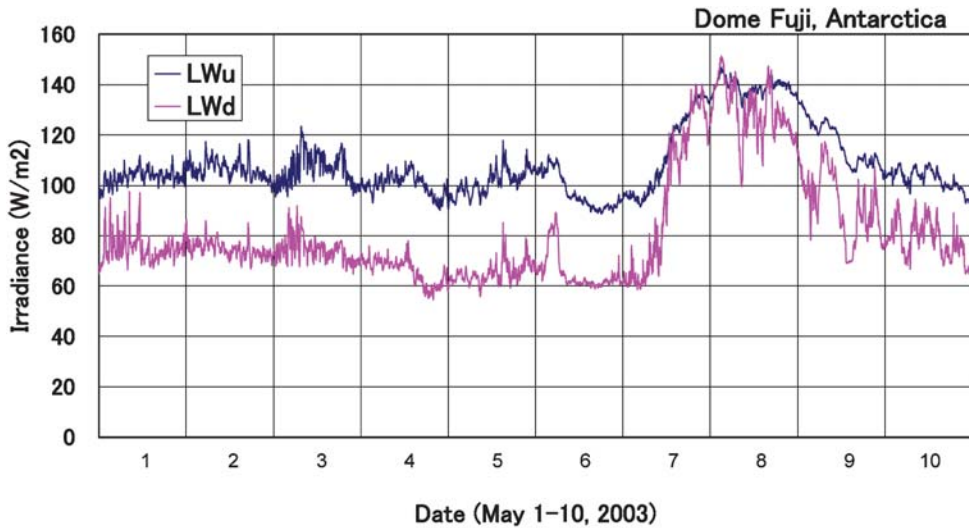


図7 5月上旬の上向き・下向き長波放射の時系列.
 Fig. 7. Time series of LWu and LWd for the first 10 days of May.

4. 極夜期の事例解析

図7に5月上旬の上向き・下向き長波放射の変動を1分値で示す。6日までは全般に30 W/m²程度上向き放射が上回る放射冷却の状態で、8日を中心として上向き・下向きともに放射強度が増し、7日から8日にかけては下向き放射と上向き放射は同程度の値を示し、下向き放射が上向き放射を上回ることもある。この時期の地上気象データでは気温が上がり雲量が増加しており、大気擾乱の影響が示唆される。

一方、5月1日、3日、5日、6日にも下向き放射の小さな増加が観測されている。放射冷却が無くなるほどではないが、温度の異なる上空大気の流れ込みや雲の形成が行われていることを示唆しており、興味深い。

5. 1997年との比較

図8に第38次隊による1997年の短波放射強度の季節変化を示す。図8aには2003年の下向き短波放射強度を黒丸で、上向き短波放射を青丸で重ねて表示した。2003年の上向き短波放射には図4のような補正は施さず測定値を示した。

2003年の下向き放射観測は1997年の放射計と同じ機種である。下向き放射強度の季節変化は両年でよく似ている。1997年の測定では上向き放射が下向き放射を上回ることはなく、2月や9月から1月にかけての反射率(図8b)は0.75-0.8で推移する。両年の夏の反射率を比べると、2003年(0.85)の方がより大きく、2003年の上向き放射の異常値が夏の時期においても含まれている可能性もある。年間を通した上向き放射の異常オフセット値(ここでは、

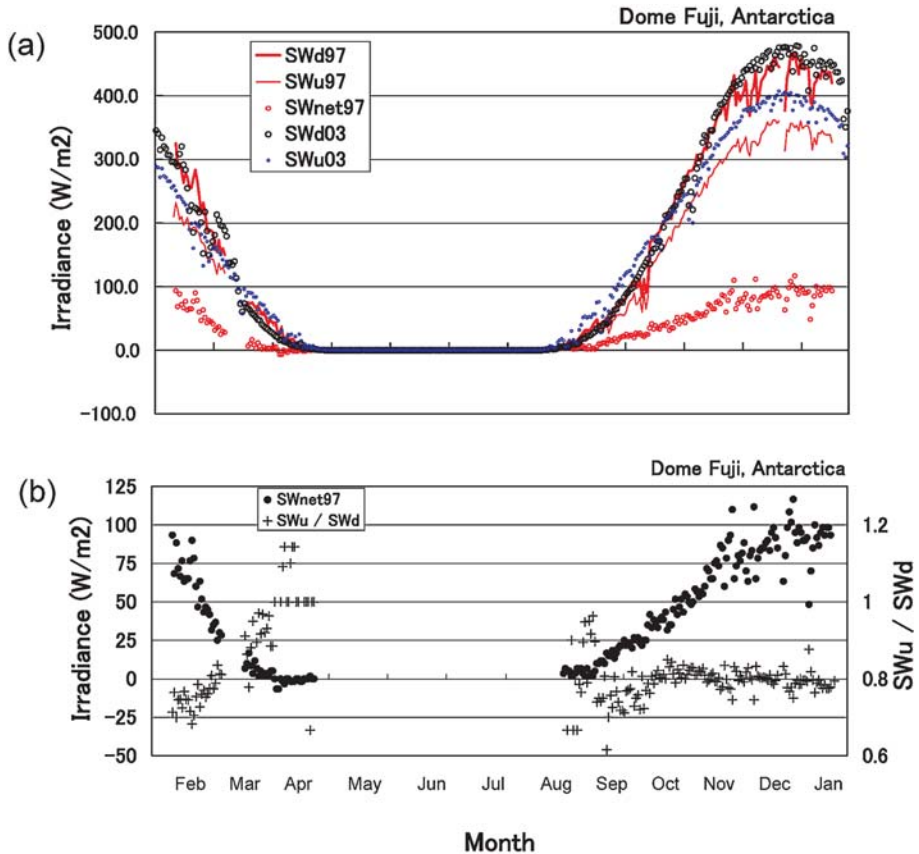


図 8 第 38 次隊による 1997 年の短波放射強度（上向き放射: 赤色細線, 下向き放射: 赤色太線, 正味放射: 赤色丸）の時系列と 2003 年（上向き放射: 青色丸, 下向き放射: 黒色丸）の比較。
 Fig. 8. Time series of SWu (thin red line), SWd (bold red line) and SWnet (red open circles) in 1997 by JARE-38, compared with those in 2003 (SWu: blue circles and SWd: black circles).

加算の作用) を考慮し, 夏の 12-1 月にかけての反射率を 1997 年の 0.8 程度に合わせる操作を工夫することで, 適切な補正方法が見つかる可能性があると考えている. これは今後の課題とする.

図 9 は長波放射の月平均値の比較を示す. 最も顕著な違いは, 4 月から 7 月の下向き放射について, 2003 年が 1997 年を下回ることである. この結果として, 長波放射収支がより大きな負, すなわち活発な放射冷却をもたらしている. 下向き長波放射が小さいことは, 上空に暖かい空気の流入がないことや雲形成が抑制されていることを反映する.

6. ま と め

本論文では, 2003 年 2 月から 2004 年 1 月 20 日にかけてドームふじ基地で行った放射観測の

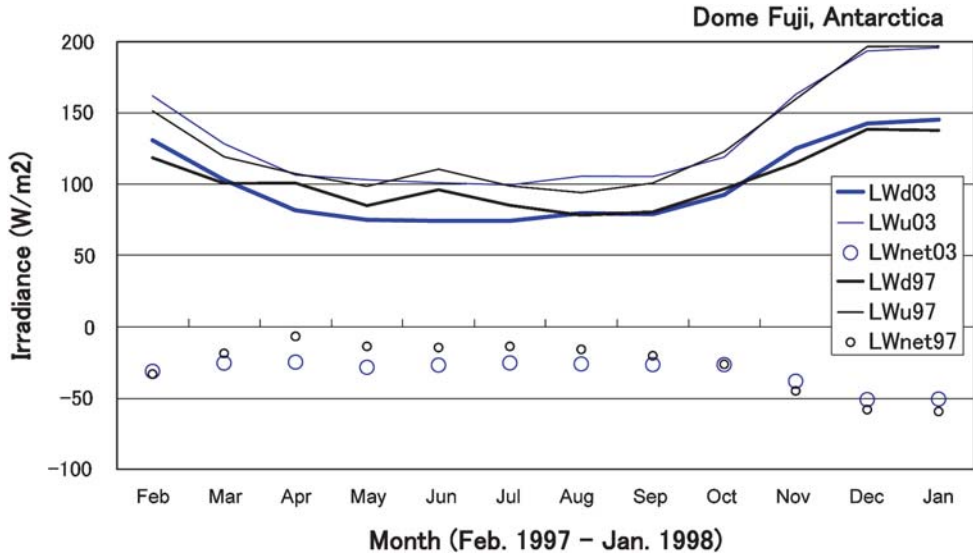


図 9 2003 年と 1997 年の長波放射の月平均値の時系列。
 Fig. 9. Time series of longwave radiation for 2003 and 1997.

結果の概要を記述するとともに、1997 年の結果との比較を行った。短波放射観測では、下向き放射は 1997 年と比較的よく一致した。一方、上向き放射は、極夜前後の 3 月以降、及び 8 月から 10 月に下向き放射上回るなど、測定値の異常が見られる。測定にはファンのない放射計を用いており、霜の影響を常時受けざるを得なかったことが原因の一つの候補である。データ修正は今後の課題とした。

長波放射観測では、放射計ドームへの霜除けのための送風ファン付きの機種を用いたことで、年間を通して良好なデータが取得された。霜や霜取り対策による影響を回避しきれなかった 1997 年のデータと比較して信頼性のより高いデータとなった。

謝 辞

第 44 次南極地域観測隊・ドームふじ基地越冬隊の方々には放射観測の実施にあたり大変お世話になりました。

文 献

- 平沢尚彦 (1999) : ドームふじ観測拠点における高層気象・放射・雲の観測. 天気, **46**, 147-152.
 Hirasawa, N., Nakamura, H. and Yamanouchi, T. (2000): Abrupt changes in meteorological conditions observed at an inland Antarctic station in association with wintertime blocking. *Geophys. Res. Lett.*, **27**, 1911-1914.
 亀田貴雄 (2004) : 皆既日食. 南極北極の百科事典, 国立極地研究所編. 東京, 丸善, 90p.
 Kuhn, M., Kundla, L.S. and Stroschein, L.A. (1977): The Radiation Budget at Plateau Station, Antarctica,

- 1966-1967. ed. by J.A. Businger. Washington D.C., Amer. Geophys. Union, 41-73 (Antarct. Res. Ser. 25).
- Yamanouchi, T. (1983): Variations of incident solar flux and snow albedo on the solar zenith angle and cloud cover at Mizuho station, Antarctica. *J. Meteor. Soc. Jpn.*, **61**, 879-893.
- Yamanouchi, T., Wada, M., Mae, S., Kawaguchi, S. and Tsukamura, K. (1981): Measurements of radiation components at Mizuho Station, East Antarctica in 1979. *Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue*, **19**, 27-39.
- Yamanouchi, T., Hirasawa, N., Hayashi, M., Shuhei, T. and Kaneto, S. (2003): Meteorological characteristics of Antarctic inland station, Dome Fuji. *Mem. Natl Inst. Polar Res. Spec. Issue*, **57**, 94-104.