

極域の下向き長波放射に対する雲と水蒸気の効果

山田 恭平¹、早坂忠裕¹

¹ 東北大学大気海洋変動観測研究センター

Effect of cloud and water vapor on downward longwave radiation in polar region

Kyohei Yamada¹ and Tadahiro Hayasaka¹

¹Center for Atmospheric and Oceanic Studies, Tohoku University, Sendai, Japan

Downward longwave radiation is important factor to affect on climate change. In polar regions, cloud effect is not evaluated sufficiently because the long term polar night and high surface albedo make satellite retrieval difficult. The intent of the present study is to quantify cloud radiative effect for downward longwave radiation in the polar regions by in-situ observation and radiative transfer calculation. The observation sites in this study are Ny-Ålesund (NYA), Syowa (SYO), and South Pole (SPO). These stations belong to the Baseline Surface Radiation Network. The period of data analysis is from 2004 to 2012. The effect of cloud on the downward longwave radiation is evaluated by subtraction of calculated downward longwave radiation under clear-sky condition from observed value under all-sky condition. Radiative transfer model for broad band and narrow band are used for the evaluation of clear sky radiation with vertical temperature and humidity profile obtained by radiosonde observations. Calculated result shows good correlation with observation under clear-sky condition. The bias and RMSE of broadband model is $+0.83 \pm 5.0 \text{ W/m}^2$. Cloud base height and cloud fraction are estimated by micro pulse lidar and sky camera, respectively.

The cloud radiative effect (CRE) varied from -10 - $+110 \text{ W/m}^2$ (-10 - $+40$ %). CRE increased with increasing of cloud fraction and decreasing of cloud base height and precipitable water. The averages of CRE are roughly the same in 3 sites. At SPO, the relative contribution of CRE (the ratio of CRE to observed downward longwave radiation) is larger than the other sites by 10 % because of small amount of water vapor. At Syowa, negative effects were sometimes obtained. The negative cloud effect emerged under dry and temperature inversion condition. One of reasons of negative effect is considered to be existence of cloud at temperature inversion altitude. When the cloud effect is smaller than -5 W/m^2 , 50 % of them have a condition with cloud base height estimated by micro pulse lidar lower than 2 km.

下向き長波放射フラックスは地表面での放射収支を決定する重要な要素であり、水循環や気候変動に大きな影響を与えている。雲や温室効果気体は長波放射を吸収、射出することで地表面を暖めるが、その寄与の見積りには未だ大きな曖昧さが残る。特に極域では長波放射の代表的な吸収・放出源である水蒸気の量が少ないため、雲の影響が特に重要である。しかし極域では極夜や高い地表面アルベドによって衛星による雲のリトリバルが難しく、その影響の見積りは不十分である。

本研究では Baseline Surface Radiation Network (BSRN; Ohmura et al., 1998) に所属している Ny-Ålesund (NYA)、South Pole (SPO)、Syowa (SYO) の 3 観測地点で行われているラジオゾンデ観測と放射観測の結果を用いて雲の下向き長波放射フラックスに対する影響を求め、雲量や大気中の水蒸気量と雲の下向き長波放射フラックスに対する影響を定量的に評価する。表 1 に本研究の対象地点を述べる。扱う期間は 2004 年から 2012 年までである。

雲の放射効果 (Cloud Radiative Effect; CRE) は全天における下向き長波放射フラックスの観測値 ($\text{DLR}_{\text{Obs}}^{\text{All}}$) から快晴を仮定した下向き長波放射フラックスの計算値 ($\text{DLR}_{\text{Cal}}^{\text{Clear}}$) を差し引くことで見積もる。 $\text{DLR}_{\text{Obs}}^{\text{All}}$ は 1 分間平均の下向き長波放射フラックスの値を、さらに前後 30 分で平均し、1 時間平均の値を用いる。広帯域の下向き長波放射フラックスの計算値は 2 流近似法を用いた 1 次元モデルである mstrnX (Sekiguchi and Nakajima, 2008) を用いて求める。快晴時における下向き長波放射フラックスの計算値と観測値の差は $-0.83 \pm 5.0 \text{ W/m}^2$ 、相関係数は $r=0.99$ であり、計算値は観測値と非常に良い相関を示していた。また温室効果気体の下向き長波放射フラックスに対する影響を調べるために、RSTAR6b (Nakajima et al., 1986, 1988) を用いて水蒸気と二酸化炭素の線吸収帯の季節変化や観測地点による違いを求める。雲底高度はマイクロパルスライダーを用いて推定し、雲量は全天カメラに Sky Index - Brightness Index 法 (SIBI 法; 山下と吉村, 2008) を用いて見積もる。SIBI 法を用いて雲量を推定するためには、全天カメラ画像の青空と雲の領域を分割する閾値曲線の推定が必要であるため、各観測地点における目視観測の雲量が 0 および 8 のときを用いて、閾値曲線の定数を観測時間帯ごとに決定する。図 1 に全天カメラによる雲量の推定の一例を示す。

測定期間中、CRE は雲量の増加に伴って増加し、雲底高度や可降水量の増大に伴って減少して約 -10 W/m^2 (-10 %) から 110 W/m^2 ($+40$ %) まで変動していた。CRE の平均値は 3 観測地点間では大きな違いはなかったが、相

対的な CRE の寄与 (DLR_{Obs}^{All} に対する CRE の割合) は、SPO で他の 2 地点より 10%程度大きくなっていました。この理由としては観測期間中の SPO における月平均の可降水量がいずれの月でも 2mm 以下と非常に低かったことが挙げられる。水蒸気の回転吸収帯と二酸化炭素の $15\mu\text{m}$ 吸収帯など、吸収帯の重なり合いによる下向き長波放射フラックスへの影響は、水蒸気が少ない気候状態で顕著に変動する。下向き長波放射フラックスは可降水量に対数的に急激な変化を示し、特に可降水量が 5mm 以下でその変化は激しい (Zhang et al., 2001)。そのため本研究では特に可降水量が小さな SPO とそれ以外の地域で、雲の相対的な寄与に差が生じていたと考えられる。

図 2 に SYO での可降水量の変化に対する CRE の相対的な寄与を示す。負の放射強制力は主にモデルや観測、装置の誤差によって生じるが、本研究中では特に可降水量が 10mm 以下の冷たく乾いた大気状態で負の寄与が多くなっていた。雲による寄与が正であった日と負であった比を比較すると、寄与が負の日は地表付近に気温の逆転層が生じていることが多く、地表面に相対湿度の極大値が存在していた。CRE が -5 W/m^2 以下のとき、50%以上の日がマイクロパルスライダーによって雲底高度 2km 以下の雲を捉えていたが、目視による雲量は快晴に近い状態であり、光学的薄い雲が影響していたと考えられる。

Table 1. BSRN stations in polar regions with continual radiosonde observation.

Region	Station	Abbr.	Lon.	Lat.	Alt.	Period	UTC
Arctic	Ny-Ålesund	NYA	78.9250	11.9300	11	2004-2012	12
Antarctic	South Pole	SPO	-89.9830	-24.7990	2800	2005-2012 (only for summer)	0, 12
	Syowa	SYO	-69.0050	39.5890	18	2006-2012	0, 12

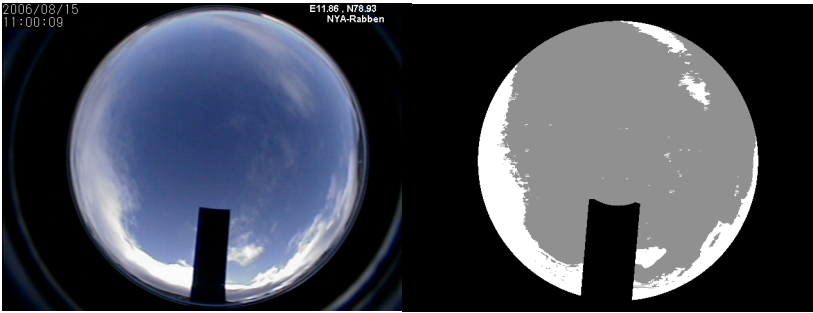


Figure 1. Example of estimation of cloud fraction at NYA, August 15th, 2006, 11UTC.
White and gray indicate cloud and clear-sky, respectively.

Contribution of CRE under all-sky at SYO

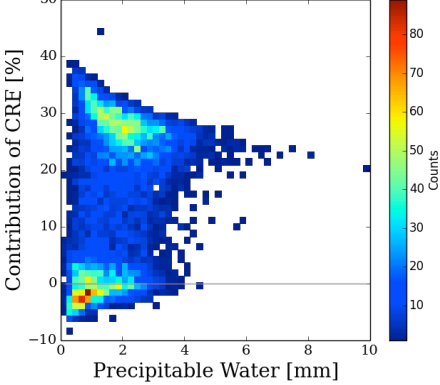


Figure 2. The relationship between precipitable water and contribution of CRE at SYO.

References

Nakajima, T., & Tanaka, M. (1986). Matrix formulations for the transfer of solar radiation in a plane-parallel scattering atmosphere. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, **35**(1), 13-21.

Nakajima, T., & Tanaka, M. (1988). Algorithms for radiative intensity calculations in moderately thick atmospheres using a truncation approximation. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, **40**(1), 51-69.

Ohmura, A., et al., Baseline Surface Radiation Network (BSRN/WCRP), a new precision radiometry for climate research, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **79**, 2115-2136, 1998.

Sekiguchi, M. and T. Nakajima, A k-distribution-based radiation code and its computational optimization for an atmospheric general circulation model, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, **109**, 2779-2793, 2008.

Zhang T, Stamnes K, Bowling SA, Impact of the atmospheric thickness on the atmospheric downwelling longwave radiation and snowmelt under clear-sky conditions in the Arctic and subarctic. *Journal of Climate* **14**: 920-939, 2001.

山下恵, & 吉村充則. (2008). Development of Sky Conditions Observation Method using Whole Sky Camera. *写真測量とリモートセンシング*, **47**(2), 50-59.