

低緯度の下部成層圏に存在する巻雲の特徴について Characteristics of cirrus clouds in the lower stratosphere

岩崎杉紀¹、Z.J. Luo²、久保田尚之³、柴田隆⁴、岡本創⁵、石元裕史⁶

Suginori Iwasaki,^{1*} Zhengzhao Johnny Luo², Hisayuki Kubota,³ Takashi Shibata,⁴ Hajime Okamoto,⁵ and Hiroshi Ishimoto⁶

¹防衛大学校、²ニューヨーク市立大学、³海洋研究開発機構、⁴名古屋大学、⁵九州大学、⁶気象研究所

¹National Defense Academy, ²City College of New York, ³Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, ⁴Nagoya University, ⁵Kyushu University, ⁶Meteorological Research Institute.

Abstract

Stratospheric cirrus (SC), such as jumping cirrus and overshoot plume, is likely hydrate the lower stratosphere since numerical simulations show it is generated from diabatic process of overshooting clouds. However, characteristics of SC are not known. We focus on studying microphysics and global distribution of SC by use of spaceborne sensors. Our retrieval results show the mode radius and the ice water content of SC were 4-10 μm and 1 mg/m^3 or less, respectively. The global distribution of SC suggests that SC is generated from higher overshooting clouds.

1. はじめに

成層圏の水蒸気は地球の温暖化計算の上で欠かせない温室効果気体である (Solomon et al., 2010)。雲頂が成層圏まで達する積乱雲 (オーバーシュート) は、雲を成層圏に直接運ぶので、成層圏の水蒸気量の決定に重要であると考えられている。しかし、それが成層圏の水蒸気量に及ぼす役割は分かっていない。未飽和の下部成層圏に雲を運べば、下部成層圏は加湿されるかもしれないが、それが過飽和であれば雲粒の成長が促されてより落下しやすくなり脱水するかもしれない (Hassim and Lane, 2010)。また、もしオーバーシュートが断熱過程で上昇するならば、雲頂付近は気温が最低となる高度 (cold point height, CPH) のものより冷たくなっているため、その空気塊はすぐに下降をするだろう。この場合、オーバーシュートは成層圏の水蒸気に直接影響を与えない。このため、雲粒子の大きさ、断熱・非断熱過程の割合、周囲の空気の気温や水蒸気量が、オーバーシュートが成層圏を加湿するか脱水するかを決める要因になる。

1km以上CPHより上空にオーバーシュートから作り出されるstratospheric cirrus (SC)は、(1) 数値計算では非断熱過程で成層圏の空気と混ざりあうと示されたこと (Wang, 2013)、(2) 観測から生成直後にすぐに降下して消えることは無いので雲粒子は大きくは無いただろうと推測されること、のため、成層圏を加湿している可能性が高いと思われる。SCの定義は無いが、本研究では、オーバーシュートのドームの風下のアンビルから重力波の砕波により上空に飛び出すjumping cirrusや、オーバーシュートの頂上から熱的な不安定により飛び出すovershoot plumeといったsubvisual cirrus cloudやオーバーシュートとは異なる成層圏の雲をSCと呼ぶこととする。

2. 結果

2.1 事例紹介

図1は、2007年5月22日の22UTC頃 (23日2時LT)、バングラディッシュで観測された衛星搭載ライダーCALIOPと雲レーダCloudSatのSCの緯度高度断面である。ここで、CALIOPとCloudSatは、同じ極軌道に複数の衛星がほぼ時間差なく周回するA-Trainを構成する衛星に搭載されたセンサである。CALIOPでは、CPHの上に2層のSCが観測されている。どちらも温位400K以上に存在するので、気候学的な成層圏に存在する。レーザ光の減衰のため、アンビルより下には信号が観測されていない。CloudSatでは、2層のSCは観測されていない。電波の後方散乱は粒径の6乗に比例するのでレーダは小さい粒子には感度が低いため、粒径が小さいことが示唆される。可視・近赤外の光と異なり電波の減衰は小さいが、CloudSatでも0-5kmに信号が観測されていない。降雨が激しく電波減衰で下層が見えない場合は、下層になるにつれ徐々に信号が薄れていき、今回のようにある高度で急に信号が無くなることは無い。このため降雨が無かったことを示している。

図2は、CALIOPが2層のSCを測定した前後の10 μm の輝度温度である。20UTCのCALIOPの軌道で最も低い輝度温度は200Kである。この輝度温度では対流が発達しているはずだが、CloudSatのデータから雨が降らない。また、この時刻の前後数時間はconvective cloud clusterがほとんど動いていないので、風

が全体に弱いことを示している。ダッカで放球されたラジオゾンデは上空10kmまでしか測定されていないので解析に用いることが出来ない。再解析データERA-Interimでは、下部成層圏でも10m/s以下と弱い風であった。また、convective cloud clusterの最も低い輝度温度は、CALIOPが2層の雲を測定した2-3時間前で、193Kであった。このため、2層の雲はこれらの最も対流が発達した時間帯に出来たのではないかと推察される。

2.2 粒径と氷水量の推定

radar-lidar法(Okamoto et al., 2003)で2層のSCの粒径と氷水量(IWC)を推定する。といっても、CloudSatでそれは観測できていないので、その雲からのレーダ反射はCloudSatのノイズレベル(氷雲で-23dBZ)以下である。そこで、まずはCloudSatの信号をノイズレベルと仮定し、モード半径とIWCの上限値を推定する。その結果、下のSCでモード半径が $25\mu\text{m}$ 、IWCが $2.5\text{mg}/\text{m}^3$ 、上のSCで $28\mu\text{m}$ 、IWCが $1.7\text{mg}/\text{m}^3$ となった。2-3時間ほぼ同じ高度に漂うには、モード半径は $10\mu\text{m}$ 程度でなければならないので、これからも過大に見積もられていることが分かる。同様にIWCも過大に見積もられているはずである。しかし、IWCはオーバーシュートの典型的な値である $10\text{mg}/\text{m}^3$ より小さい。このことは、昇華や沈降によりSCのIWCが減ったことを示唆する。

次に下限値を推定する。radar-lidar法による推定で、ほとんどのオーバーシュートの粒子の個数密度は $3.2 \times 10^5/\text{m}^3$ 以下であることが示された。そこでSCの個数密度もこれ以下とする。これは、SCがオーバーシュートから生成されているとすると、沈降や昇華によりその個数より減るだろうと推測されるからである。これにより、下限値は下のSCでモード半径は $5\mu\text{m}$ 、IWCは $0.6\text{mg}/\text{m}^3$ 、上のSCでモード半径は $4\mu\text{m}$ 、IWCは $0.2\text{mg}/\text{m}^3$ となった。

2.3 経験的なしきい値による全球分布

図示していないが、その他多数のSCの特徴から、以下の3つをSCと判定するしきい値とした。

- convective cloud clusterがSCの下に存在するため、輝度温度は220K以下
- 熱帯圏界面に多数ある巻雲などの雲を排除するため、SCのCALIOPの雲頂は、CPHやCloudSatの

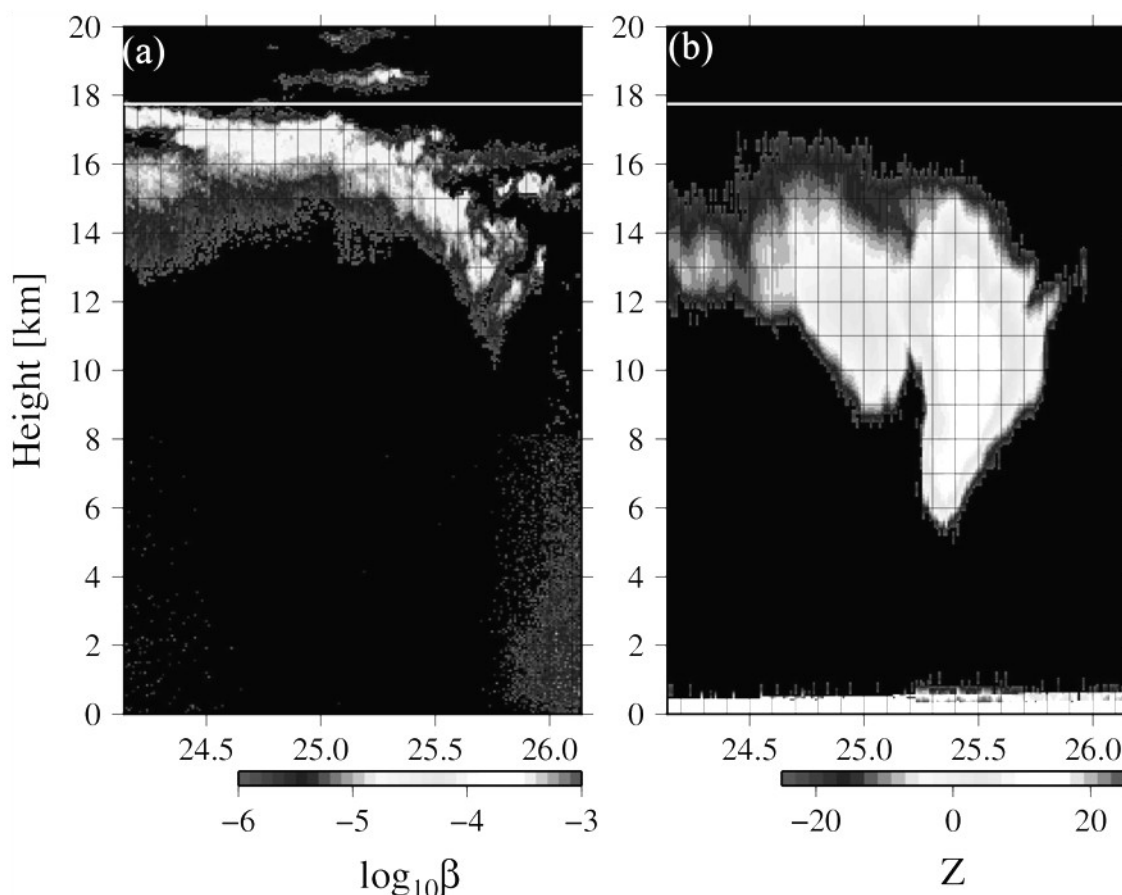


図1 2007年5月22日の22UTC頃(23日2時LT)、バングラディッシュで観測された(a) CALIOPの後方散乱係数、(b) CloudSatのレーダ反射因子。白線はECMWFで見積もられたCPHの高さ。

雲頂より1km以上高い

- SVCを排除するため、雲の幅を150km以下

とした。これらのしきい値により、4年間で131のSCを見つけ、うち106例が1層構造、13例が多層構造であった。10%がSCでない雲をSCと判定したが、これはERA-InterimのCPHの誤推定が原因と思われる。しかし、何千ものSCでない雲は排除することができた。

図3はオーバーシュートとSCの全球分布である。これより、東南・南アジアのプレモンスーン期に多くSCが出現することが分かった。これらの地域のプレモンスーン期の対流は、モンスーン期のものより背が高いことが知られている(Kodama et al., 2004)。これは、背が高い対流によってSCが作られていることを示唆する。ただ、南米ではオーバーシュートが多く観測されているにもかかわらずSCはほとんど観測されていない。経験的なしきい値を改良する必要があるかもしれない。

3 2重のSCの成因過程の考察

Wang et al. (2008)では、無風のオーバーシュートの数値実験を行った。その結果は、(1) オーバーシュートに下部成層圏の空気が不均一に混ざりあい、暖かい空気塊が冷たい空気塊の下に入り込んだ

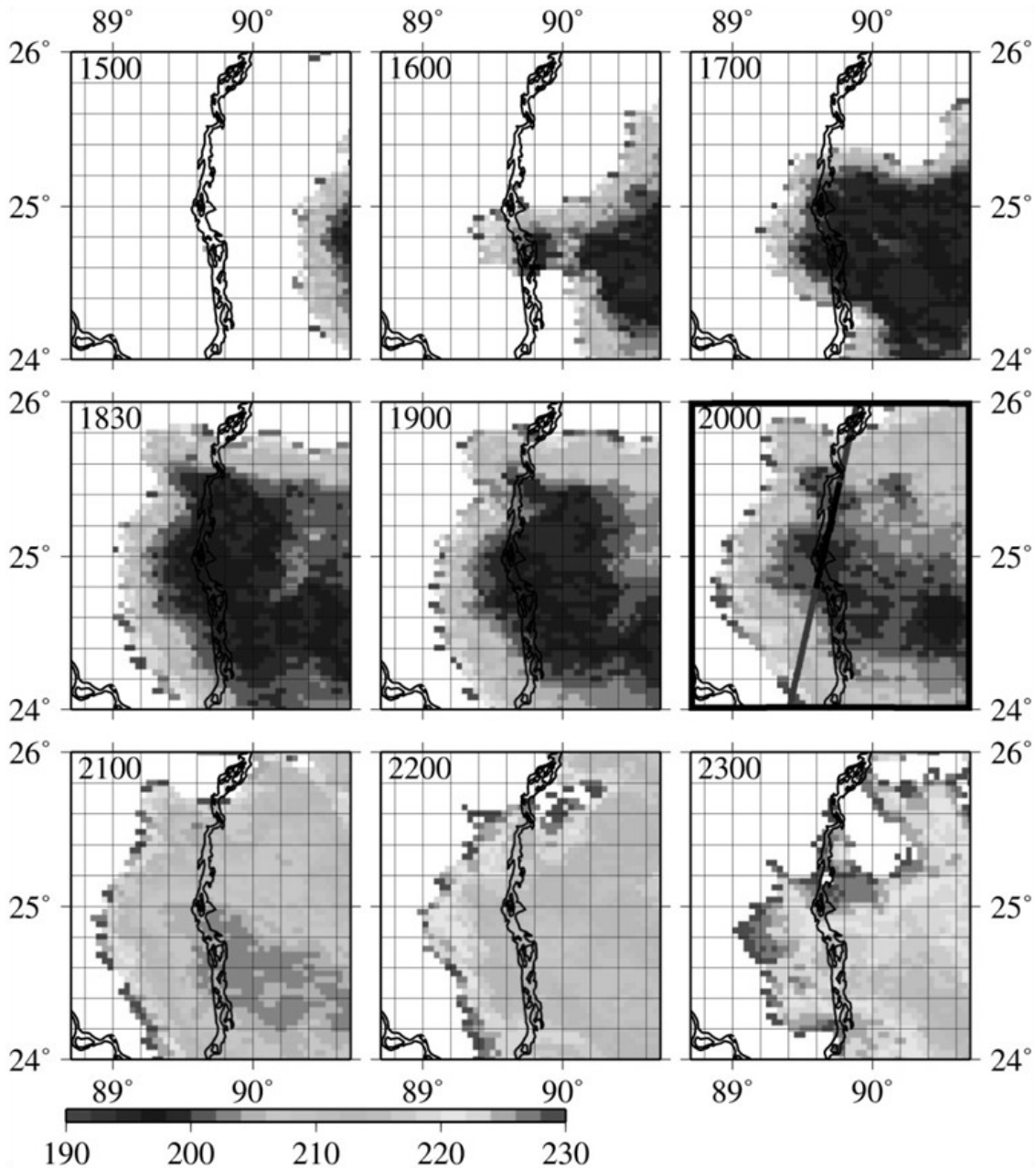


図2 MTSATの1時間ごとの赤外温度。バングラディッシュのダッカの北のJamuna川沿い。CALIOPは20時頃に2層のSCを観測した。20時の中央の斜線はCALIOPの軌道を表わしている。視差補正は雲頂高度を18kmと仮定して行っている。Iwasaki et al. (2015)より転載。

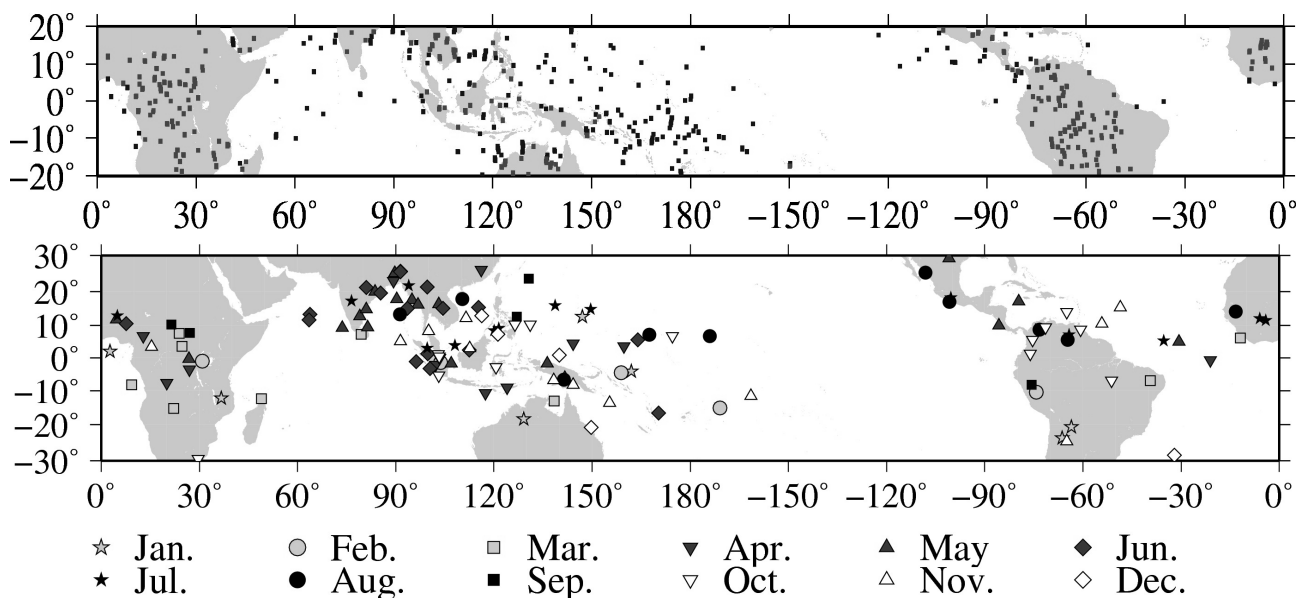


図3 (上) オーバーシュートと(下) 経験的なしきい値で見つかったSCの全球分布。Iwasaki et al. (2010, 2015)より転載。

時にそれを上に押し出してオーバーシュートの上に雲を形成する、(2) この押し出された雲も成層圏の空気塊と不均一に混ざることによりその上に雲を作り、2層構造のSCがオーバーシュートの上に作られる、(3) 無風なので水蒸気は周辺から供給されないため、いったん雨が降った後は雨が降らない、ことを示した。これらの結果は本研究で示した結果と酷似する。このため、本事例解析の2層のSCはオーバーシュートと成層圏の空気塊の熱的な不安定によって生成したと考えられる。

4 おわりに

本研究では、オーバーシュートから下部成層圏に放出されたとみられるstratospheric cirrus (SC)の事例解析を行った。オーバーシュートから2-3時間後のSCのモード半径とIWCはそれぞれ4-10 μm 、1mg/m³以下と推定された。また、経験的なしきい値で求めた全球分布から、背の高いオーバーシュートがSCを作ると考えられた。数値実験との比較より、2層のSCは、オーバーシュートの熱的な不安定から生成されたと考えられた。

5 参考文献

- Hassim, M. E. E., and Lane, T. P., 2010. A model study on the influence of overshooting convection on TTL water vapour. *Atmos. Chem. Phys.* 10, 9833–9849. doi:10.5194/acp-10-9833-2010.
- Iwasaki, S., Shibata, T., Nakamoto, J., Okamoto, H., Ishimoto, H., and Kubota, H., 2010. Characteristics of deep convection measured by using the A-Train constellation. *J. Geophys. Res.* 115, D06207. doi:10.1029/2009JD013000.
- Iwasaki, S., Z. J. Luo, H. Kubota, T. Shibata, H. Okamoto, and H. Ishimoto, 2015: Characteristics of cirrus clouds in the tropical lower stratosphere, *Atmospheric Research*. 164-165, 358-368, doi:10.1016/j.atmosres.2015.06.009.
- Kodama, K., Ohta, K., Katsumata, M., Mori, S., Satoh, S., and Ueda, H., 2005. Seasonal transition of predominant precipitation type and lightning activity over tropical monsoon areas derived from TRMM observations. *Geophys. Res. Lett.* 32, L14710. doi:10.1029/2005GL022986.
- Okamoto, H., Iwasaki, S., Yasui, M., Horie, H., Kuroiwa, H., and Kumagai H., 2003. An algorithm for retrieval of cloud microphysics using 95 GHz cloud radar and lidar. *J. Geophys. Res.* 108, 4226. doi:10.1029/2001JD001225.
- Solomon, S., Rosenlof, K. H., Portmann, R. W., Daniel, J. S., Davis, S. M., Sanford, T. J., and Plattner, G. K., 2010. Contributions of Stratospheric Water Vapor to Decadal Changes in the Rate of Global Warming. *Science*. 327(5970), 1219-1223.
- Wang, P. K., Setvák, M., and Rabin, R., 2008. A cloud model interpretation of satellite observed features atop severe storms, EUMETSAT Conference in Darmstadt, Germany.
- Wang, P. K., 2013. *Physics and Dynamics of Clouds and Precipitation*, Cambridge University Press, New York, 467 pp.