

CALIPSO、CloudSat、MTSATで観測したovershootingの解析
Analysis of an overshooting measured by CALIPSO, CloudSat and MTSAT

岩崎杉紀¹、中元次朗¹、柴田隆²、岡本創³
 Suginori Iwasaki¹, Jiro Nakamoto¹, Takashi Shibata², Hajime Okamoto³

¹ 防衛大学校、² 名古屋大学、³ 東北大学
¹ National Defense Academy, ² Nagoya University, ³ Tohoku University

Abstract

Water vapour is known as an important gas for chemical and radiative effect in the stratosphere and upper troposphere and it is transported from the lower latitude to the higher latitude in the stratosphere. An overshooting, a cloud intrusion through its level of neutral buoyancy above a cumulonimbus, is known as one of the origins to rehydrate the tropical stratosphere. However, an overshooting also affects dehydration of stratosphere because of a cold air intrusion; hence, the role of an overshooting is not known. Here we show that an overshooting rehydrates the stratosphere by synergy observations of a space-borne lidar Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations (CALIPSO), a space-borne cloud radar CloudSat, and Multifunctional Transport Satellite (MTSAT). That is, retrieved mode radius and ice water content of the overshooting measured by CALIPSO but not by CloudSat are $21.0 \pm 5.5 \mu\text{m}$ and $(0.20 \pm 0.14) \times 10^{-2} \text{ g/m}^3$, respectively. Thus half of ice water exists above the cold point tropopause (CPT) after 30 min from the overshooting, where we assume CPT is the same height of observed thin cirrus cloud in the tropical tropopause layer (TTL), TTL cloud. In addition, the difference of brightness temperatures of MTSAT shows there were enough water vapor in the stratosphere above the overshooting. Since the overshooting we analyzed occurred in the smallest class of a cloud cluster, the similar rehydration should be usually occurred. Therefore, we may underestimate the rehydration of stratosphere by overshootings. We anticipate effects of overshootings would resolve TTL issues such as a generation mechanism of a TTL cloud which dehydrates the air entering the stratosphere. Hence, our study would be the important key to reveal the complicated mechanism of rehydration and dehydration of lower stratosphere.

はじめに

オーバーシュートは成層圏を加湿するという説(Jensen et al. 2007)と、脱水するという説(Sherwood and Dessler 2001)がある。この相反する主な理由は、オーバーシュートの雲の粒径分布が分かっているからである。すなわち、Sherwood and Dessler (2001)では、雲粒子が十分大きくオーバーシュート後すぐに沈降し、成層圏には冷たい空気塊だけ残るので脱水する、Jensen et al. (2007)ではオーバーシュートの雲粒子は小さく十分ゆっくり沈降するので成層圏を加湿する、と相反する数値計算の結果を示している。

両結果の妥当性を検討するには、オーバーシュートの雲粒子を直接測らなければならないが、それは積乱雲の最も活発なところに機器を投入しなくてはならず、不可能である。オーバーシュート付近の雲粒子観測としてはChaboureaud et al. (2007)がGeophysicaの航空機観測をオーバーシュートの上空(18.2km)で行った。また、Nielsen et al. (2007)はオーバーシュートから200km離れた場所で気球とライダー観測を行った。が、いずれも乾燥した成層圏の影響を受けているため、正確な測定とはいえない。

Alcala and Dessler (2002)は熱帯降雨観測衛星(TRMM; Kummerow et al. 1998)のレーダデータ解析を行い、深い対流のうち5%がオーバーシュートし、その粒子の平均半径と個数密度は $138 \mu\text{m}$ と $0.4 \times 10^{-6} /\text{m}^3$ と見積もり、その終端速度が1 - 3 m/sとなるのですぐにオーバーシュートの粒子はなくなるだろうと結論した。Liu and Zipser (2005)もAlcala and Dessler (2002)と同様の解析を5年間のデータで行い、深い対流のうち0.1%がオーバーシュートしていると見積もっている。しかしながら、ここで注意したいのは、彼らの用いたTRMMは小さい粒子(<100 μm)に感度がないことである。このため、彼らは大きい粒子の解析しかしていない。

ここでは、オーバーシュートに含まれるすべての雲粒子の解析も行うため、衛星搭載ライダーCALIPSO(Winker et al. 2002)と衛星搭載雲レーダCloudSat (Stephens et al. 2002)の同時観測データをOkamoto et al. (2003)のアルゴリズム(以下、radar/lidar解析)で解析した。なお、radar/lidar解析は、雲の微物理量を最も誤差が少なく導出できることがHeymsfield et al.(2008)によって示されている。さらに、MTSATの輝度温度の差より成層圏の水蒸気量を見積もった。

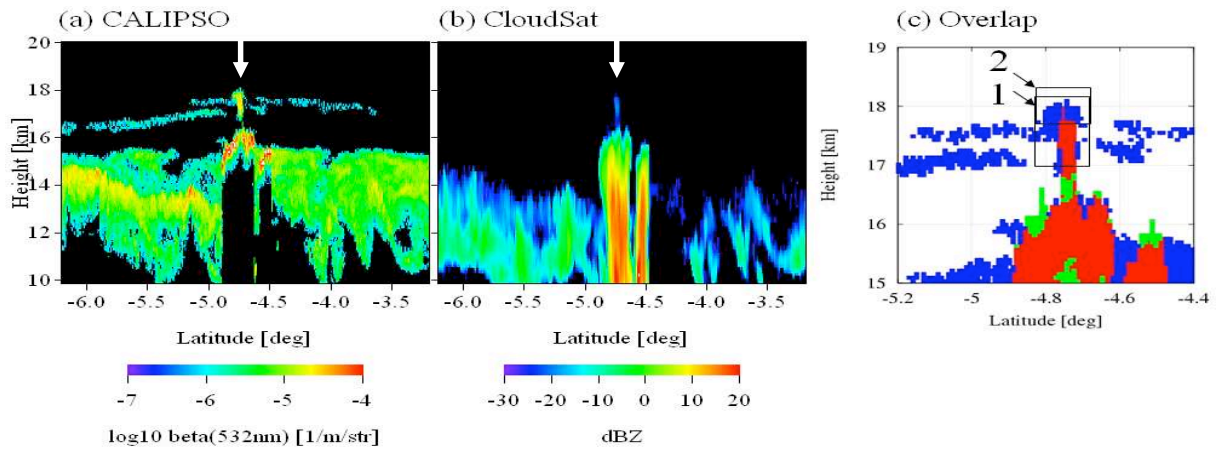


Figure 1. Space-borne lidar and radar measurements of the overshooting. The height-latitude sections of (a) the attenuated backscattering coefficient of CALIPSO β' and (b) the attenuated radar reflectivity factor by Cloud-Sat Z' at 0145 LT on 13 January, 2007. The cloud top of the overshooting is 18.1 km and detected on 4.75 °S, 178.9 °E. We assume data below (a) 5×10^{-7} /m/str or (b) -27 dBZ are noise, respectively. (c) Overlaps of CALIPSO and CloudSat data; red, blue and green denote data observed with CALIPSO and CloudSat, only observed with CALIPSO, and only observed with CloudSat, respectively. The rectangles 1 and 2 denote the overshooting above CPT defined by GMAO and that by TTL cloud height, respectively.

観測

図1は、2007年1月13日の0145LT、4.75 °S、178.9 °EでCALIPSOとCloudSatによって観測されたオーバーシュートで、その減衰補正を行っていない後方散乱係数 β' 、レーダ反射因子dBZ、両データの重なり具合を示したものである。雲頂は18.2 km、幅10 kmに渡っていた。Global Modeling and Assimilation Office (GMAO)によって見積もられたcold point temperatureとその高さはそれぞれ -82.4 °Cと17 kmでオーバーシュートよりも低かった（ただしGMAOデータの高度分解能は1kmである）。最寄のラジオゾンデ観測はタラワ島で行われているが、放球時間が10時間、距離も900kmも異なるので、ゾンデデータは参考にはならない。

図1で、CloudSatで観測されているがCALIPSOで観測されていないものは（例、オーバーシュートの下側）、減衰が激しくレーザー光線が下まで届いていないためである。また、CALIPSOで観測され、CloudSatで観測できていない雲（例、17km付近の2層の薄い雲）は、粒子数が少ないか雲粒子が

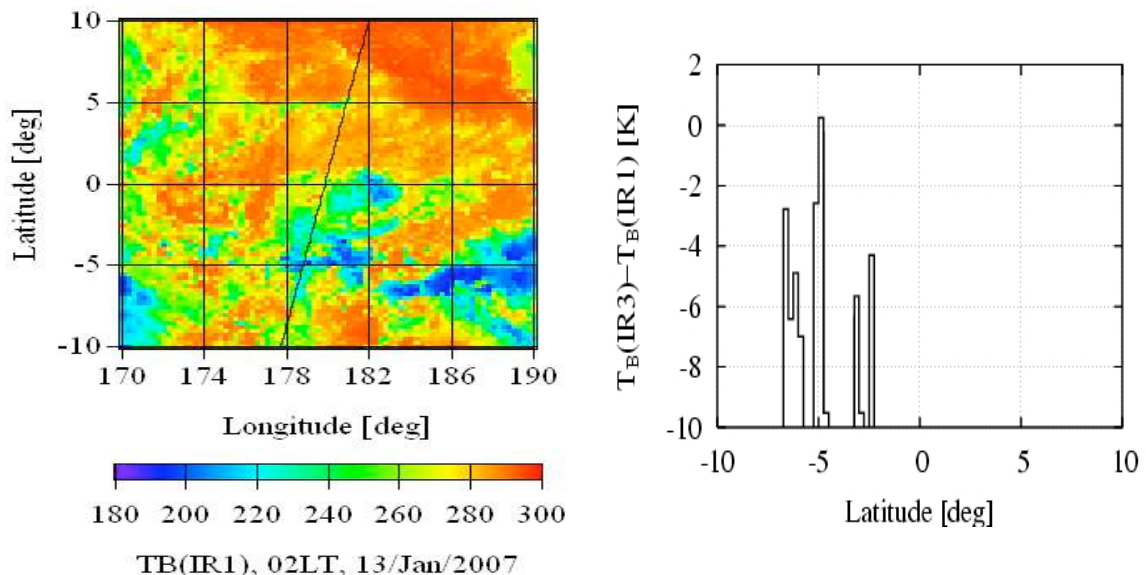


Figure 2. MTSAT measurements of the overshooting. (a) The latitude-longitude section of the brightness temperature of channel 1 (a wavelength of 10.3 - 11.3 μ m) T_B (IR1) measured with MTSAT at 0200 LT, 15 minutes after the overshooting. The special resolution is $0.25^\circ \times 0.25^\circ$. The diagonal line denotes CALIPSO and CloudSat orbit. (b) $\Delta T_B = T_B(WV) - T_B(IR1)$ along the satellite's orbit. ΔT_B is positive around the overshooting and it is $+0.25$ K.

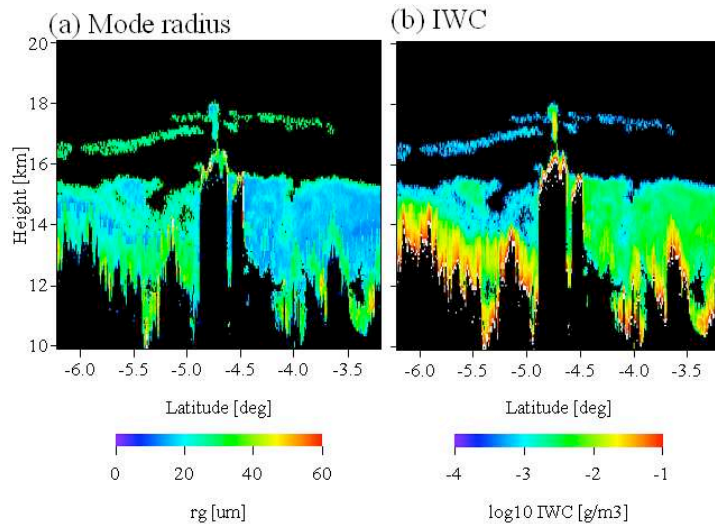


Table 1. r_g and IWC analysed in area 1 and 2.

	Area 1	Area 2
CAL +CLO	$25.4 \pm 3.0 \mu\text{m}$, (1.11 ± 0.52) $\times 10^{-2} \text{ g/m}^3$	$24.4 \pm 2.8 \mu\text{m}$, (1.63 ± 0.79) $\times 10^{-2} \text{ g/m}^3$
CALI PSO	$21.0 \pm 5.5 \mu\text{m}$, (0.20 ± 0.14) $\times 10^{-2} \text{ g/m}^3$	$22.2 \pm 5.6 \mu\text{m}$, (0.17 ± 0.13) $\times 10^{-2} \text{ g/m}^3$

"CAL+CLO" denotes retrieval of CALIPSO and CloudSat synergy data. "CALIPSO" denotes that only CALIPSO measured clouds hence CloudSat data are assumed as -27 dBZ for the radar/lidar analysis. Area 1 and 2 are assumed CPT is defined as GMAO data and TTL cloud height, respectively, and represented as rectangles in Figure 1(c).

Figure 3. Retrieval of r_g and IWC. Here we assume the log-normal distribution with the standard deviation 1.5 as a particle distribution of clouds. Note we assume -27 dBZ when CALIPSO measures clouds but CloudSat can not because we assume signals below -27 dBZ as noise of CloudSat. Thus, retrieved results of which data are observable by CALIPSO but not by CloudSat would be overestimated. For example, though a particle size of a TTL cloud is basically less than $20 \mu\text{m}$, the retrieved size of TTL clouds are $20\sim 30 \mu\text{m}$. Some data synergy observed with CALIPSO and CloudSat can not be retrieved. The reason would be the size distribution or particle shapes are quite different from our assumption.

小さいためCloudSatの感度以下になっているためである。オーバーシュートを起こしている場所では、CloudSatは14km以下で15dBZ以上を観測している。

図1(a)では、幾何学的厚さが400m以下の薄い雲が高度16.5km以上に2層観測されている。一方は南緯4.5°Sで高さ17.3 kmから南方に150km、もう一方は南緯5.1°Sで高さ17.5 kmから北方に180kmそれぞれ水平に伸びている。これらはSVC又はTTL cloudとして知られている雲で、その特徴は幾何学的厚さが1km以下、水平に一様、時には2700kmに渡って一様に存在することが知られている(Winker and Trepte, 1998)。これらのTTL cloudの高度はオーバーシュートの付近で最も高く、それぞれの先端で500mくらい低くなっている。TTL cloudはcold point temperature付近で観測され、その高度は水平一様であるのが多い。このため、オーバーシュートやその周辺の深い対流でcold point tropopause (CPT)がオーバーシュート付近で高くなった可能性がある。なお、GMAOで計算された等温位面の高度はほとんど変わっていない。

オーバーシュートの寿命は20~30分程度であるため、これら2つのTTL cloudはこのオーバーシュートにより作られたのではない(もしオーバーシュートにより作られたなら、その水平に広がる速さは平均70m/sにもなり現実的ではない)。従って、これらTTL cloudはオーバーシュートの前に生成されたと思われる。ただ、もしそうであるなら、他のTTL cloud同様これらのTTL cloudも水平一様であるはずだが、図1(a)にあるようにオーバーシュートの付近、特に北側で消滅して不連続になっているように見える。Jensen et al. (2007)のオーバーシュートの数値計算で、オーバーシュートの両脇に下降気流が出現すると示している。これらTTL cloudも成層圏の乾いた空気塊の下降で消され不連続になったかもしれない。

図2(a)は同日0200LTのMTSATによって観測された輝度温度 $T_B(\text{IR1})$ である。オーバーシュートの T_B は190Kであった。また、それを含む208K以下の領域の面積は $4.5 \times 10^3 \text{ km}^2$ で、Chen et al. (1996)のクラウドクラスタ分類ではもっとも小さいClass 1に分類される。このため、このクラウドクラスタが特別に発達していたためオーバーシュートが引き起こされた、というわけではない。

図2(b)は、輝度温度の差 $\Delta T_B = T_B(\text{WV}) - T_B(\text{IR1})$ で、 ΔT_B が正になるのは、水蒸気が雲頂よりも暖かい高度に存在する、つまり成層圏に水蒸気が存在することを示唆する(Chung et al. 2008)。図2(b)より、オーバーシュートの箇所の ΔT_B だけ+0.25 Kと正になっている。従って、オーバーシュートによ

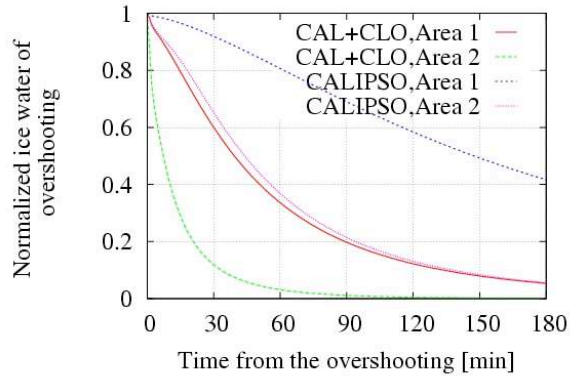


Figure 4. Decreasing of total amount of ice water due to terminal velocity. We assume particles as hexagonal columns whose aspect ratio, $2a/L$ where a and L denote length of hexagon side and that of column, is $1/3$. The terminal velocity is then estimated at 85 hPa and -81°C with Boehm (1989). The tendencies of decreasing are the same when aspect ratios are $1/6$, 3 , and 6 . The legend "CAL+CLO" denotes retrieval of CALIPSO and CloudSat synergy data. "CALIPSO" denotes that only CALIPSO measured clouds hence CloudSat data are assumed as -27 dBZ for the retrieval. Area 1 and 2 are defined by CPT height and represented as rectangles in Figure 1(c).

り水蒸気が成層圏へ輸送されたと推定することが出来る。また、図では示していないが、周辺のクラウドクラスターでは $0\sim 4\text{K}$ 程度までの ΔT_B が広範囲にわたって観測されている。もし、それらの箇所をCALIPSOとCloudSatで同時観測できていたならば、より発達したオーバーシュートを観測できたかもしれない。

成層圏に達したオーバーシュートは、CPTの高さによって図1(c)の四角で囲んだ領域1と2が考えられる。(1)はGMAOのCPTより高い雲をオーバーシュートの雲とする区分である。ただし、これはデータ同化で高度方向 1km 分解能と粗い閾値である。(2)はTTL cloudがCPTの高さに沿って観測されることが多いので、TTL cloudの高さをCPTの高さと仮定し、それより高い雲とする方法である。ここではどちらの区分でも解析を行った。

図3に解析結果を示し、それを表1にまとめる。CALIPSOだけが観測した雲の粒径の方がCALIPSOとCloudSatどちらも観測できた場合より $10\sim 20\%$ 小さく、標準偏差が大きい。また、IWCは10倍小さくなった。(1)と(2)の区分による違いはほとんど見られなかった。

粒子は沈降だけすると仮定した場合、解析できた全雲氷量の時間変化を図4に示す。ただし、オーバーシュートの実際の体積が不明なので、0分を1と規格化している。まず、CPTがGMAOで見積もられた 17km とした場合、CALIPSOだけが観測した雲の全氷水量とCALIPSOとCloudSatが観測した雲の全氷水量のどちらも半分以上の雲氷が $20\sim 30$ 分(～オーバーシュートの寿命)以上CPTより上に浮遊していられる。一方、TTL cloudの高さをCPTと仮定した場合、同時観測できた氷粒子はすぐにCPT以下に落下してしまい、成層圏に存在し続けることは難しいことが分かった。

まとめ

CALIPSO、CloudSat、MTSATでオーバーシュートを同時観測することが出来た。オーバーシュートの一部はCALIPSOでは観測できたがCloudSatでは観測できなかった。オーバーシュート付近のTTL cloudの高度分布より、cold point tropopause (CPT)の高さがオーバーシュートかその周辺の深い対流により持ち上げられた可能性がある。このため、オーバーシュート付近でTTL cloudの高度分布を見れば、オーバーシュートによる重力波の励起(Lane et al. 2001)を観測できるかもしれない。また、オーバーシュートの両脇にはTTL cloudが不連続になっていた。これは、Jensen et al. (2007)のモデル計算でも示されたオーバーシュートの縁の下降流によりTTL cloudが消滅したと考えることもできる。TTL cloudによりオーバーシュートの周辺の環境場や風の流れを推測できる可能性がある。

CPTの高さをTTL cloudの高さと同じとした場合、CALIPSOとCloudSatの両方が観測できた雲の r_g とIWCは、 $25.4\pm 3.0\ \mu\text{m}$ 、 $(1.11\pm 0.52)\times 10^{-2}\ \text{g/m}^3$ となった。CALIPSOでは観測できたがCloudSatは感度以下であった雲は、最大 $21.0\pm 5.5\ \mu\text{m}$ 、 $(0.20\pm 0.14)\times 10^{-2}\ \text{g/m}^3$ となった。これらの結果は、Jensen et al. (2007)のオーバーシュートのモデル計算と矛盾しない。また、MTSATの輝度温度の差から、このオーバーシュートの上の成層圏に水蒸気が存在することが示唆された。

雲粒子の消滅が終端速度による沈降だけで決まると仮定した場合、成層圏に存在できる雲氷の量は、CPTの高さと雲粒子の粒径に強く依存する。CALIPSOとCloudSatの両方で観測できる雲はすぐにCPT以下に沈降してしまうため、成層圏の加湿には寄与していないと考えられる。一方、CloudSatでも観測できないオーバーシュートの雲は30分後でも半分以上の雲水がCPTの上に存在することができる。これが成層圏の加湿に寄与し、MTSATでそれが観測されたと考えられる。

ここで解析したオーバーシュートは、Chen et al. (1996)の区分の最も小さなクラスのクラウドクラスターで起きたものである。このため、この程度の加湿は珍しい現象ではなく、我々はオーバーシュートの加湿を過小評価している可能性がある。今後はより多くの事例で解析を行っていきたい。