

熱帯上部対流圏における弧状巻雲と雲物理パラメーター推定

稲飯洋一（札幌管区气象台 気象防災部予報課）

1. はじめに

熱帯上部対流圏における巻雲は、全球の放射バランスや対流圏-成層圏間の物質輸送に重要な役割を担っている。本研究では、熱帯中西部太平洋において深い対流に伴って形成され数十時間程度維持される弧状の巻雲に注目し、巻雲が維持される弧状領域と巻雲が消失する弧状内部領域の空気塊の起源やそれぞれの空気塊が経験した気象要素を比較することで、熱帯上部対流圏における雲物理パラメーターについて考察する。

2. データと手法

2020年11月と12月について、気象衛星ひまわりによる赤外画像データを用いて、弧状の巻雲の存在を確認し、放射輝度温度から推定された雲頂高度データ(Hamada and Nishi, 2010)や衛星(CALIPSO)搭載ライダー(CALIOP)観測データを用いて、その高度を確認した。次に、巻雲が維持されている弧状領域と巻雲の消失した弧状内部領域それぞれからECMWF ERA5 客観再解析データを使用した多粒子後方流跡線解析(Inai, 2018; Inai et al., 2019)を行った。

流跡線はサブグリッドスケールの輸送や混合は正確に表現できないため、衛星観測された放射輝度温度と流跡線に沿った気温とを比較する事で、流跡線で表現される空気塊に対して対流遭遇判定(Inai et al., 2013; 2018)を行った。これにより対流による持ち上げや混合を考慮に入れながら空気塊が経験した気温など気象学的要素を推定し、特に巻雲が維持されている弧状領域と巻雲の消失した弧状内部領域との差に注目した解析を行った。

さらに、上記のように推定された気象要素

を束縛条件にして雲微物理パラメーターについて簡単なスweep計算を行い、対流持ち上げ時に空気塊に氷晶として含有される氷水量や、上部対流圏における氷晶の重力落下に伴う氷水損失速度について吟味した。

3. 結果と考察

弧状巻雲は熱帯中西部太平洋において2020年11月から12月にかけて4事例確認され、その高度は雲頂高度推定データや衛星搭載ライダー観測から、約12 kmから15 kmであると推定された。それぞれの事例について多粒子後方流跡線解析を行った結果、弧状内部領域の空気塊は直近(およそ24時間以内)に生じたメソスケール対流系(Mesoscale convective system: MCS)の対流コアによって下部対流圏から上部対流圏へ持ち上げられた空気塊であること、巻雲を維持している弧状領域の空気塊は予め上部対流圏にあった空気と深い対流起源の空気が混合したものであると推定された。

弧状領域と弧状内部領域のそれぞれの空気塊について、対流遭遇以降に経験した最低気温(多くの場合、対流遭遇時あるいはその直後に経験)を推定、比較した(第1図)。最低気温経験後の気温変化率に注目すると、巻雲の消失した弧状内部の空気塊は後+0.8 K/h程度の変化率で昇温している一方、弧状巻雲を維持している大気は同様に+0.3 K/h程度の変化率であることが示された。

弧状領域、弧状内部領域の空気塊は、共に対流に遭遇した時点では氷晶を包含していたと考えられ、弧状領域ではその後も氷晶が維持される一方で弧状内部領域では消失したと考えられる。この事がある程度の簡略化とと

もに数式化すると、弧状領域については、

$$SMR_0^A + rI * IWC_0 - IWC_{sed} * t > SMR_1^A \quad (1)$$

弧状内部領域については、

$$SMR_0^I + IWC_0 < SMR_1^I \quad (2)$$

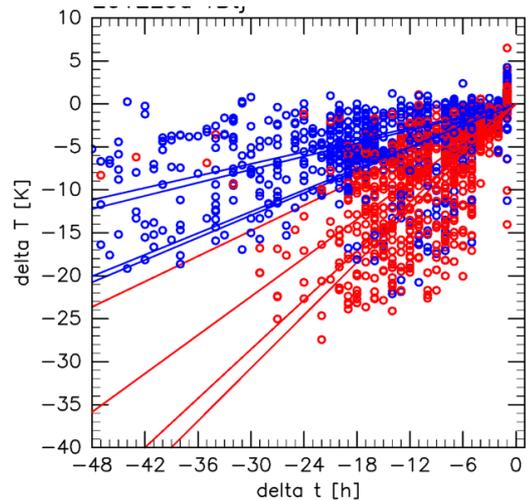
と表すことができる。ここで、 $SMR_0^{A,I}$ ：対流遭遇時の飽和水蒸気混合比 [ppmv]、 $SMR_1^{A,I}$ ：流跡線計算初期時刻の飽和水蒸気混合比 [ppmv]、 IWC_0 ：対流遭遇時の氷水量（弧状内部領域） [ppmv]、 rI ：弧状内部領域と弧状領域の IWC_0 の比、 IWC_{sed} ：氷晶の重力落下による氷水損失速度 [ppmv/h]、 t ：対流遭遇時から流跡線初期時刻までの時間 [h]、である。

式(1)(2)を利用して雲微物理パラメータについてスイープ計算を行った結果の一例を第2図に示す。この事例の場合、弧状領域と内部領域で対流遭遇時の氷水量が同じ（すなわち $rI = 1$ ）であったと仮定した場合には、 IWC_{sed} の上限は 2.3 ppmv/h と推定された。同様に、弧状領域の氷水量の初期値が内部領域の2倍（すなわち $rI = 2$ ）と仮定した場合には、氷晶落下による氷水損失速度の上限は 7.5 ppmv/h と推定された。

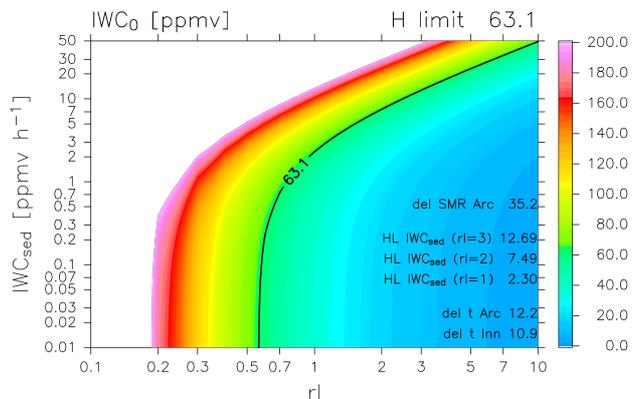
同様のスイープ計算を他の事例についても行ったところ、氷水損失速度の上限は、対流遭遇時の氷水量に対する比で 3%~10%/h 程度であると推定された。

参考文献

- Hamada, A., and N. Nishi, 2010, *J. Appl. Meteor. Climate*, Vol. 49, pp. 2035-2049.
- Inai, Y., et al., 2013, *ACP*, 13, 8623-8642, doi:10.5194/acp-13-8623-2013.
- Inai, Y., 2018, *JGR: Atmos.*, 123, doi:10.1029/2018JD028300.
- Inai, Y., et al., 2018, *Atmos. Env.*, doi:10.1016/j.atmosenv.2018.04.016.
- Inai, Y., et al., 2019, *ACP*, 19, 7073-7103, doi:10.5194/acp-19-7073-2019.



第1図：弧状巻雲全4事例について、弧状巻雲領域（青）と弧状内部領域（赤）の空気塊が対流遭遇以降に経験した最低気温（多くの場合対流遭遇時の気温）とその時刻（流跡線計算初期時刻からの相対値）。実線は個々の事例の結果についての回帰直線を示す。



第2図：2020年12月1日4時（UT）、高度13 kmの弧状巻雲事例について、弧状領域と内部領域の対流遭遇時の氷水量の比（ rI ：横軸）と氷晶落下による氷水損失速度（ IWC_{sed} ：縦軸）の値をスイープした場合に計算された、弧状内部領域の空気塊の対流遭遇時の氷水量（ IWC_0 ）の下限値（色）。同上限値は黒等値線で示されている。