

領域大気モデルを用いた熱帯対流圏中層の 層状構造に関する数値実験

大塚成徳・余田成男

京都大学大学院理学研究科

要 旨

熱帯対流圏中層でしばしば観測される水蒸気の層状構造について、その三次元的構造や物質輸送の特徴を調べるためにメソスケールの領域大気モデルを用いて数値実験を行った。再現実験で得られた高湿度の層状構造の水平スケールは約 1000km、鉛直スケールは約 1km であった。層状構造が出現した領域を中心に大量粒子群の後方追跡実験を行ったところ、層状構造の湿潤な部分は北西風により熱帯収束帯から移流されてきており、その上下の乾燥した部分は南東から移流されてきていた。流線解析の結果、層状構造の成因は、東西に並んだ二つの総観規模渦の間にあるよどみ点の位置が鉛直にずれていることであることがわかった。

キーワード: 熱帯収束帯, 対流圏中層, 層状構造

1. はじめに

1999 年に東部太平洋赤道域において調査船「照洋丸」によるオゾンゾンデ観測が Soundings of Ozone and Water in the Equatorial Region (SOWER)/Pacific 計画の一環として行われた (Shiotani et al., 2002)。照洋丸は北緯 2 度線に沿って西経 140 度 (9 月 21 日) から 110 度 (9 月 28 日) まで東進し、その後北緯 10 度、西経 95 度 (10 月 7 日) まで北東に進んだ。塩谷らはその期間中オゾンゾンデ観測を行い、相対湿度とオゾンの層状構造を高度 2km, 5km, 9km 付近にしばしば観測した。鉛直スケールは約 1~2km であった。これらの層では相対湿度がオゾンや南北風と逆相関になっていた。つまり湿潤な層はオゾンの濃度が低く、北風が吹いていた。塩谷らは、海面付近の空気はオゾンに乏しいことから、熱帯収束帯において対流圏中層に持ち上げられた湿潤でオゾンに乏しい空気塊が北風で移流されてきたと推測した。

層状構造に関する先行研究としては、Danielsen et al. (1987) による大気微量成分の層状構造の観測報告がある。その後、層状構造の研究は PEM-West A

(Newell et al., 1996) や PEM-Tropics A (Stoller et al., 1999) の太平洋中部・西部での飛行機キャンペーン観測などにより展開された。これらの研究では微量成分の組成比をもとに空気塊の起源が推定されている。一方、対流圏中層の 0°C 安定層とそれに伴う雲の層状構造については Johnson et al. (1999) などの研究がある。高度 5km 付近の 0°C 安定層が雲の成長を抑制し、雄大積雲を生じさせ、雄大積雲からのデトレイメントにより対流圏中層に湿潤な空気が供給されると考えられている。

ラジオゾンデ観測や飛行機観測は時間的空間的に限られるが、もし数値実験により四次元データが得られれば、層状構造の時間変動、力学的特徴、物質輸送の特徴などについて知ることができる。そこで、本研究ではメソスケールの領域大気モデルを用いて、照洋丸観測期間のうちの 3.5 日間について数値実験を行う。

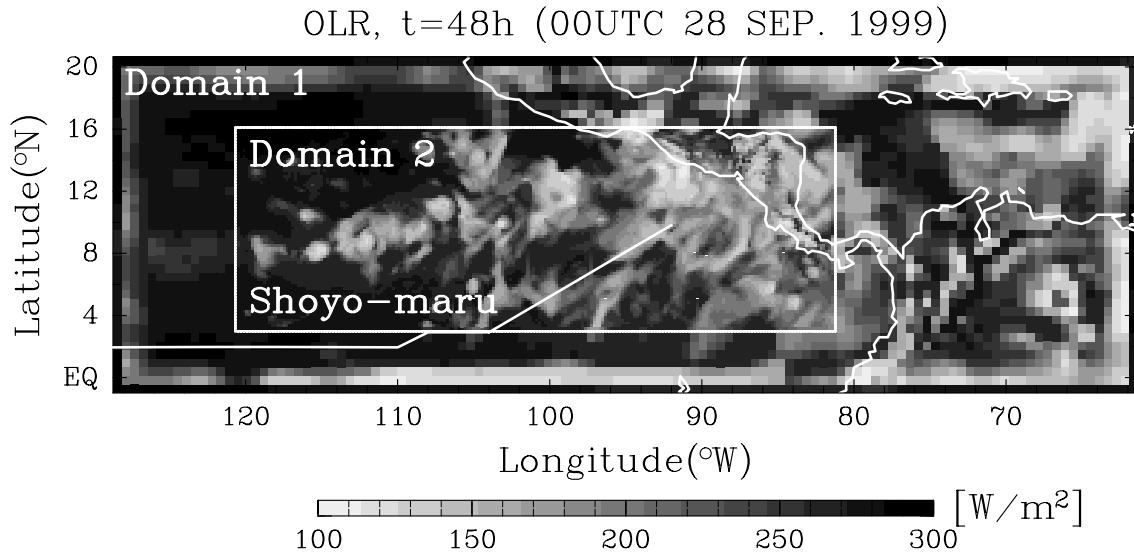


Fig. 1 Outgoing longwave radiation at 48 h from the initial time of integration. The inner white box shows the area of Domain 2. The white line beginning from lower left side of the figure shows the cruise track of Shoyo-Marui.

2. モデル

本研究で使用したモデルは、非静力学領域大気モデルの The Fifth-Generation NCAR/Penn State Mesoscale Model (MM5) である。計算領域は Fig. 1 に示したように東部太平洋の西経 62 度～128 度、南緯 1 度～北緯 20 度である。モデルは二つのドメインから成り、2-way nesting している。外側の Domain 1 は 40×120 グリッドで、格子間隔は 63 km である。内側の Domain 2 は 73×211 グリッドで、格子間隔は 21 km である。鉛直には地表から下部成層圏の 25 hPa まで 62 層ある。鉛直格子間隔は対流圏中層では約 300 m である。二つのドメインとも積雲パラメタリゼーションを用いており、微物理パラメタリゼーションは雲水・雨水・氷・雪を含むものを用いた。放射過程は長波・短波を含み、特に雲からの長波放射も扱っている。計算期間は 1999 年 9 月 26 日 00 UTC～9 月 29 日 12 UTC の 3.5 日間である。初期値・境界値に与えるデータとしては水平解像度 1 度、時間間隔 6 時間の NCEP Global Tropospheric Analyses (FNL) を用いた。

モデルの再現性を示すためにいくつかの結果を示す。Fig. 1 は計算開始から 48 時間後 (9 月 28 日 00 UTC) の上向き長波放射 (OLR) の図である。OLR の分布は衛星赤外画像のパターンとよく似ている。熱帯収束帯の雲列が北緯 10 度付近に沿って西経 120 度から 80 度付近まで伸びている。

相対湿度の鉛直分布も照洋丸観測の結果とよく似た分布を示す。Fig. 2 は計算で得られた対流圏中層の湿潤な層状構造の例である。南北風 (破線) が高度 2 ～6 km で相対湿度 (実線) と逆相関を示しているのが

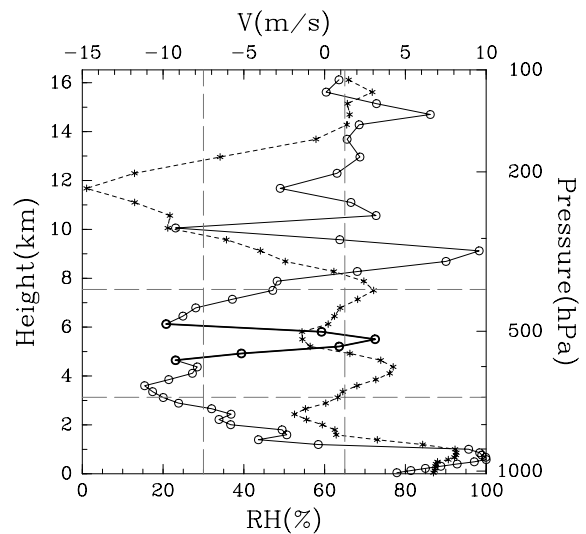


Fig. 2 Vertical profiles of relative humidity (RH, solid line with open circles) and meridional wind component (V , dotted line with asterisks, positive value means southerly) at 109.7°W and 4.9°N , $t = 48\text{ h}$. Gray and vertical dashed lines show thresholds to extract the layered structure. Gray and horizontal dashed lines show the range of analysis. Thick line part of the RH profile is an example of the layered structure.

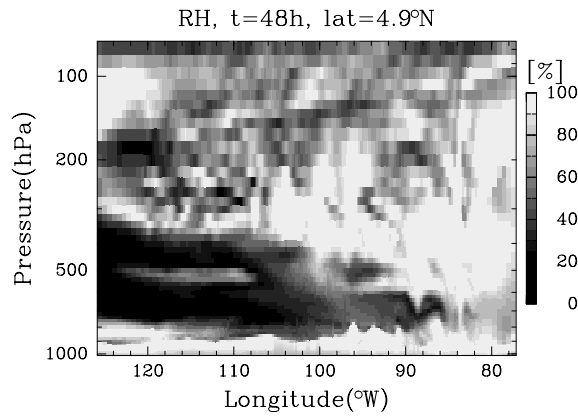


Fig. 3 Zonal section of relative humidity (RH) at 4.9°N, $t = 48$ h (00 UTC 28 Sep. 1999).

わかる。つまり湿潤な部分では北風が吹き、乾燥した部分では南風になっている。高度 5~6 km 付近にある湿潤層の鉛直スケールは約 1.5 km で、照洋丸観測で得られたものと同程度である。Fig. 3 は計算結果における相対湿度の東西鉛直断面図である。全般に対流圏上部は相対湿度が高く、東の方ほど湿潤な部分の下端が低い。また、Fig. 2 に見られた 500 hPa 付近の湿潤層が西経 108 度~122 度に広がっている。この結果は Shiotani et al. (2002) の Fig. 7 や Fujiwara et al. (2003) の Fig. 3a で示されているような照洋丸観測における相対湿度の経度分布と似た特徴を示している。

我々の計算結果は層状構造の様々な特徴をよく再現しており、MM5 における積雲や微物理のパラメタリゼーションの選び方についても適切と判断できる。そこで以下ではこの対流圏中層の層状構造についてさらに解析を進める。

3. 結果

3.1 層状構造の分布

まず相対湿度の鉛直プロファイルを用いて層状構造の定義を行う。ここでは最も湿潤な部分が相対湿度 65% 以上、湿潤な部分の上下で最も乾燥した部分が相対湿度 30% 以下のものを層状構造とした。Domain 2 の計算結果のうち対流圏中層に注目するために解析は 700~400 hPa の範囲に限って行った。また、この範囲で特に薄い層に注目するために相対湿度 30% 以上の部分の厚さが 150 hPa (~2 km) 以下のものを抽出した。Fig. 2 はこれらの条件で得られた層状構造の典型例である。その鉛直の広がりとは約 1.5 km である。

Fig. 4 は層状構造が見られた領域の水平分布図である。背景のトーンは固体・液体の水の鉛直積算量を示している。北緯 8 度~12 度には熱帯収束帯の対流雲のかたまりが見える。層状構造は熱帯収束帯の南側の対流活動の少ない穏やかな領域に出現している。一方熱帯収束帯の北側には層状構造は見られない。層状構造の出現領域の東西スケールは約 1000 km、南北スケールは約 400 km である。最も大きい層状構造のかたまりは $t = 20$ h くらいに出現し始め、 $t = 48$ h に面積が最大になった後、東西に引き伸ばされながら縮小していった。このかたまりの寿命は 1~2 日くらいである。層状構造の下端 (相対湿度が 30% になるところ) の高度は約 4.5 km で、層状構造のかたまりの中ではほぼ一様であるが、層状構造の厚さは西の方ほど厚く (~1.5 km)、東の方ほど薄い (<1 km)。

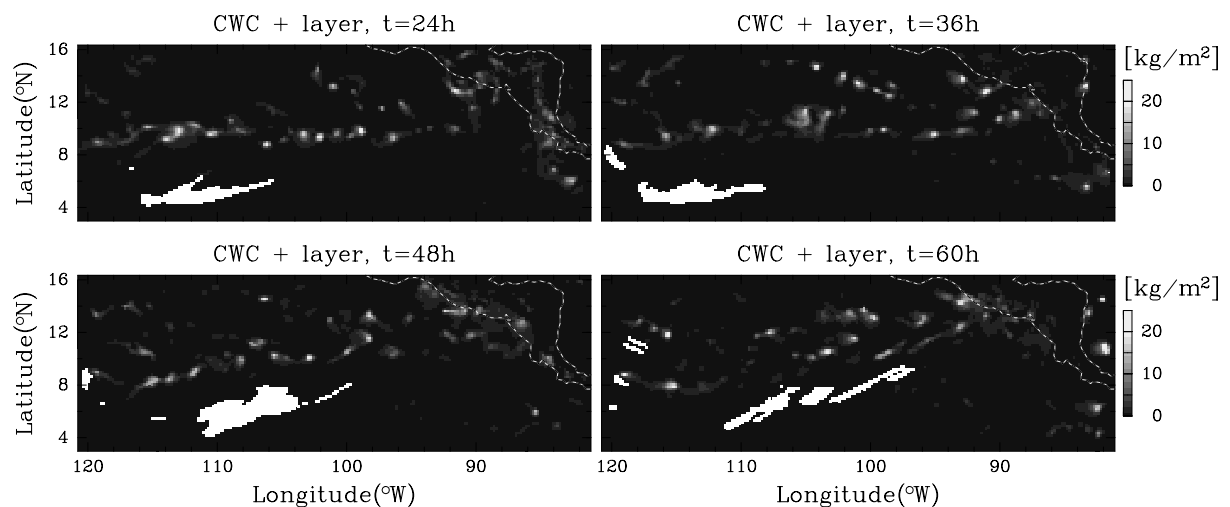


Fig. 4 Horizontal distribution of the area where the layered structures are obtained at $t = 24$ h, 36 h, 48 h, and 60 h in white. Column amount of cloud water content (CWC) in also shown with gray tones.

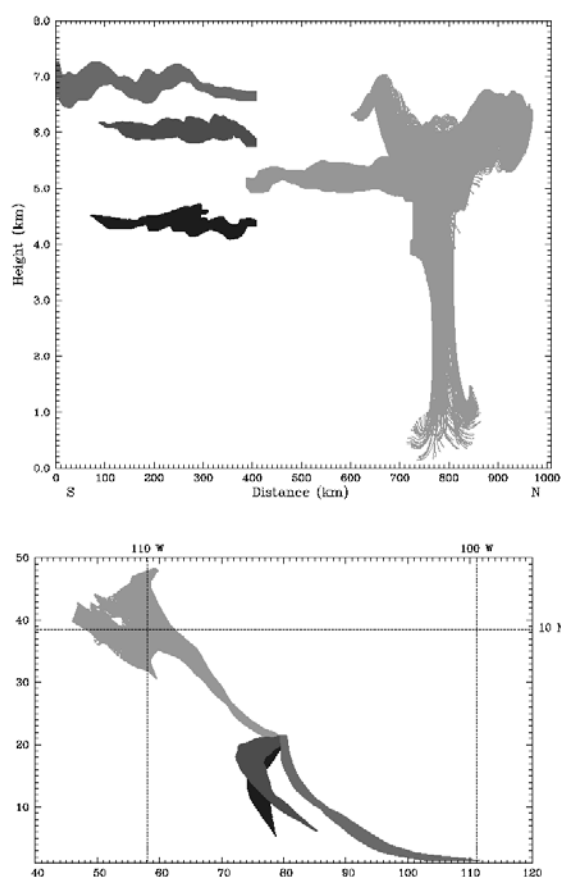


Fig. 5 Backward trajectory analysis. Top: Projection of the trajectories onto a meridional plane. The “initial” positions are located at around 400 km from the southern end of the plot and around 4.4 km, 5.1 km, 5.8 km, and 6.6 km in height. Bottom: Projection of the trajectories onto a horizontal plane. The “initial” positions are at grid number $(x, y) = (80, 21)$, which is about 106°W , 6.5°N . The gray tones are as same as those in the top panel.

3.2 大量粒子追跡実験

大気中のトレーサー物質が層状構造の周りでどのように輸送されているのかを調べるために、計算された風で仮想粒子を流す粒子追跡実験を行った。一つめの実験として、 $t = 48 \text{ h}$ に層状構造の下 (4.4 km)、中央 (5.1 km)、上 (5.8 km と 6.6 km)の限られた領域に 6250 個ずつ粒子を配置し、時間を遡って $t = 12 \text{ h}$ まで追跡する後方流跡線解析を行った。湿潤層の内部においた粒子は北西から来ていた (Fig. 5 下図の左上の粒子群)。その粒子の多くは海洋上大気境界層から対流によって持ち上げられて対流圏中層に来ていた (Fig. 5 上図の右の粒子群)。一方、湿潤層の上下にある乾燥した層に置いた粒子は、南東からほぼ水平に来ていた (Fig. 5 上図の左の粒子群、下図の右下の粒

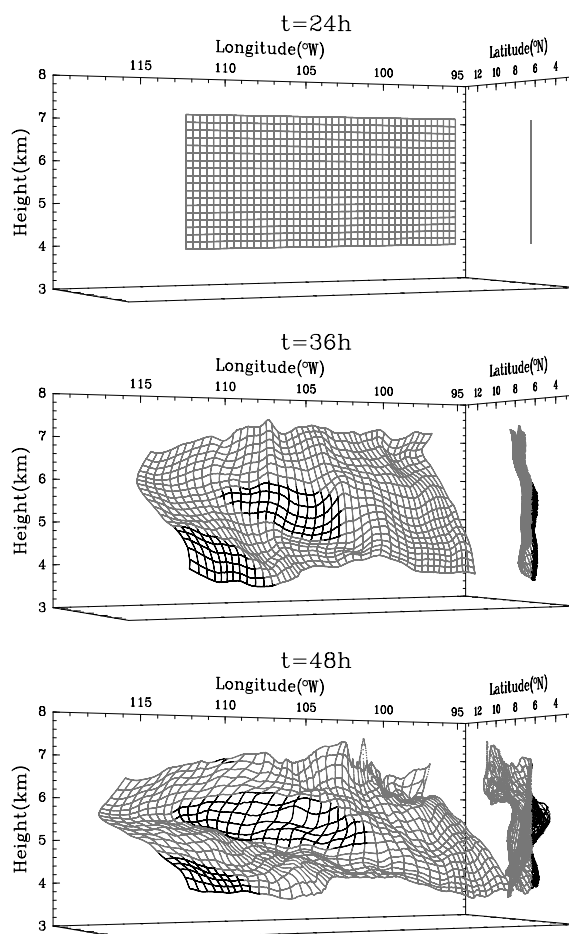


Fig. 6 Three-dimensional transport visualized by deformation of a lattice, which consists of a large amount of tracer particles. The particles that moved southward are shown in black, and those moved northward are shown in gray. Black lines and gray lines on the meridional plane are the projection of the particles that moved southward and northward, respectively.

子群)。これらの結果は湿潤層が北風の部分と対応しているという観測結果とも一致し、高湿度の空気が熱帯収束帯から水平に移流されてきたという Shiotani et al. (2002) の推測を裏付けるものである。

次にもうひとつ時間を遡って粒子群の起源を調べる後方粒子群追跡実験を行った (図は省略)。 $t = 48 \text{ h}$ において層状構造が見られた全領域で、湿潤部分 (550 hPa)に水平に粒子を配置し、 $t = 12 \text{ h}$ まで後方追跡した。空気塊の動きは、Fig. 4に示した層状構造の動きとは異なり、時間が進むにつれて、粒子が存在する領域は南西から北東の方向に引き伸ばされ、北西から南東の方角には圧縮されていた。これは次の3.3節で見るように、水平流速場がよどみ点 (鞍点)を持つことに起因する。

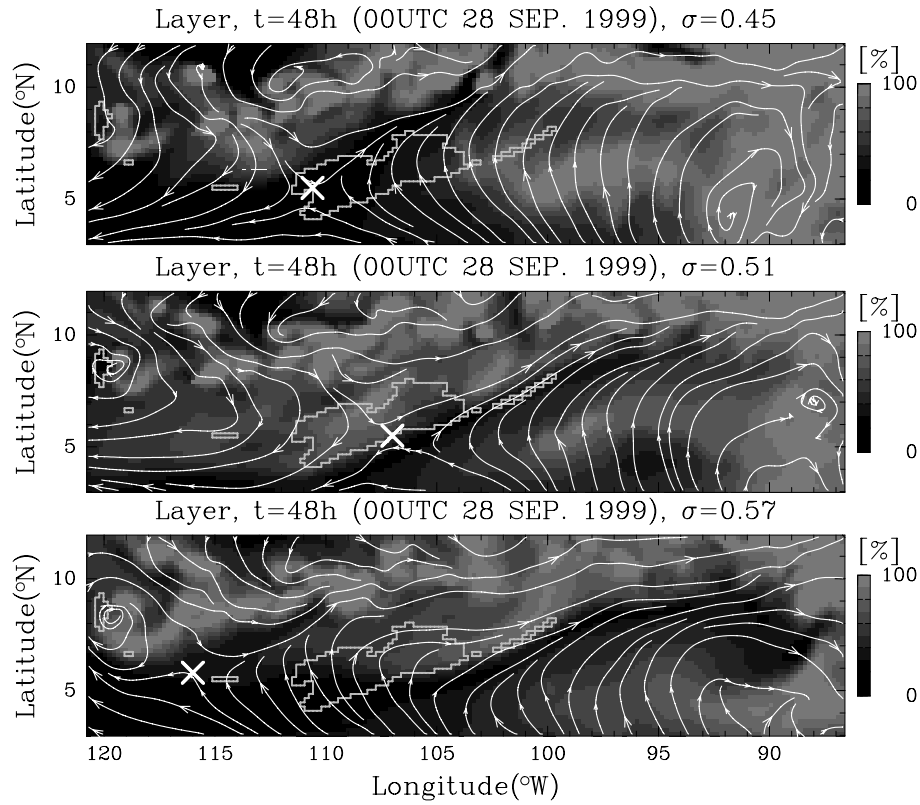


Fig. 7 Horizontal sections of relative humidity (gray scale) and streamlines at 0.45 (top panel, about 460 hPa), 0.51 (middle panel, about 520 hPa), and $\sigma = 0.57$ (bottom panel, about 580 hPa), at $t = 48$ h. Cross marks indicate saddle points of flow at each level. Areas which are surrounded by gray lines indicate regions of the layered structures.

最後に層状構造形成の空間依存性を調べるために、 $t = 24$ h から $t = 48$ h までの前方粒子群追跡実験を行った。初期時刻 ($t = 24$ h) に粒子を東西鉛直断面に平行な面上に格子状に配置した (Fig. 6 の上段)。位置は北緯 5.9 度、西経 115.8 度～99.9 度、高度 4～7 km である。Fig. 6 の中段は 12 時間後、下段は 24 時間後の粒子群の位置を表す。黒色と灰色の粒子はそれぞれ、元の位置に対して南に動いたものと北に動いたものを表す。格子全体としては東西方向に引き伸ばされている。一方、南北方向の変位についてはやや複雑である。大半の粒子は北向きに变位し、特に变位が大きかったのは格子の東側上部である。一方、格子の中央部分の高度 5.5 km 付近の粒子は南に変位した。南への変位が見られる高度は西ほど高かった。この経度依存性により層状構造は緩やかに傾いており、東ほど高度が低くなっている。このことは層状構造が西で厚く東で薄いこととも関連している。

3.3 流線解析

Fig. 2 を見てわかるように、熱帯収束帯の南側において対流圏下層では熱帯収束帯に向かって北向きに風が吹き、一方、対流圏上層では熱帯収束帯から

南向きに風が吹いている。この流れは基本的にハドレー循環の一部である。しかし対流圏中層では複雑な南北流分布になっている。層状構造に伴う風のオイラー的運動を調べるために、流線解析を行った。

$t = 48$ h における $\sigma = 0.45$, 0.51, 0.57 での流線を Fig. 7 の白線で示す。ここで σ は地表面気圧で規格化した気圧である。各レベルにおいて、西経 120 度、北緯 8 度付近に時計回りの渦があり、さらにもう一つ西経 90 度、北緯 5 度付近にも時計回りの渦がある。この二つの渦の間には×印で示した位置によるみ点、より正確には鞍点がある。ここで $\sigma = 0.51$ レベルでは鞍点は層状構造 (Fig. 7 において灰色の線で囲まれた領域) の東の端にある。一方、他の二つのレベルでは鞍点は層状構造の位置よりも西の方にある。 $\sigma = 0.51$ での鞍点と $\sigma = 0.45$ での鞍点に挟まれた領域では、南北風成分は層状構造の形成に寄与する分布になっている。つまり $\sigma = 0.51$ では北風が吹き、その上では南風が吹いている。北風は熱帯収束帯から湿潤な空気を運び、南風は相対的に乾燥した空気を運ぶことにより、この経度帯に相対湿度の層状構造が形成されている。

$\sigma = 0.57$ における鞍点の位置は $\sigma = 0.51$ や $\sigma =$

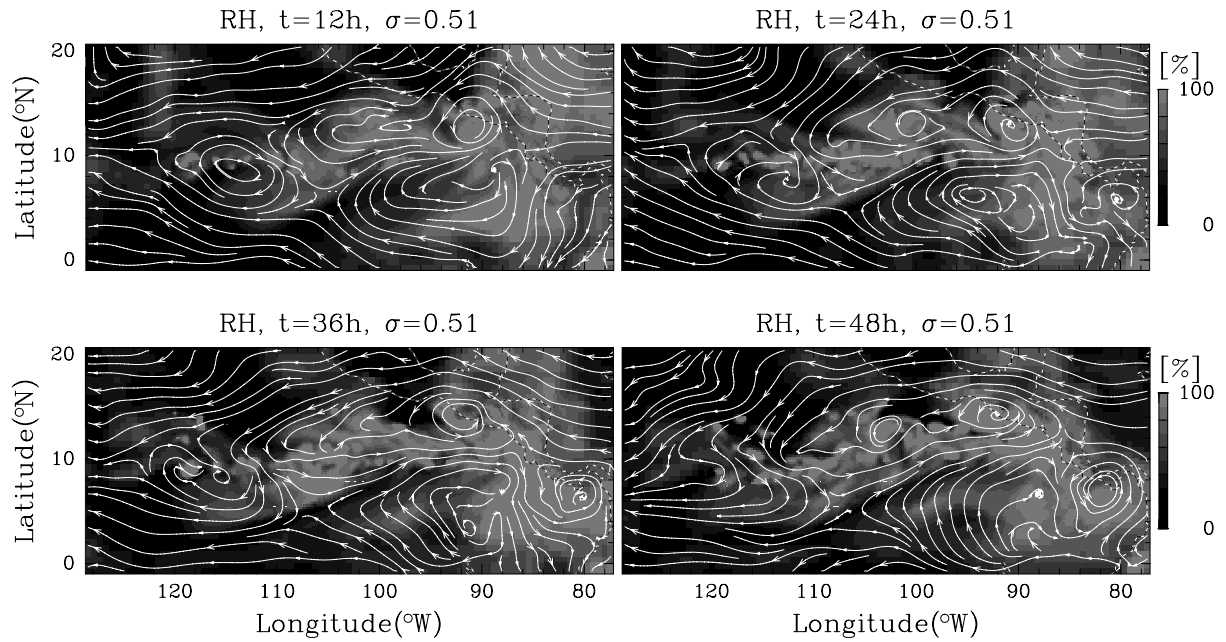


Fig. 8 A time series of the horizontal section of relative humidity and streamlines at $\sigma = 0.51$ from $t = 12$ h to $t = 48$ h with a time step of $\Delta t = 12$ h.

0.45 における鞍点の位置よりもずっと西にずれている。鉛直に見ると $\sigma = 0.45$ における鞍点が高度が下がるにつれて連続的に東にずれており、 $\sigma = 0.55$ 付近で不連続になっている。この鞍点の位置が東西にずれている構造が Fig. 6 で見たような層状構造の緩やかな傾斜を形成している。Fig. 6 で黒色と灰色の領域の上側の境界はほぼ鞍点の位置に一致している。

Fig. 8 は $\sigma = 0.51$ における流線の時間変化を相対湿度とともに示したものである。 $t = 12$ h から 48 h まで、先に述べた 2 つの総観規模渦と鞍点構造が継続的に見られることがわかる。鞍点の部分では乾燥した空気と湿潤な空気が接しており、その空気塊が北東–南西方向に引き伸ばされている様子が見てとれる。

4. まとめ

東部太平洋赤道域で 1999 年の照洋丸観測の際に見られた相対湿度の層状構造について調べるために、領域大気モデル MM5 を用いて数値実験を行った。その結果、熱帯収束帯の南側の高度 5 km 付近に相対湿度の高い層状構造が再現された。鉛直プロファイルの特徴は照洋丸観測において観測された層状構造のものと似ている。層状構造のうち最も面積の大きいかたまりは東西スケールが約 1000km、南北スケールが約 400km、鉛直スケールが 1~2km であった。層状構造のかたまりを形成する時間スケールは約 1~2 日であった。

熱帯では対流活動によって対流圏の上から下までよく混合されている。しかし層状構造は対流によって乱されことなく 1~2 日持続していた。このことは、対流によって乱されない限り、穏やかで成層した大気の状態が空間的には総観規模の広がり、時間的には数日の長さで存在する可能性を示している。

大量粒子の後方流跡線解析により、湿潤な層の空気は層状構造の北側の熱帯収束帯から水平に移流されて来ていることがわかった。一方、乾燥した層の空気は南から来ていた。また、この粒子追跡実験より湿潤な層内の空気粒子の多くは海洋上の境界層から対流によって持ち上げられて来ていることもわかった。これらの結果は Shiotani et al. (2002) による、湿潤な層の空気が熱帯収束帯から輸送されてきているのではないかという示唆を裏付けるものである。

粒子群を東西鉛直面内に格子状に配置した前方粒子追跡実験により、層状構造が東西方向にやや傾いていることがわかった。また、流線解析より西経 120 度、北緯 8 度、および、西経 90 度、北緯 5 度付近に位置する二つの総観規模渦の間にある鞍点が三次元的な層状構造の形成過程に果たす役割が明らかになった。層状構造の緩やかな傾きは層状構造より上において鞍点の位置が上ほど西にずれていることに起因することがわかった。今の時点では、二つの渦と鞍点の形成過程については明らかでない。

一般に、薄い層状構造は、構成する空気塊が元々どのような空気塊であったかという意味での「起源」

が鉛直に厚いものか薄いものか、によって分類できる。ここでの空気塊は水蒸気やオゾンといった微量成分の混合比によって互いに識別されるものである。起源となる空気塊が十分薄く、大気が安定成層している場合には薄い層状構造が形成される。一方、空気塊の起源が薄くなくても、循環場が強い鉛直シアアを持っていれば薄い層状構造が形成される (e.g., Haynes and Anglade, 1997)。例えば、対流によって境界層から自由対流圏に貫入した空気塊は、厚い起源の好例であるが、流れの鉛直シアアによってすみやかに引き伸ばされて薄い層状構造ができる。

Johnson et al. (1999) の Fig. 13(b) には、熱帯の 0°C 安定層付近において積乱雲からのデトレイメントが棚状雲としてただよっている様子が描かれている。これは層状構造の薄い起源の例といえる。一方、我々の粒子追跡実験では、対流域という厚い湿潤空気塊から鉛直シアアによって薄い層状の湿潤域が形成されていた。我々の例における層状構造は、 0°C 安定層に伴う棚状雲というよりは、より鉛直シアアの果たす役割が大きい構造と考えられる。

赤道付近ではコリオリパラメタが小さいので大気の運動は温度風の関係に強く縛られることはなく、従って鉛直に薄い積雲群からの吹き出しや強い鉛直シアアが可能となる。つまり、赤道付近の水平の流れは鉛直に独立になってもよく、このことが今回の実験において層状構造が専ら熱帯収束帯の南側に現れていることの理由となりうる。

予備的に NCEP/NCAR 再解析データを調べたところ、今回見られたような渦と鞍点は東部太平洋において 9 月と 10 月にはよく見られることがわかった。よって、このような渦運動やそれに伴う層状構造はこの領域の気候学的特徴である可能性がある。層状構造の出現頻度やその物質輸送・混合過程における役割についてさらなる解析が必要である。

謝 辞

粒子追跡実験とその結果の作図 (Fig. 5) には RIP をもちいた。図の作成 (Fig. 5 を除く) には地球流体電脳ライブラリをもちいた。

参考文献

Danielsen, E. F., Gaines, S. E., Hipskind, R. S., Gregory, G. L., Sachse, G. W. and Hill, G. F. (1987): Meteorological context for fall experiments including distributions of water vapor, ozone, and carbon monoxide, *J. Geophys. Res.*, Vol. 92, No. D2, pp. 1986–1994.

Fujiwara, M., Xie, S.-P., Shiotani, M., Hashizume, H., Hasebe, F., Vömel, H., Oltmans, S. J. and Watanabe, T. (2003): Upper tropospheric inversion and easterly jet in the tropics, *J. Geophys. Res.*, Vol. 108, No. D24, pp. 4796–4809, doi:10.1029/2003JD003928.

Haynes, P. and Anglade, J. (1997): The vertical-scale cascade in atmospheric tracers due to large-scale differential advection, *J. Atmos. Sci.*, Vol. 54, No. 9, pp. 1121–1136.

Johnson, R. H., Rickenbach, T. M., Rutledge, S. A., Ciesielski, P. E. and Schubert, W. H. (1999): Trimodal characteristics of tropical convection, *J. Climate*, Vol. 12, No. 8, pp. 2397–2418.

Newell, R. E., Wu, Z.-X., Zhu, Y., Hu, W., Browell, E. V., Gregory, G. L., Sachse, G. W., Collins Jr., J. E., Kelly, K. K. and Liu, S. C. (1996): Vertical fine-scale atmospheric structure measured from NASA DC-8 during PEM-West A, *J. Geophys. Res.*, Vol. 101, No. D1, pp. 1943–1960.

Shiotani, M., Fujiwara, M., Hasebe, F., Hashizume, H., Vömel, H., Oltmans, S. J. and Watanabe, T. (2002): Ozone observations in the equatorial eastern Pacific—the Shoyo-Marun survey—, *J. Meteor. Soc. Japan*, Vol. 80, No. 4B, pp. 897–909.

Stoller, P., Cho, J. Y. N., Newell, R. E., Thouret, V., Zhu, Y., Carroll, M. A., Albercook, G. M., Anderson, B. E., Barrick, J. D. W., Browell, E. V., Gregory, G. L., Sachse, G. W., Vay, S., Bradshaw, J. D. and Sandholm, S. (1999): Measurements of atmospheric layers from the NASA DC-8 and P-3B aircraft during PEM-Tropics A, *J. Geophys. Res.*, Vol. 104, No. D5, pp. 5745–5764.

Numerical Experiments on the Layered Structures in the Tropical Mid-Troposphere with a Regional Atmospheric Model

Shigenori OTSUKA and Shigeo YODEN

Graduate School of Science, Kyoto University, Kyoto, Japan

Synopsis

We performed numerical experiments on layered structures in the tropical mid-troposphere, which are often observed by radiosonde and airborne observations as anticorrelation between humidity and ozone, with a regional atmospheric model in order to investigate their three-dimensional structure and material transport processes. We reproduced a thin layered structure of high humidity, which has a horizontal scale of about 1000 km and a vertical extent of about 1 km. Particle transport experiments around the layered structure show that wet part of the layered structure is advected from the intertropical convergence zone by northwesterly winds, while dry parts above and below it come from southeast direction. Streamline analysis shows that the reason why the thin layered structure is produced is that a stagnation point between two synoptic-scale vortices shifts longitudinally with height.

Keywords: inter tropical convergence zone, mid-troposphere, layered structures