

## 暖水プール上空に見られる乾燥状態について

米山 邦夫\*<sup>1</sup> 勝俣 昌己\*<sup>1</sup>

西部熱帯太平洋の暖水プール域では、大気海洋相互作用が活発で、積雲対流活動が盛んな場所として一般には知られている。しかしながら、亜熱帯上空からの乾燥空気塊の侵入など時として乾燥し、対流活動が抑制される状態が起きる。本稿では、海洋地球研究船「みらい」のMR02-K06レグ1航海時に観測された乾燥状態を例に、その特徴を記述する。

キーワード：暖水プール, 乾燥空気塊侵入, 「みらい」MR02-K06航海

## On the dry atmospheric condition over the warm pool region

Kunio YONEYAMA\*<sup>2</sup> Masaki KATSUMATA\*<sup>2</sup>

In general, it is well known that the warm pool region in the tropical western Pacific Ocean is the place where the air-sea interaction is very active and cumulous convections vigorously occur. However, it also experiences very dry conditions with few clouds due to the dry intrusion events from the upper troposphere in the higher latitudes. This paper describes the characteristics of the dry air conditions observed during the R/V MIRAI MR02-K06 leg-1 cruise from the standpoint of this event.

**Keywords** : warm pool, dry intrusion, R/V MIRAI MR02-K06 cruise

---

\*1 海洋科学技術センター 海洋観測研究部

\*2 Japan Marine Science and Technology Center, Ocean Observation and Research Department

## 1. はじめに

地球上でもっとも海面水温が高く暖水プールと呼ばれる海域が存在する西部熱帯太平洋海域は、大気海洋間の相互作用が活発で、その結果生じる積雲対流活動が膨大な熱を大気中に放出することから、地球規模での気候システムにとって正の熱源としての役割を果たしていることが一般に知られている。例えば、この暖水プールの東への移動によって説明されているエルニーニョ現象が気候変動に影響を与えるのは、暖水プール上空で発達する積雲対流活動の移動も伴うことが大きな原因となっている。同海域のこのような大気海洋相互作用の役割に注目して計画立案され、1992年11月から1993年2月までの4ヶ月間にわたり実施された国際集中観測がTOGA COARE (Tropical Ocean and Global Atmosphere Program / Coupled Ocean-Atmosphere Response Experiment)<sup>1)</sup>である。そしてこのTOGA COAREがもたらした新たな知見の1つは、暖水プール上空は常に対流活動が活発な海域ではなく、亜熱帯上空から乾燥空気塊が侵入し、時として非常に乾燥し対流活動が抑制される状態になることがあることである<sup>2)-6)</sup>。従来、同海域の対流活動が抑制される因子としては、エルニーニョ現象に伴う暖水の東への移動の他、熱帯太平洋で主な降水源となっている東西に延びる熱帯収束帯 (ITCZ, Intertropical Convergence Zone) が季節変化する熱赤道の移動に応じて南北移動することや、暖水プール域で特にその存在が顕著になるMJO<sup>7)</sup>と呼ばれる赤道季節内振動の下降流フェーズに相当する抑制期の存在などが考えられていた。しかしながらTOGA COAREで発見された乾燥空気塊侵入と呼ばれる現象は水平スケールが数100kmから1000km、時間スケールが数日程度のいわゆる総観規模的な特徴を持っている。また長年の暖水プール域におけるラジオゾンデ観測の結果から、この現象はTOGA COARE時だけに現われた特別な現象ではなく、もっと頻繁に見られる現象であり、かつ発生の仕方がENSO (エルニーニョ・南方振動) フェーズとも関係していることが指摘されている<sup>8)</sup>。

西部熱帯太平洋海域における降水過程を研究の主対象にした大気海洋相互作用に係る観測研究が海洋地球研究船「みらい」を用いて実施されている。2002年11月から12月にかけて実施されたMR02-K06レグ1航海では、その定点観測期間中対流活動が抑制され、船上ではほとんど降雨が観測されない状態にあった。そこで本稿ではこの時の乾燥状態の特徴を前述の乾燥空気塊侵入現象の観点で調べた結果を中心に記述する。

## 2. 大気一般場の概要

海洋地球研究船「みらい」によるMR02-K06レグ1航海は2002年11月13日に青森県むつ市の関根浜を出港後、12月16日に米国グアムに寄港するまでであるが、そのうち特に11月22日から12月12日までの21日間は北緯2度、東経138.5度の海域において定点観測として大気及び海洋に関する集中的な観測が実施された(詳細は<http://www.jamstec.go.jp/>より入手可能なクルーズレポートを参照)。

図1は人工衛星ひまわり(GMS)により得られた北緯2度を中心に南北2度の範囲内で平均した雲頂輝度温度の経度-時間断面図である。図中の矩形は「みらい」のドップラーレーダーによる観測範囲を加味して観測期間・位置を示している。定点観測を開始して間もなくは雲域が観測海域上空を東進通過している。米国海洋大気庁気候診断センターの解析(<http://www.cdc.noaa.gov/>)によると、この雲域はMJOに伴う対流活動域に対応している。しかしながら「みらい」船上のみならず半径200kmのレーダー観測範囲内においても十分な降雨は観測されておらず(図略)、深い十分に発達した降水システムというよりは少なくとも観測域付近では比較的上層の雲もしくは降雨には至らない程度の雲システムが通過しただけと考えられる。いずれにしても大規模場の観点で言えばMR02-K06レグ1の観測期間はMJOの対流活動域が通過し、対流不活発期に相当している。なお観測期間はENSOフェーズとしてはエルニーニョ期に相当する(例えば米国海洋大気庁気候予測センター<http://www.cpc.noaa.gov/>参照)。

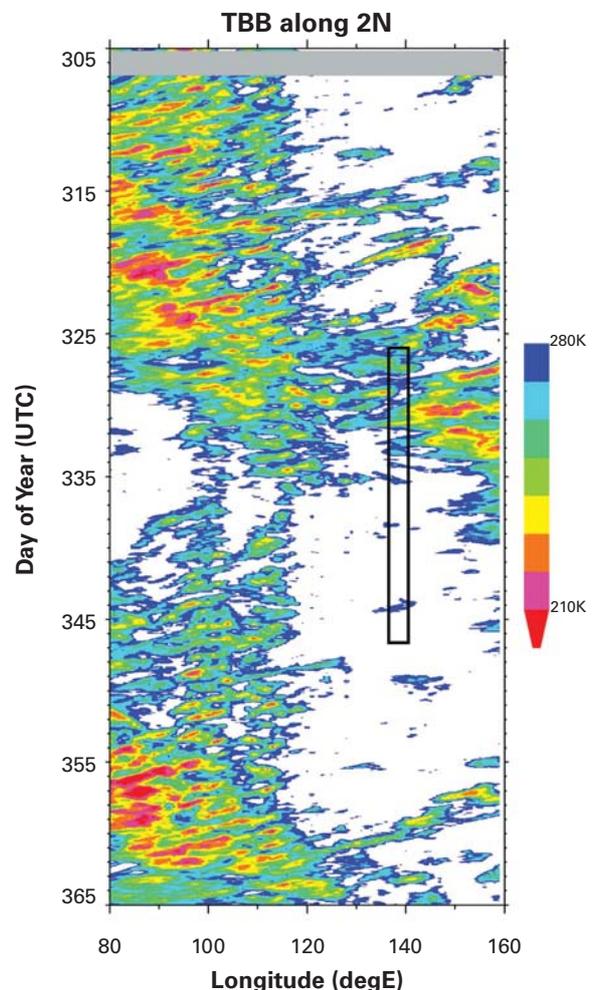


図1 北緯2度に沿ったGMS雲頂輝度温度の経度-時間断面図。矩形は「みらい」による観測位置と時刻を示す。

Fig. 1 Time-longitude cross section of GMS TBB data along the 2°N line. Solid rectangle indicates the observational location and period.

図2は期間平均した温位・相当温位・飽和相当温位(図2a)と風の東西・南北成分(図2b)の鉛直プロファイルである。東西風のパターンでは下層西風・上層東風となっておりMJOフェーズの観点では比較的对流活動が活発になりやすいパターンで、かつ温位の分布を見る限り熱帯の一般的な分布で潜在不安定な状態ではあるが、中層が非常に乾燥しており深い対流発生には適していなかったことがわかる。

図3はラジオゾンデ観測により得られた可降水量の時間変化(図3a)と混合比の高度-時間断面(図3b)を示す。可降水量の変化を見ると、最初の8日間の平均は54mmで、同海域の平均的な値(53mm)<sup>8)</sup>よりむしろ高い。しかしながら、その後約1mm day<sup>-1</sup>程度の減少傾向になり、観測最終日には40mm近くまで落ち込んでいる。この結果最終的には観測期間平均で48mmと低い値となっている。特にDAY336-338及びDAY341-342では局所的な減少が確認できる。図3bとの比較から、最初の減少は高度600hPa以

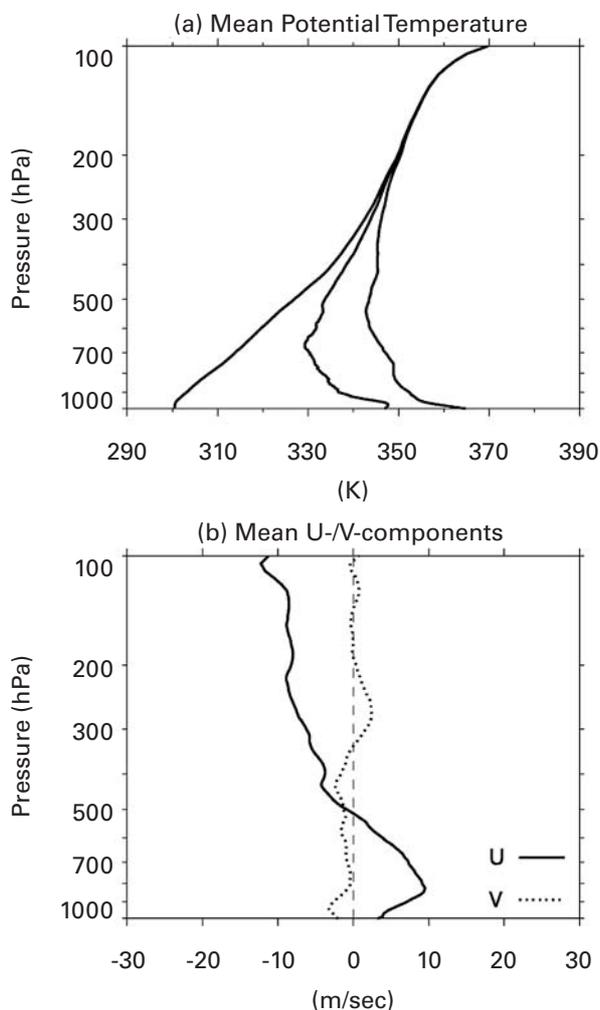


図2 観測期間平均した(a)温位(左), 相当温位(中央), 飽和相当温位(右)と(b)風の東西・南北成分の鉛直プロファイル。

Fig. 2 Vertical profiles averaged for the MR02-K06 leg-1 observational period of (a) potential temperature(left), equivalent potential temperature(center), saturated equivalent potential temperature(right), and (b) zonal/meridional wind components.

高で、後者は800hPa付近で乾燥したために水蒸気総量である可降水量が減少したことがわかる。また特徴的なのは、これら局所的に減少したあとに短期間で再びもとの状態に戻っている点である。次節ではこの局所的な乾燥状態について記述する。

なお、DAY335以降の全体的な減少傾向は次のように解釈することができる。例えば混合比2g kg<sup>-1</sup>のコンターの傾斜を求めるとおよそ350m day<sup>-1</sup>と見積られる。一方で、図2aに見られるように温位の平均的な鉛直勾配は約4.7K km<sup>-1</sup>と算出される。このことからコンターの傾斜はちょうど温位の1.6K day<sup>-1</sup>の減少に相当する。この値は熱帯域における大気の一般的な放射冷却率と一致する。つまり可降水量の時間変化において認められた水蒸気量の減少は、大気の放射冷却による空気塊の沈降によるものとみなすことができる。これはMJOの対流活発期が過ぎた後に大規模場の観点で沈降場になっていたことを意味し、その効果の程度を示すものと言える。

### 3. 乾燥空気塊の侵入

図3aに見られた2度の可降水量の大きな減少を乾燥空気塊侵入の観点で調べるため、過去の研究<sup>3), 6)</sup>に倣いNCEP/NCAR再解析データ<sup>9)</sup>を用いて、空気塊の侵入経路を流跡線解析により求めた。それぞれ乾燥状態が出現した

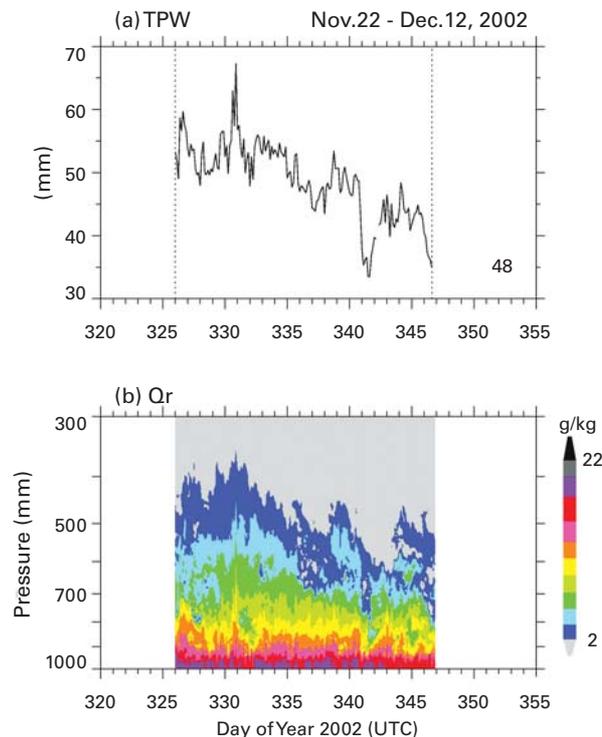


図3 ラジオゾンデデータから算出された、(a)可降水量の時間変化、及び(b)混合比の高度-時間断面図。DAY326は2002年11月22日に相当する。

Fig. 3 (a) Time series of total precipitable water, and (b) time-height cross section of water vapor mixing ratio. DAY326 corresponds to 22 November 2002.

最下層の高度から計算を開始し、出現前後の日付についても同様に行った。12月2日(DAY336)のケースの結果を図4に示す。この図で明らかなように11月30日や12月1日に観測された空気塊はもともと観測域の北西側(のやや下層)に位置していたが、乾燥状態が出現した12月2-3日の場合、前日までは経路を変え空気塊は北東側の亜熱帯に遡ることができる。またこれらはほぼ高度を変えずに輸送されている。各軌跡に沿った比湿の変化を見ると(図5)、亜熱帯に存在した $1\text{g kg}^{-1}$ 程度の乾燥した空気塊が熱帯域に近づくにつれ徐々に湿りながら観測海域に侵入してきたことがわかる。12月4日のケースでは図4と図5からむしろ既に乾燥した観測域付近に侵入したことで湿度が下がったものと考えられる。

同様に12月7日(DAY341)のケース(図6)ではいずれも北東方向からの空気塊の侵入であるが、12月7日から空気塊は亜熱帯上層を起源としていることがわかる。亜熱帯域では空気塊は東向きに流れているが、途中で進路を南向きに

変更し、その後西向きに進みながらやがて観測域上空に到達している。

以上のように乾燥状態が出現したときの日付から空気塊の軌跡を遡ると起源がそれを境に変化しており、いずれも亜熱帯上層を起源としていたことが確認された。

次にそれぞれの空気塊を遡った起源つまり亜熱帯上層

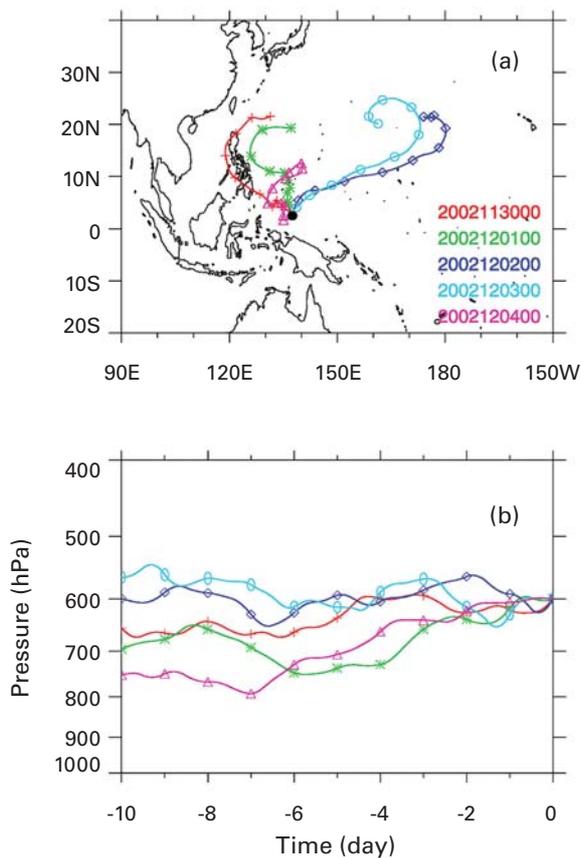


図4 (a) 空気塊の水平方向の軌跡。黒丸は計算開始位置で観測サイトを、その他の各マークは1日間隔を表し、10日前まで計算。計算開始高度は600hPaで開始時刻は図中に記載。(b) (a)の各軌跡の高度変化。

Fig. 4 (a) Backward air parcel trajectories whose calculations were started from 600hPa at 2°N, 138.5°E (solid circle) for different five days listed on the figure. Each mark indicates one-day interval and backward calculation was done for 10 days. (b) Air parcel height along the track in (a).

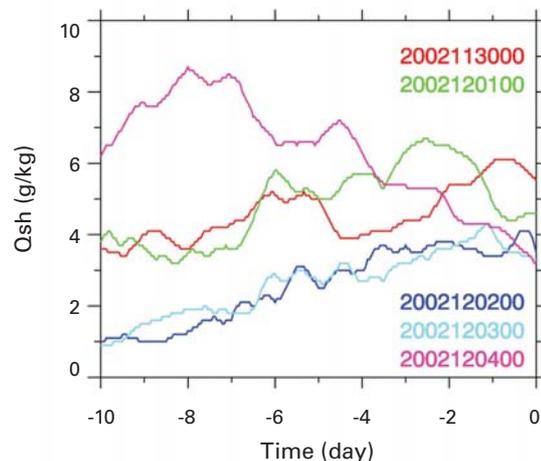


図5 図4に示された空気塊の軌跡の比湿の変化。  
Fig. 5 Specific humidity along the track shown in Fig. 4.

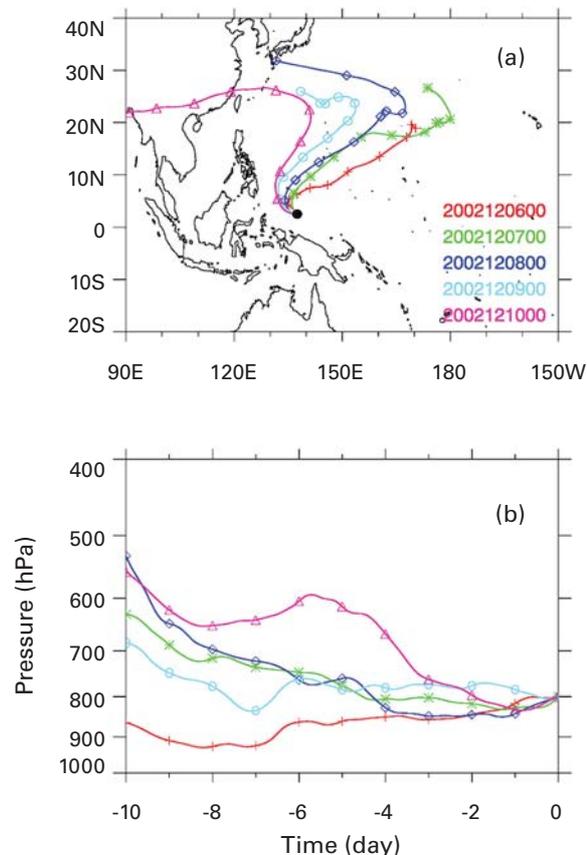


図6 図4と同じ。ただし計算は12月6日から10日までの5日間で開始高度は800hPa。

Fig. 6 Same as Fig. 4, but the calculation was started from 800hPa in the period of 6–10 December 2002.

における針路変更について調べるために、図7に2つのケースについてそれぞれ進路を変更した時の600hPa面での風の間を示す。いずれのケースも日付変更線のやや東にトラフの中心があり、空気塊はその西側に位置し、高気圧性循環場の中にあつたことがわかる。この結果は過去の報告<sup>6), 8)</sup>と一致しており、中緯度における傾圧不安定波の発達が元々の乾燥空気塊を熱帯方向に押し出す働きをしていたことが確認できる。また同じく過去の研究<sup>8)</sup>で指摘されているように今回の観測時期はエルニーニョ期に行われたが、その侵入経路は日付変更線の東側で赤道域到達後に貿易風により侵入するラニーニャ期のパターンとは異なっている。図8は12月7日のケースで観測直前の12月5日の空気塊の位置とその高度での風の間を示すが、北緯8度、東経155度付近を中心として熱帯低気圧が存在している。西側に位置する空気塊はこの熱帯低気圧に伴う風の間に乗れり、赤道域まで到達していることがわかる。つまり11月27日頃に熱帯域に侵入し、その後西向きに移動していた空気塊は熱帯低気圧の存在により侵入経路を新たに南側に変更する

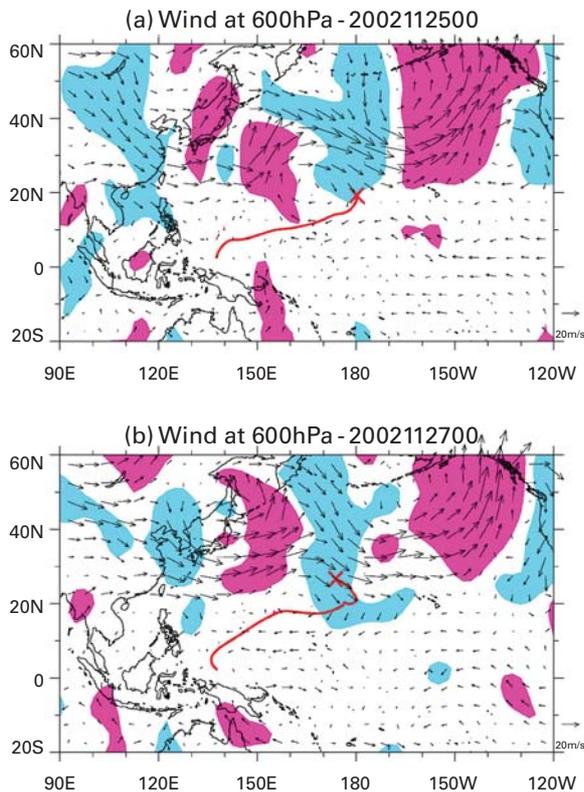


図7 高度600hPa面における(a) 11月25日及び(b) 11月27日の風ベクトル。青(赤)色は南(北)向き成分が $5\text{ m s}^{-1}$ 以上の領域を示す。(a)には図4で12月2日から計算したケース、(b)には図6で12月7日から計算したケースのそれぞれ空気塊の軌跡を重ねて示している。×は各図の時刻での位置。

Fig. 7 Horizontal wind vectors at 600 hPa at 0000 UTC on (a) 25 November 2002, and (b) 27 November 2002. Blue (red) shading indicates that southward (northward) meridional wind component exceeds  $5\text{ m s}^{-1}$ . Air parcel trajectories shown in Figs. 4a and 6a are superimposed.

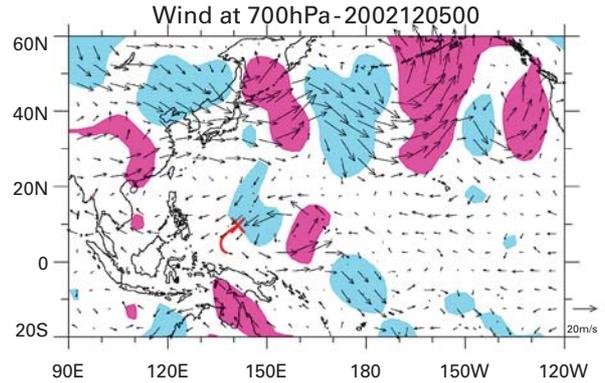


図8 2002年12月5日0000 UTCにおける700hPa面での風ベクトルと12月7日に観測された空気塊の軌跡とその時刻での位置(×)。陰影は図7と同じ。

Fig. 8 Same as Fig. 7, but at 700 hPa and at 0000 UTC on 5 December 2002.

ことによって観測域に侵入したと考えられる。ここでは熱帯低気圧の存在が最終的な侵入に大きく寄与していたことになる。また、この移動する熱帯低気圧の存在のために単に乾燥空気塊の侵入が起きただけではなく、周囲の湿潤な空気も赤道域に取り込む結果となったと考えられる。つまり活発な空気の水平移流のために乾燥空気塊が下層800hPa付近にまで侵入した後も比較的短時間で元の湿度に回復したものと考えられる。熱帯域の雲のない領域の湿度分布について調べた研究<sup>10)</sup>によれば海洋性熱帯域(ただしここでは南北10度以内の暖水プール域は解析対象に含まれていない)の少なくとも25%の領域で、700hPaより上層の水蒸気の約80%は水平移流によるものであるという結果もあり、移流の寄与が大きいと推測される。

#### 4. まとめ

北緯2度、東経138.5度の暖水プール域で2002年11-12月に海洋地球研究船「みらい」を用いて実施されたMR02-K06レグ1観測航海は、大気対流活動が非常に抑制され降雨が極めて少ない状態であった。本研究ではこの上空の乾燥状態について原因を探った。

まず、大規模場の観点では、赤道季節内振動MJOの対流活発期の通過後に相当し、大気の放射冷却による空気の沈降場であったことが、可降水量にしておよそ $1\text{ mm day}^{-1}$ 程度の減少に寄与していた。さらに、この比較的ゆっくりとした水蒸気量の減少とは別に途中急激に水蒸気量が減少する様子も見られた。これは過去の研究結果と同様に亜熱帯域上層の空気塊が中緯度における傾圧不安定波の発達に伴い熱帯方向に押し出され、その後熱帯低気圧などの現象により最終的には観測海域上空に到達したことが確認された。ただし水平移流が活発だったために、過去の事例<sup>3), 4)</sup>とは異なり比較的短期の2-3日程度で元の(ただし低い)水蒸気量分布に回復したと推測される。

以上のように大規模場的に雲がなく放射冷却による乾燥化が進行するだけでなく、対流圏中層に乾燥空気塊が侵入

することで、さらに浅い対流活動の発達さえ抑制され乾燥状態が長く続いたものと考えられる。

#### 謝辞

「みらい」MR02-K06レグ1研究航海におけるラジオゾンデ観測の実施には赤嶺正治船長及び乗組員の方々を始めとして、(株)グローバルオーシャンディベロップメント観測技術員の羽入正樹氏、末吉惣一郎氏、長濱則夫氏、名古屋大学の篠田太郎氏、高橋千陽氏、地球観測フロンティア研究システムの中田隆氏のご協力を得ましたことに謝意を表します。解析に使用したGMS雲頂輝度温度データは高知大学情報科学教室 (<http://weather.is.kochi-u.ac.jp/>) より、またNCEP/NCAR再解析データは米国海洋大気庁気候診断センター (<http://www.cdc.noaa.gov/>) より、それぞれ入手しました。感謝致します。

#### 参考文献

- 1) Webster, P. J., and R. Lukas, "TOGA COARE: The Coupled Ocean-Atmosphere Response Experiment." *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 73, 1377-1416, (1992).
- 2) Parsons, D., and Coauthors, "The integrated sounding system: Description and preliminary observations from TOGA COARE." *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 75, 553-567, (1994).
- 3) Numaguti, A, R. Oki, K. Nakamura, K. Tsuboki, N. Misawa, T. Asai, and Y.-M. Kodama, "4-5-day-period variation and low-level dry air observed in the equatorial western Pacific during the TOGA-COARE IOP." *J. Meteor. Soc. Japan*, 73, 267-290, (1995).
- 4) Yoneyama, K., and T. Fujitani, "The behavior of the dry westerly air associated with convection observed during the TOGA-COARE R/V Natsushima cruise." *J. Meteor. Soc. Japan*, 73, 291-304, (1995).
- 5) Brown, R. G., and C. Zhang, "Variability of midtropospheric moisture and its effect on cloud-top height distribution during TOGA COARE." *J. Atmos. Sci.*, 54, 2760-2774, (1997).
- 6) Yoneyama, K., and D. B. Parsons, "A proposed mechanism for the intrusion of dry air into the tropical western Pacific region." *J. Atmos. Sci.*, 56, 1524-1546, (1999).
- 7) Madden, R. A., and P. R. Julian, "Observations of the 40-50-day tropical oscillation - A review." *Mon. Wea. Rev.*, 122, 814-837, (1994).
- 8) Yoneyama, K., "Moisture variability over the tropical western Pacific Ocean." *J. Meteor. Soc. Japan*, 81, 317-337, (2003).
- 9) Kalnay, E., and Coauthors, "The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project." *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77, 437-472, (1996).
- 10) Sherwood, S. C., "Maintenance of the free-tropospheric tropical water vapor distribution. Part I: Clear regime budget." *J. Climate*, 9, 2903-2918, (1996).

(原稿受理：2003年8月6日)