

熱帯海洋上の大気境界層の構造

文字 信貴・吉門 洋・光田 寧

STRUCTURE OF THE TROPICAL BOUNDARY LAYER

By *Nobutaka* MONJI, *Hiroshi* YOSHIKADO and *Yasushi* MITSUTA

Synopsis

The temperature, humidity and wind fields of the tropical oceanic boundary layer are investigated by lower troposphere radiosondes (LTS). The experiment is a part of the Monsoon Experiment (MONEX) carried out on the R. V. Hakuho-Marui for two weeks in May, 1979. Two different weather situations, i.e., the disturbed and undisturbed periods were chosen to analyze. The depth of the mixed layer is found to depend on the weather conditions. It developed up to several hundred meters under the undisturbed situations, but reached only a few hundred meters during the disturbed period. The horizontal wind peak appeared in the stable layer right above the mixed layer. The latitudinal variations are also investigated.

1. はじめに

熱帯海域は大気の運動の熱源であり、わが国における梅雨期の降雨や台風の発生などとも密接な関係があると考えられている。しかしながら、熱帯海域の気象現象の理解は、中緯度のそれと比較して遅れている。1979年に地球大気開発計画 (GARP) の副計画としてモンスーン実験 (MONEX) が実行されたが、わが国は西太平洋熱帯海域の大気に重点を置いた研究計画に参加し、京都大学防災研究所からも研究船白鳳丸を利用して大気海洋間の相互作用や乱流輸送、大気境界層の鉛直構造の観測を実施した。その中で、ここでは低層ゾンデ (LTS) によって得られた高さ3 km以下の風速、温湿度の観測結果にもとづいて、熱帯大気境界層の構造について考察を行う。なお、海面付近の微細気象や、乱流観測については、別に塚本・他¹⁾によって詳述されている。船上における境界層観測としては、これらのほか音波レーダー観測、パイボール観測、係留気球観測を行った。それ以外にも高層気象観測、放射観測、海洋観測などが他の研究機関によって行われた²⁾。

白鳳丸の経路は Fig. 1 に航路図を示すとおり、1979年5月1日に東京を出港し、東経140度の経線に沿って南下、5月8日に北緯2度の定点に着いてここで13日間の観測を行った後、ラバウルに寄港、帰路は東経150度の経線に沿

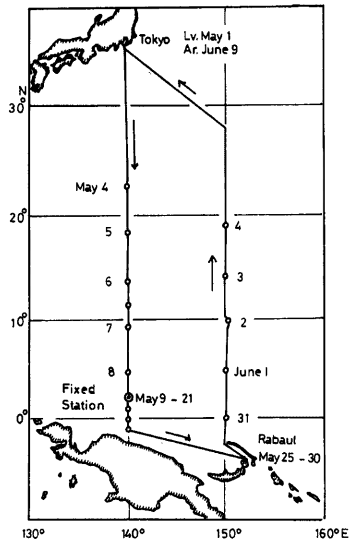


Fig. 1. Track chart of the Hakuho-Marui. Circles indicate the location of LTS measurements.

って北上し、6月9日に東京に帰港した。定点以外にも往復路において緯度変化を見るための観測を1日1回程度行った。

熱帯海域の大気境界層はいくつかの特徴を有する事が考えられる。すなわち、熱帯海域では、強い日射のため高温高湿な状況を呈している事、また赤道付近では地球の自転の効果が最小となるため、境界層内の風の場合がコリオリカの無視できる特殊な条件下にあるなどの点において中緯度の大気境界層と異った性質を持っている事が予想される。低層ゾンデの観測データは、解析は全部は終了していないが、ここでは強化観測期間中のデータを中心に、3種類の条件下の観測、すなわち、積雲対流活動の活発な期間、赤道無風帯に入った期間、及び、往復路の緯度変化の観測結果について述べる。

2. 低層ゾンデ観測

低層ゾンデを用いた海上約3km以下の温湿度、風の鉛直分布の観測と信号解析の過程をFig. 2にブロックダイアグラムで示す。観測に用いた低層ゾンデ(明星電気製 JWA-76 THW)は乾球温度、湿球温度と気圧の測定感部及び信号変換器と送信器から成り立っている(伊藤・他³⁾参照)。乾球温度と湿球温度の信号は、それぞれ4秒及び2秒間隔で交互に切り替えて送信される。ゾンデの高さを計算するための気圧の測定には小型のアネロイド気圧計を用いている。気圧の信号は940mbより下層では12mb毎に、上層では30mb毎に温度信号の中にパルス状の電圧降下として記録される。気圧計は最低約680mbまで、すなわち約3.2km程度の高さまで測定が可能である。気圧計はゾンデ放球の数時間前に気圧検定槽の中で高精度アネロイド気圧計を基準計器として用いて検定を行った。気圧計の精度は約1mbである。これらの信号は1673MHzの電波で送信され、船上の自動追尾のパラボラアンテナによって受信し、信号変換器(明星 RD 65A型)を通してペンレコーダに自記させた。ゾンデの上昇速度は5m/sに調整した。

風向風速の測定は、自動追尾機構によりゾンデの方向を向いているアンテナの方位角、仰角、及び気圧の信号から計算されるゾンデの高さを用いて行った。アンテナの方位角、仰角、従って船に相対的なゾンデの方位角、仰角を船の動揺に対して補正し、真の方位角、仰角を計算するのであるが、船の傾きと方位を知るために傾斜計と方位計(測器舎製)を船室に設置した。傾斜計からのピッチ角とロール角の信号、及び方位計の信号は、アンテナの角度の信号と同時にカセットデータレコーダ(TEAC DR-100)を用いて2Hz/chの割合でデジタル記録した。アンテナの角度は6秒毎に1回測定されるので、高さに直して約30m毎にゾンデの位置が記録されることになる。また、方位角と仰角の測定の間には0.1秒の時間差があるが、船の動揺周期が約8秒である事を考えると両者はほぼ同時刻の信号と考えても補正上の問題は生じない。

船の動揺の結果、追尾アンテナの周差運動が場合によっては大きくなるが、これを取除くため方位角仰角信号の平滑化を行った。平滑の方法は10個のデータ(すなわち60秒)の移動平均を用い、高度100m毎に読取った。異なる移動平均を用いると多少異なる風速分布が得られるが、ここでは同一期間中のパイボール観測⁴⁾の結果なども参考にしてこの値を用いる事にした。従って風速の鉛直方向の分解能はあまり良くない。特に放球直後、高さ150m程度までは追尾が精度良く行えないので、移動平均の計算を行えるのは300m以上の高さからである。上層の高さの限界は、その時の受信状態に左右されるが、風の観測は2~2.5km程度

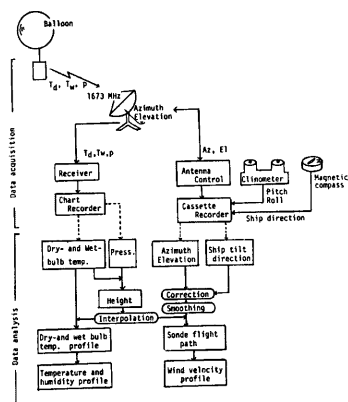


Fig. 2. Data acquisition and analysis procedure for LTS.

までは可能であった。

低層ゾンデによる観測は船がドリフト状態の時に行ったが、船が海流などによって観測中に流される速度の補正は航行衛星 (NNSS) による正時の船位置算定値を用いて行った。ほとんどの場合補正值は 0.5 m/s 以下であった。

低層ゾンデによる観測は定点 (2°N, 140°E) において、13日間、通常 1 日 3 回、強化時 1 日 6 回の観測を行い、また定点への往復路において、往路は東経140度、帰路は東経150度の経線に沿って 0 度と北緯20度の間で 1 日 1 回停船して行った。合計62の測定の中で約10%が不完全なデータであった。ここで用いたものは、

Table 1. List of the analyzed LTS data and the surface meteorological data.

a) Observation at the fixed station (2°N, 140°E)

Run No.	Day	Time (JST)	Wind*		Temperature (°C)		
			Direction	Speed (m/s)	Air**	Dew** point	Sea*** surface
16	May 12	00:20-00:31	SE	3.8	28.2	24.8	29.5 <i>r</i>
17	12	04:17-04:31	SE	2.5	28.0	25.0	29.4
18	12	08:22-08:35	SE	1.0	26.0	25.1	29.5
19	12	12:17-12:29	E	4.5	27.1	24.6	29.9
20	12	16:30-16:42	E	5.0	28.3	24.8	29.8
22	12	21:14-21:30	ENE	3.1	26.3	24.4	29.7 <i>r</i>
32	16	00:27-00:39	SE	3.0	27.0	24.9	29.6 <i>r</i>
33	16	04:30-04:45	ENE	2.5	27.5	24.6	29.6
34	16	08:25-08:39	E	2.2	28.5	23.9	29.7
35	16	12:17-12:29	SW	1.0	30.3	23.7	29.7
36	16	16:32-16:42	—	0.9	30.9	23.3	29.7
37	16	20:19-20:30	—	0	29.0	23.0	29.8

b) Observation along 140°E and 150°E

Run No.	Day	Time (JST)	Lat. N	Long. E	Wind*		Temperature (°C)		
					Direction	Speed (m/s)	Air**	Dew** point	Sea*** surface
2	May 5	08:02-08:10	18°26'	140°00'	E	8.0	27.3	21.7	28.8
3	6	07:52-08:10	13°47'	139°57'	E	7.0	27.2	21.8	28.5 <i>r</i>
5	7	07:47-07:57	9°16'	140°00'	ENE	5.5	27.0	25.3	29.2
6	8	08:06-08:17	4°45'	140°02'	SW	8.0	26.7	24.8	29.7 <i>r</i>
8	9	08:52-09:01	2°00'	139°59'	E	6.2	27.1	24.3	29.8
58	May 31	08:28-08:40	0°01'	150°02'	ESE	1.0	28.5	23.4	29.9
59	June 1	08:36-08:47	4°53'	149°59'	ENE	6.2	26.9	24.0	29.8 <i>r</i>
60	2	08:28-08:41	9°42'	150°19'	E	8.7	28.8	24.4	29.2
61	3	08:20-08:42	14°16'	149°59'	ENE	7.0	25.4	22.5	28.2
62	4	08:15-08:31	19°18'	149°58'	E	8.0	27.9	23.3	28.7

* measured on the foremast²⁾.

** measured on the deck²⁾.

*** measured at the water intake of the ship²⁾.

r means rain within a half hour of the sonde release.

定点における強化観測の2回分(1日6回を計2日)と、往復路における観測の結果である。これらの測定
の時刻、場所、船上で測定された気象要素²⁾を **Table 1** に示す。

観測期間中の気象状況は、低層ゾンデの2回の強化観測期間中で互に大きく異なるものであった²⁾。最初の
強化観測日5月12日は、定点(2°N, 140°E)は熱帯収束帯の影響下にあり、天気は非定常で変化が激しかっ
たのに対し、後の強化観測日5月16日は静穏な期間、いわゆる赤道無風帯の領域に定点が入っており、降雨
もほとんど無かった。

3. 温湿度場の鉛直構造

熱帯の海面温度は、定点における観測期間中は、平均 29~30°C 程度を保ち、ここで解析を行った期間に
は ±1°C 程度の変化が認められた。しかし、海洋上の大気の温度の変化はそれよりも大きく、例えば 100 m

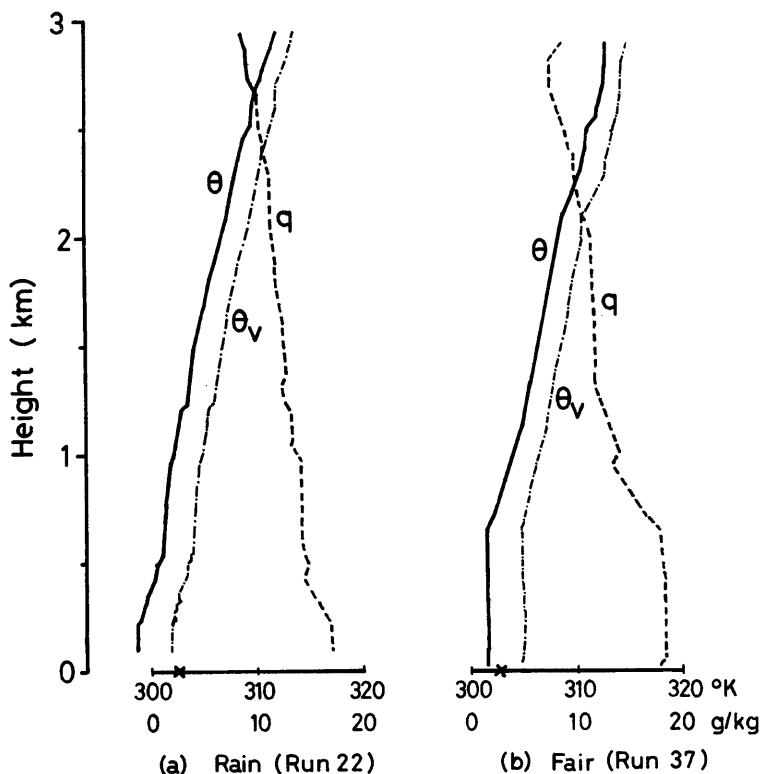


Fig. 3. Examples of the temperature and humidity profile for (a) rainy condition (Run 22, 21:14 May 12), and (b) fair condition (Run 37, 20:19 May 16). Solid lines indicate the potential temperature (θ), dash-dotted lines the virtual potential temperature (θ_v) and dashed line the specific humidity (q). Crosses indicate the surface temperature.

の高度の温度は1日に2~3°C程度変動した。その変化は、海面温度に左右される変化ではなく、また日変化の傾向も認められない。その変化は、雲が多く降水がある時、すなわち大気に活発な対流活動がある時と、晴天静穏な時との差によって生じ、特に降雨に伴って下層で気温が低下する傾向が顕著に認められた。

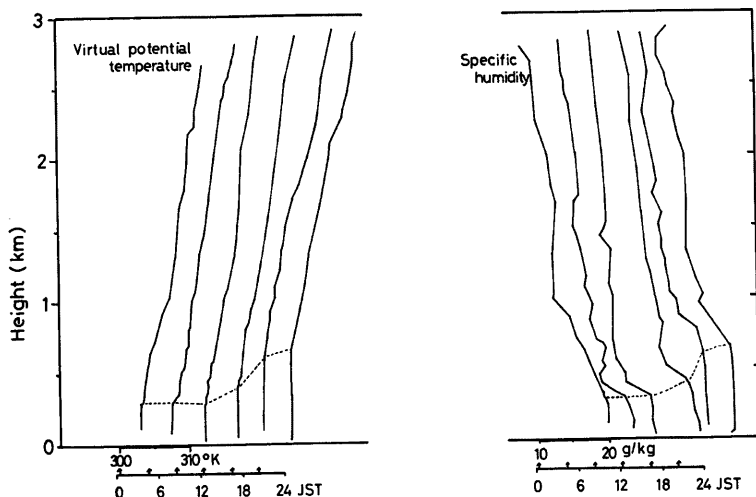


Fig. 4. Variation of the virtual temperature and the specific humidity profile on May 16, 1979. The dashed lines indicate the upper limit of the mixed layer. Arrows in the lower abscissa indicate the time of the LTS release and the position of 300°K or 10 g/Kg.

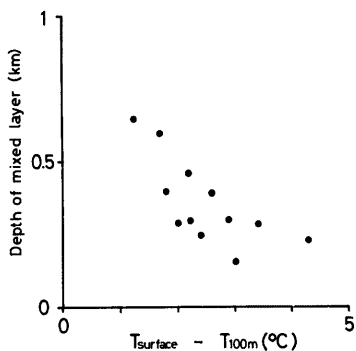


Fig. 5. Relation between the surface-air temperature difference and the mixed layer depth. Sea surface temperature was measured at the water intake of the ship²⁾, and the air temperature at 100 m by LTS.

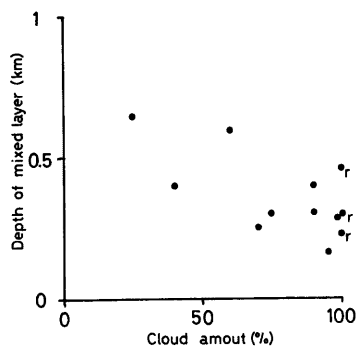


Fig. 6. Depth of the mixed layer as a function of the cloud amount. $\times$ indicates the rain within a half hour of the LTS release.

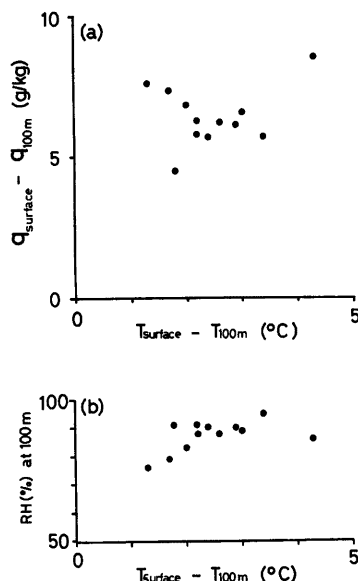


Fig. 7. Relation between the surface-air temperature difference and (a) the surface-air specific humidity difference, (b) the relative humidity at 100 m level. The surface humidity means the saturation specific humidity at the surface temperature.

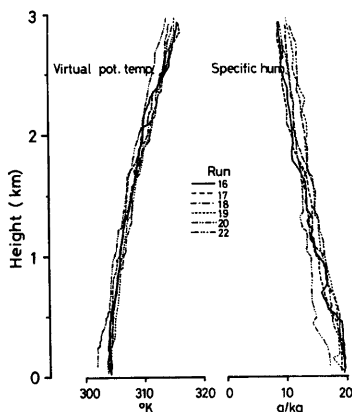


Fig. 8. Variation of the virtual potential temperature and the specific humidity distribution during the disturbed period (May 12).

Fig. 3 に降雨時と晴天時の温度、比湿の鉛直分布の比較を示す。どちらも夜間(20~21時頃)の観測結果である。海面温度は×印で示してある。降雨時には下層まで温度が低くなっており、最下層の海面付近で大きな温度勾配を作るのに対し、晴天時には下層で温度が数100 m にわたって一定である層が存在し、海面近くの気温は、海面温度により近い値を示す(Fig. 4)。Fig. 5 の左側に5月16日の1日の仮温度場の変化例を示す。破線で示したのは混合層の上限である。この日は静穏日で、曇天から晴天へ徐々に変化した。それに従って、混合層が発達していく様子がわかる。この日の最初と最後の仮温度プロファイルの差から、1 km 以下の層に貯えられた熱量を計算すると、約 10 w/m^2 の割合で顕熱の輸送が海面から行われた事になるが、その値はその日の乱流観測⁹⁾ 結果に近い値である。Fig. 5 の左側は同日の比湿分布の変化である。仮温度分布と比較して上下変化は滑らかではないが、混合層の発達とは類似している。

対流活動が活発となり、静穏な自由大気中の混合が進み、水滴の蒸発などによって生じた冷気が下層の広い範囲に拡散して行く時には混合層は消滅するものと考えられる¹⁰⁾。対流活動を示す1つの目安として雲量を選んで混合層の高さとの関係を見ると Fig. 6 に示すとおり、雲量が多いほど混合層の発達がおさえられている様子がわかる。ところが、下層の水蒸気の変化を見てみると、100 m の高さの比湿と海面の飽和比湿の差は Fig. 7(a) に示す様に、温度差と明確な関係を示さない。雲量の多い場合に気温海面温差が大きくなる時、水蒸気量の増加は明確には認められないが、相対湿度は増加する Fig. 7(b)。なお、温度の鉛直方向の相関も明確ではなく、下層の温度が降下した時に1~2 km の高さの温度も低くなる傾向は認められなかった。

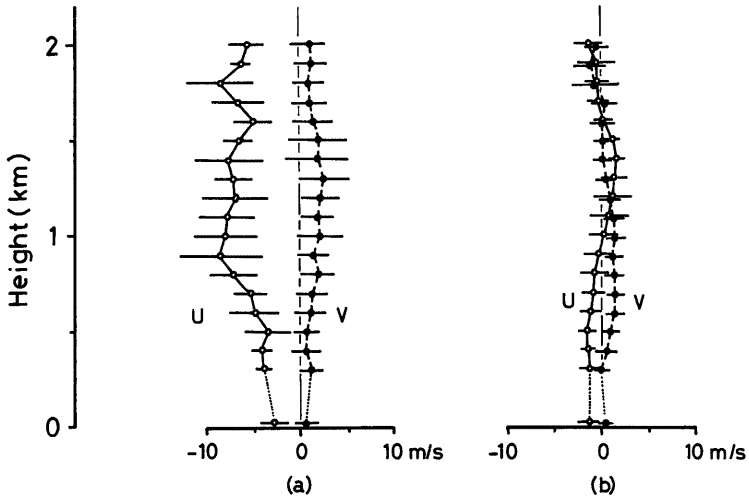


Fig. 9. Average wind profile over a day of (a) disturbed period (May 12), and (b) undisturbed period (May 16). Horizontal bars indicate the standard deviation of the variations in each measurement. The point near the surface are from the anemometer on the ship's formast at 23 m height²⁾.

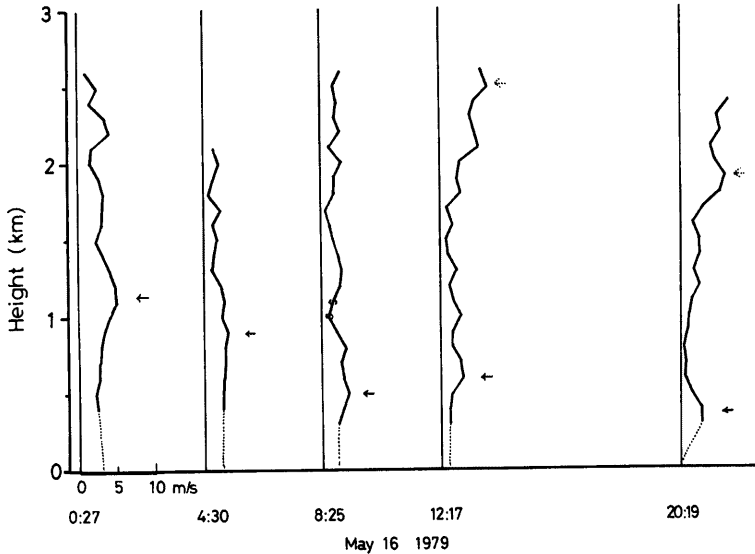


Fig. 10. Variation of the total horizontal wind speed distribution in the undisturbed day (May 16). Small arrows indicate the location of the low level peak used in Fig. 11. () indicates the less reliable data.

温度場はこの様に変動はしているが、全体的にはほぼ一定の分布形状を保っており、5月12日の様な天気の変化の激しい日でも Fig. 8 に示す様に大きく変わる事はなく、観測期間中の 3 km 以下、500 m 以上の層の仮温位の勾配は平均的に $4^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 程度のなだらかな鉛直変化をしていた。

4. 風速場の構造

強化観測日のうち5月12日には、他グループのオメガゾンデ高層観測²⁾によれば 500 mb の高度で 7~12 m の東寄の風が、また16日には 7~10 m/s の東寄の風が吹き、これに対し、船上では12日には 1~5 m/s

の東寄の風、16日には 0~3 m/s の東寄の風が吹いていた。12日は擾乱期の中にあり、変化が激しかったのに対し、16日には無風状態も現れた。低層ゾンデによるこの期間の風観測も12日は変化が激しかったが、16日は全層(2.5 km 程度まで)低風速であった。

Fig. 9 に5月12日及び16日の風の東西成分(西→東の時 $U>0$)及び南北成分(南→北の時 $V>0$)の、それぞれの1日の平均値と標準偏差とを示す。擾乱の大きかった12日は、 U 成分は全層で高層と同じ東成分が卓越していたが、静穏な16日には風は赤道付近特有の弱風がいろいろな向に吹いていた。一般的な傾向として、擾乱期の、特に前後に雨が降った時には風速のプロフィールも大きく変化するのに対し、晴天静穏時には比較的滑らかな鉛直分布を示す。

高層観測によれば、両日とも 10 km 前後の高さで 10 m/s を越える東風が吹き、最大風速域を形成しているが、低層ゾンデの観測高度範囲である 3 km 以下では風速は単調な分布を示さない事が多い。Fig. 10 に静穏な日(5月16日)の水平風速の大きさの鉛直分布を示す。1 km 程度以下の高さにピークを有するプロフィールが半数以上である。この傾向は他の日においても同様であった。これらの低層ピークの現れる高度は混合層の上に隣接する安定層中である事が貿易風域の観測において示されている²⁾が、今回の観測においても、低層のピークの位置は混合層の上の自由大気中に現れる場合が大部分であった。Fig. 11 に混合層の高さと低層ピークの現れる高さとの関係を示す。

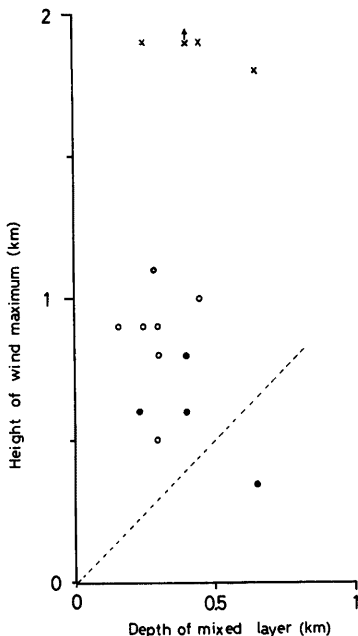


Fig. 11. Height of the wind velocity peak. Circles indicate the maximum appeared in the whole measured layer, dots the predominant low level peak with the maxima at higher levels indicated by crosses.

5. 緯度変化

緯度による大気境界層の変化を見るために、定点 (2°N , 140°E) への往復路に1日1回、午前8時前後に低層ゾンデを放球して観測を行った。観測地点は、Table 1 に示したとおり、北緯20度と赤道の間に限られている。帰路の東経150度に沿っては、風及び温湿度の観測を行ったが、往路の東経140度に沿っては、風の測定は準備が不十分で精度が悪いので温湿度の解析のみ行った。

赤道から北緯20度までは5日間程度の日数を要し、全体の大気の状態もその間に变化してしまうので、厳

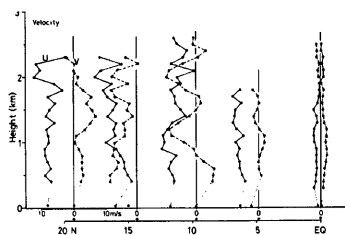


Fig. 12. Latitudinal variations of the wind velocity profiles.

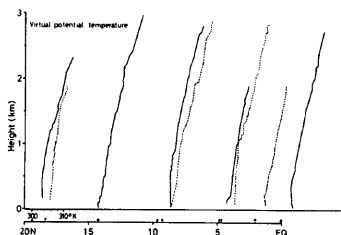
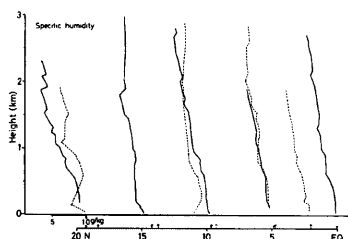


Fig. 13. Latitudinal variations of the virtual potential temperature profile. The solid curves indicate the measurement along 150°E and the dashed curves along 140°E. The arrows indicate latitude of the measurements and 300°K in abscissa.



← Fig. 14. Same as Fig. 13 except for the specific humidity and that the arrows indicate 10 g/Kg in the abscissa.

密な意味では緯度変化を見る事は不可能ではある。しかし、Fig. 12, 13, 14 に示した様に、次の様な変化傾向を認める事ができる。風向は、全体に東風が卓越し、風速は、高緯度ほど高層にピークが移動する様な傾向が認められた。ただし、風速分布は時間変化が激しいので、1例のみから結論する事はできない。一方、温湿度の分布については、緯度変化は小さいが、仮温位、比湿分布とも高緯度ほど勾配が急であり、しかも鉛直変化の大きな分布となっている。なお、この観測範囲では貿易風逆転は認められなかった。

6. 結 語

熱帯海洋上 3 km 以下の大気の鉛直構造の観測を低層ゾンデを用いて観測を行い、その中で 2 回の強化観測期間に得られたデータについて解析を行った。2 回の観測はそれぞれ擾乱期と静穏期という全く性質の異なった状況の中にあり、大気境界層の性状もそれぞれの特徴を示した。解析結果をまとめると以下の通りである。

- 1) 温湿度場には、海面近くに数 100 m の高さまで温位、比湿がほぼ一定である混合層が存在する。
- 2) 混合層の高さは天気の状態によって変化し、晴天時は高く、曇雨天時は低い。すなわち、晴天日には、温度が海面温度に近づく形で混合層が上層へ発達する。
- 3) 温位と比湿の分布は互にほぼ対称形をしていて、時間変化は小さいが、風速分布は時間とともに激しく変化する。
- 4) 風速は、擾乱期には下層 2 km まで東風が卓越していたが、静穏期には変動が多く一定の風向は示さない。
- 5) 風速分布には 2 km 以下の低層にピークが現れる場合が多い。ピークの位置は、大部分が混合層の上の安定層中であるが、温度場との明確な関係は認められない。

MONEX の研究航海の主席研究員浅井富雄教授をはじめとする東京大学海洋研究所の方々、ならびに船上での低層ゾンデ観測に御協力を頂いた京都大学原子炉実験所の水間満郎・岩本智之両氏に厚く感謝します。

参 考 文 献

- 1) 塚本 修・藤谷徳之助・光田 寧：熱帯海洋上における接地気層の乱流特性，京都大学防災研究所年報，第24号 B-1, 1981, pp. 357-370.
- 2) Asai, T. Ed.: Preliminary report of the Hakuho-Mar cruise KH-79-2, Ocean Res. Inst. Univ. of Tokyo, 1979, 115 pp.
- 3) 伊藤昭三・渡辺好弘・岡野 博：LTS-72 型低層ゾンデの話，天気，Vol. 21, 1974, pp. 127-141.
- 4) Izawa, T. Ed.: MONEX-FGGE Data Report, 1981.
- 5) Riehl, H. and Malkus, J.: On the heat balance in the equatorial trough zone, Geophysica, Vol. 6, 1958, pp. 503-538.
- 6) Augstein, E., H. Schmidt and F. Ostapoff: The vertical structure of the atmospheric planetary boundary layer in undisturbed trade wind over the Atlantic ocean, Boundary-Layer Meteor., Vol. 6, 1974, pp. 129-150.