

熱帯海洋上における接地気層の乱流特性

塚本 修・藤谷徳之助・光田 寧

TURBULENCE CHARACTERISTICS IN THE ATMOSPHERIC SURFACE LAYER OVER THE TROPICAL OCEAN

By *Osamu* TSUKAMOTO, *Tokunosuke* FUJITANI and *Yasushi* MITSUTA

Synopsis

Turbulence measurement of atmospheric surface boundary layer was carried out on board over the tropical Pacific as a part of MONEX (Monsoon Experiment). The air temperature and sea surface temperature show a little diurnal variations due to intense solar radiation in the fair weather condition. In the case of squall passage, temperature and specific humidity decrease but their turbulent fluctuations increase. The turbulent fluctuations of air temperature show quite different from the ramp structure which were usually seen in specific humidity fluctuations. According to the turbulent flux estimation by spectral density technique, water vapor transfer plays a very important role in energy exchanges at the air-sea interface and the Bowen's ratio is estimated as 0.14.

1. は し が き

熱帯地域は大気大循環を支配する大きな熱源であり、気象学的には重要な地域で種々のスケールの研究が近年さかんに行われている。大気境界層についても例外ではなく、欧米諸国を中心に BOMEX (Barbados Oceanographic Meteorological Experiment), ATEX (Atlantic Trade Wind Experiment), GATE (GARP Atlantic Tropical Experiment) 等が大西洋の熱帯地域において行われ、種々の成果が得られつつある。MONEX (Monsoon Experiment) も GARP (地球大気開発計画) 副計画の一つとして、東アフリカモンスーン、ソマリジェットとベンガル湾低気圧、西太平洋熱帯海域モンスーンなどの観測、理論両面からの解明を課題として、対応する熱帯海域においてそれぞれの計画が1979年を中心に行われた。このうち、わが国は西太平洋熱帯海域モンスーン観測とモンスーンの数値シミュレーション及び解析を担当した。西太平洋熱帯海域は梅雨期に日本にもたらされる降雨の源泉である多量の水蒸気を大気に供給する大きな補給源の一つと見なされており、また熱帯擾乱の発生地域としても重要な地域となっている。GARP では同時に FGGE (First GARP Global Experiment) の観測も進めており、赤道付近での観測強化のための観測船配置の目的とこの MONEX の観測とを兼ねて、東京大学海洋研究所の研究船、白鳳丸と気象庁の観測船、啓風丸がこの海域で観測を行うこととなった。著者らは白鳳丸に乗船し、大気境界層のうちでも高さ数十メートルまでの接地気層における乱流観測を担当した。大気境界層全体については低層ゾンデ、パイロットバルーン、係留気球、音波レーダー等を用いた観測が行われており、その一部は文字他¹⁾に報告されている。また白鳳丸においては大気境界層観測以外にもオメガゾンデを用いた高層観測、放射観測、ブイを用いた波浪観測、XBT や CTD を用いた海洋観測が全国9機関、27名の研究者により行われた²⁾。

白鳳丸は1979年5月1日に東京港を出港し、東経140度線に沿って南下し、気象・海洋の緯度変化の観測を行い5月8日、北緯2度、東経140度の観測地点に到着した。その後21日まで定点観測を行い、バブアニューギニア国、ラバウルで休養、補給した後に復路を東経150度線に沿って移動観測を行いながら北上し、6月9日、40日間の航海を終えて東京港に帰港した。

2. 観測システム

白鳳丸での接地境界層の観測は大きく次の2つに分類できる。

2.1 乱流変動量からの運動量・顕熱・潜熱の各鉛直輸送量の推定（渦相関法及びスペクトル密度法による）及び乱流特性の解明

このために海面上 23 m の前部マストの頂部に三次元超音波風速温度計³⁾（海上電機，DAT-300），直径 100 μ の銅・コンスタン熱電対乾湿計（海上電機，PY-100）を設置し，これにより風速三成分と乾湿球温度の各乱流変動量を測定した。しかし船体はたえず動揺しているために，このままでは渦相関法による乱流輸送量の測定は行えず，そのために加速度計とジャイロを組合せた船体動揺測定装置を船体の重心近くに設置し，その信号を用いて風速三成分については動揺補正を行った。また海面上 8 m の船首の手摺において直径 5 μ の熱線風速計（KANOMAX, Model 7000）と Lyman- α 湿度計（ERC, Model BLR）を設置して風速と比湿の速い変動を測定した。また比較のために小型三杯風速計と熱電対乾湿計も併せて設置して絶対値の基準とした（**Photo. 1** 参照）。これら乱流変動量の信号はすべて14チャンネルのデータレコーダ（TEAC, R-280）を用いて磁気テープに収録し，帰港後解析を行った。

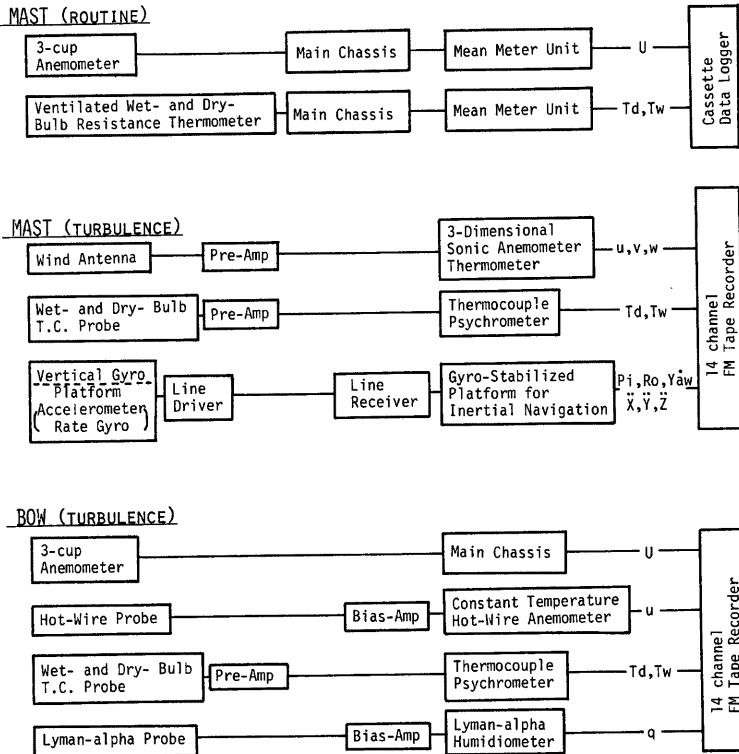


Fig. 1. Block diagram of observation system.

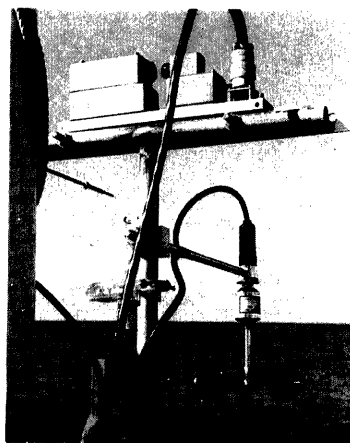


Photo. 1. Turbulence sensors installed on the handrail at the bow of R/V Hakuho-Maru.

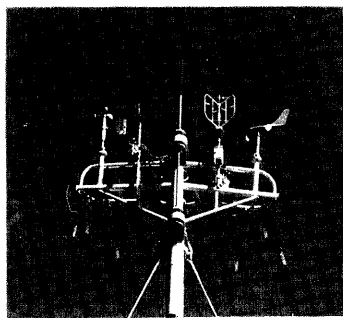


Photo. 2. Meteorological sensors installed on the top of the foremast of R/V Hakuho-Maru.

2.2 海上気象要素の連続測定

航海期間中の風速・気温・湿度の連続測定のために前部マストには前述の乱流計測器の他に小型三杯風速計と抵抗線を用いた乾湿球温度計を設置した (Photo. 2 参照)。これらの信号はアナログデータ処理装置によって60秒の移動平均をかけた後に1分毎にデジタルカセットレコーダ (TEAC DR-55) に収録した。この他に赤外線放射温度計 (Barnes, PRT-5) による海面温度の観測も随時行った。

これらのすべての観測のブロックダイアグラムを Fig. 1 に示す。

3. 海上気象要素の記録の解析

5月9日から21日までの定点観測期間は気象学的には3つの期間に大別できる。すなわち9日～14日は熱帯収束帯の影響下にあると見られる時期で主として東風が卓越しており、曇りがちでスコールがしばしば起こった。15日～17日はほとんど風のないいわゆる赤道無風帯にあたり、おだやかな天気で安定していた。最後の8日～21日は北西風が卓越して晴天の日が続き、スコールはまれであった。Fig. 2 に示したのは5月14日の曇天で時々降雨のあった1日と5月18日の晴天で夕方強いスコールに見舞われた1日の海面での温度と比湿、および海面上 23 m のマスト頂部での気温と比湿の変化の様子を示している。

海面温度については従来から行われているバケツ採水による方法と赤外線放射温度計を用いて遠隔測定する方法とを比較し、○印 (バケツ採水) と×印 (放射温度計) で区別した。両者の差は、ここに示した例で見ても、また観測期間中の全データで見てもほぼ 0.3°C 以内におさまっており、平均的には 29°C ～ 30°C で特に系統的な差は見出せなかった。同様な結果は小倉他⁹⁾ が相模湾で行った観測結果にも見られる。放射温度計では厚さ 20μ 程度の表面水層の温度を測定することになるといわれているのに対し、バケツ採水では厚さ数十 cm の層の水温を測定していることになると見られ、この差は表面付近の水温の鉛直分布に関係しており興味あるところではあるが、このデータだけでは詳細な議論は困難である。この時の水温の鉛直分布については他に東北大学のグループが観測を行っており、水面下 0.05 m では 1 m での水温に比べて 0.04°C 低いという実測結果と、放射やバルク法によるエネルギー輸送量のデータから下向き短波放射がない時には海面温度は 0.05 m の深さの水温よりも更に 0.25°C 低いという推定を行った⁹⁾。これは海面から大気に対

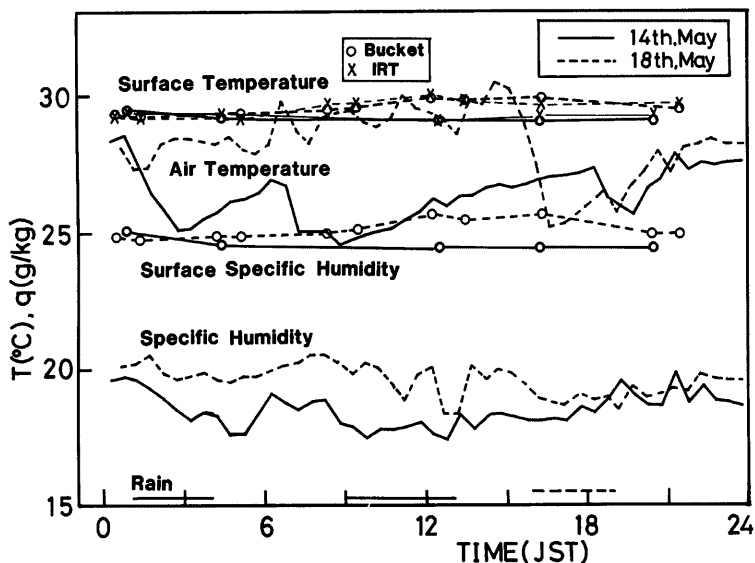


Fig. 2. Diurnal variations of meteorological parameters on 14th and 18th, May, 1979.

しての長波放射と顕熱，潜熱の輸送のために海面温度が下がることによるとされている。しかし，下向きの短波放射がある時，つまり昼間においてはこの効果とは逆に海面温度を上げる場合も現れてくる。Hasse⁹⁾は大西洋赤道付近での観測結果から，海面温度 (T_s °C) と海面下ある深さでの水温 (T_w °C) との差は短波放射の入射量 (S ly/min) と顕熱，潜熱の各輸送量と海面からの長波放射との和 (F ly/min)，および風速 (U m/s) で支配されることを見出し，その関係は

$$T_s - T_w = C_1 \frac{F}{U} + C_2 \frac{S}{U} \dots\dots\dots(1)$$

で示されるとしている。ここで T_w の深さを 50 cm とすれば $C_1 = 9.6$, $C_2 = 1.75$ と与えられている。MONEX 期間中の代表的な値として例えば $F = 0.5$ ly/min, $U = 5$ m/s をとると右辺第1項は -0.96°C となり， S としては正午ごろの最大値として $S = 1.3$ ly/min をとると右辺第2項は $+0.46^\circ\text{C}$ となり，海面と 50 cm の深さとは昼間でも 0.5°C ，夜間では約 1°C の差として現れることになる。しかし先に述べたようなバケツ採水によるものと放射温度計によるものとの差には，このような顕著な差は現れておらず，また夜間における 1°C の温度差も前述の近藤らの推定と大きく異っており，海面のごく近くのいわゆる skin layer の鉛直温度分布については更に研究を進めてゆく必要があると考えられる。

Fig. 2 に示した両日の気象要素を比較してみると，ここに示したものすべてについて平均的に大きな値を示していることがわかる。特に気温の差は大きく，14日には気温が海面温度に比べて $3\sim 4^\circ\text{C}$ 低いのに対し，18日には日中はほとんど温度差がないという状況であった。これには主として下向きの短波放射の差 (14日は 85 ly/day, 18日は 497 ly/day と5倍以上ちがう) と14日には午前2時ごろから12時ごろにかけてかなりの降雨があったこと (50 mm 程度) に原因があると考えられる。海面温度については前述の Hasse の考えに従えば短波放射が強い時には (1) 式の右辺第2項が大ききいて，海面温度は上昇する。それに伴って気温も上昇し，特に熱帯海域のように短波放射の大きい所では18日の例にも見られるように，海面温度，気

温にある程度の日変化が見られるようである。また、降雨に伴う海面温度の下降については雨滴の温度が海面温度よりも低いために多量の降雨があった場合には温度の下降が起こっていると考えられる。雨滴の温度については正確な測定はないが、乱流観測中に熱電対乾湿計に雨滴が衝突した記録から推定すると、約 26°C と推定され、これは明らかに海面温度よりも低いことがわかる。一方、気温の下降については、海面温度が降下することも一つの原因ではあるが、これはさほど大きな降下はもたらさず、降雨に伴って上空での雨滴の蒸発によって冷却された空気が下降してくるために起こると考えられている。この気温の降下が最も顕著に現れているのは18日夕刻のスコールによる例である。この日は16時ごろまでは良い天気で気温や海面温度にも日変化が見られるが、16時すぎより NW から SW への風向の変化と共に風速も 8~9 m/s 程度に上昇し、2時間で約 10mm の降雨をもたらした。これによって気温は 5°C 程度減少し、海面温度も 0.2°C ほど下降している。また境界層上部においても降水の前後で風場、温度場ともかなり異った様相を示すことが報告されている⁷⁾。

大気中の水蒸気量、比湿について見てみると温度のような顕著な日変化は見られず、18日のスコールによっても少し下降の傾向はあるがさほど大きなものではない。定点観測期間中についてもほぼ 19 g/kg 前後の値を示し、あまり大きな変化がない。相対湿度については平均的には70~80%程度であるが、気温の変化に伴ってかなり変動する場合も見られる。

4. 乱流観測結果

以上は主としてマストでのルーチン観測の結果、つまり比較的長周期の変化についてであるが、比較的短周期(10分以下)の乱流変動については別の方法で解析を行った。乱流変動の解析は先にも述べたとおり前部マストの頂部と船首の手摺で行っており、観測時には船体の影響をできるだけ小さくするために、船首を風上側に向けている。乱流変動の記録はすべてアナログデータレコーダで磁気テープに収録しており、データ処理は観測終了後これを研究室に持ち帰って各チャンネル共0.04秒、或は0.08秒毎に AD 変換して別の磁気テープに収め、これをミニ・コンピュータ (NOVA 01) を用いて処理した。1回の観測時間は1~2時間であるが、データ処理の都合上、約11分を単位として解析を行った。またスペクトル解析については FFT の手法を用いた(データ数=1024)。

先にも述べたように正確な風速変動の測定、あるいは渦相関法による乱流輸送量の直接測定には船体の動揺補正を充分に行う必要があるが、この結果については別の報告⁸⁾にゆずり、ここでは船体の動揺の影響があまり大きくないと思われる温度変動と湿度変動の特性、およびスペクトル密度を用いた乱流輸送量の間接測定結果について述べる。

4.1 熱電対乾湿計と Ly- α 湿度計の比較

海面上 8m の船首の手摺において Ly- α 湿度計と熱電対乾湿計を用いて温度、湿度の乱流変動の測定を行った。Fig. 3 に示したものは二つの Run についての温度変動と比湿変動の時系列を示している。これらのうちで、比湿変動を示す 2 つの信号、すなわち Lyman- α 湿度計で測定したものと熱電対乾湿計で測定したものとを対比する。図にも見られるように大きなスケールの変動については両者はかなり良く一致している。しかし Fig. 4 に示した両者のパワースペクトル、また Fig. 5 に示した両者の周波数別の相関係数と位相の関係からも認められるように 0.1 Hz 程度より小さなスケールの変動については両者の対応はあまり良くない。これは以前にも著者ら⁹⁾ がとりあげたように、熱電対乾湿計の応答の悪さに起因するものと考えられる。一方の Lyman- α 湿度計については、光源の強度が安定しないために絶えず校正を行いながら用いる必要があるという欠点はあるが、これを何らかの形で影響を少なくする方法を考えて用いれば有効であるといわれており¹⁰⁾、少なくとも比湿の変動成分のみについてはほぼ正確な測定が行われていると考えられる。熱電対乾湿計の応答の補正については著者ら⁹⁾ による方法もあるが、その他に Shaw and Tillman¹¹⁾ は応答の遅れは真の信号に Low Pass Filter をかけたものと等価と考えて、次のような簡単な再帰型 Low Pass Filter

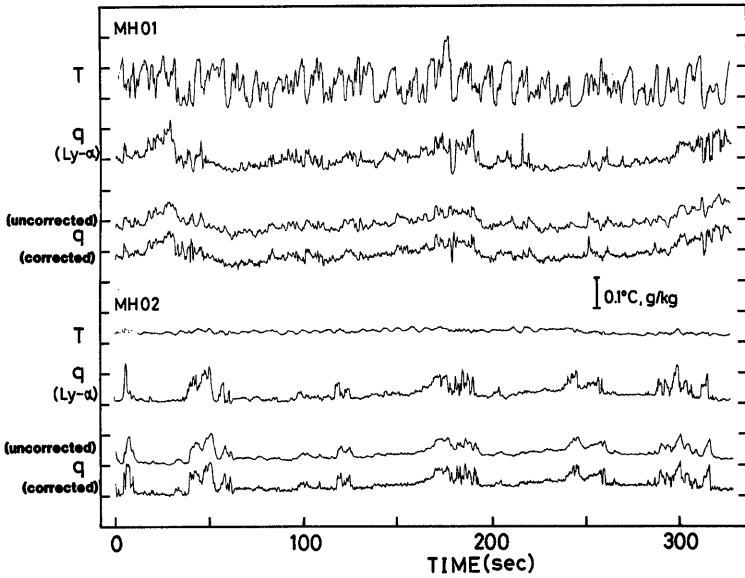


Fig. 3. Time domain traces of temperature and humidity fluctuations of Run MH-01 and MH-02. Humidity fluctuations includes Lyman-alpha humidity q , and uncorrected psychrometer q and corrected psychrometer q .

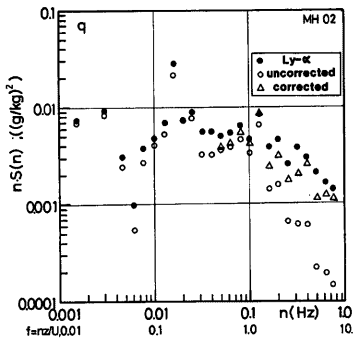


Fig. 4. Power spectra of humidity fluctuations of corrected psychrometer data as compared with uncorrected psychrometer and Lyman-alpha humidity.

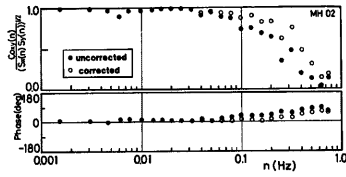


Fig. 5. Spectral correlation coefficient and phase lag between corrected psychrometer and Lyman-alpha as compared with uncorrected psychrometer.

を考えた。

$$y_i = \alpha y_{i-1} + (1-\alpha)x_i \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$\text{但し, } \alpha = 2 - \cos(2\pi\Delta t f_c) - [\cos^2(2\pi\Delta t f_c) - 4 \cos(2\pi\Delta t f_c) + 3]^{1/2} \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここで x_i は元の信号の時系列, y_i はフィルターのかかった信号の時系列, Δt は信号の時間間隔, f_c は Low Pass Filter の cut-off 周波数 (振巾の自乗が 1/2 になる周波数) を示す。いま, 計測器の信号としてとり出せるものは y_i であるので (2) 式を x_i について逆に解くと,

$$x_i = \frac{y_i - \alpha y_{i-1}}{1-\alpha} \quad \dots\dots\dots(4)$$

と簡単な形で表わすことができる。

この操作を熱電対乾湿計の乾球温度, 湿球温度の各々について行い, 比湿に換算したものを Fig. 3 の各 Run の最下段に示している。この場合の cut-off 周波数 f_c は乾球については 1 Hz, 湿球については 0.2 Hz, また Δt としては 0.16 秒とした。補正の結果を見るとかなり改善されているように見られ補正が効果的であることがわかる。この補正したデータを用いて改めて比湿変動のパワースペクトル及び Lyman- α 湿度計との周波数別相関係数, 位相を計算したものを Fig. 4, Fig. 5 に併せて示した。まずパワースペクトルについては低周波側ではほとんど差がないのは当然であるが 0.1 Hz 以上の高周波側では, かなり補正による差が見られ, 補正前には -5/3 乗則 (この図では -2/3 乗の傾き) よりも, より急激に減衰していたのに反し, 補正を行うとかなり -5/3 乗則に近い形になる。また, 相関係数, 位相についても 0.1 Hz 以上でかなり改善されていることがわかる。ただしコヒーレンスで見ると多少の改善は見られるようであるが, あまり差はない。これは quadrature spectra の部分がコヒーレンスの方には入って行くのに対し, 周波数別の相関では入ってこないことによるためである。つまり, 元の信号にわずかも変動が残っていれば補正を行うことによってかなり効果を上げることができるが, 全く見えない信号を補正によって生み出すことはできない。当然の結果であるが, 補正を行えばどんな信号でも応答を良くすることができるというわけではないという一つの例である。

4.2 温度および比湿変動の乱れの特性

温度変動と比湿変動の時系列は前に Fig. 3 に示したが, これを見てもかなり変動の様子が異なっているのがわかる。ここでは 2 つの Run について示したが, 比湿変動についてはどちらの場合にも convective plume の通過を示唆しているような, いわゆる ramp structure が見られる。これに対し温度変動については MH 01 の場合にはかなり大きな振巾 ($\sigma_T = 0.45^\circ\text{C}$) で変動しているのに MH 02 の場合には変動はほとんど見られない ($\sigma_T = 0.06^\circ\text{C}$)。さらにこれをスペクトル解析してみると顕著な差が現れる。比湿変動のスペクトルについては Fig. 4 に見られたように, 周波数 $n = 0.01$ Hz (無次元周波数 $f = n\tau/U \approx 0.1$) 以下の低周波部分にエネルギーピークを持ち, これよりも高周波側では Kolmogoroff の -5/3 乗則に従うという一般的な形¹²⁾に近い。しかし Fig. 6 に示した温度変動のスペクトルはこのような一般形とはかなり異って $n = 0.1$ Hz ($f \approx 1$) 付近にピークを持つ形となる。これに似た温度変動のスペクトルは大西洋熱帯海域で行われた BOMEX のデータにおいて顕著に見られその結果¹³⁾を引用して Fig. 7 に示す。BOMEX の場合にはピークの周波数が $f \approx 0.3$ 付近にあり, ここに示したピーク ($f \approx 1$) とはややずれているが, より低周波側で振巾が減少している点では MH 01 の場合と同じである。BOMEX の場合には, この低周波側での振巾の減少の原因は, 高湿な大気 (比湿は約 20 g/kg) のために長波放射の吸収が大きく, これが大きなスケールにわたって温度場の構造を均一化して低周波の変動を抑えてしまったためではないかと推測している。しかし証拠は挙げておらず, 今回の場合も比湿は BOMEX の場合と同程度ではあるが, 同じ原因で低周波変動が抑えられているのかどうかは断定できない。しかし BOMEX の場合と大きく異なるのは, BOMEX ではこの傾向がほとんどの場合に限られたのに対し, 今回の場合にはまれなケースであるということである。特に MH 01 のように温度変動が大きな場合は少なく, ほとんどの場合について σ_T は 0.2°C 以下であった。

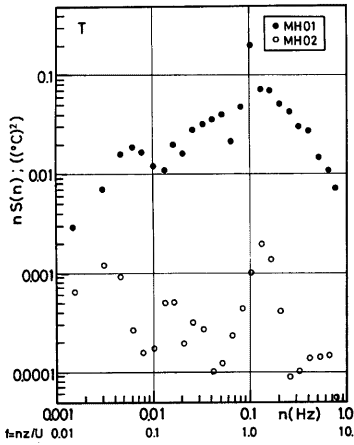


Fig. 6. Power spectra of temperature fluctuations of Run MH-01 and MH-02.

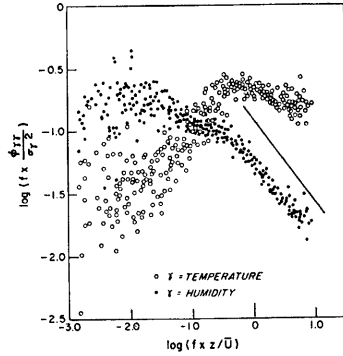


Fig. 7. Normalized temperature and humidity spectra at BOMEX. The straight line have a slope of $-2/3$ corresponding to the $-5/3$ Kolmogoroff law. (after Phelps and Pond¹³).

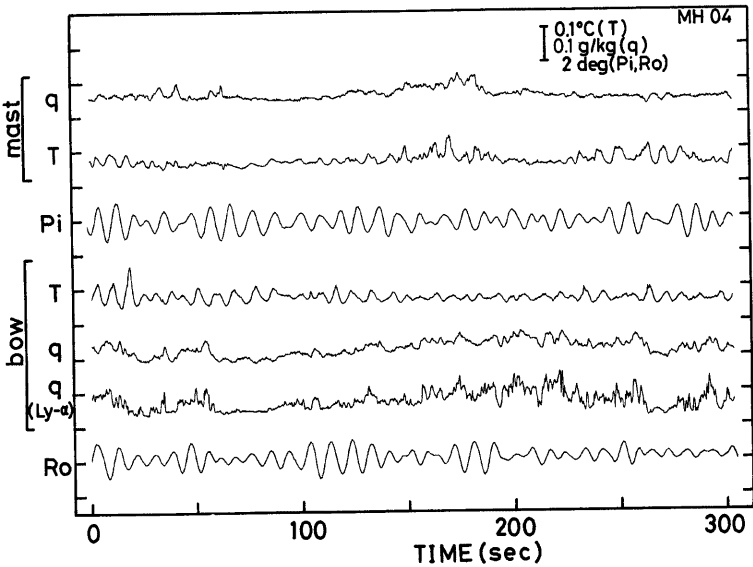


Fig. 8. Time domain traces of temperature and humidity at the top of the foremast and bow as compared with pitching angle and rolling angle.

その典型的な場合は Fig. 3 に示した MH 02 のようにほとんど変動がない場合である。

温度変動の小さな MH 02 についての温度のパワースペクトルは Fig. 6 に示したが、MH 01 に比べて変動が小さいために全体的にレベルが下がっているが 0.1 Hz 付近にピークがある点では共通しており、顕著な差は低周波側まで振巾が比較的大きいことである。同じ熱電対乾湿計のデータを使用しているにもかかわらず比湿変動には 0.1 Hz 付近のピークはほとんど見られない。そこでこの現象をもう少し詳しく調べるために最も顕著にピークの現れた MH 04 をとりあげ解析を行ってみると次のようなことがわかった。

i) この温度変動と最も良い相関を示すのは船体の動揺の信号のうちのピッチング角で、ピッチング角と逆位相、つまり船首が上がっている時に気温が下がり、船首が下がっている時に気温が上ること。

ii) 同時に海面上 23 m のマスト頂部で測定した温度変動にも同じ位置にスペクトルのピークが見られるが、船首でのものほど顕著ではないこと。

Fig. 8 に船首とマストで測定した温度と比湿及びピッチング角とローリング角の変動の時系列を示しているが、これを見てもこの2つの傾向は確認できる。気層が非常にはっきりした不安定成層をしていれば、船の上下に伴ってこのような現象が見られることは想像できる。この場合の海面温度は 29.2°C、船首では 28.7°C、マスト頂部では 29.4°C で海面とマストとの間に気温の極小が生じる型の分布をしている。また観測中は日射が強く、風も弱かったために船体の影響で船を中心とした heat island ができていたことも考えられるが、もしそうであるなら船首の部分もその中に入ってしまったために、そこで測定している気温自身がかなり高いものになっているはずである。一方、ここで得られた記録から逆算すると船首付近の高さに温度勾配にして約 0.3°C/m 程度の不安定成層が存在したことになる。従って気温の極小は船首の高さ(8m)とマスト頂部の高さ(23m)との中間にあるはずである。これがどのような原因によって生じたものかは興味のあるところであるが、現在のところは不明である。また先に述べた MH 01 の 0.1 Hz 付近でのスペクトルピークもこれが原因となっていると考えられるが、変動が大ききことと、低周波側で温度変動が小さくなってゆくことに差が見られる。

これまでに比湿変動については convective plume を示すような ramp structure が卓越するのに対し、温度変動についてはこのような大きな変動はほとんど見られず、0.1 Hz 付近に卓越周期をもつ変動を含んでいることがわかったが、両者の周波数別の相関係数について調べると次のようになる。Fig. 9 には比湿変動と温度変動についての周波数別の相関係数と位相のずれを示している。かなりのばらつきはあるが、全体的には 0.01~0.1 Hz 付近にピークを持ち、両側で下がるという形をしているようである。また位相については、ほとんどの周波数範囲で温度変動が先行しているようである。Phelps and Pond¹³⁾ によれば San Diego のデータでは相関は低周波側で 1 に近づいたが、BOMEX では ± 1 付近から低周波側ではむしろ低くなる傾向にあり、ここで得ている結果に近い。また位相については San Diego ではほとんど零であったが、BOMEX では全周波数範囲で 20~40° ほど温度の方が先行し、ここで得ている結果と似ている。これらの現象は先に述べた温度変動の特性が大きく作用していると考えられ熱帯海域に特有の現象かもしれない。

温度・比湿変動の特性として最後にとりあげねばならないのは非常に安定した天候の場合と熱帯の特色であるスコール等の擾乱に伴う場合との比較である。Fig. 10 に示したのは5月12日早朝のマスト頂部における温度、比湿、風速の時間変化の記録であるが、5時10分ごろ風速が急激に大きくなったことに対応して温度と比湿が急激に減少している。またこれに伴って風向も変化しているわけであるが、これは観測点のすぐ傍をスコールが通過したことによるものである。これを見ただけでも気温、比湿の低下と共に各々の変動の振巾が大きくなっていることがわかるが、この前後約90分間の記録を約10分ずつの Run に分け各 Run についての温度、比湿の平均値、乱れの標準偏差、両者の相関係数を Fig. 11 に示した。スコールの起こる以前の約50分間には、平均値、変動ともあまり大きな変化はないが、スコールの通過とともに気温、比湿の低下とともに各々の変動が大きくなったことがわかる。しかし、その後については徐々に元の状態に戻りつつある。この時の比湿の減少は約 2 g/kg であるが、もし上層からの downdraft によって気温、比湿の減少が起

こつたとすれば、この比湿差から高度 300~400 m 付近にその源があることが低層ゾンデのデータからわかる。また参考のために30分単位で求めた渦相関法による顕熱輸送量と潜熱輸送量を示したが潜熱輸送量(蒸発量)が3倍以上にも増加しているのは注目すべきことである。しかし顕熱輸送量はあまり変化していない。こ

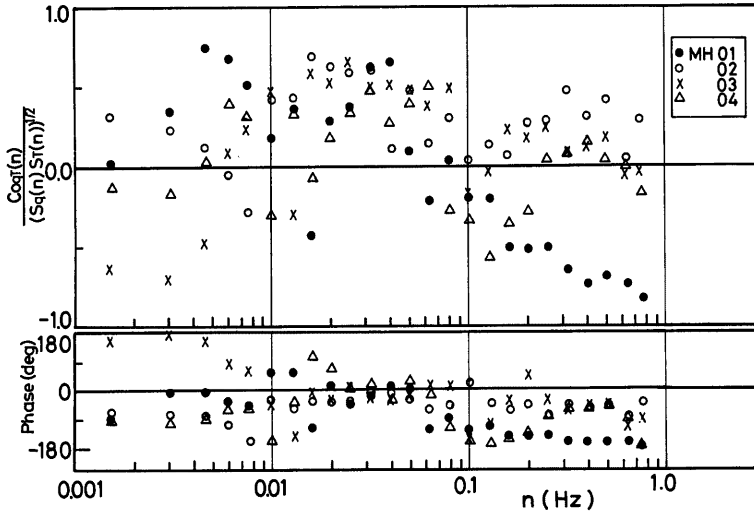


Fig. 9. Spectral correlation coefficient and phase lag between humidity and temperature.

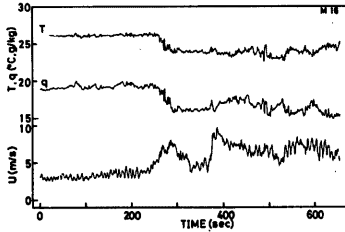
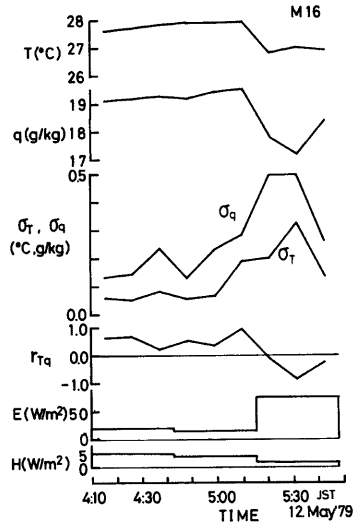


Fig. 10. Time domain traces of temperature, humidity and wind speed at the time of squall passage.

Fig. 11. Time variations of mean and rms values of temperature and humidity, correlation coefficient of T and q and turbulent fluxes of sensible heat and latent heat around the time of squall passage.



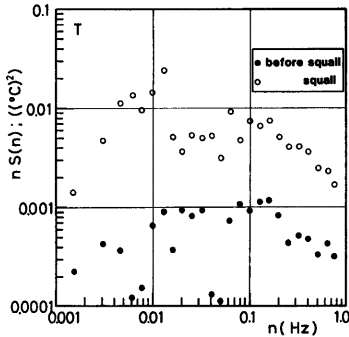


Fig. 12. Comparison of power spectra at the time of squall passage and before the squall passage.

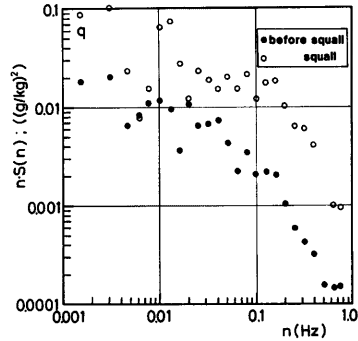


Fig. 13. Same as Fig. 12 except for humidity.

ここで、どのように乱れの状態が変化したかを調べるためにスコールの前後、約10分間ずつについてスペクトル解析を行った。Fig. 12, 13 は温度、比湿のパワースペクトルについて前後の状態を比較したものである。まず温度については、0.1 Hz 付近にピークをもっていたものがスコールの接近と共に全体的に変動のレベルが上昇すると共に 0.1 Hz のピークは小さくなり 0.01 Hz 付近のピークが大きくなっている。つまり、より低周波側の変動が大きくなったといえる。先に 0.1 Hz 付近のピークは船首付近の不安定層の存在を示すものとしたが、ここで得られた結果はスコールが近づくとこの不安定層が無くなるか、高さが低くなることを示している。一方の比湿変動については全体的に変動が大きくなっているだけで、ピークの位置も両方共 0.001 Hz 付近にあるようであまり変化がない。また Fig. 14

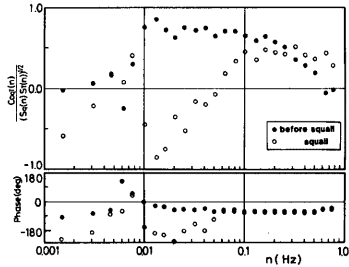


Fig. 14. Comparison of spectral correlation coefficient and phase lag between humidity and temperature at the time of squall passage and before the squall passage.

に示した相関と位相についてみるとスコール接近時には 0.01~0.1 Hz で相関が大きな負の値を示しており、これは Fig. 11 の時間変化、Fig. 12 の全体的な相関を見ても認められるが非常に興味深い現象である。このように積雲の通過に伴って変動の様子が変化することは飛行機観測によっても明らかにされてきており、LeMone and Pennell¹⁴⁾ は subcloud layer 上部での乱流輸送量が積雲の分布と非常に密接に関係していることを明らかにしている。接地気層においても、これに対応した関係のあることがこのデータから推定できる。

4.3 乱流輸送量の間接測定

先にも述べたように船体の動揺補正を加えた乱流輸送量の直接測定は別に行われているので、ここではスペクトル密度を用いた間接測定法の結果について述べる。この方法は Hicks and Dyer¹⁵⁾ によって提唱され、著者の1人が実際のデータに適用してその有用性を指摘したものである¹⁶⁾。これは風速、温度、比湿の慣性小領域でのスペクトル密度が Kolmogoroff の $-5/3$ 乗則と Monin-Obukhov の相似則に従うとして輸送量を推定するもので NIFTI と呼ばれている。Fig. 15 には定点観測期間中のマストでの観測による各輸送量と変動の標準偏差の大きさを示してある。特に顕著な変化は見られないが、乱流輸送量は9日から16日にか

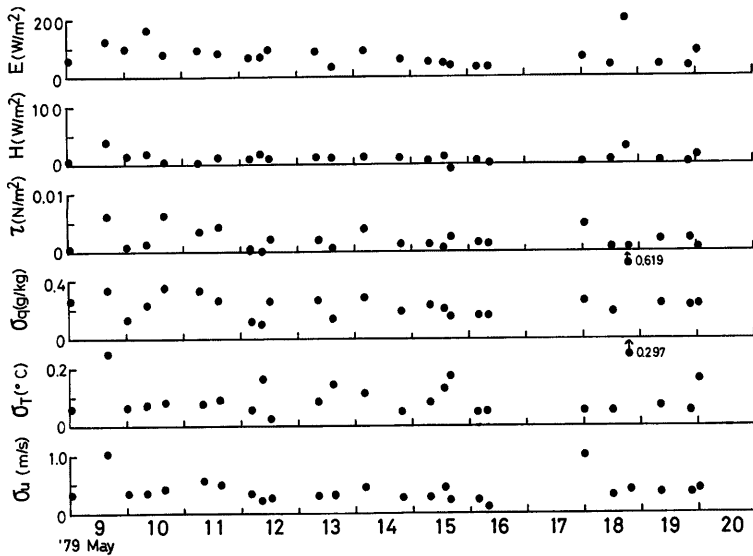


Fig. 14. Variations of turbulent fluxes obtained by spectral density technique and rms values of fluctuations of temperature, humidity and wind speed.

けてわずかずつではあるが減少してゆく傾向が見られる。これは先にも述べたように15日～17日にかけて赤道無風帯に入り、ほとんど風のない穏やかな日が続いたことと関係しているのではないかと考えられる。平均的には顕熱輸送量は約 11 W/m^2 程度と非常に小さいのに対し、潜熱輸送量は 80 W/m^2 程度とかなり大きくなっている。Fig. 16 には顕熱輸送量と潜熱輸送量との対比を BOXEX や AMTEX のデータと共に示した。今回のデータは BOMEX のものとはかなり類似していることがわかるが、冬期東シナ海で行った AMTEX の時とは異り、潜熱輸送量の比重がかなり大きいことがわかる。AMTEX の場合には海面温度とマストでの気温の差が大きい時には 10°C 以上もあったことに対し、今回の場合にはさほど大きな差がな

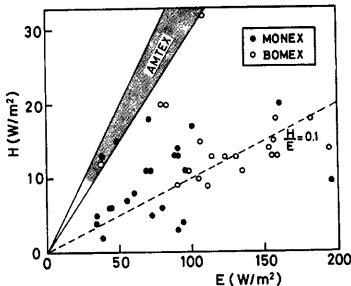


Fig. 16. Comparisons of sensible heat flux and latent heat flux in MONEX, BOMEX and AMTEX.

ったことがこの原因として考えられる。また温度変動に対し比温変動が相対的に AMTEX の場合よりも大きいことも関係している。顕熱輸送量と潜熱輸送量との比、つまり Bowen 比で表わせば AMTEX では $0.3 \sim 0.4$ であったのに対し、今回は 0.14 、BOMEX では 0.1 程度となり水蒸気の貢献度がかなり大きいことがわかる。なお、ここで示した潜熱輸送量 80 W/m^2 は蒸発量にすれば約 3 mm/day となり、BOMEX での約 5 mm/day と比べるとやや小さいようである。もっとも AMTEX においても、これよりも大きな蒸発量が寒気吹出し時には観測されている。ここで推定した乱流輸送量をチェックする意味で、船体の動揺補正を加えた直接測定の結果と比較してみると、NIFTI で求めたものの方が直接測定の結

果と比べて1.5倍ほど大きな値を示している。これは運動量、顕熱、潜熱の各輸送量の比較においてあてはまる。NIFTIの方は種々の仮定に基いているために精度が悪いのはもっともであるが、直接測定において長周期の変動を除くため、0.0073 HzのHigh Pass Filterを用いていることも乱流輸送量を小さく評価してしまう一つの原因ではないかと考えられる。しかし、いずれにしてもBOMEXの場合ほど蒸発量が大きくないことはパルク法による蒸発量の推定からも言える。

5. 結 語

熱帯海域での接地気層における乱流観測により、次のようなことが明らかとなった。

i) 気温、海面温度については日射の強い日にはある程度日変化が見られるが、比湿についてはほとんど変化しない。

ii) スコールに伴って気温はかなり下降するが、比湿の下降はそれほど大きくない。また、かなり降水を伴った場合には海面温度も下降する。

iii) 熱電対乾湿度計の応答の遅れによって、Lyman- α 湿度計と比較した場合には0.1 Hz以上の高周波側でかなり変化の様子が異なるが、デジタルフィルターを逆に使うことによりかなり補正を行うことができる。

iv) 温度変動と比湿変動とを比較すると、比湿変動がいわゆるramp structureを示すのに対し、温度変動は大きなスケールの変動はあまり卓越せず、0.1 Hz付近に一つのピークを持つようなスペクトルを示す。また全体として温度変動の振巾はかなり小さい場合が多い。

v) スコールの通過に伴って、温度、比湿の絶対値が下がると共に温度変動、比湿変動は急激に大きくなる。また水蒸気の乱流輸送量もそれに伴って大きくなるが、顕熱輸送量はあまり変化していない。

vi) スペクトル密度を用いて推定した乱流輸送量は平均的には顕熱輸送量は 11 W/m^2 、潜熱輸送量は 80 W/m^2 （蒸発量に換算すれば約 3 mm/day ）でBowen比は約0.14であった。

最後に本研究航海にあたりお世話になった東大海洋研究所の浅井富雄教授はじめ乗船研究員の方々、また白鳳丸の田玉船長以下乗組員の方々に厚く感謝する。

参 考 文 献

- 1) 文字信貴・吉門 洋・光田 寧：熱帯海洋上の大気境界層の構造，京都大学防災研究所年報，第24号，B-1，1981，pp. 371-380.
- 2) Asai, T. Ed.: Preliminary report of the Hakuho Maru cruise KH-79-2 [MONEX Cruise], Ocean Res. Inst. Univ. of Tokyo, 1979, 115 p.
- 3) Hanafusa, T., Y Kobori and Y. Mitsuta: Single head sonic anemometer-thermometer, The Boulder Low-Level Intercomparison Experiment, WMO Report, 1980, pp. 7-13.
- 4) Ogura, Y. et al: A comparison between sea surface temperature measured by an infrared radiation thermometer and that by the bucket method, Journ. Ocean. Soc. Japan., Vol. 25, No. 5. 1969, pp. 255-258.
- 5) 近藤純正・佐藤 威：西太平洋の海面熱収支—MONEX 第2報，1979年度日本気象学会秋季大会講演予稿集，1979，pp. 134.
- 6) Hasse, L.: The sea surface temperature deviation and the heat flow at the air-sea interface, Boundary-Layer Met., Vol. 1, 1971, pp. 368-379.
- 7) 水間満郎・塚本 修：熱帯海洋上における接地気層の乱流特性について，日本気象学会関西支部昭和55年度第3回例会講演要旨集，1980.
- 8) 藤谷徳之助：熱帯海洋上における乱流輸送過程の研究 (MONEX) (2)，1980年度日本気象学会秋季大会講演予稿集，1980，pp. 104.

- 9) 塚本 修・光田 寧：赤外線湿度計と熱電対乾湿計の比較観測について，京都大学防災研究所年報，第22号，B-1，1979，pp. 429-436.
- 10) 藤谷徳之助：紫外線湿度計による湿度変動の測定，天気，第27巻，第9号，1980，pp. 649-655.
- 11) Shaw, W. J. and J. E. Tillman: The effect of and correction for different wet-bulb and dry-bulb response in thermocouple psychrometry, Journ. Applied Met., Vol. 19, 1980. pp. 90-97.
- 12) Smedman-Högstrom, A.: Temperature and humidity spectra in the atmospheric surface layer, Boundary Layer Met., Vol. 3, 1973, pp. 329-347.
- 13) Phelps, G. T. and S. Pond: Spectra of the temperature and humidity fluctuations and of the fluxes of moisture and sensible heat in the marine boundary layer, Journ. Atmos. Sci. Vol. 28, 1971, pp. 918-928.
- 14) LeMone, M. A, and W. T. Pennell: The relationship of trade wind cumulus distribution to subcloud layer fluxes and structure, Mon. Wea. Rev., Vol. 104, 1976, pp. 524-539.
- 15) Hicks, B. B. and A. J. Dyer: The spectral density technique for the determination of eddy fluxes, Quart. Journ. Roy. Met. Soc., Vol. 98, 1972, pp. 838-844.
- 16) Tsukamoto, O.: Application of NIFTI method for field measurement of turbulent fluxes, Bull. Disast. Prev. Inst., Kyoto Univ., Vol. 24, 1974, pp. 281-293.