

多良間島における地空相互作用について

光田 寧・文字 信貴・塚本 修

A STUDY OF AIR-SURFACE INTERACTION AT TARAMA ISLAND

By Yasushi MITSUTA, Nobutaka MONJI and Osamu TSUKAMOTO

Synopsis

A boundary layer measurement was made on the 50 m tower of Tarama Island in February, 1974. Tarama Island is a small and flat coral island of Okinawa, Japan. The direct measurement of turbulent fluxes of momentum, sensible heat and latent heat were made with a sonic anemometer-thermometer and a thermocouple psychrometer at the top of the 50 m observing tower. The observation was a part of the AMTEX for the study of air mass modification over East China Sea. During this observation, periodical changes of meteorological parameters are remarkably seen. Diurnal variations are clearly seen in calm conditions and changes with a period of 4 days are predominant for most of the parameters throughout the period. Turbulent characteristics of airflow observed on this tower are different from those over open sea because of the effect of the island.

1. は し が き

冬期、沖縄から台湾付近にかけての東シナ海海域において東シナ海低気圧と呼ばれる小低気圧が発生し、急速に発達して日本付近に大きな災害をもたらすことがしばしば見られる。天気予報の精度向上と全地球的気候変化について研究する国際的な気象学の研究プロジェクトである地球大気開発計画（GARP）の副計画の1つとして気団変質観測計画（AMTEX）がとりあげられ、まず初年度として1974年2月約2週間にわたって沖縄近海において大規模な気象観測が展開された。これは冬期に中国大陸から吹き出した乾いた寒気団が、黒潮の流れる暖かな東シナ海海面上において熱と水蒸気の補給を受けて変質する過程を明らかにすることにその主目的があり、更にその過程でじょう乱、つまり東シナ海低気圧が発生するメカニズムまでも研究しようとするものである。著者らは海面と大気とのエネルギーの交換を定量的に評価するための大気境界層の観測を担当し、その一部として多良間島において観測を行った。本報告は主としてこの島での観測結果について述べる。AMTEX という全体的な計画から見た場合、海上における観測資料が必要となるが、他の報告¹⁾にも見られるように船上での観測は非常に困難であり、しかも観測点の数をさほど増すことはできない。従って多良間島のような小島での観測結果を用いて何らかの方法で広い海域で生じている現象を推測する必要がある、そのための方法を研究することも、ここでの観測結果を利用する上で必要であり、かつ重要な課題と考えられる。

2. 観 測 の 詳 細

Fig. 1 は AMTEX の行われた海域での気象観測網を示す地図で、多良間島はこの海域の南西部にあたる平坦な小島である。著者らはこの島の南西部にある台風観測所²⁾の施設を用いて観測を行った。この島では同時に台風観測所から約 4 km 離れた島の北岸で、岡山大学とオーストラリアのグループが観測を行った。

著者らの行った観測のブロックダイアグラムを Fig. 2 に示す。三次元の超音波風速温度計（Kaijo Denki. Model PAT-311-1）³⁾と直径 50 μ m の銅・コンスタンタン熱電対乾湿球温度計⁴⁾を 50m の塔の頂上に設置し、

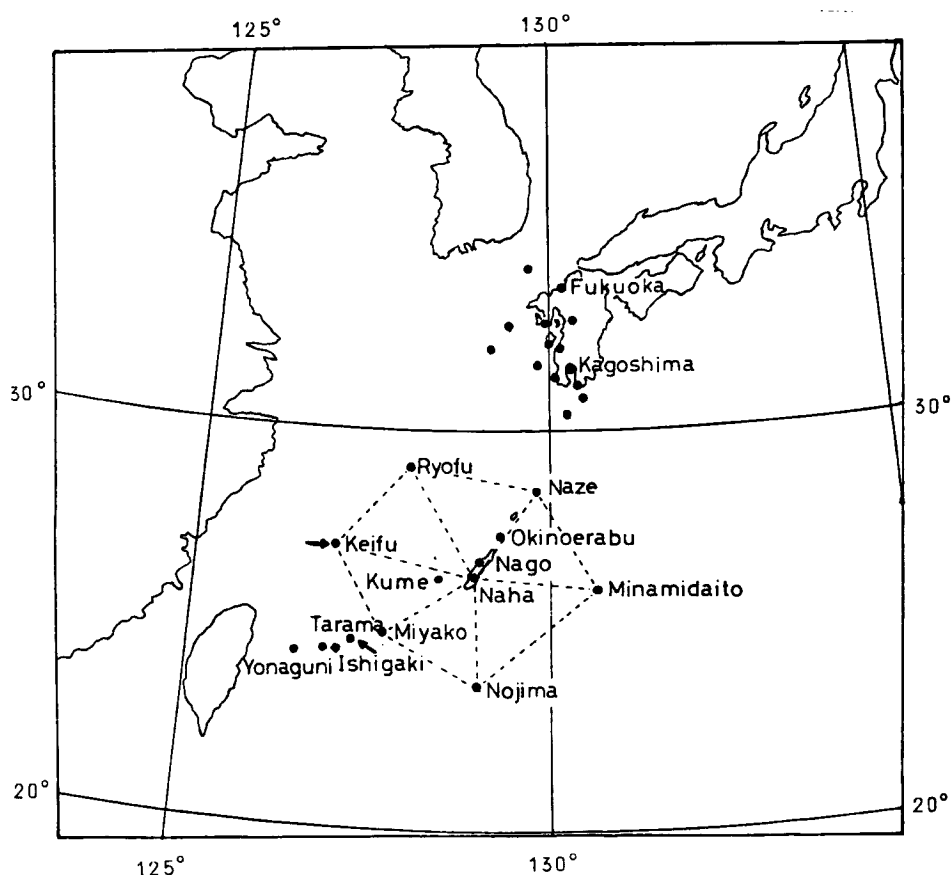


Fig. 1 The map of AMTEX area and observing points.

風速三成分と音仮温度及び乾湿球温度の変動を測定した。これらの各変動量からは渦相関法によって運動量輸送量、顕熱輸送量、潜熱輸送量が直接求められる。顕熱輸送量については熱電対乾湿計の乾球温度出力を用いて計算されるものの他に、超音波風速温度計の温度出力を用いて計算されるものの2種類が求められるが、後者の出力は湿度の影響を受ける音仮温度である点で両者は多少異っている。また、これらの各輸送量と風速、気温、湿度の鉛直分布との関係を見るために50m, 35m, 25m, 15m, 7mの各高度に気象庁型の三杯風速計、50mと15mの2高度にはプロペラ型風向風速計と通風式ダイオード乾湿球温度計を設置した。

これらの各アナログ信号は、すべて40チャンネルのデータ収録装置 (TEAC DP-2000) を用い、各チャンネル共1秒毎にデジタル化して磁気テープに記録された。

観測は昭和49年2月15日から28日までの2週間にわたって行われ、この間、毎日3時、9時、15時、21時の各正時前30分間に他の観測点と同時の観測を行ったが、2月16日～18日は強化観測期間とし、3時間毎の観測を行った。観測期間中、前半は比較的穏やかな日が続いたが後半は季節風の吹き出しが始まり、雨を伴った強風となった。不幸にして後半の強風のために熱電対乾湿計の感部が断線し、更に超音波風速計の鉛直成分にも支障をきたしたため、各輸送量の直接測定は20日頃から欠測が多くなった。

磁気テープは研究室に持ち帰り、京都大学大型計算機センターのFACOM 230-75を用いて必要な各要素の計算を行った。

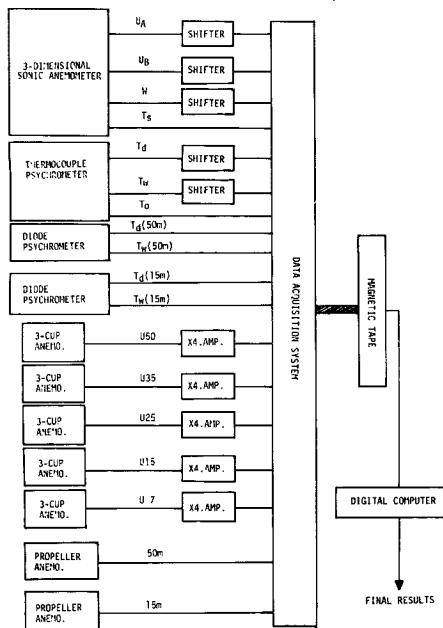


Fig. 2 The block diagram of the observation.

3. 解析結果および考察

ここで得られた約2週間におけるデータは膨大な量に及び、解析は現在なお進行中であるが、ここではこれまでに得られている結果及びそれに対する考察について報告する。なお、観測結果の大部分は AMTEX の観測報告⁵⁾ に他の地点での結果と共に報告されている。

観測期間中における基本的な統計量の変化の様子を、Fig. 3 及び Fig. 4 に示す。Fig. 3 は50m 高度での平均風向及び平均風速（超音波風速計による）、平均気温及び平均比湿（通風乾湿計による）の変化の様子を示す。比湿の変化のうち白丸印は50m 高度の温度計のトラブルのため、15m 高度のもので代用したものである。

図からも明らかなように15日～18日の4日間は風速5m/sec 以下の穏やかな日が続き、風向は東から時計回りにほぼ一回転している。18日から22日まででも良く似た変化を繰り返しているが、風速はやや強くなってきた。23日以降は急激に風が強まると共に気温が急激に下がり、大陸からの乾燥した寒気が北北東の風となって持続的に吹き出してきた。

また Fig. 3 には渦相関法によって求めた運動量輸送量、顕熱輸送量、潜熱輸送量の時間変化をも示している。後半は測器のトラブルにより欠測が多いが、穏やかな最初の4日間においては運動量輸送量以外の輸送量には顕著に日変化のパターンが見られる。超音波風速温度計の温度出力を用いて計算した顕熱輸送量と熱電対乾湿計の乾球温度出力を用いて計算した顕熱輸送量とを比較すると両者は非常に良く似た変化をしており、前者は平均的に約3%ほど大きな値を示す。顕熱輸送量と潜熱輸送量との比を表わす Bowen 比は平均0.53となり、夏期に草地上で得られた値、0.34⁶⁾ などよりもやや大きい。

Fig. 4 は風速三成分と音仮温度、気温、比湿の各変動の標準偏差の時間変化を見たものである。風速三成分のうち、平均風向成分 u 、風向直角成分 v の変動の標準偏差については日変化はあまり顕著ではないが、鉛直成分 w の変動の標準偏差には前半非常にはっきりと日変化が見られる。同様に温度変動、比湿変動の標準偏差についても同じ期間中、日変化は顕著に見られる。

大気における乱流変動が Monin-Obukhov の相似則⁷⁾ に従うとすれば、無次元化した統計量は安定度 z/L の普遍関数になるはずである。Fig. 5 は風速三成分の変動の各標準偏差を摩擦速度 u_* で無次元化したものを、安定度 z/L_s に対してプロットしたものである。ここでは Monin-Obukhov の長さ L を計算する場合、超音波風速温度計の温度出力 T_s から導かれた顕熱輸送量 H_s を用いた。風向方向成分の変動、 σ_u/u_* については風速の長周期成分の寄与がかなり大きいと考えられるため、値はかなりばらついており安定度による変化は顕著ではなく、全体の平均値は3.74となる。一方、鉛直成分の変動、 σ_w/u_* は不安定の場合、 $-z/L_s$ の増加と共に増加する傾向を見ることができ、 $z/L_s > -1$ の中立に近い場合及び安定な場合の平均値は1.69である。風向直角方向成分の変動、 σ_v/u_* は両者の中間にあり、安定度による変化がわずかに見られる。しかし全安定度領域で平均したものは2.77である。

不安定の場合には機械的な乱れよりも自由対流に伴う乱流変動が卓越すると考えられ、乱れの性質が変わってくる。このような場合には次元解析から不安定領域での風速の鉛直成分 w の変動及び温度 θ の変動と安定度 z/L の間には

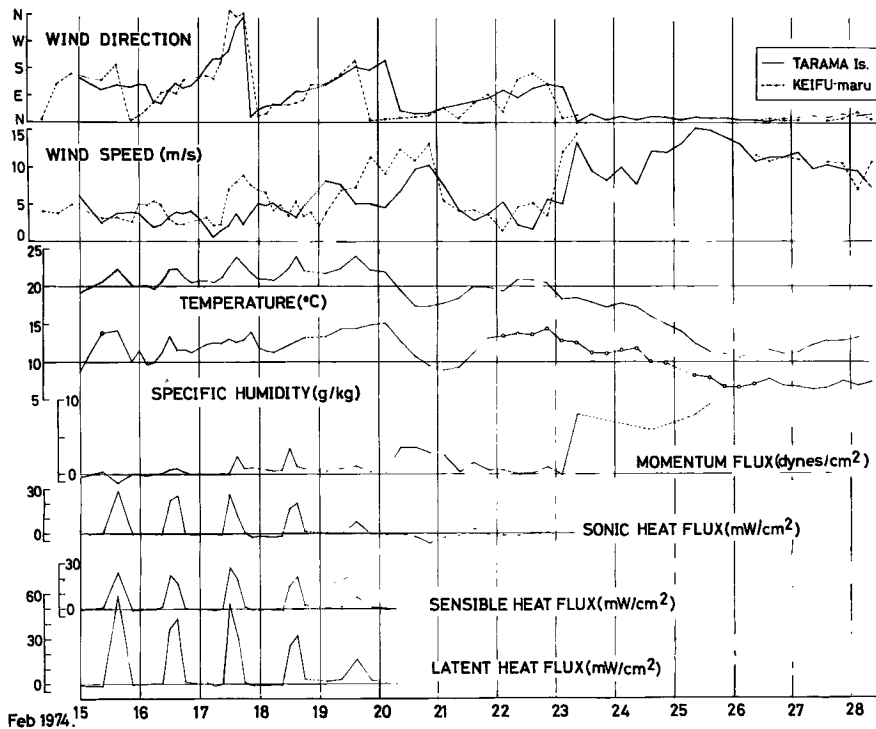


Fig. 3 Time variations of the mean values of wind direction, wind speed, temperature, specific humidity and the turbulent fluxes of momentum, sensible heat (measured by sonic anemometer-thermometer and by thermocouple thermometer) and latent heat, at Tarama 50 m tower during AMTEX'74.

$$\frac{\sigma_w}{u_*} = C_w \cdot \left(-\frac{z}{L}\right)^{1/3} \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\sigma_\theta}{|\theta_*|} = C_\theta \cdot \left(-\frac{z}{L}\right)^{-1/3} \dots\dots\dots (2)$$

のような関係があると言われている⁸⁾。Fig. 6 は今回得られた資料から風速の鉛直成分 w と音仮温度 T_s の各変動と安定度の関係を対数スケールで示したもので、参考のため Monji⁸⁾ が実験的に塩原の上で求めた係数 $C_w=2.2$, $C_\theta=0.92$ を用いて (1), (2) 式の関係を直線で示してある。風速の鉛直成分 w の変動についての実測値はここに示した直線よりもやや小さい方に分布しているが、その勾配はほぼ一致している。また音仮温度 T_s の変動については不安定側ではここで示した直線上に分布している。しかし中立に近づくとき実測値は直線で示される値よりも大きな値を示すようになる。これは例えば30分間の観測時間中の熱輸送量が観測時間全体の平均としては零になっても、温度変動自体は零にはならないで有限の値を持つため、無次元化した乱れの強さは無限に大きくなりうるためと考えられる。同様に乾球温度変動 θ 、比湿変動 q についても Fig. 7 に示したが乾球温度の変動は音仮温度の変動と良く似た変化をしており、更にこの図を見る限り、湿度も温度と同じ形の変化をしており湿度に対しても温度と同じ相似則が適用できそうである。Fig. 6, Fig. 7 には安定の場合の実測値も併せてプロットしてある。温度、湿度については中立に近づくに従って値が大きくなる傾向は少し認められるが、はっきりとした関係は見出せない。

今回の観測期間中、風向は時刻と共に変化しているが観測塔は島の南西岸から 500m ぐらい離れており、陸

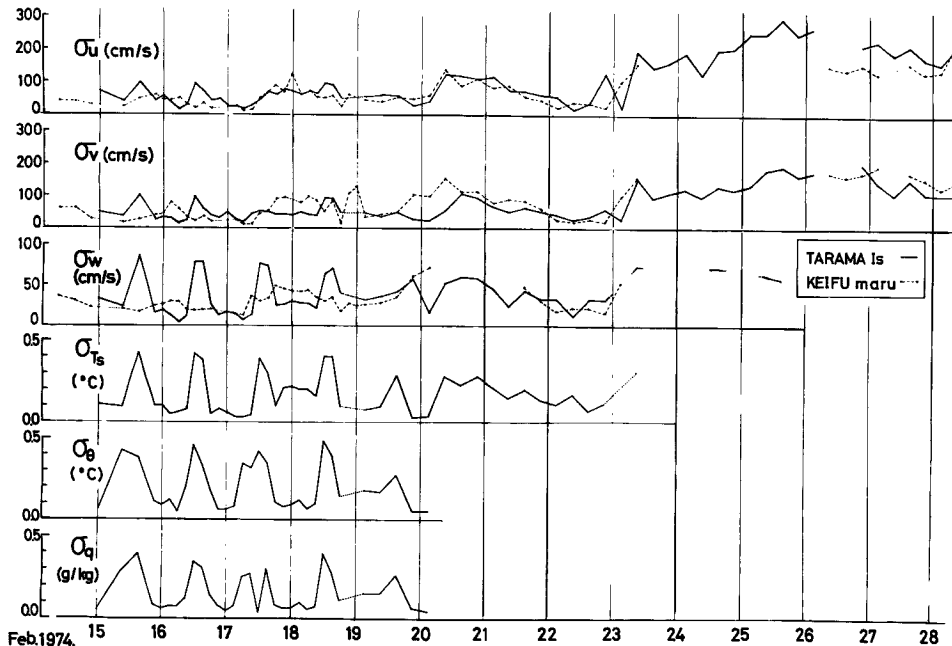


Fig. 4 Time variations of the standard deviations of the fluctuations of the longitudinal velocity, lateral velocity, vertical velocity, sound virtual temperature, dry-bulb temperature and specific humidity.

側から風を受ける場合と海側から風を受ける場合とでは陸地の部分を通過する距離が異なるため、かなり風の特徴が変わっていることが考えられる。Fig. 8, Fig. 9 は乱れの強さと抵抗係数を風向別にして風速に対してプロットしたものである。弱風の場合には両者共かなりばらついているが風速 5m/sec 以上の場合に限ってみると、乱れの強さについては陸からの風の場合 0.186, 海からの風の場合 0.096 という平均値を持ち、粗度の大きい陸地をより長く通った風の方が乱れの強さは大きくなっている。また、参考のため同じ AMTEX 期間中に気象庁の観測船啓風丸で得られた結果¹⁾を併せてプロットしたが、この平均値は 0.106 となり多良間島で海測から風を受けた場合は、この値にかなり近く、この風向の場合には海洋上での風の特徴を表しているといえる。

抵抗係数については 50m 高度の風速に対するものを図示したが、風速 5m/sec 以上の陸からの風の場合の平均値は 4.38×10^{-3} で、これを風速の対数分布を仮定して 10m 高度の風速に対するものに換算すると 8.76×10^{-3} となり、これは一般の海面上での値 1.2×10^{-3} ¹⁰⁾ などよりは大きい、陸上における値 10.5×10^{-3} ⁶⁾ などよりは小さい値であり、海と陸との中間的なふるまいを示している。海側から風の吹く時で風速 5m/sec 以上での平均値は 1.72×10^{-3} となり、10m 高度に換算して 3.44×10^{-3} となる。この場合でも抵抗係数は海面上における値よりもずっと大きく、浅い水面上での抵抗係数 1.7×10^{-3} ¹⁰⁾ の 2 倍程度になっている。このことは大気安定度がこの観測の際に不安定の場合が多かったことを考えに入れてもなお、この 50m の塔で測定した結果がそのまま広い海面上での現象を代表していると考えたことには問題があることを示している。

先に各統計量の期間中の時間変化を示した Fig. 3, Fig. 4 においてははっきりした日変化を示す日がある日が見受けられたが、これらの周期性を更に詳しく見るため、このような日変化のはっきりと認められる穏やかな日の続いた 2 月 15 日 3 時から 2 月 18 日 24 時までの 4 日間 (96 時間) のデータについて 32 点の調和解析を行ってみた。Fig. 10 は高さ 50m での風速、気温、比湿の各平均値についての結果を示すもので、平均風速 $\bar{U}$ は 96

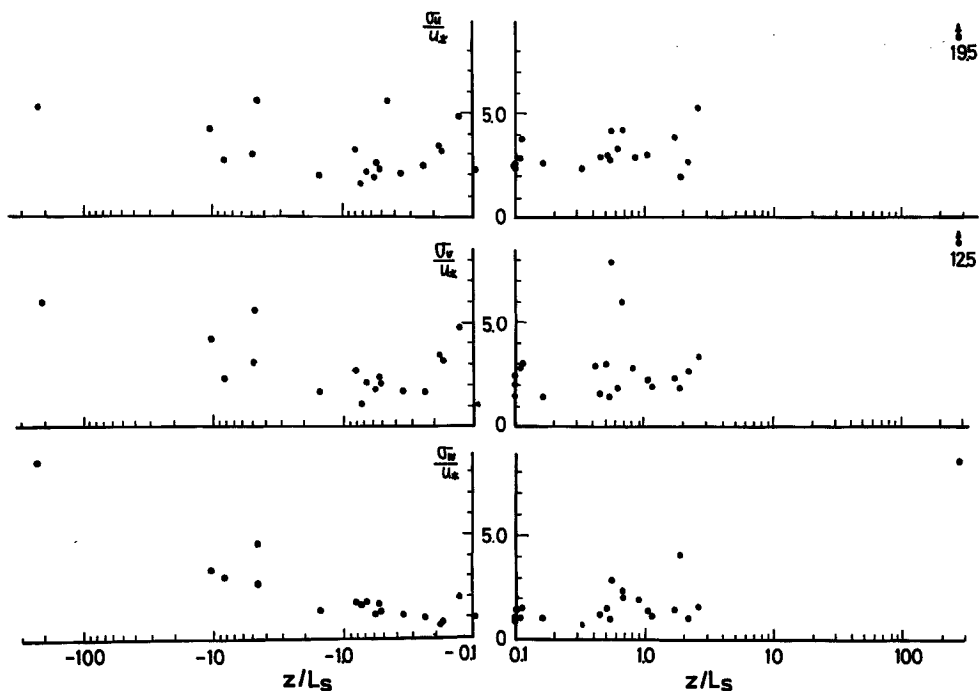


Fig. 5 The normalized standard deviations of the longitudinal velocity, the lateral velocity and the vertical velocity as functions of stability.

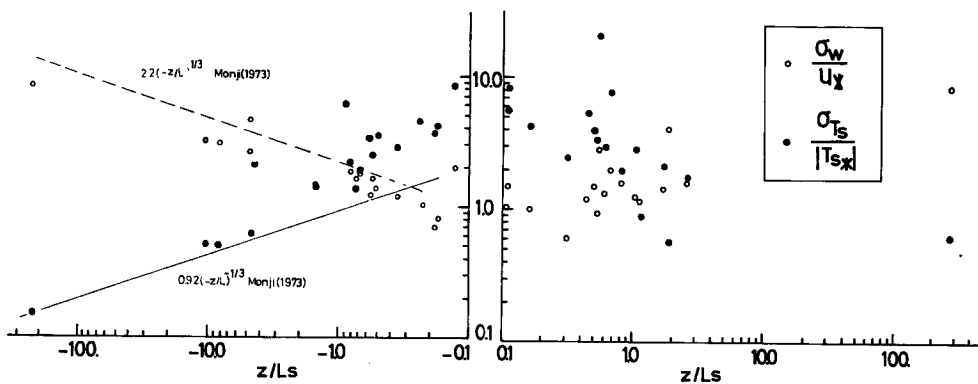


Fig. 6 The normalized standard deviations of the vertical velocity and the sound virtual temperature as functions of stability.

時間周期に最大振巾を示し日変化よりも更に大きなスケールの現象に支配されていると考えられる。もっとも24時間周期にもはっきりしたピークが見られる。また、日射の影響を直接受ける気温には24時間周期に非常に鋭いピークが見られ、風速の場合のような4日周期はあまり見られない。比湿は風速と気温の中間的なふるまいをしているが、やはり日変化に最大のピークを示す。

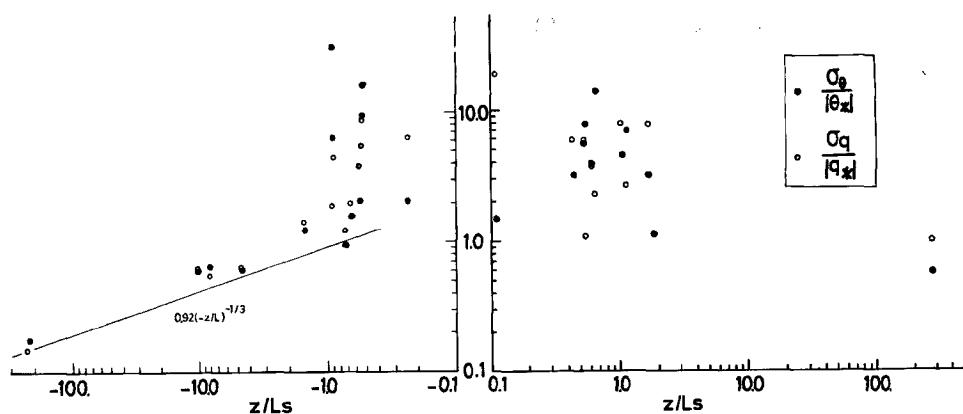


Fig. 7 Same as Fig. 6 but for the dry-bulb temperature and specific humidity.

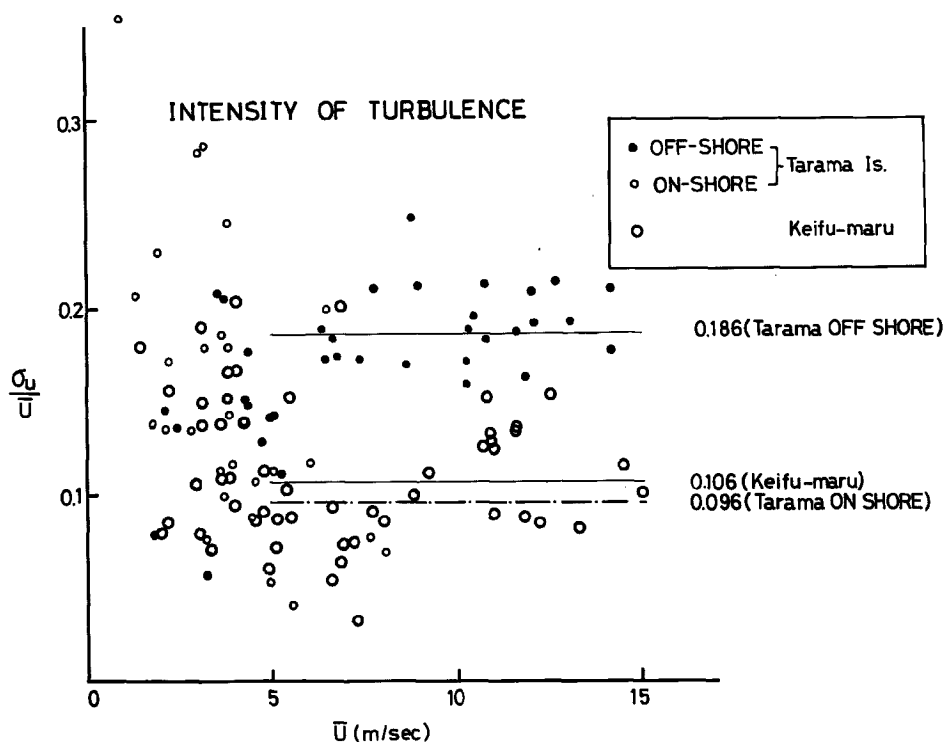


Fig. 8 The intensity of turbulence as a function of mean wind speed.

風速三成分の変動の標準偏差の時間変化について同様なことを調べたものが **Fig. 11** である。ここで興味あることは平均風向成分 σ_u については先の平均風速 $\bar{U}$ の変化とも関連して 4 日周期がかなり大きく 1 日周期とほぼ同程度の割合を示しているが、鉛直成分 σ_w については 4 日周期はあまり問題にならないくらい小さく、1 日周期に鋭いピークを持つ。**Fig. 12** は同様に乾球温度 θ 、音仮温度 T_s 、比湿 q の各変動の標準偏差の変

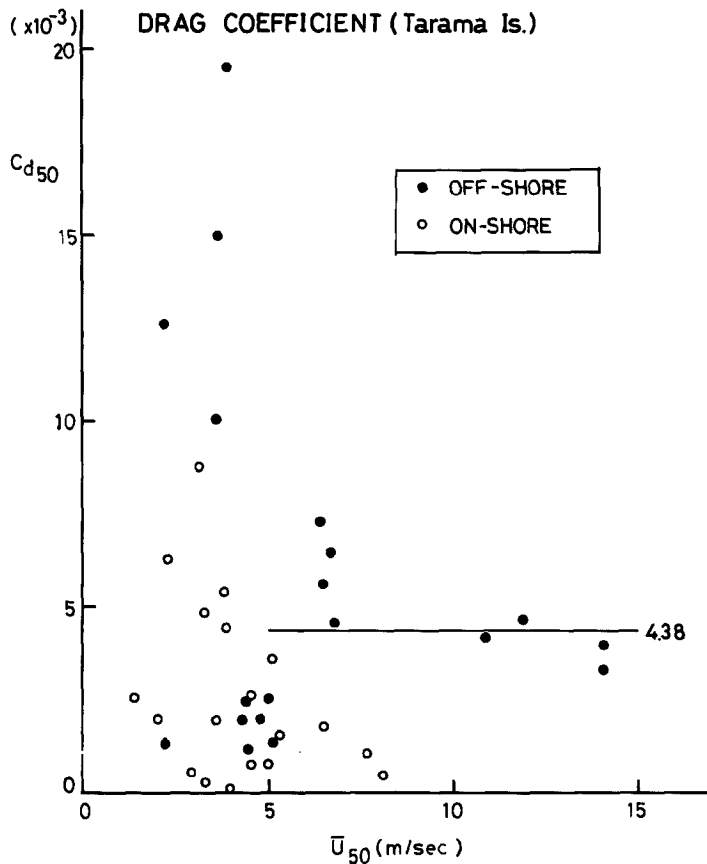


Fig. 9 The drag coefficients at the height of 50 m as a function of mean wind speed.

化を解析したもので3つともその平均値の場合と同様に顕著な1日周期の変動量の増大が見られる。

Fig. 13 には運動量輸送量 τ_u 、顕熱輸送量 H 、潜熱輸送量 Q についての調和解析の結果が示してある。 H と Q については先程の σ_H 、 σ_Q とも関係して1日周期に鋭いピークを持つが、 τ_u については24時間周期にはほとんどピークは見られず、4日周期が最も大きくなっており風速の変化と対応する点があり、興味深い。

風向変動まで考慮に入れた風のベクトルの調和解析に相当するものとして新しい技法を用いてみた。これはロータリー・スペクトルと言われているもので、海洋学においてこれまで用いられてきたが最近、気象学においても少しずつ取り入れられつつあるものである¹¹⁾。その解析の結果は Fig. 14 に示すとおりであるが、正の周波数が反時計回り、負の周波数が時計回りの回転の向きを示す。これを見ると反時計回りの回転はあまりなく、ほとんど時計回りの回転で2日～4日周期の振巾が非常に大きく、実際の風向が約3日間で時計回りに一回転している事実と対応する。このような変化は Fig. 3 でも明らかなように啓風丸においても見られるように、AMTEX 海域全体においてこのような現象が見られるのかどうか興味あるものである。また、わずかながら約1日周期の小さなピークも見られる。

2月15日から18日にかけての風向の変化を見ると2月16日には特に顕著な1日周期の風向変化が見受けられる。そこで、この日の風向と風速を島の北岸における岡山大学の観測点での記録と併せて示したものが Fig. 15

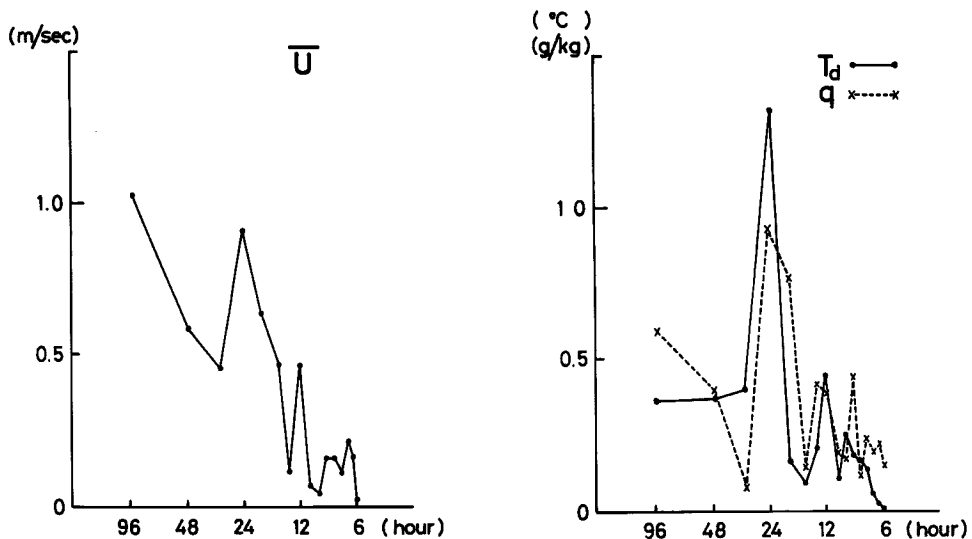


Fig. 10 The results of the harmonic analysis of mean wind speed, air temperature and specific humidity.

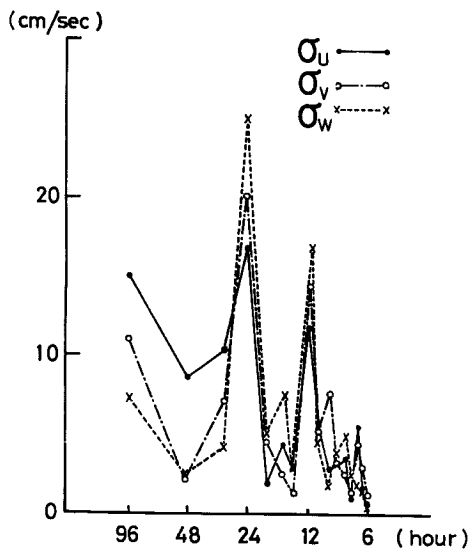


Fig. 11 The results of the harmonic analysis of the standard deviations of longitudinal velocity, lateral velocity and vertical velocity.

である。風速は両者共早朝に最小となり、午後に最大となる変化を示しているが、風向の両地点での変化を見ると、早朝は島の中心から発散していく向きで午後には逆に島の中心に向かって収束する風向となり、風向の回転の向きが島の北側と南側で逆向きになっている。この日の宮古島における高層風の観測によれば900 mb面での風向はほぼ南で風速は約5m/secの風が1日中吹いていた。従ってここに見られる日変化は島の存在によって生じた局地的な循環であることはほぼ間違いない。

このような局地的な風の起こる原因としては、海陸風に見られるような地表面の温度と海面の温度との差が考えられる。Fig. 16に地面上1.5mにおける気温（地表面温度の測定値がないので、この温度を一応地表面温度を表わす目安とする）、サンゴ礁の内側での岡山大学の観測点での表面水温、及び多良間島付近の外洋における船舶からの表面水温の報告の3つを併せて示した。これを見ると外洋での表面水温は大きな変化はないが、島の上の地表面上の気温ははっきりとした日変化を示しており、振巾は約10°Cにも達してい

る。サンゴ礁内の表面水温もかなり日変化しているのが見られ、地表面温度の影響を受けているためか地表面温度よりも位相が少し遅れた形をしている。ここで注意すべきなのは外洋の表面水温と地上1.5mでの気温の差を見ると、昼間においてもやや陸上の方が外洋の表面水温とほぼ同じか或はやや高い程度の温度を示すということである。一方、夜になると陸地上の方がかなり冷え込み、16日の早朝には約9°Cもの温度差がつい

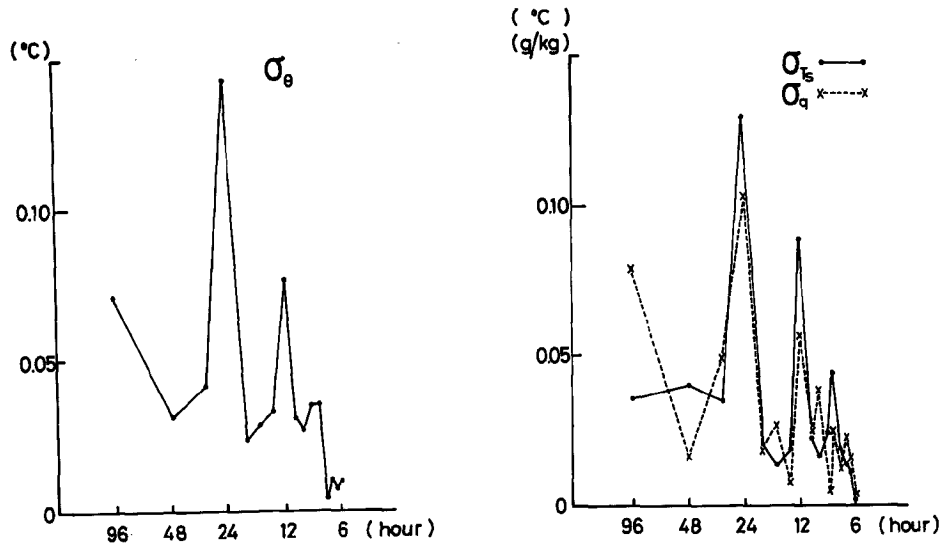


Fig. 12 The results of the harmonic analysis of the standard deviations of dry-bulb temperature, sound virtual temperature and specific humidity.

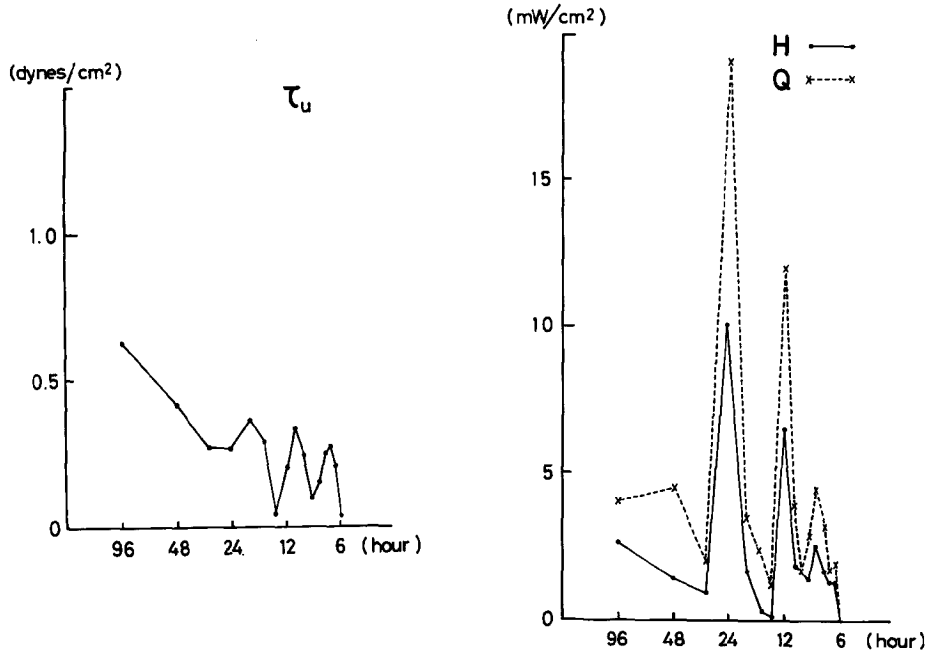


Fig. 13 The results of the harmonic analysis of momentum flux, sensible heat flux and latent heat flux.

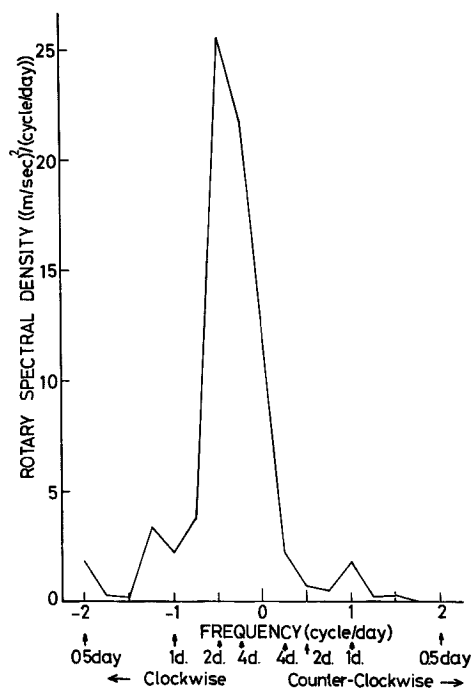


Fig. 14 The rotary spectrum of mean wind velocity vector.

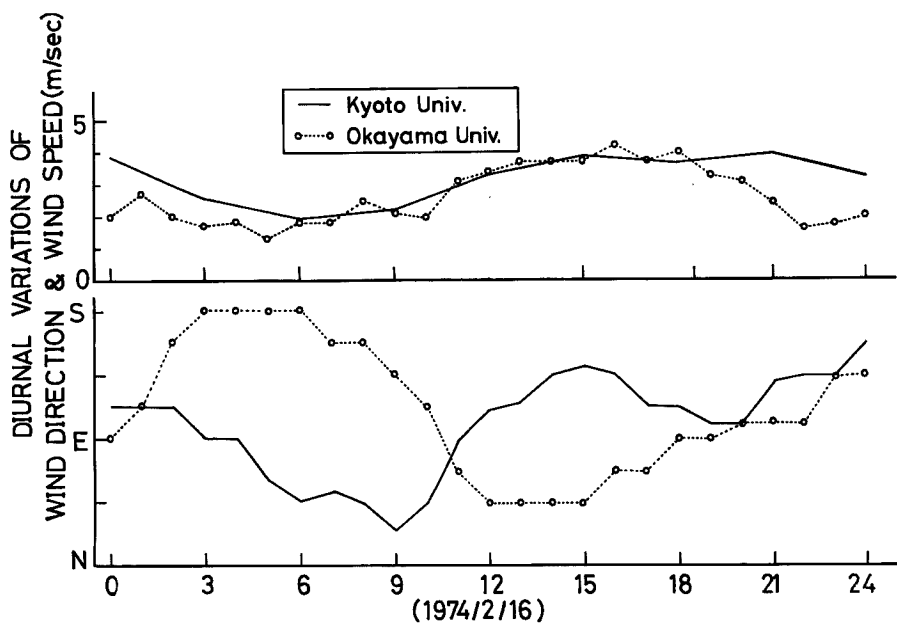


Fig. 15 The diurnal variations of mean wind speed and wind direction at both sites of Kyoto University at southwestern edge and Okayama University at the north-western edge of Tarama Island.

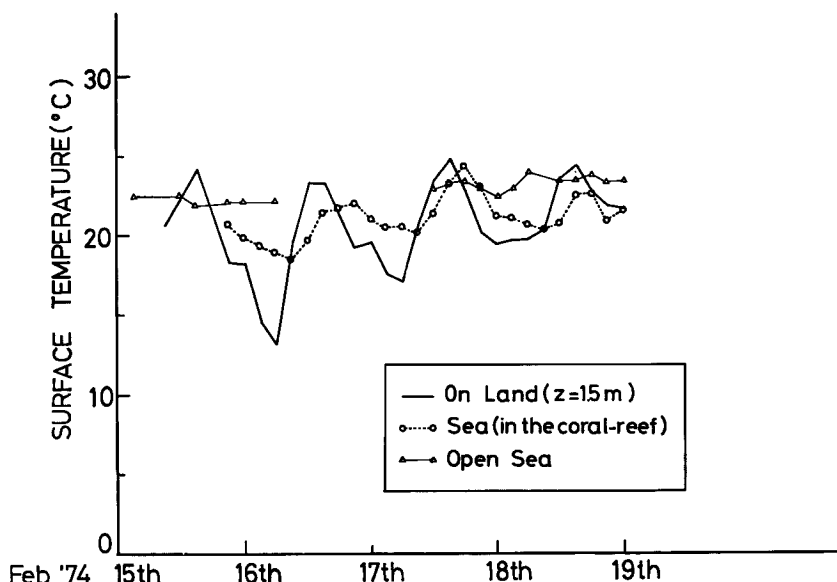


Fig. 16 Time variations of the air temperature at the height of 1.5 m (Kyoto University site), the sea surface temperature in the coral-reef (Okayama University site) and the sea surface temperature of the open sea.

ている。従って夜間における島の上の大気は外洋性のものとは明らかに異っており、安定な成層の境界層が生じていると考えられる。直径 4 km のこの多良間島が原因となって海陸風循環が発生するかどうかは明らかでないが、夜間には発散、昼間は収束していることは事実である。表面温度及び地表面摩擦の変化を考えてこの島の上での風の性質を知ること、この島の上での現象と外海上での現象を接続して考えていく上に極めて重要な問題であるので、この問題については今後更に詳しい解析を行う予定である。

4. 結 語

冬期東シナ海において大陸からの乾いた寒気が吹き出した場合の海面と大気との相互作用について調べる目的を持って小さな島（多良間島）で乱流輸送の観測を主として気象観測を行ったが、風向の変化と共に測定される乱れの強さや抵抗係数などの風の性質は明らかに変化し、島の陸地面の影響で風の特性にはっきりとした違いのあることがわかった。前半の穏やかな期間においては日変化も見られ、特に顕熱や潜熱の乱流輸送量は大きな振巾で変化していることがわかった。しかし、平均風速や運動量輸送量には更に長い 3 日～4 日周期の大きなスケールの変化が卓越しており、これらは海洋上で見られるものとはほぼ同じものである。島を中心とした局地的な風系が生じている例が一部見出せたが、これがどういう原因によって生じるものかという議論は大気境界層全体についての、飛行機や気球をも利用した総合的な気象観測の結果が必要となってくる。従って本年度の結果からはこの島での測定結果と海洋上の現象とを正確に関連づけることはできなかったのもので、第 2 年度（1975 年 2 月）の観測を待って更に議論を進めたい。

謝 辞

第 1 年次 AMTEX' 74 の観測が無事終了したことに対して色々御尽力いただいた AMTEX 事務局の方々はじめ、関係者各位に厚く謝意を表します。また実際の観測及び準備にあたり、面倒な仕事をさせていただいた京都大学防災研究所技官・羽野淳介氏、杉政和光氏に心から感謝します。なお、本研究は文部省国際共同研

究費によって行われた。

参 考 文 献

- 1) 光田寧, 藤谷徳之助, 林泰一: 航行中の船舶による海上での乱流測定法について(3), 京都大学防災研究所年報, 第18号, 1975(発表予定)
- 2) 光田寧, 加藤晶子: 風速の空間的・時間的変動の性質について, 京都大学防災研究所年報, 第16号, B, 1973, pp. 293-304.
- 3) Mitsuta, Y.: Sonic Anemometer-Thermometer for Atmospheric Turbulence Measurements, Flow, Its Measurements and Control in Science and Industry, Vol. 1, Instrument Society of America, Pittsburgh, 1974, pp. 341-347.
- 4) Tsukamoto, O., Fujitani, T., and Y. Mitsuta: Dynamic Response of the Hygrometer Using Fine Thermocouple Psychrometer. (2), 1975, (to be published).
- 5) Monji, N. and O. Tsukamoto: Boundary Layer Measurement on 50 m Tower in Tarama. Boundary Layer and Radiation Observations, AMTEX'74 Data Report Vol. 4, Management Committee for AMTEX, pp. 88-92.
- 6) Mitsuta, Y., Hanafusa, T., Tsukamoto, O. and H. Kawanishi: A Study of Energy Budget at the Air-Ground Interface, Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute Kyoto University, Vol. 22, 1973, pp. 249-257.
- 7) Obukhov, A. M.: Turbulence in an Atmosphere with a Non-Uniform Temperature, Boundary Layer Met. Vol. 2, 1971, pp. 7-29.
- 8) Monji, N.: Budgets of Turbulent Energy and Temperature Variance in the Transition Zone from Forced to Free Convection. J. Met. Soc. Japan. Vol. 51, pp. 133-145.
- 9) Mitsuta, Y. and T. Fujitani: Direct Measurement of Turbulent Fluxes on a Cruising Ship, Boundary-Layer Met. Vol. 6, 1974, pp. 203-217.
- 10) Mitsuta, Y., Monji, N. and O. Tsukamoto: Drag Coefficients in the Low Wind Speed Region: Proceeding of the 2nd U. S. National Conference on Wind Engineering Research, 1975, pp. 1-5~1-3.
- 11) O'Brien, J. J. and R. D. Pillsbury: Rotary Wind Spectra in a Sea Breeze Regime, J. Appl. Met. Vol. 13, 1974, pp. 820-825.