

多良間島における地空相互作用について (Ⅱ)

光田 寧・文字 信貴・塚本 修

A STUDY OF AIR-SURFACE INTERACTION AT TARAMA ISLAND (II)

By Yasushi MITSUTA, Nobutaka MONJI and Osamu TSUKAMOTO

Synopsis

A boundary layer measurement of AMTEX '75 was held on the 50 m tower of Tarama Island. It was the second phase of the AMTEX (Air Mass Transformation Experiment). The first phase of AMTEX was held on February 1974 and some results are already shown in the previous paper. As was mentioned in the previous paper, the diurnal changes of turbulent fluxes are also found in this phase in spite of rather strong wind. The preliminary results of AMTEX '75 and the air mass modification due to this island body are studied in this paper.

1. は し が き

昨年度に引き続き、冬期東シナ海海域において気団変質観測実験 (AMTEX) がくり上げられ、著者らは多良間島の 50m の塔を用いて AMTEX '75 の境界層観測を担当した。前回の報告¹⁾ で述べたように AMTEX '74 の観測結果を見ると、前半の穏やかな期間中には顕熱や潜熱の乱流輸送量等に顕著な日変化が見出せ、多良間島を中心とした局地的風系が存在していることもわかった。また島の陸地面を長距離にわたって吹送してくる風向の場合には、抵抗係数や乱れの強さなどの乱流特性を表わす量が大きな値を示す傾向も現われている。この報告では AMTEX '75 の予備的な解析結果と併わせて、大気の流れに対する島の影響について特にとり上げ、AMTEX '74 の結果も整理し直して解析を試みたのでその結果について述べる。

2. AMTEX '75 の観測概要

多良間島の南西部にある台風観測所²⁾ の施設を用いて接地境界層の乱流観測を行い、台風観測所から約 4 km 離れた島の北岸では岡山大学とオーストラリアのグループが棧橋上の高さ 10 m の塔上で同時観測を行った。著者らの行った観測のブロックダイアグラムを Fig. 1 に示すが、渦相関法による乱流輸送量の直接測定には前回同様、三次元超音波風速温度計 (海上電機, PAT-311-1 型) と銅-コンスタンタン熱電対乾湿計からの風速三成分と温度、湿度の変動値を用いた。熱電対乾湿計については前回は直径 50 μ の素線を用いたが、強度的に弱いことが判明したため、今回はこれを直径 120 μ のものと交換し更に乾湿計のブリアン部分を測定用感部と分離し、超音波風速計の測定部に与える風の乱れを小さくするように改造した。なお、素線を太くしたことによる湿度計としての応答時間はあまり変わらないことが見出されている³⁾。風速の鉛直分布測定には強風用として 5 高度 (50, 35, 25, 15, 7 m) に気象庁型三杯風速計、弱風用としては 3 高度 (50, 25, 15m) にギル型風速計のプロペラの代りにアルミ製の小型三杯を取り付けた風速計を設置した。また気温、湿度の鉛直分布測定のためにはダイオード通風乾湿計を小型三杯風速計と同じ 3 高度に設置した。また 8 台のプロペラ式風向風速計 (高度 15m) により、水平距離 720m にわたる風の空間分布も同時に測定した。これらの各信号は各チャンネル共、1/4 秒毎に数値化して磁気テープに収録され観測終了後、研究室にもち帰ってデータ処理を行った。

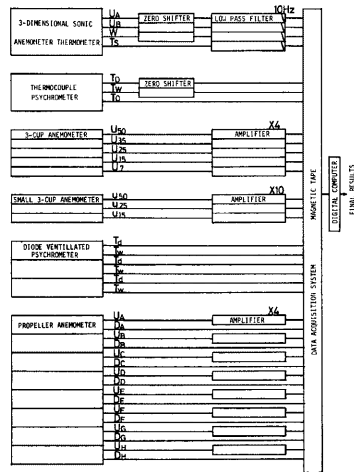


Fig. 1. The block diagram of the observation.

観測期間は1975年2月14日午前9時より3月1日午前3時までの15日間にわたり、通常は3時、9時、15時、21時の各正午前30分間を観測時間と定め、また20日9時より22日9時までは強化観測期間として0時、6時、12時、18時の観測を加え、3時間毎の観測を行った。24日21時より25日15時までの1日間は測器のトラブルのため観測を中止した。

3. AMTEX '75 の解析結果

データ処理は現在も進行中であるが、ここでは現在までに処理を終わっているものを示す。Fig. 2, 3 は AMTEX '75 の観測期間中の基本的な気象要素の統計量の変化の様子を示す。Fig. 2 は上から順に 50m 高度での平均風向、平均風速、地上 1.5m での平均気温、平均比湿及び直接測定で得られた運動量輸送量 (τ)、顕熱輸送量 (H_s, H)、潜熱輸送量 (Q) の変化を示す。運動量輸送量については平均風向方向のもの (実線) と風向横方向のもの (破線) の両方を示し、顕熱輸送量については音仮温度を用いたもの (H_s) と乾球温度を用いたもの (H) の両方を示してある。各 Run の解析時間は約30分とした。

この図からも明らかなように風向はほとんどが北で大陸からの季節風の吹き出しが目出っており、その間に風速の弱い穏やかな期間が含まれている。しかし全体的に見ると気温は AMTEX '75 の期間中の初めと終りで高く、中盤で低くなる傾向を見せている。また比湿についてもほぼ同様の傾向が見受けられる。一方、乱流輸送量についてみると前回同様運動量輸送量以外は非常に顕著な日変化をしていることがわかる。AMTEX '74 の場合は風が弱く晴天の場合の観測値のみしか得られなかったが、今回のように風のやや強い場合においてもこのような 1 日周期の乱流輸送量の変化が起きていることが見出された。

Fig. 3 には風速三成分の変動の標準偏差、($\sigma_u, \sigma_v, \sigma_w$) と温度 (音仮温度 (T_s) と乾球温度 (θ))、比湿 (q) の各変動の標準偏差の期間中の変化の様子を示している。これを見ると風速変動にはさほど顕著な日変化は見られないが温度、比湿の変動にはかなり大きな振幅の日変化が見られる。前回の場合には風速の鉛直成分の変動 σ_w について前半の穏やかな期間にはかなりの日変化が見受けられたが、今回はさほど顕著な例は見出せなかった。今回の場合、前回に比べて風速がやや大きかったために熱対流の風速鉛直成分への影響が少なかったためではないかと考えられる。

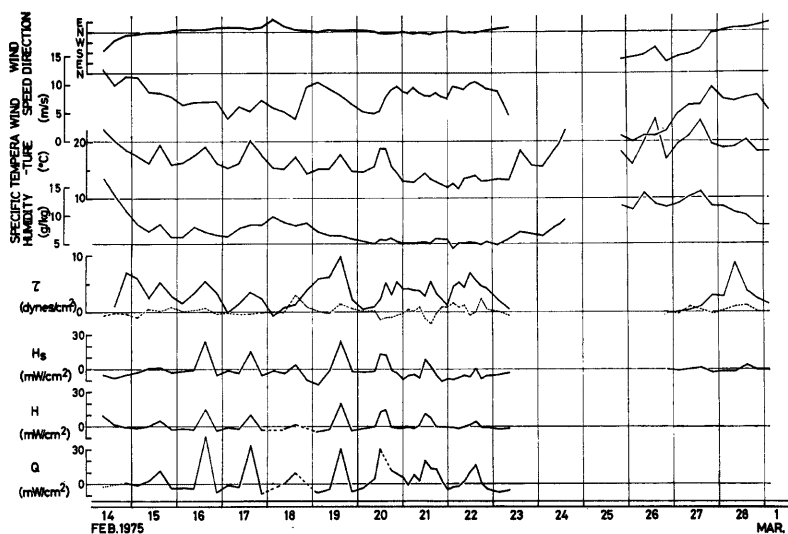


Fig. 2. Time variations of the mean values of wind direction, wind speed, temperature, humidity and the turbulent fluxes of momentum, sensible heat (measured by sonic anemometer-thermometer and by thermocouple thermometer) and latent heat, at Tarama 50 m tower during AMTEX '75.

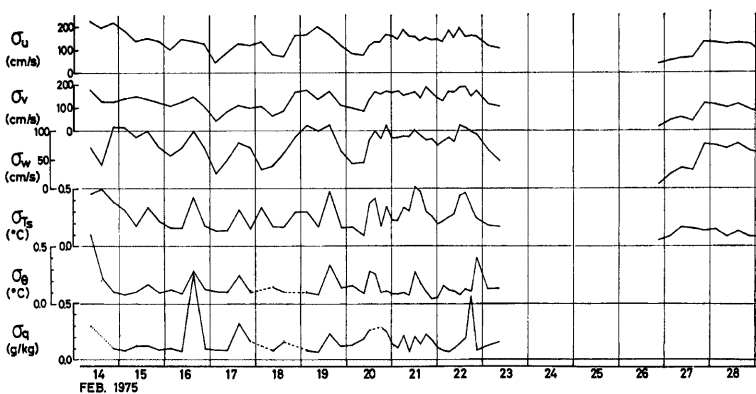


Fig. 3. Time variations of the standard deviations of the fluctuations of the longitudinal velocity, lateral velocity, vertical velocity, sound virtual temperature, dry-bulb temperature and specific humidity.

これらの各変動量を Monin-Obukhov の相似則に従って無次元化したものと安定度 z/L の関係を示したものが次の Figs. 4, 5, 6 である。Fig. 4 は風速三成分についてのもので σ_u/u_* , σ_v/u_* の値はかなりば

らつきが大きいが、 σ_w/u_* については特に中立付近ではばらつきは非常に小さい。中立付近では σ_u/u_* , σ_v/u_* , σ_w/u_* は一定の値をとると考えられるが、 $|z/L| < 1.0$ の範囲に対する各々の平均値は $\sigma_u/u_* = 2.93$, $\sigma_v/u_* = 2.69$, $\sigma_w/u_* = 1.58$ となる。

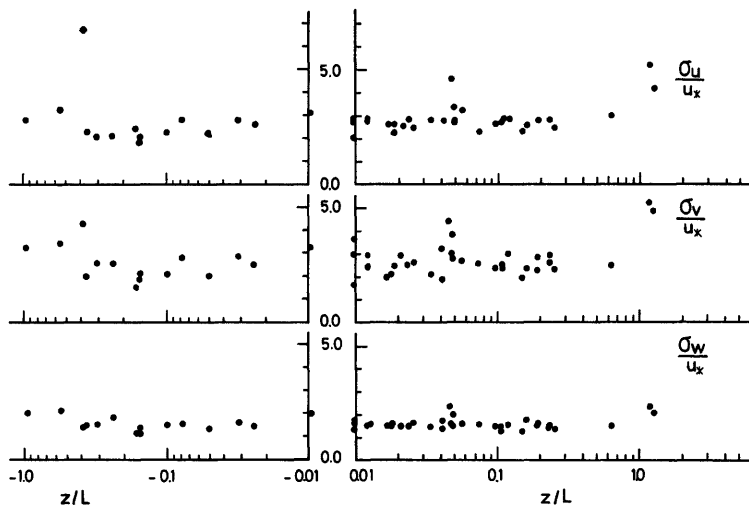


Fig. 4. The normalized standard deviations of the longitudinal velocity, the lateral velocity and the vertical velocity as functions of stability.

また風速鉛直成分と温度の変動については強い不安定の場合、自由対流が発達するとして

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

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

の関係式が成立し、Monji⁽⁴⁾ は実験的に $C_w = 2.2$, $C_\theta = 0.92$ という値を求めている。前年度のデータではこの関係式をかなり満足する結果が得られたが、今回のものは強い不安定領域のデータがないため実験的検証は

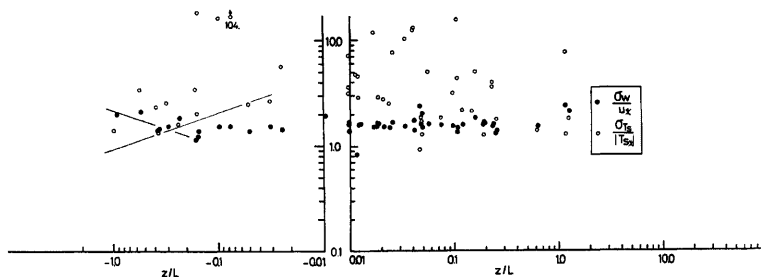


Fig. 5. The normalized standard deviations of the vertical velocity and the sound virtual temperature as functions of stability.

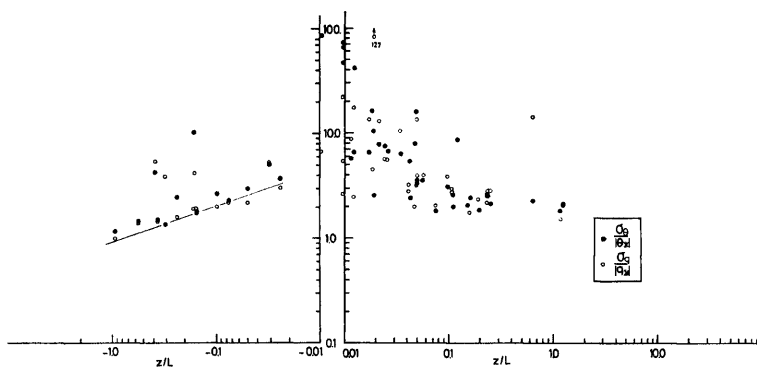


Fig. 6. Same as Fig. 5 but for the dry bulb temperature and specific humidity.

得られなかった。Figs. 5, 6 に示したものは風速鉛直成分，温度（音仮温度と乾球温度），比湿について無次元化した変動の標準偏差の値と安定度の関係を（1），（2）の関係式と共に示してある。

4. 大気の流れに対する島の影響

前回報告したように AMTEX '74 の期間中の 50 m の塔で測定した乱流統計量には，明らかに島という陸

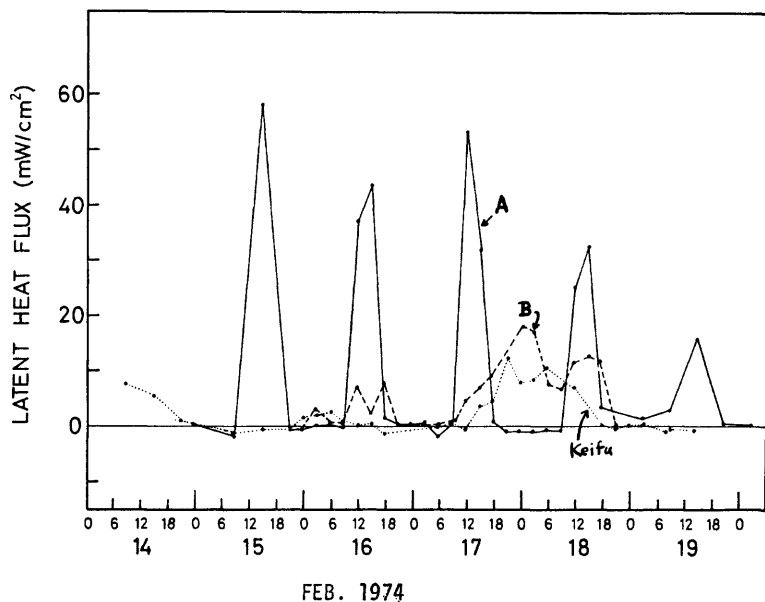


Fig. 7. The comparison of the time changes of latent heat fluxes obtained at Kyoto University site Okayama University site at Tarama island and Keifu-maru.

地の存在による影響がいくつか見られる。一例として Fig. 7 に穏やかな期間中の潜熱輸送量の変化を他の観測点（この島の北側の岡山大学の観測点と多良間島の北約 400 km の啓風丸）での直接測定値と共に示した。啓風丸の測定値は外洋のものを代表すると考えられ 3～4 日周期の大きなスケールで変化しており、岡山大学のものもかなりそれに近い変化をしている。しかし、A で示した著者の測定値はほとんど相関がなく、日変化のみが卓越している。

Fig. 8 に多良間島の地図を示すが、著者の観測点は A で示す位置にあり、岡山大学の観測点は B である。A 点では風向によって海岸からの吹走距離が 0.5～5 km の間で変化し、吹走距離の短い場合は乱流特性は外洋上のものに近く、長い場合は陸上のものに近くなると考えられる。AMTEX の観測に関する乱流輸送量の吹走距離による影響については Dyer⁵⁾ の研究があるが、この研究は中立付近の安定度を対象としており、ここであげられた例のような著しい不安状態にはこの研究結果からは十分に説明できない。陸地の影響は太陽放射に伴う島からの熱的要因に加えて、島という粗度の大きなものの存在による力学的乱れも加担してくると考えられる。Fig. 9 は抵抗係数 $C_D = (u_* / \bar{U})^2$ と吹走距離の関係を示した。ばらつきが大きいのは C_D の値が安定度や風速にも依存するためと考えられるが、平均的には吹走距離の小さい方が値は小さく、海上での値（啓風丸, $C_D = 1.3 \times 10^{-3}$ ）⁶⁾ に近づき、吹走距離の増加と共に大きくなる。Fig. 10 は乱れの強さ $(\sigma_w / \bar{U})$ を同様に示したがやはり吹走距離の増加と共に平均的には値が大きくなる傾向が見られる。なお、ここでは安定度によるばらつきを取り除くために中立成層に近いと考えられる風速 5m/s 以上のデータのみを示した。以上は力学的な乱れの特性であるが、熱的なものを表わすものとして Fig. 11 に Bowen 比 (H/Q) と吹走距離の関係を示した。この値は海上では小さく陸上では大きくなると考えられるが、吹走距離のみの関数とは考えられないためばらつきが大きい、それに加えてここに示したデータでは各々の輸送量が小さい場合も含まれているので精度が悪く、特に顕著な傾向は見出せなかった。

前回の報告で島を中心とした局地的風系が生じており（光田他¹⁾ の Fig. 15 参照）、その原因の 1 つとして島の表面温度との差が考えられた。実際の観測では島の上の地表面温度の測定は行っていないので、前回は地上 1.5m の気温を海面温度と比較したが、地表面温度と地上 1.5m の気温とはかなりの差があると考えられる。ここでは地表面温度の推定法として次の様な方法を用いた。一般に顕熱輸送量 (H) をバルク法で求める場合には、抵抗係数からの類推で顕熱についての輸送係数 C_H を用いて次の様に置ける。

$$H = C_H \cdot \rho \cdot C_H \cdot \bar{U} (\theta - \theta_s) \quad \dots \dots \dots (3)$$

今回の観測では H は渦相関法によって求まっており、また 50m 高度での $\bar{U}$, θ の値も得られているので C_H の値がわかれば θ_s を推定できる。そこで渦相関法で得た運動量輸送量の値から C_D の値を各 Run 毎に求め、 $C_H = C_D$ と仮定して (3) 式のバルク法を逆に用いて地表面温度 θ_s を推定した。この値を Fig. 12 に外洋での海面温度、サンゴ礁内の海面温度と共に示した。これによると晴天の穏やかな日には地表面温度の日変化の幅はかなり大きく 20°C 以上になる場合もあり、地表面温度は 40°C 以上になる場合もあると考えられる。これを海面温度と比較すると、温度差は昼間では約 20°C にも達すると考えられる。このようにして地表面温度を推定すると昼間は海面と陸地面の温度差はかなり大きくなり、この温度差は海島風を発達させるに充分大きいと考えられる。しかし、この方法は陸上において (3) 式のような形でバルク法が適用できるかという問題もあり、ここでの議論をそのまま結論とすることは困難である。

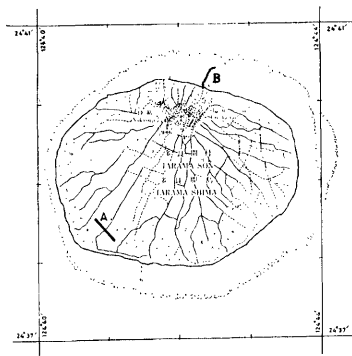


Fig. 8. The map of Tarama island. The point A denotes the Kyoto University site and the point B denotes the Okayama University site.

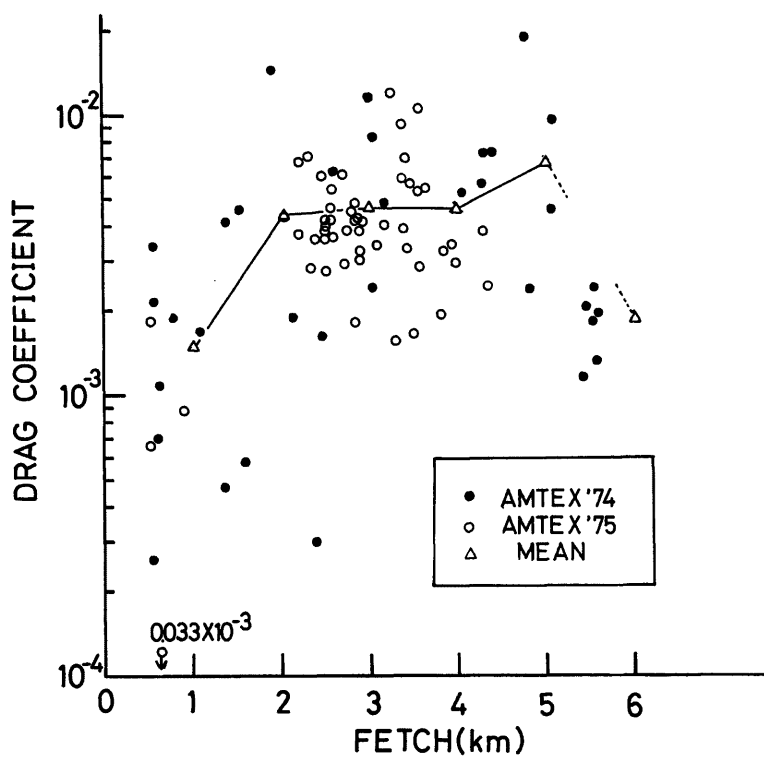


Fig. 9. The drag coefficient as a function of fetch.

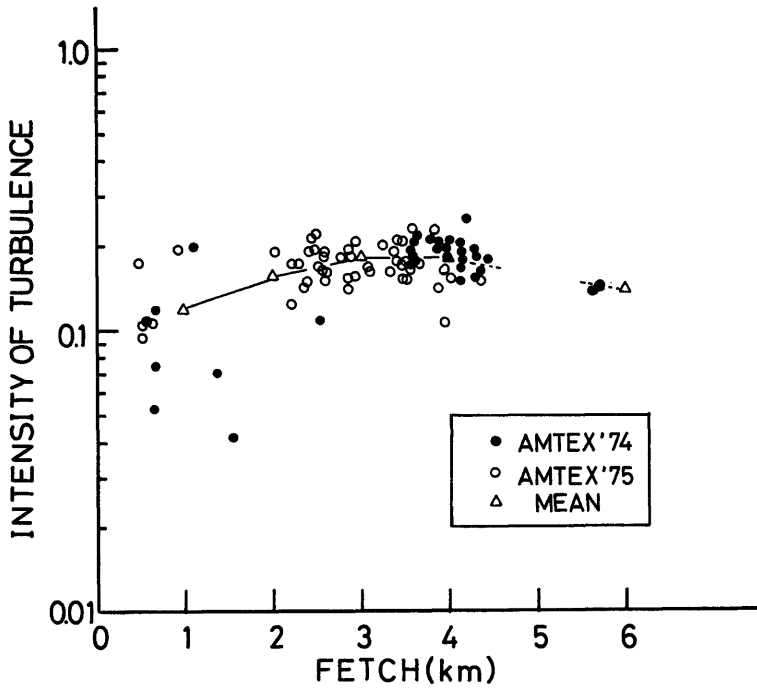


Fig. 10. The intensity of turbulence as a function of fetch.

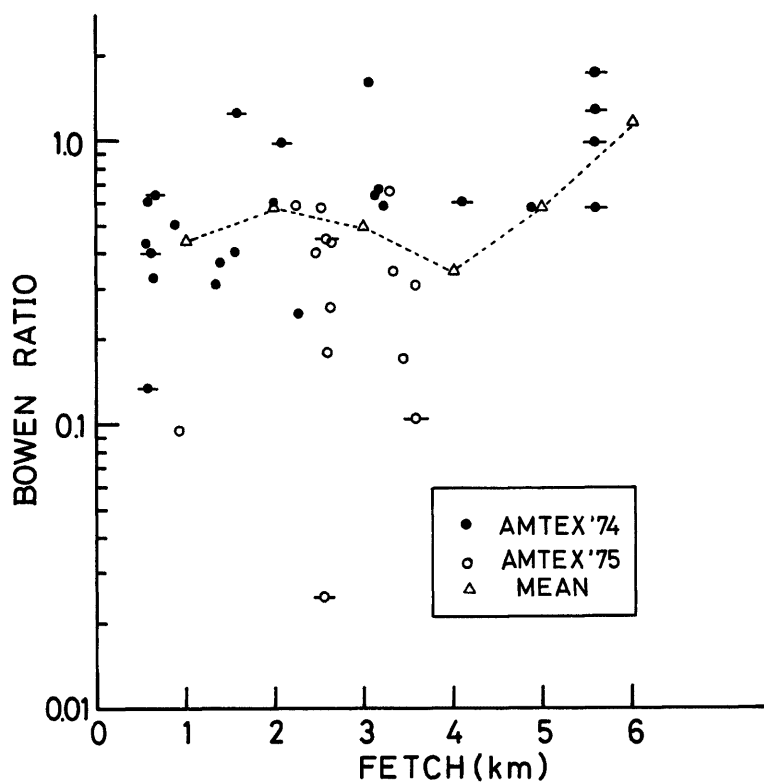


Fig. 11. The Bowen ratio as a function of fetch. The horizontal bar denotes the data of small fluxes (less than 1 mW/cm²).

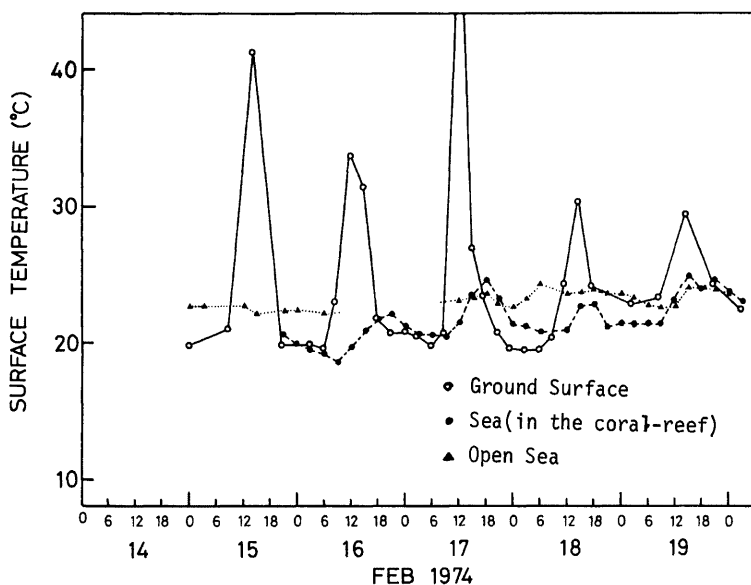


Fig. 12. Time variations of the ground surface temperature obtained with transfer coefficients, the sea surface temperature in the coral reef and the sea surface temperature of the open sea.

5. 結 語

多良間島における接地境界層の乱流観測を昨年度に引き続き AMTEX '75 の一部として行った。前年度と同様に乱流輸送量には昨年よりもやや風が強かったにもかかわらず顕著な日変化が見られた。今回は特に島の影響による乱流特性を表わす変化を重点的に研究し、海岸から観測点までの陸上の吹走距離によって乱れの様子が変わることがある程度見出された。この変化を説明する定量的な裏付けが必要であるが、この島の場合には海岸線に対して必ずしも直角に風が吹くとは限らず、単純な二次元的な内部境界層理論を適用するには限界があると考えられる。なお、今回は米国の大気科学研究センターの観測機によってこの島のまわりの飛行機観測が行われているので、その結果が出れば多良間島を中心とした内部境界層の様子がより明らかになるものと考えられる。

謝 辞

AMTEX の観測が無事終了したことに対し AMTEX 事務局の方々を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御世話になった京都大学防災研究所技官・羽野淳介氏、杉政和光氏及び、京都大学大学院生・尾堂克明氏に厚く感謝します。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・文字信貴・塚本 修：多良間島における地空相互作用について，京都大学防災研究所年報，

第18号 B, 1975, pp. 189-201.

- 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) Tsukamoto, O., Fujitani, T., and Y. Mitsuta: Dynamic Response of the Hygrometer Using Fine Thermocouple Psychrometer (2), 1976, (to be published).
- 4) Monji, N.: Budgets of Turbulent Energy and Temperature Variance in the Transition Zone from Forced to Free Convection. J. Met. Soc. Japan, Vol. 52, pp. 135-145,
- 5) Dyer, A. J.: Consideration of Fetch in the AMTEX Experiment, Scientific Report of the Third AMTEX Study Conference, AMTEX Report No. 6, 1974, pp. 67-77.
- 6) Tsukamoto, O., T. Hayashi, N. Monji and Y. Mitsuta: Transfer Coefficients and Turbulence Flux Relation ship as Directly Observed over the Ocean during the AMTEX '74. Proceeding of the Fourth AMTEX Study Conference, 1975, pp. 109-112.