

航行中の船舶による海上での乱流測定法について (3)

光田 寧・藤谷徳之助・林 泰一

MEASUREMENT OF TURBULENT FLUXES FROM A MOVING SHIP (3)

By Yasushi MITSUTA, Tokunosuke FUJITANI and Taiichi HAYASHI

Synopsis

A new method for the direct measurement of turbulent fluxes over the ocean from a moving ship developed by the authors was applied to the studies of air mass modifications over the Kuroshio current during the AMTEX field observation period of February, 1974. The vertical component of wind velocity was corrected also for vertical motion of a ship body, which had been neglected in the previous study. During the observing period, pronounced clockwise rotations of wind direction in a few days period was observed. All the meteorological parameters including the turbulent fluxes changed with the same period. The averaged transfer coefficients of momentum, sensible heat and latent heat corrected for the height of 10m are 1.32×10^{-3} , 1.40×10^{-3} and 1.40×10^{-3} respectively.

1. は し が き

第1報¹⁾, 第2報²⁾において, 著者らは, 航行中の船舶上における乱流輸送量を直接測定する方法を開発し, 実際の海上での試験に応用することに成功した³⁾。本来, この開発は, 地球大気開発計画(GARP)に関連した, Air-Sea Interaction の観測に応用することが主な目的であった。今回, 1974年2月に本邦南西海域上で行なわれた(GARP)の副計画の1つである気団変質実験(Air Mass Transformation Experiment, AMTEX)の一部として, 気象庁所属の観測船啓風丸船上において, これを実施した。今までの試験観測では, 海上が比較的穏やかな場合であったため, 風速の測定値に対して, 船の運動を補正する際に, 船体の重心は上下に動かないとして補正を行ってきた。しかし, 今回の観測が実施された冬季の東シナ海のように, 波高が大きい場合には, この方法をそのまま適用してよいかどうかについて, 再検討してみる必要があった。観測の資料は, 現在, 解析を続行中であるが, 今までに得られた結果について, 本文に報告する。

2. 船舶上における乱流輸送量の観測法

海面から大気への運動量, エネルギーなどの補給量を測定するには, 種々の方法が考えられるが, 海面上という制限された場所のため, どの方法によっても精度を上げることが困難であり, 多少, 測定が複雑となっても, 渦相関法による以外に方法がない。これは, 被輸送量と風速の鉛直成分の変動の共分散から, 鉛直乱流輸送量を求めるもので, 運動量, 顕熱, 潜熱の輸送量は, 次のように書ける。

$$\text{運動量輸送量} \quad \tau = -\rho \overline{u'w'} \dots\dots\dots(1)$$

$$\text{顕熱輸送量} \quad H = C_p \rho \overline{w'T'} \dots\dots\dots(2)$$

$$\text{潜熱輸送量} \quad Q = L \rho \overline{w'b'} \dots\dots\dots(3)$$

ここで, 記号 $\bar{\quad}$ は, 測定時間を通しての平均を, 記号 $'$ は, その平均値からの変動量を示す。 ρ は大気密度で, 実際には, これも変動する量であるが, ここでは, 測定の総合精度が, それほど高くないので, 一定値としても問題にならず, 全観測期間の平均的な値に対応する 1.21kgm^{-3} を用いた。 u は風速の主風向成分 (ms^{-1}),

w は風速の鉛直成分 (ms^{-1}), C_p は大気 の定圧比熱で, $1.00 \times 10^3 \text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ である。 T は気温 (K), q は比湿 (kg kg^{-1}), L は水の蒸発潜熱で, $2.44 \times 10^6 \text{Jkg}^{-1}$ である。また, この解析には, 熱の輸送量の単位として, 国際単位系 (SI) に基き, Wm^{-2} を採用することにした。そして, これを従来からの単位に換算すると, $1 \text{Wm}^{-2} = 1.43 \text{mcal/cm}^2 \cdot \text{min}$ であり, 潜熱 1Wm^{-2} は, 蒸発水量では, 0.035mm/day にあたる。運動量の単位は, Nm^{-2} を採用した。この値は 10dynes/cm^2 に相当する。

この観測は, 船体の風に対する影響が最も小さいと期待され, できるだけ測定高度を高くして, 波による気象要素の変動の影響も最小となるように前部マストの頂部で気象要素の測定を行なうのであるが, 海上での船は, 常に動いており, マストの頂部に固定した風速計で測定した風速には, 船体の動揺に伴う測器の動きによるみかけの速度が含まれている。従って, このマストの頂部で測定した風速の値に対して, みかけの風速を取除き, 真の風速を求めることが, この観測の基本原理である。実際には, 第1報¹⁾で報告したように, 風速とは別に, 船体の動きを実測しておき, その値を用いて, 後で補正を行なうというものである。このための補正式は複雑となるが, 著者ら³⁾は, 実際の船体の動揺データを用いて, 補正式の各項を評価し, 微小な項を無視することによって, 次のように, 単純化することができることを示した。

$$U = u_{obs} \cos \theta \cos \phi + v_{obs} \cos \phi \sin \phi + w_{obs} \sin \theta \cos \phi \cos \phi - w_{obs} \sin \theta \sin \phi + \theta R \cos \alpha \cos \phi \cos \phi - \dot{\theta} R \cos \alpha \cos \phi \sin \phi + \dot{X}_0 \dots \dots \dots (4)$$

$$V = -u_{obs} \cos \theta \sin \phi + v_{obs} \cos \phi \cos \phi - w_{obs} \sin \theta \cos \phi + w_{obs} \sin \theta \cos \phi \sin \phi - \dot{\phi} R \cos \alpha \cos \phi \cos \phi - \dot{\theta} R \cos \alpha \cos \theta \cos \phi \cos \phi + \dot{Y}_0 \dots \dots \dots (5)$$

$$W = -u_{obs} \sin \theta + v_{obs} \cos \theta \sin \phi + w_{obs} \cos \theta \cos \phi - \dot{\theta} R \sin \alpha \cos \theta - \dot{\theta} R \cos \alpha \sin \theta \cos \phi - \dot{\phi} R \cos \alpha \cos \theta \sin \phi + \dot{Z}_0 \dots \dots \dots (6)$$

ここで, $u_{obs}, v_{obs}, w_{obs}$ は, 船体に相対的な風速成分, θ, ϕ, ψ は, 船体のピッチング角, ローリング角, ヨーイング角を示し, $\dot{X}_0, \dot{Y}_0, \dot{Z}_0$ は, 船体の移動速度成分である。また, R は船体の重心と風速計までの距離, α は船体の重心と風速計を結ぶ線分と船体の垂直線とのなす角である。今までは, 船の重心の動きは, 船の航行によるものであり, 波などによる加速度運動は, 無規できるほど小さいとしてきた。しかし, 補正後の風速の鉛直成分には, 多少, 波の周期に対応する変動が残っており, 補正の不完全さが考えられたのと, 今回の観測では, 波が高いことが考えられたので, 船体の波による動きを調べることにし, 船体の垂直軸に平行に加速度計を取付け, 船体の上下方向の加速度の測定を行なった。加速度の測定値を, 船体に固定した座標系から, 地球に固定した座標系に座標変換して鉛直方向の加速度を求め, それを時間積分すれば, 船体の上下運動の速度を求めることができる。今, 単純化のために, 船体は, 上下方向のみに加速度運動するとし, 地球に固定した座標系の加速度の鉛直成分 A_z は, 船体の垂直軸に固定した加速度計で測定される加速度 a_{obs} を用いて次のように書くことができる。

$$A_z = \frac{a_{obs}}{\cos \theta \cos \phi} + g + (\dot{\theta}^2 + \dot{\phi}^2)(r_y \sin \phi + r_z \cos \theta) \cos \theta \dots \dots \dots (7)$$

ここで, (r_x, r_y, r_z) は, 重心と加速度計の距離, g は重力加速度である。 A_z を時間積分すれば, 船体の上下運動の速度を求めることができる。

3. 観 測

観測は, AMTEX 観測網の一点である北緯 28° , 東経 125° の定点において, 気象庁の観測船啓風丸船上で行なった (Fig. 1 参照)。観測期間中, 船は 1 日 1 回, 位置を修正する以外は, 漂流状態にあった。観測期間は, 1974 年 2 月 14 日 9 時から 28 日 9 時までの 2 週間で, 測定は, 通常 1 日 4 回, 3, 9, 15, 21 時の各正時前 30 分間を標準としたが, 2 月 16 日から 18 日までは, 強化観測期間とし, さらに, 6, 12, 18, 24 時を加え, 1 日 8 回にふやした。

気象要素の測定には, 前回までの観測に用いた測器を改良して使用した。風速測定には, 3 次元超音波風速

温度計（海上電機，Model PAT 311-1）を，気温及び湿度の測定には，熱電対乾湿計^④を用い風速計の感部に取付た。この測器は，気温，湿度とも，風速10m/s，気温20°Cの条件下で0.5Hzぐらいまでは充分追従する。

船体の運動は，船体の重心の平行移動と，そのまわりの回転運動の6成分について知る必要がある。しかし，ここでは，船は水平方向には，航行による等速運動だけで移動するとし，波による動きは，この方向には，無視できて，上下方向にのみ有意なものであるとした。また回転運動のうち，ピッチング角とローリング角は，観測室の床に設置した船舶用傾斜計で短周期のものを測定したが，方位角については，波による変動は小さいものとし，船の進行方向を示す長周期のものだけが有意であると考えた。今回は，船はほとんどの場合，漂流しているので，水平方向の速度は無視し，方位角は風などによるゆっくりとした船の回転のみであると考えていることになる。この信号は，船に取付けてあるジャイロコンパスから得た。なお，傾斜計の最大出力は $\pm 10^\circ$ であり，スケールアウトする

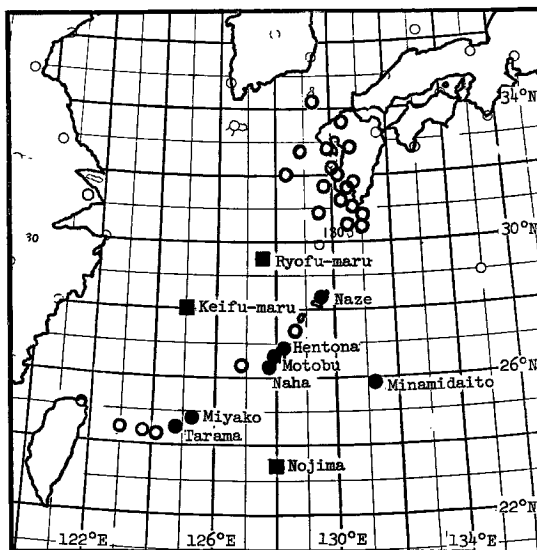


Fig. 1 The map of AMTEX observational area.

船に取付けてあるジャイロコンパスから得た。なお，傾斜計の最大出力は $\pm 10^\circ$ であり，スケールアウトする

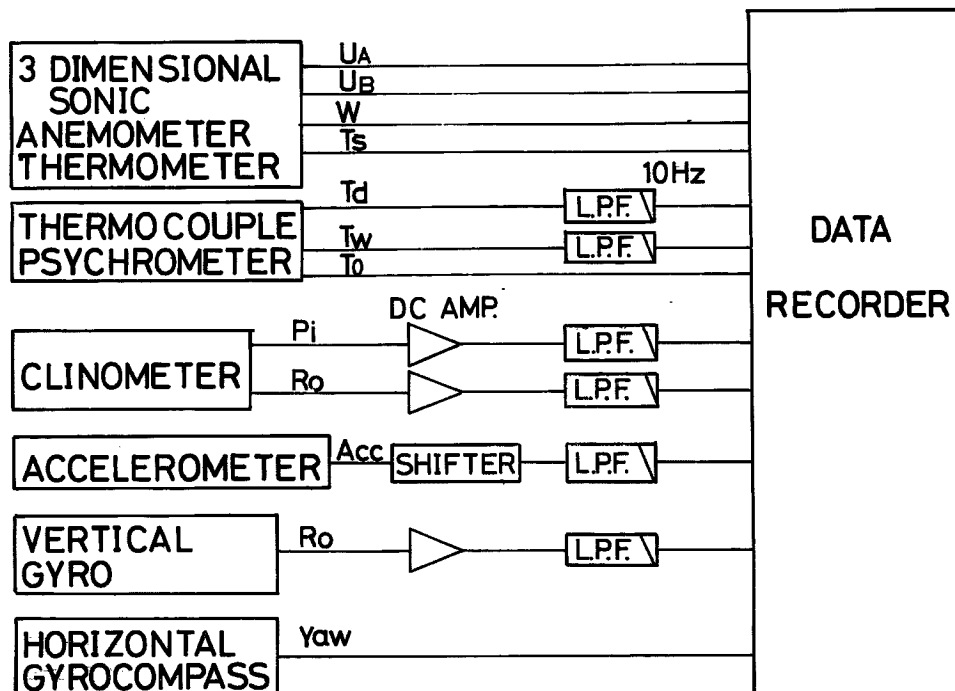


Fig. 2 The block diagram of observational system.

場合には、船に設置されている制御用の垂直ジャイロの信号を利用した。船の重心の上下方向の加速度は、傾斜計の感部に取付けた加速度計により測定した。以上のようにして得られた風速3成分, 気温, 湿度, 船の動揺の信号は, 14チャンネルのデータレコーダー (TEAC, R-271) により, アナログ的に磁気テープに記録した。そのブロックダイアグラムを Fig. 2 に示す。

4. 船体の運動

この観測において得られた記録を後に述べるような方法でデジタル化し, 最初に船体の運動について, 予備的な調査を行なった。Fig. 3 a), b) には, 平均風速と, 船体の平均的な傾きの関係を示す。Fig. 3 a) は, ピッチング角の平均値と, 船首-船尾方向の平均風速成分との関係であるが, この方向は, 船の長軸方向であるので, 風による傾きは顕著でない。Fig. 3 b) は, ローリング角の平均値と船体横方向の平均風速成分との関係を示す。これによると, 風速の増大とともに, 船体の傾きは直線的に大きくなる。船体に作用する荷重は, 風速の2乗に比例して大きくなるはずであるから, このような直線的な関係を示すことは, 船体の横方向の傾きに対する復元力が, 傾きに対して直線的でないことを示しているものと思われる。船体は, 今回の場合, 80 m 程度の長さを有し, 波長の短い風波に対しては, あまり追従した動きを示さないが, 波長の長いうねりによって傾き, 上下にも動くことが考えられる。Fig. 4 には, うねりの波高とローリング角の標準偏差との関係を示す。この図から, うねりの波高が大きくなれば, ローリングの振幅もほぼ直線的に増大する。また, この図には, 傾斜計による値だけでなく, 垂直ジャイロによる値も示しているが, 両者の間には差があるのが認められる。同時に記録した両者の記録 (Fig. 5) を比較すると, 今回利用した垂直ジャイロの出力信号は, 何らかのフィルタがかかっているようで, 短周期の船体の動揺に対する追従が必ずしもよくないようである。また, ピッチング角とローリング角の変動のスペクトルを計算した結果は, Fig. 6 のとおりで, 周期約7秒のところに顕著なピークが生じている。

船体の上下運動がうねりによる海面の上下に対し, どの程度, 追従しているかを調べた結果を Fig. 7 に示す。この図は, 観測されたうねりの平均波高 (気象庁資料) と加速度計の出力を座標変換し, 積分して求めた船体の上下運動の速度の標準偏差との関係を示す。両者の間には, よい直線関係が認められ, 波高が大きくなると, 重心の動きもほぼそれに比例して大きくなることがわかる。一方, 船体の重心の上下運動のスペクトルを Fig. 8 に示す。この図からわかるように, 船の傾きの場合と同じ約0.15Hz に, はっきりしたピークをも

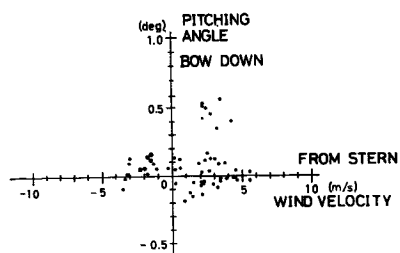


Fig. 3 a) Mean values of pitching angle as a function of along wind velocity to the ship body.

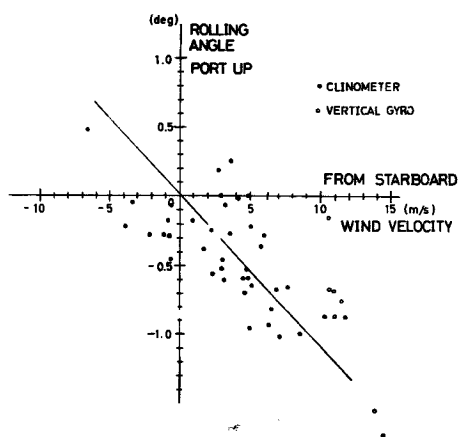


Fig. 3 b) Mean values of rolling angle as a function of cross wind velocity to the ship body.

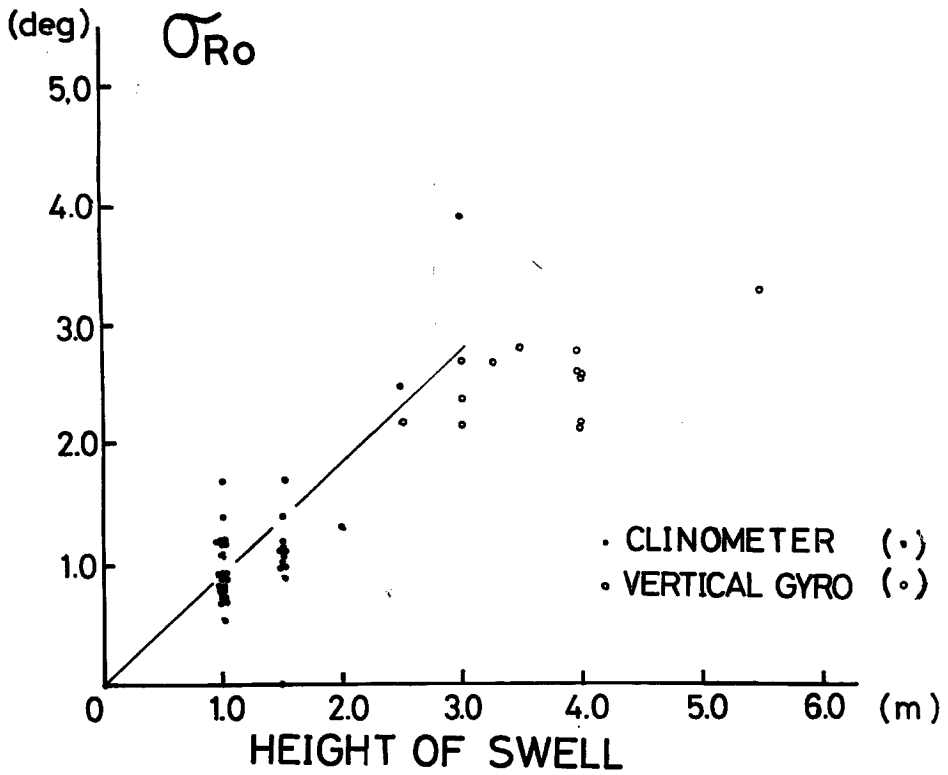


Fig. 4 R. M. S. values of rolling angle as a function of height of swell.

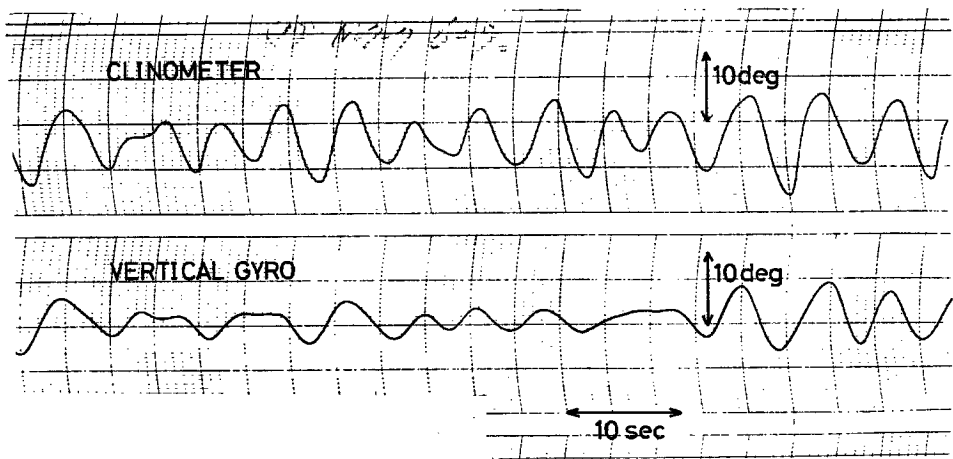


Fig. 5 An example of the traces of rolling angles measured by a clinometer and a vertical-gyro.

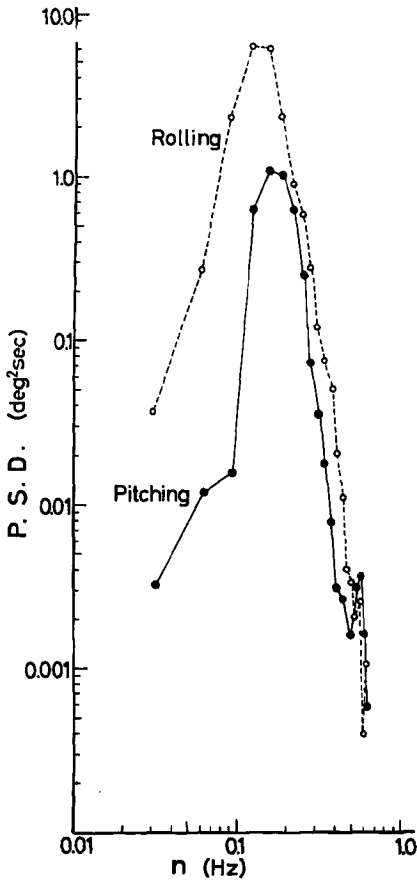


Fig. 6 Power spectra of pitching and rolling angles of the ship.

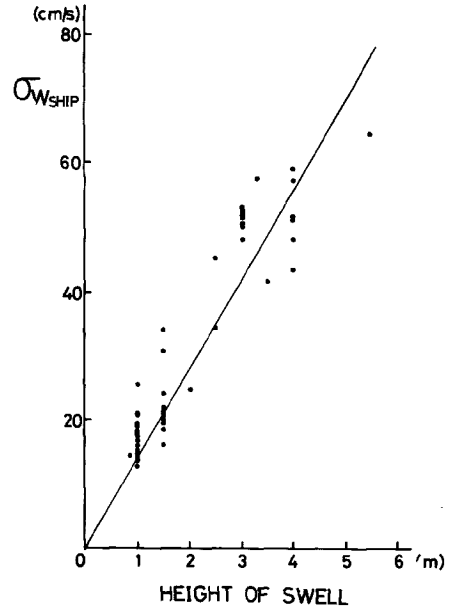


Fig. 7 R. M. S. values of vertical velocity of the ship as a function of height of swell.

っている。うねりの周期は、この7秒で、船体の上下運動は、この周期のみの単振動であると仮定すると、**Fig. 7**に示した標準偏差をもつような船体の上下運動の両振幅は、観測されたうねりの高さの約半分に対応する。この結果によれば、海が比較的穏やかで、うねりの波高が1~2mであっても、船体の重心は、最大0.3 m/sの速度で上下し、その両振幅は、0.5~1mに達する。このように、船体の重心の上下運動の速度は、風速の鉛直成分に対して無視できない程度の大きさをもつことになる。

前回までの観測では、乱流要素の測定は、海面上約20mのマストの頂部で行ない、その測定点が、重心に対して回転しても、上下方向の動きは、無視できるとして、測定値を回転について、補正したものは、平均20mの高度での値を代表すると考えてきた^{1)~3)}。しかし、今回の観測で、船体の上下運動による速度は、風速の鉛直成分と同程度の標準偏差を持つことになり、無視するには、大きすぎるものであることがわかった。このため、この上下運動についての補正も実施しなければ、実際の風速鉛直成分の変動の値は、信頼度が低いことになる。そこで今回は、予備観測で行なってきた回転に対する補正に加えて、この上下運動の補正も行なった。このように、風速の鉛直成分に船体の上下運動の速度を補正するとしても、測定点の上下方向の変位について考慮するまでには至っていない。すなわち、測定点は、うねりの周期で上下に動いており、その測定点を含む面を横切るような乱流輸送量を測定しているのであって、固定した測定点における一定の高度の面を横切る輸

送量とは多少差がある。しかし、測定点が海面より高ければ、輸送に貢献する乱れのスケールも大きくなり、また、うねりによる気流の変化も、マストの頂部の高さにもなれば、小さくなるため、上下の変位は無視しても、それほど大きな誤差を含まないと考えてもよいのではないかと思われる。このことについては、さらに解析を進めて、うねりに対応する周期の大気の運動がどの程度、輸送に貢献するかを評価した上で、はじめて議論を進めることができる。これが、この船上での乱流輸送量測定法の精度を決定するものである。

5. 解析およびその結果

5.1 解 析

観測された記録から乱流輸送量を計算するにあたり、船体に固定された風速計で測定された風速を、静止座標系から見た風速に変換する際、以上のような考察から、(4)(5)(6)式において、 $(\dot{X}_0, \dot{Y}_0, \dot{Z}_0)$ が船の航行速度と船体の上下運動の重なったものであるとして計算を進めることにし、船体の上下運動の加速度は(7)式により求めることにした。

記録したデータは、観測期間全体で60例、約40時間であるが、実際に解析したのは、そのうち52例、約30時間である。他の例は、測器の動作不良などのため、解析不可能であった。

アナログ形式のデータを、A-D 変換器 (TEAC, DP-300) により、デジタル化して、紙テープに打出し、ミニコンピューター (NOVA Model 01) により3段階の処理をして、解析した。最初の A-D 変換のサンプリング時間は0.2秒とし、これを、4個毎に平均して、各測器の動特性の差異をなくした。また、船の傾斜角は、0.4秒だけ前後する記録から、角の時間変化率を求めた。船体の上下方向の加速度は、信号の直流的誤差を消去するため、40秒間の移動平均値からの偏差をとった。また、船体の方位角は、ジャイロコンパスの出力を40秒間移動平均したものをを用いた。このように処理して、作製した各測定値のテープを用いて、先に述べた補正方法で真風速を求め、同時に乾湿球温度から、Tabata の提案した近似式⁵⁾を利用して、比湿を計算し、(1)~(3)式から乱流輸送量を求めると同時に、他の統計量を計算した。この結果は AMTEX '74 Data Report⁶⁾に報告されている。

5.2 気象要素の時間変化

風向、風速、気温、比湿の平均値及びバケツ採水による海面温度 (バケツ採水が不可能な場合には、船のエンジンの冷却水の取入口の水温で代用) の AMTEX 期間中の時間変化を Fig. 9 に示す。風速は、最初の数日は、5m/s 以下で、南風が卓越しているが、以後は、風速も10m/s を超えることが多くなり、15m/s に達する場合もある。そして、風速が大きい期間は、風向は北である。図から明らかなように、気象要素の変化には、日変化は、ほとんどなく、むしろ、2~3日の周期変動が認められる。観測期間中に測定された気温の最高は、19日の19.7°Cで、最低は20日の11.3°Cであり、1日のうちに、8.4°Cも気温が急降下した。しかし、海面温度は、期間中、ほぼ一定で、17°C前後で、気温よりも高い場合が多く、その温度差は最大5.8°Cに達した。もっとも、気温の方が海面温度より高くなる期間もわずかながらあるがその差は大きくない。比湿は、19日後

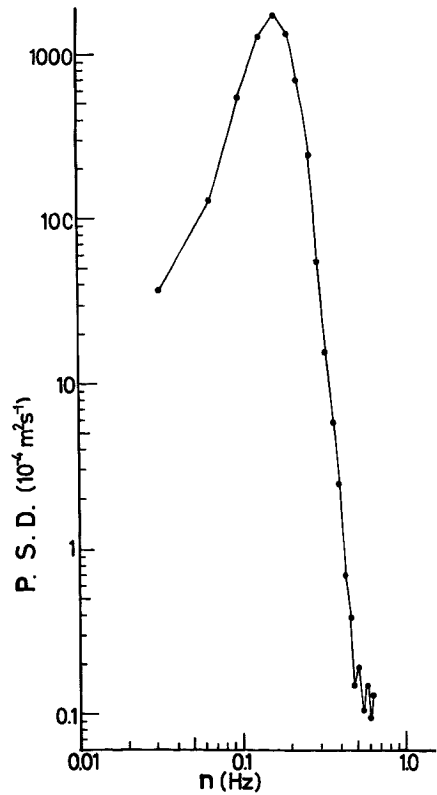


Fig. 8 Power spectrum of vertical velocity of the ship.

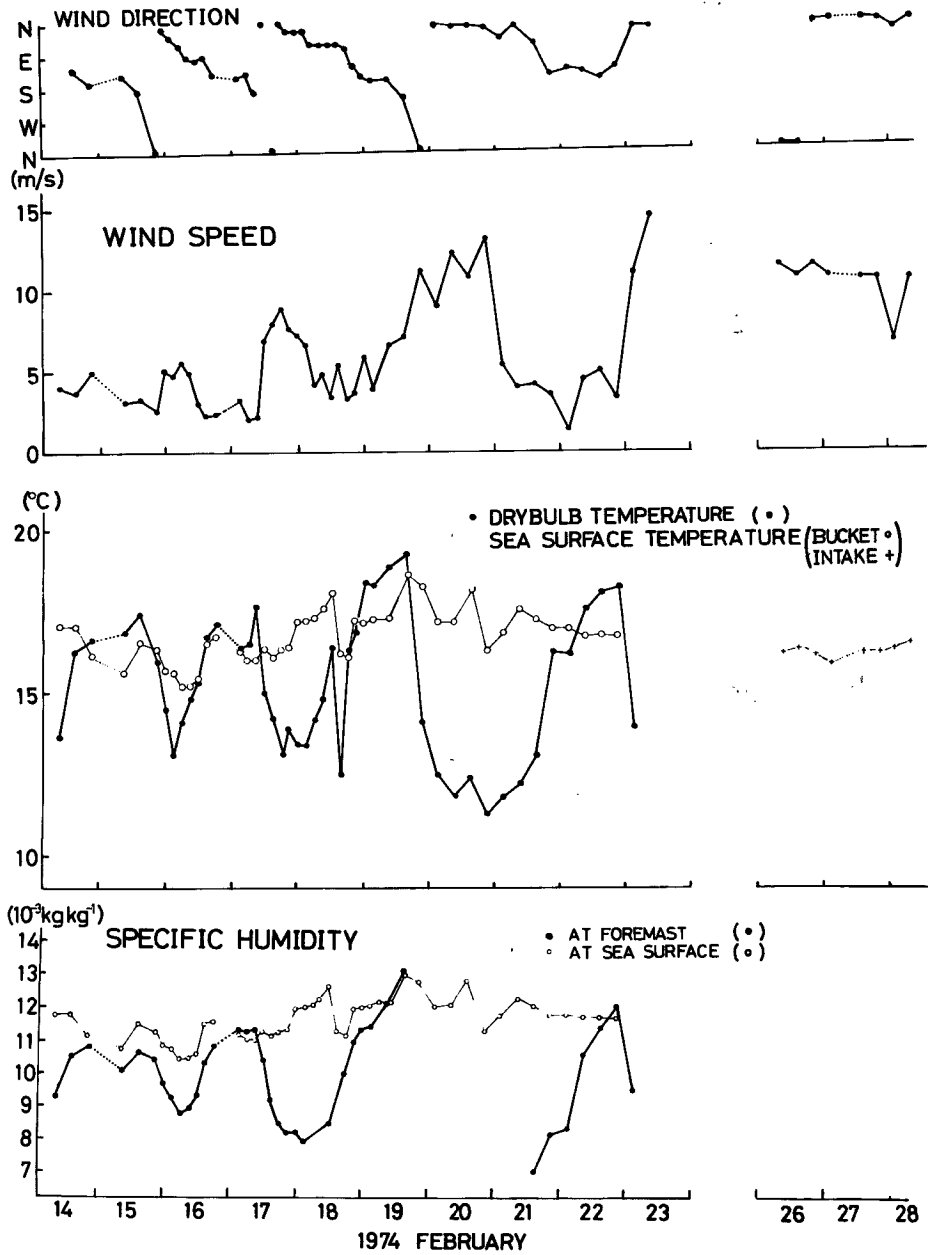


Fig. 9 The time variations of averaged values of wind direction, wind speed, temperature and specific humidity on the top of the mast, and temperature and specific humidity at sea surface on R. V. Keifu-Maru during AMTEX.

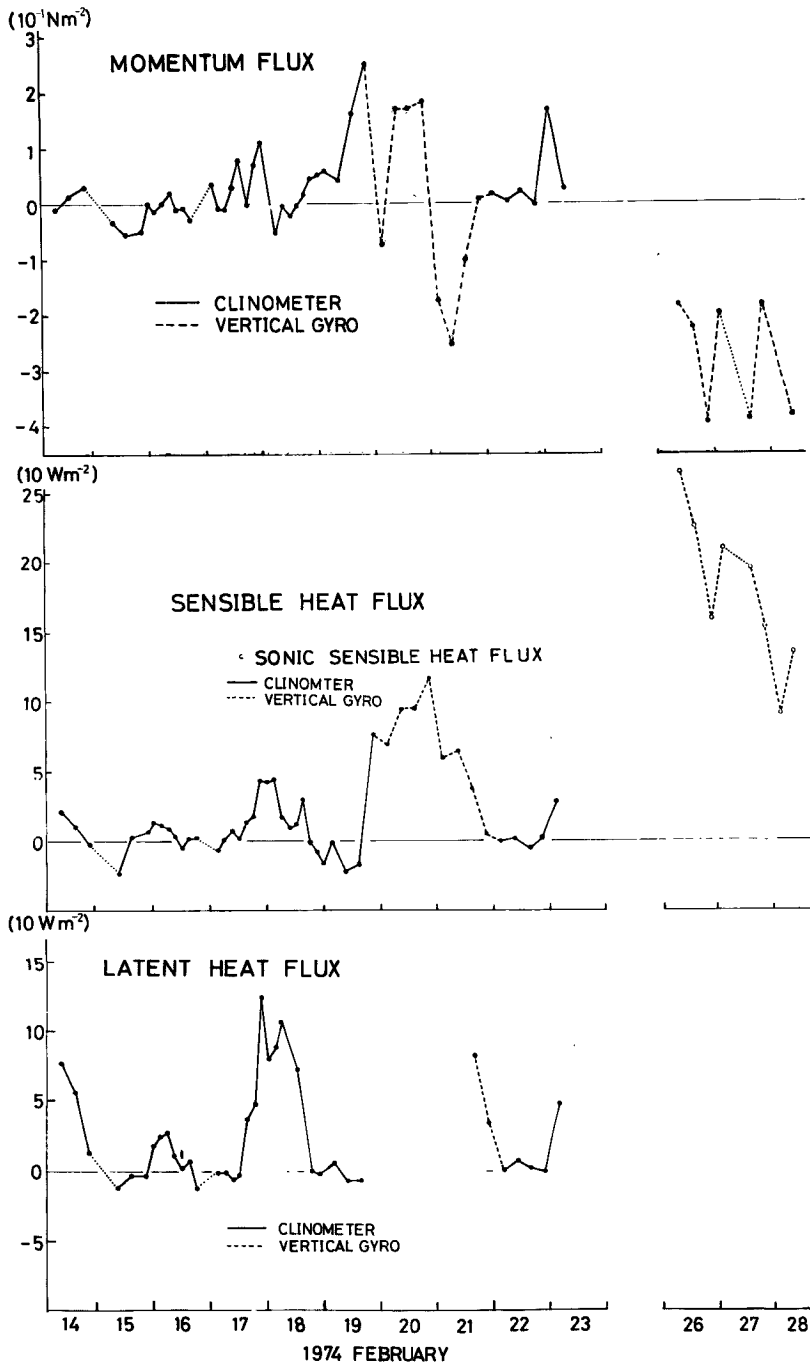


Fig. 10 The time variations of turbulent fluxes of momentum, sensible heat and latent heat during AMTEX.

半から21日前半にかけて、湿球が乾燥してしまい、測定不可能であったが、大勢としては、風や気温と同様な周期で変化しており、南風で高温時には高湿となり、北風で低温時には低湿であった。そして、高湿時には、海面水温に対応する飽和比湿とほぼ同じになり、ときには比湿勾配は逆転する。

このように、この期間に観測された気象要素の時間変化の特徴は、2～3日周期の変動が卓越していることで、風向は、この周期で時計方向に回転しており、北風の時に風速は増大し、乾燥し、低温になる。すなわち、この頃、大陸からの寒気がこの付近の海上に吹き出してくる。このような変動は同時に観測が行なわれた多良間島においても認められ、AMTEX 観測地域全体に共通しているようである。

5.3 乱流輸送量

運動量、顕熱、潜熱の輸送量の時間変化を、Fig. 10 に示す。前に述べたように、ローリング角の信号として傾斜計と垂直ジャイロの出力は、多少特性が異なっているので、垂直ジャイロの信号を利用した場合の輸送量は区別して図示した。運動量輸送量 τ_u は主風向と逆方向を向いている場合がかなりみうけられ、風速が大きくなり、垂直ジャイロのローリング角の信号を用いて補正を行なった場合に、特にその傾向が著しい。また、主風向と直角方向の輸送量 τ_v は、主風向のものに比べて、必ずしも小さいとは限らず、 τ_u よりも大きい値を示した場合さえある。このように、運動量の輸送の方向は、平均風向と一致するとは限らず、 90° あるいは、それ以上の角度異なっている場合がある。

顕熱の輸送量は、気温と海面温度との温度差によく対応して変化している。輸送の方向は、その温度勾配に

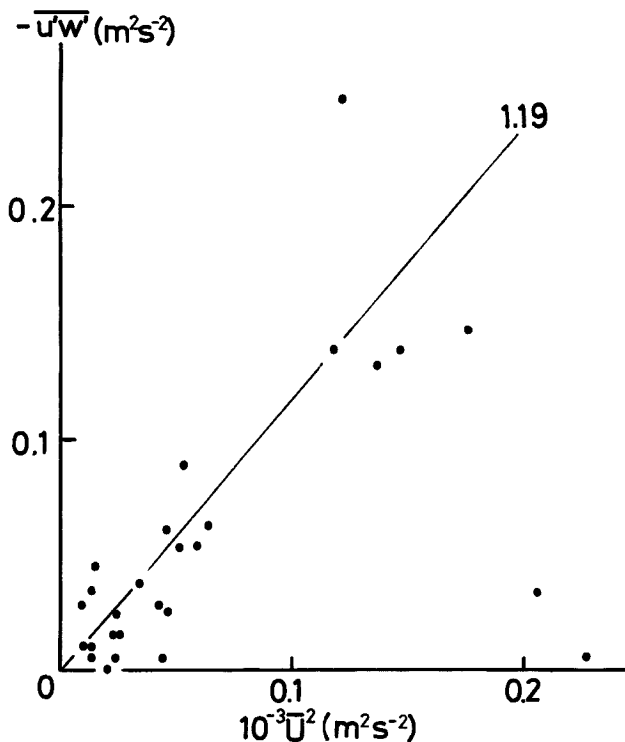


Fig. 11 Covariance of longitudinal component and vertical component of wind velocity plotted against the square of the mean wind speed. The straight line corresponds to $C_D=1.19 \times 10^{-3}$.

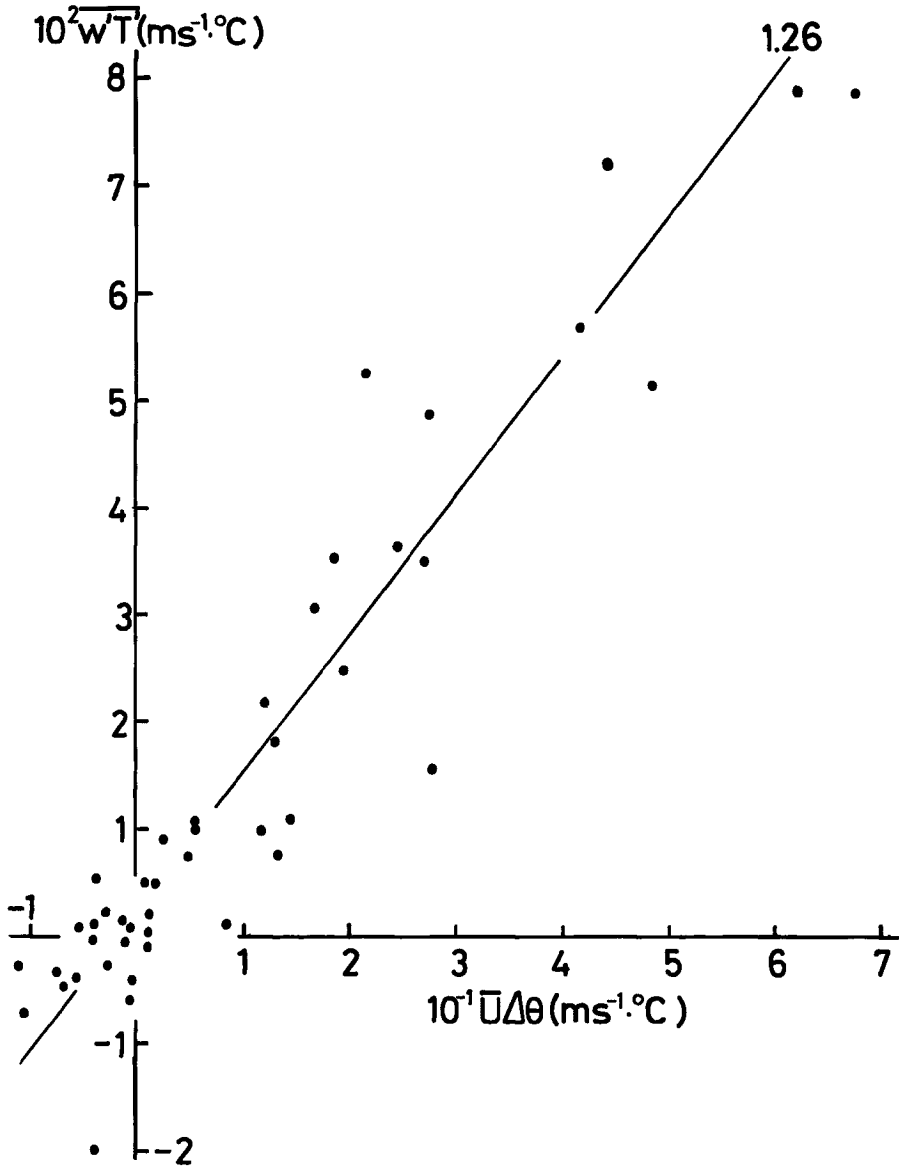


Fig. 12 Covariance of air temperature and vertical wind component plotted against the product of mean wind speed and air-sea temperature difference. The straight line corresponds to $C_H = 1.26 \times 10^{-3}$.

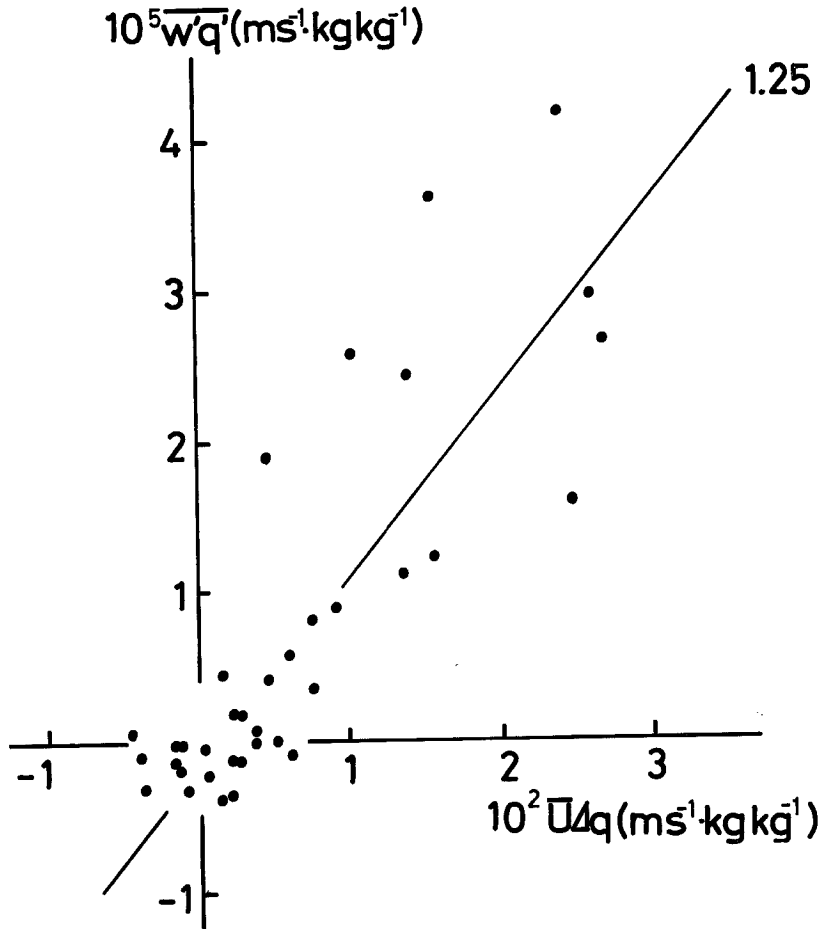


Fig. 13 Covariance of specific humidity and vertical wind component plotted against the product of mean wind speed and air-sea specific humidity difference. The straight line corresponds to $C_B = 1.25 \times 10^{-3}$.

よく一致している。観測後半には、熱電対が断線したため、超音波風速温度計によって測定した仮温度の変動の値を用いて輸送量を計算した。この仮温度の変動は、気温の変動と全く同じではなく、湿度変動の影響を受けるものである⁷⁾ので、それを用いて計算した輸送量も、顕熱の輸送量と一致しない。その誤差は、ポーエン比に依存し、0.1程度のポーエン比の場合の誤差は高々約10%であり、今回の観測では、ポーエン比は平均すると0.3になり、従って誤差も10%を越えることはないと考えられる。潜熱の輸送量も、顕熱と比較的類似した変化を示している。

各輸送量と平均風速、温度差、湿度差の関係を Fig. 11, 12, 13 に示した。横軸は、それぞれ、平均風速の2乗 ($\overline{U^2}$)、平均風速と温度差の積 ($\overline{U(\theta_s - \theta_a)}$) および平均風速と比湿度差の積 ($\overline{U(q_s - q_a)}$) が目盛っており、縦軸は鉛直風速成分と主風向風速成分、気温、比湿度との共分散が示してある。これらの図から明らかなように、測定値は、比較的良好、直線で近似できるような分布をしている。

6. 結果に関する考察

この気団変質実験（AMTEX）のために開発してきた船舶上における乱流輸送量の直接測定法も、ここに示したような船体の上下加速度運動を新たに加えることにより、海面上の乱流輸送量の定義をどのように考えるかについての疑問は多少残ってはいるが、その応用範囲および精度に改善を加えることができた。そして、前節に示したような冬季東シナ海上における乱流輸送についての観測の結果を得た。この結果において、最も顕著な特徴は、2～3日の周期をもった風の時計方向の回転とそれに伴う気象要素の周期変化である。詳細な議論は、他の地点の観測結果、たとえば、多良間島における観測結果⁹⁾などを考慮に入れて、総合的な立場から研究を進めなければならないが、この啓風丸において、同時に行なわれた高層観測の結果¹⁰⁾との比較を Fig. 14 に示す。この図は、啓風丸のマストの頂上と 900mb 面（高度 1000m）での風向、風速を対比したものである。観測期間の最後の部分の風の強い数日間は両者共に非常に近い値を示し、風速の鉛直シャーがほとんどないことがわかる。しかし、前半においては、その間の関係は必ずしも単純ではない。900mb での風向に時計方向に回転している傾向があることは認められるが、マストの頂上での風向との差は一定ではない。そして、その交角は、ほとんどの場合、90°又はそれ以上に達している。一方、風速は、ある場合には、上下で位相が逆の変化をしており、マストの頂上での風速が、900mb のものより大きい場合さえかなり見られる。ここでみられるような現象は、この付近の海面温度が 20°C 近くあるような黒潮付近では、流れに直角、すなわち季節風に直角な方向に、海水温の大きな水平勾配が存在、その上に寒冷な、大陸からの大気が出流するという非常に特殊な状況で生じたものであると考えられる。そして、気団変質過程を研究する上で大きな手掛りを与えるものであろう。

運動量の輸送量は、先に述べたように、その輸送方向が、マストの頂上での平均風向と異なる場合がかなりあった。特に、Fig. 14 で、マストの頂上での風速と、900mb 面での風速を比較すると、後者が前者より小さい場合、あるいは、マストの頂上と 900mb 面の風向のシャーが大きい場合に上のような現象が多く生じている。高所の風速が小さいことは、異常な現象であるが、この場合には、輸送の方向が、平均流からみて上向きとなって不思議ではない。このような場合の一例として、2月23日9時の風の鉛直分布を Fig. 15 に示す。こ

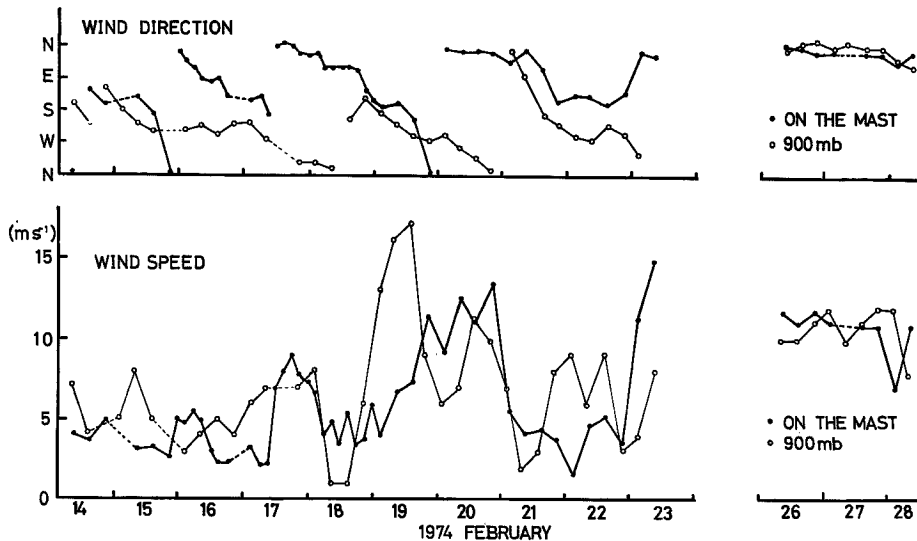


Fig. 14 The time variations of mean wind directions and mean wind speeds on the top of the mast and at 900mb level.

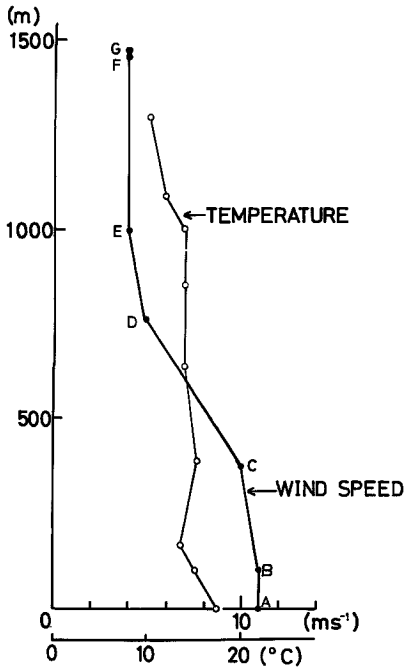


Fig. 15 a) The vertical distribution of mean wind speed and temperature at 9:00 on February 23rd.

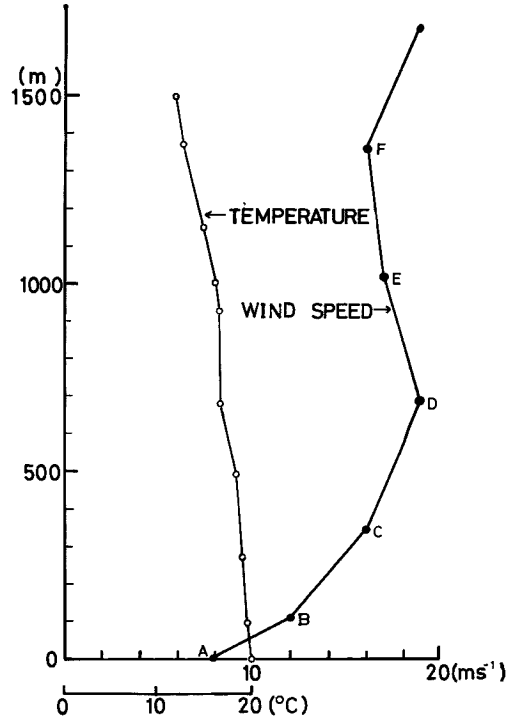


Fig. 16 a) The vertical distribution of mean wind speed and temperature at 15:00 on February 19th.

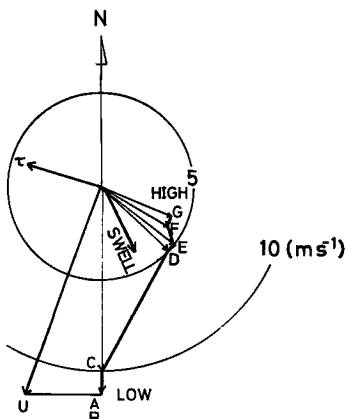


Fig. 15 b) The hodograph of wind velocity vectors and directions of momentum transfer and swell at the same time.

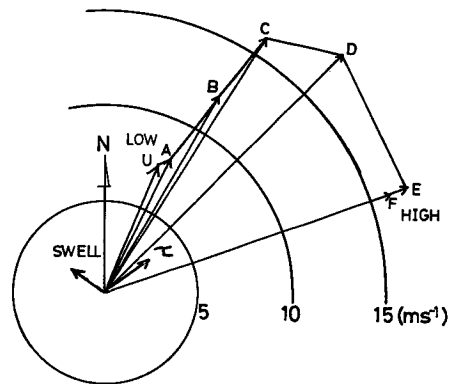


Fig. 16 b) The hodograph of wind velocity vectors and direction of momentum transfer and swell at the same time.

の図から明らかなように、海面付近の風速が、高度1000m 付近での風速より大きい。また風向とうねりの進む方向は、約 60° 傾いており、運動量の輸送方向は、マストの頂上の平均風向と 90° 以上異なり、うねりの進行方向とは逆である。このことは、うねりから運動量が気中へ輸送されることを示す。また、摩擦応力の向きが、高度1000m 前後の風向と丁度逆方向になっており、上空より運動量の欠損が下層へ輸送されていると考えることもできる。上の例と対照的な一例として、運動量の輸送方向が、平均風向とほぼ一致している場合を、Fig. 16 に示す。この例は、2月19日15時の資料である。この場合には、風速は高さと共に増加し、摩擦応力は、平均風向と同じ向きである。

これまで、船体の影響による気流の変化については、問題にしていなかった。それは、強風時などでは、ここで利用している前部マストの頂部以外に、船体の影響が小さいと考えられる場所を見出しえなかったためもあるが、実際に解析した結果についてみると、風速の鉛直成分の平均は零ではなく、平均風速に比例した上向きの成分が残っている。そして、その比は、 $0.2\sim 0.3$ であって $10^\circ\sim 15^\circ$ の角度をもった上昇流になっていることになる。このような傾いた気流の中での鉛直乱流輸送量を簡単に平均値を無視して、(1)~(3)式のように表現してよいかどうかは問題があるが、今回は、これについての考慮は全くしていない。その分だけ誤差として残っているわけであるが、現在のところ、その大きさを正確に評価する方法はない。

Fig. 11 には、比較的風速の鉛直分布が単純な形をしていて、平均風向と摩擦応力の向きが、大きく異なっていない場合についての $-\overline{u'w'}$ と \overline{U}^2 の関係を図示してあるが、これから比例定数、すなわち、抵抗係数 C_D を求めると、 $(1.19\pm 1.04)\times 10^{-3}$ となり、この値は直線に示すとおりである。この値を、風速に対数分布を仮定して、10m 高度に換算すると $(1.32\pm 1.04)\times 10^{-3}$ となる。この値は、同じ方法で夏季東シナ海での値、 1.22×10^{-3} 、ATEX での大西洋での値 1.20×10^{-3} などと、ほぼ一致し、海洋上の C_D の値は、どの海域においても、この程度の値を示すと考えてもよいであろう。また著者らが、今回までに、固定した塔を用いて測定した C_D の値は、起伏のある草地上で 14.5×10^{-3} 、平らな草地上で 10.5×10^{-3} 、平らな裸地上で 5.5×10^{-3} 、浅い湖面上で 1.7×10^{-3} であり、今回得られた値は、これらの延長上にある。

前述のように、気温の変化には、2~3日の周期が卓越しており、その変化に対応した変化は顕熱の輸送量にも見られる。マスト上での気温の変化と上層の大気気温の変化のようすを調べてみると、19日後半の海面近くでの気温上昇から、それ以降の下降に対しては、850mb、900mb 高度での気温変化も対応している。しかし、それ以前の14~18日の2日程度の周期変化は、上層では顕著には見られない。このことは、前半における寒気の流出が、小規模なものであり、大気の下層にのみ、寒気が流出していることを示している。

Fig. 12 は、 $\overline{w'T'}$ と $\overline{U}d\theta$ の関係を示すが、両者は比較的よく直線近似できて、輸送係数 C_H は、 1.26×10^{-3} である。高度10m での値に換算すると、 1.40×10^{-3} となる。

同様に $\overline{w'q'}$ と $\overline{U}dq$ との関係を示す Fig. 13 から輸送係数 C_B を求めると 1.25×10^{-3} であり、高度10m の換算値は 1.40×10^{-3} である。このように得られた、バルク輸送係数は、 C_H と C_B とはほぼ同程度の大きさであるが、 C_D はそれらよりやや小さい値を示している。

7. 結 語

著者らが開発してきた船舶を利用した海面上における乱流輸送量を直接測定する方法を改良し、1974年2月の AMTEX において、啓風丸船上で観測を行ない、気団変質時の海洋上における乱流輸送量の評価を行なった。なお、この際、船体の重心の上下運動の速度は、風速の鉛直成分に比較して、決して無視できない大きさをもっていることが、予備解析でわかったので、その補正をも同時に行なった。それでも海面が荒れた場合の補正方法には、問題点が多少残っており、今後、検討を加える必要がある。

今回の観測の解析結果として、AMTEX 期間中、風向が2~3日周期で時計方向に回転し、他の気象要素もこれに伴って周期変動していることがわかった。また、高度10m での値に換算したバルク輸送係数の平均値として、 $C_D=1.32\times 10^{-3}$ 、 $C_H=1.40\times 10^{-3}$ 、 $C_B=1.40\times 10^{-3}$ の値が得られた。

謝 辞

この研究は、地球大気開発計画 (GARP) の副計画の一つである気団変質実験 (AMTEX) の一環として、文部省国際共同研究費によって行なわれたものである。この研究を進めるにあたり、啓風丸船上において、色々と御世話になった、松野船長以下乗組員の皆様に感謝したい。また、観測資料の解析にあたり、ミニコンピュータのプログラミングおよび操作に関し、研修員加藤晶子氏の御助力を得たことを深く感謝する。

参 考 文 献

- 1) 光田 寧・花房龍男・米谷俊彦：航行中の船舶による海上での乱流測定法について，京都大学防災研究所年報第12号A，1969，pp. 245-259.
- 2) 光田 寧・花房龍男・米谷俊彦：航行中の船舶による海上での乱流測定法について(2)，京都大学防災研究所年報第13号A，1970，pp. 419-432.
- 3) Mitsuta, Y and T. Fujitani: Direct Measurement of Turbulent Fluxes on a Cruising Ship, Boundary-Layer Met. Vol. 6, 1974, pp. 203-217.
- 4) Tsukamoto, O., T. Fujitani and Y. Mitsuta: to be published, 1975.
- 5) Tabata, S: A Simple but Accurate Formula for the Saturation Vapor Pressure over Liquid Water. J. Appl. Met., Vol. 12, 1973, pp. 1410-1411.
- 6) Fujitani, T and T. Hayashi: Boundary Layer Measurement on R. V. Keifu-Mar., AMTEX'74 DATA REPORT, Vol. 4, Boundary Layer and Radiation Observations, Management Committee for AMTEX, 1974, pp. 102-106.
- 7) Mitsuta, Y: Application of Sonic Anemometer-Thermometer to Studies of Vertical Eddy Transport Processes in the Atmospheric Boundary Layer, Special Contribution of Geophysical Inst. Kyoto Univ. Vol. 8, 1968, pp. 45-60.
- 8) Monji, N. and O. Tsukamoto: Boundary Layer Measurement on 50 m Tower in Tarama, AMTEX'74 DATA REPORT, Vol. 4, Boundary Layer and Radiation Observations, Management Committee for AMTEX, 1974, pp. 88-92.
- 9) Ninomiya, K: Aerological Data at Keifu-Mar., AMTEX'74 DATA REPORT Vol. 2 Aerological Data, Management Committee for AMTEX, 1974, pp. 361-420.
- 10) Dunkel, M., L. Hasse, L. Krügermeyer, D. Schriever and J. Wucknitz: Turbulent Fluxes of Momentum, Heat and Water Vapor in the Atmospheric Surface Layer at Sea during ATEX, Boundary-Layer Met., Vol. 6, 1974, pp. 81-106.