

航行中の船舶による海上での乱流測定法について

光 田 寧・花房 龍男・米谷 俊彦

MEASUREMENT OF TURBULENT FLUXES FROM A MOVING SHIP

By Yasushi MITSUTA, Tatsuo HANAFUSA
and Toshihiko MAITANI

Synopsis

A new method of direct measurement of turbulent fluxes over sea surface from a moving ship is established. The first test observation was made in the summer of 1968 by the use of the Research Vessel, Ryofu Maru II of Japan Meteorological Agency on the East China Sea to the west of Japan. The details of the method of observation and the results of the test observation are presented in this paper.

1. は し が き

大気と地球表面との間の物理量の交換を正確に知ることが地球大気の運動を決定するための一つの境界条件を明らかにすることであり、天気現象を理解する上において重要な問題の一つである。しかし、この交換量は直接測定することが困難であるために未だに十分な知識が得られる状態には至っておらず、特に地球表面の%を占める海面上での交換についての知識はほとんど得られていない。そこで全地球的な規模で大気の物理過程に関する研究を推進しようとする国際的な研究計画 (GARP) の一環として、この地空相互作用の研究が取り上げられ世界各国でその研究が強力に進められようとしている。

この研究もこの地球大気開発計画の一環として行われたもので、航行中の船舶を利用して広範囲にわたる海洋上での色々な物理量、主に運動量、熱量、水蒸気量の垂直乱流輸送量を直接測定するための方法を確立するのがその目的である。従来から用いられている海洋上での測定方法は主に海中に固定した塔を用いるか、海上に浮べたブイを用いるかのいずれかであったが、これは精密な研究目的には適当であっても広範囲にわたる資料を収集するためには機動性が乏しく不適當である。航行中の船舶を用いれば広範囲にわたって、しかも色々な条件での観測を比較的容易に実施出来る。しかし動いている船の上では静止系に相対的な真の風を測定することが困難であるという問題が生じる。その点についてはまず船に相対的な風を測定し、同時に測定した船の動揺に関する資料を用いてこれを補正して真の風速を求めるという方法によって解決することが出来る。これは航空機による風速変動の観測に用いられたものとはほとんど同じ手法を用いれば良いのであって¹⁾ 船の動揺が比較的ゆっくりとしたものであり、また前進速度もほぼ一定と見ても大差ないような状態を作ることが容易に出来るという点で航空機の場合よりも簡単にはずである。

乱流輸送の測定は eddy correlation method²⁾ を用いた直接測定を行い、そのために必要な風速の垂直成分と水平成分の検出には超音波風速計³⁾ を用いる。また熱量あるいは水蒸気量の輸送の測定のために必要な気温及び水蒸気量の変動の測定には超音波風速温度計とその感部の中に組み込んだ熱電対乾湿球湿度計⁴⁾ を用いる。これらの感部を船体自身の気象要素に対する影響の最も少ないと考えられる船の前部マストの頂部に取り付け。一方、船の動揺は新たに船舶用の傾斜計を作ってこれにより pitching と rolling 角を測定

し、船の前進速度は船に備え付けられた計器による値を利用するという方法を用いることにする。この相対風速の真の風速への換算、輸送量の計算は各々の記録を一度高速度の記録装置に記録した後に読みとって電子計算機を用いて計算するという方法が適当である。

このような方法の実用化に関する第一回の予備観測を1968年7月九州西方海上の東シナ海上で行われた特別観測(集中豪雨特別観測—GARP)の一部として気象庁の観測船凌風丸を用いて行った。以下にその観測方法の詳細および観測結果について述べる。

2. 基本 原理

動揺する船舶の前部マストの頂部に固定された超音波風速計によって測定された風速成分を感部の運動と傾斜の影響に対して補正し、地面に相対的な真風速に変換し、乱流輸送量の測定を行うための基本的な方法は次のとおりである。

地球に固定された座標系に相対的な真の風速 $V(U, V, W)$ は

$$V = V_P + v \quad \dots\dots\dots (1)$$

によって与えられる。ここで $V_P = V_P(\dot{X}, \dot{Y}, \dot{Z})$ はマストの頂部 $P(X, Y, Z)$ の運動速度である。又 v は P を原点とし地球に固定された座標系と平行な移動座標系に相対的な風速である。

船舶の動揺に関して普通に行われる仮定に従って船の回転の中心が重心 $G(X_0, Y_0, Z_0)$ にあり、重心は船体に相対的な運動をしないと、さらに船体の yawing は大きな船では pitching などに比べて無視出来るほど小さいとするとマストの頂部の運動速度 V_P は次のように書ける。

$$\begin{cases} \dot{X} = R\dot{\theta} \cos(\alpha + \theta) + \dot{X}_0 \\ \dot{Y} = R\dot{\theta} \sin(\alpha + \theta) \sin\phi - R\dot{\phi} \cos(\alpha + \theta) \cos\phi + \dot{Y}_0 \\ \dot{Z} = -R\dot{\theta} \sin(\alpha + \theta) \cos\phi - R\dot{\phi} \cos(\alpha + \theta) \sin\phi + \dot{Z}_0 \end{cases} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで R は重心 G とマストの頂部 P の間の距離であり、 α は鉛直軸と線 GP のなす角度、 θ は pitching 角、 ϕ は rolling 角、さらに $\cdot$ は時間微分を示す。これらの関係は Fig. 1 に図式的に示されているとおりである。

一方 v はマストに固定されマストと共に傾斜する超音波風速計で測定される風速 $V_{\text{obs}}(u_{\text{obs}}, v_{\text{obs}}, w_{\text{obs}})$ から船舶の傾きを補正すれば得られ、 v の各成分はそれぞれ次のように書ける。

$$\begin{cases} U = u_{\text{obs}} \cos\theta + v_{\text{obs}} \sin\theta \sin\phi + w_{\text{obs}} \sin\theta \cos\phi \\ V = v_{\text{obs}} \cos\phi - w_{\text{obs}} \sin\phi \\ W = -u_{\text{obs}} \sin\theta + v_{\text{obs}} \cos\theta \sin\phi + w_{\text{obs}} \cos\theta \cos\phi \end{cases} \quad \dots\dots\dots (3)$$

従って真の風速は(1)式に(2)、(3)式の関係を代入して得られた次の式によって、観測された風速から計算されることになる。

$$\begin{cases} U = R\dot{\theta} \cos(\alpha + \theta) + \dot{X}_0 + u_{\text{obs}} \cos\theta + v_{\text{obs}} \sin\theta \sin\phi + w_{\text{obs}} \sin\theta \cos\phi \\ V = R\dot{\theta} \sin(\alpha + \theta) \sin\phi - R\dot{\phi} \cos(\alpha + \theta) \cos\phi + \dot{Y}_0 + v_{\text{obs}} \cos\phi - w_{\text{obs}} \sin\phi \\ W = -R\dot{\theta} \sin(\alpha + \theta) \cos\phi - R\dot{\phi} \cos(\alpha + \theta) \sin\phi + \dot{Z}_0 - u_{\text{obs}} \sin\theta + v_{\text{obs}} \cos\theta \sin\phi + w_{\text{obs}} \cos\theta \cos\phi \end{cases} \quad \dots\dots\dots (4)$$

これらの方程式は動揺する船上で測定された風速成分と地面に相対的な風速成分との関係を示す式である。ここで R と α は既知量である。 $u_{\text{obs}}, v_{\text{obs}}, w_{\text{obs}}$ は超音波風速計で測定される風速であり、 $\theta, \phi, \dot{\theta}, \dot{\phi}$ は傾斜計で測定される傾斜角とその時間微分である。 $\dot{X}_0, \dot{Y}_0, \dot{Z}_0$ は船体の運動速度である。従ってこの方程式の右辺に含まれている変数を正確に測定すれば地面に相対的な真の風速成分が得られることになる。

さらに船体が十分大きな船であるならば船の重心の上下、左右方向の運動は十分小さいものと考えてよい場合が多いからこれを無視すれば船に相対的な風、船体の pitching と rolling 及び船の前進速度を知れば真の風を知ることができる。勿論実際の応用に当ってはここになされたいくつかの仮定によって生じる誤差は

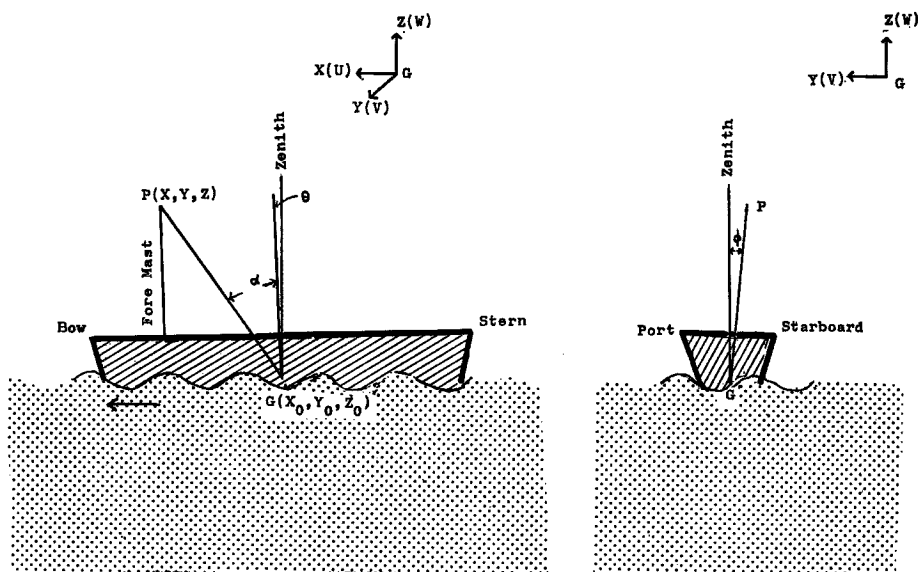


Fig. 1 Schematic expression of the coordinate system.

常に注意する必要がある、固定した塔の観測などに比べれば多少の精度の低下は止むを得ないとしなければならない。しかし測定の機動性はこの欠点を補うものである。

真の風速分値が求められたならばそれらの値から次の関係によって垂直乱流輸送量を計算することができる。

$$E(X) = \overline{X'(\rho W)'}'$$

ここでバーは時間平均、プライムはその平均値からの偏差を示し、 ρ は空気密度、 X は測定しようとする物理量のintensity、 W は風速の垂直方向の成分である。ここで X を V (風速の水平分値) とすれば運動量輸送量が求められ、 $C_p T$ とすれば (但し C_p は定圧比熱、 T は気温) 熱量の垂直輸送量が求まり、 q (水蒸気量) とすれば水蒸気量の垂直輸送量が求められることになる。

3. 観測用測器

このような観測のために用いるべき個々の測器は傾斜計を除いて特に新たに開発する必要のあったものはないが以下に簡単に個々の測器の特色および、観測のための block diagram を議論する。

(a) 超音波風速温度計

超音波風速温度計は風速の3次元的分値と気温の測定のために用いられる。本研究においては著者の一人³⁾が開発したパルス時間差方式の超音波風速温度計の改良型を用いたが、これは完全にトランジスタ化された3次元測定用のもので、測定用の sound path length は 20 cm であって水平の2成分は120°に交叉しており、プローブ自身によって生じる乱れのための測定誤差を最小限に食止められるようになっている。そのため直交座標系による測定値を求めるには簡単な計算回路が必要である⁵⁾。20 cm のスパンを用いることによる風速変動の高周波側での測定誤差は波長 100 cm 程度の短周期の風速の変動に対しても振巾の減少が10%以下であるから³⁾ マストのように比較的高い場所での測定にはほとんど問題とならない。またこの超音波風速温度計によればあらかじめセットした設定温度を中心とした気温の変動を測定することができる。

気温の測定の際の動特性は風の測定の場合と全く同じである。

(b) 熱電対乾湿計

水蒸気量の変動を測定するために熱電対乾湿計が用いられた。感部に用いられた銅—コンスタンタン線の直径は 120μ でありこの測器の動特性は著者⁴⁾によって議論されている。それによればたとえば気温 20°C 風速 5 m/sec 以上の場合には水蒸気量の 0.4 cps 以下の周期の変動を振巾において10%以下の損失で測定することができる。このような特性は水蒸気の垂直輸送量の測定には必ずしも十分とはいえないがさしあたってこれに代る測器が準備できなかったのものでそのまま用いている。

(c) 傾斜計

船の *pitching* 角と *rolling* 角の測定のために新しい型の傾斜計を特にこの研究のために開発した。その外観は **Photo. 1** に示したとおりである。感部は直交した振動面をもった2つの小さな振子であり、その傾角は差動変圧器によって検出され2成分の傾角に比例した電気的な出力が得られる。従って船の船首—船尾方向と左右方向の水平面に対する傾斜角を独立に取り出すことができ *pitching* 角, *rolling* 角が測定できる。この振子機構全体はシリコンオイル中につかっており制動されている。この振子の固有周期は約0.23秒であり減衰比は約0.38である。この振子の傾角の変動に対する周波数応答特性が **Fig. 2** に示されている。この図からも明らかなようにこの傾斜計は船の動揺の周期が2秒程度より長い時にはほとんど完全に船の動

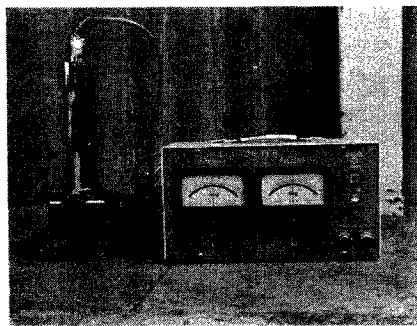
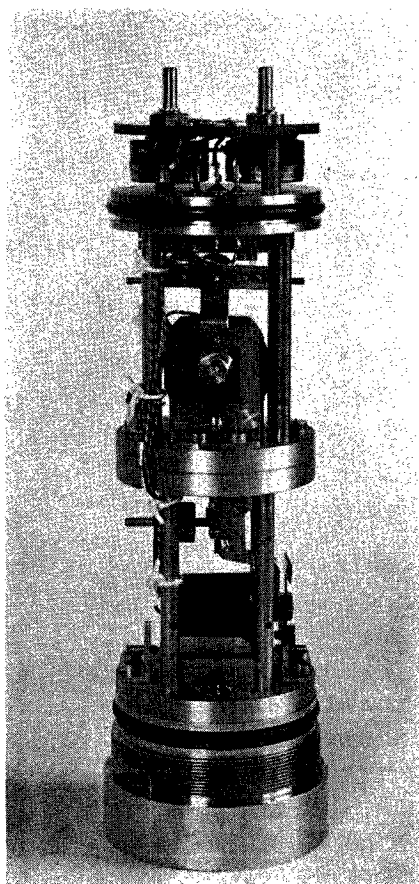


Photo. 1 Outlook of the clinometer

揺に追従する。従って比較的長い周期で動揺する観測船の上で用いるにはこの程度の傾斜計で十分である。この傾斜計を用いるに当っては船体の動きの加速度による影響をできるだけ小さくするために船体の重心に近いところにおくのが望ましい。

(d) Block diagram

これらの測器を用いて船上で観測する場合の Block diagram の一例を Fig. 3 に示す。

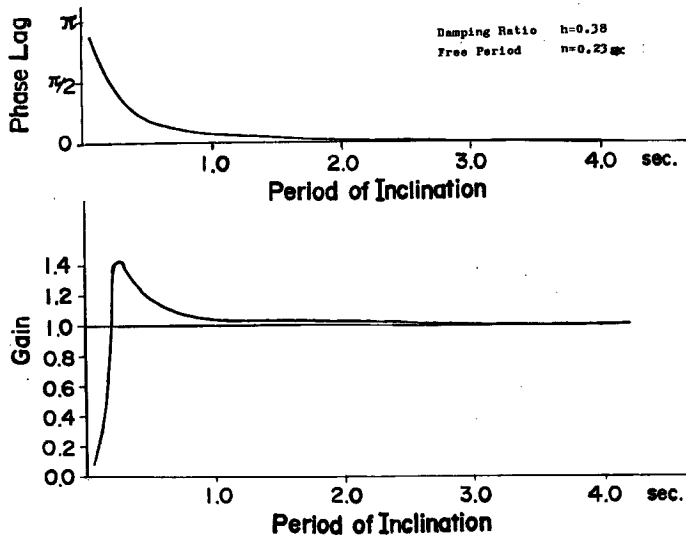


Fig. 2 Total dynamic response of the clinometer.

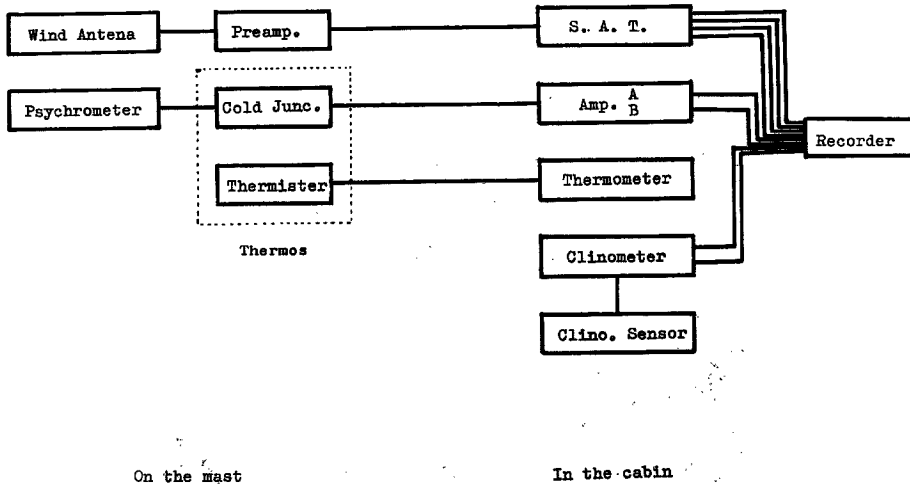


Fig. 3 Block diagram of the observational system.

4. 予 備 観 測

この方法を用いて海上の乱流輸送量を測定するための予備観測が1968年7月8日から18日までの期間に集中豪雨特別観測—GARP の一環として東シナ海で気象庁の海洋観測船凌風丸を用いて行われた。この凌風丸の船体の長さは約80mで前部マストの高さは海面上約18mである。三次元超音波風速温度計と熱電対乾湿計を前部マストの頂部に設置した様子を **Photo. 2** に示す。熱電対乾湿計は超音波風速計の感部の中に入るように設置されている。感部からの信号はケーブルで約70m離れた観測室まで送られた。熱電対乾湿計からの信号は増巾器を通して記録計に入れられた。又船の動揺を測定するために傾斜計は観測室に置かれた。これらの信号の記録は二台のペンレコーダで行われ両者の同時性はタイマーによって同じタイムマークを入れることによって確保された。この観測系の Block diagram は前の **Fig. 3** に示されているものである。

観測の前半(7月9日～7月11日)は定点 A ($31^{\circ}30'N$, $128^{\circ}30'E$) で漂流中の船上で行われた。そして後半(7月15日～7月17日)には船首を一定に保ち航行速度を一定にして行われた。各測定の間観測時間は約1時間のものが大部分であった。

船を漂流させた場合に得られた記録の一例 (Run 6) が **Fig. 4** に示されている。船の動揺の周期に対応した風速成分の変動がみられる。但しここで示された風速成分は超音波風速計で測定された生の記録であり Horizontal A, B は 120° に交叉した軸で測定した水平二成分で, W が垂直成分である。図の上二段には熱電対乾湿計の乾球と湿球温度の記録が示されており, 湿球温度の変動は乾球温度の変動より大きくなっている。**Fig. 5** は約 3 m/sec の風に向かって 12 kt で航行中の船上で得られた記録の一例である。前の記録と同様に船の動揺の影響が垂直速度の変動にも大きく現われており, その補正の必要なのがわかる。熱電対乾湿計の乾球温度も湿球温度の変化も小さい。

予備観測で得られた全ての観測の詳細が **Table 1** に示されている。船速はロランで求めた二点の位置から決定したものである。いくつかの観測では電氣的な雑音が入ったり, その他観測上の問題のある場合もあるが, それらは表中に * で示されている。

これらの予備観測の記録は0.4秒間隔で眼で読みとりその結果を紙テープにパンチして京都大学の電子計算機 HITAC-5020 を用いて先に述べた方式に従って輸送量の計算を行うこととし, 作業を実施中である。



Photo. 2 Sensors on the foremast of the ship.

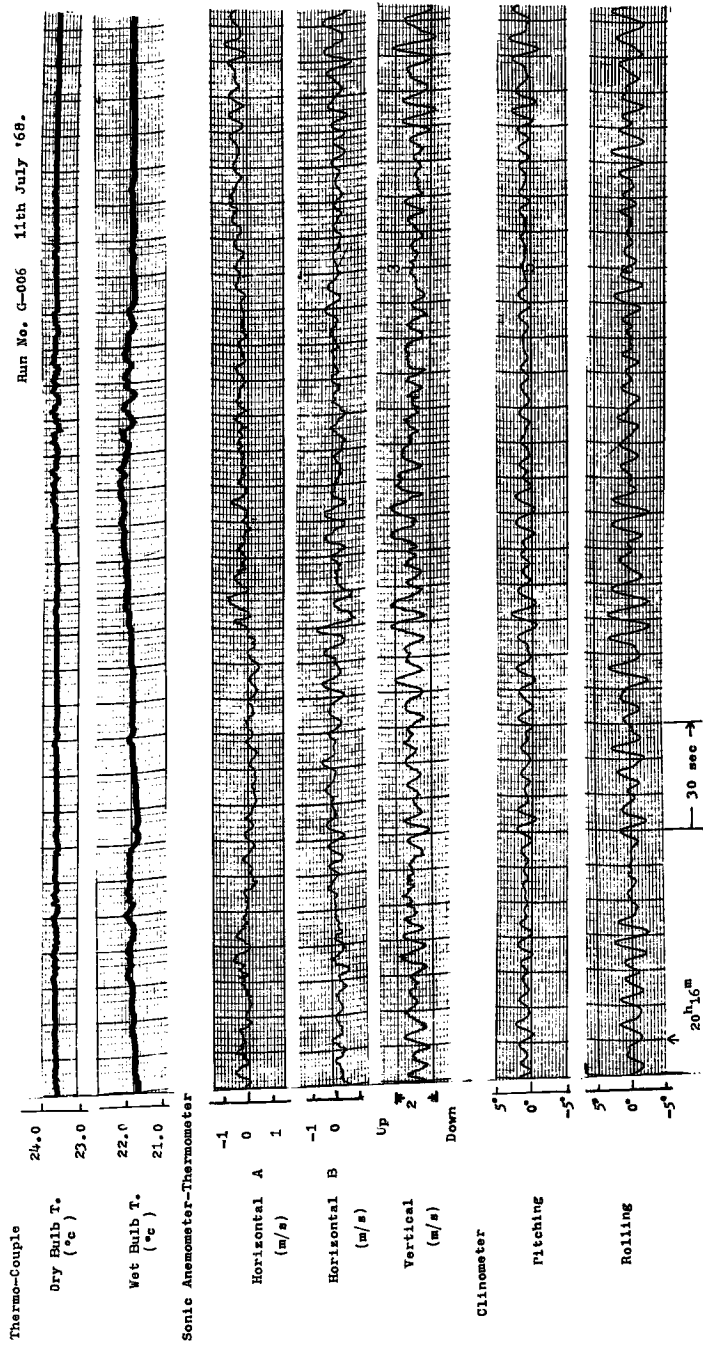


Fig. 4 An example of the trace observed on the drifting ship..

Table 1 List of the test observation data

Run No.	Date	Time	Cloud Cover	Ship Position	Ship Speed	Ship Direc.	Wind Speed (m/s)	Wind Direc	Dry Temp. (°C)	Wet Temp. (°C)	Sea S.T. (°C)	Sonic Anemometer-Thermometer				Thermo-Couple		Clinometer
												A	B	W	T	T _d	T _w	
G-001	10 th July '68	22 : 10-22 : 41	9/10	Point A	Drift	260	10	S S E	24.3	23.5	24.3	0	0	0	0*	0*	0	0
G-002	"	23 : 00-00 : 03	10/10	"	"	280	9	S	24.7	23.9	24.2	0	0	0	0	0*	0	0
G-003	11 th July '68	08 : 15-09 : 15	10/10	"	"	300	2	N N E	24.6	23.1	24.7	0	0	0	0	0	0	0
G-004	"	11 : 07-12 : 00	10/10	"	"	310	3	N E	25.2	23.1	24.7	0*	0*	0	0	0	0	0
G-005	"	15 : 10-16 : 10	9/10	"	"	290	0	—	27.0	23.6	25.3	0	0	0*	0*	0*	0	0
G-006	"	19 : 16-20 : 15	10/10	"	"	70	2	N W	24.5	23.0	24.7	0	0	0	0	0	0	0
G-007	15 th July '68	14 : 03-15 : 00	9/10	32°01' 129°33'	13 knots	180	6	S S W	26.2	25.2	24.9	0	0	0	0	0	0	0
G-008	"	15 : 25-15 : 45	9/10	31°54' 129°33'	Drift	290	6	S	26.3	25.2	24.6	0	0	0	0	0	0	0
G-009	"	16 : 14-16 : 43	9/10	31°34' 129°34'	13 knots	180	5	S	26.3	25.3	25.1	0	0	0	0	0	0	0
G-010	"	20 : 10-21 : 00	5/10	31°00' 129°18'	12 knots	270	3	S W	26.2	25.4	25.8	0	0	0	0	0	0	0
G-011	16 th July '68	06 : 00-07 : 00	9/10	31°00' 127°00'	"	270	8	S S W	24.7	24.4	23.3	0	0	0	0	0	0	0
G-012	"	09 : 00-10 : 00	9/10	31°17' 126°41'	"	0	9	S S W	25.1	24.2	23.5	0	0	0	0	0*	0	0
G-013	"	12 : 15-13 : 15	4/10	35°27' 127°05'	"	90	10	S S W	25.4	24.2	24.0	0	0	0	0	0	0	0
G-014	"	15 : 40-16 : 05	4/10	31°25' 127°45'	Drift	310	10	S S W	25.9	24.9	25.5	0	0	0	0*	0	0	0
G-015	"	19 : 08-19 : 45	9/10	31°21' 128°29'	12 knots	140	9	S S W	25.8	24.9	25.4	0	0	0	0	0	0	0
G-016	17 th July '68	01 : 53-03 : 00	0/10	31°32' 130°01'	"	0	4	S	25.1	24.6	25.3	0	0	0	0	0	0	0
G-017	"	05 : 51-06 : 51	8/10	31°40' 129°12'	"	270	7	S S W	25.3	24.7	25.6	0	0	0*	0	0	0	0
G-018	"	12 : 00-13 : 00	4/10	31°38' 128°11'	"	270	9	S S W	26.2	25.3	25.5	0	0	0*	0	0	0	0

at 18 m at 10 m at 19 m 0: The signal from the sensor is recorded completely. 0*: The signal from the sensor is recorded incompletely.

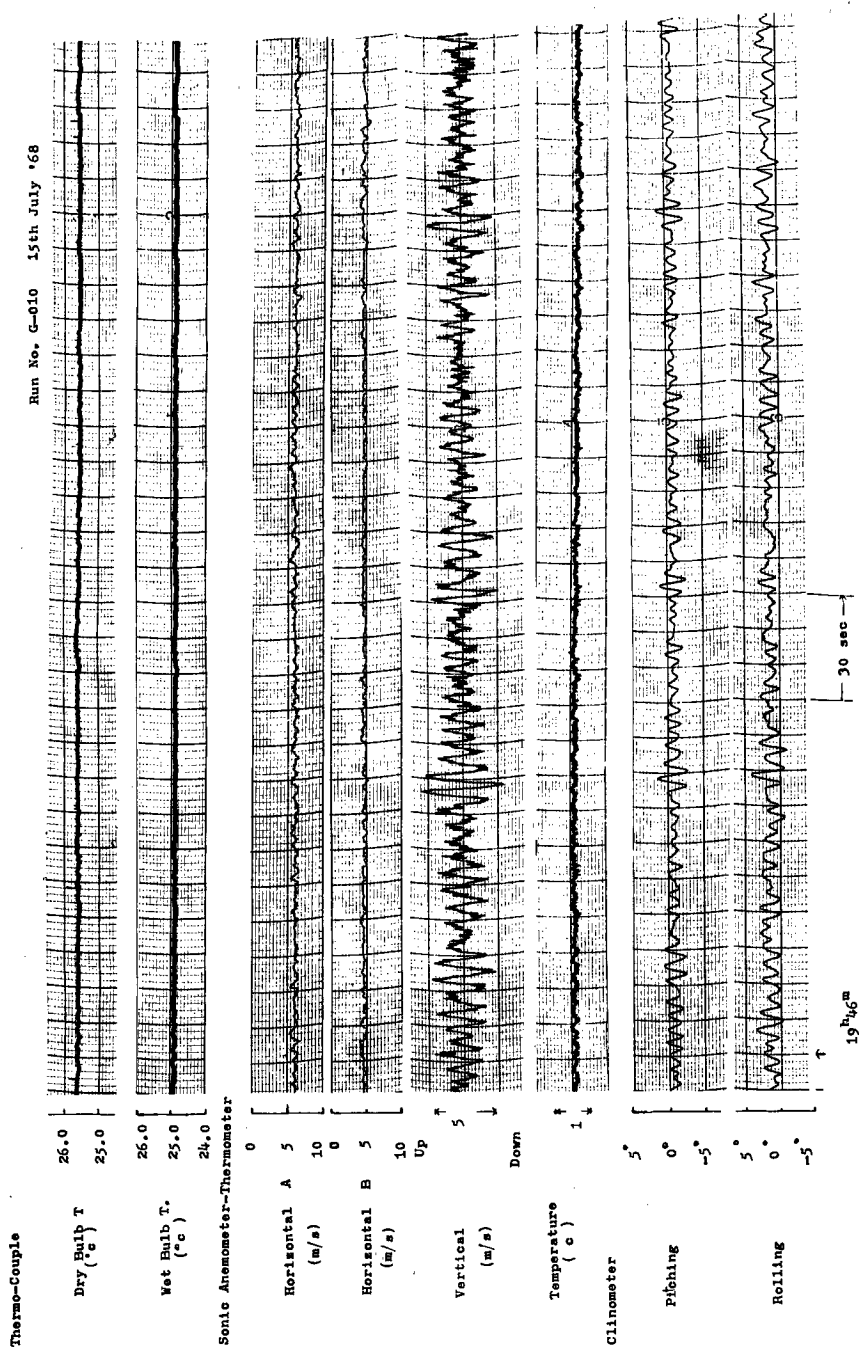


Fig. 5 An example of the trace observed on the moving ship.

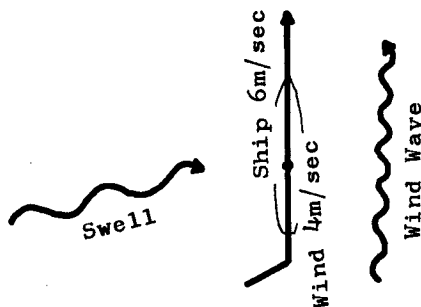
5. 解析の一例

資料処理は目下進行中であるがその間に得られた一つの例について以下に述べる。すなわち先の Fig. 4, Fig. 5 から明らかなように船の動揺のために生じた見かけ上の風速成分が存在することがはっきりと見られる。それを船の運動に関する知識によって補正し真の風を求めるのが解析の第一段階である。ここでは

Table 2 Related enviromental parameters (Run 16)

RUN 16

Date		July 17th, '68
Time		01:53-03:00
Cloud Cover		0/10
Ship	Position	180°01'E ; 31°32'N
	Direction	0°
	Speed	13 knots
Wind (mast)	Direction	S
	Speed	4 m/sec
Air Temperature		25.1°C
Sea Surf. Temp.		25.3°C
Wind Wave	Direction	190°
	Period	2.0 sec
	Height	0.3 m
Swell	Direction	250°
	Period	7.0 sec
	Height	1.0 m



航行中の観測 (Run 16) の解析の例について述べる。この Run 16 では真の風が約 5 m/sec で船の後から吹いている場合であり船が風を追い越すかたちになって実際には船に相対的な前からの風速が約 1~2 m/sec になっている場合である。海上には周期約 7 秒波高約 1 m のうねりと周期約 2 秒波高約 0.3 m の風波が観測されている。この Run 16 の気象並びに海象状況は Table 2 に示されており、この表の下側には船の波に対する相対的な関係が図式的に示されている。

この際観測された船の pitching 角と rolling 角の power spectrum は Fig. 6 に示すとおりである。pitching の変動成分の最大になる周期は約 5 秒であり、rolling はそれより幾分長い周期である。そしてその振巾は rolling 角の方が pitching 角より大きい。この rolling の周期はほぼうねりの船に相対的な周期と一致しているようである。

このように動揺する船上で測定された相対風 u_{obs} , v_{obs} , w_{obs} の power spectra は Fig. 7 に示すとおりである。各成分の power spectra は pitching, rolling の power の最大になる周波数に対応した所に peak を持っており、船首方向成分 u と pitching, 横風と rolling の間の coherence もその周波数付近で 1.0 に近くなっている。結局この peak の周波数付近では実測された風はほとんど船の動揺によって生じた見かけ上の変動でありどうしても船の動揺に対する補正が必要になる。そこで先に述べたように (4) 式を用いて $\dot{Y}_0 = \dot{Z}_0 = 0$ としてこの動きに対する補正を行った。その補正を行って得られた真の風速のスペクトルを計算した結果が Fig. 8 に示されている。この図からも明らかとなり peak は完全には消えてしまっていないで、この山での各風速成分と pitching と rolling との coherence も無視出来るほど小さくは

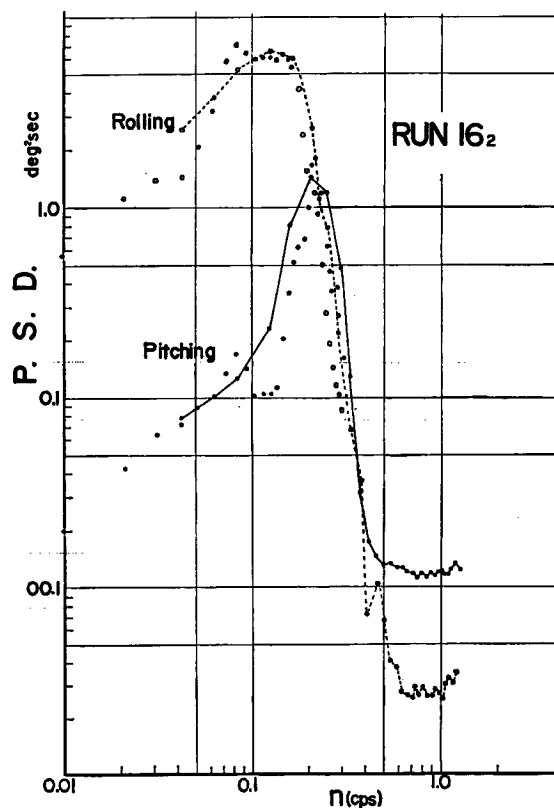


Fig. 6 Power spectra of pitching and rolling angles of the ship (Run 16)

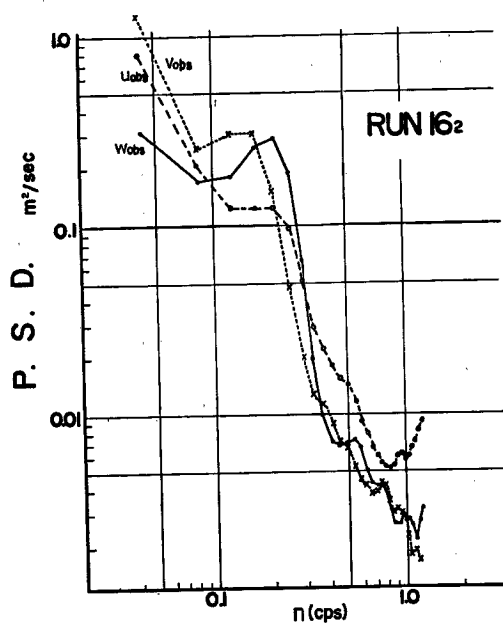


Fig. 7 Power spectra of observed wind velocity components (Run 16)

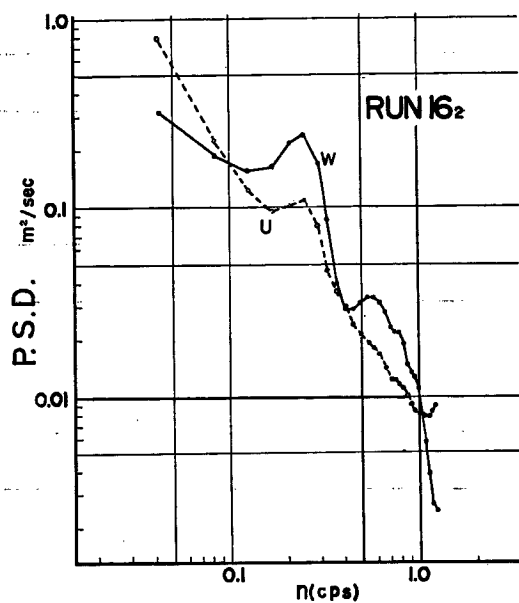


Fig. 8 Power spectra of corrected wind velocity components (Run 16)

Table 3 Results of the analysis (Run 16)

RUN 16_i

Ship	
Direction	0°
Speed	6.4 m/sec
Relative Wind	
Direction	45°
Speed	2.2 m/sec
True Wind	
Direction	160°
Speed	5.0 m/sec
Standard Deviation	
U	0.42 m/sec
W	0.27 m/sec
Friction Velocity	0.17 m/sec
Momentum Flux	0.35 dyne/cm ²
Drag Coef. ($\tau/\rho U^2_{10}$)	1.2×10^{-3}

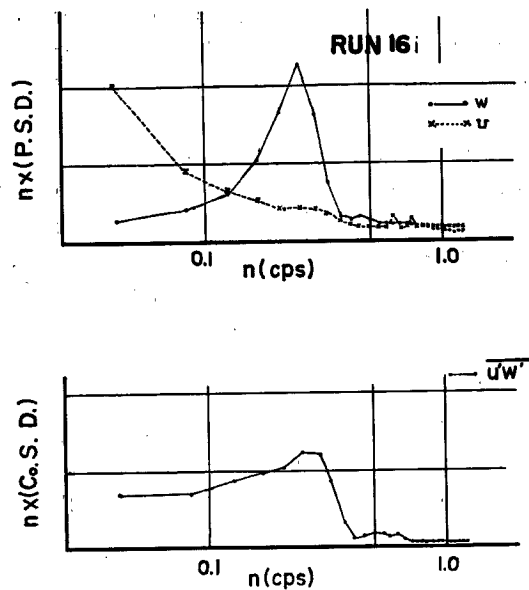


Fig. 9 Cospectrum between horizontal and vertical wind velocity components (Run 16)

なっていないところからこの周期の船の動きすなわち波と関係のある変動がなお存在していることがわかる。これが補正の方法が不完全なために生じたものか大洋中の波のある状態でそのような変動が実在するのかを明らかにするだけの材料は今のところ発見できず更に検討が必要である。

補正方法にもまだ十分な吟味が必要な段階であることは確かであるが、今仮にこの補正方法が正しいものと考えて解析を進めてみたところ次のような結果が得られた。すなわち真の風のベクトル平均風向に平行な風速変動成分 u と垂直成分 w を求めてそれらの variance, covariance ならびに cospectrum の計算をしてみると風向方向及び垂直方向の風速変動の標準偏差は各々 $\sigma_u = 42 \text{ cm/sec}$ $\sigma_w = 27 \text{ cm/sec}$, 摩擦速度 $u_* = 18 \text{ cm}$ となり, 風速約 5 m/sec の状態で期待される値としては不合理ではない値と考えられる結果が得られた。この結果に基づいて運動量の輸送量を求めてみると $\tau = 0.35 \text{ dyne/cm}^2$ となり摩擦係数 ($\tau/\rho u^2$) は 1.2×10^{-3} となって, 海面上の値としてこれまでに報告されている値⁶⁾ とも良く一致する結果となる。このような合理的な値が得られたことによって先の補正が正当なものであったと断定するのは早計であるがあまりに大きな誤りもないようである。

一方別な立場からこの場合の摩擦速度を算出し上の結果と比較してみた。すなわち風速変動のスペクトルは高周波数側で理論的に予想される $-5/3$ に近い勾配を示し減少している。Kolmogorov⁷⁾ の仮説によれば慣性小領域に入っていると考えられる周波数域のエネルギー密度 $F(k)$ は $F(k) = c\epsilon^{2/3} k^{-5/3}$ で示される。ここで c は普遍常数で ϵ は単位質量当りのエネルギー逸散量である。また k は波数であり n/u によって置かえられる。この関係から ϵ を求めることができる。ここでは 1 cps 付近の密度 (band 巾 0.4 cps) を用いての計算を行ったがその結果垂直風速, 水平風速成分の power spectrum から求めた値はそれぞれ $\epsilon_w = 5.7 (\text{cm}^2/\text{sec}^3)$, $\epsilon_u = 19 (\text{cm}^2/\text{sec}^3)$ となった。なおその際 c の値としては垂直風速に対しては Panofsky and Pasquill⁸⁾ に従って 0.20 , 水平風速に対しては 0.15 を用いた。さらに簡単のために Pasquill⁹⁾ に従って $\epsilon = \frac{u_*^3}{kz}$ なる関係が成立するとしてこの式から u_* を求めてみると垂直速度 w から求めた ϵ_w を用いた場合 $u_{*w} = 16 \text{ cm/sec}$, 同様に ϵ_u を用いると $u_{*u} = 24 \text{ cm/sec}$ となる。これらの値は先の風速の補正結果から直接法で求めた $u_* = 17 \text{ cm/sec}$ と大差ない。このように風速成分の power spectrum から Kolmogorov の仮説を用いて求めたものも, 風速変動から直接求めたものもほとんど同じ値が得られた。この点から先の船の動揺に対する補正がかなり確かなものでないかと考えることができるようである。これらの結果はに Table 3 示されている。

更に u と w の間の cospectrum を作って運動量の輸送の様子を調べてみたものが Fig. 9 である。この図の横軸に周波数, 縦軸に uw cospectrum が plot してある。又参考のために上段に垂直速度 w と水平風速 u の power spectrum が plot してある。cospectrum の最大を示す周波数帯は垂直速度 w の power spectrum の最大を示す周波数帯と一致しており水平風速 u よりも垂直速度 w の影響を大きく受けていることがわかる。cospectrum はそれより高周波数側では急激な減少を示して値も小さくなっている。従ってこの高周波数側での運動量輸送はきわめて小さいと考えられる。

6. 結 語

航行中の船舶を利用して乱流輸送量を直接測定する方法はまだ緒についたばかりであり, この方法の有効性についても慎重な検討が必要な段階である。しかしいくつかの未解決な問題を含んでいるとはいえ, 得られた結果は不合理なものではなく海上での広範な地空相互作用の資料の集積のための有望な方法であると考えられる。

7. 謝 辞

この研究は集中豪雨特別観測-GARP の研究計画の一部として行なわれたものである。この研究を進めるに当たって観測船凌風丸に乗船する機会を与えて頂いた気象庁関係者の皆様更に乗船中色々とお世話頂き観

測の実施を容易にして頂いた凌風丸の白川船長以下乗組員の皆様に心から感謝するとともにこの研究の過程で貴重な御助言を載いた防災研究所石崎浚雄教授と理学部山元龍三郎教授に感謝したい。さらにこの研究費の一部は文部省科学研究費に依った。

参 考 文 献

- 1) Bunker, A.F. : Turbulence and Shearing stresses measured over the north Atlantic ocean by an airplane-acceleration technique. Journ. Meteor. Vol. 12, 1955, pp. 445-455.
- 2) Swinbank, W.C.: The measurement of vertical transfer of heat and water vapor by eddies in the lower atmosphere, Journ. Meteor, Vol. 8, 1951, pp. 135-145.
- 3) Mitsuta, Y.: Sonic anemometer-thermometer for general use. Journ. Meteor. Soc. Japan, Series II, 44, 1966, pp. 12-24.
- 4) Sano, Y. & Mitsuta, Y.: On the dynamic response of the hygrometer using fine thermocouple psychrometer. Special contribution, Geophy. Institute, Kyoto Univ., Vol. No. 9, 1968.
- 5) Mitsuta, Y.: Application of sonic anemometer-thermometer to the studies of vertical eddy transport processes in the atmospheric boundary layer. Special Contribution, Geophy. Institute, Kyoto. Univ. No. 8, 1968.
- 6) Hasse, L & Brocks, K.: On the determination of vertical transports of momentum and heat at sea. WMO-IUGG Symposium on numerical weather prediction, 1968, (to be published).
- 7) Kolmogorov, A. N.: The local structure of turbulence. Doklady ANSSR, 30, 1941, pp. 301-305.
- 8) Pasquill, F. and. Panofsky, H. A.: The constant of the Kolmogorov law, Quart. J. R. Met. Soc., Vol 89, 1963, pp. 550-551.
- 9) Pasquill, F.: The determination of eddy diffusivity from measurements of turbulent energy. Quart. J. R. Met. Soc., Vol 89, 1963, pp. 95-106.