

航行中の船舶による海上での乱流測定法について (2)

光田 寧・花房龍男・米谷俊彦

MEASUREMENT OF TURBULENT FLUXES FROM A MOVING SHIP (2)

By *Yasushi* MITSUTA, *Tatsuo* HANAFUSA and *Toshihiko* MAITANI

Synopsis

The method of direct measurement of turbulent fluxes over sea surface from a moving ship proposed in the previous paper is tested, and fluxes of momentum, sensible heat and water vapor are obtained from the data of ocean expedition of 1968. The ocean expedition is made again on the East China Sea on R.V. Hakuohmaru in the summer of 1969. Power spectral analysis of wind speed fluctuation over sea surface is made over a wide range from about 10^{-4} cps to 3×10^2 cps.

1. は し が き

著者等は第1報¹⁾において航行中の船舶による乱流輸送量の直接測定法を提案し、昨年夏に九州西方海上の東シナ海で行った試験観測の資料を用いてこの方法が海洋上の広範囲にわたる大気と海洋の相互作用に關する資料を収集するために有望な方法の一つであることを示した。

本年度(昭和44年)には前回の研究を更に進めて船体運動の補正方法の精度を検討し、さらに運動量に加えて熱量、水蒸気量の輸送量の算定を行った。それと併行して本年7月にふたたび集中豪雨特別研究—GARPの一環として東京大学海洋研究所の白鳳丸を利用して東シナ海で昨年と同様な観測を行った。その際に得られた観測結果を用いて風速変動の広帯域($10^{-4} \sim 3 \times 10^2$ cps)にわたるスペクトル解析も行った。

このような広帯域にわたる風速変動のスペクトラムは海洋上の大気境界層に於ける大気現象の様相を知る上で重要であるばかりでなく、乱流輸送量を測定する際の観測時間の長さを決定するといった面などにも応用出来る有用な知識である。

この論文ではまず海上での風速変動の広帯域スペクトルについて述べ、それから船上での乱流測定における船体の動揺の補正法の検討とそれを応用して計算した運動量、熱量および水蒸気の垂直乱流輸送量を報告する。

2. 観 測

昨年度(昭和43年度)の観測の内容は第1報¹⁾に述べたとうりであるが、本年度の観測は東京大学海洋研究所の白鳳丸(Photo. 1)に国内の各研究機関からの研究者が集まって行った地空相互作用の総合観測²⁾の一部として行った。気象要素の垂直乱流輸送量の直接測定のための測器は昨年度に用いたものに改良を加えて利用した。すなわち風速測定には超音波風速計を前部マストの頂部に設置し、その感部の一部に気温および湿度の変動要素を測定するための熱電対乾湿計を取り付けた。取り付けの様子はPhoto. 2に示すとうりである。補正のための船体の動揺の測定は記録装置を置いた観測室内の床の上に設置した傾斜計を用いて行った。

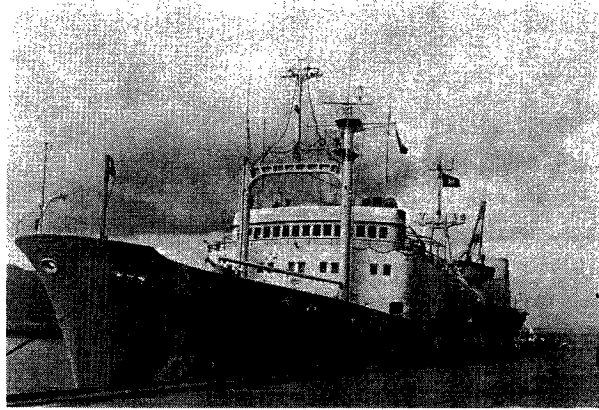


Photo. 1 The R.V. Hakuho Maru.

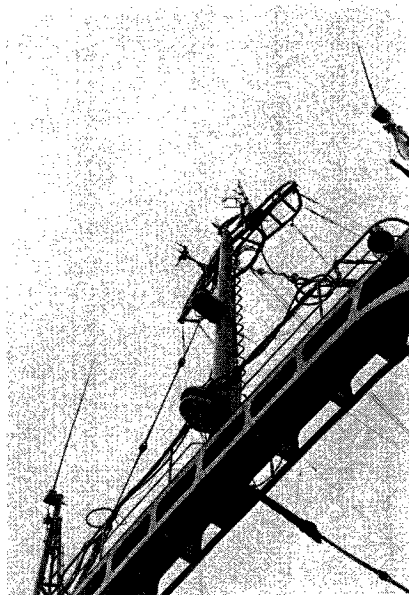


Photo. 2 The foremast of the Hakuho Maru and the sonic anemometer (port side of the propeller anemometer).

本年には乱流輸送の測定以外に前述のように風速変動の測定を行ったが、そのための測器は白鳳丸の前部マストに設置されているプロペラ式風速計とその近くに設置した高周波数変動を測定するための熱線風速計 (Kanomax 28-3111) である。

各測器からの信号はすべてマルチプレクサー (TEAC AU-151) によって多重化してデータレコーダ (TEAC R-200) の DR チャンネルに記録した。これは観測終了後、データ処理装置によって直接数値化、計算を行うことが容易となるからである。なお、熱線風速計の出力の記録については高周波数側の振巾の小さい変動成分まで再生させるために信号を3つのアクティブフィルター (通過域 10 cps 以下, 1~100 cps, 10 cps 以上) によって3つの帯域に分けレベルを調節した後テープレコーダの別々のチャンネルに記録する

という方式を用いた。

観測は昭和44年7月2日から8日にかけて東シナ海中央部で行い、この間乱流輸送測定のための測定を14回、熱線風速計による風速変動の高周波数成分の測定を6回行うことができた。そしてこの期間にプロペラ式風速計による風速は連続して別のペンレコーダに記録した。その観測の概要は Table 1 に示すとうりである。

Table 1 The list of the observations for the 1969 expedition.

a) Turbulent flux measurements.

Run GARP '69	Date	Time		Wind direction	Relative wind speed m/sec from	Air temp. °C	Sea surface temp. °C	Ship speed		
	July	h	m						h	m
1	2	20	30	21	24	SW	3 left 10°	22.8	22.7	13 kt
2	4	08	35	09	15	SSW	11 left 20°	22.8	21.0	stop
3	4	20	48	21	30	SW	11 left 10°	22.7	21.0	stop
4	4	23	10	23	50	SSW	11 right 40°	22.7	21.0	stop
5	5	00	20	01	14	WSW	9 right 45°	22.3	21.0	stop
6	6	13	50	14	50	SW	9 right 30°	22.9	21.3	stop
7	7	11	28	12	15	SSE	2 left 30°	23.1	21.4	stop
8	7	14	12	15	06	SSW	5 right 15°	23.9	21.6	stop
9	7	16	43	17	35	SSW	9 left 40°	23.7	21.6	stop
10	7	17	47	18	40	SSW	11 left 30°	23.6	21.6	stop
11	7	20	08	21	10	SSW	11 left 45°	23.2	21.5	stop
12	7	22	33	23	27	SSW	11 left 35°	23.2	21.4	stop
13	8	00	52	01	40	SSW	13 right 40°	23.5	21.4	stop
14	8	10	15	11	08	W	14 left 10°	22.0	21.4	stop

b) High frequency fluctuation measurements.

Run GARP '69	Date	Time		Wind direction	Relative wind speed m/sec from	Air temp. °C	Sea surface temp. °C	Remarks		
	July	h	m						h	m
H-1	6	19	25	20	03	SSW	7 left 40°	22.0	21.4	5103 gantry
H-2	7	16	04	19	30	SSW	6 left 25°	24.1	21.7	5105 gantry
H-3	7	19	00	—	—	SSW	11 left 30°	23.4	21.6	5105 mast
H-4	7	21	20	22	18	SW	10 left 30°	23.2	21.4	5105 mast
H-5	7	23	35	—	—	SSW	13 left 25°	23.1	22.4	5105 mast
H-6	8	02	08	02	32	SSW	15 left 15°	23.0	21.4	5105 mast

これらの観測記録は現在解析中であるが現在までに解析の終了した風速変動の広帯域スペクトルについて次章に述べる。

3. 海洋上における風速変動のスペクトル

海上における風速変動のスペクトル解析の例は陸上におけるもの^{3),4),5)}に比較するとその数は少なく、特に大洋上の風速変動の広帯域スペクトルについては Byshev & Ivanov⁶⁾ による論文がみられるに過ぎない。彼等の解析によれば海上においても陸上と同じくいわゆる energy gap がみられるということが述べら

Table 2 Portions of wind speed

Run No.	Date and time	Sensor	Averaging time (sec)	Frequency range (cps)
4+5	July '69 3 rd 13. 07 ~ 21. 30	Propeller anemometer	25.0	$1.3 \times 10^{-4} \sim 2.0 \times 10^{-2}$
3	3 rd 08. 40 ~ 13. 06	"	2.5	$1.3 \times 10^{-3} \sim 2.0 \times 10^{-1}$
4	3 rd 13. 07 ~ 17. 15	"	2.5	"
5	3 rd 17. 23 ~ 21. 30	"	2.5	"
H-5-L	{ 7 th 23. 35 ~ 8 th 00. 10	Hot wire anemometer	0.375	$9.0 \times 10^{-2} \sim 1.3 \times 10^{-0}$
H-5-L-1	"	"	0.025	$1.3 \times 10^{-1} \sim 2.0 \times 10^{+1}$
H-5-M-1	"	"	0.0017	$2.0 \times 10^0 \sim 3.0 \times 10^2$
H-2-M-1	7 th 16. 04 ~ 16. 05	"	0.0017	"
H-5-H-1	7 th 23. 35 ~ 23. 36	"	0.0017	"

れているが、用いた資料が不完全なものであるため確実なものとはいえない。今回の観測を行った位置は陸地より 300 km 以上離れており、大洋上での風の性質を充分代表出来るものと考えられるし、船がほぼ 1 週間にわたって錨を下ろして停止していたため長周期までの風速変動を測定するためには好適の条件を有していた。

スペクトル解析にあたっては一度に広いスペクトル帯にわたって計算することは不可能であるから先きに著者らが陸上の資料を解析する場合に行ったのと同様にいくつかの周波数帯に分けて計算を行った。また測器の性能にも制限があるので低周波数側はプロペラ式風速計による記録を、高周波数側は熱線風速計による記録を用いた。解析を行った資料は Table 2 に示すとうりである。パワースペクトルの計算は Tuckey の方法によって、京都大学の電子計算機 KDC-2 を用いて行った。

Fig. 1 から Fig. 6 までは計算の結果得られた各々のスペクトルを示したものである。各々の図の横軸は周波数 (n) を対数で示し、縦軸はスペクトル密度 ($F(n)$) と周波数 (n) の積を直線目盛りで記入してある。Fig. 1 はプロペラ型風速計の風速の 25 秒間平均値を約 8 時間半にわたって解析したもので 10^{-4} cps から

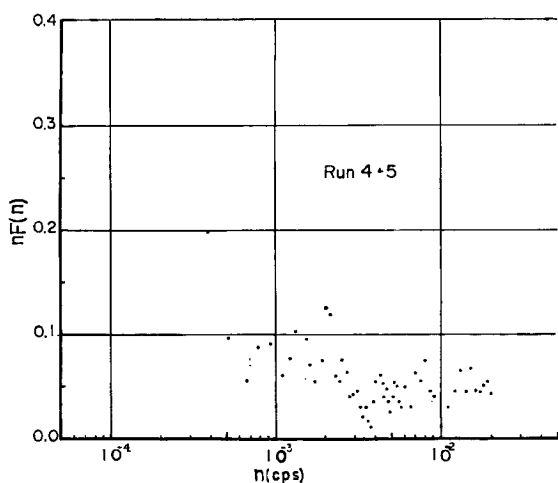


Fig. 1 Long period wind speed spectrum as observed by the propeller anemometer.

spectra and related quantities.

Number of lags	Degree of freedom	Weather	Mean wind speed (m/s)	Standard deviation (m/s)	Intensity of turbulence
150	13	●	10.4	1.2	0.11
"	82	●	11.3	1.1	0.10
"	80	●	10.8	1.3	0.12
"	"	●	10.0	1.2	0.12
"	"	⊙	13		
"	"	⊙	"		
"	"	⊙	"		
"	74	⊙	"		
"	99	⊙	"		

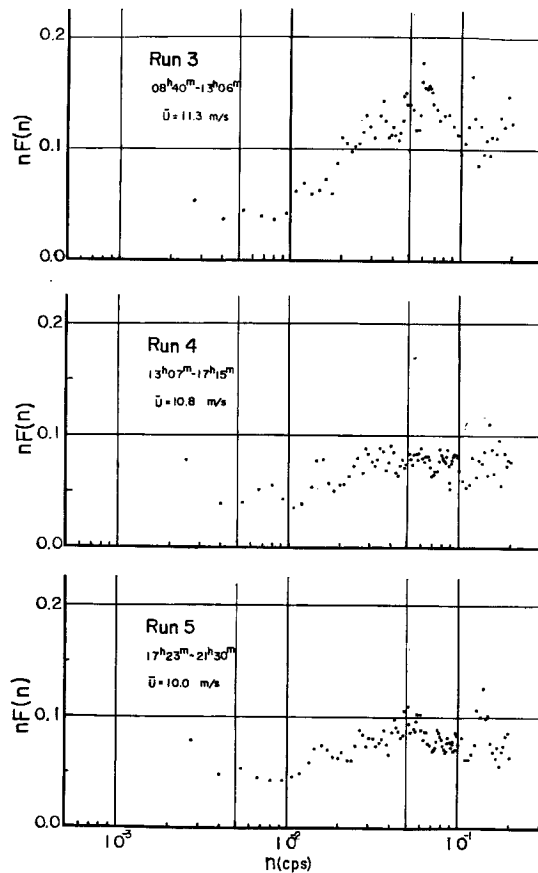


Fig. 2 Long period wind speed spectra as observed by the propeller anemometer.

10^{-2} cps までの範囲のスペクトルが得られている。陸上においてはこの範囲はいわゆる energy gap に入る範囲であるが、 5×10^{-4} cps すなわち周期30分ぐらいから長いところからスペクトルの増大がみられ、また 2×10^{-3} cps すなわち周期約10分ぐらいのところに小さい山がみられる。これらの観測を行った期間中比較的雨が強かったことから、この10分程度の周期をもつ小さな山は対流現象に関連したものとも考えられ、これが海上での特色であるとは断定出来ない。

Fig. 2 はほぼ4時間ずつのプロペラ型風速計による観測の結果を解析したもので、いわゆる micro-turbulence に対応する山の部分を含むものである。山の位置はいずれの場合も $5 \sim 10 \times 10^{-2}$ cps のところにあるが、この位置は陸上でみられる 10^{-2} cps 程度のところよりは少し高周波側によっている。しかしそれでも波の周期よりは長いところにある。いずれも連続した時間のものであるが山の高さは Run 3 と Run 4

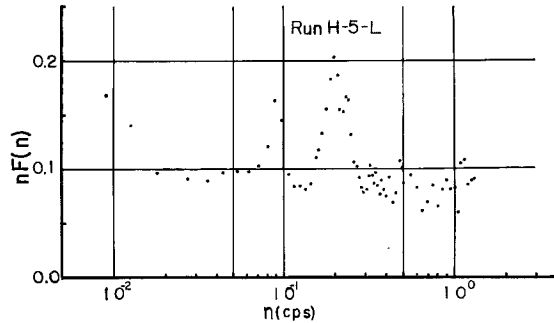


Fig. 3 Short period wind speed spectrum as observed by the hot wire anemometer.

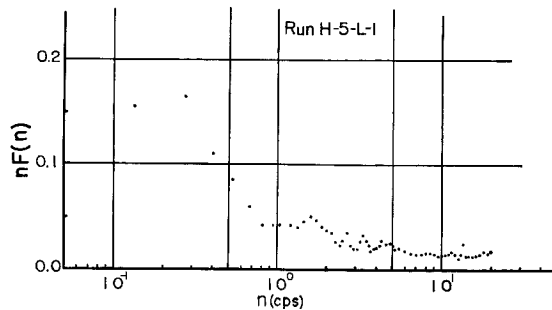


Fig. 4 Short period wind speed spectrum as observed by the hot wire anemometer.

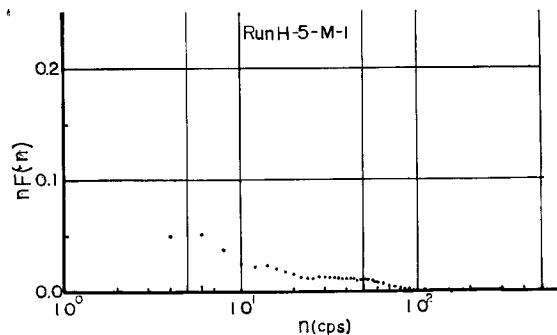


Fig. 5 Short period wind speed spectrum as observed by the hot wire anemometer.

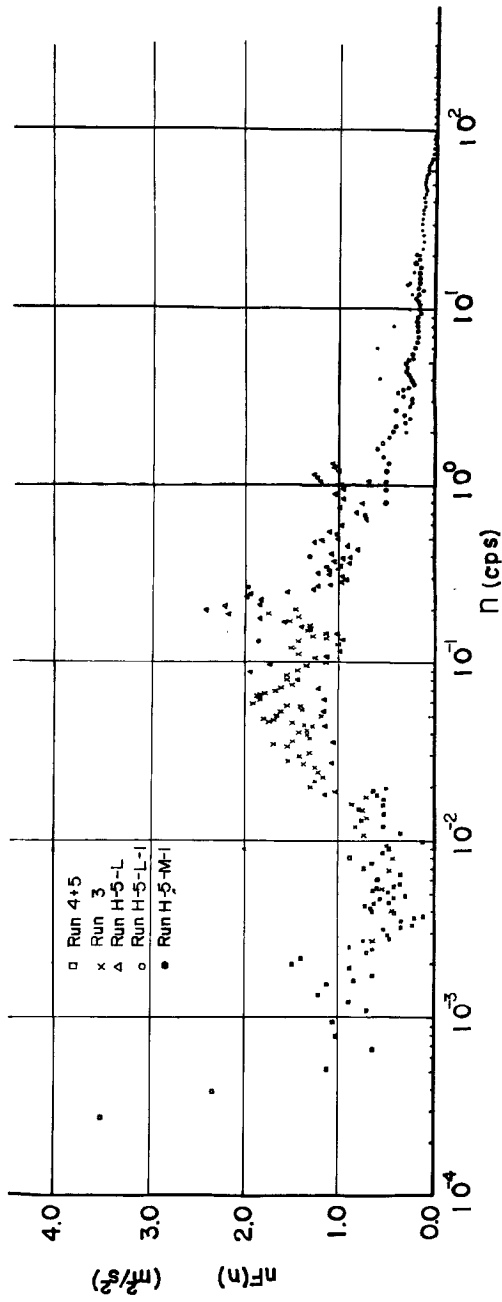


Fig. 6 Synthesized wide range wind speed spectrum over ocean.

よび5とはかなり異なっている。風速はこれらの期間を通じてほとんど変化していないが、海面状態において Run 3 の時間中に波高の増大がみられる。このことは波の発達とその上の風の乱れとの間に関係のあることを示すものとも考えられるがはっきりしない。

Fig. 3 は熱線風速計の低周波数成分を用いて計算したものである。この周波数帯の中にはっきりした山が2つみられるが、これは風速に船体の動揺を補正しない値を用いたために船体の pitching と rolling の周期に対応した変動が生じたものと思われる。自然の風に波に対応した周期の変動が実際に存在するかどうかは船体の動揺の補正を行なった上でなければ考察を進めることは出来ない。この点については後章で述べる。

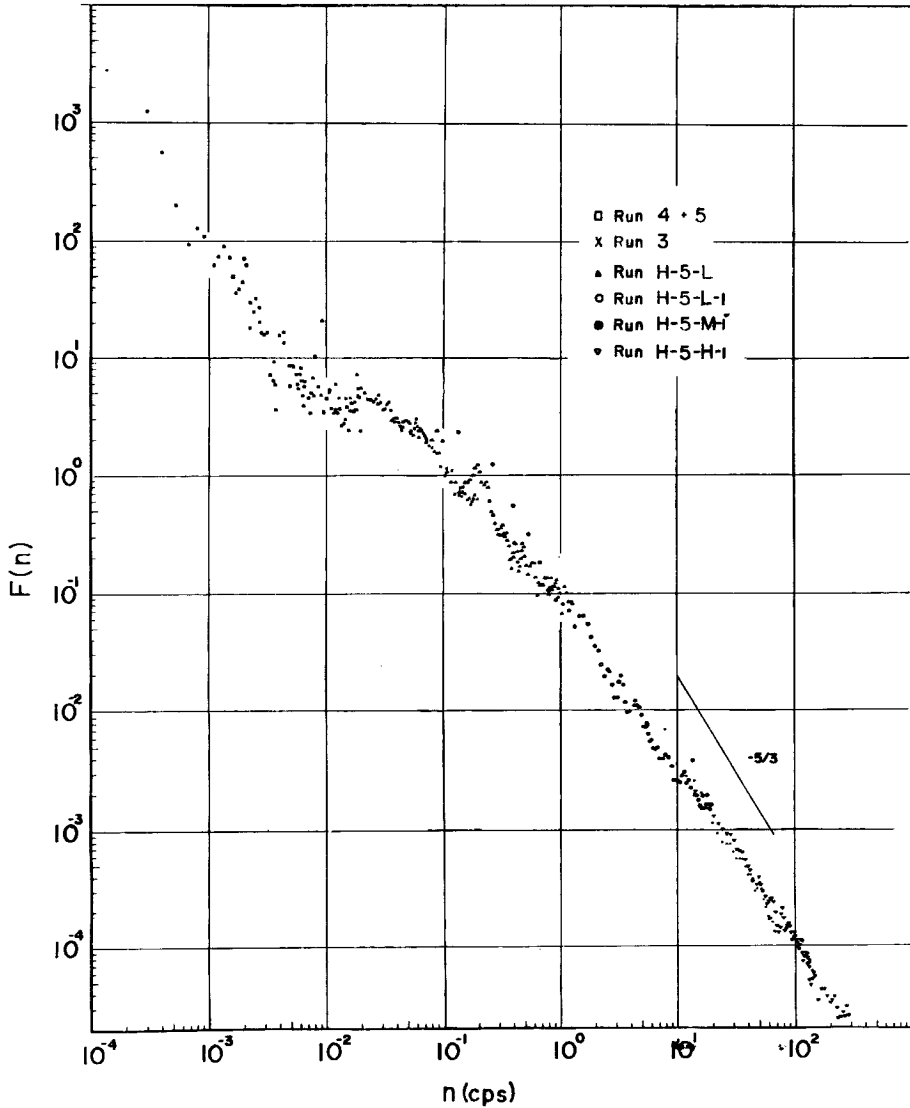


Fig. 7 Wide range wind speed spectrum as plotted on logarithmic scale.

Figs. 4, 5 はさらに高周波数側のスペクトルを示すものであるが energy 密度は急激に減少している。

これらのスペクトルを接続して一つの図にまとめたものが **Fig. 6** である。海面上における風の乱れのエネルギーの分布をこの図によってみることができる。上にも述べたとうり、いわゆる energy gap は $10^{-3} \sim 10^{-2}$ cps 程度の範囲にとどまって陸上でみられるよりはその巾は狭く、しかも 2×10^{-3} cps 付近に小さな山がみられる。surface layer 中の shear のため生じる mechanical turbulence すなわちいわゆる micro turbulence に相当する山は陸上でみられるものよりは多少高周波数側によっているが、それでも海の波あるいはうねりの周波数よりは低いところに山がある。高周波数側の energy の減少の様子は陸上においてみられるものと大差ない。この記録では風速の船体の動揺による影響を補正していないが、船体の動揺のスペクトルは非常にはっきりした山を示していることが前回の観測からわかっており¹⁾、その山以外の周波数帯のスペクトルへの影響は少くないから、この図では 10^{-1} cps および 2×10^{-1} cps 付近の山にのみ船体の動きの影響が現われていると考えてよい。

いま **Fig. 6** に示したスペクトルをスペクトル密度と周波数との関係のみみたものが **Fig. 7** である。この図では両軸は対数で目盛ってある。全体の形は **Fig. 6** から予想されるところであるが、1 cps 付近から始まるスペクトル密度が周波数の⁻⁵/₃に比例して減少するいわゆる慣性小領域が非常に高い周波数まで広がっており、今回解析した 300 cps 付近まで及んでいることは明らかである。しかし、ここに示した解析の例は Run H-5 の場合のみを用いたものであるが、この場合よりも風が弱い Run H-2 の場合の高周波数側のみを解析してみると **Fig. 8** のような結果が得られた。Run H-5 の場合は風速約 13 m/sec であり Run H-2 の場合は風速約 6 m/sec である。この図からも明らかのように、スペクトルの形は少し異なっており、20 cps 付近からスペクトル密度は急速に減少し始めてほぼ周波数の⁻³に比例して減少している。このことは Run H-2 の場合には慣性小領域の高周波数側の限界がその付近にあったことを示しており、乱れの性質を研究する上において興味ある問題である。分子粘性による dissipation がこれくらいの周波数から大き

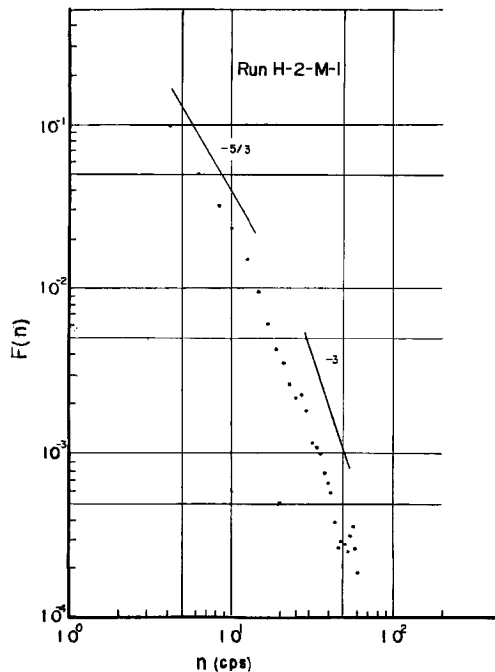


Fig. 8 High frequency wind speed spectrum in moderate wind case.

く作用するものとすれば、このような観測から乱れの dissipation rate を直接求めることも可能となる。しかし、Run H-2 の場合にこの限界が非常に高いところにあった理由についても考察を行わねばならぬ問題が残されている。

4. 風速変動成分の補正法の検討

航行中の船舶から垂直乱流輸送量を直接測定するための方法として著者等が提案した方法は前報¹⁾で述べたとおりであるが、マストの頂部に3次元的な風速成分の測定可能な超音波風速計を設置し、それによって測定された船体に相対的な風速を別に測定した船体の運動を補正して真の風速を求め、さらに別に測定した気象要素の変動成分と組み合わせる乱流輸送量を求めようとするものである。

風速の補正式は次のとおりである。

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

ここで R と α はマスト頂部から船の重心を結ぶ線分の長さとその鉛直線となす角度であり、 u_{obs} , v_{obs} , w_{obs} は船体に相対的な風速成分、 θ と ϕ は船体の傾斜角であり、 \dot{X}_0 , \dot{Y}_0 , \dot{Z}_0 は船の重心の移動速度成分である。

これらの式の各項の大きさが実際にどの程度のものであるかを調べるために1968年度観測の Run 16 の場合を例にとって船体平行成分 u と垂直成分 w の計算式の各項の大きさを計算したものの時間変化を Fig. 9 および Fig. 10 に示す。水平成分については Fig. 9 に示す通りであるがこの場合相対的に大きな値を示すのは第1および第2項のみである。このように Pitching による船の回転によって生じる運動が風速の変動量とほとんど同じ程度の大きさを示すことは船の動揺の測定の精度を上げることがこの観測において重要であることを示している。Fig. 10 は垂直成分の補正を示すものであるが、この場合も垂直成分の測定値と Pitching 角の時間変化を含む項が大きい値を示している。Rolling が相対的に効果が小さいのは船体の運動軸からの回転半径が相対的に小さいことによるものと考えられる。

なお、これらの補正計算においては船体の横方向運動 \dot{Y}_0 および垂直運動 \dot{Z}_0 を無視しているが、この正当性に関する資料は今回得られていない。しかし同時に行った波の観測において、東大海洋研究所平啓介氏等²⁾は加速度計を用いて観測を行い波の測定に際して船体の重心の垂直運動は無視出来るとの結論を出しているので、この観測においても余り大きな影響を及ぼさないものと考えても良いであろう。

5. 垂直乱流輸送

前報¹⁾においては船舶上での乱流輸送量の測定結果としては運動量輸送の例のみを示したが、1968年度の観測結果を用いて他の物理量の輸送についても計算を進めた結果を以下に示す。

1968年度の観測における乱流輸送量を Table 3 に示す。運動量輸送については前報に述べたとおりであるが顕熱および潜熱の輸送は共に上向きであり各々、 $0.27 \text{ mcal/cm}^2/\text{min}$ と $8.1 \text{ mcal/cm}^2/\text{min}$ である。比較のために船で別に測定した平均の気象要素を用いてバルク法で計算したこれらの輸送量は $1.1 \text{ mcal/cm}^2/\text{min}$ と $25 \text{ mcal/cm}^2/\text{min}$ である。これらを比べると直接法とバルク法の Bowen 比はいずれも 0.033 と 0.042 でかなり近い値であるが、絶対値はバルク法によるものが数倍も大きい。

海面上での乱流輸送の機構を明らかにするために、風速の垂直成分と運動量、気温及び水蒸気量の変動量との間の cospectra を計算した結果が各々のスペクトルと共に Fig. 11 に示してある。運動量（水平風速）、気温、水蒸気量のスペクトルは周波数の増大と共に減少していく形を示しており、前節に述べた風速のスペクトルの形とほぼ同じ形になっているが、風速の垂直成分だけは 0.25 cps 付近のうねりの周期に一致したところにはっきりとした山をもつ形になっている。運動量と垂直成分の cospectrum はこのうねりの

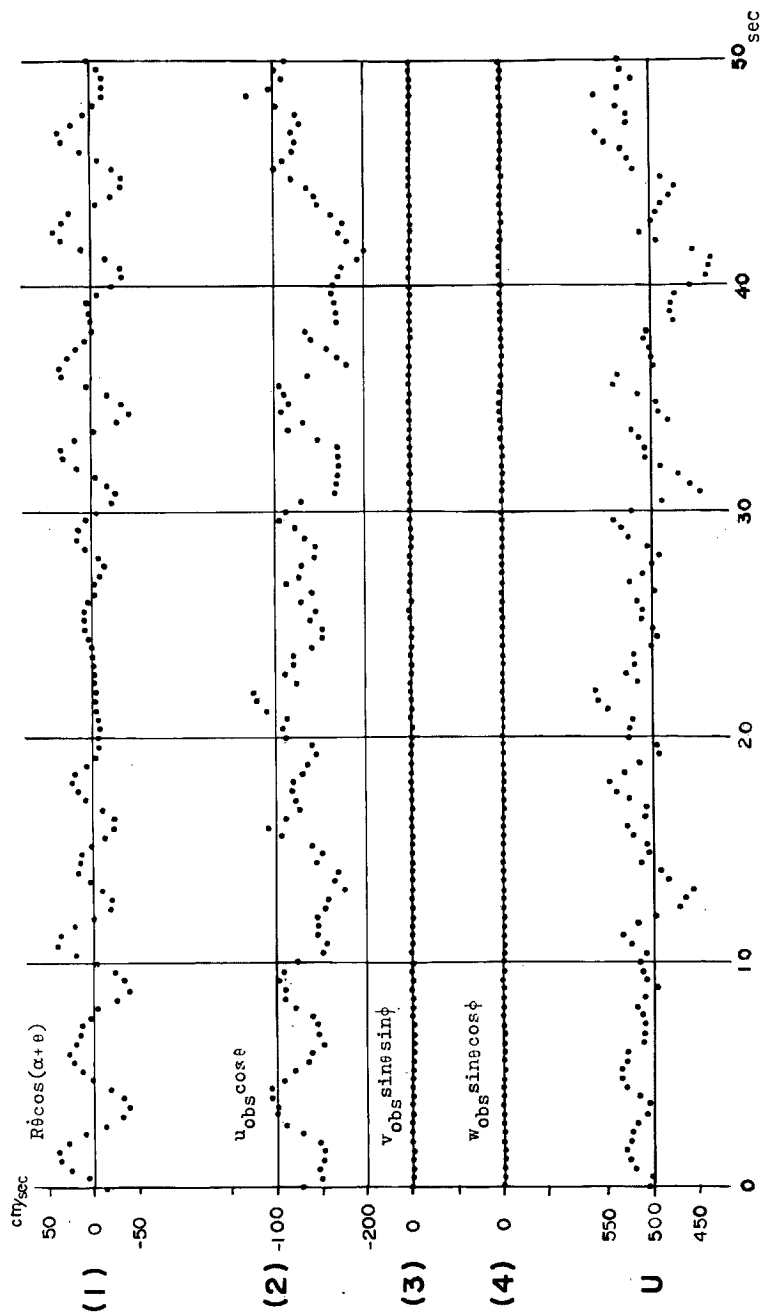


Fig. 9 Time changes of the terms of the correction equation for bow component of wind.

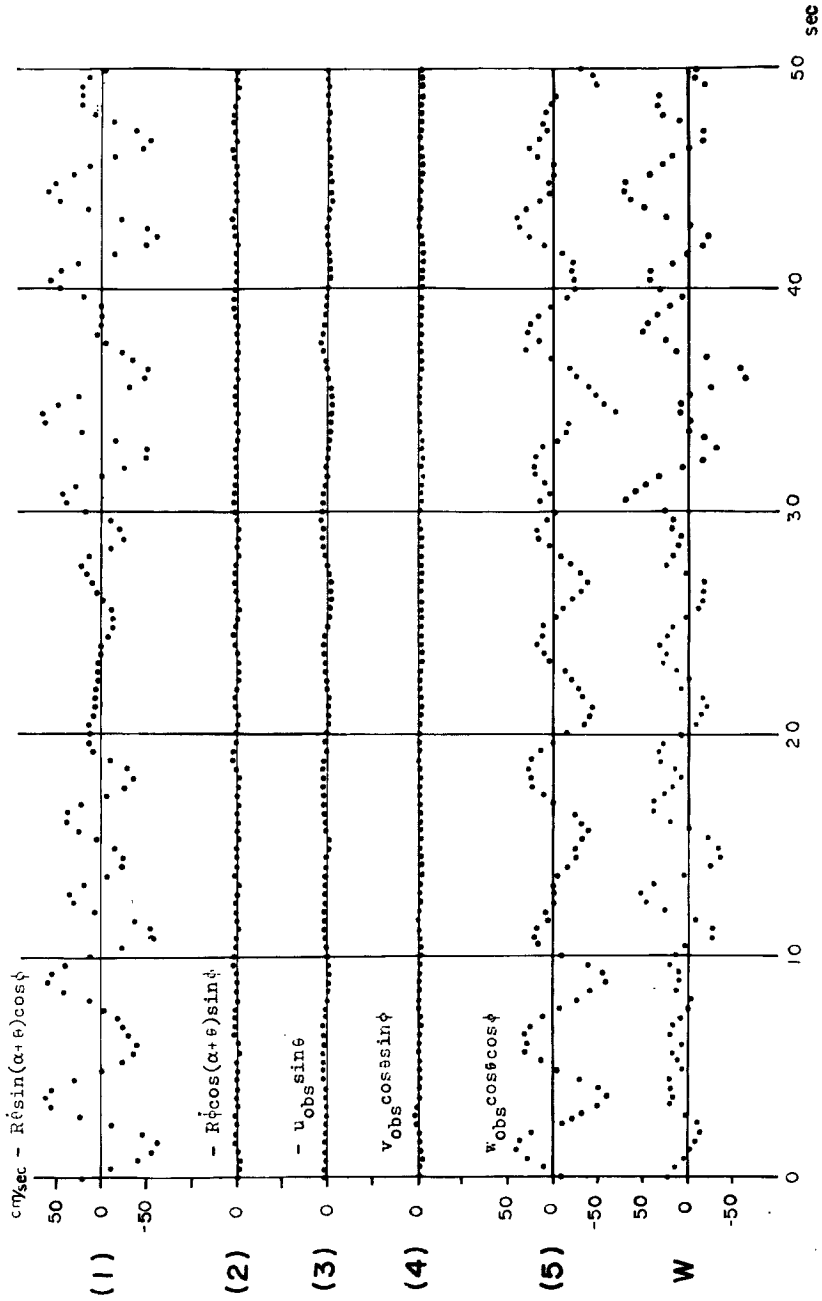


Fig. 10 Time changes of the terms of the correction equation for vertical component of wind.

Table 3 The results of analysis for Run 16 (1968)¹⁾.

Mast	Wind velocity	U_a	5.0 m/sec
	Temperature	θ_a	25.2°C
	Spec. humidity	q_a	19.0 g/kg
Sea surface	Temperature	θ_w	25.3°C
	Satur. spec. humidity	q_w	20.1 g/kg
Eddy corr. method	Momentum flux	$\tau_e = -\rho \overline{w'w'}$	0.35 dyne/cm ²
	Sensible heat flux	$H_e = C_p \rho \overline{w'T'}$	0.27 mc cal/cm ² min
	Latent heat flux	$Q_e = L \rho \overline{w'q'}$	8.12 mc al/cm ² min
Bulk method	Momentum flux	$\tau_b = \rho C_d' U_a^2$	0.35 dyne/cm ²
	Sensible heat flux	$H_b = C_p \rho C_d' (\theta_w - \theta_a) U_a$	1.1 mc al/cm ² min
	Latent heat flux	$Q_b = L \rho C_d' (q_w - q_a) U_a$	25.1 mc al/cm ² min

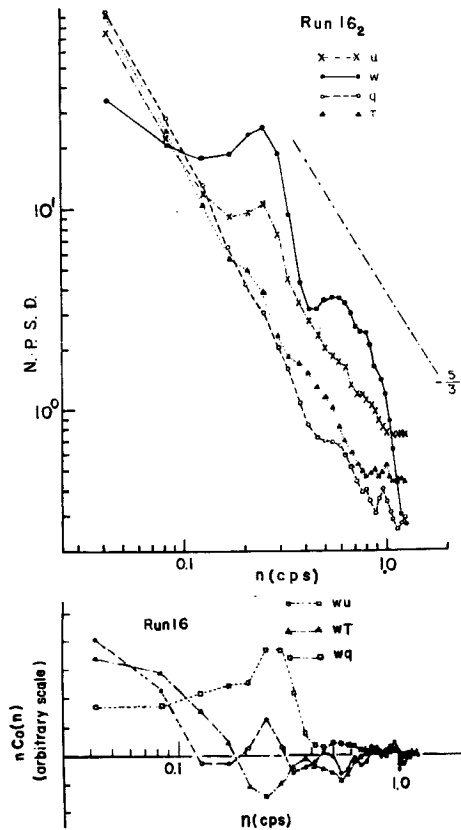


Fig. 11 Spectra and cospectra of meteorological entities over ocean.

周期に対応した山をもっているが、気温と水蒸気量の垂直成分に対する cospectra はこのような山が見えず低周波数側で大きく輸送に寄与する部分がある。このような差異は輸送の機構に本質的な差があるためでは

ないかと思われるが、他の例についても詳しく調べた上でなければ結論は出せない。現在本年度の観測の結果の解析も行いつつあるので後日詳細な検討を行う予定である。

6. 結 語

本報においては前回の報告に引き続いて航行中の船舶による乱流量の測定結果を用いて船上で観測された風速値から真の風速を求める補正式の検討と前回の運動量に加えて熱量、水蒸気量の輸送量の算定を行った。又それと併行して本年7月に東シナ海で行った観測資料を用いて風速変動の広帯域 (10^{-4} cps $\sim 3 \times 10^2$ cps) にわたるスペクトル解析を行った。そのスペクトルの形は全般的には陸上で観測されたスペクトルと類似しているが、海洋上での特色ではないかと思われる特色もいくつか見出された。

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われたものである。この研究を進めるに当って観測船白鳳丸に乗船する機会を与えて頂いた東京大学海洋研究所関係者の皆様、更に乗船中色々と御世話頂いた白沢船長以下乗組員の皆様に感謝すると共に白鳳丸の観測において協力を頂いた他研究機関の皆様にも感謝したい。なお、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) 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29号，A，1969，pp. 245~259.
- 2) Mitsuta, Y., T. Hanafusa and T. Maitani: Measurement of turbulent fluxes over the Sea. Preliminary Report of The Hakuho Maru Cruise KH-69-3 (GARP Cruise), 1969, pp. 16~18.
- 3) Van der Hoven, I.: Power spectrum of horizontal wind speed in the frequency range from 0.00007 to 900 cycles per hour. J. Meteorol. Vol. 14, No. 2, 1957, pp. 160~164.
- 4) 石崎澆雄・光田 寧・花房龍男：風速変動の長周期成分について，京都大学防災研究所年報，第11号A，昭43.3，pp. 489~497.
- 5) 石崎澆雄・光田 寧・佐野雄二：風速変動の長周期成分について（2），京都大学防災研究所年報，第29号A，昭44.3，pp. 227~235.
- 6) Byshev, V.I. and Yu. A. Ivanov: The time spectra of some characteristics of the atmosphere above the ocean. Izv. Atmospheric and Oceanic Physics, Vol. 5, No. 1, 1969, pp. 17~28.
- 7) 平 啓介・竹田 厚・石川浩治・稲田 亘・渡部 勲：波浪スペクトルの船上測定，昭和44年度海洋学会秋季大会発表，昭44.