

長大栈橋を利用した大気・海洋相互作用の観測

光田 寧・土屋 義人・塚本 修
大滝 英治・岩谷 祥美

TURBULENCE MEASUREMENTS OF AIR-SEA INTERACTION PROCESSES WITH OBSERVATIONAL PIER

By Yasushi MITSUTA, Yoshito TSUCHIYA, Osamu TSUKAMOTO,
Eiji OHTAKI and Yoshiharu IWATANI

Synopsis

Turbulence measurements were carried out over the sea on an observational pier in order to study air-sea interaction processes. Turbulent transport of momentum were studied in terms of drag coefficient. According to the preliminary analysis, the value is $C_D=1\sim2\times 10^{-3}$ in the high wind condition. This should be studied further in relation to wave height data.

Intensive observation were made in order to study transport processes of heat, water vapor and carbon dioxide. Turbulent flux of carbon dioxide is found to be downward and the value is much smaller than over vegetables. The bulk transfer coefficient of sensible heat and water vapor were $C_H=2\sim3\times 10^{-3}$, $C_E=1\sim2\times 10^{-3}$ respectively. Spatial structures of wind and temperature turbulence are also studied.

1. は し が き

全地球表面の約3分の2を占める海洋とその上にある大気との相互作用、即ち、熱・運動量・物質などの交換過程を解明することは、種々の点から見て重要な問題である。ここでは大気乱流の立場からこれらの交換過程を研究する方法をとる。

大気と海洋との相互作用のうちまずとりあげたのは、海面に大きな波が生じた時にその上での風速変動はどのようなものであり、風と波との間にどのような運動量交換が行われているかという問題である。大気から海洋への運動量輸送は抵抗係数というパラメータを用いて表わされることが多いが、これについては Kondo¹⁾, Amorocho and DeVreis²⁾, Hsu³⁾ など多くの研究がなされている。しかし、強風時の抵抗係数の値については精度の良いデータが少なく、まだ解明されていない点が多い。

また、運動量以外の熱・水蒸気は大気へのエネルギー、水分の供給として重要であり、炭酸ガスは近年気候変動の問題として重要性が指摘されている。これまで海面上で炭酸ガス輸送量を測定した例はあまりないが、Ohtaki and Matsui⁴⁾ によって開発された赤外線を利用した炭酸ガス・水蒸気変動計によってこれを直接測定することが可能になった。更に海洋上あるいは海岸付近に水平方向に拡がりをもった大型の構造物(例えば栈橋など)を建設する場合にこれに作用する風の力を知る必要があるが、そのためには海洋上の風の空間的構造についての知識が必要である。ここではこのような点についても研究を行ってゆくこととした。

海洋上での大気乱流の観測はこれまで航空機、船舶、ブイ等を用いて行われてきたが、これらで測定した

大気乱流のデータにはプラットホームの動揺による成分が含まれており、これを除去する処理は非常に煩雑なものとなる。幸いにも、昭和60年秋に防災研究所附属大潟波浪観測所に観測用栈橋が新営されて波浪観測等が行われている。これは海につき出した固定したプラットホームであるため動揺補正の必要がなく、著者らはこれを利用して先に述べたテーマについての大気乱流の観測を開始した。ここではこの観測の概要と、予備的な研究結果について述べる。

2. 観測システム

本栈橋は新潟県中頸城郡大潟町の京都大学防災研究所附属大潟波浪観測所にあり、ほぼ北東から南西にのびる海岸線に直角に 250 m 沖合にのびている。先端部は両脇に 50 m ずつ腕がのびている T 字型をしており (Fig. 1 参照)、床面の高さは海面上約 9 m、先端部付近の水深は 4 m 程度である。

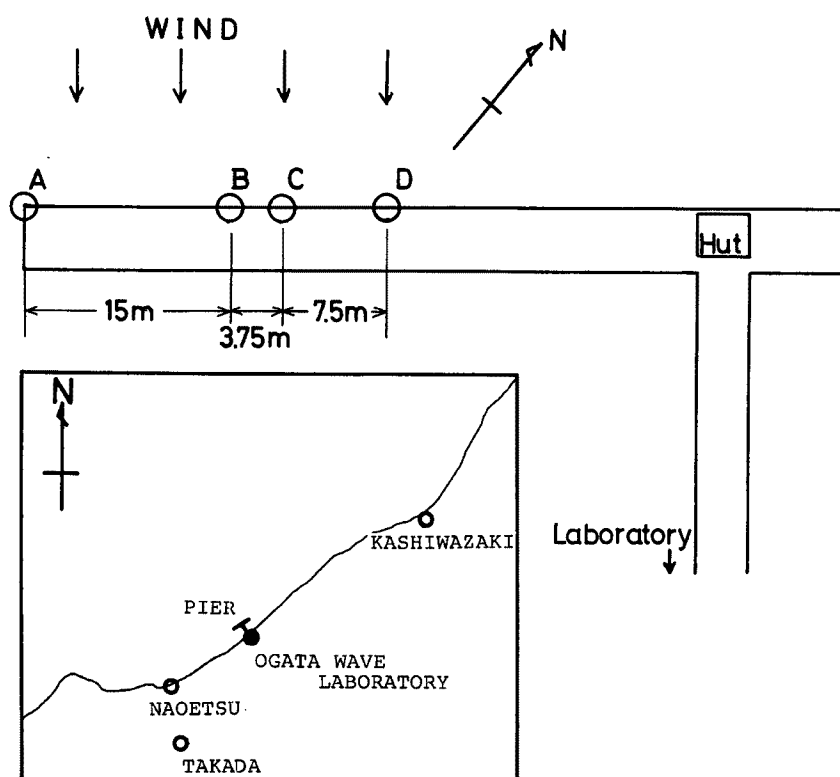


Fig. 1. Location of the observation pier at Ogata Wave Laboratory and arrangement of observational points on the pier

海面上の運動量交換過程を明らかにするために、栈橋南西端 (Fig. 1 の A 点) に測風塔を設置した。これには海面上 11 m の高さに三次元超音波風速計 (海上電機, μ DAT-300), 4 高度に気象庁型三杯風速計 (小笠原計器, CE-300) が設置してあり、風速三成分と気温の乱流変動及び風速の鉛直分布の測定が随時可能な状態にある。三杯風速計の平均海面からの高さはそれぞれ 10 m, 8.33 m, 6.33 m, 5.33 m である。測風塔での観測の様子を Photo 1 に示す。

栈橋南西端の測風塔より 50 m 離れた避難ハウス内に風速計の変換器をおき、風速計の信号はここから直流電圧の形で約 300 m 離れた観測所本館の観測室に導かれる。ここではノイズと雷サージを防ぐために LC フィルターとダイオードを付加してある。Fig. 2 のブロック図に見られるようにこれら 8 成分の信号は各

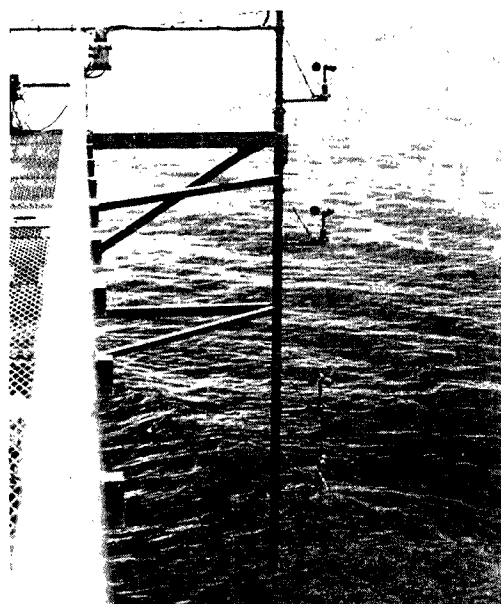


Photo. 1. Wind measurement at observation pole

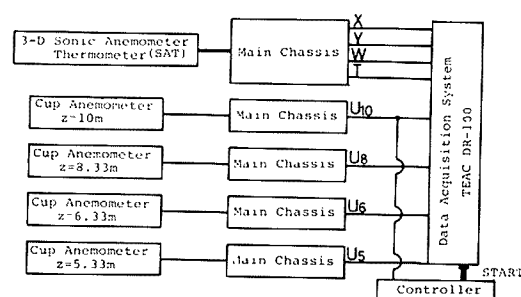


Fig. 2. The block-diagram of observational system in high wind

チャンネル 10 Hz で AD 変換してデジタルでカセットテープに収録される (TEAC, DR-100)。このデータ収録装置は 10 m 高度の三杯風速計の 10 分間平均風速が予め設定した風速値を超えたときに、自動的に収録を開始するシステムをとっている。テープ 1 巻には約 25 分間の記録が収録できる。本観測は昭和 60 年 12 月よりスタートしたが、初

年度は震災などのため十分な記録は得られなかった。

また運動量以外にも熱・水蒸気・炭酸ガスの交換過程の解明のために 1986 年 10 月 11 日～10 月 13 日の間に特別観測を行った。栈橋上の Fig. 1 に示した B 点に三次元超音波風速温度計と熱電対乾湿計、炭酸ガス・水蒸気変動計を組合せて設置し、各フラックスの直接測定を行った。これらのデータと併せて日射量、表面水温の測定も行っている。同時に風速変動の空間的構造を知るために Fig. 1 に示す C 点、D 点にも三次元超音波風速温度計を設置し、A 点、B 点のものと合せて 4 地点での風速三成分と気温の乱流変動を測定した。各組合せにより最小 3.75 m から最大 25.25 m までの空間の乱れの分存を測定することができる。これらの信号は Fig. 3 のブロック図に示すように、B 点でのデータはパーソナルコンピュータ (NEC, PC9801) に、A～D 点のデータはデジタル磁気テープの収録装置 (TEAC, DR-1000) に各々 10 Hz でサンプリングして記録した。

3. 強風時の海面上での運動量輸送

Table 1 は A 点での全成分の記録が得られるようになった 1986 年 4 月以降の強風観測の結果をまとめたものである。表の左側には 4 高度での風速と乱れの大きさの分布を右側には超音波風速温度計で測定した結果を示してある。ここに示す風向は真北から時計回りに測ったもので、 $45^{\circ} \sim 135^{\circ}$ が海側からの風ということになる。ここには風向と同時に吹上角も示したが、風向によって $0^{\circ} \sim 5^{\circ}$ 程度の値をとり、これは栈橋本体の影響が現れているものと考えられる。これを補正するために、吹上角が 0 となるように uw 平面内で座標系を回転し、次のような処理を施した (例えば Phelps and Pond⁵⁾)

$$u' = \hat{u} \cdot \cos \phi + \hat{w} \cdot \sin \phi \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$w' = \hat{w} \cdot \cos \phi - \hat{u} \cdot \sin \phi \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここで ϕ は吹上角、 $\hat{u}$ 、 $\hat{w}$ は変換前の座標系での風向方向、鉛直方向の風速成分、 u' 、 w' は変換後の座標系での風速成分を示している。このような座標変換を行った後に各成分のリニアトレンドを除去して統計処理を行った結果が Table 1 の右半分に示したものである。また Fig. 4 に示したものは乱流変動の時系列の一例を風速三成分 (u , v , w) と気温 (T) 及び運動量、顕熱の輸送に関連する ($u'w'$, $w'T'$) について表したものである。運動量については下向きの、顕熱については上向きの輸送がスパイク状の変動となって見られ

Table 1. The results of observations in high wind conditions

Run	Date/Start Time	Cap U_{10}		Cap U_6		Cap U_2		Cap U_1		σ_u	σ_v	σ_w	$\overline{u'u'}$ (m/s) ²	$\overline{v'v'}$ (m/s) ²	$\overline{w'w'}$ (m/s) ²	σ_T (°C)	$\overline{w'T'}$ (m/s·°C)	z/L
		$\bar{U}$	σ_u	$\bar{U}$	σ_u	$\bar{U}$	σ_u	$\bar{U}$	σ_u									
19	1986. 4. 6 07:30	11.5	2.18	11.1	2.13	10.5	2.03	10.6	2.05	11.6	1.00	0.500	-0.259	-0.104	1.92	0.306	0.071	-0.0814
20	" 08:52	13.1	2.01	12.8	1.98	12.0	1.93	12.0	1.96	12.0	2.08	0.513	-0.275	-0.265	1.91	0.472	-0.015	0.0157
21	" 09:11	14.8	3.79	14.2	3.61	13.4	3.45	13.5	3.42	15.2	1.73	0.740	-0.573	-0.271	2.48	0.355	0.111	-0.0386
22	4. 7 08:40	14.7	2.24	14.2	2.22	13.5	2.14	12.5	2.13	14.7	1.46	0.630	-0.387	-0.244	1.79	0.465	0.145	-0.0911
23	4.11 22:14	13.6	2.00	13.1	1.95	14.9*	2.32	12.4	1.91	14.0	1.21	0.607	-0.387	-0.164	1.97	0.468	0.124	-0.0778
24	4.12 08:36	13.5	1.46	13.3	1.46	12.9	1.46	11.7	1.40	13.1	1.22	0.496	-0.343	-0.228	1.99	0.235	0.043	-0.0323
25	4.15 11:05	12.2	2.20	12.4	2.24	12.1	2.22	12.5	2.10	—	—	—	—	—	—	—	—	—
27	5. 9 17:02	13.7	1.75	13.3	1.76	14.9	1.75	12.5	1.72	—	—	—	—	—	—	—	—	—
28	5.16 12:24	13.5	1.47	13.2	1.49	13.6	1.95	12.4	1.47	—	—	—	—	—	—	—	—	—
29	8.22 11:24	4.5	0.36	4.3	0.35	4.5	0.44	3.8	0.35	4.3	—	—	-0.013	0.0043	6.11	0.081	-0.003	0.377
30	11.25 18:03	10.8	1.21	10.5	1.21	9.8	1.20	9.9	1.23	12.5	1.20	0.437	-0.0726	0.166	0.464	0.270	0.052	-0.402
31A	" 20:18	9.2	1.08	8.9	1.05	8.3	1.04	8.5	1.06	10.6	1.20	0.363	-0.0373	-0.0386	0.331	0.327	0.051	-1.071
31B	11.26 6:58	14.0	1.65	13.5	1.61	12.6	1.58	12.7	1.64	15.4	2.06	0.677	-0.201	-0.154	0.847	0.612	0.018	-0.302
32A	" 8:07	14.7	2.32	14.1	2.29	13.3	2.20	13.4	2.22	15.9	1.86	0.714	-0.321	-0.225	1.26	0.695	0.201	-0.167
32B	11.26 09:14	14.7	2.03	14.1	2.00	13.3	1.94	13.4	1.99	16.0	2.47	0.691	-0.216	-0.034	0.843	0.714	0.182	-0.274
33A	12. 4 09:24	16.8	1.72	16.5	1.75	15.6	1.72	15.4	1.72	18.9	1.64	0.714	-0.562	0.261	1.57	0.464	0.115	-0.0412
33B	12. 4 10:29	17.0	1.86	16.8	1.88	16.0	1.84	15.8	1.85	19.6	1.45	0.659	-0.553	0.167	1.44	0.588	0.190	-0.0698
34A	12. 7 10:42	17.2	1.93	16.9	1.96	15.8	1.89	15.9	1.89	19.1	1.93	0.711	-0.456	0.203	1.25	0.594	0.125	-0.0614
35A	12.10 17:31	16.8	1.65	16.5	1.67	16.2	1.81	15.4	1.61	19.1	1.20	0.636	-0.406	0.169	1.11	0.020	0.001	-0.0006
35B	12. 7 10:42	16.1	2.04	15.8	2.05	15.4	1.92	14.8	1.99	18.0	1.67	0.671	-0.350	0.135	1.08	0.501	0.094	-0.0686
36A	12.29 06:07	14.0	1.79	13.7	1.78	13.2	1.76	13.0	1.73	16.8	1.76	0.573	-0.231	0.065	0.818	0.572	0.133	-0.181
36B	12.30 02:56	16.4	1.71	16.2	1.76	15.4	1.76	15.1	1.72	20.4	1.42	0.638	-0.443	0.199	1.06	0.435	0.099	-0.0507
37A	12.31 17:47	17.0	1.72	16.7	1.73	17.2	1.85	15.6	1.70	20.4	1.49	0.706	-0.505	0.094	1.21	0.029	0.002	-0.0008
37B	1. 3 12:51	17.0	2.13	16.6	2.23	16.7	2.27	15.6	2.11	19.4	2.78	0.864	-0.730	0.774	1.93	0.337	-0.033	0.0079
38A	1. 8 05:02	15.1	1.92	14.7	1.95	18.5*	3.97*	13.9	1.87	18.2	1.65	0.720	-0.323	0.188	0.975	0.601	0.033	-0.0271
38B	" 08:24	15.7	1.88	15.6	1.85	14.9	1.80	14.5	1.76	20.5	1.72	0.623	-0.388	-0.176	0.923	0.408	0.047	-0.0294
39A	1.13 05:20	14.5	2.44	14.5	2.38	15.6	3.35	13.6	2.19	18.6	2.01	0.654	-0.450	-0.377	1.30	0.507	0.143	-0.0716
39B	1.13 11:51	17.1	2.14	16.7	2.15	16.7	2.18	15.6	2.04	20.8	1.94	0.731	-0.459	0.282	1.06	0.721	0.117	-0.0568
40A	1.14 22:02	15.5	1.50	15.3	1.55	14.8	1.56	14.0	1.52	20.2	1.34	0.587	-0.298	0.148	0.730	0.378	0.058	-0.0539
40B	1.17 07:57	17.2	1.98	17.1	1.99	16.7	1.97	15.6	1.88	22.1	1.63	0.629	-0.358	-0.159	0.732	0.262	0.062	-0.0437
41A	1.17 15:47	16.5	2.41	16.1	2.41	15.4	2.41	14.7	2.40	20.6	2.11	0.735	-0.292	0.290	0.546	0.674	0.017	-0.0230
41B																		

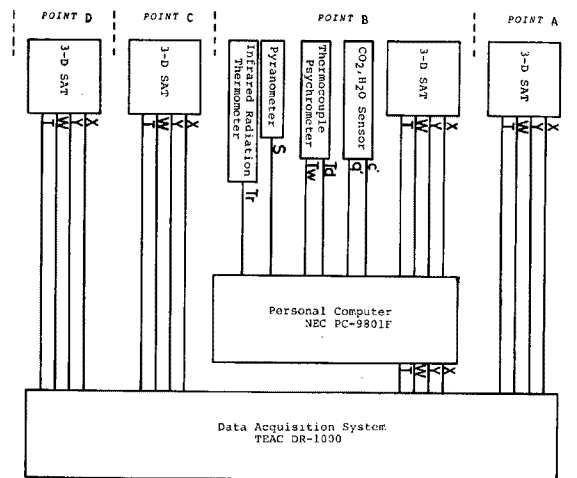
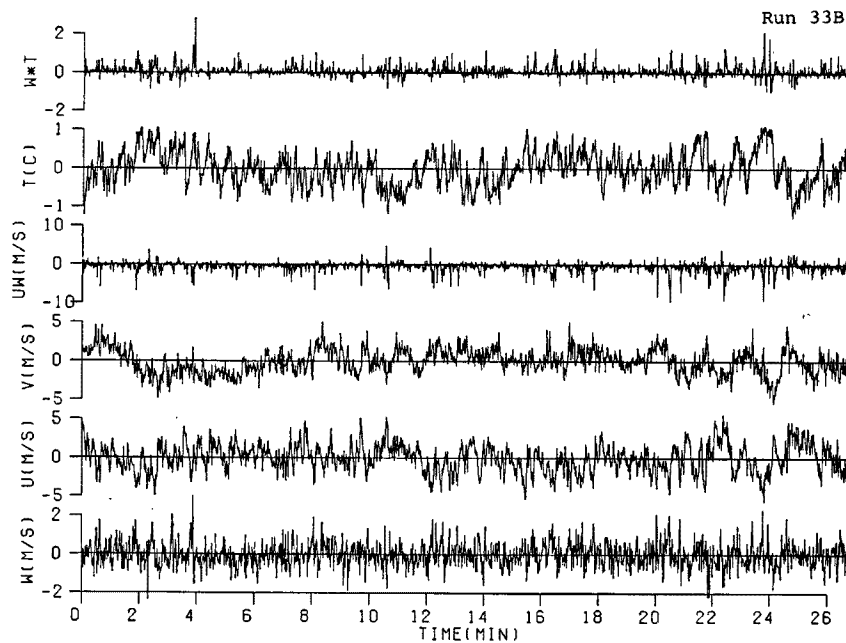


Fig. 3. The block-diagram of intensive observation in Oct. 1986

Fig. 4. An example of time series of three components of wind velocity, temperature and cross products of w' and u' , and w' and T'

る。

一般に平坦な地表面上での運動量輸送量、 τ は次のような形で表わされる。

$$\tau = -\rho \overline{u'w'} \dots\dots\dots (3)$$

$$= \rho C_D \bar{U}^2 \dots\dots\dots (4)$$

ここで ρ は空気密度を表わし(3)式は渦相関法による表現をしたものである。一方(4)式はバルク法による表現で、 C_D は抵抗係数、 $\bar{U}$ は平均風速でふつうは10m高度の値を用いる。**Fig. 5**は(3)式と(4)式の関係、即ち $\bar{U}^2$ に対して乱流変動から求めた $-\overline{u'w'}$ の値をプロットしたもので、この各点と原点とを結んだ直線の傾

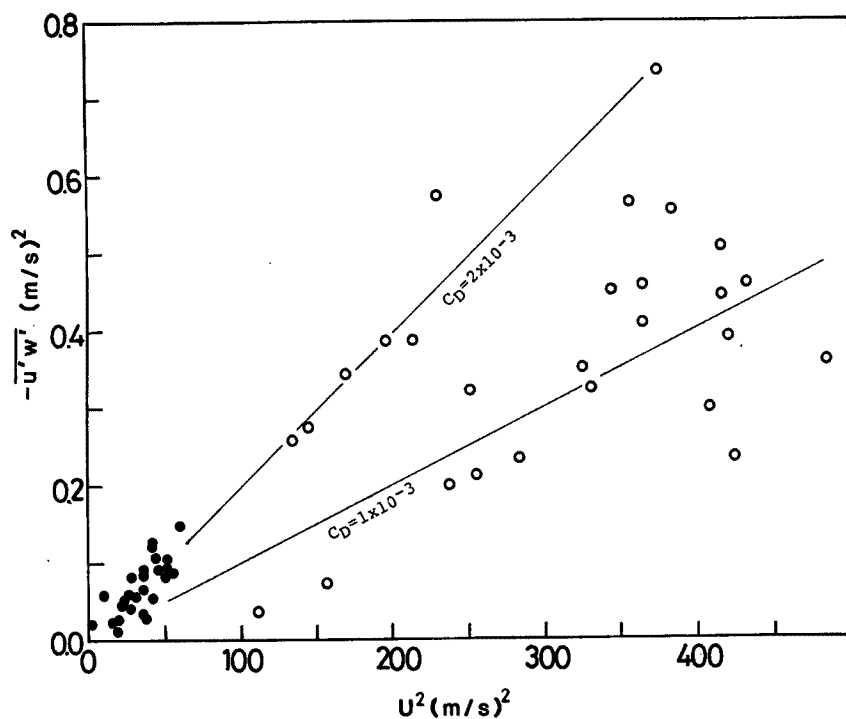


Fig. 5. Momentum flux. Directly measured covariance ($-\overline{u'w'}$) versus square of wind speed.

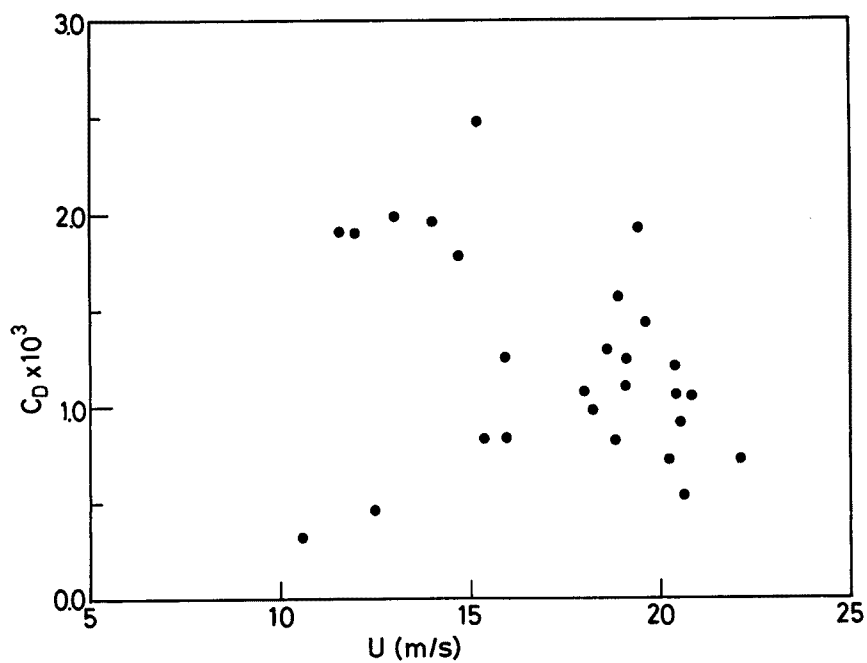


Fig. 6. Drag coefficient as a function of wind speed.

きが抵抗係数, C_D の値を表わすことになる。図中の白丸は **Table 1** に示したA点での通常の強風観測で得られたもの, 黒丸は後に述べる特別観測時にB点で得られたものを示す。図には $C_D=1.0 \times 10^{-3}$ と $C_D=2.0 \times 10^{-3}$ に相当する直線をひいてあるが多くのデータはほぼこの直線にはさまれた領域にある。また **Fig. 6** は得られた抵抗係数の値と風速との依存性を見たものであるが, これだけのデータでは顕著な傾向は見られず, さらに多くのデータを集積してゆく必要がある。

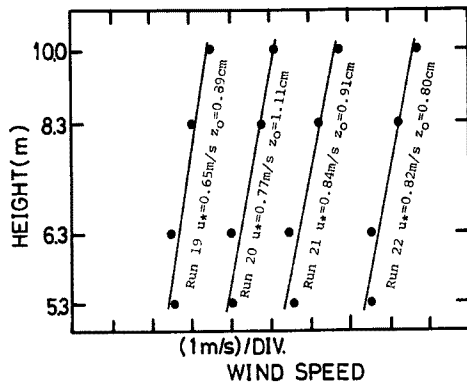


Fig. 7. Examples of vertical profile of wind speed. The solid lines are fitted by the least square method and the values of friction velocity (U_*) and roughness length (z_0) are noted in the figure.

一方, 風速の鉛直分布の測定例を **Fig. 7** に示す。これは縦軸に高度を対数目盛で, 横軸に風速をリニアにとってある。これに風速分布の対数則,

$$U_z = \frac{U_*}{k} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \dots\dots\dots (5)$$

を適用して最小自乗法で U_* , z_0 の値を求めたものを図中に数字と直線で示してある。ここで k はカルマン定数, U_* は摩擦速度 ($=\sqrt{-\overline{u'w'}}$), z_0 は粗度長, z は測定高度である。この方法で求めた U_* の値と乱流変動から求めた値との対応はあまり良くなかった。

4. 海面上での熱・水蒸気・炭酸ガスの乱流輸送

通常行っている強風観測以外に1986年10月に行った特別観測のうち, B点での熱・水蒸気・炭酸ガスの各フラックスの測定結果について述べる。

Fig. 8 は観測を行うことのできた10月12日と13日についての日射量, 気温, 比湿, 海面温度, 風向風速の15分毎の平均値の時間変化を示している。風向の 0° は海側から海岸線に直角に風が吹く場合で, 海側から風の場合を主に対象とした。当日の天気は曇りがちで, 一時的な雨もあり時おり雲間より日が射す程度であった。気温などに顕著な日変化は認められず, 平均的には海面上 10 m の高さでの気温は 18°C 程度, 海面温度は 22°C 程度の不安定成層をしていた。また比湿については海面上の飽和比湿は 16 g/kg 程度, 高さ 10 m では 8 g/kg 程度であった。

Fig. 9 は乱流変動から渦相関法で求めた運動量, 顕熱, 潜熱, 炭酸ガスの各乱流輸送量の時間変化を示している。各フラックスの値の大きな変化は風速の変化に主に依存しているようである。13日の昼間の風が強い場合の潜熱輸送量は約 200 W/m^2 (蒸発量にすると約 7 mm/day), 顕熱輸送量は約 80 W/m^2 で Bowen 比は 0.4 程度であった。これらの値は冬期東シナ海 (AMTEX)⁶⁾ での $E=800 \text{ W/m}^2$, $H=200 \text{ W/m}^2$ に比べるとかなり小さいが, 初冬の琵琶湖での値⁷⁾ とほぼ同程度である。

顕熱と潜熱 (水蒸気) の輸送についても, (4)式と同様に次の様な表現が可能である。

$$H = C_p \rho \overline{w'T'} = C_p \rho C_H \cdot \bar{U} \cdot \Delta T \dots\dots\dots (6)$$

$$E = \rho L \overline{w'q'} = \rho L C_E \cdot \bar{U} \cdot \Delta q \dots\dots\dots (7)$$

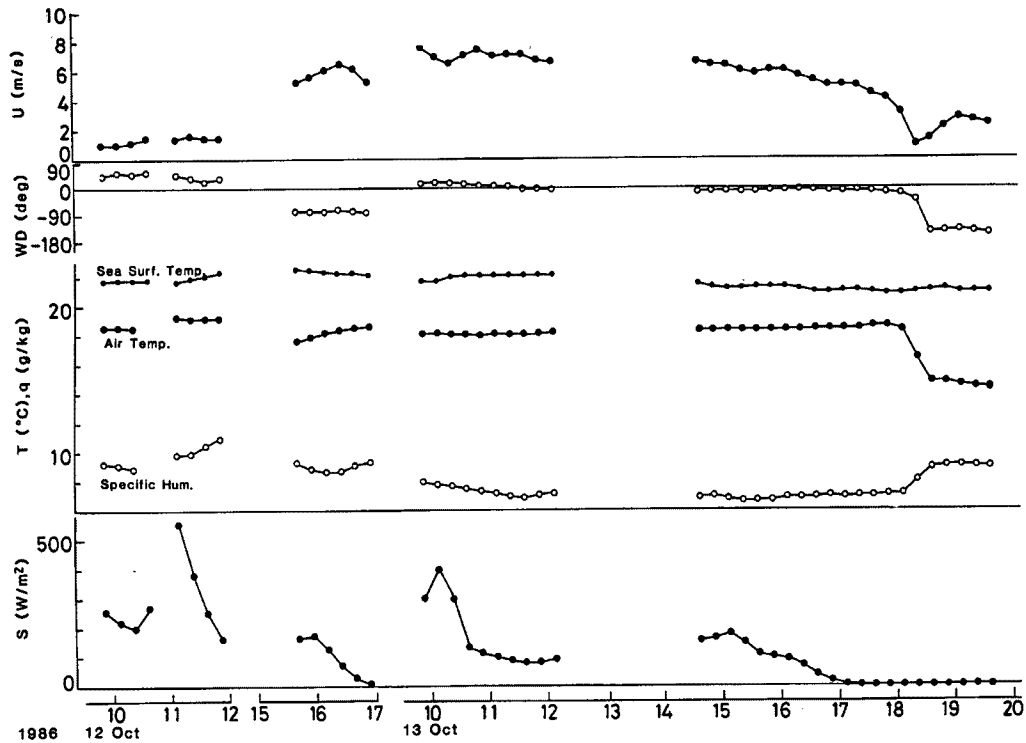


Fig. 8. Time changes of solar radiation (S), air temperature, specific humidity, sea surface temperature, wind direction (WD) and wind speed (U) during the intensive observation period

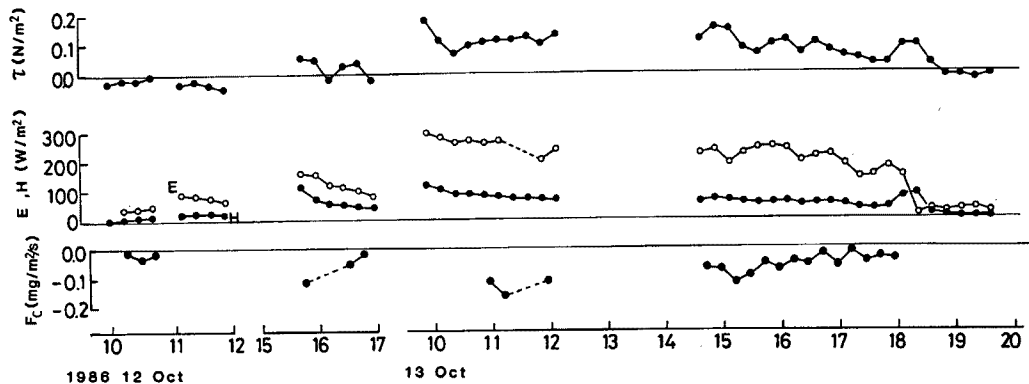


Fig. 9. Same as Fig. 8 except for turbulent fluxes of momentum (τ) sensible heat (H), latent heat (E) and carbon dioxide (F_c).

ここで C_H , C_E はそれぞれ運動量輸送の抵抗係数に対応するもので顕熱, 潜熱に対するバルク係数, ΔT は気温と海面温度との, Δq は比湿と海面飽和比湿との差である。これらの式の間を **Fig. 5** と同様にプロットしてみると **Figs. 10, 11** のような結果になる。かなりばらつきは大きいものの C_H については $2 \sim 3 \times 10^{-3}$ 程度, C_E については $1 \sim 2 \times 10^{-3}$ 程度の値をとるようである。

一方, 炭酸ガスのフラックスについては欠測が多いが輸送は下向きで最大でも $-0.17 \text{ mg/m}^2/\text{s}$ 程度である。これまで海面上での炭酸ガス輸送量を直接測定した例を見ると Sable Island では $0.02 \sim 0.04 \text{ mg/m}^2/\text{s}^{81}$,

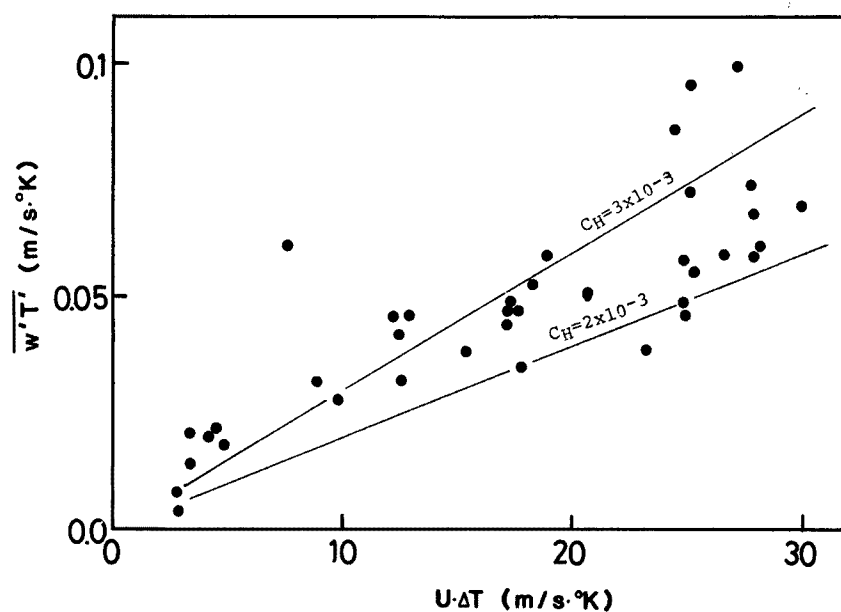


Fig. 10. Sensible heat flux. Directly measured covariance $(\overline{w'T'})$ versus $U \cdot \Delta T (\Delta T = T_s - T_a)$.

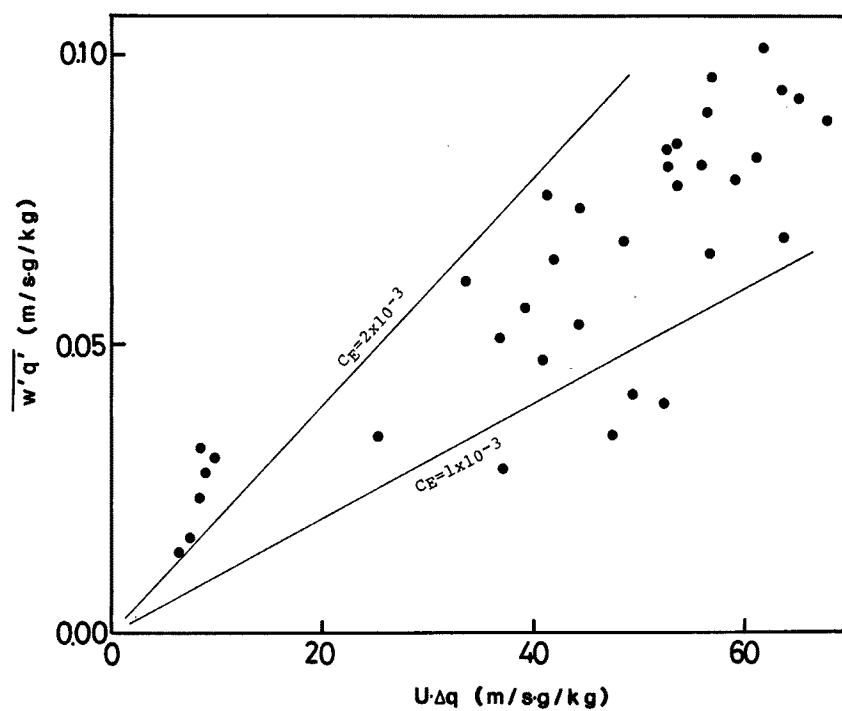


Fig. 11. Water vapor flux. Directly measured covariance $(\overline{w'q'})$ versus $U \cdot \Delta q (\Delta q = q_s - q_a)$.

Florida の海岸では $0.05 \sim 0.35 \text{ mg/m}^2/\text{s}^{91}$ であり、いずれも海面から大気への上向きの輸送となっている。これらはいずれも海水温度が上昇している期間における観測であり、本報告で示したものは逆に海水温度が下降している期間のものである。海水中の炭酸ガスの溶解度は水温が低いほど大きくなるのでここで見られた結果は不合理ではないと思われる。いずれにしてもフラックスの値は非常に小さく、一般に植物群落上で観測される値の $1/10 \sim 1/100$ 程度である。

現在の段階では海面直上での炭酸ガス濃度を測定することができないので、バルク法的な考えはそのまま適用できないが、輸送量 $\overline{w'c'}$ と風速との関係をプロットしてみると **Fig. 12** のようになる。風速が大きくなると急速にフラックスは大きくなる傾向が見られ、破線で示した $\bar{U}^2$ に比例する形に近いようである。

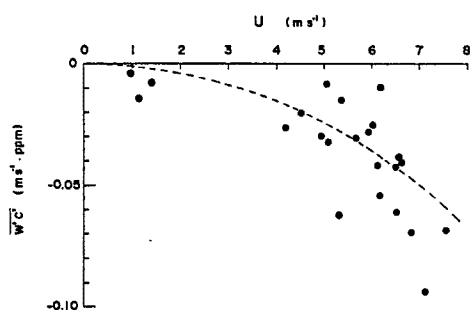


Fig. 12. Carbon dioxide flux. Directly measured covariance $\overline{w'c'}$ versus wind speed.

5. 乱れの空間構造について

今回の特別観測では **Fig. 1** に示したように栈橋上の4点で風速三成分と気温の変動を測定した。**Table 2** には風向が測線にほぼ直角でやや風の強い場合の、4点で測定した各統計量の値の一例を示してある。

() で示した数値は右端に示した4点でのアンサンブル平均値を1としてそれに対する比率を表わしている。平均値や乱れの標準偏差についてはほぼ5%以内のばらつきにおさまっているが、共分散 $\overline{u'w'}$, $\overline{w'T'}$ について20%程度のばらつきになる場合も見られ、特に $\overline{u'w'}$ についてばらつきが大きくなる傾向にある。

Fig. 13 は4点で同時に得られている乱流変動のデータから空間相関係数を求めたものである。風速の水平成分に比して鉛直成分の減衰が大きく、気温変動は両者の中間に位置している。図中の白丸は Shiotani

Table 2. A comparison of statistics at four points on the pier

POINT	A	B	C	D	mean
$U \text{ m/s}$	5.99 (0.996)	5.69 (0.947)	6.28 (1.045)	6.06 (1.008)	6.01
$\sigma_u \text{ m/s}$	0.771 (0.950)	0.790 (0.972)	0.849 (1.043)	0.838 (1.032)	0.812
$\sigma_v \text{ m/s}$	0.992 (1.001)	0.954 (0.962)	1.026 (1.035)	0.992 (1.001)	0.991
$\sigma_w \text{ m/s}$	0.282 (0.927)	0.295 (0.970)	0.323 (1.062)	0.317 (1.042)	0.304
$\sigma_T \text{ }^\circ\text{C}$	0.206 (1.000)	0.199 (0.966)	0.205 (0.995)	0.216 (1.048)	0.206
$\overline{u'w'} (\text{m/s})^2$	0.0837 (1.192)	0.0759 (1.081)	0.0656 (0.934)	0.0557 (0.793)	0.0702
$\overline{w'T'} (\text{m/s} \cdot ^\circ\text{C})$	0.0333 (0.895)	0.0368 (0.989)	0.0392 (1.054)	0.0396 (1.064)	0.0372

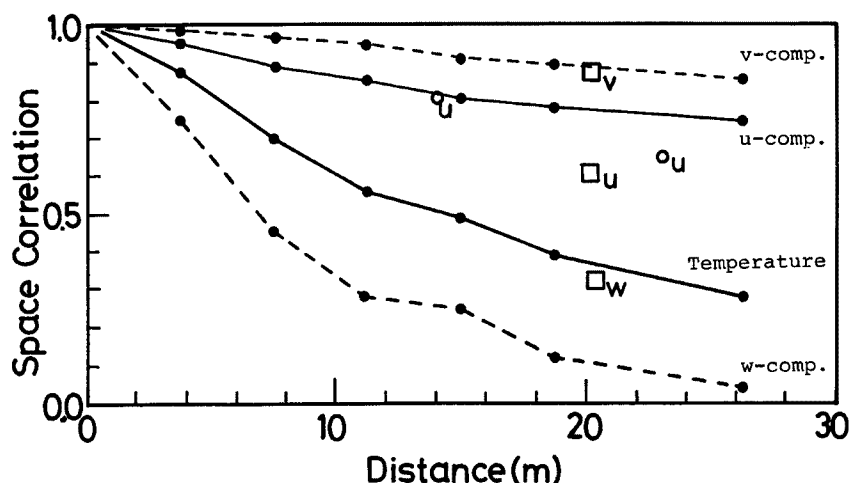


Fig. 13. Space correlation coefficients of three components of wind velocity and temperature. Open circles show data from Shiotani and Iwatani¹⁰⁾ and open squares show data from Fujitani and Hanafusa.¹¹⁾

and Iwatani¹⁰⁾ が里浦で高さ 40 m にエアロベーン型風速計を設置して得たデータ、白い四角は藤谷・花房¹¹⁾ が鹿児島で高さ 20 m に超音波風速計を設置して得たデータをそれぞれ示している。条件が異なるので単純な比較はできないが w 成分の相関が大きい点特徴的である。

6. 結 語

日本海につき出した大渦波浪観測所の観測用栈橋を用いて大気・海洋相互作用のための大気乱流の観測を行った。

これまでの強風時における観測から運動量輸送に関する抵抗係数の値は $1 \sim 2 \times 10^{-3}$ 程度になることがわかったが、更にデータを集積して風速依存性、あるいは安定度依存性についても調べてゆきたい。また波浪データとの対比も行つて、海面の粗度と抵抗係数の関係についても解析を進める予定である。

1986年10月に行った特別観測の結果から、海面と大気との炭酸ガス輸送量は植物群落上の $1/10 \sim 1/100$ 程度しかなく、わずかではあるが大気から海洋への輸送が起こっていることがわかった。顕熱と水蒸気のバルク係数については $C_H = 2 \sim 3 \times 10^{-3}$, $C_E = 1 \sim 2 \times 10^{-3}$ 程度の値が得られた。また海上風の空間構造については風速の水平成分に比べて鉛直成分の空間相関係数が急速に減衰することがわかった。詳細な研究の成果については現在行っている解析の終了の後に報告する予定である。また今後も引き続き本栈橋を用いた大気・海洋相互作用の研究を進めてゆきたい。

最後に本観測を行うにあたり、色々とお世話になった大渦波浪観測所の白井助教授、内山技官に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Kondo, J.: Air-Sea Bulk Transfer Coefficients in Diabatic Conditions, Boundary-Layer Meteor., Vol. 9, 1975, pp. 91-112.
- 2) Amorocho, J. and J. J. DeVreis: A New Evaluation of the Wind Stress Coefficient over Water Surfaces, J. Geophys. Res., Vol. 85, 1980, pp. 433-442.
- 3) Hsu, S. A.: A Mechanism for the Increase of Wind Stress (Drag) Coefficient with Wind

- Speed over Water Surfaces: A Parametric Model, J. Phys. Oceanogr., Vol. 16, 1986, pp. 144-150.
- 4) Ohtaki, E. and T. Matsui: Infrared Device for Simultaneous Measurement of Fluctuations of Atmospheric Carbon Dioxide and Water Vapor, Boundary-Layer Meteor., Vol. 24, 1982, pp. 109-119.
 - 5) Pond, S., G. T. Phelps, J. E. Paquin, G. McBean and R. W. Stewart: Measurements of the Turbulent Fluxes of Momentum, Moisture and Sensible Heat over the Ocean, J. Atmos. Sci., Vol. 28, 1971, pp. 901-917.
 - 6) Mitsuta, Y. and T. Fujita: AMTEX Data Report Vol. 4, Boundary Layer and Radiation Observations, 1974, 1975, Management Committee for AMTEX.
 - 7) 光田 寧, 花房龍男, 文字信貴, 塚本 修, 林 泰一: 琵琶湖からの蒸発量の推定について(1), 京都大学防災研究所年報, 第16号B, 1973, pp. 327-342.
 - 8) Jones, E. P. and S. D. Smith: A First Measurement of Sea-Air CO₂ Flux by Eddy Correlation, J. Geophys. Res., Vol. 82, 1977, pp. 5990-5992.
 - 9) Wesely, M. L., D. R. Cook, R. L. Hart and R. M. Williams: Air-Sea Exchange of CO₂ and Evidence for Enhanced Upward Fluxes, J. Geophys. Res., Vol. 87, 1982, pp. 8827-8832.
 - 10) Shiotani, M. and Y. Iwatani: Horizontal Space Correlations of Velocity Fluctuations during Strong Winds, J. Meteorol. Soc. Japan, Vol. 54, 1976, pp. 59-67.
 - 11) 藤谷徳之助, 花房龍男: 海上風の空間構造の研究, 第8回風工学シンポジウム論文集, 1984, pp. 7-12.