

海上風と風波の基礎特性について

On the Characteristics of Marine Surface Wind and Wind Waves

青野利夫*・後藤智明**

Toshio. Aono, Chiaki. Goto

To obtain the basic knowledge on marine surface wind, it was investigated that relationship between wind velocity and significant wave parameters and turbulent characteristic of wind by using the data measured from MT station at Osaka bay. Obtained results are as follows: ① It was confirmed that the measured wind and wave data were satisfied $3/2$ power law. ② Turbulent characteristics of wind velocity was similar to the turbulent boundary layer theory such as open channel flow.

keywords: Marine surface wind, wind waves, $3/2$ power law, turbulence

1. はじめに

港湾構造物の設計などに用いられる波浪推算や橋梁等の海上構造物の耐風設計、船舶の係留問題などでは、外力となる海上風の影響を強く受けることが知られている。とくに、波浪推算では海上風と波浪の関係が重要となり、海上風の変動に伴う波の方向スペクトルの変化、海上風の抵抗則の問題、風と波との相互作用等多くの未解明の問題がある。

従来より海上風と風波の間には、経験的な関係である $3/2$ 乗則 (Toba, 1971) が成立することが知られている。この関係は、海上風の平均量と風波の有義波諸元との関係を示したもので、風と波との平均量に関する局所的な平衡状態を表現するものであると考えられる。一方、海上風と水面変動間の時系列上の特性に関しては、上記の問題や $3/2$ 乗則の物理機構に関して有益な情報が得られると考えられるが、時系列的に見た海上風と水面変動の関係は、あまり明確ではなく場合によっては異なった結果が得られている (Takeda, 1981, Naito, 1978)。

本研究は、このような海上風と波浪の機構解明を目的として現地で観測された海上風の平均風速とスペクトルおよび乱れに対して基礎的な検討を行ったものである。

2. 大阪湾における気象・海象観測

解析に利用したデータは海上観測局 (写真-1: MT 局) の超音波式波高計と 10m 高度に設置されたプロベラ型風向・風速計および 3 成分超音波式風向・風速計とによって観測されたものである。海上観測局は大阪湾泉州海岸から東方 6.5km、水深 17.5m の地点にあり (図-1)、関西空港建設のための気象・海象の経常的な観測が昭和 53 年から行われている。観測項目は多岐にわたり、毎正時に 10 分間または 20 分間の観測値をテレメータにより中央監視局に伝送し各台帳諸元に処理される。海上風データは、プロベラ式に関してはサンプリング周波数 0.2Hz で 10 分間測定し、風向は 16 方位に分割してその中で最多の方位を風向としている。また、超音波式風速計は、サンプリング周波数が 10Hz で 10 分間の計測結果から風速値と風向 (1 度単位) を算定している。波浪データは、サンプリング周波数 10Hz で得られる水面変動値からゼロアップクロス法によって波を定義し有義波諸元を算定している。

海上観測局の有効フェッチは、Saville の方法を用いて算定すると図-2 となる。具体的な 16 方位別の有効フェッチは表-1 のようになり、東から南方向が最も短く 7km 以下で、最も長いのは北西方向の 33.4km である。

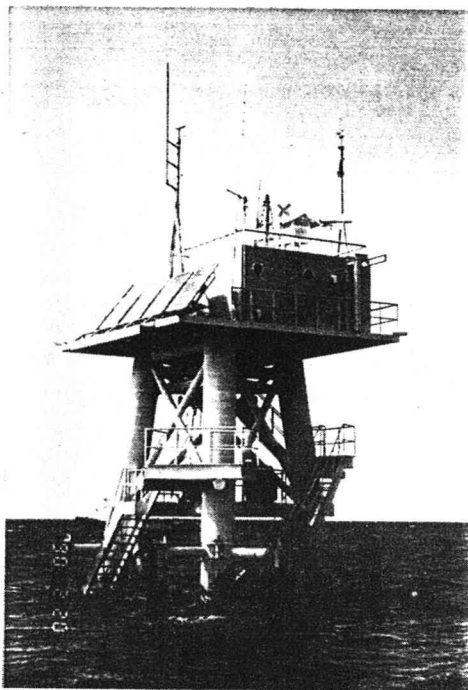


写真-1 大阪湾海上観測局の全景

* 正会員 工博 東亜建設工業株式会社 技術研究所 数値解析研究室 (横浜市鶴見区安善1-3)
(前運輸省港湾技術研究所 水工部海洋エネルギー利用研究室)

**正会員 工博 東海大学工学部土木工学科 教授
(前運輸省港湾技術研究所 水工部海洋エネルギー利用研究室 室長)

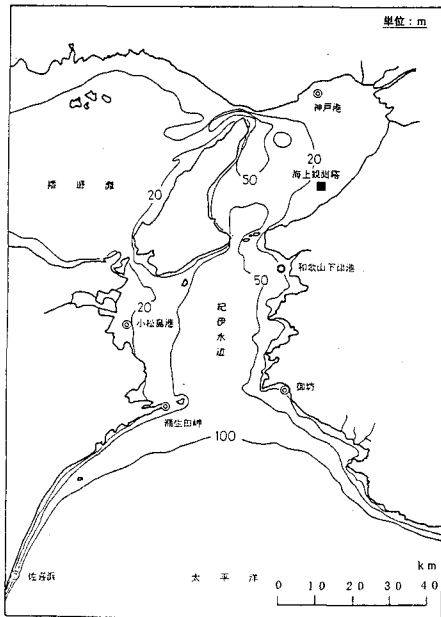


図-1 MT局の位置図

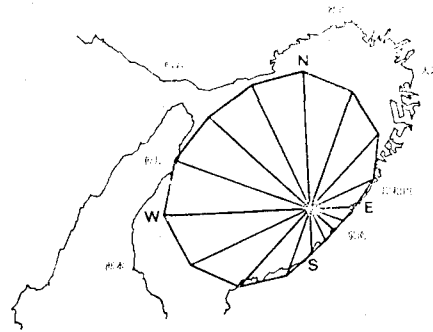


図-2 MT局の有効フェッチ

表-1 方向別のフェッチ (単位:km)

NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S
30.75	22.10	11.10	7.30	6.25	5.60	6.45	7.40
SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	N
11.25	17.30	31.95	30.20	25.05	33.40	25.70	26.80

3. 解析方法

解析は、海上観測塔 (MT 局) で 1984 年から 1991 年の 8 年間に発生した顕著な擾乱 30 ケース (測定数にして約 1400 回) を抽出して行った。解析データは、10m 高度に設置された 3 成分超音波式風速計と超音波式波高計によって得られた風速変動と水面変動である。これらは、ともに測定間隔が 0.1 秒で毎正時に風速計は 10 分間、波高計は 20 分間測定が行われている。またプロベラ式の風向・風速計は、超音波式との比較を行うため台帳データから 10m 高度平均風速と平均風向を読みとって用いた。

この観測データを用いて、水面変動からゼロアップクロス法により有義波諸元を算定した。風速変動は、最大風速の発生する向きを主流方向として平均風速を算定した。乱れの定義に関しては、バンドパスフィルターなど種々の方法が考えられるが、ここでは最も単純な方法である平均値からの偏差を乱れと定義して乱流諸元を算定した。また、風速と水面変動のクロス・スペクトル解析 (FFT 法、データ数: 4096, 自由度: 40) を行いスペクトル、コヒーレンスを算定した。

これらの解析結果をもとに、波と海上風の関係、海上風の乱流特性およびスペクトルの特性について検討した。

4. 大阪湾における海上風と波浪の関係

海上風の乱流特性を検討する前に、MT 局で得られた有義波諸元と平均海上風速を用いて、鳥羽に代表される摩擦速度を代表風速とする無次元波高と無次元周期との $3/2$ 乗則の適用性について考察する。具体的には、風波を表現する無次元パラメータ相互の特性とこれらの無次元パラメータから逆算される海上風の比較・検討から代表風速に対して考察を行う。なおここで用いた波浪データは全て有義波に関して深海の条件 ($h/L_0 > 0.5$) を満足するものである。

4-1 風波の無次元特性量の関係

鳥羽の $3/2$ 乗則は次式で表される

$$\left[\frac{g H_{1/3}}{u_*^2} \right] = B \left[\frac{g T_{1/3}}{u_*} \right]^{3/2}, \quad B = 6.2 \times 10^{-2} \quad (1)$$

ここに、 u_* : 摩擦速度であり

$$u_* = \sqrt{C_D} U_{10} \quad (2)$$

となる。無次元常数 C_D は 10m 高度風速 U_{10} を基準風速とした海面の抵抗係数であり、本研究では Mitsuyasu (1971) の C_D 則を用いた。

$$C_D = \begin{cases} (1.290 - 0.024 U_{10}) \times 10^{-3} & (U_{10} < 8 \text{ m/s}) \\ (0.581 + 0.063 U_{10}) \times 10^{-3} & (U_{10} \geq 8 \text{ m/s}) \end{cases} \quad (3)$$

ここでは風波を表現するパラメータとして、波高 H 、周期 T 、エネルギー B 、フェッチ R 、ピーク周波数 f_m

を考え、さらに波齢 C/u_* 、波形勾配 $H_{1/3}/L_{1/3}$ などの無次元量も加えて無次元パラメータ相互の関係を検討する。無次元化されたパラメータは以下のように表現される。

$$\frac{gH_{1/3}}{u_*^2}, \frac{gT_{1/3}}{u_*}, \frac{g^2E}{u_*^4}, \frac{gF}{u_*^2}, \frac{f_m u_*}{g}, \frac{C}{u_*}, \frac{H_{1/3}}{L_{1/3}}$$

図-3 は深海波の条件に適合するデータを用いて、無次元波高 $gH_{1/3}/u_*^2$ と無次元周期 $gT_{1/3}/u_*$ との関係を示したもので、図中には鳥羽による 3/2 乗則 ($B=0.062$:破線)と著者らによる 3/2 乗則 ($B=0.067$:実線)の関係が直線で示されている。両者の関係に大きな相違はないが、図-3 の関係から最小自乗法によって求められた 3/2 乗則の係数は $B=0.067$ であり、著者らによる関係に近いことが認められる。また、図に見られるデータのばらつきは、鳥羽が指摘したようなうねり性の波浪および風向の急激な変化による 3/2 乗則からのずれが MT 局のデータに現れていることを意味している。さらにつけ加えると現地波浪の場合、鳥羽の言う pure wind waves は殆ど存在せず何らかの風波以外の成分が波浪には必ず含まれていることを図-3 は示している。

図-4 は無次元フェッチと無次元エネルギーの関係で、この関係は後述する表 3 を構成するための重要な関係であり、無次元エネルギーについて示すと次のようになる。

$$\frac{g^2E}{u_*^4} = 1.6 \times 10^{-4} \frac{gF}{u_*^2} \quad (4)$$

4-2 大阪湾 MT 局観測値の定式化

無次元化された有義波パラメータ相互の関係は、表-2 のように整理できる。表 3 は縦の諸元を Y、横を X として $Y=aX^n$ としたときの a と n の関係を示したもので表中に表れる記号は無次元パラメータ間の係数であり、それぞれ、A は無次元フェッチと無次元エネルギー則の係数、a は無次元波高と無次元エネルギー則の係数、B は 3/2 乗則の係数、b は無次元周期と無次元周波数則の係数である。各無次元量間の関係に対する検討結果から、各無次元量間の係数は以下のようにになっていることが確認されている(後藤・青野, 1993)。

$$A=0.00016, a=3.86, B=0.067, b=1.13$$

表-3 は表-2 に上に示した係数値を代入して計算した結果と、観測データから指数 n を表 3 と同じべき乗則であると仮定して算定した係数 α が示されている。表-3 の観測値と計算結果との比較から両者の一致度が高く、無次元パラメータ相互の関係が表-2 の関係で示されることがわかる。このことは 3/2 乗則が成立する範囲では、海上風から得られる摩擦速度を媒介として波浪を表現する諸元間の独立性は失われることを意味する。言い替えれば風波の波浪諸元は風の摩擦速度と他の諸元 1 個が得られれば全て算定でき、波浪諸元に関する相似性と海上風との関係がこの表-3 から示されたといえる。

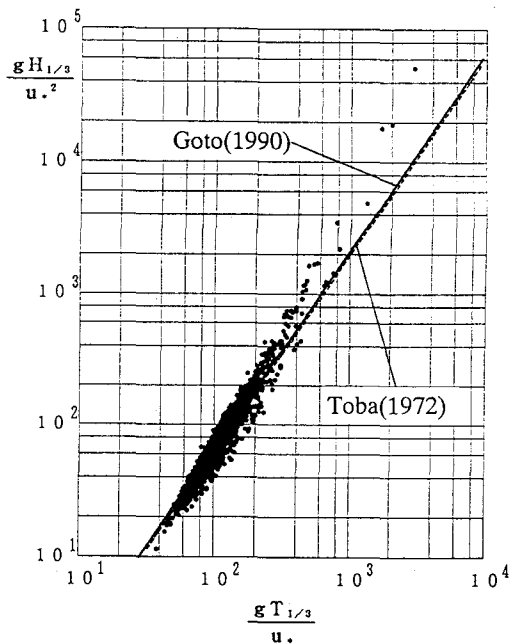


図-3 無次元波高と無次元周期の関係

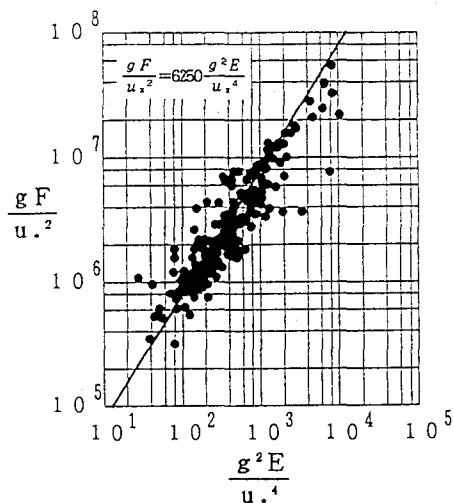


図-4 無次元エネルギーと無次元フェッチの関係

表-2 無次元パラメータ相互の関係

		$(Y=aX^n)$													
X	Y	$\frac{gH/U^2}{\alpha}$	$\frac{gT/U}{n}$	$\frac{g^2E/U^4}{\alpha}$	$\frac{gF/U^2}{n}$	$\frac{C/U}{\alpha}$	$\frac{f_m U/g}{n}$	$\frac{H/L}{\alpha}$	$\frac{gH/U^2}{\alpha}$	$\frac{gT/U}{n}$	$\frac{g^2E/U^4}{\alpha}$	$\frac{gF/U^2}{n}$	$\frac{C/U}{\alpha}$	$\frac{f_m U/g}{n}$	$\frac{H/L}{\alpha}$
gH/U^2	$\frac{1}{B^{2/3}}$	1	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$
gT/U	$\frac{1}{B^{2/3}}$	$\frac{1}{B^{2/3}}$	1	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$
g^2E/U^4	$\frac{1}{a^2}$	$\frac{1}{a^2}$	$\frac{2}{3}$	1	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$
gF/U^2	$\frac{1}{a^2 A}$	$\frac{1}{a^2 A}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{3}$	1	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$
C/U	$\frac{1}{2\pi B^{2/3}}$	$\frac{1}{2\pi B^{2/3}}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	1	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$
$f_m U/g$	$\frac{B^{2/3}}{b}$	$\frac{B^{2/3}}{b}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	1	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$
H/L	$2\pi B^{4/3}$	$2\pi B^{4/3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	1	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$

4-3 有効風速

表-3 無次元パラメータ関係式の計算値と実測値の比較

3/2 乗則の成立を前提として海上風と波浪の諸元が互いに関係していることを示したが、このことは波浪の諸元から海上風が逆算できることを意味する。有義波高・周期のような比較的取得の容易な諸元から海上風が逆算されさらにその精度が高ければ、現在わが国の海上風の観測点が非常に少ない現状を考慮すると、この手法が確立されれば波浪推算結果の補正や波浪推算手法の改良に対して非常に有力な手法となると考えられる。

海上風の逆算法（以後光易にならって有効風速と言う）としては4種類程度が考えられ、ここでは最も適合性の高い手法である 3/2 乗則と Mitsuyasu C_D 則を用いる方法について示す。

①式 (4) の 3/2 乗則を変形した u_* に関する式 (31) から摩擦速度を求める。

$$u_* = \frac{H_{1/3}^2}{g B^2 T_{1/3}^3}, \quad B=0.067 \quad (5)$$

ここで係数 B は著者らによって提案された数値を用いている。次に式 (5) から得られた u_* を式 (2) と式 (3) の C_D 則に代入して U_{10} を算定する。

この方法のほかにも、(2) Wilson 則から直接計算する方法、(3) 3/2 乗則(鳥羽)と鳥羽 Z_0 則を用いる方法、(4) 光易の方法などがあるが今回は割愛した。

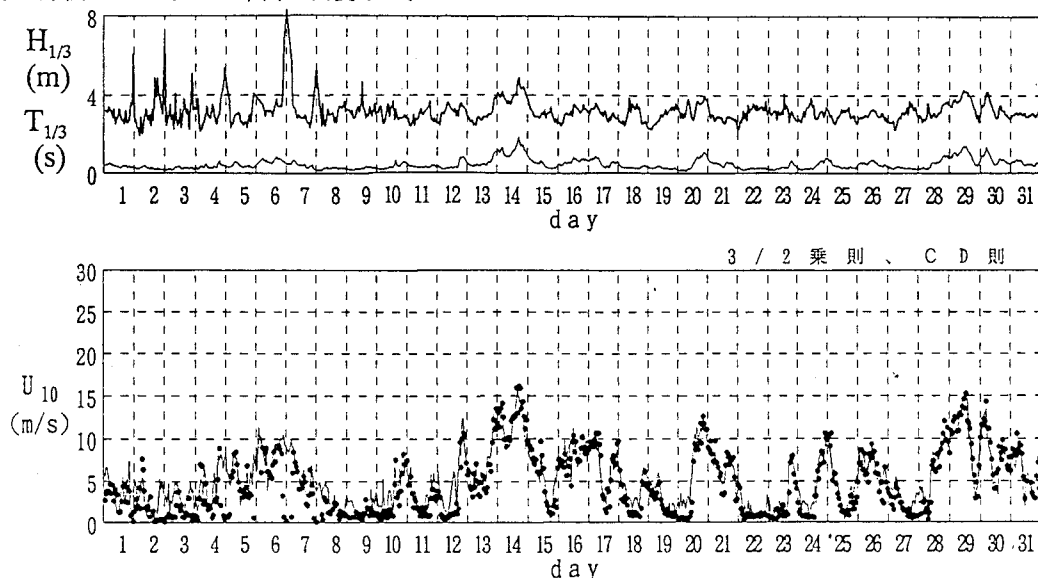


図-5 海上風速の実測値と有効風速の比較結果例

図-5 は、MT 局で得られた 10m 高度観測風速と有効風速との比較結果の一例である。期間は 1985 年 1 月で図中の黒抜き丸が有効風速で実線が観測値である。また有義波高と周期の経時変化も同時に示されている。図-5 から有効風速と観測値との一致度が高いことが認められる。

これらの傾向は図-6 においてより明瞭に認められる。図-6 は 1984 年から 1991 年までの 8 年間分の観測データに対して有効風速との相関を検討した図であり、縦軸は有効風速、横軸は観測風速であり図中の黒ぬき丸は平均値、縦線は誤差の標準偏差である。

この図から、風波の抵抗則で重要となる 20m/s 以上の風速値は殆ど得られておらず、MT 局のデータでは抵抗則に関する手法の妥当性を完全に検討することは出来ないが、測定風速範囲内では光易の C_D 則が最も抵抗則として妥当であり、さらにこの C_D 則が抵抗則に関する水理学的な知見に基づいて提案されていることから現状ではこの抵抗則を用いるのが良いと考えられる。

5. 海上風のスペクトルと乱れ特性

これまでの検討から、海上風と風波の間には平均量について強い相関があり、局所的な平衡状態が形成されていることが明らかとなった。この平均量の関係を基礎に、時系列上での風波と海上風の特徴について検討する。

図-7 は、1984 年1月3日0時から2日間における有義波高と周期および10m 高度平均風速 U_{10} と風向、海上風の各成分の乱れ強度 (u' , v' , w') の経時変化を示したもので、 U_{10} と風向は超音波式とプロベラ式の両者の結果が示されている。図から平均風速と風向について両者の違いがほとんどないことが認められる。乱れの強さは主流方向が最も強く 10m/s を越える高風速時の U_{10} に対して 10% 前後になるのが認められる。また、鉛直方向の乱れは主流方向の乱れの約 5 割程度となっていることから、海上風の乱れは開水路等の境界層乱流と類似の特性を示している。

図-8 は、水面変動と風速変動の経時変化および海上風のスペクトルと水面変動とのコヒーレンス、フェイズの一例 (1984 年 1 月 3 日 16 時) を示したものである。海上風のスペクトルは、低周波領域で高いエネルギーを示し風の大規模な変動が非常に強いことを示している。また、コヒーレンスは低周波域において高くなるのが認められ、水面変動に見られる波群特性と海上風との間に強い相関があることが示されている。このことは、海上風の大規模な変動と波群構造とが互いに影響を与えあっていることを示唆しており、海上風の影響を考慮した波群の解析の必要性を示している。

3/2乗則, 光易CD則

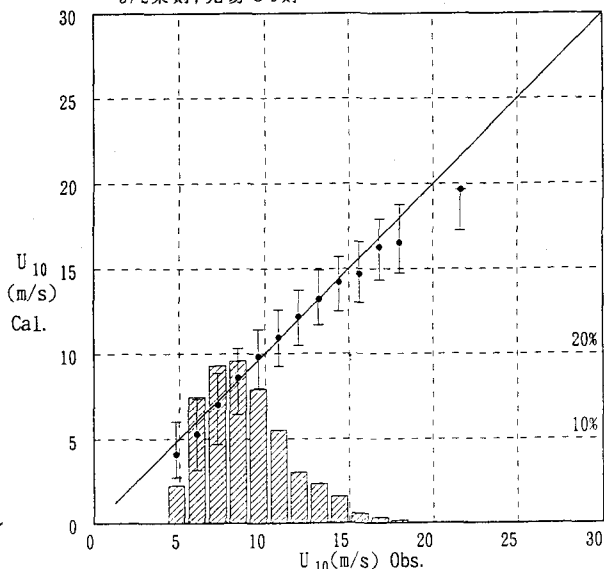


図-6 海上風速の実測値と計算値の比較

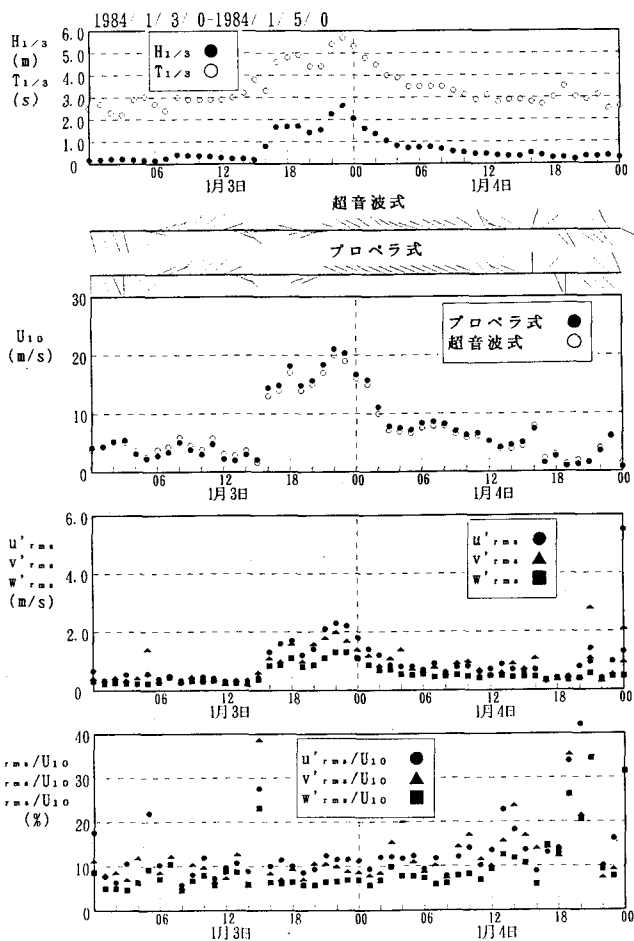


図-7 海上風の乱れ強度の経時変化

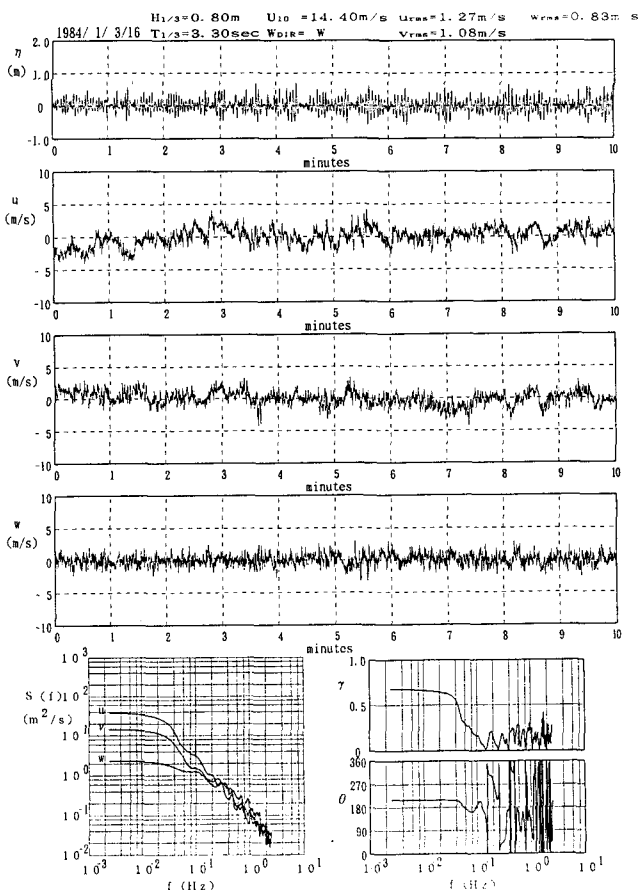


図-8 水面変動と風速変動およびコヒーレンスとフェイズ

5. おわりに

海上風と風波の特性を、 $3/2$ 乗則に基づいた平均量の関係から検討し、次いで時系列上の特性から海上風の乱流特性、スペクトルの特性および風速と水面変動間の相関特性を検討した。得られた結論は以下のとおりである。

① $3/2$ 乗則が成立する範囲では、海上風から得られる摩擦速度を媒介として波浪を表現する諸元間の独立性は失われる。言い替えれば風波の波浪諸元は風の摩擦速度と他の諸元 1 個が得られれば全て算定でき、波浪諸元に関する相似性が成立している。

②有義波高・周期から逆算される有効風速は、 $3/2$ 乗則と光易の C_D 則から得られる風速が最も実測の風速を良く説明する。

③海上風の乱れは、開水路等の境界層乱流と類似の特性を示す。また、海上風のスペクトルは、低周波領域で高いエネルギーを示し風の大規模な変動が非常に強く、水面変動に見られる波群特性と海上風との間に強い相関がある。このことは、海上風の大規模な変動と波群構造とが互いに影響を与えあっていることを示唆している。

【謝辞】本研究を実施するにあたり、芝木英之氏（株式会社エコー）、見上敏文氏（株式会社アルファード水工コンサルタント）から貴重な助言を頂いた。また、関西空港（株）から貴重なデータを提供して頂いた。ここに謝意を表する。

参考文献

- Mitsuyasu, H. (1971): Rep. Res. Inst. Mech. Kyushu Univ., Vol.19, pp.37-74.
Naito, G. (1978): J. Met. Soc. Japan, No.56, pp.25-34.
Takeda, A. (1981): J. Met. Soc. Japan, No.59, pp.487-509.
Toba, Y. (1972): J. Oce. Soc. Japan, 28, pp.109-120.
後藤智明・末次宏児・永井紀彦 (1990): 運輸省港湾技術研究所報告, 第 29 巻, 第 3 号, pp.3-26.
後藤智明・青野利夫 (1993): 運輸省港湾技術研究所報告, 第 32 巻, 第 1 号, pp.53-99.