

海上風の乱流特性と浮体まわりの流れの 数値シミュレーション

TURBULENT CHARACTERISTICS OF SEA WIND AND NUMERICAL SIMULATION OF FLOW AROUND A FLOATING BODY

田中博通¹・南将人²・野上郁雄³・関田欣治⁴

Hiromichi TANAKA, Masato MINAMI, Ikuo NOGAMI, Kinji SEKITA

¹ 正会員 工博 東海大学教授 海洋学部海洋土木工学科 (〒424-8610 静岡県清水市折戸3丁目20番1号)

² 正会員 工修 八戸工業高等専門学校助教授 建設環境工学科 (〒039-1192 青森県八戸市上野平16-1)

³ 正会員 工修 山口県萩市役所 (〒758-0041 山口県萩市大字江向510番地)

⁴ 正会員 工博 東海大学教授 海洋学部海洋土木工学科 (〒424-8610 静岡県清水市折戸3丁目20番1号)

This research is concerned with the characteristics of wind velocity on through the measurement of wind velocity of nearby sea surface continuously by using a multichannel anemomaster.

The main conclusion from this study is as follows; the coefficient of friction calculated by assuming Karman constant as 0.4 ranges between 0.01 and 0.07. Furthermore, there is linear relation between roughness parameter and the coefficient of friction. Wind velocity fluctuation spectra showed that it differs depending upon the height from sea level. A strong eddy occurs at the back of a floating body when the wind velocity measured used in numerical modelling the response of the floating body, which implies that this fact must be taken into account in wind load estimation.

Key Words : Sea wind, turbulent characteristic, floating body, numerical simulation

1. はじめに

接地境界層に関する総合的観測は1968年カンザス州で行われ普遍関数表示等の多くの成果が得られた。¹⁾ また、自然風のスペクトルに関する研究はDavenport²⁾と日野³⁾により行われ、そのスペクトルは広く使用されている。一方、海上風については、Ochi等⁴⁾と加藤等⁵⁾が観測値を基に研究を行いそれぞれのスペクトルが提案されている。

海洋空間の有効利用として開発が行われている大型浮体構造物を設計する場合、自然環境外力として風荷重を算定する必要がある。また、浮体構造物が大型化するにつれ、形状抵抗のみならず摩擦抵抗を考慮しなければならないことから、海面近傍の平均風速分布と乱流特性を求めることが大切である。

既往の海上風の研究は、海面から10m以上の高さで測定した風速を基にスペクトルを求め、そのスペクトルピークと乱れ強さの値から抵抗係数を算定し、風速分布に関する諸量についてを論じていた。

本研究は沖合にある観測塔で多点風速計を用いて海面近傍の風速の連続観測を行い、その結果を基に平均風速分布特性と変動成分についてのスペクトル等について考察したものである。このような海面近

傍の風速測定は、測定の困難さから意外に少ないのが現状である。

また、本研究では測定した実風速を境界条件として、Sola法により浮体構造物周辺の風況を数値計算により求め考察した。

2. 観測方法

観測は静岡県志太郡大井川町の約200mの沖合にある建設省所有の海洋技術研究施設(34°47'17"N; 138°18'55"E)で行った。観測日時は1999年12月9日14:56から10日12:50までである。

風速測定は多点風速計のセンサーを施設のデッキから張り出したポールより垂らしたワイヤーに0.5~1.5m間隔で取り付けて水平方向の風速を連続測定した。この時のサンプリング時間は5Hzとし、1回の測定で約1時間50分のデータを収録し、同様な測定を今回は10回行った。

観測期間中、センサーの位置は固定してあるため、潮位変動によりセンサーの平均海面からの高さが変化する。従って、各観測ケース毎にワイヤーの0点の平均海面からの高さを読み取り、後に建設省が測定した潮位データから観測ケース毎のセンサーの平

均海面からの高さを算定した。

また、同時に気温、気圧変動と超音波風速計による海面近くの2方向風速を測定したが、今回は多点風速計のデータから得られた風速特性について検討する。

図-1は観測風景であり、左が多点風速計、右が超音波風速計である。

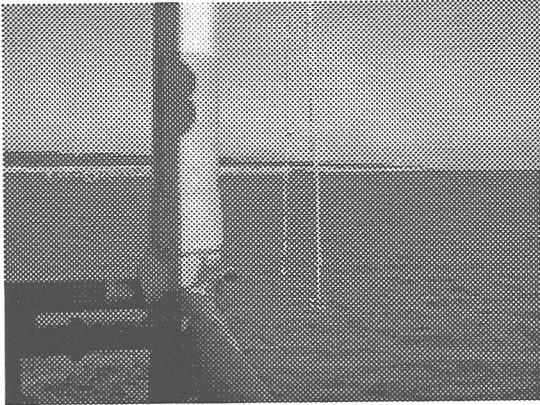


図-1 観測風景

3. 観測結果及び考察

(1) 風速分布

1時間50分の1回の測定時間内で風速に長周期のトレンドが生じているため、平均風速が比較的安定している部分を取り出し検討した。取り出したデータは8192個(1638.4秒間)である。

図-2は風速(T22)の時系列である。T22は測定ケースであり、表-1に平均海面からの高さ(z)と平均風速(V)を示してある。Z<1.73m以下の風速変動は同様な傾向を持ち、高周波成分が顕著である

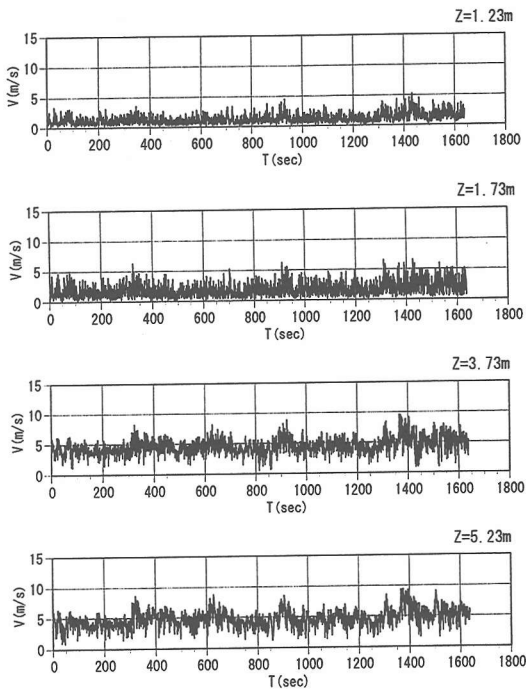


図-2 風速の時系列 (T22)

表-1 測定した風速値と対数分布則に基づく諸量

	Z(m)	V(m/s)	A	z ₀ (m)	Kd	H ₀ (m)	T ₀ (s)	H _{1/2} (m)	T _{1/2} (s)
T13	0.87	1.69	1.17	0.189	0.0161	0.27	4.6	0.40	7.0
	1.37	2.43							
	3.37	3.47							
	4.87	3.70							
T21	1.6	2.31	1.68	0.401	0.0252	0.31	4.9	0.45	7.1
	3.6	3.75							
	5.1	4.23							
	5.32	5.32							
T22	1.23	1.24	2.67	0.795	0.0500	0.31	4.3	0.46	6.1
	1.73	1.85							
	3.73	4.54							
	5.23	4.78							
T23	1.32	1.75	2.70	0.676	0.0413	0.33	4.8	0.49	6.8
	1.82	2.65							
	3.82	5.04							
	5.32	5.32							
T31	1.82	2.53	3.76	0.892	0.0490	0.30	4.7	0.46	6.5
	2.32	3.68							
	4.32	6.26							
	5.82	6.79							
T32	2.12	2.15	4.55	1.300	0.0737	0.29	4.6	0.40	6.4
	2.62	3.13							
	4.62	6.26							
	6.12	6.71							
T41	2.35	2.74	2.78	0.861	0.0396	0.31	4.5	0.45	6.8
	2.85	3.42							
	4.85	4.75							
	6.35	5.59							
T42	2.9	2.49	2.47	1.051	0.0498	0.28	4.6	0.43	6.9
	4.9	3.85							
	6.4	4.42							
	6.4	4.42							
T43	2.9	1.95	2.20	1.193	0.0570	0.28	4.6	0.43	6.9
	4.9	3.12							
	6.4	3.69							
	6.4	3.69							
T81	0.88	2.54	1.07	0.072	0.0110	0.25	4.8	0.38	7.2
	1.48	3.41							
	3.48	4.06							
	4.06	4.06							
T91	1.55	1.68	1.63	0.553	0.0328	0.28	4.3	0.43	6.2
	3.55	3.05							
	5.05	3.60							
	5.05	3.60							
T101	1.58	1.83	2.81	0.822	0.0457	0.31	4.2	0.46	5.8
	2.08	2.55							
	4.08	4.68							
	5.58	5.25							
T102	1.64	2.54	2.77	0.699	0.0364	0.32	4.7	0.45	6.4
	2.14	2.88							
	4.14	4.96							
	5.64	5.82							
T103	2.16	3.11	3.19	0.812	0.0430	0.32	4.7	0.45	6.4
	4.16	5.27							
	5.66	6.16							
	5.66	6.16							

とともに約 100 秒程度の周期が見られる。Z>3.73mの風速変動には約 300 秒の周期がある。また、Zが増加するほど変動が大きくなることがわかる。

図-3は平均風速分布である。また、図-4はその風速分布を片対数で表したものである。図-4より今回測定した高さまでは対数分布となっている。

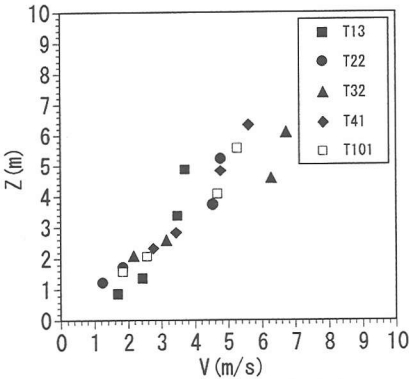


図-3 平均風速分布

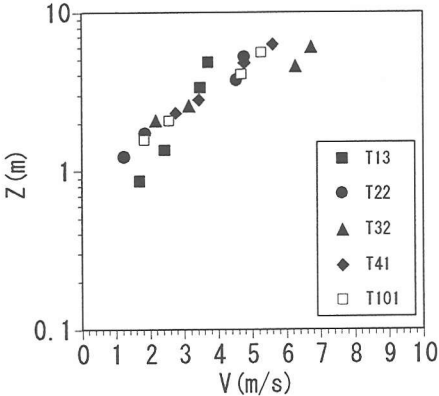


図-4 平均風速分布 (片対数)

ここで、平均風速分布に (3a) の対数分布則を適用し、実測値を用いて粗度パラメータ (Z_0) と係数 (A) を求めた。

$$V(Z) = A \cdot \ln(Z/Z_0) \quad (3a)$$

ここで、

V : 平均風速 (m/s)

Z : 海面からの高さ (m)

Z_0 : 粗度パラメータ (m)

A : 係数 (V_*/κ)

V_* : 摩擦速度 (m/s)

κ : カルマン定数 (≈ 0.4)

表-1 に A と Z_0 の値を示してあるが、 Z_0 は著者等⁶⁾ が平坦な砂浜で求めた値である約 0.01m よりもかなり大きな値となった。係数 A は平坦な砂浜の値と同程度の値となった。

境界面のせん断応力 (τ) は次式で定義される。

$$\tau = \rho K_d V^2 \quad (3b)$$

ここで、

ρ : 空気の密度 (kg/m^3)

K_d : 摩擦係数

(3a), (3b) より、 $K_d = (A\kappa/V)^2$ となり、 $\kappa=0.4$ と測定した最上部の平均風速から K_d を求めた。その結果を表-1 に示してある。今回の K_d は 0.01~0.07 の値となり、Davenport⁷⁾ や著者等⁶⁾ が求めた平坦な地形の値である 0.005 よりかなり大きな値となった。海面近傍の風速は波浪との干渉もあり、その摩擦係数は定かでないが、今回の計測高さが低いことから摩擦係数を算定するときの基準風速に問題があるものと考えられる。

図-5 は平均波高 (H_0) と K_d の関係である。測定期間中、 H_0 がほぼ一定であったこともあり、それ程顕著な傾向は見られない。

また、(3a) と (3b) より、粗度パラメータと摩擦係数に次式の関係がある。

$$Z_0 = Z \exp(-\kappa/(K_d)^{1/2}) \quad (3c)$$

図-6 は表-1 に示した Z_0 と K_d の値をプロットしたものであり、これよりほぼ直線的な関係があることがわかる。

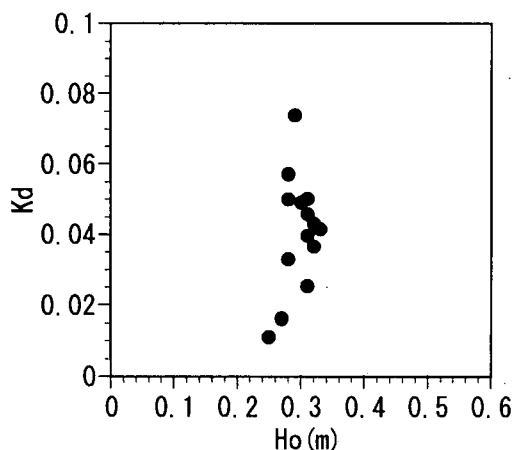


図-5 平均波高と摩擦係数

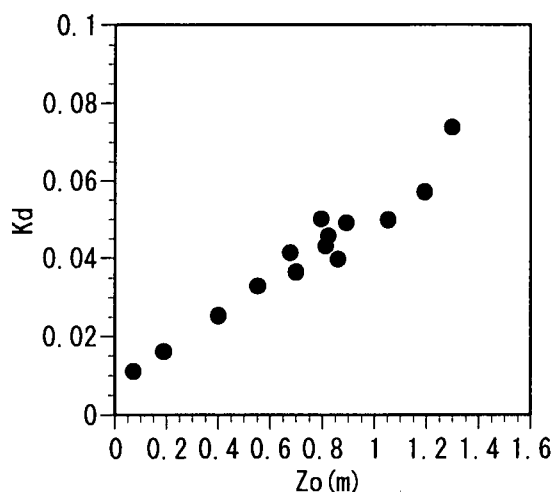


図-6 粗度パラメータと摩擦係数の関係

(2) 乱れ強さ

図-7 は測定した最上部の平均風速 (V_0) で乱れ強さ (V') を無次元化して表した乱れ強さの分布である。高度が増すにつれ乱れ強さが増加する傾向がある。著者等⁶⁾ の海浜部での測定では地上から約 2m をピークにして、高度が増すにつれ乱れ強さが一様化する傾向にあった。これより、海上風の境界層は平坦な地上風と比較して厚いことがわかる。

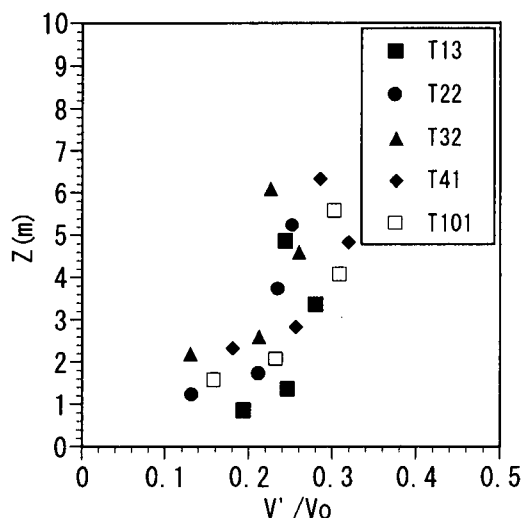


図-7 乱れ強さの分布

(3) ガストファクター

ガストファクター (G) は、最大風速 ($V_{\max}$) と平均風速 (V) の比で定義され、一般に突風率といわれるものである。定義からガストファクターは乱れ強さと密接な関係があり、乱れ強さが大きければガストファクターも大きくなる。また、ガストファクターは構造物の設計や空港、ロケット発射基地の情報として重要であることから、多くの既往の研究がある。塩谷⁸⁾ はこれら一連の研究を整理した。

図-8 はガストファクターの分布である。ガストファクターは高度が増すにつれ減少し、海面近くの値は地上風の値よりも大きい。 $Z > 3\text{m}$ ではほぼ 2 前後の値となった。

図-9 はガストファクターと評価時間の関係である。評価時間が大きくなると、 $z < 1.73\text{m}$ では急激にガストファクターが減少していることから、高周波成分が有ることがわかる。 $z > 3.73\text{m}$ ではほぼ一致しており、しかも評価時間が増加してもガストファクターはそれ程変化しない。また、評価時間が 25 秒以上になると、ガストファクターは高さに関係なくほぼ同程度の値となった。

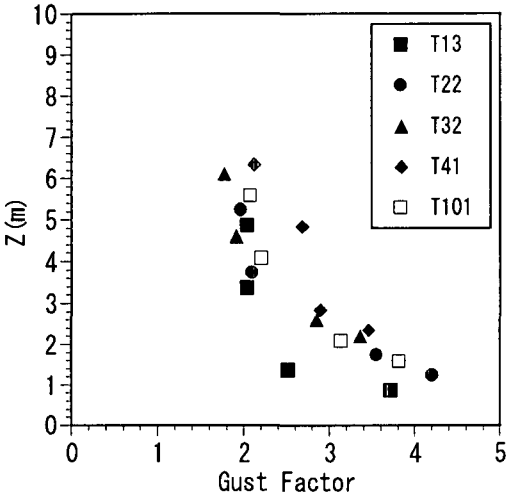


図-8 ガストファクター

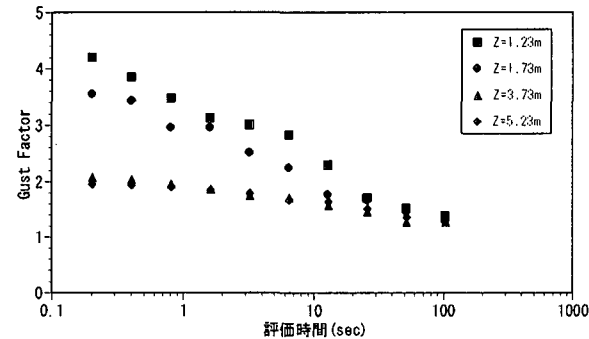


図-9 ガストファクターと評価時間の関係(T22)

(4) 風速変動スペクトル

図-10 は風速変動スペクトルである。低周波側において明らかに $z < 1.73\text{m}$ と $z > 3.73\text{m}$ の領域でスペクトル形が異なっている。著者等⁶⁾の地上風の観測から求めたスペクトルでは、スペクトル形に変化はなく、ただスペクトルピークの周波数が高度が増すにつれ低周波側にシフトする現象であった。海面近くのスペクトルでは、いくつかの卓越周波数があり、そのピークは高度が増すにつれ高周波側に若干シフトしている。どの測定ケースにも同様な傾向があることから、海上風のスペクトルの特徴であるといえる。しかし、表-1 に示してあるように今回の観測時に発生していた波浪の平均周期は約 4.5 秒位であり、周波数にして約 0.22Hz であることから、直接的に波浪の影響だけとはいえない。今後、波浪と風速を同時測定するとともに、このスペクトル形の異なりについて検討する必要がある。

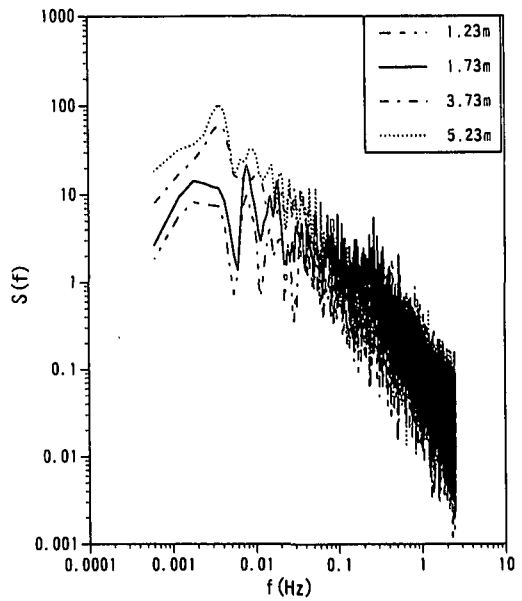


図-10 風速変動スペクトル (T22)

4. 浮体周辺の風教のシミュレーション

測定された風速データを境界条件として用い、浮体構造物周辺の風況を数値計算によって検討した。

(1) 基礎式と計算法

数値計算に用いた基礎式には、二次元非圧縮性流体の連続式と Navier - Stokes 式を用いた。それらの式を以下に示す。

$$u_x + v_y = 0 \quad (4a)$$

$$\begin{aligned} u_t + (u^2)_x + (uv)_y &= -\frac{1}{\rho} p_x + g_x + \nu(u_{xx} + u_{yy}) \\ v_t + (uv)_x + (v^2)_y &= -\frac{1}{\rho} p_y + g_y + \nu(v_{xx} + v_{yy}) \end{aligned} \quad (4b)$$

ここで、各記号は、

u, v : 流速

p : 圧力

t : 時間

ρ, ν : 空気の密度、動粘性係数

g : 重力加速度

数値計算法は、圧力 (p) と速度 (u, v) をスタッガード格子状に配置し、N.S.式から時刻($n+1$)での流速を陽的に求め、連続の式から得られるボワゾン式を反復法で解き、圧力と速度を修正して、新しい時刻での圧力と速度を求める「SOLA 法」⁹⁾、¹⁰⁾を用いて計算した。

(2) 計算対象領域と諸条件

計算対象とした浮体の形状は、浮体の長さ 10m、水面上高さ 2 m とした。また、水平方向には、浮体の前後にはそれぞれ 4 m と 10m の領域を付加した。鉛直方向には、風の有効測定範囲が約 5 m であることを考慮し、鉛直方向の高さ 8 m を上限とした。計

算格子間隔は、計算器の容量等を考慮し、 $\Delta x = \Delta y = 0.1\text{m}$ を設定した。従って、全計算領域は $24\text{m} \times 8\text{m}$ とし（計算格子数 240×80 の全 19,200 格子）、その中に $10\text{m} \times 2\text{m}$ の浮体を配置した。

次に時間間隔 Δt は、N.S.式に対流項と粘性項が含まれているために計算の安定性を考慮して、測定時の時間間隔を 4 分割し、 $\Delta t = 0.05\text{sec}(=20\text{Hz})$ とし、境界条件の風速として与える場合には、測定された風速データを直線補間して用いた。

計算の対象とした観測日時は、T22（1999 年 12 月 9 日 19 時 1 分～19 時 28 分）のデータを用い、この間の平均風速が約 3m/s である事から、観測開始から 10 秒間の観測結果を用いた。なお、境界条件として鉛直方向の分布には、各測定 Ch 間を直線補間し、静水面付近は $1/7$ 乗則を用いて風速分布を補間して用いた。

3)計算結果と考察

図-11 に、計算開始 10 秒後の風速ベクトル図を示す。浮体構造物の前面（ $X=4\text{m}$ ）では向きは鉛直となり、それに引きずられるように浮体の上面（ $Y=2\text{m}$ ）でも上向きとなっている。浮体背後（ $X=15\text{m}$ ）では、時計回りの大きな渦が発生しており、再付着点位置は $X=18\text{m}$ 付近であり、浮体高さ 2m の約 1.5 倍の水平距離が遮蔽領域となっていることが分かる。また、鉛直方向 $Y=6\text{m}$ 以上の領域では、鉛直風速 V はほとんど生じていないことから、浮体構造物による風の軌道の影響範囲は静水面上の高さの約 3 倍以下となるものと考えられる。

図-12 に角速度の算定結果を示す。これは、図-11 から渦度の $1/2$ を求めた結果である。値が正の場合は時計回りの回転速度が大きいことを示しているが、浮体の背後（ $X=16\text{m}$ 付近）を中心とする強い渦が発生していることがわかる。また、浮体の前面（ $X=5\text{m}, Y=3\text{m}$ ）でも強い渦が発生しており、浮体に作用する風圧力の算定には、抗力に加え、これらの影響を考慮する必要があるものと考えられる。

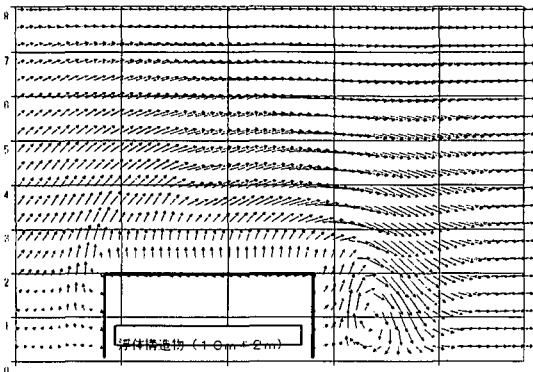


図-11 風速ベクトル図 (T=10 秒後：T22)

5. 結論

以上のことから結論として次のことがいえる。

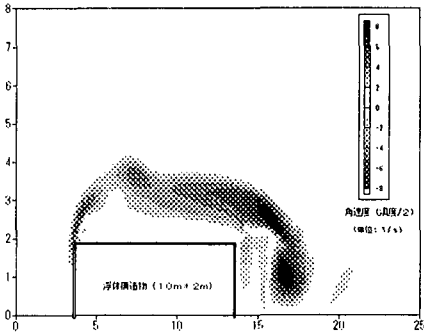


図-12 角速度分布図 (=渦度/2)

- ・ $\kappa=0.4$ として求めた K_d は $0.01 \sim 0.07$ の値となり、平坦な地形の値よりも大きな値となった。
- ・ Z_0 と K_d にはほぼ直線的な関係がある。
- ・ 評価時間に対するガストファクターの値は海面近くと海面から離れた領域で傾向が異なる。
- ・ 風速変動スペクトルは海面近くと、海面から離れた所で分布形状が異なり、卓越周波数は高度が増すにつれ高周波側に若干シフトしている。
- ・ 浮体構造物に対する風の影響範囲は、浮体の水面上高の約 3 倍以下である。

謝辞

研究を遂行するに当たり観測施設を使用させていただいた建設省中部地方建設局静岡河川工事事務所に感謝いたします。

本研究は科学研究費（基盤研究(c)）の助成を受けて行ったものである。

参考文献

- 1) 竹内清秀，近藤純正：大気科学講座 1 地表に近い大気，東京大学出版会，1981.
- 2) Davenport, A.G.: The spectrum of horizontal gustiness near the ground in high winds, *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, Vol.87, pp.194-211, 1961.
- 3) 日野幹雄：瞬間最大値と評価時間の関係—とくに突風率について，土木学会論文集 第 117 号，pp. 23-33, 1965.
- 4) Ochi, M.K. and Shin, Y.S.: Wind turbulent Spectra for design consideration of offshore structures, *OTC 5736*, 1988.
- 5) 加藤俊司，大松重雄，吉元博文，斎藤昌勝：浮体係留システムの運動応答と係留力の予測，船舶技術研究所報告 別冊第 16 号，pp. 11-60, 1994.
- 6) 田中博通，野上郁雄，関田欣治：沿岸海浜部における自然風の乱流特性について，第 14 回海洋工学シンポジウム，日本造船学会，pp. 233-238, 1998.
- 7) Davenport, A.G.: The application of statistical concepts to the wind loading of structures, *Proc. Inst. Civil Engrs.*, Vol.19, pp.449-472, 1961.
- 8) 塩谷正雄：強風の性質，開発社，1992.
- 9) 八田夏夫：流れの計算，森北出版，
- 10) 土木学会：海岸波動（波動・地盤と波の相互関係）