

海上風の粗度パラメーターと摩擦係数について

田中博通*・田中 満**・南 将人***

1. はじめに

地表から数十 m まで接地境界層と言われ、風速分布は地面や海面の摩擦が支配的である。この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風速分布の普遍関数表示等の多くの成果が得られ専門書に紹介されている (Kaimal, 1988; 竹内・近藤, 1981)。

自然風のスペクトルに関する研究は Davenport (1961) と日野 (1965) 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 and Shin (1988) と加藤・大松・吉元・斎藤 (1994) 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。

風速分布の対数則に関係する粗度パラメーターは地上風について Pasquill (1971), Jackson (1977), 田中・野上・関田 (1998) によって求められた。また、海上風の摩擦係数は Davenport (1961), Geernaert (1987), 加藤・大松・吉元・斎藤 (1994) が実測値から求め、本多・光易 (1980) は実験から求めた。特に、海上風の摩擦係数は測定の困難さから風速分布より決定したものでなく、海上の一点の観測値から求めたものであり、実際の海上風の測定例が少ないのが現状であることからこれらの値を適用している。また、この摩擦係数は無次元スペクトルを決定する際に重要な値となる。

大規模浮体構造物 (メガフロート) の設計には自然環境外力として波浪外力、潮流力、風荷重を考慮する必要がある。現在のメガフロートは長さ 1000 m, 幅 60 m, 高さ 3 m のスケールであるが、メガフロートのスケールが増大するにつれ風荷重は圧力抵抗のみならず摩擦抵抗を算定することが重要である。そのためには海面近傍の風速分布を求め、粗度パラメーターと摩擦係数を風速と波高の関係から決定することが必要である。本研究は、海面近傍の海上風と波浪を連続測定し、その測定結果を基に平均風速分布より粗度パラメーターと摩擦係数を求め、それらの値について風速と有義波高との関係について検討することを目的として行ったものである。

2. 観測方法

観測は静岡県志太郡大井川町の約 250 m の沖合にある国土交通省所有の海洋技術総合研究施設 (34°47'17" N; 138°18'55" E) で行った。観測日時は 2000 年 10 月 19 日～22 日と 2000 年 11 月 28 日～30 日である。

風速測定は多点風速計のセンサー 8 本を 0.5～2.5 m 間隔で測定用ポールに取り付けるとともに、超音波水位計、微差圧計、温度計、超音波風速計も取り付け同時測定した。サンプリング時間は 5 Hz, 1 測定のデータ数は 16384 個である。測定はバッテリー電源が消費されるまで無人観測した。観測によって得られた全測定結果から風向が海洋技術総合研究施設の後流域になっていない 23 ケースの測定について解析した。なお、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、センサー高は各観測ケース毎の中心時間の平均海面からの高さに補正した。

図-1 は海上風の観測風景である。



図-1 海上風の観測風景

* 正 会 員 工 博 東海大学教授 海洋土木工学科

** 学生会員 東海大学大学院 海洋学研究科海洋工学専攻

*** 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

3. 観測結果及び考察

(1) 風速分布および粗度パラメーター

図-2は観測した風速の時系列である。ここでは同時測定した1ch～8chのうち、海面に近い1chとほぼ中央の4chと最上位置の8chを示してある。この図より海上風は数10秒～800秒程度の様々な周期を含み、今回測定した海面から10mまでは風速変動が連動している。

図-3は表-1に示す測定ケース V01000～V01010 の平均風速分布である。どの測定ケースも高度は増すにつれ風速は増加しているが、風速が4 m/s以下の微風においてはその増加割合が小さく、海面から4.0 m以上ではほぼ一様風速となっている。しかし、風速が4 m/s以上になると今回測定した海面から10 mの高さでも増加傾向にある。この風速分布を片対数で表すとほぼ直線分布となり対数則が成り立っていることがわかる。

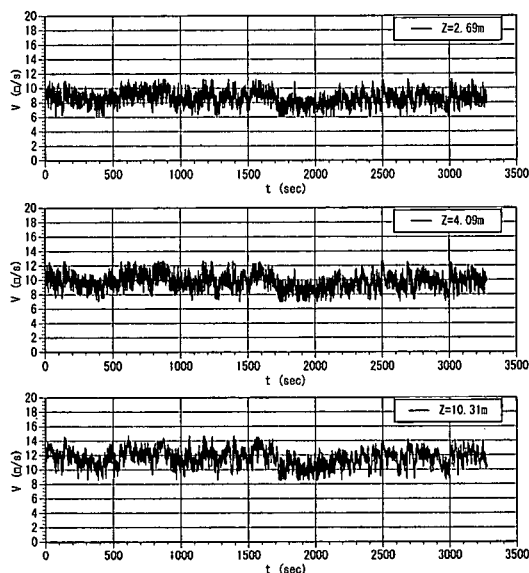


図-2 風速の時系列 (V01016)

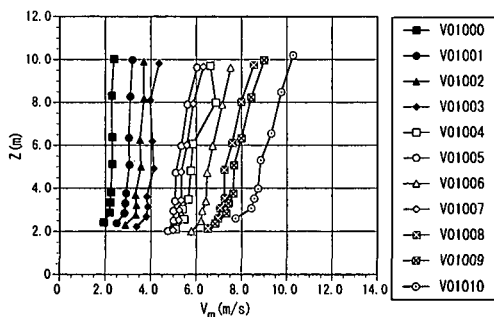


図-3 平均風速分布 (V01000～V01010)

接地境界層の風速分布は、接地境界層のスケールファクターである式(1)で定義される Monin-Obukhov 長 (L) と高さ (z) の関数として表すことができる。

$$L = -\frac{V_*^3 T}{g \kappa (w' \theta')} \quad (1)$$

ここで、 V_* は摩擦速度 (m/s)、 T は平均気温 (K)、 g は重力加速度 (m/s^2)、 κ は Karman 定数 ($=0.4$)、 w' は鉛直方向風速変動 (m/s)、 θ' は気温変動 (K) である。今回、観測ポール先端に取り付けた超音波風速計より鉛直方向風速を測定しており、同時測定した気温から顕熱フラックスを求めることができる。また、後述する海面近傍の摩擦係数から摩擦速度が求まり、これらの値を用いて式(1)から Monin-Obukhov 長を算定すると、表-1に示す風速が比較的小さい V01000 と風速が比較的大きい V01016 の Monin-Obukhov 長はそれぞれ 7.74 m、6280 m となった。ここで、 $Z=10$ m とすると z/L はそれぞれ 1.29, 0.0016 となり、約 $z/L < 1$ であることからほぼ安定度が中立であるといえ、そのときは式(2)の対数則が成り立つ。

$$V(z) = A \cdot \ln\left(\frac{z}{Z_0}\right) \quad (2)$$

ここで、 V は平均風速 (m/s)、 Z は海面からの高さ (m)、 Z_0 は粗度パラメーター (m)、 A は係数 ($=V_*/\kappa$) である。表-1にそれぞれの測定ケースについて平均風速から求めた係数 (A) と粗度パラメーター (Z_0) の値を示してある。また、求めた値から計算した風速分布は実測値に一致することから、式(2)より $Z=10$ m として計算した風速を基準風速とし、以後 V_{10} と表わすことにする。

図-4は基準風速 (V_{10}) と粗度パラメーター (Z_0) の関係である。ここで、V010 と V011 はそれぞれ 2000 年 10 月と 11 月の測定値を基に計算したものである。V010 の測定ケースにおいては、粗度パラメーターは基準風速が増加するにつれ大きくなる傾向があり、 $V_{10} > 8$ m/s で

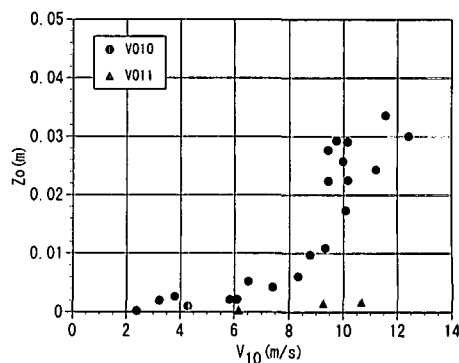


図-4 基準風速と粗度パラメータの関係

表-1 風速測定結果と対数則に基づく諸量および波高データ一覧

Case	V_{10} (m/s)	最多風向	T (°C)	A	Z_0 (m/s)	K_d	V_* (m/s)	$H_{1/3}$ (m)	$T_{1/3}$ (sec)	H_0 (m)	T_0 (sec)	C (m/s)
October 19-22, 2000												
V01000	2.39	E	21.686	0.223	0.00023	0.00140	0.089	0.77	5.8	0.53	4.4	6.40
V01001	3.22	ESE	21.357	0.377	0.00198	0.00220	0.151	0.86	6.2	0.60	4.6	6.57
V01002	3.77	ENE	21.037	0.457	0.00262	0.00235	0.183	0.87	6.1	0.60	4.5	6.48
V01003	4.29	E	21.002	0.467	0.00103	0.00190	0.187	0.93	5.7	0.63	4.5	6.48
V01004	6.50	NE	20.468	0.860	0.00523	0.00280	0.344	0.87	5.4	0.58	4.3	6.31
V01005	5.82	NNE	19.952	0.689	0.00214	0.00224	0.276	0.88	5.9	0.59	4.3	6.31
V01006	7.38	NE	20.287	0.952	0.00428	0.00266	0.381	0.90	5.5	0.59	4.1	6.11
V01007	6.09	NNE	23.419	0.721	0.00212	0.00224	0.288	0.89	5.8	0.63	4.4	6.40
V01008	8.31	NE	20.522	1.122	0.00606	0.00291	0.449	0.84	5.1	0.56	4.1	6.11
V01009	8.75	NE	19.698	1.263	0.00975	0.00333	0.505	0.93	5.9	0.66	4.7	6.65
V01010	10.08	NE	19.831	1.586	0.01736	0.00396	0.634	0.97	5.5	0.63	4.4	6.40
V01011	9.43	NE	20.094	1.546	0.02241	0.00430	0.618	0.98	5.8	0.66	4.4	6.40
V01012	9.42	NE	20.166	1.600	0.02767	0.00461	0.640	1.02	5.7	0.71	4.4	6.40
V01013	9.73	NE	20.278	1.669	0.02931	0.00470	0.668	1.13	5.9	0.78	4.8	6.72
V01014	9.97	NE	20.207	1.672	0.02579	0.00450	0.669	1.09	5.6	0.74	4.5	6.48
V01015	10.14	NE	19.627	1.736	0.02910	0.00469	0.694	1.10	6.4	0.75	4.8	6.72
V01016	11.55	NE	19.968	2.028	0.03362	0.00493	0.811	1.18	5.8	0.79	4.6	6.57
V01017	10.15	NE	19.977	1.666	0.02253	0.00431	0.666	1.06	6.1	0.70	4.8	6.72
V01018	9.32	NE	20.081	1.367	0.01095	0.00344	0.547	1.17	6.3	0.75	4.8	6.72
V01019	11.20	NE	20.555	1.861	0.02433	0.00442	0.744	1.26	6.3	0.83	5.1	6.92
V01020	12.42	NE	20.744	2.138	0.03010	0.00475	0.855	1.15	6.2	0.77	4.8	6.72
November 28-30, 2000												
V01104	10.66	NE	13.441	1.231	0.00174	0.00213	0.492	0.76	4.0	0.52	3.6	5.52
V01105	9.27	NE	13.21	1.057	0.00156	0.00208	0.423	0.90	4.2	0.63	3.7	5.65
V01106	6.17	NE	12.737	0.607	0.00039	0.00155	0.243	0.85	4.6	0.58	3.9	5.89

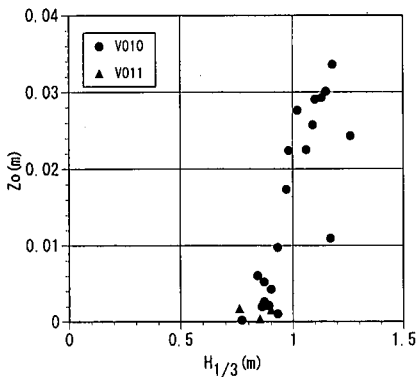


図-5 有義波高と粗度パラメータの関係

は増加割合が大きくなった。Lo (1977) は風速が大きくなると粗度上から渦が活発に発生することにより粗度パラメーターが増加するものと考えた。しかし、V011の測定ケースにおいては風速が増加しても粗度パラメーターはそれ程増加していない。これは表-1からわかるが、基準風速が増すと平均波高(H)と有義波高($H_{1/3}$)が増加する傾向があるが、V010とV011の測定ケースを比較するとV011の測定ケースにおいては基準風速の大きさに比して波高と周期が小さいためである。図-5は有義波高($H_{1/3}$)と粗度パラメーター(Z_0)の関係を示したものである。この図より、粗度パラメーターは有義波高が増加するにつれ直線的に増加する傾向があり、粗度としての波高に関係しているといえる。しかし、波高の増加は粗度自体のスケールの増加であるが、固定床と異なり波動の特性から粗度パラメーターは波高のスケール程度の影響は受けない。今回測定した風速範囲 $2.39 \text{ m/s} < V_{10} < 12.42 \text{ m/s}$ においては $0.00023 \text{ m} < Z_0 < 0.03362 \text{ m}$

となり、塩谷 (1979) による NASA のデータである滑らかな海面 ($2 \times 10^{-4} \sim 3 \times 10^{-4} \text{ m}$) と Pasquill (1971) や Jackson (1977) の研究による低草原、耕地のオーダーとなった。田中・野上・関田 (1998) は平坦な砂浜で $Z_0 = 0.01 \text{ m}$ といった値を求めている。また、このときの係数 A は約 1.5 前後となった。

(2) 摩擦係数

境界面のせん断応力(τ)は式(3)で定義される。

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

ここで、 ρ は空気密度(kg/m^3)、 k_d は摩擦係数、 V は基準風速であり一般的には地表 10 m の高さの風速を用いる。式(2)と式(3)から式(4)の関係が得られる。

$$k_d = \left(\frac{AK}{V} \right)^2 \quad (4)$$

今回、基準風速(V_{10})とKarman定数を0.4として摩擦係数(k_d)を求めた。その結果を表-1に示してある。図-6は基準風速(V_{10})と摩擦係数(k_d)の関係である。基

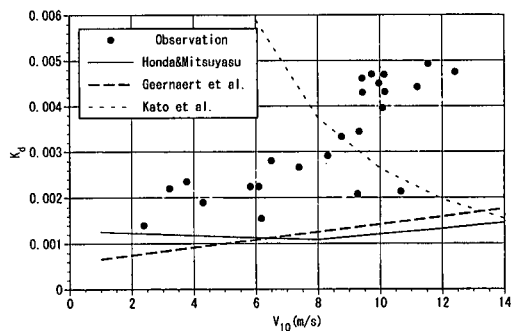


図-6 基準風速と摩擦係数との関係

準風速が増すにつれ摩擦係数はほぼ直線的に増加する傾向がある。今回の測定風速範囲では $0.00140 < k_d < 0.00493$ となった。この値は, Davenport (1961) や田中・野上・関田 (1998) が求めた平坦な地形の値である 0.005 より小さな値となった。本多・光易 (1980) は実験から式 (5) を求めた。

$$\begin{aligned} k_d &= (1.28 - 0.0242 V_{10}) \times 10^{-3} & \text{as } V_{10} \leq 8 \text{ m/s} \\ k_d &= (0.581 + 0.0626 V_{10}) \times 10^{-3} & \text{as } V_{10} \geq 8 \text{ m/s} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (5)$$

Geernaert・Larsen・Hansen (1987) は海上から 33 m の高さに設置した音波風速計を用いて 10 分から 30 分間連続測定したデータから Reynolds Stress を求めて式 (6) に示す摩擦係数の式を提案した。

$$k_d = (0.0847 V_{10} + 0.577) \times 10^{-3} \dots\dots\dots (6)$$

加藤・大松・吉元・斎藤 (1994) は浮遊式海洋構造物 (POSEIDON 号) において海面から 19.5 m の高さの海上風を観測し, スペクトルピーク値と摩擦係数の関係から式 (7) に示す摩擦係数の式を求めた。

$$\begin{aligned} k_d &= 1.0 / V_{19.5}^{1.58} & \text{as } V_{19.5} < 17 \text{ m/s} \\ k_d &= 0.065 \times 10^{-3} V_{19.5} & \text{as } V_{19.5} > 17 \text{ m/s} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (7)$$

図-6 には式 (5), (6), (7) の既往の研究結果である関係式による値を併記してあり, 今回の求めた摩擦係数は本多・光易 (1980) と Geernaert・Larsen・Hansen (1987) の結果より大きな値となった。また, 加藤・大松・吉元・斎藤 (1994) の結果と比較すると $V_{10} < 9 \text{ m/s}$ では小さく, $V_{10} > 9 \text{ m/s}$ では大きな値となった。ただし, 摩擦係数の求め方として本多・光易 (1980) 以外は風速分布から求めた値ではない。

図-7 は有義波高 ($H_{1/3}$) と摩擦係数 (k_d) の関係がある。有義波高が増加するにつれ摩擦係数はほぼ直線的に増加する傾向がある。よって, 摩擦係数は粗度パラメータ同様, 有義波高に関係しているといえる。

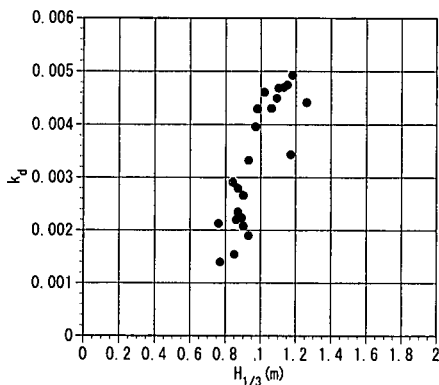


図-7 有義波高と摩擦係数の関係

(3) 乱れ強さ

乱れ強さ (V') を基準風速 (V_{10}) で無次元化した相対乱れ強さ (V'/V_{10}) は海面からの高度が増すにつれ若干大きくなったが, 基準風速に対する乱れ強さの増加割合は 10% 程度であった。図-8 は粗度パラメータと相対乱れ強さとの関係である。この図には海面に近い ch1 の乱れ強さ (V'_1) と海面から最も離れた ch8 の乱れ強さ (V'_8) が示してある。両者とも粗度パラメータが増加するにつれ相対乱れ強さは減少する傾向がある。これは, 前述したように基準風速に対する乱れ強さの増加割合は約 10% と小さいことに起因する。また, 図-8 に Counihan (1975) が高さ 30 m の地上で観測した結果を併記してある。実線は Counihan (1975) が求めた式 (8) で表される関係式である。今回の結果と異なり, 粗度パラメータが増加すると相対乱れ強さも増加する傾向にある。

$$\frac{V'}{V} = 0.096 \log Z_0 + 0.016 (\log Z_0)^2 + 0.24 \quad \dots (8)$$

(4) 風速変動スペクトル

図-9 は風速変動の無次元スペクトルである。図中の実線は測定ケース V01016 の海面からの高さ $Z = 10.31$

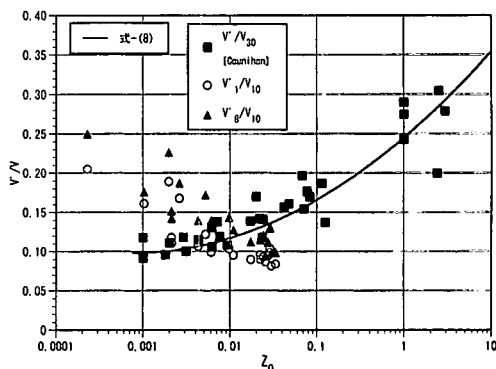


図-8 粗度パラメータと乱れ強さの関係

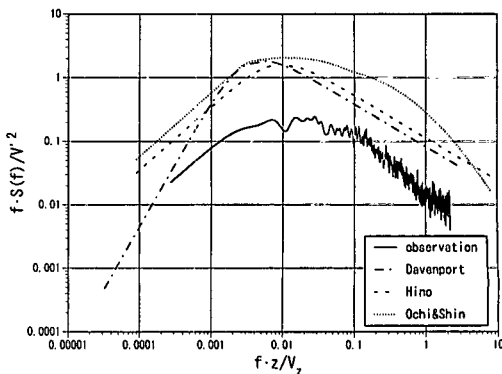


図-9 他の無次元スペクトルとの比較

mにおける無次元スペクトルである。図中には、代表的な Davenport (1961), 日野(1965), Ochi and Shin (1988)の無次元スペクトルを示し比較した。今回得た無次元スペクトルは高周波側では Davenport, 日野の無次元スペクトルに一致し, 低周波側では Ochi and Shin の無次元スペクトルに傾向が一致する。しかし, 全般的には日野の無次元スペクトルによく一致している。今後, 海面近傍の風速変動スペクトルについて波浪変動との関係を検討する必要がある。

4. おわりに

今回, 海面から 10 m 付近までの海上風の連続観測を行い, 風速分布の対数側から粗度パラメーターと摩擦係数を求めた。粗度パラメーターは基準風速が増すにつれ増加する傾向はあるが, 粗度パラメーターの値に最も関係するのは有義波高である。また, 摩擦係数の値も有義波高に関係し, 有義波高が増すと摩擦係数も増加する傾向があることがわかった。

今後, 波浪等も同時測定していることからより詳細なメカニズムを解明していきたい。

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国土交通省中部地方整備局静岡河川工事事務所に感謝いたします。また, 研究に協力してくれた東海大学大学院生高橋琢磨君, 学部学生尾山健介君 (現: ㈱オフィスマリタイム), 小林芳弘君 (現: コトコ㈱) に感謝いたします。本研究は文部科学省科学研究費 (基盤研究 (c), 研究代表者 田中博通) の補助を受けて行ったものである。

参 考 文 献

加藤俊司・大松重雄・吉元博文・斎藤昌勝 (1994): 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.
- 塩谷正雄 (1979): 強風の性質—構造物の耐風設計に関連して—, 開発社, p. 37-38.
- 竹内清秀・近藤純正 (1981): 大気科学講座 1 地表に近い大気, 東京大学出版会, p. 10-31.
- 田中博通・野上郁雄・関田欣治 (1998): 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.
- 日野幹雄 (1965): 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.
- 本多忠夫・光易 恒 (1980): 水面に及ぼす風の作用に関する実験的研究, 第 27 回海岸工学講演会論文集, pp. 90-93.
- Counihan, J. (1975): Adiabatic atmospheric boundary layers. A review and analyses of data from the period 1880-1972, Atmos. Environ., 9, pp. 871-905.
- Davenport, A. G. (1961): The spectrum of horizontal gustiness near the ground in high winds, Quart. J. Roy. Met. Soc., Vol. 87, pp. 194-211.
- Davenport, A. G. (1961): The application of statistical concepts to the wind loading of structures, Proc. Inst. Civil Engrs., Vol. 19, pp. 449-472.
- Geernaert, G. L., S. E. Larsen and F. Hansen (1987): Measurements of the wind stress, heat flux, and turbulence intensity during storm conditions over the North Sea, Jour. of Geoph. Res., Vol. 92, No. C12, pp. 13,127-13,139.
- Jackson, P. S. (1977): Aspects of surface wind behavior, Wind Engineering, pp. 1-14.
- Kaimal, J. K. (1988): The atmospheric boundary layer—Its structure and measurement, (光田寧・山田道夫訳, 技法堂出版, p. 6-22.)
- Lo, A. K. (1977): Boundary layer flow over gentle curvilinear topography with a sudden change in surface roughness, Quart. Jour. Roy. Meteor. Soc., 103, pp. 199-209.
- Ochi, M. K. and Shin, Y. S. (1988): Wind turbulent Spectra for design consideration of offshore structures, OTC 5736, pp. 461-467.
- Pasquill, F. (1971): Wind structure in the atmospheric boundary layer, A discussion on architectural aerodynamics, Phil. Trans. Roy. Soc. London, A, 269, pp. 430-456.