

変動風速による海面抵抗係数と風波の応答に関する研究

Experiments on Drag Coefficients and Response of Wind Waves to Periodically Fluctuating Winds

泉宮尊司¹・湯島智恵美²・石橋邦彦³

Takashi, IZUMIYA, Chiemi YUJIMA, and Kunihiro ISHIBASHI

Experiments have been carried out to investigate drag coefficients and response of wind waves under periodically fluctuating winds. Wind stresses estimated from momentum conservation law considering radiation stresses were compared with those estimated from vertical distribution of wind speed. It is found that the former stresses are much larger than latter ones and about twice of the latter in the case of breaking wind waves. Vertical distributions of time-averaged wind speed of periodically fluctuating winds were also compared with those of constant wind speed. The significant difference between them can not be found. However, in the case of periodically fluctuating winds long period waves with predominant period of fluctuating winds were excited unlike constant wind speed.

1. 緒 言

自然風には「ゆらぎ」や「風の息」と呼ばれる比較的に長い変動からいわゆる乱流成分まで様々な周期の変動成分が含まれている。これまでに一定風速に対する風波の発生・発達メカニズムは理論的および実験的に明らかにされているが、風速が変動する場合の風波の応答や海面抵抗係数の変化に関する研究は殆どなされていない(山下ら, 1998; Toba ら, 2001; 杉原ら, 2004)。しかしながら、現地の風速を観測してみると、数10秒から数10分の変動が有意に含まれており、このような変動風速に対する海面抵抗係数や風波の応答特性を明らかにする必要がある。そこで本研究では、まず自然風を観測してその変動特性を明らかにすると共に、風洞水槽において風波の有義波周期の数倍程度の周期の変動風速を発生させて、風波の発達特性と海面抵抗係数の変化について調べることを研究の目的とする。

本研究では、まず自然風を2成分超音波式風速計で観測し、そのスペクトルを算定して変動特性等を調べる。次に変動風速が海面抵抗係数に与える影響や風波の応答を調べるために、風速を変化させた風洞水槽実験を行い、水位変動を計測すると同時にその水面波形を用いて、風波のスペクトルや radiation stress を算定する。海面抵抗係数の算定は、風速分布から算定する従来法に加えて、運動量保存則を用いて平均水面勾配と radiation stress の勾配から算定する2つの方法を採用して比較検討する。また、変動風速による風波の応答に関しては、変動風速と水位変動のスペクトルを算定し比較することにより、その特性を調べる。

2. 自然風の観測とその特性

変動風速に関する風洞実験を行う前に、自然風の変動特性について調べることにした。自然風の観測は、2007年2月2日に新潟大学建設学科棟屋上(21.59 m)の風上側の建物の影響がない場所において、2成分超音波風向風速計を用いて行った。サンプリング周波数2 Hzでデータを取得し、2時間を1セットとして3セット分観測を行った。

図-1は、2月2日12時15分以降の100 s間の風速の変化を示したものである。濃い実線は2 s間の平均風速を示している。この時間帯の2時間の平均風速は6.84 m/sであったが、この図に示すように様々な周期の変動が観測されており、その大きさも比較的大きい。特にこの図では、周期が10数秒から数10秒の変動が有意に生じていることが分る。

観測時間2時間分の風速データを最大エントロピー法(MEM法)を用いてスペクトル解析したものが、図-2である。スペクトルの実測値は1000 s程度までの低周

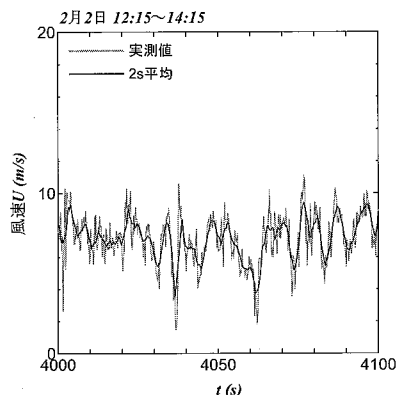


図-1 自然風の風速変動

1 正会員 工博 新潟大学教授 工学部建設学科
2 富山市役所
3 正会員 新潟大学技術職員 工学部建設学科

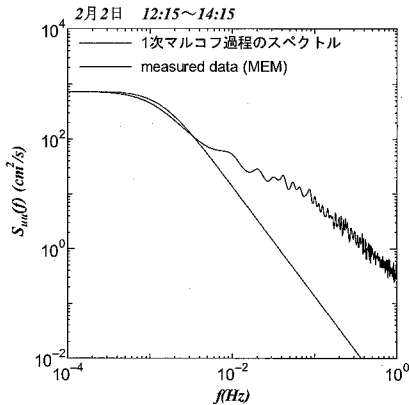


図-2 自然風の周波数スペクトル

波数ほどエネルギーが大きく、現地波浪の周期付近では数オーダほどエネルギーが小さくなっている。またこの図には、参考のため1次マルコフ過程に従う場合のスペクトルも実曲線で示している。このスペクトルは、

$$S_{uu}(f) = \frac{a}{b + f^2} \dots \dots \dots (1)$$

で表され (a , b は定数), 周波数 f の値が大きいとき, スペクトルは f^{-2} のような振る舞いをする。しかしながら, 実測のスペクトルは周波数が大きいところでは f^{-1} のような振る舞いをしており, よく知られた $1/f$ の揺らぎがあることが分る。したがって, 自然風には様々な周波数の変動が含まれており, 2時間程度の範囲内では低周波数ほどエネルギーが大きい特徴を持っていることが分った。

3. 変動風速による風波の応答

変動風速が海面抵抗係数に与える影響や風波の応答を調べるために, 変動風速の風洞実験を新潟大学建設学科にある長さ 10 m, 高さ 0.8 m, 幅 0.4 m の 2 次元水槽を用いて行った。風速変動の周期は, 水槽内に発生する風波の有義波周期の数倍から 10 数倍程度に設定した。風速の変化は, 交流インバータにより送風機のモータの回転数を制御して行い, 風速分布は微差圧計付きのピトー管 5 台を用いて計測した。さらに, 容量式波高計 3 台を用いて, 水位変動を計測すると同時に, その水面波形を用いて風波のスペクトルや radiation stress も算定した。

(1) 変動風速による風波の変化

水面からの高さ 0.2 m での約 5 分間平均風速 $U_{0.2}$ を, 約 5 m/s, 7 m/s, 9 m/s, 11 m/s および 13 m/s の 5 種類とし, その一定風速と変動風速の周期を約 3 s と約 6 s に設定した 2 種類の合計 15 ケースを行った。図-3 は, 風速 ($U_{0.2}=9.7$ m/s, $z=0.2$ m) を作用させた時の風

速, および吹送距離 3.2 m, 4.2 m および 5.2 m の位置における水面変動も併せて示している。風速が一定の場合においても, 波群のようなものが形成されており, 吹送距離が長くなるにつれて波群の周期も風波の波高も大きくなっていることが分る。

図-4 および図-5 は, 平均風速約 10 m/s において周

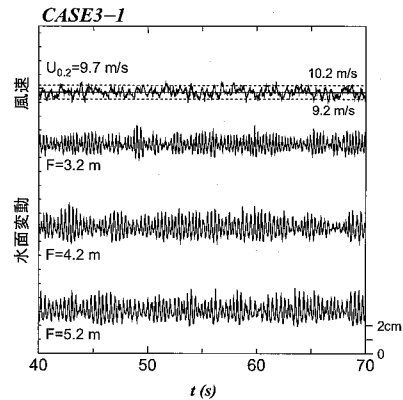
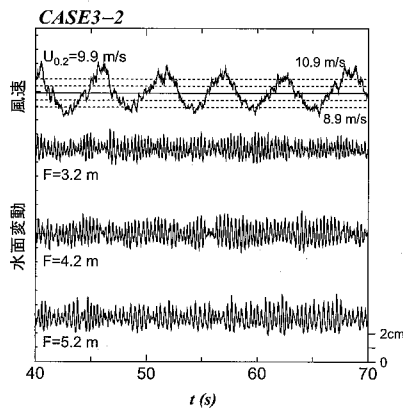
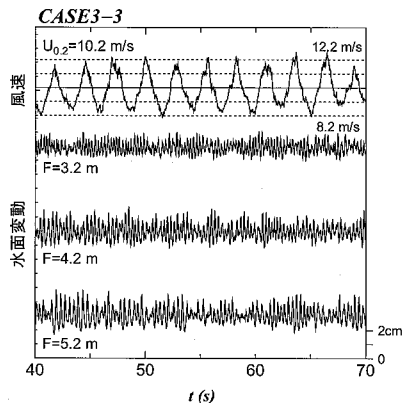


図-3 一定風速 (9.7m/s) の場合の風波の変化

図-4 変動風速 ($T_L=6$ s) の場合の風波の変化図-5 変動風速 ($T_L=3$ s) の場合の風波の変化

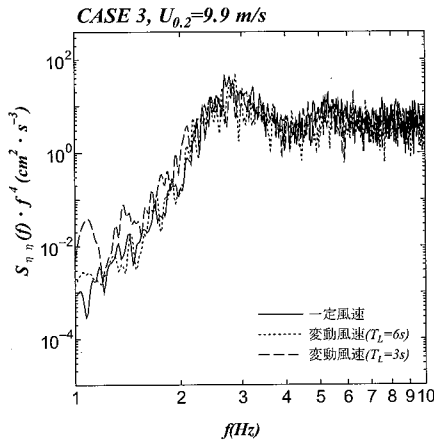


図-6 風波のスペクトル $S_{\eta\eta}(f) \cdot f^4$ の比較

期約 6 s および 3 s の変動風速を作用させた時の風波の変化を示している。変動風速の場合には、風波の波群が変動風速の周期に一致するような変動が見られ、一定風速の場合の不規則な波群の形成状況とは若干異なるようである。

この関係をもう少し詳しく見るために、後節の長周期波との応答のところでは、長周期成分のスペクトルを比較するが、ここでは風波成分の変動成分による変化をみるために、風波のスペクトル $S_{\eta\eta}(f)$ に周波数 f の 4 乗を乗じたスペクトルを比較することにする。図-6 は、風波のスペクトル $S_{\eta\eta}(f) \cdot f^4$ を比較したものである。風波のエネルギーピークが 2.7 Hz 前後にあるが、そのピーク周波数以上では、風波のエネルギーが飽和状態にあるために、一定風速および変動風速を作用させてもほぼ同一のスペクトル形状になっていることが分る。もう少し詳しく見ると、ピーク周波数の約 2.7 Hz 以上で、一種の飽和度を示す $S_{\eta\eta}(f) \cdot f^4$ の値(泉宮ら, 2004)はほぼ一定値になるが、若干オーバーシュート現象が見られ、2 倍周波数の 5 Hz 台でもやや値が大きくなっている。エネルギーピーク周波数よりも低周波数側の 1 Hz までの範囲では、変動周期約 3 s の変動風速を与えたケースではややエネルギーが大きくなっているが、周期約 6 s の変動風速を与えたケースでは、一定風速のスペクトルとほぼ同一であることが分る。

(2) 風速分布の比較

図-7 および図-8 は、風速の変動周期が 6 s および 3 s の時の平均風速の鉛直分布を比較したものである。図中の 500 rpm 等の回転数は、送風機の回転数を示しており、水面から 20 cm の高さでの平均風速は、約 5.2 m/s, 6.9 m/s, 9.5 m/s, 11.6 m/s および 13.9 m/s である。これらの図より、いずれの変動周期においても、平均風速の鉛直分布に有意な変化はないようであるが、900 回

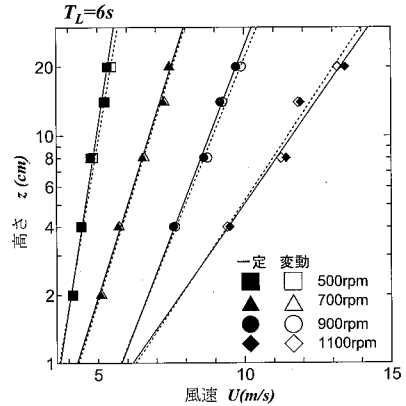


図-7 鉛直風速分布の比較 (変動周期 6s)

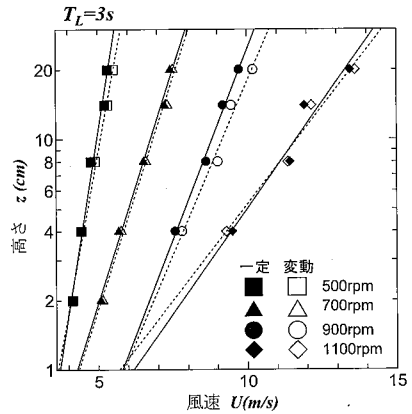


図-8 鉛直風速分布の比較 (変動周期 3s)

転以下の平均風速が 11.6 m/s 以下のより低風速では、変動風速を作用させた方が極わずかに風速の減衰率が大きいようである。

しかしながら、海面から 4 cm あるいは 2 cm 以下の風速が風波およびその飛沫の影響により計測されていないので、海面に近い位置においては何かの変化が見られる可能性は依然残っている。明確に言えることは、計測された範囲内ではほぼ対数則が成立し、一定せん断応力層が変動風速の吹いている場合でも存在していることである。

(3) 変動風速による海面抵抗係数の変化

海面せん断応力の計測法には、一般に風速分布の鉛直分布より対数則を当てはめて推定する方法や運動量保存則を適用して算定する方法などがある。運動量保存則は、radiation stress の変化も考慮して、

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial S_{xx}}{\partial x} = -\rho g (h + \bar{\zeta}) \frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial x} + \tau_s - \tau_b \dots \dots (2)$$

なる関係式から海面せん断応力 τ_s を算定する方法である。ここに、 M は運動量流束、 S_{xx} は radiation stress,

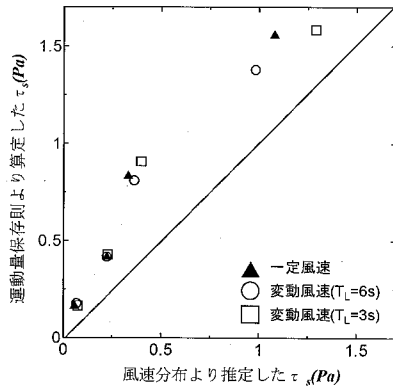


図-9 海面せん断応力の比較

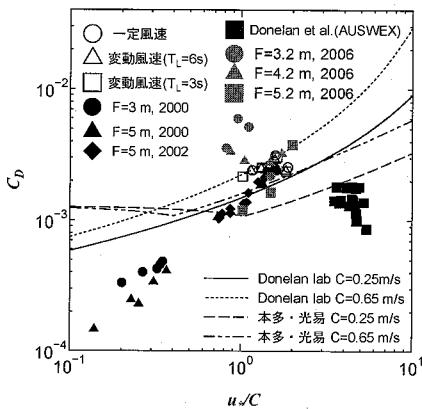


図-10 海面抵抗係数と波齢の逆数との関係

h は静水深, $\bar{\zeta}$ は平均水位, τ_b は底面摩擦応力, ρ は水の密度である。本研究では, 変動風速の周期のオーダーで時間平均をとると, M の値がほぼ一定になるのでこの非定常項を無視し, 底面摩擦応力 τ_b も十分に小さいと考えられるので無視して, 海面せん断応力 τ_s を算定した。

図-9 は, 風速分布より対数則を適用して求めた海面せん断応力と運動量保存則を適用して求めたものを比較したものである。この図より, 風速が比較的小さく海面せん断応力も小さい場合には両者の差異は小さいが, 風速が大きくなるにつれてその絶対差異が大きくなること分る。この差異の原因の一つは, 移動境界である風波に対して対数則を適用して, 一定せん断応力層の存在の仮定の下に海面せん断応力を評価していることの誤差が考えられる。すなわち, 順風と逆風では風速分布はほぼ同じでも, 海面近傍の変動圧力や変動風速の位相が異なり, 風波へのエネルギーの輸送が逆となることや, 移動境界においてはその境界面近傍では, 一定応力層の仮定が成立しないことなどが挙げられる。

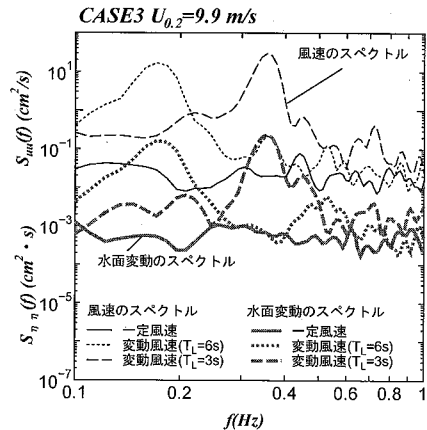


図-11 風速と水位変動のスペクトルの比較 (その 1)

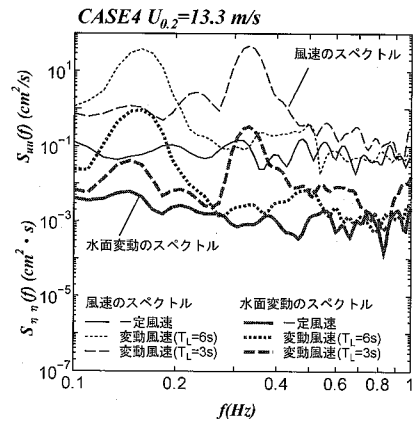


図-12 風速と水位変動のスペクトルの比較 (その 2)

図-10 は, 海面抵抗係数と波齢の逆数との関係を示したものである。この図には, 山下ら (2003) のデータや本多・光易 (1980) および Denelan (1990) の実験式も示している。変動風速による結果は, $\triangle$ 印 (周期 6 s) および $\square$ 印 (周期 3 s) で示している。一定風速の場合との違いは明確ではなく, 平均量を用いれば従来の本多・光易 (1980) の実験式や Denelan ら (1990) の関係式に近いと言える。

4. 変動風速による長周期波の応答

変動風速による長周期波の発生および応答を調べるために, 風速と水位変動の極めて低周波数側のスペクトルを調べた。図-11 および図-12 は, 吹送距離 4.2 m の位置における, それぞれ平均風速 9.9 m/s と 13.3 m/s の一定風速および変動風速の場合の 0.1 Hz から 1.0 Hz までのスペクトルを比較したものである。いずれの場合においても, 変動風速のスペクトルのピーク周波数の位置に水位変動のスペクトルのエネルギーピークが存在し

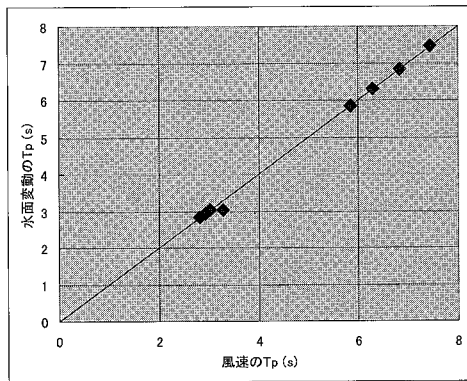


図-13 変動風速と水位変動のスペクトルの卓越周期の比較

ており、風速変動と共鳴して長周期波が発生・発達しているように見える。しかしながら、風速が変動すると圧力も同様に変動するので、Phillips (1969) の共鳴機構によるものかも知れない。どちらに共鳴しているかを調べるには、詳細な圧力分布および海面せん断応力の時間変化を調べる必要がある。

変動風速と長周期水位変動との関係をもう少し詳しく調べるために、それらのスペクトルのピーク周波数から卓越周期 T_p を算定し、図-13 にそれらを比較した。この図に示されるように、風速変動と長周期波の卓越周期はほぼ一致しており、海面せん断応力が圧力による共鳴機構が働いていることが窺える。

5. 結 論

自然風の観測および変動風速による海面抵抗係数や風波の応答特性を風洞水槽を用いて調べ、その結果以下の事柄が明らかとなった。

- (1) 自然風は短周期の乱流成分から数時間の長周期の変動成分をもち、2 時間計測の周波数スペクトルでは長周期ほどパワーがあり、 $1/f$ に近い関係で減衰していることが分った。
- (2) 風速変動によって、波群も一定風速の場合よりも有意に変化していることが各風速において確かめられた。風波上の時間平均風速分布は、一定風速の場合と変動風速の場合ではほぼ同一であり、有意な差異は認められなかった。
- (3) 風速分布から算定した海面摩擦応力と radiation stress を考慮した運動量保存則から算定したものとでは、最大で 2 倍程度の差異があり、風波上の風速分布のみでは海面摩擦応力の計測誤差が大きくなる可能性があることが示唆された。風波が碎波している場合に

両者の差異が大きくなる傾向が見られた。

- (4) 海面抵抗係数の値は、風速が変動する場合でも時間平均風速を用いて評価することによって、風速がほぼ一定の場合と余り変化しない結果が得られた。しかしながら、風波の有義波周期の時間のオーダーでは、波群が形成され海面摩擦応力も変動しているものと推察された。
- (5) 風速変動と風波との応答を詳しく調べるために、変動風速と水面変動のスペクトルを算定したところ、両者のスペクトルのピークは正に一致しており、風速変動との共鳴により長周期波が発生・発達していることが明らかとなった。このことはすべての変動風速の場合においても成立しており、ピーク周期の差異は数% 程度以内であった。
- (6) 長周期波が風波群から形成されていると考えると、波群の代表周期も変動風速の周期に一致していることが推測された。しかしながら、周期的に変動する海面摩擦応力による変動なのか、風速変動に伴って気圧も同様に変動するため、気圧変動との共鳴であるかは詳細な検討が必要である。

参 考 文 献

- 泉宮尊司・上野 晃・石橋邦彦(2004a): 風波の局所相似構造と飽和度を考慮したエネルギー逸散スペクトルの評価, 海岸工学論文集, 第 51 巻, pp. 196-200.
- 泉宮尊司・上野 晃・石橋邦彦(2004b): 風波上の気流圧力および風速変動の鉛直分布特性に関する研究, 海岸工学論文集, 第 51 巻, pp. 386-390.
- 杉原裕司・津守博通・大賀崇史・吉岡 洋・芹澤重厚(2004): 風波とうねりが混在する波浪場の海面抵抗則に関する研究, 海岸工学論文集, 第 51 巻, pp. 66-70.
- 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.
- 山下隆男・路 明・Christophe Ruscher(1998): 碎波帯近傍における海面せん断応力の評価法, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp. 81-85.
- 山下裕之・泉宮尊司・長谷部純・黄 光偉・石橋邦彦(2003): 海面抵抗係数の波齢および波形勾配依存型評価式の提案, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp. 91-95.
- Donelan, M.A. (1990): Air-sea interaction, In B.Le Mehaute and D.M.Hanes Eds. The Sea, Ocean Engineering Science, Wiley Interscience, pp. 239-292.
- Phillips, O. M. (1969): The Dynamics of the Upper Ocean, Cambridge Univ. Press, 261p.
- Toba, Y., S.D.Smith and N. Ebuchi (2001): Historical drag expressions, In Wind Stress over the Ocean, Jones, S.F. and Y. Toba eds, Cambridge University Press, pp. 35-53.