

風速および気圧変動による長周期波の共鳴発達機構に関する研究

Resonant Evolution of Long Period Waves by Periodically Fluctuating Winds

泉宮尊司¹・渡辺 聡²・石橋邦彦³

Takashi IZUMIYA, Satoshi WATANABE and Kunihiko ISHIBASHI

Field observation have been carried out to investigate spectral characteristics of natural wind velocity. Laboratory experiments on response of wind waves under periodically fluctuating winds have also been done. Spectral density of natural fluctuating wind velocity indicates a f^{-1} decay low. The measurements of the wind velocity and air pressure above wind waves show that the fluctuating components of wind velocity change in phase to the water surface elevations, while those of the air pressure change almost out of phase to wind waves. In the experiments, long-period waves appear to be generated by the periodically fluctuating components of wind velocity, not by those of air pressure through the spectrum analysis of the fluctuating components of the water surface elevation, wind velocity and air pressure.

1. 緒言

海の波には一般に周期が30s以上の長周期波が含まれており、特に発達した低気圧や台風などが通過する際には、その長周期波は浅海域では非常に大きな振幅となっていることがしばしば観測されている(青木ら, 1997; 笠井・佐藤, 1999)。長周期波は、港湾での荷役作業の支障となるだけでなく、波の遡上や打上げ高さおよび越波流量にも大きな影響を及ぼしている。また、長周期波による流速は余り大きくなくても、継続時間が長いので、浮遊砂の移流や海浜地形変化にも有意に影響を及ぼしていると考えられる。このため、長周期波の発生・発達および伝播・増幅特性を明らかにすることは、極めて重要である。

しかしながら、非線形拘束波による長周期波の発生機構に関してはほぼ明らかとなっているが(関本, 1999)、自由長周期波に関しては、その起源と発達機構については不明な点が多い。また、長周期波の観測によると、非線形拘束波による長周期波は自由波に比べて1オクタード小さいことが報告されており(中畑ら, 2001)、自由波の発生メカニズムを調べる重要性は益々大きくなっている。

そこで本研究では、自由長周期波と見なされている長周期波が、自然界に存在する風速変動や気圧変動により共鳴して生じているのではないかと仮説を立て(泉宮ら, 2007)、自然風の気圧と風速変動の観測を行い、その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の変動風速を発生させて、長周期波が気圧と風速変動のどちらに共鳴して発生・発達しているかを調べることを研究の目的とする。

2. 自然風の風速および気圧変動の観測

自然風の変動特性を調べるために、泉宮ら(2007)は建物屋上で風速を観測し、そのスペクトルが $1/f$ のゆらぎ則に従っていることを示している。しかしながら、観測されたのは風速のみであり、気圧変動に関しては測定されておらず、その変動特性に関しては不明であった。

そこで本研究では、新潟大学建設学科棟屋上において、2成分超音波風向風速計、微差圧計を取り付けたピトー管式風速計および微気圧計を用いて観測を行った。計測時間を30分および60分の2種類設定し、サンプリング周波数5Hzでデータを取得し、合計4ケース観測を行った。

図-1は、自然風の気圧および風速変動のスペクトルを示したものである。スペクトル解析には、FFT法を用いて平滑化を施したものをを用いている。この図では、周波数約0.05Hz以上で、気圧および風速変動共にほぼ f^{-1} 則に従っていることが分る。また、エネルギー密度のピークが $f=0.01$ Hz前後に存在し、周期約100s前後の変動が卓越していることが分る。他の時間帯においても、周波数0.05Hz程度以上ではほぼ f^{-1} 則に従っており、それ以下の

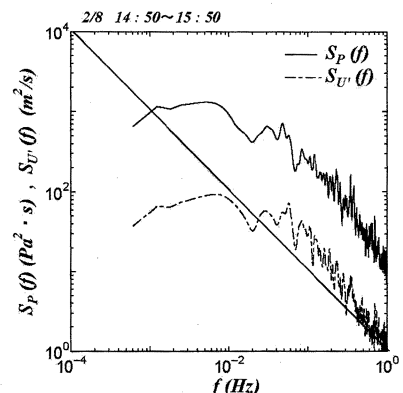


図-1 自然風の気圧および風速変動のスペクトル

1 正 会 員 工 博 新潟大学教授 工学部建設学科

2 新潟県十日町地域振興局

3 正 会 員 新潟大学技術専門職員 工学部建設学科

周波数では、より低周波数ほどエネルギー密度が高い結果であった。この結果は、周期数分から数10分の風の変動振幅は有意な振幅を持っていることを示しており、この風の気圧や風速変動と共鳴が生じれば、長周期波が発生することは十分に考えられることである。

3. 風速および気圧変動による風洞水槽実験

風速および気圧変動による風波と長周期波の応答を調べるために、新潟大学建設学科にある長さ10m、高さ0.8m、幅0.4mの風洞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数倍程度の約3sと約6s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、風速および気圧変動はそれぞれ微差圧計付きのピトー管および微差圧計を用いて計測した。水位、気圧および風速は、吹送距離 $F=4.0\text{m}$ の位置で各ケースとも約200s間計測し、サンプリング周波数50Hzでデータレコーダに記録した。気圧変動の計測は、静水面から2.4cmの高さで行い、風速は同じく静水面から4.2, 8.2, 14.2, および20.2cmの高さで計測した。

風洞水槽実験は、平均風速が約5m/s, 7m/s, 9m/s, 11m/sの4種類とし、一定風速と変動風速の周期を約3sと約6sに設定した2種類の合計12ケースを行った。

表-1 実験条件

Case No.	平均風速 U (m/s)	変動周期 T_L (s)	Case No.	平均風速 U (m/s)	変動周期 T_L (s)
1	4.71	一定風速	7	8.85	3
2	7.07	一定風速	8	11.3	3
3	8.39	一定風速	9	5.01	6
4	11.0	一定風速	10	7.30	6
5	4.65	3	11	8.74	6
6	7.51	3	12	11.1	6

(1) 風速および気圧変動による水位変化

図-2は、一定の風速($U_{0.14}=8.39\text{m/s}$)を作用させた時の風速変動、気圧変動および水位変動を示したものである。風速が一定の場合では、風速と気圧変動との明確な関係は見出されないが、気圧変化と水位変動において類似した波群が形成されていることが分る。これは、波群中の波高が大きい時には、風波上の気圧変化も大きくなるため、類似した波群が形成されるものと考えられる。

一方、変動風速を作用させた図-3および図-4では、風速変動と気圧変動とはほぼ逆位相で変化しており、風速が大きい時に気圧がやや低下している関係が認められる。この関係は、変動の周期や平均風速が変化しても、ほぼ成立していた。水位変動に関しては、風速変動の周期とほぼ同じ周期で変動しているようであり、風速が大きい位相よりも多少遅れて高波群が形成されていることが分

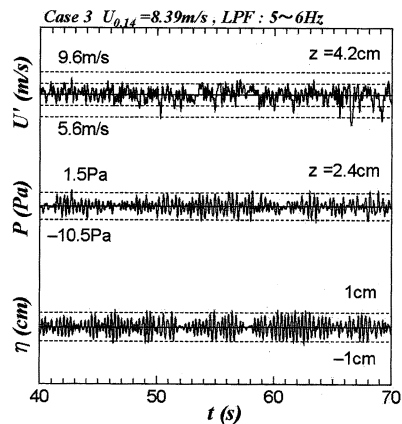


図-2 風速、気圧および水位変動（一定風速：Case 3）

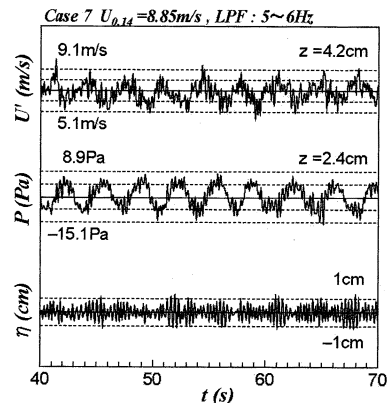


図-3 風速、気圧および水位変動 ($T_L=3\text{s}$: Case 7)

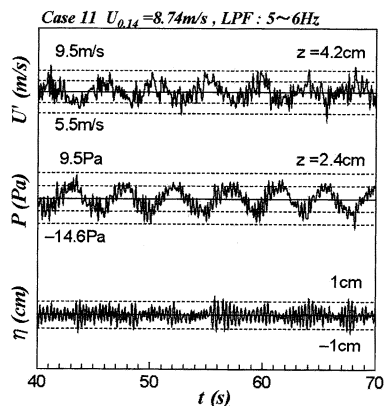
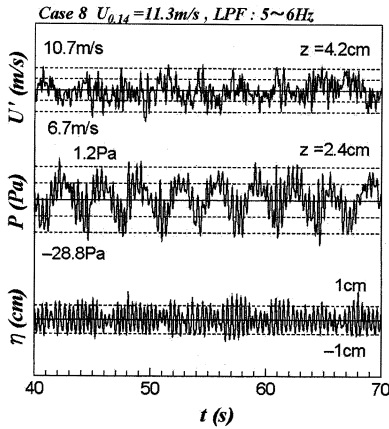
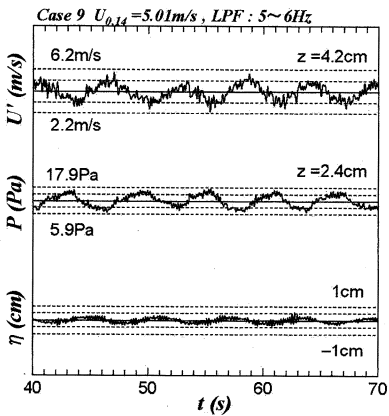


図-4 風速、気圧および水位変動 ($T_L=6\text{s}$: Case 11)

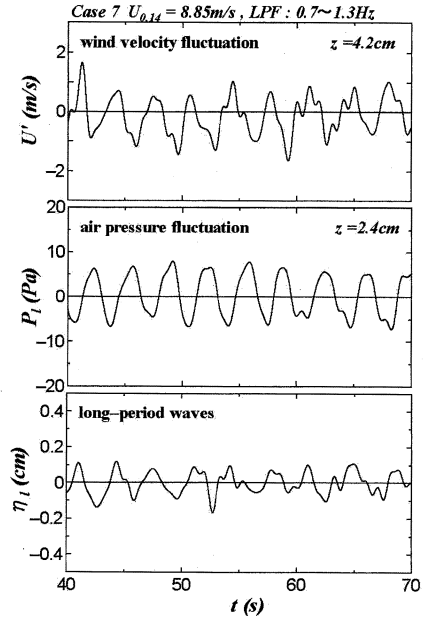
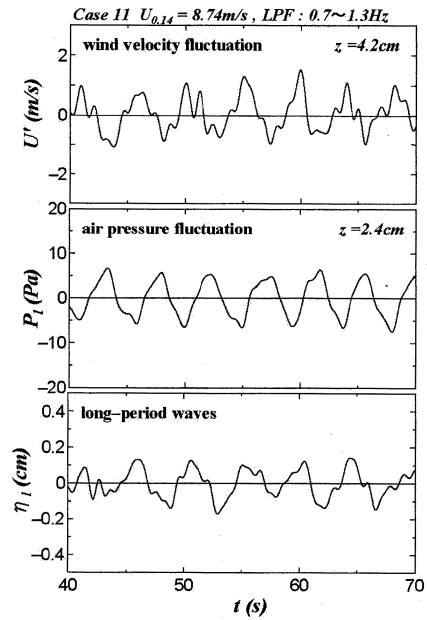
る。また、これらの図をよく見ると、気圧変動の高周波変動成分は、風波の水位変動とほぼ同一の周期で変動していることが認められる。この関係をもう少し明確に見るために、平均風速の大きいCase 8($U_{0.14}=11.3\text{m/s}$)を図-5


図-5 風速，気圧および水位変動 ($T_L=3s$: Case 8)

図-6 風速，気圧および水位変動 ($T_L=6s$: Case 9)

に示す。このケースでは，風波の水位変動と同じ周期で気圧が変化しており，Milesの共鳴機構によって風波が発達していることが認められる。また，波群の振幅も風速変動の周期とほぼ同じ周期で変動しているような傾向が見られる。

図-6は，逆に平均風速が約5.0m/sと小さく，風速変動の周期が6sの場合の風速，気圧および水位変化を示したものである。風速が小さいので風波成分は余り発達していないが，変動風速に応じて長周期の波が有意に発生しているのが分る。この長周期の波は，風波成分の振幅から考えて波群によって形成されたものではなく，変動風速かあるいは気圧変動に共鳴して発生したものと推測される。これらの何れかに共鳴しているかについては，後節のエネルギー供給スペクトルのところで議論することにする。

気圧，風速および水位変動の関係をもう少し詳しく見るために，風波成分をローパスフィルターで除去した波形を比較することにした。図-7は，平均風速8.85m/s，変動周期3sの実験結果を示したものである。風速と気圧変


図-7 風速，気圧および水位変動の長周期成分 ($T_L=3s$)

図-8 風速，気圧および水位変動の長周期成分 ($T_L=6s$)

動に関しては，ほぼ逆位相で変化しており，風速が大きい位相では，気圧が下がる傾向にあると言える。一方，気圧変動と水位変動との関係は，逆位相に近いようである。しかしながら，変動風速成分と水位の長周期成分は多少位相遅れがあるが同位相に近く，波形も類似してい

る。図-8は、平均風速8.74m/s、変動周期6sの測定結果である。風速変動と気圧変動との関係は、変動周期3sの場合とほぼ同じで大抵的に逆位相で変化している。また、風速変動と水位変動との関係も前ケースと同様に、ほぼ同じ位相で変化していることが認められる。

(2) 風速、気圧および水位変動のスペクトルの比較

図-9および図-10は、風速、気圧および水位変動のスペクトルを比較したものである。図-9は風速の変動周期が3sのCase 7で平均風速が8.85m/s、図-10が周期6sで平均風速がほぼ同じの8.74m/sの実験結果である。風波成分が卓越している3Hz付近では、水位変動と気圧変動のスペクトルが類似しており、水位変動に応じて風波上の気圧変化が生じていることが分る。変動風速成分のスペクトルは、気圧の測定位置($z=2.4\text{cm}$)より測定位置が高い($z=4.2\text{cm}$)こともあって、明確なエネルギーのピークは見られない。

しかしながら、風速変動の周期に対応する0.33Hz付近には、気圧変動および水位変動にもエネルギーピークが存在しており、共鳴現象によって長周期波が発生していることが明確に認められる。このような共鳴現象は、図-10に示すように変動周期が6sの時も明確に見られる。このように風速変動によって、ほぼ同じ周期の長周期波

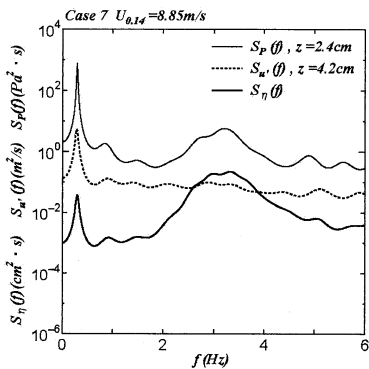


図-9 風速、気圧および水位変動のスペクトル($T_L=3\text{s}$)

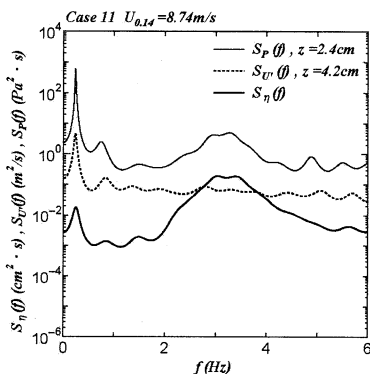


図-10 風速、気圧および水位変動のスペクトル($T_L=6\text{s}$)

が発生することが実験から確かめられたが、その発生が気圧変動によるものか風速変動によるものかについては未だ不明である。

(3) エネルギー輸送量の評価

気流から風波へのエネルギー輸送量の観点から、波成分にエネルギーの供給がなされているかについて調べることにした。

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \frac{1}{\rho_w g} \overline{p \frac{\partial \eta}{\partial t}} \quad (1)$$

ここに、 E は風波のエネルギーであり、 p は気圧変動、 ρ_w は水の密度である。式(1)の右辺の項より、エネルギー供給量は気圧と水位変動のクロススペクトルのクオドスペクトルを用いて表すことができる(鶴谷ら, 1985)。

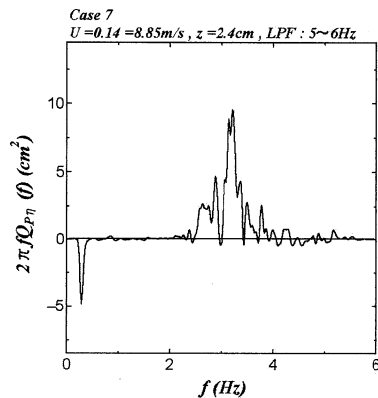


図-11 エネルギー供給スペクトル(Case 7)

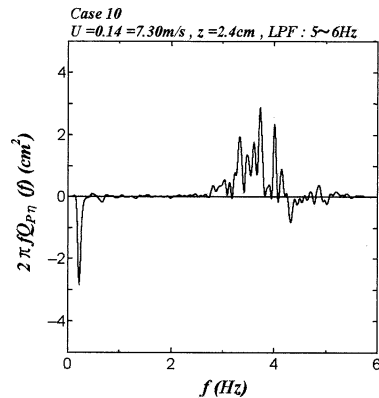


図-12 エネルギー供給スペクトル(Case 10)

図-11および図-12は、気流から波へのエネルギー供給スペクトルを示したものである。いずれの場合においても、風波成分の3Hz周辺では正の値を示しており、気流から風波へエネルギーが供給されていることが明らかである。一方、長周期波成分の周波数帯では、スペクトルは負の値を示しており、気流圧力変動によって負の仕事

がなされている結果となっている。したがって、気圧変動に共鳴して長周期波が発生・発達していることは、ほぼ否定される。

それでは、風速変動との関係について、運動量保存則と連続式を用いて考察する。運動量方程式より、水位変動に関する以下の関係式が導かれる。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^2 \bar{\zeta}}{\partial t^2} - \frac{\partial}{\partial x} \left\{ g(h + \bar{\zeta}) \frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial x} \right\} - \frac{\partial}{\partial y} \left\{ g(h + \bar{\zeta}) \frac{\partial \bar{\zeta}}{\partial y} \right\} \\ & + \frac{1}{\rho} \left\{ \frac{\partial^2 S_{xx}}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 S_{xy}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 S_{yy}}{\partial y^2} \right\} = - \frac{\partial}{\partial x} \left\{ g(h + \bar{\zeta}) \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\Delta P}{\rho g} \right) + \frac{\tau_x^s}{\rho} - \frac{\tau_x^b}{\rho} \right\} \\ & - \frac{\partial}{\partial y} \left\{ g(h + \bar{\zeta}) \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\Delta P}{\rho g} \right) + \frac{\tau_y^s}{\rho} - \frac{\tau_y^b}{\rho} \right\} \end{aligned} \quad \dots\dots (2)$$

ここに、 $\bar{\zeta}$ は平均水位、 S_{xx} 、 S_{xy} 等はradiation stress成分、 h は静水深、 τ_x^s は海面せん断応力、 τ_x^b は底面摩擦応力、 ΔP は気圧低下量である。上式の右辺が気流変動による強制外力項であるが、水深が10m程度以下の場合には、海面摩擦応力項は右辺の $\{\}$ の第1項の気圧変化による項よりも有意な大きさとなり、吹き寄せ効果の時間的変動により長周期波を引き起こす要因となり得る。

4. 結 論

自然風の観測および風洞水槽実験において、長周期の風速変動を与えて、水位、気圧および風速変動を同時計測した結果、以下の事柄が明らかとなった。

- (1) 自然風の観測では、気圧および風速変動のスペクトルは、 $1/f$ に近いほぼ相似的な関係で減衰していることが分った。このことより、風速変動の低周波数に大きな振幅を有していることが分った。
- (2) 風速変動と気圧変動との関係は、ほぼ逆位相の関係にあり、風速が強くなった時に気圧が下がる傾向にあることが分かった。また風速変動と波群の形成には、ある程度の対応関係が認められた。
- (3) 長周期波と気圧および風速変動との関係を詳しくみるために、それらにローパスフィルターをかけて長周期成分を抽出して比較を行った。その結果、長周期波と風速変動とはほぼ同位相であり、波形も類似していることが分った。また、風速変動と気圧変動は逆位相に近いことも明らかとなった。
- (4) 同時計測された水位と気圧および風速変動のスペクトルを算定し比較したところ、長周期風速変動と同じ周波数で長周期波が発生していることが分った。このことは、変動風速の周期を3sから6sに変化させても、平均風速を強くしても弱くしても成立していることから、両者の何れかに共鳴していることが明らかとなった。
- (5) 風波および長周期波へのエネルギー供給を詳しく調

べるために、気圧変動と水位変動のクオドスペクトルを算定したところ、風波成分には気流からエネルギーが輸送されているのに対して、長周期波成分では逆に気流に対して仕事をしていることが分った。このことは他の変動風速の場合においても同様であり、長周期波は気圧変動に共鳴して発達しているのではなく、変動風速に共鳴して発生・発達していることが分った。すなわち、変動風速により海面摩擦応力が変化し、それに伴って長周期波の水位勾配が共鳴して変化するために、長周期波の運動量が増大することによって発達しているものと考えられた。

なお、本研究の一部は、日本学術振興会の科学研究費基盤研究Cによったことを付記し、感謝いたします。

参 考 文 献

- 青木伸一・喜岡 渉・山村易見・相川久紀・舟橋 香(1997): 台風の通過に伴う沿岸長周期波の増幅と伝播に関する現地観測, 海岸工学論文集, 第44巻, pp.216-220.
- 青木伸一・岡辺拓巳・出口一郎(2002): 波浪条件の異なる2つの海岸での長周期波の増幅と港内副振動の特性比較, 海岸工学論文集, 第49巻, pp.231-235.
- 泉宮尊司・湯島智恵美・石橋邦彦(2007): 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, 海岸工学論文集, 第54巻, pp.196-200.
- 岡田知也・橋本典明・永井紀彦(1999): 沿岸域における流れの長周期変動と風の関連性, 海岸工学論文集, 第46巻, pp.441-445.
- 笠井雅広・佐藤慎司(1999): 台風に伴う波浪と長周期変動, 海岸工学論文集, 第46巻, pp.301-305.
- 関本恒浩(1999): 港湾内外の長周期波の特性とその評価に関する研究, 中央大学博士学位論文, 130p.
- 鶴谷広一・柳嶋慎一・松延嘉國(1985): 逆風による波の減衰について, 第32回海岸工学講演会論文集, pp.209-213.
- 仲井圭二(2004): 東日本沿岸域における波浪と長周期波の時空間変動特性, 海岸工学論文集, 第51巻, pp.226-230.
- 永井紀彦・橋本典明・清水勝義・平井宜典・伊藤一教・東江隆夫(1996): 長期連続観測による沖合長周期波の変動特性, 海岸工学論文集, 第43巻, pp.216-220.
- 中畑 禎・落合敏浩・柏原裕彦・花山格章・森屋陽一・関本恒浩(2001): 冬期日本海の現地観測に基づく浅海域への入射長周期波の評価, 海岸工学論文集, 第48巻, pp.256-260.
- 吉岡洋・大森咲枝・芹澤重厚・高山知司(2005): 風の息が励起する副振動, 海岸工学論文集, 第52巻, pp.186-190.
- 和田耕造・梅沢信敏・小谷野喜二・桑原伸司(1988): 苫小牧海域における長周期波特性について, 第35回海岸工学論文集, pp.247-251.
- Hibiya, T. and K. Kajiura(1981): Origin of the Abiki phenomenon (a kind of seiche) in Nagasaki Bay, J. Oceanogr. Soc. of Japan, Vol.38, No.3, pp.172-182.