

風の息が励起する副振動

吉岡 洋*・大森咲枝**・芹澤重厚***・高山知司****

和歌山県田辺湾に隣接する下芳養湾で荒天時に顕著にみられる局地的な副振動は風向の変化に敏感に対応していた。その成因を風の息に求めて、高潮モデルに空間全域一様な風の息を与えて沿岸水位を計算すると、特定の風向で周期 6 分の副振動を下芳養湾だけに発達させることができたが、実際に発生した波高には及ばなかった。風の息に場所による位相差を与えて風域の移動をモデルに取りいれると、その移動速度が湾外水域の長波速度に近い場合に副振動が著しく増幅され、ほぼ現実の波高の副振動を再現することができた。

1. はじめに

高潮の予測をする場合、気圧の吸い上げや風の吹き寄せのみならず、砕波帯内でのセットアップが取り上げられるようになったが、高潮発生中の副振動は考慮されていない。数キロメートル以下の港湾もしくは小湾では共鳴周期が高々数十秒から数分の非常に局地的な副振動が起こりうるが、高波に隠れて気づかれない可能性がある。高潮災害中の異常に高い浸水高や大きな越波量の原因として副振動の効果を検討するために、吉岡らは、和歌山県の田辺湾周辺で顕著にみられる荒天時の局地的な副振動の特性を観測と数値実験で究明してきた。

田辺湾に隣接する下芳養湾(図-1)では、荒天時に 3 分から 6 分の周期で波高約 1 m の大きな副振動が生じるが、田辺湾ではあまり発達しない。外力として荒天時に風速が数分周期で変わる風の息と、群波性砕波によるサーフビートが予想されるが、沿岸の副振動と沖合の風や波の記録との対応を見ると、風向の変化に敏感に対応していた(吉岡ら, 2002)。

そこで高潮数値モデルに台風の代わりに空間全域一様な風の息を与えて水位変化を計算すると、特定の風向周期(南西, 6 分)で下芳養湾だけに副振動を発達させることができたが、実際に発生した波高の 1/4 にも及ばなかった(吉岡ら, 2003; Yoshioka ら, 2004)。

群波性砕波による長周期波を再現する代わりに、沖から長周期の定常波を入射させて、沿岸の水位振幅を比較すると、6 分や 8 分周期の水位変動は下芳養湾では 10 倍以上増幅された。その場合、沖からの長周期波の侵入角度が湾口方向と一致しているかどうかで大きな差が生じた。しかし、同程度の増幅は田辺湾奥においても見られ、下芳養湾だけが顕著に発達するという観測結果とは一致しなかった(吉岡ら, 2004)。

オランダのロッテルダム港の副振動を研究した Jong・Battjes(2004)は、成因を前線通過による風域場の移動とし、その移動速度が湾外水域の長波速度に近い場合に著しく増幅されると報告している。そこで、風の息に場所による位相差を与えて風の息の移動をモデル化して副振動発生の実験をした。

2. 計算方法

本研究で用いているプログラムは後藤ら(1997)が開発した津波・高潮数値計算プログラムをもとにしている。連続式は(1)、運動方程式は(2)(3)と表される。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) - fN \\ = -gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{D}{\rho} \frac{\partial p_0}{\partial x} + \frac{1}{\rho} (\tau_{sx} - \tau_{bx}) + A_h \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) + fM \\ = -gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{D}{\rho} \frac{\partial p_0}{\partial y} + \frac{1}{\rho} (\tau_{sy} - \tau_{by}) + A_h \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

D は全水深 ($h + \eta$)、 P_0 は海面気圧、 (M, N) は (x, y) 方向の流量、 τ_s , τ_b は海面および底面せん断応力である。

海面に作用する海面せん断応力 τ_s は(4)式で表される。

$$\tau_{sx} = \rho_a C_D W_x \sqrt{W_x^2 + W_y^2}, \quad \tau_{sy} = \rho_a C_D W_y \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \quad (4)$$

ρ_a は空気密度 ($1.22 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$)、 C_D は海面の抵抗係数、 (W_x, W_y) は海上 10 m 高度の (x, y) 成分風速である。

C_D は本多・光易(1980)の C_D 則((5)式)を用い、各グリッドごとに海面上 10 m の風速 U_{10} (m/s) から計算している。

$$C_D = \begin{cases} (1 - 1.89 \times U_{10} \times 10^{-2}) \times 1.28 \times 10^{-3} & (U_{10} < 8.0) \\ (1 + 1.078 \times U_{10} \times 10^{-1}) \times 5.81 \times 10^{-4} & (U_{10} \geq 8.0) \end{cases} \quad (5)$$

* 正会員 理博 愛知県立大学教授情報科学部

** (株)テクノクラフト

*** 京都大学助手防災研究所白浜海象観測所

**** フェロー 工博 京都大学教授防災研究所気象・水象災害研究部門

次に、海底面から作用する底面せん断応力 τ_b は

$$\tau_{bx} = \frac{\rho_w g n^2}{H^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} \quad \tau_{by} = \frac{\rho_w g n^2}{H^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} \quad (6)$$

で表される。ここで、 ρ_w は海水の密度 (1.03 g/cm^3)、 g は重力加速度、 n はマンニングの粗度係数 (0.025)、 H は水深である。

図-1に示す田辺湾と下芳養湾を包含する海域に、モデル化した風の息を与えたり、西端の開境界に水位変動を与えたりして、沿岸10地点での水位変動を調べた。

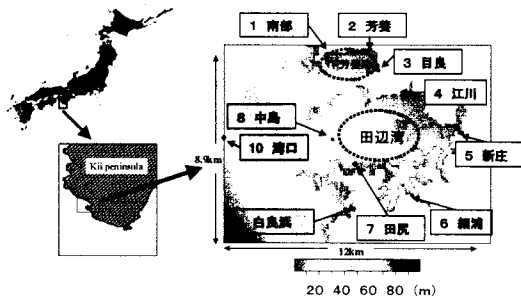


図-1 田辺湾周辺（計算領域）の地形と測点図

表-1に示すパラメータを用い、静止状態の計算開始から3時間かけて外力（風の息の風速および開境界の水位振幅）を増加させて設定値にし、その後9時間設定値の外力を与え続け、のべ12時間計算した。10地点において最後の1時間の副振動の平均波高を読み取った。

これまでの振動風モデルでは、平均風の風向きと同じ方向で振幅だけが周期変動していた（直線振動モデル）。

表-1 計算に用いられたパラメータ

計算領域	西端	東経 $135^{\circ}17'00''$
	南端	北緯 $33^{\circ}39'50''$
	東西	120グリッド (12 km)
	南北	89グリッド (8.9 km)
タイムステップ		1.0 (s)
グリッドサイズ		100 m
層数		1層
境界条件	陸側	壁条件 (完全反射)
	海側	放射条件 (自由透過)
水平渦動粘性係数		$10.0 \text{ m}^2/\text{s}$
鉛直渦動粘性係数		$0.01 \text{ m}^2/\text{s}$
コリオリ係数		$8.0623 \times 10^{-5}/\text{s}$



図-2 直線振動モデル 円周振動モデル

しかし実際の風の息は風速のみならず風向も変動している。そこで振幅は一定で振動方向が周期的に変化するモデル（円周振動モデル）に変えて、実際の風に近づけた。

計算された南部の副振動で両モデルを比較したところ、直線振動モデルではもっとも大きな副振動を起こした風向が東で、北風と南風のときはほとんど起こらなかったが、円周振動モデルではもっとも大きな副振動を起こした風向が東南東で、南北の風向でも小さいながらも副振動波高が見られ滑らかな分布形になった。このように円周振動モデルは直線振動モデルとほぼ同じ副振動を起こすがより現地観測に近い結果となった。以下の実験では円周振動モデルを使用した。

これまでの風の息モデルは、海域全体でいっせいに風速が変化する定在モデル（図-3上）だった。実際の風の息には移動性が見られるので、風速の空間分布が移動する進行モデル（図-3下）にして、副振動の発達を検討した。

実験は以下のケースで行った。

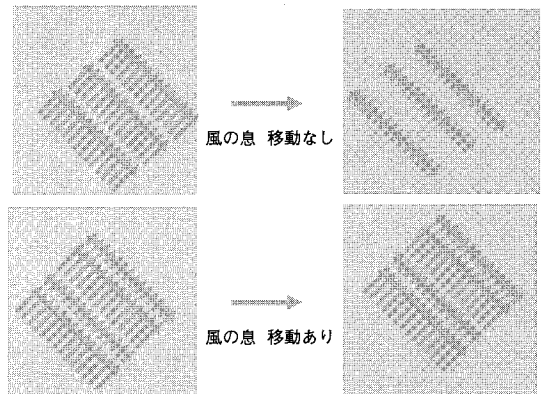


図-3 風の息のモデル 定在モデル(上)と進行モデル(下)

1. 風の息の平均風速と振動風速を変えて副振動の発達を比較（風の息で副振動を引き起こすのは振動成分だけか？）
2. 風の息と波の群波性を両方与えて相乗効果があるか
3. 風の息に移動を与えて副振動が発達するか
移動速度を平均風速にするか、独立に与えるか
4. 風域を拡大して副振動が発達するか

3. 計算結果

（1）風の息で副振動を引き起こすのは振動成分だけか？

定在モデルの風の息を与えて、本多・光易の C_D 則（式5）により計算した海面抵抗係数で得られた南部（モニター点1、図-1）の副振動波高を、振動風速振幅を横軸に平均風速を縦軸にとり等値線で表したものが図-4である。副振動の発達には、振動風速振幅だけでな

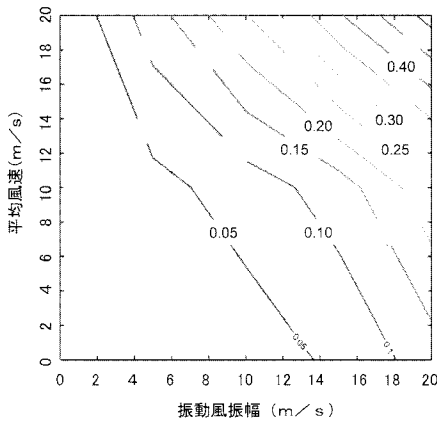


図-4 南部の副振動波高と平均風速，振動風速

く，平均風速が大きく効いている。

(2) 風の息と波の群波性を両方与えて相乗効果があるか

風の息（定在モデル）を与えると同時に，波の群波性を与えるために開境界で風の息と同周期の一定微小振幅の水位変動を与えて，副振動を発生させた。

周期は6分と3分，風の息の平均風速20 m/s，振動風速振幅10 m/s，平均風の風向きを8方位で計算した。また，波の進入方向を北西，西，南西の計3通り与えた。

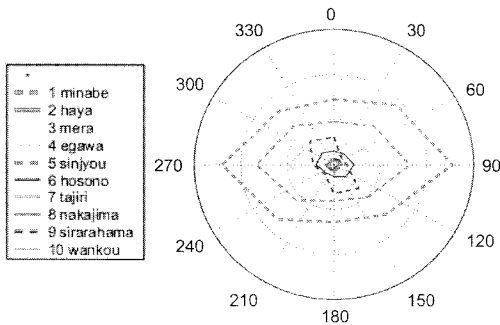


図-5 6分周期の風の息と南西入射波による副振動
円周は風向き，中心からの距離は各測点の副振動
波高（フルスケール60 cm）

6分周期で波の進入方向が南西の条件の副振動波高を表したものが図-5である。6分周期が最も大きかった南部では，波のみの時は波の入射方向が南西，西，北西の順に大きかった（吉岡，2003）。しかし同周期の風の息を同時に与えたとき，南西，北西，西の順で大きかった。

波と風の息を同時に与えると，単独に与える場合よりは大きな副振動が起こるが，線形に足し合わせたほどには達しなかった。

(3) 風の息に移動を与えて副振動が発達するか

移動を与えなかった場合に周期6分では東風の時最と

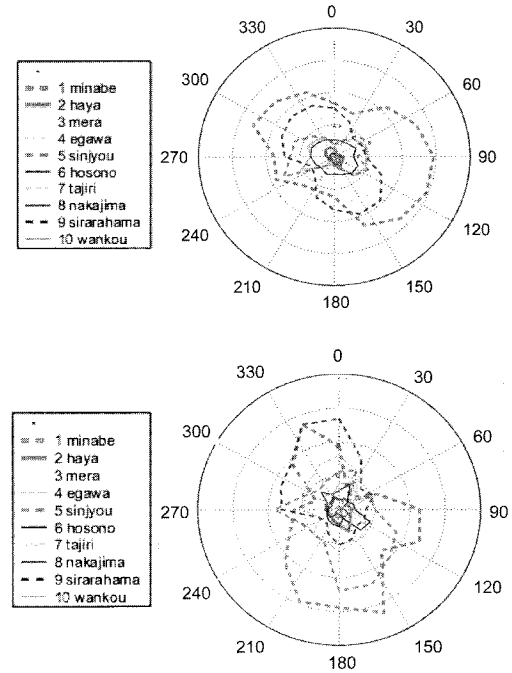


図-6 周期6分の定在モデル(上)と進行モデル(下)
副振動波高フルスケールは40 cm

も発達した副振動が，風域が平均風速で移動する場合には南の風の時に最も発達し（これは観測と一致する），波高もやや増加した（図-6）。

顕著だったのは周期3分の場合で，風域が定在モデル

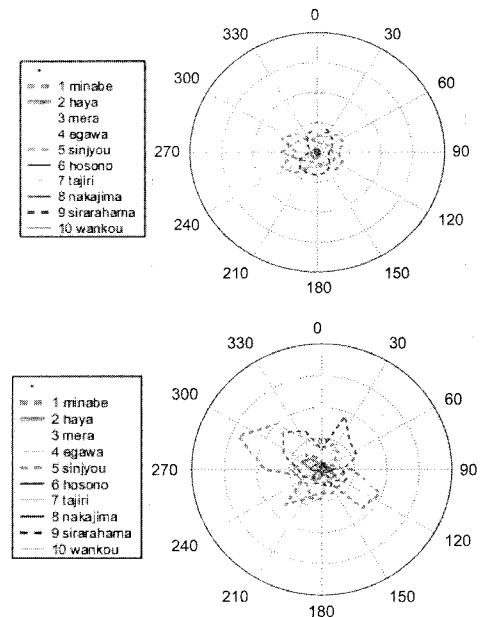


図-7 周期3分の定在モデル(上)と進行モデル(下)
副振動波高フルスケール40 cm

では10 cm 程度しか励起されなかった副振動が、移動速度20 m/s、移動方向 ESE すなわち WNW の風域場をあたえると、南部や目良など下芳養湾沿岸で30 cm 近い波高に発達した(図-7)

さらに風域の移動速度を平均風速とは独立にあたえた場合、移動速度11 m/s (これは水深12 m の長波速度)の時に最も発達してほぼ観測値と同じオーダーになり、周期3分の副振動波高(63 cm)は6分の波高(44 cm)より大きくなった。実際荒天時の下芳養湾では6分よりは3分程度の副振動が卓越している。風の息を移動させて長波速度に近づけると下芳養湾だけに副振動が著しく発達することがあきらかにされた(図-8)。

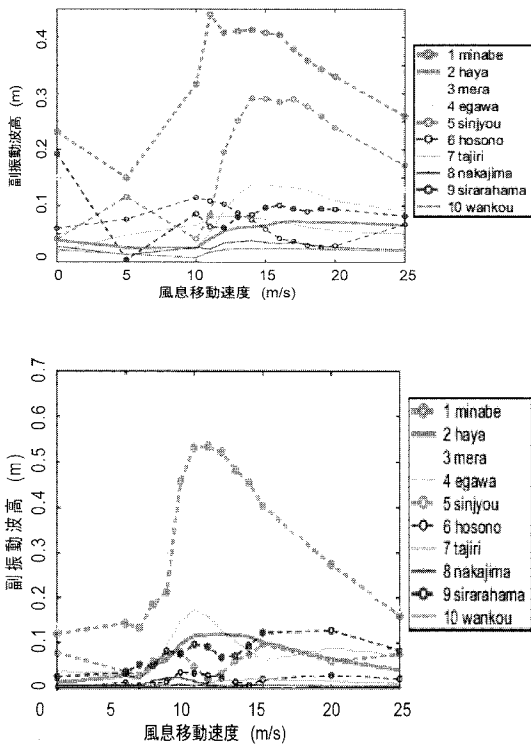


図-8 風域移動速度と副振動波高、周期6分(上)、3分(下)

(4) 風域を拡大して副振動が発達するか

計算領域を拡大し(東西南北2倍、面積4倍)、吹送距離の影響を調べた。計算領域は下芳養湾と田辺湾を含む東西方向24 km、南北方向17.8 km の空間でグリッドサイズは100 m、タイムステップは1.0 s である。計算領域を図-9に示す。なお、下芳養湾について調べたいのでコリオリ係数はもとの緯度より計算したものを使用した。

定在モデルによる結果(図省略)では、副振動波高は6分周期のときに22 cm、3分周期のときに12 cm であり、もとの領域で得られた結果とほぼ同じだった。

移動速度は平均風速とした進行モデルで、6分周期お

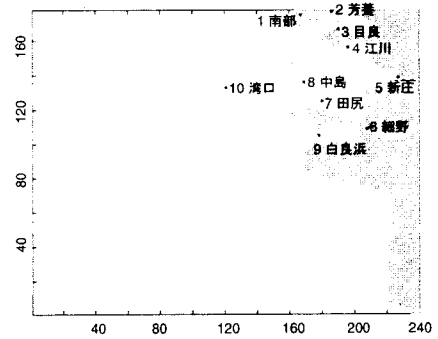


図-9 広域計算領域

よび3分周期の条件で得られたものが図-10である。6分周期のときには南(180°)からの風のときに最大副振動波高51 cm が南部で得られ、3分周期のときには南西(225°)からの風のときに最大副振動波高30 cm が目良で得られた。

6分周期では、南からの風のとき、下芳養湾の南部と目良で約2倍の値となった。

3分周期では、平均風向が西北西の場合、領域を拡大しても副振動波高は、南部では変わらず目良では小さくなった。しかし、南西からの風のときには、ほかのモニタ一点の副振動波高はほとんど変わらないが、南部と目良においては約1.6倍に増えた。

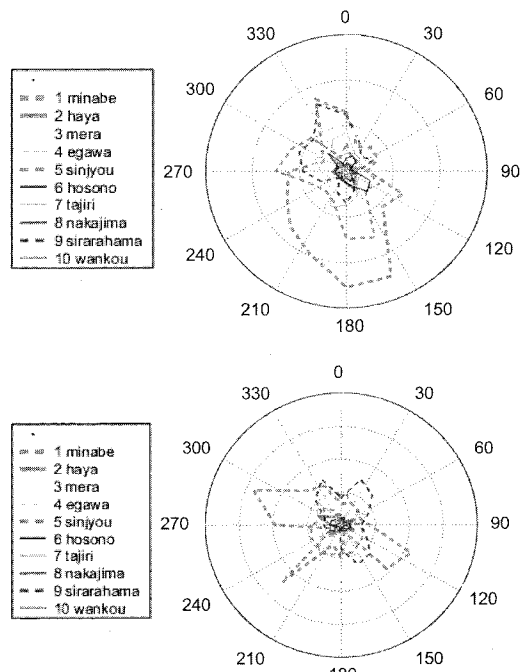


図-10 広域領域進行モデルによる副振動
周期6分(上)、3分(下)
波高フルスケールは60 cm(上)、40 cm(下)

風の息の移動速度が変更できるモデルによる結果では(図省略), 6分周期のときには移動速度が20 m/sのときに最大副振動波高50 cmが南部で得られ, 3分周期のときには移動速度が11 m/sのときに最大副振動波高65 cmが目良で得られた。

4. 考 察

(1) なぜ平均風速が副振動の発達に影響するのか

平均風速が振動風速幅より大きいと仮定して, 海面に作用する海面せん断応力 τ の式を以下のように展開した。

$$\begin{aligned}\tau &= C_D U U = C_D (\bar{U} + \hat{U} \sin \omega t) (\bar{U} + \hat{U} \sin \omega t) \\ &= C_D (\bar{U}\bar{U} + 2\bar{U}\hat{U} \sin \omega t + \hat{U}\hat{U} \sin \omega t \sin \omega t) \\ &= C_D (\bar{U}\bar{U} + 2\bar{U}\hat{U} \sin \omega t + \hat{U}\hat{U} (1 - \cos 2\omega t)/2) \\ &= C_D (\bar{U}\bar{U} + \hat{U}\hat{U}/2 + 2\bar{U}\hat{U} \sin \omega t - \hat{U}\hat{U} \cos 2\omega t/2) \\ &= \bar{\tau} + \hat{\tau} \cdots \cdots (7)\end{aligned}$$

$$\bar{\tau} = C_D (\bar{U}\bar{U} + \hat{U}\hat{U}/2) \cdots \cdots (8)$$

$$\hat{\tau} = C_D (2\bar{U}\hat{U} \sin \omega t - \hat{U}\hat{U} \cos 2\omega t/2) \cdots \cdots (9)$$

ここで, C_D は海面抵抗係数, U は風速, $\bar{U}$ は平均風速, $\hat{U}$ は振動風速振幅である。 $\bar{\tau}$ は平均せん断力で通常の高潮を起こす外力, $\hat{\tau}$ は振動せん断力で副振動を起こす外力である。 $\hat{\tau}$ をみると(式9), $\hat{U}$ が0 m/sでないかぎり, 平均風速 $\bar{U}$ が最も大きく効いている。

(2) 風の息と波の群波性を両方与えて相乗効果があるか

波と風を同時に与えると, 単独に与える場合よりは大きな副振動が起こるが, 線形に足し合わせたほどには達しなかった。そのため, 風の息と波の群波性の相乗効果は期待できないと考えられる。

しかし, 風の息だけの場合, 副振動の風向特性は場所ごとに異なっていたが, 波を同時に与えた場合(図-5), ほとんどの場所で同様の形状をしているのは波の影響と考えられる。また, 副振動を効果的に起こす波の入射方向の順番が変わったのは風の影響だと考えられる。そのため, 相乗効果とはいえないが, 波と風両方とも副振動励起に影響しあっている。

(3) 風の息に移動を与えて副振動が発達するか

6分周期と3分周期の両方とも移動速度が約10 m/sから20 m/sの範囲で副振動波高が大きくなっている。田辺湾の湾口部の水深が約30 mで, 下芳養湾の湾口部水深が約10 mということは, 長波速度でのおおの約17 m/sと10 m/sにあたる。

このことは, 風の息の移動速度が田辺湾・下芳養湾の湾口で長波速度とほぼ一致した時, 長周期波の共鳴発達が起き, 湾内の副振動が増幅されたと考えられる。そして, 風の息の移動速度11 m/sが, 下芳養湾に到達する

長周期波の経路上での平均長波速度と考えられ, その条件で, 下芳養湾の南部と目良だけで副振動が発達した。

(4) 風域を拡大して副振動が発達するか

風の息が移動しないときには, 吹送域を拡大しても副振動が増幅されなかった。領域全体に一律な風が吹いていると吹送距離の効果はない。

風の息が移動する場合において, 6分周期は南風のとき, 3分周期は南西風のときに最大副振動波高を得て, 風域を拡大したことによる増幅率も2倍と1.6倍だった。これは, 南風, 南西風両方とも, もとの領域よりも吹送距離が長くなったためである。3分周期の西北西風のときに増幅されなかったのは, 今回の拡大では吹送距離の増加が南側に限られ, 北側では元の領域と変わらなかったためである。風の息が移動するときには吹送距離によって副振動がより増幅する。

5. おわりに

和歌山県の下芳養湾で荒天時に観測された副振動の成員を, 既存高潮モデルを応用して究明した。

本研究で得られた結論は以下のとおりである。

- 1) 副振動の発達には振動風速振幅だけでなく平均風速も影響していた。強風時に副振動が顕著に発達する。
- 2) 風の息と長周期波の進入を同時に与えると, それぞれ共に副振動の発達に影響して, 単独に与えたときより大きくなったが, 相乗効果はなかった。
- 3) 風の息の移動速度を長波速度に近づけると副振動が著しく発達した。
- 4) 吹送距離を増加させると副振動は増幅した。

今後は, 本研究で用いた風の息のモデルが適切であるか現地観測から検証する必要がある。

参 考 文 献

- 後藤 明(1997): 津波・高潮数値計算プログラムマニュアル
本多忠夫・光易 恒(1980): 水面に及ぼす風的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
吉岡 洋・芹澤重厚・高山知司(2002): 高潮災害における副振動の影響, 海洋開発論文集, 第18巻, pp. 125-130.
吉岡 洋・村山英俊・高山知司・芹澤重厚(2003): 風による副振動の励起, 海洋開発論文集, 第19巻, pp. 893-898.
吉岡 洋・古倉崇志・高山知司・芹澤重厚(2004): 副振動に及ぼす波向きの影響, 海洋開発論文集, 第20巻, pp. 797-802.
de Jong, M. P. C. and J. A. Battjes(2004): Low-frequency sea waves generated by atmospheric convection cells, J. Geophys. Res., 109, C01011, doi:10.1029/2003JC 001931.
Yoshioka H., etc.(2004). Observation and computation of resonant long period oscillation excited by strong wind, Proc. 29th Int. Conf. Coastal Eng., ASCE, vol.2, pp. 1290-1298.