

風による副振動の励起

EXCITATION OF THE SEICHE BY THE WIND

吉岡洋¹・村山英俊²・高山知司³・芹澤重厚⁴

Hiroshi YOSHIOKA, Hidetoshi MURAYAMA, Tomotsuka TAKAYAMA, Shigeatsu SERIZAWA

1 正会員 理博 京都大学防災研究所 助手 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

2 正会員 国土交通省航空局 国土交通技官

3 フェロー 工博 京都大学防災研究所 教授 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

4 京都大学防災研究所 助手 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

The long period oscillation (LPO) with high amplitude (1m) and short period (<5min.) was observed at Shimohaya Bay in Wakayama Prefecture in a storm. The sea wind gustiness and wave group observed at the offshore area had the nearly same period of the LPO. We had the numerical simulation of the LPO assuming that LPO is generated by only wind gustiness. The results show good agreement with observed LPO qualitatively (East wind with 6 minute oscillation generate big LPO only in Shimohaya-Bay). But the amplitude of calculated LPO is less than 10 % of observed one.

Key Words : long period oscillation, storm surge, wind gustiness

1. 緒論

和歌山県の田辺湾の北に隣接する下芳養湾で、台風来襲時の荒天時に約5分周期で振幅約1mにもおよぶ副振動が観測された¹⁾。高潮の最中(水位最高時付近)に副振動が高波浪と重なると大きな災害を起こす可能性が高い。下芳養湾の例で言えば、従来の防波堤設計における設定潮位よりも0.5m近く高くなった水位の状態が高波浪が構造物に当たり、越波量や転倒モーメント、滑動力に重大な影響を与えることになる。港湾内での高潮時の副振動の原因を考えることは防災上重要である。

水平スケール約2km、水深約10mの下芳養湾の静振第一モードの周期は約400秒なので、その周期に近い外力があれば共鳴して大きく振動するはずである。田辺湾口の京都大学防災研究所田辺中島高潮観測塔(図-1参照)で観測された海上風の息や波浪の群波性には、それに近い周期変動が卓越していた¹⁾。下芳養湾の荒天時の副振動を起こす外力はどちらであろうか?

港湾区域の副振動(長周期波)は荷役作業の障害になるので、その原因究明が数多く行われ、うねりの有義波高と長周期波との明瞭な相関関係が報告され、うねりを成因として経験的予測式が作られてい

る。青木²⁾によると、愛知県渥美半島の外洋に面した赤羽根海岸における波群性長周期波の標準偏差は、

$$\eta_{rms} = 0.003H_{1/3}T_{1/3} \quad (1)$$

で表すことが出来る。ここで、 η_{rms} は長周期波の標準偏差、 $H_{1/3}$ は有義波高、 $T_{1/3}$ は有義波周期である。0.003は比例定数で、場所によって異なるが、赤羽根の値は長周期波が目立つ他の港湾に比べて比較的高い値である。この比例定数を下芳養湾にあてはめると、後述する現地観測結果によれば、湾口の観測塔で $H_{1/3}=6m$ 、 $T_{1/3}=13sec$ のうねりが観測されたので、下芳養湾における砕波波高は、屈折や回折を考慮した波浪変形計算によって、約2.4mと見積もられ、副振動の振幅予測値は10cm以下となる。実際は同湾で最大波高1m(標準偏差 η_{rms} にして30cm)の副振動が観測されており、予測値の3倍にもおよび他の海域と比べて極端に大きいことがわかる。

一方、副振動に対する風の息の影響に対しては吉岡ら¹⁾が定性的に示唆しているだけで、検討された前例がない。しかし、暴風時の5分程度周期の風の息は、田辺湾でたまたま観測された現象ではなく、沿岸海上風の一般的な特性と思われる。たとえば、田中ら³⁾は静岡県沖の観測塔において、海面上1m~5mの高さで風速の観測を行い、各観測高度にお

けるスペクトルを求めているが、周波数 0.003Hz(周期約 5.6min) のところでスペクトルがピークをむかえている。

このように、暴風時には海上風が約 5 分周期で変動するのであれば、その周期で共鳴する港湾は何らかの影響を受けるはずである。その影響がどの程度のものか調べるために、風の息だけで副振動を起こす数値シミュレーションを行った。

2. 基礎方程式

本研究で用いているプログラムは後藤⁴⁾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。差分については、空間差分はスタカード格子を用い、時間差分はリーブ・フロッグ法を用いている。入力条件として、移動する台風による風を与える代わりに、風の息だけを与えて計算した。

高潮のような波長の長い波の運動は、波高 H と波長 L の比 H/L 、および水深 h と波長 L の比 h/L がいずれも小さいものとして、浅水理論式が適用され、圧力は静水圧分布となり、水平流速(u, v)は鉛直方向に一様な分布となる。すなわち、海底から水面までを、鉛直方向に積分した方程式で以下のように記述することが出来る。

連続式は、

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

運動方程式は、

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

$$\begin{aligned} & \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) \\ & = -fN - gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{D}{\rho} \frac{\partial p_0}{\partial y} + \frac{1}{\rho} (\tau_{sy} - \tau_{by}) + A_h \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\frac{dw}{dt} = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \quad (5)$$

としてそれぞれ表される。

ここで(x, y, z)は座標軸で、(x, y)は水平方向、 z は平均海面を基準に鉛直上向き、 p_0 は圧力、 f はコリオ

リ係数、 A_h は水平渦動粘性係数、 A_v は鉛直渦動粘性係数である。

流量(M, N)は(x, y)方向の流速(u, v)を海底 $z=-h$ から $z=\eta$ まで積分したものである。

$$\begin{aligned} M &= \int_{-h}^{\eta} u dz = U(h + \eta) = UD \\ N &= \int_{-h}^{\eta} v dz = V(h + \eta) = VD \end{aligned} \quad (6)$$

(U, V)は流速(u, v)の全水深 $D(=h + \eta)$ における平均値である。

$$\begin{aligned} (h + \eta)U &= \int_{-h}^{\eta} u dz \\ (h + \eta)V &= \int_{-h}^{\eta} v dz \end{aligned} \quad (7)$$

と定義する。

また、鉛直渦動粘性項 A_h, A_v は海面せん断応力 τ_s と底面せん断応力 τ_b とにより、

$$A_v \int_{-h}^{\eta} \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} dz = A_v \left\{ \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)_{z=\eta} - \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)_{z=-h} \right\} = \frac{1}{\rho_w} (\tau_{sy} - \tau_{by}) \quad (8)$$

で表される。

海面に作用するせん断応力は、

$$\begin{aligned} \tau_{sx} &= \rho_a C_D W_x \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \\ \tau_{sy} &= \rho_a C_D W_y \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \end{aligned} \quad (9)$$

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

従来の高潮計算においては $C_D=0.0026$ が用いられているが、本システムの高潮モデルでは本多・光易⁵⁾の C_D 則を用い、式(10)によって、各グリッドごとに、海面上 10m 風速(m/s)から計算している。

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

次に底面せん断応力項に関して、海底面から作用する底面せん断応力は、式(11)によって表される。

$$\begin{aligned} \tau_{bx} &= \frac{\rho_w g n^2}{H_2^{7/13}} M_2 \sqrt{M_2^2 + N_2^2} \\ \tau_{by} &= \frac{\rho_w g n^2}{H_2^{7/13}} N_2 \sqrt{M_2^2 + N_2^2} \end{aligned} \quad (11)$$

ここに、 ρ_w は海水の密度($=1.03 \text{g/cm}^3$)、 g は重力加速度、 n はマンニングの粗度係数($=0.026$)である。

3. 計算条件

本研究では風の息を再現するために、次式のように周期的に変化する変動風を与えた。

$$windspeed = 20 \pm 10 \sin\left(2\pi \times \frac{\text{mod}(t, T)}{T}\right) \quad (15)$$

ここで、windspeed は風速 (m), t は計算開始時刻からの経過時間, T は変動風の周期, mod(t, T) は t/T の剰余を表す。空間的には一様な分布を仮定する。数値計算の計算領域は図-1 のとおりである。

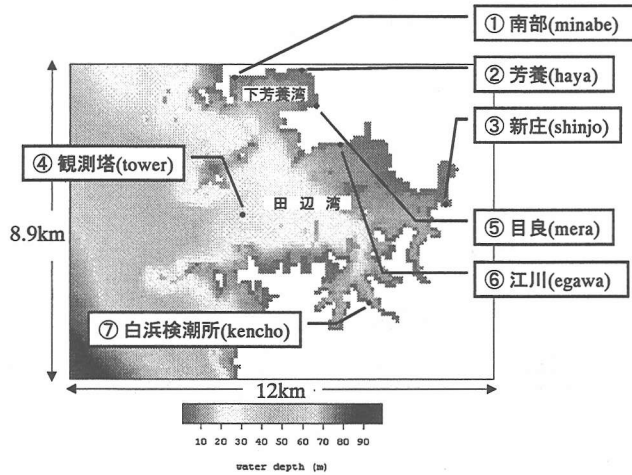


図-1 計算領域

下芳養湾と田辺湾を含む東西 12km, 南北 8.9km の領域でグリッドサイズは 100m である。また、図中に示す 7 地点において水位の記録を行なった。計算条件については表-1 のとおりである。

表-1 計算条件

計算領域	西端	東経	135° 17' 00"
	南端	北緯	33° 39' 50"
タイムステップ Δt	1.0 (sec)		
格子サイズ Δs	100 (m)		
計算領域	東西	120グリッド (12km)	
	南北	89グリッド (8.9km)	
層数	1層		
境界条件	陸側	壁条件 (完全反射)	
	沖側	放射条件 (自由透過)	
水平渦動粘性係数 A _h	10.0 (m ² /s)		
鉛直渦動粘性係数 A _v	0.01 (m ² /s)		
海面抵抗係数 C _D	風速から計算		

4. 計算結果

まず、南部において約 1m の副振動が観測された時の風向である南東風で、変動風の周期を変えてシミュレーションを行なった。そのときの各地の水位変動を図-2 に示す。グラフの横軸は変動風の周期、縦軸は十分に時間が経過して水位振動が安定したときの振幅である。各地で 40 分周期の変動風の時に水位振動の振幅が大きくなっていることがわかる。

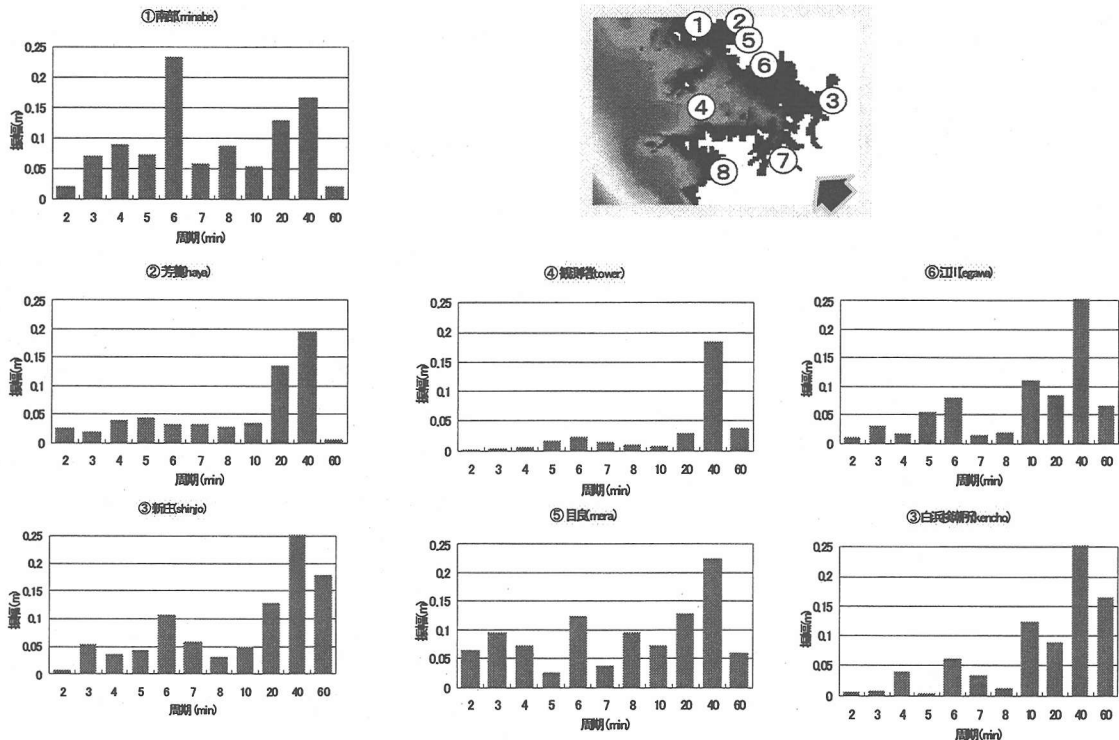
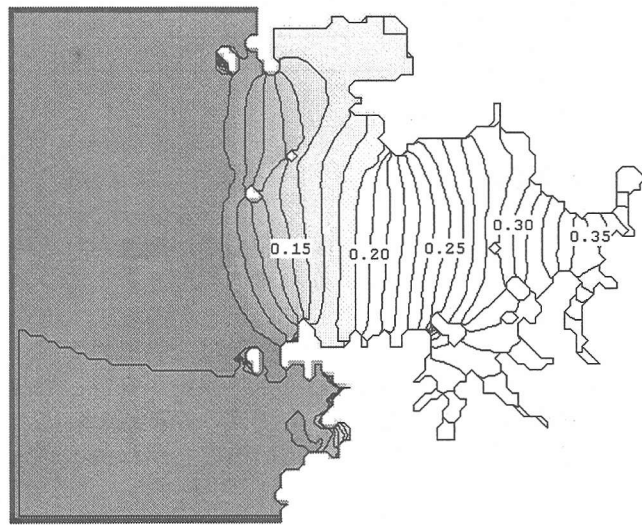
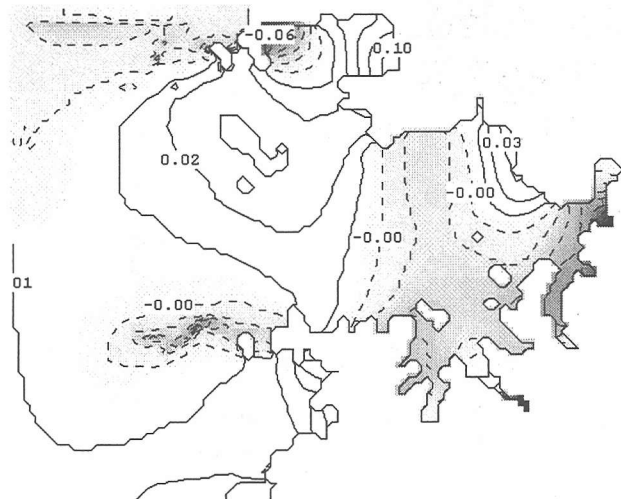


図-2 変動風の周期別の水位振幅

副振動のピークが出現した瞬間の平面分布をみると(図-3(a)), 田辺湾奥が腹, 湾口を節とするモードの振動が起きていることがわかる. しかしながら, 暴風時の風には 40 分周期の成分はほとんどないので, 実際の高潮時にこのような振動は発生しない. それに対して, 南部でだけ, 6 分周期の時に振幅が最大になっている. この平面分布を見ると(図-3(b)), 南部と目良を腹, 芳養を節とするモードの副振動が下芳養湾で発生している(図-1 参照). 暴風時には数分周期で風速が変動し 6 分周期の成分も含まれているので, 下芳養湾でだけ大きな副振動が発生することになる.



(a) 40min 周期



(b) 6min 周期

図-3 副振動のピークが出現した瞬間の水位の平面分布

つぎに, 45° ごとに計 8 方向の風向の変動風を与えて, 風向による振幅の違いを南部について確かめた. 変動風の周期については, さきのシミュレーションで, 下芳養湾の南部において, 湾の固有周期と共鳴し, 副振動の振幅が最大となった 6 分を用いた. 南部における風向による水位振幅の違いを図-4 に示す. グラフの円周方向は与えた風向, 外周方向は十分に時間が経過して水位振動が安定したときの水位振幅を表す. これを見ると, 南東(東)風と北西風のケースで約 25cm の振幅になっているのに対し, 北風, 南風のケースでは振幅は 10cm 以下である. これは, 南東(東)風と北西風が下芳養湾における副振動のモードの軸方向と一致するからであろう. つまり, 風向は副振動に大きな影響を与えている.

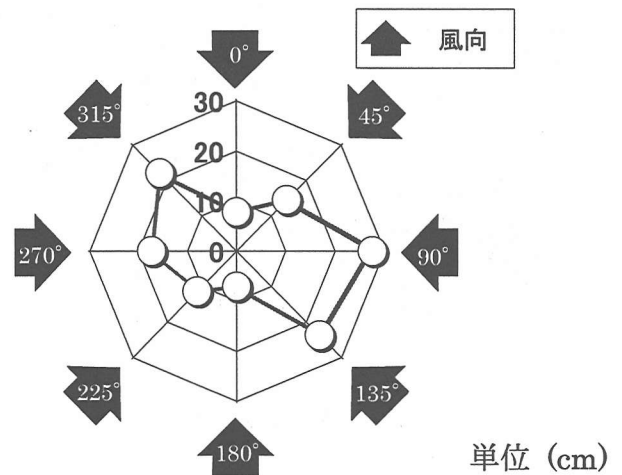


図-4 南部(minabe)での風向による副振動振幅の違い

5. 現地観測との比較

1994 年秋に発生した台風 9426 号は, 9 月 29 日 19 時 30 分頃, 紀伊半島南部に上陸し, 田辺湾の東を通過していった. この台風によって, 田辺湾では高潮が発生し, 同時に下芳養湾では振幅約 1m の副振動の発生が確認された. 観測塔で計測された風速, 風向, 有義波高および南部で計測された水位を図-5 に示す. 風向については, 北風を 0° とし, そこから東風は 90°, 南風は 180° と, 時計回りに 360° で表している. 横軸は時刻で表され, 台風が台風が上陸した 19 時 30 分に風向が東から北まわりに西の風になり, 最大風速は 21 時 10 分の 23m/s である. 一方, 南部の水位を見ると, 台風が接近して, 東の風が風速 10m/s を越すあたりから大きくなり, 17 時まで風速が増すほど振幅が増加して 1m 近くに達したが, 風向が西になると風速が増えたにもかかわらず

らず振幅は減衰している。すなわち、副振動の発達には風速のみならず風向が効いている。この時、田辺湾内の他の水位を見ても南部ほど大きな副振動は起こらず、湾口の観測塔でのみ、南部に匹敵する副振動がみられた。また観測塔の有義波高は台風上陸までは副振動と良い相関を示している。

以上の観測結果は、風の息を副振動の成因と仮定した数値シミュレーションの結果を定性的に裏付けている。すなわち、5分程度の顕著な副振動は田辺湾沿岸では南部でだけ発達し、風向きが西に変わると減衰したことである。しかし、定量的には問題がある。計算では平均風速 20m/s、変動幅 10m/s という実際よりやや大きめの風の息を与えたにもかかわらず、南部で発生した周期 6 分の副振動の振幅は 30cm にも及ばず、1 m 近い観測値の 1/3 である。

ちなみに、計測された観測塔の風を使って計算すると、励起される副振動振幅は 10cm/s 以下であった。

さらに、問題なのは数値モデルでは副振動が起こらない観測塔で、南部に匹敵する振幅の副振動が観測されたことである。その周期は南部よりさらに短い 2~3 分であった。おそらく観測塔周辺の海山地形で、群波性砕波によるサーフビートが形成されていると思われる。そうすると、下芳養湾でもサーフビートが発生してもおかしくない。事実、観測塔の有義波高の変化は風向が東の間は南部における副振動の変化と良い対応を示していた。しかし、緒論で述べたように、有義波高に比べて副振動の波高が非常に大きな値となっている。また風向が西に変わると高波浪が続いても副振動は急激に減衰している。

結局、風の息でも群波性砕波でも下芳養湾の副振動を定量的に説明することは困難である。

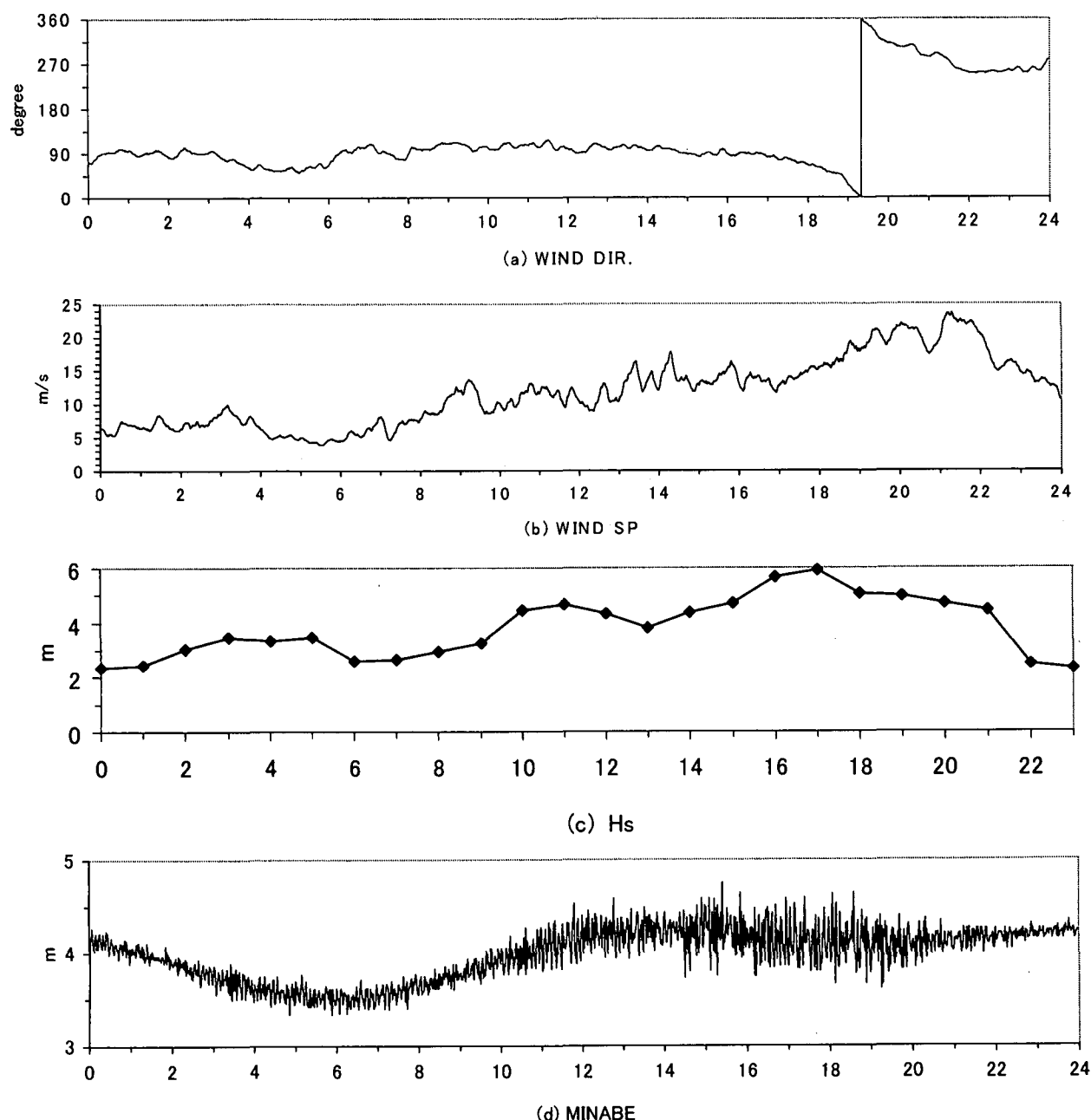


図-5 1994年9月29日に観測された観測塔の風向(a)、風速(b)、有義波高(c) および 南部の水位(d) 横軸は時刻

6. おわりに

本研究では、荒天時の下芳養湾における副振動を風の息によって励起されると仮定して、シミュレーションによりその妥当性を検討した。その結果、田辺湾全域に周期6分の風の息を与えると、下芳養湾でのみ副振動が卓越し、その振幅は風向によって変化し、南東（東）あるいは北西の風のときに増大した。その副振動のモードは、南部（みなべ）と目良（めら）が腹、芳養（はや）が節となるモードであった。しかしながら、 $20 \pm 10 \text{ m/s}$ の現実よりやや大きな風の息を与えても南部での副振動は30cm以下であり、1m近い観測結果の1/3程度であった。このことから、下芳養湾における高潮時の副振動の原因は風の息だけではないといえる。そこで、今後は波の群波性と風の息との両方が影響する機構を考える必要がある。

本研究は、平成12年度運輸分野における基礎的研究推進制度による「高潮・高波の推算技術の高度化と防災に関する基礎的研究(2000-2)」の一環として実施されている。

参考文献

- 1) 吉岡 洋・芹沢重厚・高山知司: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, 2002.
- 2) 青木伸一:沿岸長周期波の発生と伝播特性に関する研究, 海洋開発論文集, 第18巻, pp.155-160, 2002.
- 3) 田中博通・南 将人・野上郁雄・関田欣治: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, 海洋開発論文集, pp.233-237, 2000.
- 4) 後藤智明:津波・高潮数値計算プログラムマニュアル, 1997.
- 5) 本多忠夫・光易 恒:水面に及ぼす風的作用に関する実験的研究, pp.90-93, 1980.