

副振動に及ぼす波向きの影響

EFFECT OF WAVE DIRECTION FOR EXCITATION OF SEICHE MOTION

吉岡洋¹・古倉嵩志²・高山知司³・芹澤重厚⁴

Hiroshi YOSHIOKA, Takashi KOKURA, Tomotsuka TAKAYAMA, Shigeatsu SERIZAWA

1 正会員 理博 愛知県立大学情報科学部 教授 (〒480-1198 愛知県愛知郡長久手町大字熊張字茨ヶ廻間 1522-3)

2 学生会員 京都大学工学部

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 period less than 5-minute 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 as the LPO. We had the numerical simulation of the LPO, assuming that the LPO was generated by only groupness effect of breaking waves. The results showed enough intensity of amplifying of long wave by topographic resonance (6-minute long wave was amplified more than 10 times in Shimohaya Bay). However, the high amplified point was not restricted in Shimohaya Bay by the simulation.

Key Words : long period oscillation , storm surge, wave group

1. 結論

和歌山県の田辺湾に隣接する下芳養湾では、荒天時に約5分周期で振幅約1mの副振動が生じた¹⁾。高潮の最中に副振動が高波浪と重なると、副振動で上昇した水位のときに高波浪が構造物に作用すると、越波量や波力が増大する恐れがある。そのため高潮時の副振動の原因究明は防災上重要となる。

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作用すれば共鳴して大きく振動する。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⁾。

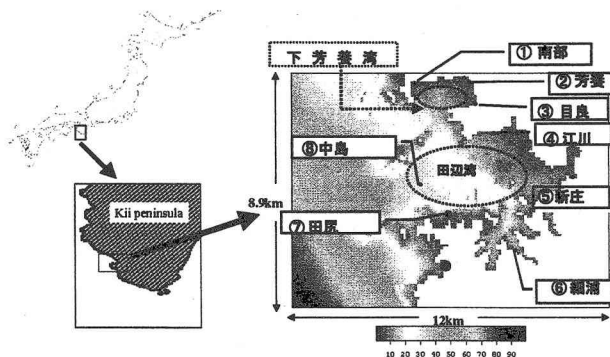


図-1 計算領域と潮位検証地点

風の息だけで観測された副振動が励起されるのかを検証するために、後藤²⁾により開発された高潮津波モデルを用い、田辺湾と下芳養湾を包含する地域に、一様な空間分布で時間的に周期変化する風を与えて、沿岸の水位変動を調べた³⁾。それによると、下芳養湾では、東(南東)の風、周期6分のときに副振動が顕著になり、東西端が腹、中央部が節となるモードであった。40分周期の風を与えても、田辺湾奥を中心に副振動が発生するが、このような長時間周期の風の息は現実的でない。10分以下の短周期の風の息が暴風時に卓越することを考えると、6分周期で下芳養湾にのみ副振動が発達するという計算結果は、副振動の原因として風の息を考えた仮説を定性的に支持するものである。しかし、定量的にはまだ問題が残っていた。非現実的な強大な風の息(20±10m/s, 周期6分)を与えても下芳養湾での副振動振幅は30cm以下であり、1m近い観測結果には遙かに及ばなかった。しかも計算では副振動がほとんどおこらない観測塔で下芳養湾に匹敵する副振動が観測された³⁾。塔で観測された副振動はサーフビートであると考えられ、当然下芳養湾にも群波性碎波によるサーフビートが発生していると思われる。そこで、もう一方の要因である群波性碎波の効果を検討した。

2. 下芳養湾の碎波特性

下芳養湾でどのくらいの碎波波高であるのかは、観測がないので、波浪変形計算から推定した。間瀬らが開発した波の屈折と回折を取り込んだ波浪変形計算モデル⁴⁾を用いて、田辺湾と下芳養湾を包含する地域(8.8km×12kmの100mメッシュ)の西側境界に西南西方向から有義波高6m,周期13秒のうねりが進入したときの、湾内の波高分布を求めた(図-2)。観測塔周辺(図中矢印根元)で波高は4mに減衰し、下芳養湾(図中矢印先端)では2mに減衰している。

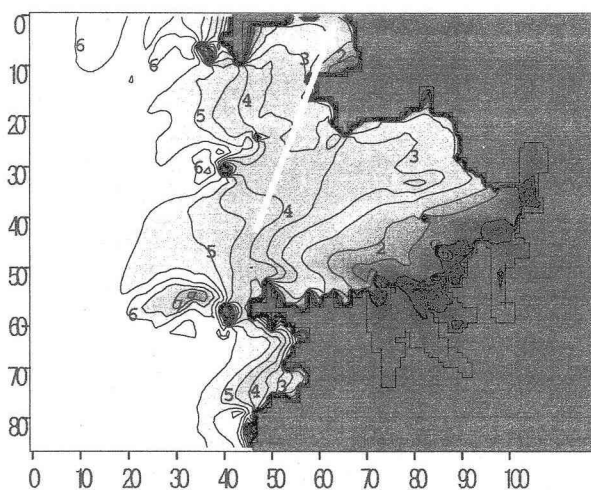


図-2 屈折回折による波浪変形
(入射波 WSW $H_s=6m$, $T_s=13s$)

塔は切り立った海山の上に位置しており、その地形は、円錐台で近似すると、標高20m,上半径40m,下半径400m程度である。この微地形は100mメッシュの波浪変形計算では無視されている。そこで、海山を中心にした海域(0.8km×1.2kmの10mメッシュ)で波浪変形計算した(図-3)。海山の外で有義波高6m,周期13秒の波が海山頂上すなわち観測塔においては、約1.2倍の7.3mに増幅されている。

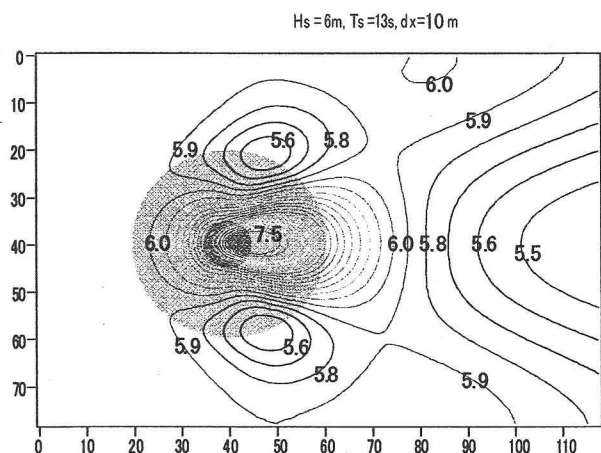


図-3 観測塔の位置する海山地形による波浪変形

2つの計算結果を総合すると、観測塔での波高の1/1.2が塔周辺の波高で、それが下芳養湾で半分になるので、下芳養湾の碎波波高は観測塔波高の0.4倍程度である。1mの副振動が観測された時、塔で6mの波高を観測していた³⁾ので、波浪変形計算から下芳養湾での碎波波高は約2.4mと推定される。

碎波波高2.4mではそれで生ずるセットアップや長周期波は、その10%程度と推定される。波高20cm程度の長周期波が波高1mの副振動を作り出せるか、地形による共鳴効果でその増幅率が5倍以上になるのか数値モデルで検討するわけである。

3. モデル設定・計算条件

群波性碎波によって引き起こされた長周期波、すなわち沖合から群波性を持つ波が入射して碎波帯で碎波することによって、それまでの拘束された長周期波が進行波に変わって岸に伝搬する過程を田辺湾全域を対象として忠実に再現することは、我々が副振動の発生に関する風の息の効果を検証した高潮津波数値モデルでは不可能である。しかし、沿岸の副振動の励起特性を調べる目的からすれば、沿岸に伝搬してくる進行性長周期波が碎波帯で発生したものか、もっと沖合から進行してきたものかは、振動している小湾のスケールが岸から碎波帯までのスケールよりあまり大きくなければ、大きな差はないと思える。もし、長周期波をすべて外境界から入射してくる進行波に置き換えれば、既存の高潮津波数値モデルで取り扱える。いわば、群波性碎波による長周期波を沖合からの微少な津波侵入に置き換えるのである。

具体的には、開境界で一定微小振幅の長周期水位変動を与えて、湾内における共振特性を検討する。この計算方法は、簡便で安定であるが、開境界で与えた振動は入射波ではなく、入射波と反射波との重複波であると解釈すべきである。

使用した数値モデルは、先に風の息による副振動励起特性を検証した時と同じもので、後藤により開発された高潮津波モデル²⁾であり、その詳細は文献³⁾に述べてあるので省略する。西側境界を強制振動させることにより波を発生させて、図-4に示す地点の水位変動を調べる計算を行った。計算区域も前回と同様に田辺湾と下芳養湾を包含する地域

(8.8km×12kmの100mメッシュ)で、計算条件も同じである(表-1)。今回は、風を与えないこと、西側開境界の水位を強制振動させることが異なる。

以下に述べるように3種類の強制振動を与えた。

CASE-1 西側の開境界に時間的に周期変化する微小な水位変化(振幅 1cm)を与えた。(すなわち、東向き
の入射波と西向きの反射波とで一定の振幅の周期変
化を形成するように強制した。周期は2, 3, 4,
5, 6, 7, 8, 9, 10, 20, 30, 40, 60 分である。

CASE-2 開境界上に6分周期で南北方向に位相差を
与えて、重複波向を西、北西、南西と3方向に変え
た。

CASE-3 最大振幅 0.1m のホワイトノイズ(時間変化
はランダムであるが、境界上では同期させた)の水
位を与えた。

いずれのケースも初期擾乱を回避する為に、計算
開始から3時間までは線形的に振幅を増加させ、そ
れ以後一定振幅で9時間計算した。

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

(1) CASE-1

図-4 に示すように、周期2分から10分までの間
で下芳養湾内の振幅が大きく増加するのは周期6分、
8分である。6分の場合、南部と目良が10倍以上の
振幅増加を示し、芳養が殆ど振幅増加を示さない。
南部ピーク時の水位平面分布(図-5)をみると、こ
の副振動は下芳養湾の湾軸方向のモードである。8
分の場合には目良が10倍の振幅増加を示した。これ
は下芳養湾中央を節とするモードである。9分と10
分で湾内のほとんどの潮位モニター点で振幅が小
さい。最大振幅の水平分布図(図-6)を見ても、潮
位モニター点以外の入り江の奥で増幅されていると
ころもあるが、全体としてこの周期帯は共鳴が弱
いようである。又、40分においてモニター点全体
で振幅増加を示すが、田辺湾の奥程振幅が増加し
ており、下芳養湾は他に比べて増加が小さい。こ
れは田辺湾全体の一次モードである。20分の場合
は下芳養湾と

新庄で増加しており、田辺湾中央の細野や立川
ではあまり増加していない。これは田辺湾奥と田
辺湾口付近を腹とするモードになっていることを
示している。

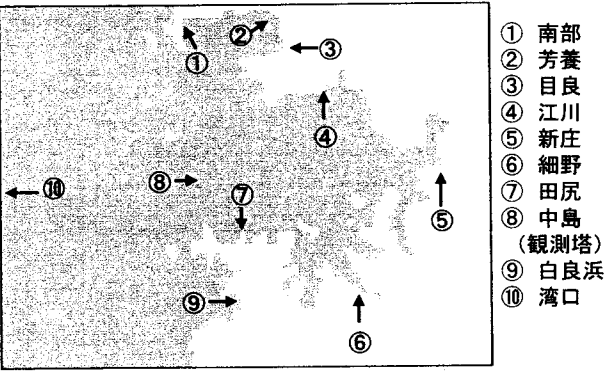
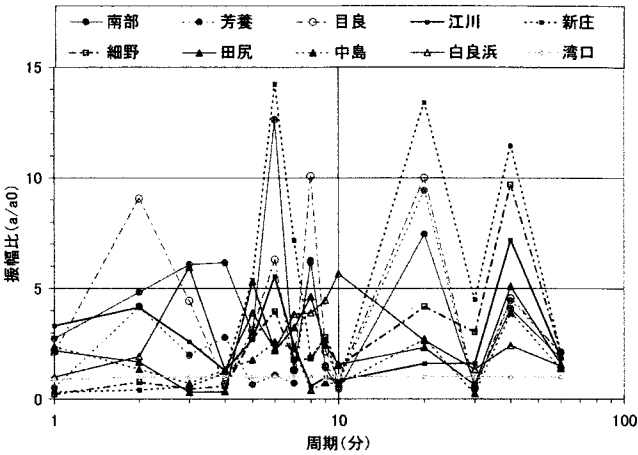


図-4 田辺湾沿岸の周期別増幅率 (CASE-1)

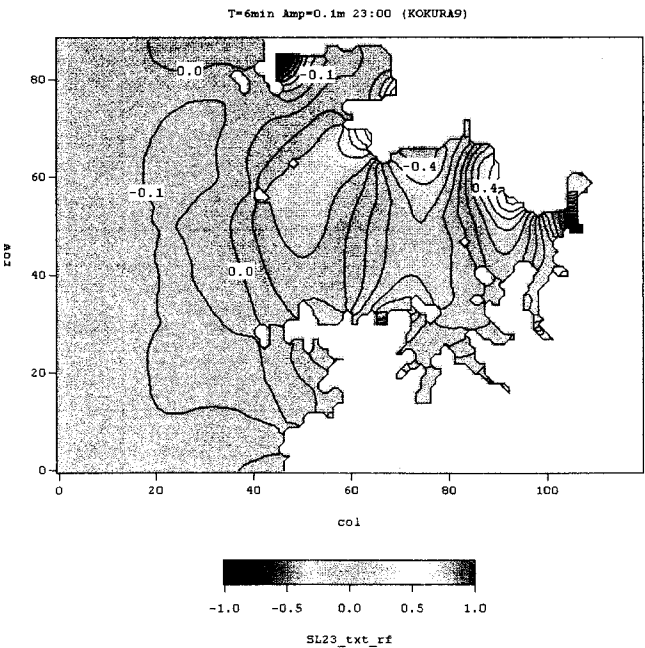


図-5 周期6分の南部ピーク時の水位平面分布

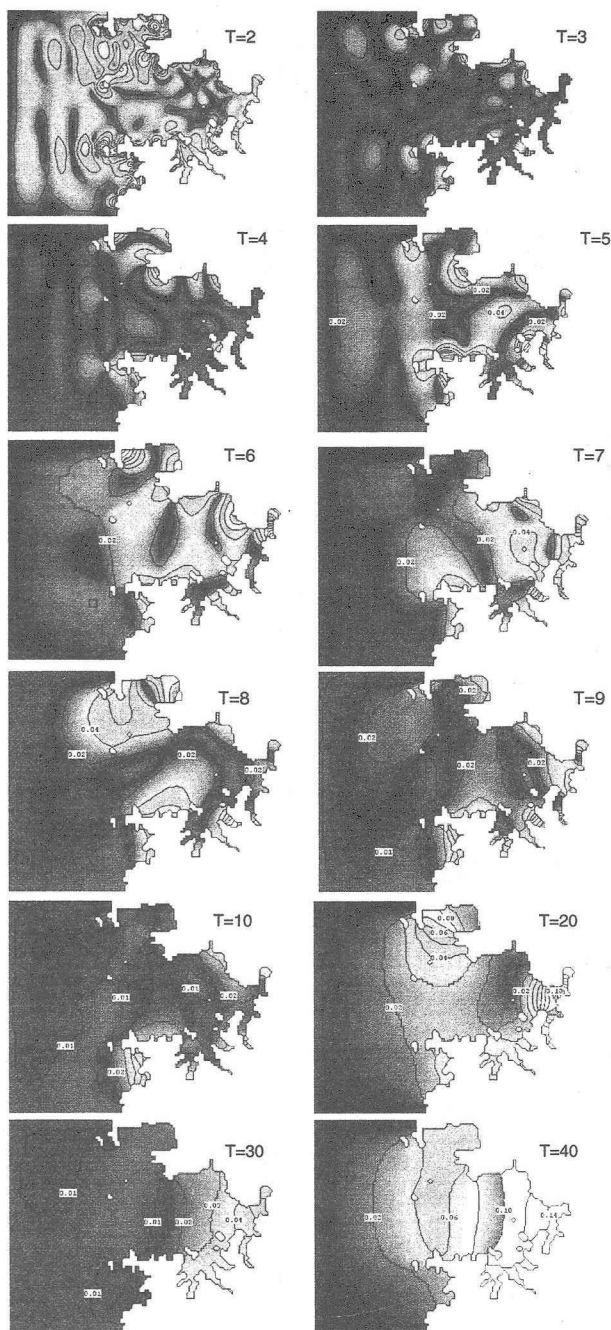


図-6 最大振幅平面分布 T: 周期 (分) (CASE-1)

(2) CASE-2

図-7, 8に示すように、下芳養湾内の振幅が最も大きくなるのは南西からの波のケースである。それに対して北西からの波(図-9)が最も小さく、副振動の発生に対して波向きの影響は大きい。これは下芳養湾が南～南西にむけて開けた形状であることを考慮すると、波の進入のし易さ(間口幅)が振幅に大きな影響を与えていると考えられる。又、田辺湾においては西からの波が最も大きくなる。これも同様に、田辺湾が西に向けて開いているからである。

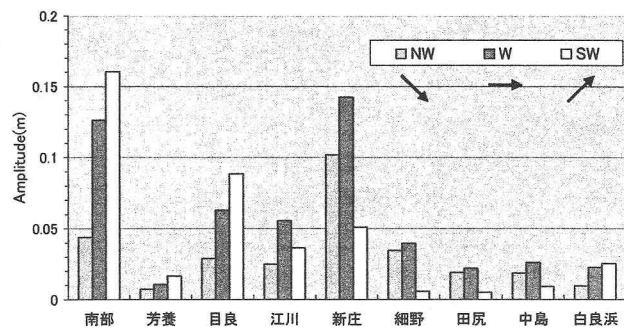


図-7 侵入波の波向きの影響 (周期 6 分) (CASE-2)

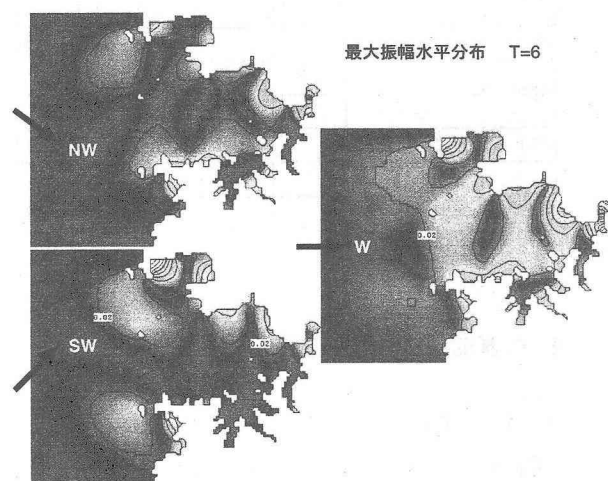


図-8 侵入波の波向きの影響 (周期 6 分) (CASE-2)

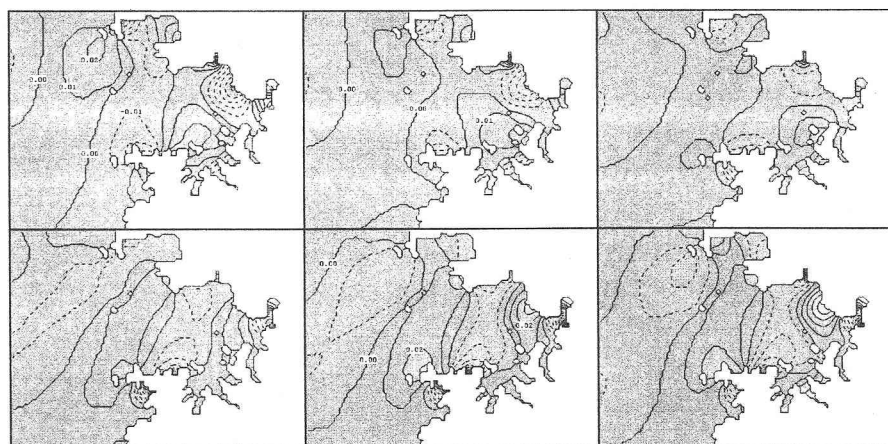


図-9 0.5 分間隔の水位変化 (CASE-2) 周期 6 分 波向き北西

(3) CASE-3

沖合開境界で最大振幅 10cm のホワイトノイズの水位変化を与えて沿岸の水位変動を調べると、境界から遠ざかるほど変動幅は減衰するが、沿岸では場所によって異なる共鳴周期で増幅が見られ、**図-10**に示すスペクトル特性が得られた。40 分周期周辺の波が田尻を除く全ての場所で増幅されるのが確認された。下芳養湾では 40 分が極大値をとるが、田辺湾の新庄及び細野では少し短い 34 分である。特に新庄においては増幅率が 100 倍近くに達する。又 6 分周期の波が下芳養湾内の南部、目良においてが 10 倍程に増幅され、芳養では 5 分の 1 程に減衰しているのが確認された。8 分周期の際、目良と芳養において 10 倍以上の高い振幅を得た。

境界にホワイトノイズを与えた **CASE-3** と周期波を与えた **CASE-1** とで、周期毎の振幅増加の分布は一致するが、増幅率は必ずしも一致しなかった。**CASE-1** の追加計算として、34 分周期の波も与えてみたが、新庄での振幅比は 10 倍程となり、40 分周期と大差ない結果に終わった。

各地点の卓越副振動特性は、風の息を考えた計算結果とほぼ一致するが、風の息では 6 分であり発達しなかった湾奥の新庄で、外力が水の波の計算では下芳養湾並みに顕著な副振動が起こったことが大きな違いであった。

5. 現地観測との対応

前回³⁾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、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。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。

今回は砕波による長周期波の発生を沖合からの進行性長周期波の侵入に置き換えて、田辺湾の西側開境界に微小振動を与えると、下芳養湾や田辺湾の奥では、特定の周期で 10 倍以上の増幅が見つけられた。下芳養湾の砕波波高が 2m 程度であっても、その 10% の波高の長周期波が生ずれば、充分 1m 程度の副振動を励起できることが期待できる。しかし、今回の方法では、下芳養湾だけに副振動を顕著に励起させることは出来なかった。

現地観測では、副振動は田辺湾奥ではあまり発達せず下芳養湾だけに発達し、砕波波高は変わらないのに波向が変わっただけで変化した³⁾。このような特性は風の息のモデルでは定性的に再現できていた。

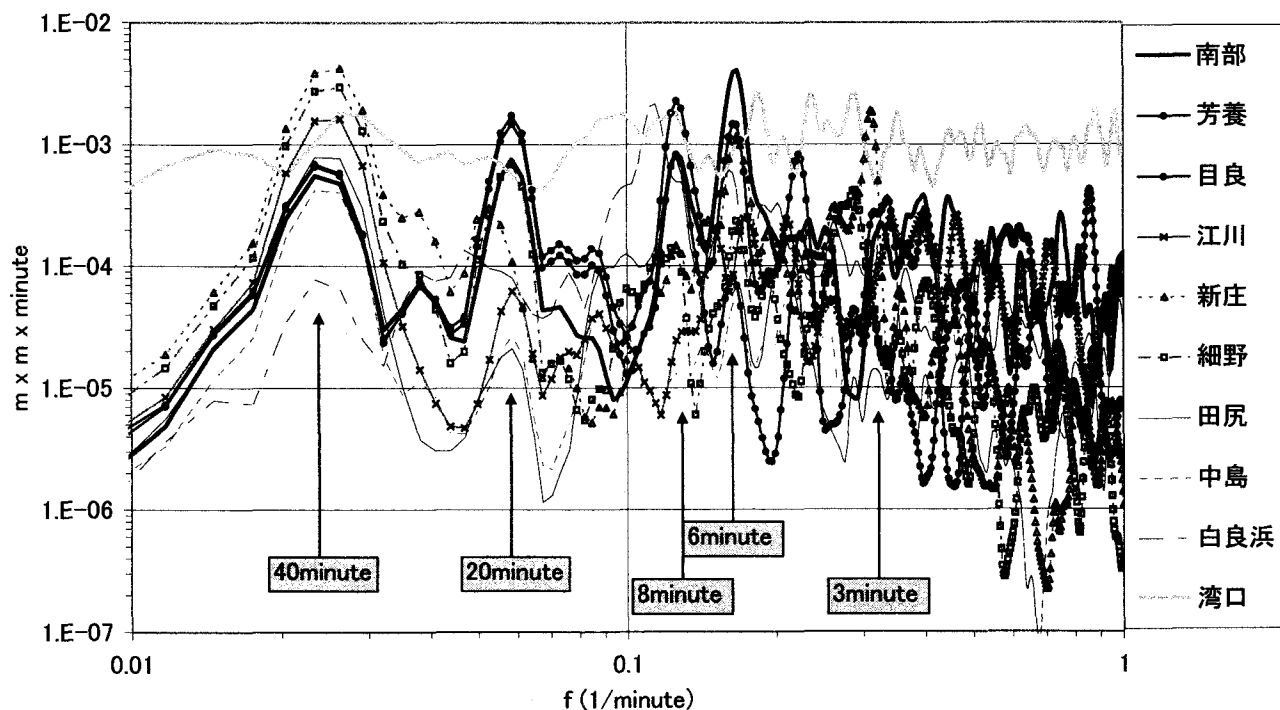


図-10 開境界でホワイトノイズの条件で発生した副振動のパワースペクトル

6. おわりに

本研究において、沖から長周期の定常波を入射させて、沿岸の振幅を比較すると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。風の息では風向きが副振動の励起に大きく影響したが、沖からの長周期波の侵入の場合も、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。風の息だけで、なぜ下芳養湾だけに副振動が発達するのか定性的に説明できるが、定量的に再現するためには群波性砕波による長周期波の発生の効果を導入する必要がある。

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) 後藤智明:津波・高潮数値計算プログラムマニュアル, 1997.
- 3) 吉岡洋・村山英俊・高山知司・芹澤重厚:風による副振動の励起, 海洋開発論文集, 第19巻, 2003, pp. 893-898.
- 4) 間瀬 肇・北野利一・吉岡 洋:不規則波のハイブリッド非線形平面変形モデル, 海岸工学論文集, 44, 1997, pp. 36-40.