

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

青木伸一*・岡辺拓巳**・出口一郎***

本研究は、異なる性質を有する 2 つの海岸に位置する漁港内およびその沖合で得られた波浪データを共通の手法で処理し、それらを比較検討することにより、長周期波の沖合での発達とその港内での増幅に関する両地点の共通点と相違点を論じたものである。太平洋に面した赤羽根漁港での台風時期の観測では、港の沖合では通常の波浪と相関の高い周期数分程度の波群性長周期波が卓越するが、冬期風浪を受ける対馬の西海岸に位置する阿連漁港では、周期十分程度の比較的長い気象性の長周期波が波浪とは無関係に頻繁に発生し、港内では後者の増幅率が大きく、ヘルムホルツモードの副振動が発生していることがわかった。

1. ま え が き

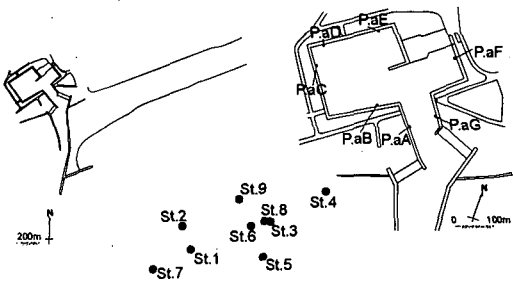
台風や冬期季節風による高波浪に伴って生じる周期数分～十数分の長周期波については、これまでに数多くの観測例や理論的・実験的な検討が行われているにもかかわらず、その実態がよくわかっていない（例えば、宇野木, 1959；合田, 1995；関本, 1999）。ひいては、これが原因となって生じる小規模港湾の副振動に関わる諸問題（港内の渦流れ、岸壁の冠水、係留船の動揺、航路埋没など）に対する解決の糸口が見い出せていないのが実状である。その原因の 1 つとして、長周期波の増幅や伝播の特性が、来襲する波浪特性、気象条件、あるいは海岸の地形などに大きく影響され、種々の観測データから得られる知見に差違があることが挙げられよう。本研究は、異なる性質を有する 2 つの海岸に位置する漁港の内外において波浪の同時観測を行い、得られたデータを共通の手法で処理することにより、長周期波の沖合での発達とその港内での増幅に関する両地点の共通点と相違点について論じたものである。両地点での長周期波の性質の違いを調べることをにより、長周期波の発達・増幅のメカニズムを探ることを目的としている。

2. 波浪観測の概要

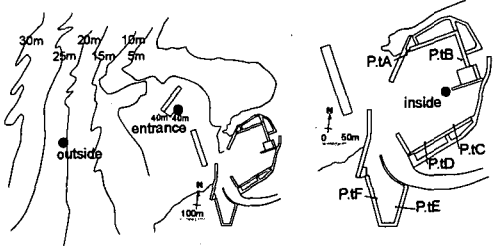
波浪の現地観測は、渥美半島太平洋岸の直線的な砂浜海岸に位置する赤羽根漁港、および長崎県対馬西岸の岩礁海岸に位置する阿連（あれ）漁港において、それぞれ台風時期および冬期に実施した。著者ら（青木ら, 1997；山村ら, 1998, 1999）は、赤羽根漁港沖合で 1996 年以來継続して台風期の波浪観測を行ってきたが、2001 年には台風の来襲に合わせて港内数点で水位の同時観測を行った。図一は赤羽根漁港沖の各年の波高計の設置位置（St. 1-St. 9）および、2001 年の港内の水位観測位置（PaA-PaG）を示したものである。漁港沖合（水深約 12 m～14

m）では、2 台の自記式波高計（WaveHunter, アイオーテック）を用いて台風時期に約 2 ヶ月間の波浪の連続観測を行っている。2001 年は、8 月 29 日～10 月 16 日の期間に観測を行ったが、期間中台風が遠州灘に最も接近したのは 9 月 10 日前後であった。期間中の波高と周期の変化は図一4(a)に示すが、台風来襲時だけでなく観測期間の後半にも高波浪が観測されている。赤羽根漁港内における波浪観測は、自記式水圧計（Compact TD, アレック電子）7 台（うち 1 台は大気圧補正のため陸上に設置）を用い、9 月 9 日、19 日および 10 月 17 日からそれぞれ 2 日間、計 3 回の連続観測を行った。

一方、阿連漁港内外においては、2001 年 2 月 10 日～3 月 10 日の 1 ヶ月間、冬期風浪の観測を行った。図一2に示すように、3 台の自記式波高計を、港外（outside, 水深 21 m）、港口部（entrance, 水深 8 m）および港内



図一 赤羽根漁港における波高計の配置



図二 阿連漁港における波高計の配置

* 正会員 工博 豊橋技術科学大学助教授 建設工学系
** 工修 豊橋技術科学大学大学院建設工学課程
*** 正会員 工博 大阪大学教授 大学院工学研究科土木工学専攻

(inside, 水深 4 m) に設置し、波浪の連続観測を行った。図-4(b) に港外観測点における波浪特性の変化を示している。また、漁港内には赤羽根漁港と同様に 6 台の水圧計 (P.tA-P.tF) を設置し、2 月 10 日および 2 月 24 日からそれぞれ 2 日間、連続観測を行った。

3. 港外における長周期波の増幅特性

(1) 長周期波の定義と分類

図-3 に赤羽根および阿連における荒天時の波浪のパワースペクトルを示す。荒天時には、赤羽根では有義波周期が 10 s 以上になるのに対して、阿連では高々 7 s 程度であり、パワーが極小値を示す周期は、赤羽根では 30 s 付近、阿連では 20 s 付近である。本論文では、この極小値を示す周期よりも長い周期をもつ波成分を長周期波と定義することにし、以下の解析を進める。長周期波のうち、周期数分程度の波成分は、一般に短周期の波との関連性が強く、波高の変動性 (波群) が主な発生原因とされる。また、これよりさらに長い周期の波成分は、短周期波との関連性が低い場合も多く、気圧変動や風など何らかの気象擾乱が原因で発生していると考えられている。本論文では、便宜上、前者を「波群性長周期波」、後者を「気象性長周期波」と呼ぶことにする。ただし、この呼称は一般的ではない。上述したように、赤羽根と阿連では風波の卓越周期が異なるため、波群の変動周期も異なると考えられる。そこで、赤羽根の観測データについては、周期 30 s-300 s の波成分を波群性長周期波、300 s 以上の波を気象性長周期波と定義することにし、阿連のデータについては、それらをそれぞれ 20 s-200 s、200 s 以上と定義して取扱った。

(2) 長周期波の増幅特性

図-4 は、赤羽根および阿連の港外観測点における 2001 年の波浪データから抽出した長周期波成分の RMS 値 (η_{rms}) の経時変化を有義波高と有義波周期の変化とともに示したものである。長周期波の抽出は、フーリエ変換による数値フィルターを用いて、対象とする周期帯の波の時系列を再構成することにより行った。ただし、潮汐変動によるトレンドはあらかじめ除去している。これより、両地点とも波群性長周期波は有義波高および有義波周期の増大とともに増大する傾向がはっきり現れている。ただし、赤羽根の方が全体的にエネルギーレベルが高い。一方気象性長周期波については、両地点とも大きさは同程度であるが、阿連では波群性長周期波が小さいため、気象性長周期波が相対的に大きくなっている。また、特に阿連においては、気象性長周期波は有義波高や有義波周期と無関係に発生している場合も多く見られる。

図-5 および図-6 は、それぞれ赤羽根および阿連にお

ける 2 種類の長周期波の RMS 値を有義波高と有義波周期の積 $H_{1/3} T_{1/3}$ を横軸にとって示したものである。ただし、図-5 には 2000 年以前に取得したデータについても一緒にプロットしている。これより、赤羽根では波群性長周期波の RMS 値は、 $H_{1/3} T_{1/3}$ にほぼ線形的に増加すると見ることができ、その比例定数は 0.003 [1/s] 程度である。また、気象性長周期波についても $H_{1/3} T_{1/3}$ の増加に対して増加傾向にはあるものの、その増幅率は波群性長周期波に比べて極めて小さいことがわかる。一方、図-6 の阿連の観測値を見ると、波群性長周期波については赤羽根に比べて増幅率が非常に小さく、 $H_{1/3} T_{1/3}$ との関係も 2 次関数的な変化を示している。また、 $H_{1/3} T_{1/3}$ の小さな範囲でも、大きな気象性長周期波が現れている点の特

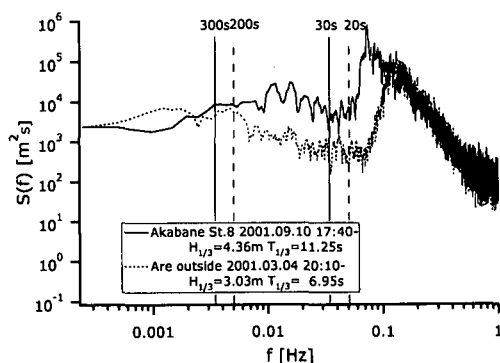
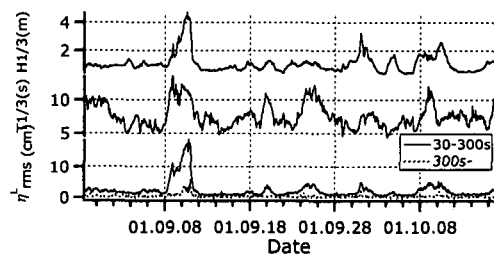


図-3 荒天時のパワースペクトルの比較

(a) 赤羽根



(b) 阿連

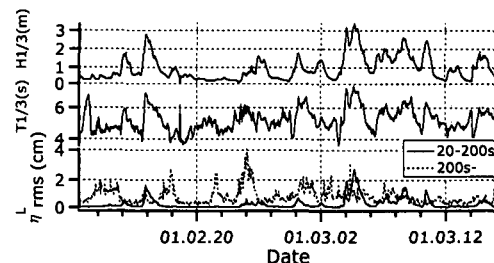


図-4 赤羽根および阿連における波高・周期および長周期波成分の RMS 値の経時変化

微的で、その値は荒天時の波群性長周期波よりも大きいものもみられる。以上のように、赤羽根と阿連のように、波浪条件や地形条件が異なる海岸での長周期波の増幅特性は大きく異なることがわかった。

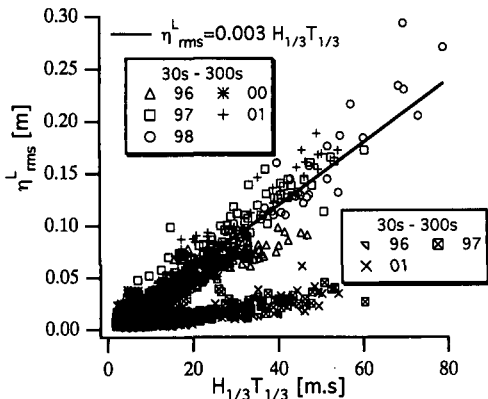


図-5 赤羽根における長周期波の増幅特性

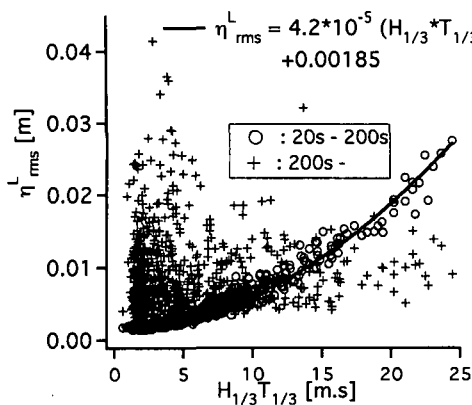


図-6 阿連における長周期波の増幅特性

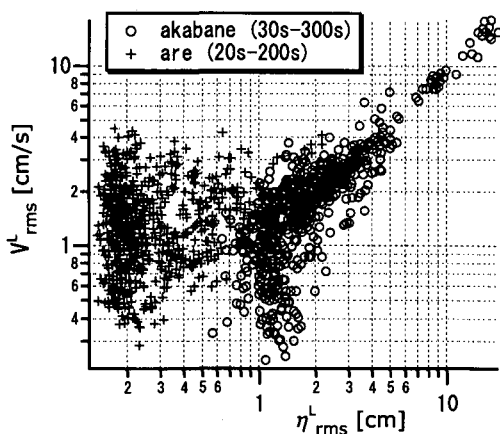


図-7 長周期流速成分と長周期波の関係

青木(2002)は、 $H_{1/3} T_{1/3}$ と波群性長周期波の η_{rms}^L の関係について、赤羽根および阿連以外での観測結果も含めて整理しているが、多くの砂浜海岸で η_{rms}^L は $H_{1/3} T_{1/3}$ に線型な関係を示す。一方、阿連のような岩礁海岸では、Herbersら(1994)が指摘しているように、砕波に伴う自由長周期波の発生が抑えられることから、拘束波成分が卓越して存在するものと推察される。また阿連では、通常波浪時でも比較的大きな気象性長周期波が発生しているが、その原因については明らかでない。気圧の観測結果と比較すると、低気圧の通過と発生タイミングが対応しているようにも見えるが、気圧変動の時間スケールはここで取扱う長周期波の周期(10分前後)に比べてはるかに大きい。

(3) 長周期流速成分

図-7は、波群性長周期波に対応する周期帯について、港外の波高計で得られた底部流速の長周期成分 V_{rms}^L と η_{rms}^L の関係をみたものである。ただし V_{rms}^L は2方向の流速成分ごとにRMS値を計算し、それらの2乗和の平方根として求めたものである。図より、赤羽根において $\eta_{rms}^L > 1.5$ cmの長周期波が観測される場合には両者の相関が高いが、 $\eta_{rms}^L < 1.5$ cmとなる赤羽根や阿連のデータについては明確な関係がみられない。これは、この周期帯の流れ成分には、波以外の寄与も存在することを示している。特に、阿連の場合には潮流が大きく、地形も複雑であることから、波以外のノイズが大きいものと推察される。ただし、阿連の港口部および港内で観測されたデータについては流速と水位変動の相関は高い。なお、気象性長周期波についても同様の整理を行ったところ、赤羽根および阿連ともに、両者の相関はあまり高くないという結果が得られた。

4. 港内副振動の特性

(1) 港内における長周期波の増幅

図-8および図-9は、港外の長周期波のRMS値に対して、同時刻に港内で観測された長周期波のRMS値をプロットしたもので、港内での増幅の程度をみることができる。図-8の赤羽根のグラフでは、港外のデータが存在する9月9日と19日の港内すべての観測点での値を一緒に示し、図-9の阿連のグラフでは、港内で連続観測した波高計のデータのみ示している。なお、図中の直線は増幅率1(港内と港外のRMS値が等しい)を表している。これらの図より、今回の観測では、いずれの港においても、波群性長周期波は港内であまり増幅されていないのに対して、気象性長周期波は2倍程度に増幅されていることがわかる。ただし、山村ら(1999)は1998年に台風が直撃した際に赤羽根漁港において周期1分程度の非常に大きな長周期振動に伴う流れを観測しており、条

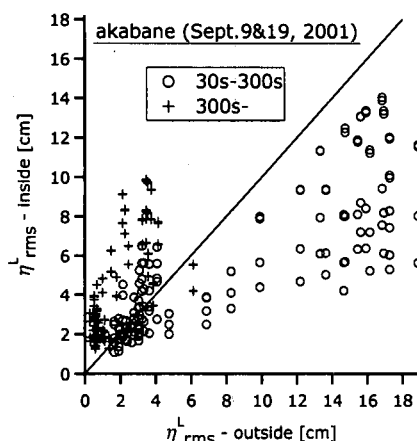


図-8 赤羽根漁港内外の長周期波高の比較

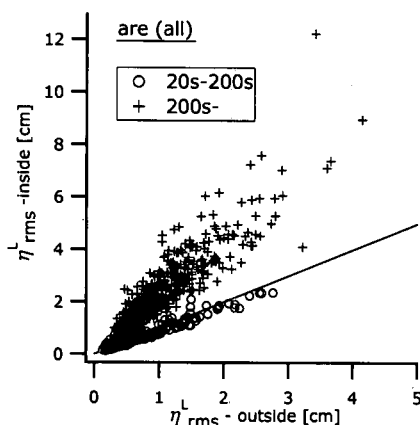


図-9 阿連漁港内外の長周期波高の比較

件によっては波群性長周期波の周期帯でも一種の共振状態が生じることもありうると考えられる。

(2) 長周期波の港内への伝播と副振動

阿連漁港では、港外、港口部、港内の3箇所で波浪の連続観測を行ったため、これらの点で観測された長周期波の時系列を比較することにより、その伝播の様子をみることができる。波高計間の距離が大きいので、波群性長周期波については比較できないが、周期の長い気象性長周期波については比較的明瞭に水位変動の伝播をとらえることができた。図-10は、その一例を示したものであり、長周期の変動が港外から港内に伝播し、伝播とともに増幅されていく様子がはっきりととらえられている。全観測期間にわたって港外と港内の200s以上の長周期波成分について水位変動の相互相関を計算したところ、相関係数は平均で0.75程度、位相差は40s程度であった。この位相差は、長波の伝播速度より計算した時間差より少し短いもののオーダー的にはほぼ一致している。

図-11は、阿連の港外の波浪データをもとに、橋本・

小舟(1986)の方法で方向スペクトルの方向分布関数を計算したものである。解析対象としたデータは、波高の増大とともに波群性および気象性の長周期波がともに増大する時期のもの(2月15日20時)を用いた。図より、気象性長周期波に属する $f=0.00125$ (800s)の成分は、 $f=0.01$ (100s)の成分に比べて伝播方向が北西(130度)および南東(310度)に明確に現れており、海岸方向への入射波とその反射波がとらえられているものと思われる。

最後に、港内での多点同時観測結果から、副振動の特性について考察する。図-12および図-13は、赤羽根および阿連漁港内の各観測点での長周期波(赤羽根:30s以上、阿連:20s以上の成分)の水位変動の時系列を示したものである。図-12より、赤羽根漁港内(内港)では周期70s-80sと周期15分程度の2種類の副振動が卓越していることがわかる。前者は波高計の設置地点ごとに位相差を有しており、内港の水域の固有周期に対応して振動しているものと推察される。さらにこの位相差を詳細に調べると、潮汐による水深変化に応じてその現れ方が変化していることが分かった。また300s以上の振動については、各点ともほとんど同じ大きさで位相差なく振動している。一方、図-13に示した阿連漁港の時系列をみると、周期5分から10分程度の長周期振動が卓越していることがわかる。さらに、P.tAからP.tDまでの4地

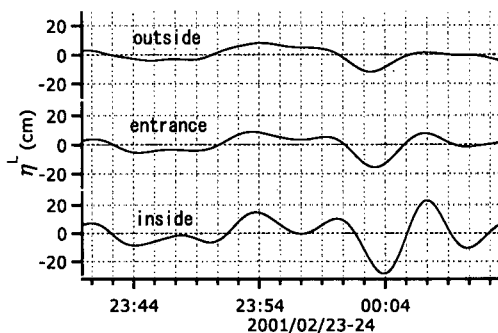


図-10 長周期波の港内への伝播(阿連, 200s以上)

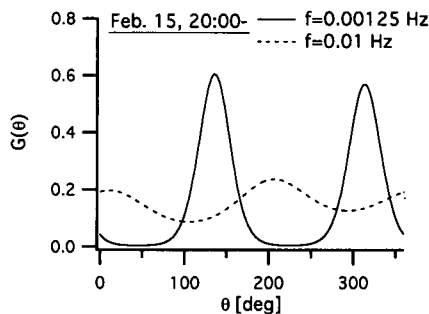


図-11 長周期波の方向分布関数の計算例(阿連, 港外)

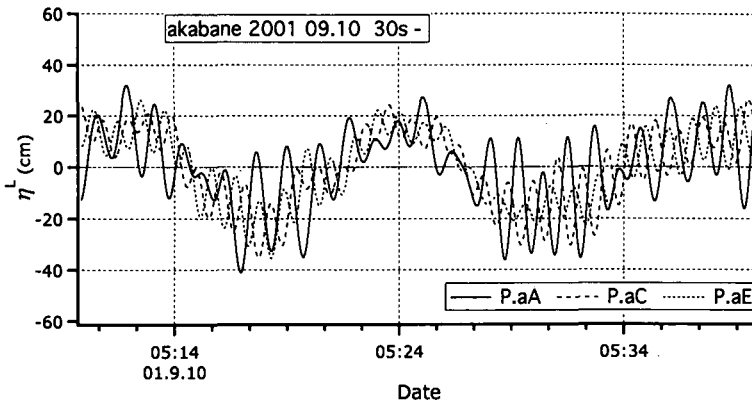


図-12 赤羽根漁港内での長周期振動の時系列

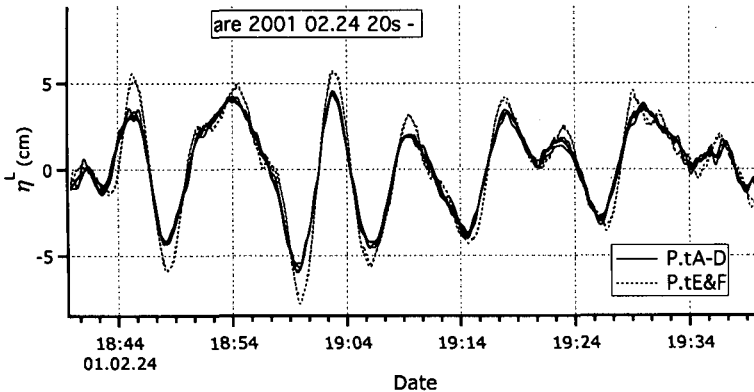


図-13 阿連漁港内での長周期振動の時系列

点の水位変動はほとんど一致しており、港内へ流入する小河川を挟んで水域が異なる P.tE および P.tF 点においてさえ、他の点と比べて多少振幅に差異はあるものの、位相はほとんど一致している。このように、周期の長い気象性長周期波に対しては港の全域にわたって同位相で振動するヘルムホルツモードの振動が生じていることが確認できた。

5. あとがき

本研究では、波浪特性および周辺地形が大きく異なる2つの漁港を対象として実施した波浪観測データを用いて、港外および港内の長周期波の特性を互いに比較することによりその特徴を明らかにした。まず長周期波を、周期数分程度の波群性長周期波と、それより長い周期をもつ気象性長周期波に分類して港外での特性を比較したところ、それらの増幅特性は両地点で大きく異なることが明らかになった。前者については、波浪条件や海岸地形の違いによる自由波の発生の程度の違いに起因してい

るものと考えられるが、後者については不明である。周期の長い気象性長周期波が卓越する場合、規模の小さな漁港では、港内への侵入に伴って振幅が増幅され、ヘルムホルツモードでの副振動が発生していることがわかった。

本研究で実施した対馬での波浪観測に当たり、復建調査設計(株)の河野・原・稲垣の諸氏、阿連漁協の新宮氏、(有)アイオーテックの井戸氏、および大阪大学の荒木助手には大変お世話になった。また、赤羽根の観測では、赤羽根漁協および豊橋技術科学大学海岸工学研究室の学生諸君にご協力いただいた。ここに記して深甚の謝意を表する。

参考文献

- 青木伸一(2002): 沿岸長周期波の発生と伝播に関する研究, 海洋開発論文集, Vol. 18, pp. 155-160.
- 青木伸一・喜岡 渉・山村易見・舟橋香・相川久紀(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.
- 宇野木早苗(1959): 港湾のセイシュと長周期波について, 第6回海岸工学講演会論文集, pp. 1-10.
- 合田良実(1995): 不規則波浪に伴う長周期波の諸研究について, 第31回水工学に関する夏季研修会講義集, Bコース, pp. B-6-1-20.
- 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, 中央大学学位論文, 130 p.
- 山村易見・青木伸一(1998): 外洋に面した小規模港湾内外における長周期波の挙動, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 311-315.
- 山村易見・青木伸一・舟橋 香(1999): 入射波の方向分散を考慮した拘束長周期波の推定と自由長周期波の伝播特性, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 286-290.
- 山村易見・青木伸一・舟橋 香(1999): 台風9807号による赤羽根漁港沖での長周期波と港内流動の観測, 土木学会年次講演会講演概要集, 第2部, pp. 163-164.
- 橋本典明・小舟浩治(1986): 方向スペクトルの推定における多変量自己回帰モデルの適用, 第33回海岸工学講演会論文集, pp. 164-168.
- Herbers, T. H. C., S. Elgar and R. T. Guza (1994): Infragravity-Frequency (0.005-0.05) Motions on the shelf. Part I: Forced waves, J. Physical Oceanogr., Vol. 24, pp. 917-927.