

外洋に面した小規模港湾内外における長周期波の挙動

山村 易見*・青木 伸一**

1. はじめに

荒天時に来襲する高波浪に伴い, 沿岸域では数分周期の長周期波のエネルギーが増大し (例えば, 永井ら, 1996; 青木ら, 1997; 佐藤, 1997), 小規模港湾の副振動 (喜岡ら, 1993; 清水ら, 1994), 係留船の長周期動揺 (菅沼ら, 1995; 渥美ら, 1997), 砂浜の侵食 (加藤ら, 1989) および航路埋没 (松岡ら, 1991) 等, 海岸工学上の諸問題に多大な影響を与えることが指摘されている。しかしながら, この数分周期の長周期波は, 現地観測データに乏しく, また実験室での再現も難しいため, 近年国内外で盛んに研究されているものの, その実態には依然として不明な点が多い。

著者らは, 航路埋没対策に苦慮していると同時に, 隣接した砂浜海岸に著しい汀線変化をもたらしている掘込み式の小規模港湾を対象に, 港の沖合いを台風が通過する際の波浪を2年間にわたって港の内外で観測した。本研究では, 高波浪に伴う港外の長周期波およびその港内での増幅特性を調べるとともに, 港外に設置した2台の波高計の同時記録を用いて, 港湾に隣接する砂浜海岸における長周期波の存在形態について調べた。

2. 波浪観測の概要

(1) 観測地点および方法

使用した現地データは, 愛知県渥美半島太平洋岸に位置する赤羽根漁港内外において, 1996年および1997年の秋に実施した波浪観測で取得したものである。96年には, 図-1に示す St. 1-96 および St. 2-96 に波高計を設置し, 9月7日~10月19日の期間, 観測を行った (詳細は青木ら, 1997)。97年には, 図-1に示す St. 3-97, St. 4-97 に波高計を設置し, 9月10日~10月24日の期間, 観測を行った。St. 3-97 では, 水位, 水圧, 2成分流速を毎偶数正時から40分間, サンプル間隔0.5秒で測定し, St. 4-97 では, 水圧および2成分流速を同じく0.5秒間隔で期間中連続測定した。なお, 2台の波高計は, 長周期波の沿岸方向への伝播特性を調べるために, 汀線平

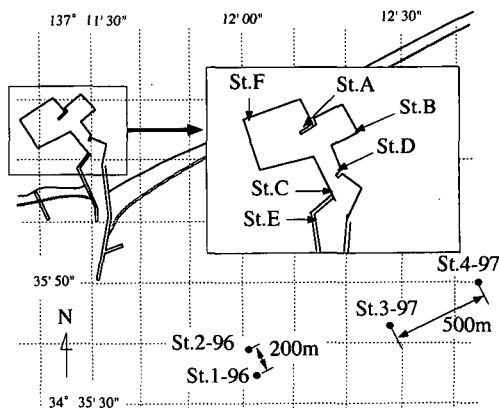


図-1 波高計設置位置

行方向に500m離して設置し, 同時刻のデータを取得できるようにした。波高計設置位置の平均水深は, St. 3-97 が12.1m, St. 4-97 が12.2mであった。

港内については, 96年の2回の台風来襲時に, 図-1に示す港内観測点 St. A~St. F において容量式波高計およびビデオ観測により, 水位の時系列を取得した。

(2) 観測期間中の気象条件

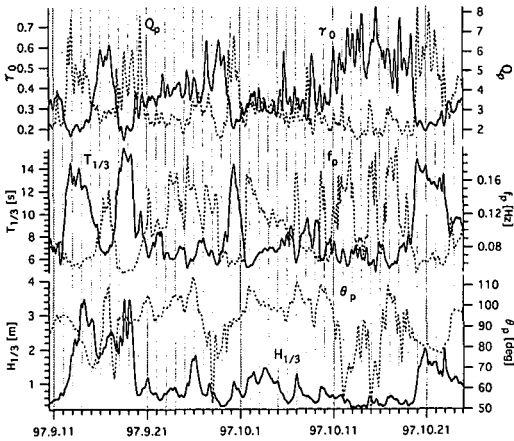
両年とも, 観測期間中台風の直撃はなかったものの, 比較的大形の台風が沖合いを幾度か通過し, 異なった気象条件で高波浪が観測された。97年の観測では, 9月13日前後に台風9719号, 9月18日前後に台風9720号, 10月20日前後に台風9723, 9724号が日本列島付近に接近した。また9月30日前後には台風9722号が南方海上を通過している。

(3) 波浪特性

図-2は, St. 3-97で得られた水位データから求めた, 97年観測期間中の有義波高 $H_{1/3}$, 有義波周期 $T_{1/3}$, スペクトルピーク周波数 f_p , 主波向 θ_p , 波峰長パラメータ γ_p およびスペクトル尖鋭度パラメータ Q_p の変化を示したものである。なお, 波向については汀線に直角方向が90°となるように示している。図より, 4回の台風の接近に対応して波高および周期の増大がみられるが, 有義波周期については, 9月30日前後の台風9722号の通過時に, 波高が小さいにも関わらず周期の大きなうねりが観測さ

* 学生会員 工修 豊橋技術科学大学大学院 建設工学系

** 正会員 工博 豊橋技術科学大学助教授 建設工学系

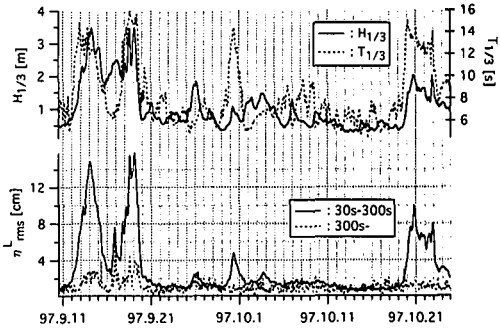


図一2 波浪特性の経時変化

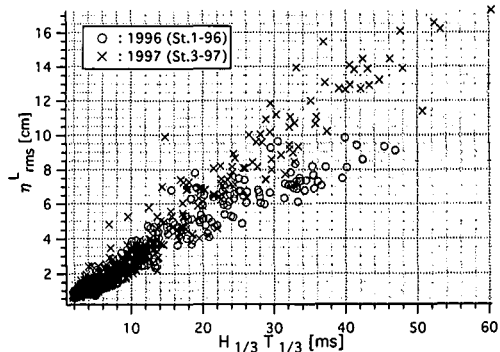
れているのが特徴的である。波向については、通常波浪時は汀線直角方向よりやや西向きであるが、台風接近時には東向きにシフトしていき、高波来襲時にはやや東向きの波向きとなっている。波峰長パラメータについては、台風来襲時に小さくなる傾向を示しており、スペクトル尖鋭度は有義波周期の変動と似た変化を示す。これらの傾向は、96年の観測結果と同様であった。

3. 水位および流速の長周期変動の増幅特性

図一3は、St. 3-97で得られた水位データから長周期波成分を周期30～300秒および300秒以上の2種類に分け、それぞれ再構築した時系列から標準偏差 η_{rms} を計算してその変動をみたものである。図中には、有義波高および有義波周期の変化も同時に示している。図より、周期30～300秒の長周期波成分は4回の台風接近に対応して増幅しているが、300秒以上の長周期波成分はほとんど増幅していないことがわかる。著者ら(1997)は、96年の観測結果から、周期30～300秒の長周期波成分の大きさは有義波高に比例するとしたが、台風9722号によるうねりが来襲した9月30日付近には、波高が小さいにも関わらず長周期波の増幅がみられることから、この増幅は波高と周期に関係するものと類推される。図一4は、前述の周期30～300秒の η_{rms} と、有義波高と有義波周期の積との関係を示したものである。図中には、96年の観測結果も同時に示している。図より、 η_{rms} と $H_{1/3} \cdot T_{1/3}$ には、ほぼ線形的な関係がみられるが、96年よりも97年の観測値の方が傾きが大きく現われている。これは、波高計設置位置の相違によるものと考えられる。このように、有義波高と有義波周期の積を用いることによりデータのまとまりは良くなるが、97年の観測においても、96年と同様に波高の2乗に比例するような傾向は観測されなかった。Bowers(1992)は、各地の観測結果をもとに、



図一3 長周期水位変動の標準偏差の経時変化



図一4 長周期水位変動の標準偏差と代表波との関係

長周期波の波高と有義波高およびスペクトルのピーク周期との関係を調べているが、自由波成分については、波高と周期の積にはほぼ比例することを示している。また渥美ら(1997)も同様の指摘をしている。

図一5は、St. 4-97で得られた2成分流速データから沿岸方向成分 u 、および岸沖方向成分 v を求めた後、周期30～300秒の長周期変動成分を抽出して再構築した時系列から求めた標準偏差 u'_{rms} 、 v'_{rms} の変動をみたものである。図一3と比較すると、高波来襲時に増幅する η'_{rms} に対応して u'_{rms} 、 v'_{rms} も増幅されているが、その値は v'_{rms} の方が u'_{rms} よりも高い値を示す傾向にある。この傾向は、他の3つの測定点のデータにも同様にみられた。佐藤(1997)も、高波来襲時に平均波向方向の長周期変動がその直交方向の長周期変動より大きくなると報告しており、今回の観測結果と一致している。

4. 岸沖および沿岸方向の長周期波の伝播特性

港外での長周期波の伝播特性を調べるために、2台の波高計より得られた沿岸方向流速 u 、および岸沖方向流速 v の相互相関係数を求めた。ただし、相関を検討するには、ある程度周波数を限定する必要があるため、水面変動および流速のスペクトルにおいて、高波来襲に伴う増

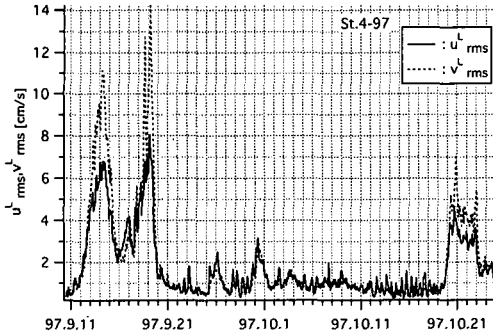


図-5 長周期流速変動の経時変化 (30~300 秒)

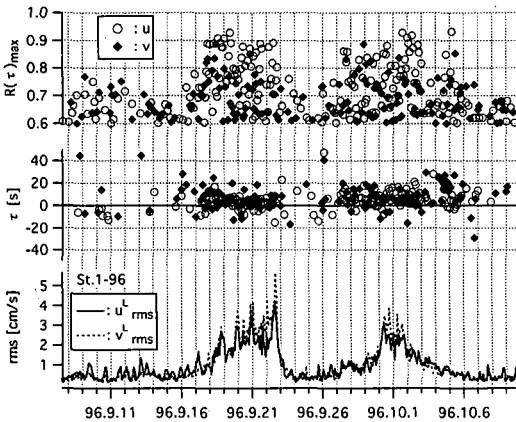


図-6 長周期流速変動の相互相関係数の最大値と位相差 (96 年)

幅が特に顕著にみられる周期 100~200 秒の成分波のみを用いた時系列を使用した。

図-6 は、96 年の観測において St. 1-96, St. 2-96 に設置した波高計の流速データより求めた周期 100~200 秒の長周期流速変動の相互相関係数の最大値 $R(r)_{\max}$ 、およびそれが発生する時間遅れを求め、その経時変化を見たものである。ただし、正の位相差は岸側の波高計の位相の方が進んでいることを示している。なお、相互相関係数については 0.6 以上を、位相差については ± 40 秒の範囲のみを示し、 u_{rms} 、 v_{rms} の変化も同時に示した。図より、高波浪時に u 、 v 共に相関が高くなり、時間遅れも 0~20 秒の間に集中する傾向にあることがわかる。

ここで、規則波の部分重複波について、2 点間の観測値の相互相関係数がどのような性質を持つかを調べてみる。 x の正方向に進行する入射波と、負方向に進行する反射波 (反射率 K_R) の合成波を A 点 ($x=0$) で観測した波形を次式のように表わす。

$$\eta_A = \cos \omega t + K_R \cos(\omega t + \epsilon) \quad \cdots (1)$$

ここに、 ϵ は入射波と反射波の位相差である。A 点から距

離 D だけ離れた点 B での観測波形は、

$$\eta_B = \cos(\omega t - kD) + K_R \cos(\omega t + kD + \epsilon) \quad \cdots (2)$$

と表わされるので、これらの波形の相互相関係数 $R(r)$ が計算できる。結果のみ示すと次のようになる。

$$R(r) = \cos(\omega r - \theta) \quad \cdots (3)$$

ここに、 θ は次式で与えられる。

$$\tan \theta = \frac{(1 - K_R^2) \sin kD}{(1 + K_R^2) \cos kD + 2K_R \cos(kD + \epsilon)} \quad \cdots (4)$$

すなわち、2 点間の相互相関係数の最大値は、反射率や観測位置によらず常に 1 となり、最大値が生じる時間遅れ $\tau = \theta / \omega$ のみが反射率と観測位置によって変化することがわかる。図-7 は、 $\epsilon = 0$ の場合について (4) 式で与えられる θ をプロットしたものであるが、部分重複波の θ は、完全重複波の位相差 (0 か π) と進行波の位相差 (kD) の間の値をとることがわかる。

図-6 に戻って、200 m 離れた波高計間を線型長波が進行する時間が 18 秒前後であることを考えると、高波浪時には岸沖方向に重複波が形成され、この重複波は岸から沖向きの振幅がやや大きいことが類推される。これは、青木ら (1997) による入反射分離によっても確かめられている。また、沿岸方向流速 u の相関が非常に高いことは、200 m 程度の範囲ではあるものの、高波浪時には沿岸方向の流速変動が岸沖方向に一樣になることを示している。96 年の高波浪時に u 、 v の相互相関係数がそれぞれ最大となったデータの長周期流速変動の時系列を図-8 に示す。図より、両者の波形の類似性が確認できる。

図-9 は、図-6 と同様に 97 年の観測において St. 3-97, St. 4-97 に設置した波高計の流速データより求めた周期 100~200 秒の長周期流速変動の相互相関係数の最大値 $R(r)_{\max}$ および時間遅れの経時変化である。なお、正の位相差は東側の波高計の位相が進んでいることを示している。97 年も 96 年と同様、高波浪時に u 、 v 共に相関が高くなっているが、特に v の相関が高い。これより、高波浪時には沿岸方向に 500 m 離れた 2 点の岸沖方向の流速変動はほぼ一樣になっていることがわかる。また、

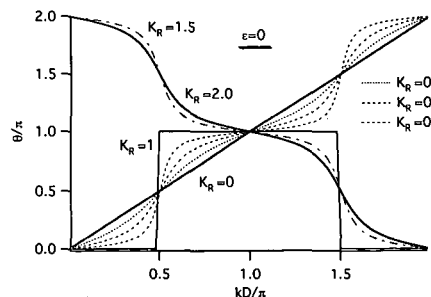
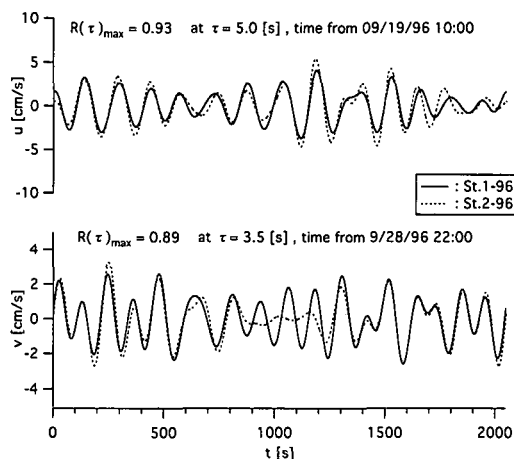
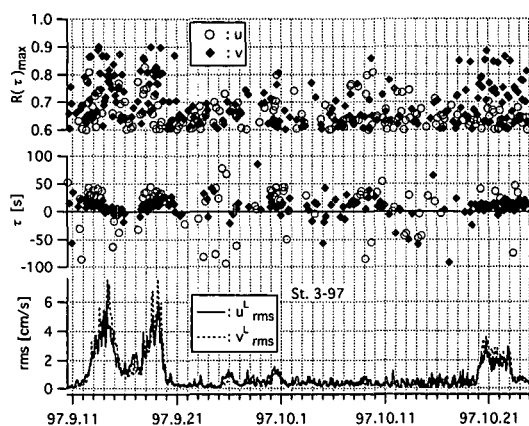


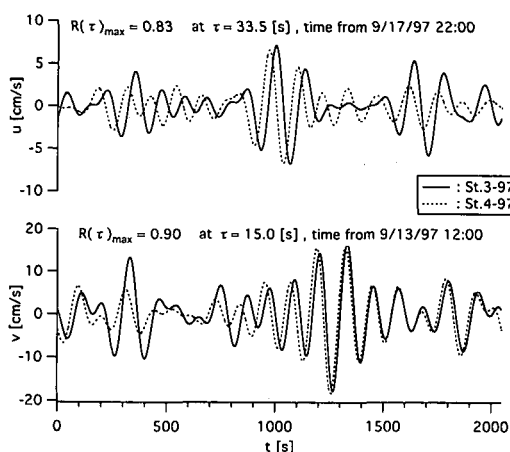
図-7 相互相関係数が最大値をとる位相差



図—8 長周期流速変動の時系列の比較 (96 年)



図—9 長周期流速変動の相互相関係数の最大値と位相差 (97 年)



図—10 長周期流速変動の時系列の比較 (97 年)

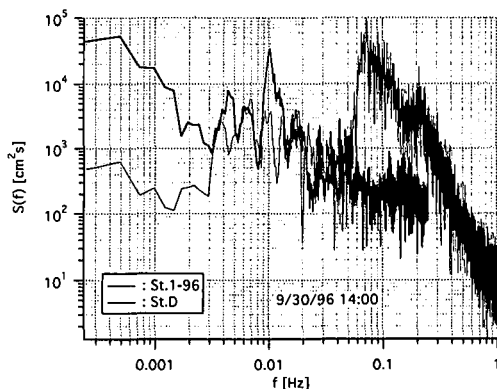
u の位相差が 0~50 秒の間に多く分布していることから、沿岸方向に進行する長周期波の部分重複波を考えた場合には、東から西へ進行する成分が卓越していると類推できる。 u , v の相互相関係数がそれぞれ最大となったデータの長周期流速変動の時系列を図—10 に示す。

5. 港内における長周期波の増幅特性

港内における長周期波の増幅特性を調べるために、スペクトル解析を行った。図—11 は、96 年 9 月 30 日 14:00 に St. 1-96 で得られたデータと、同時刻に港内観測点 St. D で得られたデータを用いて求めたエネルギースペクトルを比較したものである。図より、港内では周期 30 秒以下の短周期波成分にはエネルギーの減衰がみられるが、周期 30 秒以上の長周期波成分については、むしろエネルギーが増幅している。特に、周期 100 秒付近の成分波には明瞭なピークが確認できる。St. B, St. D における計 10 回の観測値についても同様の傾向がみられた。

図—12 および図—13 は、港内観測点 St. B, St. D における 2 度の台風来襲時の観測 (各 5 回づつ) について、港内外のスペクトルから周波数応答関数 (振幅増幅率) $H(f)$ を算出して示したものである。両図より、St. B, St. D 共に、異なる台風の来襲に対しても似かよった応答特性を示していることが分かる。これより、赤羽根漁港は高波浪時には港外の長周期波に対応してほぼ一定のモードで振動していると考えられる。図中には、太線で緩勾配方程式を有限要素法を用いて解いた計算結果も同時に示してある。なお、数値解析を行うにあたり、港内への入射波として、港外で観測された周期波成分を自由進行長波として入射させている。また、反射率については、防波堤で $K_R=1$ 、海岸で $K_R=0.80$ を与えている。

渥美ら (1997) は、港内侵入波は見かけ上、その大部分が拘束を解かれた自由進行波とみなすことができると報告している。しかしながら、今回の計算結果を観測結果と比較してみると、計算結果は観測結果を十分説明で



図—11 港内外の水位変動のスペクトルの比較

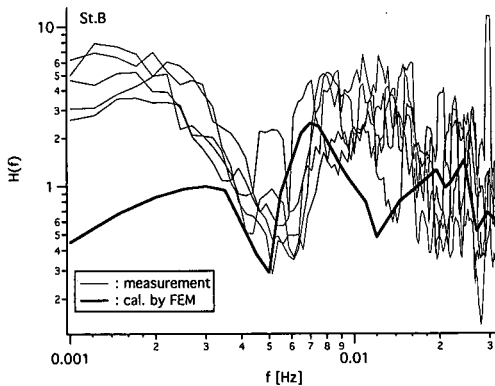


図-12 水位変動の周波数応答関数の比較 (St. B)

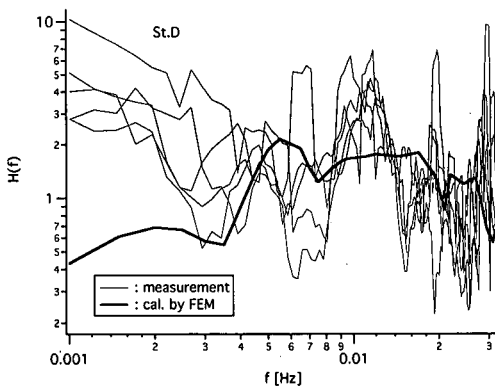


図-13 水位変動の周波数応答関数の比較 (St. D)

きているとは言い難い。計算上の問題もあるが、港内での振動は入射波に対する港の線形応答といった簡単な対応関係では説明できない部分があることが示唆される。

6. おわりに

本研究では、台風が沖合いを通過する際の長周期波の港内外での増幅特性、および隣接する砂浜海岸での長周期波の伝播特性について、赤羽根漁港内外での現地観測データをもとに考察した。得られた知見を以下に示す。

(1) 台風の接近に伴い周期30～300秒の長周期波成分が増幅され、その振幅は有義波高と有義波周期の積に比例する。

(2) 岸沖および沿岸方向流速の相互相関係数を周期100～200秒の成分について調べることで、高波浪時には岸沖方向の流速変動は沿岸方向に、沿岸方向の流速

変動は岸沖方向にそれぞれ一様となる傾向がみられた。また、岸沖および沿岸方向の長周期波を共に部分重複波とみた場合、岸沖方向については岸から沖向きに、沿岸方向については西向きに伝播する成分が卓越していることが類推された。

(3) 港内での応答関数の実測値より、港内では港外の長周期波に対応して固有の振動が生じていることが明らかとなったが、港外の長周期波を自由波として入射させた計算では振動特性を十分説明できなかった。

本研究は、科学研究費基盤研究(B)(1)「外洋に面した海岸・港湾における水理学的諸問題に関わる現地調査と観測データの公開、代表者：青木伸一、No.08555129」の一環として行ったものであり、測定した波浪データは、Web上に公開されている(<http://hydromac.tutrp.tut.ac.jp/coconut.html>)。

最後に、本研究に御協力頂いた「COCONUT」研究グループ、赤羽根漁協の方々に謝意を表します。

参考文献

- 青木伸一・喜岡 渉・山村見易・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.
- 渥美洋一・若山義樹・國田 淳・関口信一郎・川口 勉・平石哲也・青木伸一・上田 茂(1997): 長周期波の港内侵入過程の現地観測と長周期波高予測式の検討, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 221-225.
- 加藤一正・柳嶋慎一・栗山善昭・磯上知良(1989): 荒天時のバーム地形の侵食—長周期波に着目した現地観測—, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 354-358.
- 喜岡 渉・柏原謙爾・岩垣雄一(1993): 不規則波群に伴う2次長周期波の湾水振動, 土木学会論文集, No. 473/II-24, pp. 55-64.
- 佐藤慎司(1997): 浅海域における長周期流速変動の発達特性, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 256-260.
- 清水琢三・金山 進・服部 武・武藤亮介・高木伸雄・二見耕左(1994): 漁港内の長周期水面変動と平均水位上昇に関する現地観測と水理実験, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 76-80.
- 菅沼史典・神谷昌文・渥美洋一・小泉信男(1995): 現地観測による長周期波の発生頻度と船体動揺発生予測の検討, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 951-955.
- 永井紀彦・橋本典明・清水勝義・平井宣典・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.
- 松岡道男・木下勝尊・山本正昭・森口朗彦(1991): 長周期水理特性を考慮した港内堆砂モデルの適用性の検討, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 416-420.
- Bowers, E. C. (1992): Low frequency waves in intermediate water depth, Proc. 23rd Coastal Eng. Conf., pp. 832-845.