

# 台風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

青木伸一\*・喜岡 渉\*\*・山村易見\*\*\*  
舟橋 香\*\*\*・相川久紀\*\*\*\*

## 1. ま え が き

荒天時に来襲する高波浪に伴って沿岸域に発生する長周期の水面変動や流れは、港湾の副振動(山本ら, 1979; 田端ら, 1995)や係留船舶の長周期動揺(菅沼ら, 1995)を引き起こすばかりでなく、沿岸の漂砂移動に対しても大きな影響を及ぼし、砂浜の侵食や航路埋没などの要因となっていることが指摘されている(加藤ら, 1989; 松岡ら, 1991)。しかしながら、風波成分に比べてエネルギーが小さく、時空間スケールの大きな長周期波は、現地観測データに乏しい上に実験室での再現も難しく、その状態には不明な点が多い。最近の長周期波の研究は、その増幅が著しい砕波帯内での挙動に着目した研究と、砕波帯外の入射波としての長周期波に着目した研究の2つの方向で進められている。本研究は後者の立場から行ったもので、小規模な掘込み港湾を有する直線的な砂浜海岸の砕波帯沖側において波浪および流れの現地観測を実施し、沖合いを台風が通過する際、台風の接近や遠離に伴って長周期の水面変動および流れがどのように増幅・減衰し、また伝播しているかを明らかにすることを目的として行ったものである。

## 2. 現地観測の概要

### (1) 観測地点および方法

図-1に示すように、渥美半島太平洋岸に位置する赤羽根漁港東側の直線海岸に2台の波高計を設置し、1996年9月7日から10月19日までの期間、波浪観測を行った。波高計のうち沖側の1台(Wave Hunter  $\Sigma$ )は、水位、水圧、2成分流速を1時間おきに1時間、サンプリング間隔0.5秒で測定し、岸側の1台(Wave Hunter 94)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。なお長周期波の岸沖方向への伝播特性を調べるために、2台の波高計は汀線直角方向に200m離して設置し、同時刻のデータを取得できるようにした。

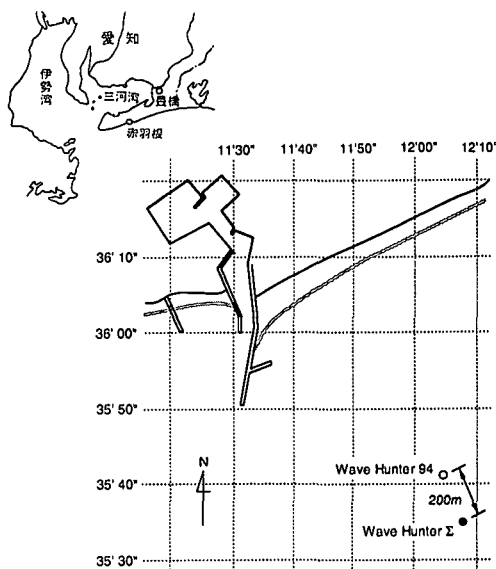


図-1 波高計設置位置

波高計の平均設置水深は、沖側13.8m、岸側11.5mであり、種々のセンサーは海底からそれぞれ1mおよび0.6m上方に取り付けられている。海底形状については、最近の測量データがないのではっきりしないが、過去の測量結果を見ると1/100程度のほぼ様な海底勾配となっている。気圧については気象庁伊良湖測候所、風については建設省中部地建東海幹線道路調査事務所日出観測所のデータを使用した。ただしこれらの観測点は、いずれも波高計設置点から約15km西方に位置している。

### (2) 観測期間中の気象条件

図-2に測定期間中に来襲した主な台風の経路図を示す。観測期間中1度は大型台風9617号が沖合い300km付近を南西から北東に通過し、1度は台風9620号と9621号が同時に接近するという、異なった2つの気象条件下で高波浪が観測された。経路図中の数字は、日付および台風の中心気圧を示している。

図-3には、観測期間中の気圧(海面換算値 $P_0$ )および平均風速( $|W|$ ,  $W_x$ ,  $W_y$ )の変化を、潮位変動と合わせて示している。ただし、 $|W|$ は風速の絶対値、 $W_x$ およ

\* 正会員 工博 豊橋技術科学大学 助教授 建設工学科

\*\* 正会員 Ph.D. 名古屋工業大学 教授 社会開発工学科

\*\*\* 学生会員 豊橋技術科学大学大学院 建設工学科

\*\*\*\* 学生会員 名古屋工業大学大学院 社会開発工学科

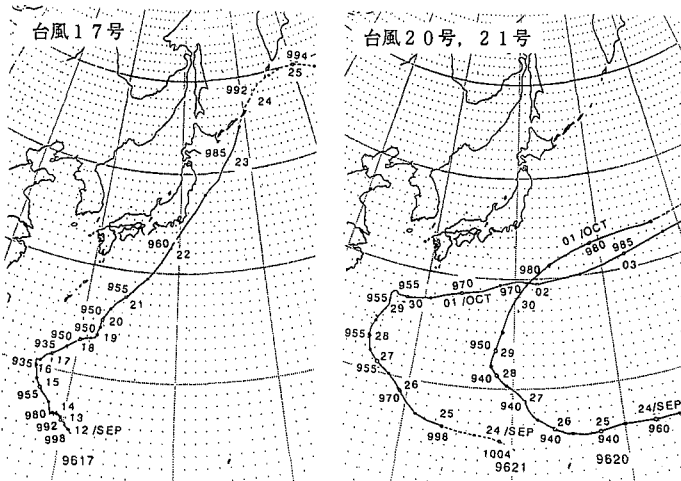


図-2 台風の経路

び  $W_y$  はそれぞれ沿岸方向および岸沖方向の風速成分 ( $x$  軸は東方向を正,  $y$  軸は岸方向を正としている) である。また潮位変動については、岸側波高計の水圧の連続観測記録を用いて調和解析を行い、主要な潮汐成分を求めて再構成したものである。これより、気圧は数日周期で変動しているが、台風 17 号が最も接近した 9 月 22 日には大きな気圧低下がみられる。ただし、台風 20 号および 21 号が接近した 10 月 1 日前後は、気圧の大きな変化はない。風についても気圧の変動周期と近い周期で増減を繰り返すが、台風 17 号接近時には台風に吹き込む強い北西風が観測されている。ただし、台風の接近に関わらず比較的強い風が吹いている場合が多い。

### (3) 波浪特性

図-4 は、沖側波高計の超音波水位計のデータから求めた、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 ( $\theta_p$ )、波峰長パラメーター ( $\gamma_0$ ) およびスペクトル尖鋭度パラメーター ( $Q_p$ ) の変化を示したものである。有義波高などの代表波は、潮汐成分を除去した後、周期 30 秒以上の長周期波成分をカットオフした時系列を用いて、ゼロダウンクロス法により求めた。図より、2 回の台風接近時とも同様な波高の増大がみられるが、有義波周期については、9 月 27 日前後および 10 月 5 日前後の台風 20、21 号の接近および遠離時に、波高は小さいにもかかわらず周期の大きなうねりが観測されているのが特徴的である。波向きについては、汀線に直角方向が  $90^\circ$  となるように示してある。通常波浪の波向き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。波峰長パラメーターについては、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している。

### 3. 長周期波の増幅特性

図-5 は、沖側の超音波水位計のデータを用いて、2 回の台風接近時前後のパワースペクトルの長周期領域での変動を、コンター図として示したものである。ただしスペクトルは時間方向にも平滑化 (10 時間の移動平均) を行っている。波高の変化によく対応して、2~4 分程度の周期成分の波エネルギーが増幅されていることが分かる。ただし、9 月 22 日の波高減衰期に周期 3 分程度の波のエネルギーが急増し、また急減している。図-6 は、長周期波成分を周期 30~300 秒および 300 秒以上の 2 種類

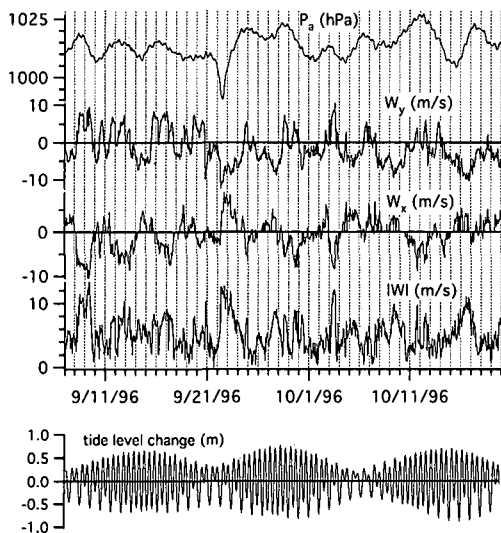


図-3 観測期間中の気圧、風速および潮位の変化

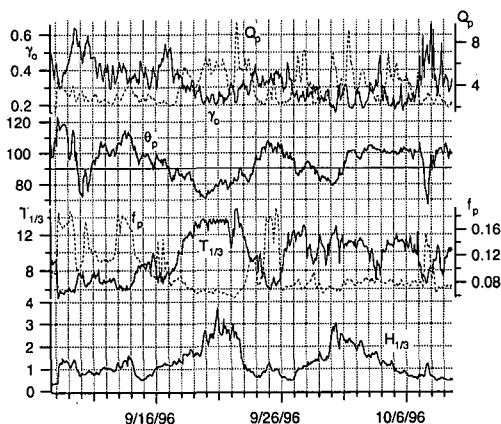


図-4 波浪特性の変化

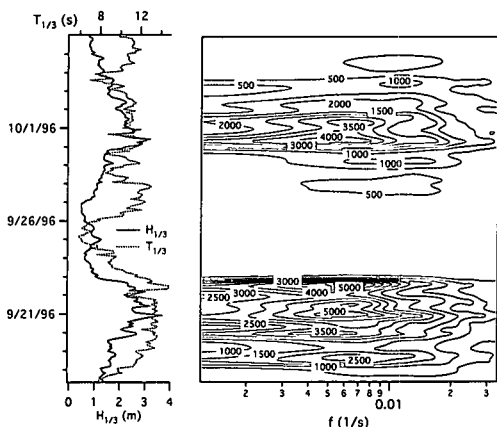


図-5 長周期波のパワースペクトルの変化

に分け、再構成したそれぞれの時系列から標準偏差  $\eta_{rms}$  を計算してその変動をみたものである。図中には Groupiness Factor (GF) および有義波高の変化を同時に示してある。30~300秒の長周期波成分は有義波高の増大にともなって大きくなる傾向を示しているが、300秒以上の長周期波成分はほとんど増幅されないことがわかる。また台風接近前後にはうねりの影響で GF が大きくなっており、ある程度波高の大きい範囲では  $\eta_{rms}$  に対する GF の影響が強くみられる (9月18日, 22日)。

図-7は、図-6に示した  $\eta_{rms}$  と有義波高の関係を示したものであるが、周期30~300秒の  $\eta_{rms}$  については、 $H_{1/3} > 1.5$  m の範囲では有義波高にほぼ線形的に増大することがわかる。これは、関本ら(1990)や永井ら(1996)が示したように、この周波数帯の長周期変動成分が線形成分波の2次干渉で説明できるとするのとは矛盾する事実となっている。この理由として、関本ら(1991)が指摘しているような海岸にトラップされた自由波の影響も考えられるが、波高に線形的に増幅することの説明にはならず、今後の検討が必要である。

#### 4. 長周期波の反射特性

観測期間中、長周期波エネルギーが最大となった台風17号接近時の波浪成分について入反射分離を行い、長周期波成分の海岸での反射特性を調べた。入反射分離は、線形理論に基づく合田ら(1976)の方法による。観測に用いた2台の波高計は汀線にほぼ直角に200m離れていることから、有効周波数の範囲は0.0027~0.0244 Hzと推定されるため、その周波数領域の軌道流速を調べて波向きが汀線直角方向から $\pm 10^\circ$ 範囲内にあった9月22日の10:06から20分間の有効周波数領域の長周期波を対象とした。

図-8は、超音波波高計による水位変動と水圧波が同

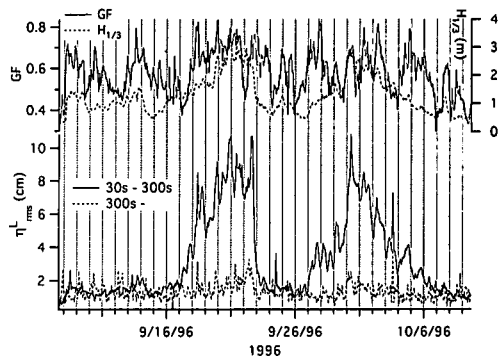


図-6 長周期水位変動の標準偏差の経時変化

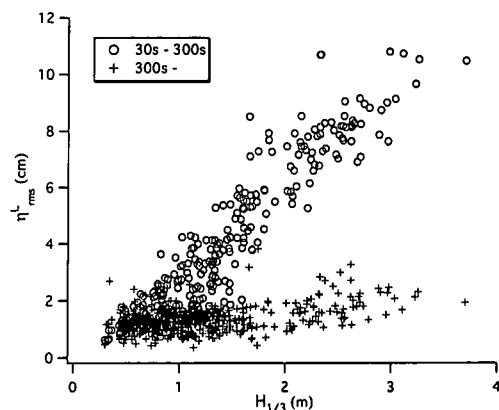


図-7 長周期波の標準偏差と有義波高の関係

時に観測されている9月22日10時~11時の沖側波高計のデータを用いて、表面波と水圧波のパワースペクトルからその伝達関数を求めたものである。図中の線形理論値と比べて、周波数0.3 Hz以上の高周波数領域では伝達率が小さく、逆に0.07 Hz以下の低周波数側では若干大きくなっており、この傾向は橋本ら(1992)によって示されているように波の多方向性及び非線形性に起因する。低周波数領域の成分波には、さらに反射波の影響も考慮する必要があるので、図-8の伝達関数を用いて岸側の水圧波から表面波を換算することには問題が残る。ここでは、2台の波高計の水圧波をそのまま用いて、水圧のパワースペクトルを分離した。FFTで分離した個々の成分波の位相速度は線形理論より与えるので、いずれにせよ2次波である拘束波の分離は厳密には行えない。

分離した水圧波の入射成分と反射成分のパワースペクトルを図-9に、それぞれの波の時間波形を図-10に示す。スペクトルに示める反射波の割合は、特に0.007 Hz以下の低周波数側で大きく、入射波のパワーよりも大きくなっている。反射率  $K_r$  を反射波と入射波のパワー  $E_r$ ,  $E_i$  から  $K_r = \sqrt{E_r/E_i}$  として求めたところ、 $K_r = 1.20$  となり反射波のパワーの方が全長周期成分でみても入射

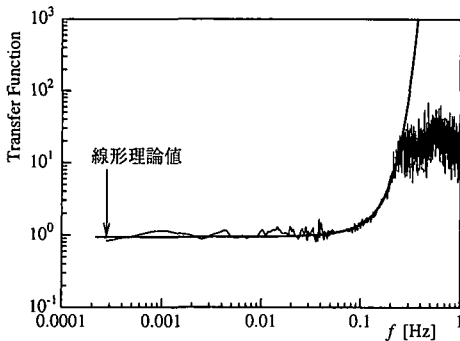


図-8 水圧から表面波への伝達関数

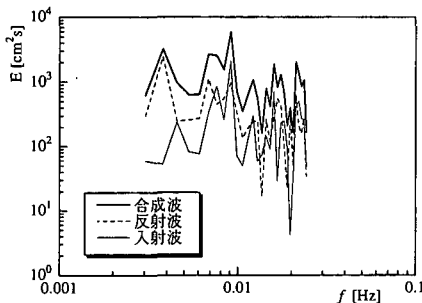


図-9 入反射分離した長周期波のスペクトル

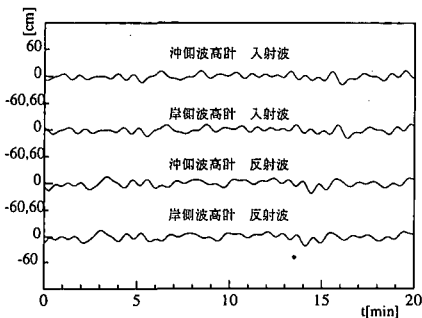


図-10 入・反射水圧波の時間波形

よる入反射分離により調べられているが、List の観測例では  $K_r > 1$ 、佐藤らは  $K_r < 1$  と報告しており、結果は分離法のほかにも観測点の水深、海底勾配、入射波の方向や波群性など多くのパラメーターに依存するので、ここで得た  $K_r > 1$  というのは長周期波の一般的な反射率を示すものではない。

岸向き成分の位相速度は沖向きのそれと比べていくぶん遅く現れることから、岸向きの全ての長周期成分を拘束長波とみなし、ピーク周波数を用いて求めた群速度  $C_g$  から岸向き成分波の位相速度を与えて、FFT 法により分離してみた。その結果、図-9 に比べて長周期波の高周波数側で反射波の比率がいくぶん小さく現れるものの、低周波数側ではほとんど変化せず、反射率は  $K_r = 1.04$  であった。実際の入射波には拘束波と自由波が混在すると考えられるので、推定値の精度を上げるためには入反射の 2 次成分波も考慮した非線形理論による分離法の検討が必要である。

## 5. 平均水位および残差流の変化

図-11 は、岸側波高計のデータから潮汐成分および波浪成分を取り除き、さらに気圧補正を行って求めた平均水位変動量  $\eta_{\text{mean}}$  および残差流の流速  $V_x$ 、 $V_y$  の変化を表したものである。潮汐成分の除去には、12.5 時間および 25 時間の移動平均を行った。図中には、図-3 で示した沿岸および岸沖方向の風速成分  $W_x$ 、 $W_y$  と、気圧変化を静的な水位上昇分に換算した値  $\eta_p$  を合わせて示しているが、これらについても 25 時間移動平均を行って平滑化してある。佐藤 (1995) の日本海の観測データによると、平均水位の変化は  $\eta_p$  と似た変動を示しているが、今回の観測では両者の対応はあまりはっきりしておらず、特に 10 月 2 日～8 日にかけての大きな水位上昇は、気圧変化と対応していない。沿岸方向の残差流については、2 度の台風来襲時に最大で 20 cm/s 程度の強い流れがみられるが、これらの流れの向きは反対であり、波向きとの関連性もみられない。沿岸方向残差流の変動パターンはむしろ沿岸方向の風とよく似ている。また岸沖方向の風は、沿岸方向が東向きするとき沖向きに、西向きするとき岸向きとなる場合がほとんどなので、沿岸方向の風によるエクマン輸送と岸沖方向の風によって岸沖方向に水位の勾配が生じ、その圧力勾配に見合うコリオリ力が生じるように沿岸方向の傾斜流が形成されているとみるべきであろう (佐藤, 1995; 宇野木, 1993)。平均水位の変動も、このような風の作用が大きく現われていると考えられ、10 月 2 日～8 日における大きな水位上昇がある程度説明できる。一方、岸沖方向の残差流は沿岸方向に比べると小さく、岸向きの恒流成分が相対的に大きくなっている。流れの変動パターンは沿岸方向の流れほど明確に

波を上回っている。一方、図-10 の分離後の時間波形から岸・沖それぞれの方向の平均的な位相速度を求めると、岸向きは 10.6 m/s、沖向きは 10.9 m/s であり、長周期波の平均的な位相速度は沖向きがいくぶん速くなる傾向がみられる。反射率  $K_r$  が 1 より大きくなるのは、観測点背後の砕波帯において長周期波が増幅することと、沖へ出ていく位相速度のより大きい成分波を自由長波とみなすと、水深変化に対する波高変化率 (水深比の 1/4 乗に比例) が拘束波の波高変化率 (水深比の 5/2 乗に比例) に比べて数段ゆるやかなことに起因すると考えられる。砕波帯外での長周期波の反射率  $K_r$  については、List (1986) および佐藤ら (1996) によっても線形長波理論に

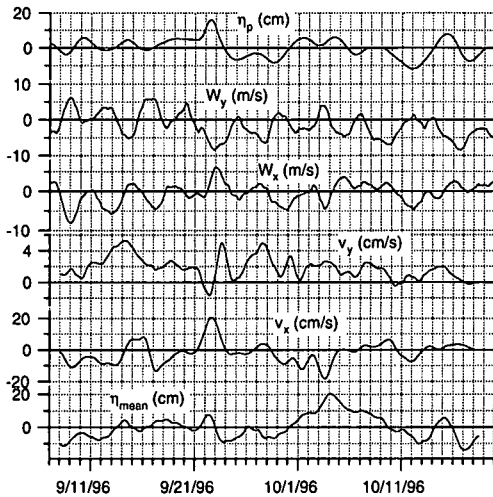


図-11 平均水面および残差流の経時変化

は風と対応づけられないが、風速変動と似た変動を示しており、やはり風の影響が大きいことがわかる。

## 6. あとがき

本研究では、台風が沖合いを通過する際に長周期波がどのように増幅・減衰し、また海岸での岸沖方向の伝播特性がどのようなになっているかについて、赤羽根漁港沖での現地観測データを元に考察した。得られた知見は以下の通りである。(1) 台風の接近に伴い、周期2~4分程度の長周期波成分が特に増幅され、その振幅は有義波高にほぼ比例する。またある程度波高の大きい範囲では波群の影響が現われる。(2) 長周期波の海岸での反射率は1より大きくなり、砕波帯内で増幅した自由長周期波が沖向きに伝播していることが示唆される。(3) 潮汐変動よりも長い周期の水位変動および残差流変動については、砕波帯外では風との相関が高く、傾斜流的な流れ構造が支配的であると予想される。

本研究は、文部省科学研究費基盤研究(B)「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、課題番号:08555129」の一貫として行ったものであり、測定した波浪の生データは、す

べてインターネット上に公開されている (<http://hydromac.tutrp.tut.ac.jp/coconut.html>)。最後に、本研究にご協力いただいた、赤羽根漁協、愛知県、建設省中部地建およびココナッツ研究グループの方々に謝意を表します。

## 参考文献

- 宇野木早苗 (1993): 沿岸の海洋物理学, 東海大学出版会, pp. 260-269.
- 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—長周期波に注目した現地観測—, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 354-358.
- 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊池 治 (1976): 不規則波実験における入・反射波の分離推定法, 港湾技研資料, No. 248, 24 p.
- 佐藤慎司 (1995): 日本海沿岸で観測された流れの特性, 土木学会論文集, No. 521/II-32, pp. 113-122.
- 佐藤慎司・田中茂信・野口賢二・加藤史朗 (1996): うねりによる長周期変動と浮遊砂輸送, 土木学会論文集, No. 551/II-37, pp. 101-111.
- 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.
- 関本恒浩・沼水琢三・窪 泰浩・今井澄雄・島津昌央 (1990): 港湾内外のサーフビートの発生・伝播に関する現地調査, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 86-90.
- 関本恒浩・沼水琢三・鶴飼亮行・坂野雅人・近藤浩右 (1991): 非砕波領域におけるサーフビートの現地観測, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 91-95.
- 田端竹千穂・田所篤博・平石哲也・玉城重則 (1995): 港湾における長周期波の増幅現象に関する現地観測, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 301-305.
- 永井紀彦・橋本典明・沼水勝義・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.
- 橋本典明・永井紀彦・菅原一晃・浅井 正・久高将信 (1992): 波浪の多方向性と弱非線形性を考慮した水圧波から表面波への換算法について, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 171-175.
- 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.
- 山本正昭・菅原輝男 (1979): 銚子漁港長周期波の現地観測, 第26回海岸工学講演会論文集, pp. 134-138.
- List, J. H. (1986): Wave groupiness as a source of near shore long waves, Proc. 20th Int. Conf. on Coastal Engineering, pp. 497-511.