

外洋に面した海岸における長周期波の特性 (茨城県波崎海洋研究施設における現地波浪観測)

LOW FREQUENCY WAVES ON A BEACH FACING OPEN SEA
(FIELD MEASUREMENTS AT HAZAKI OCEANOGRAPHICAL
RESEARCH FACILITY)

瀬戸口喜祥¹・浅野敏之²・中村和夫³

Yoshinaga SETOYUCHI¹, Toshiyuki ASANO², and Kazuo NAKAMURA³

学生会員 工修 鹿児島大学大学院 工学部海洋土木工学科 (〒890-0065 鹿児島市郡元 1-21-40)

正会員 工博 鹿児島大学助教授 工学部海洋土木工学科

正会員 鹿児島大学技官 工学部海洋土木工学科

Field measurements were conducted using specially developed wave measuring devices at Hazaki coast in Ibaraki Prefecture. Based on the data, characteristics of infra-gravity waves have been studied. Infra-gravity oscillation becomes dominant in offshore side of secondary breaking point. The low frequency wave components around $f=0.02\sim0.05\text{Hz}$ are found to be in good correlation with the envelop of incident group waves. The lower frequency wave component of $f\leq 0.01\text{Hz}$, however, does not show clear relation with the incident group waves. The existence of standing edge waves is suggested by the analyzed coherence and phase results on horizontal velocity components. Most of these results show typical characteristics as the dissipative beach which Wright-Short have classified.

Keywords : Infra-gravity waves, group waves, field measurements, edge waves, nearshore currents, beach morphology

1. はじめに

我が国の海岸工学研究は、室内実験あるいは数値計算によるものが多数を占めており、現地観測による研究は多くの労力・経費を要することからも少数に止まっている。現地波浪にはさまざまな力学要因が介在し、現象のスケール間での干渉や、地形や気象条件との干渉機構が存在する。しかし、理想的な状態に制御された室内実験や、研究者の概念的な理解を再確認するに過ぎない数値実験をいくら積み上げても、現地で生起する波と流れのダイナミズムを理解することにならない可能性がある。このような認識から、現地波浪観測を重要視する趨勢が広がりつつある。

波浪観測栈橋は、高波浪時でも安定して定常観測がで

き、現地観測にはきわめて有用な施設である。しかし、得られる波浪データはその海域の地形・波候に対する個別的なデータである。著者らは、観測栈橋のない海域でも波浪データが測得できる可搬式波高流速計を開発し¹⁾、それを用いて鹿児島県吹上浜における現地波浪の特性を検討した²⁾。この可搬式の装置によれば、観測地点や時期を問わず波浪データが測定できるので、さまざまな海岸の地形特性・気象特性と発生波浪の特性との関係を調べることができる。

Wright-Short³⁾によれば、海岸は逸散型海岸と反射型海岸を両極とする Type-1~6 の6段階に分類される。前者は海底勾配 1/100 程度の遠浅海岸であり、崩れ波砕波で多段バーを形成し、100~200 s の infra-gravity wave が卓越する。後者は勾配 1/10 程度の急勾配海岸で、波は

砕波せずに前浜に達し、入射波とその2倍の周期を持つ sub-harmonic wave が顕著なエネルギーピークを有する。

本研究では、運輸省港湾研究所の波崎海洋研究施設に、研究室で開発した可搬式波高流速計を持ち込み、鹿島灘という外洋に面する海岸の波浪特性を調べることを目的とした。また、波崎観測栈橋に配置された超音波式波高計のデータと組み合わせ、多点のデータから現地の空間的な波浪特性を解明することを目的とした。

2. 現地観測の概要

(1) 観測方法

現地観測は1998年9月12日～14日にかけて茨城県波崎町にある運輸省波崎海洋研究施設で行われた。この観測は、全国の多数の大学・研究所が観測装置を持ち寄った合同観測プロジェクトの一環である。観測は本研究室で開発した可搬式海底設置型波高・流速計(MDAS)¹⁾を4台、汀線に平行に30m間隔で設置した(図-1)。現地の縦断地形を図-2に示す。測定時間は、ダイバーの作業時間・内蔵したメモリーカードの容量(4MB)・潮汐の関係などから決まる。CH.1においては38時間、他は15時間の水位変動 η ・岸沖・沿岸方向流速 u, v をサンプリング周波数4Hzで測定した。ただし、CH.2においてはメモリーカードの故障から前半9時間のデータのみを取り出すに止まった。解析はMDASの記録に加

え、隣接する波崎観測栈橋に図-2のように配置された10台の空中発射型超音波式波高計(以下AEUWGと略記)のデータも解析し、周辺海域の平面的な波浪場の特性を調べた。AEUWGのサンプリング周波数は20Hzで行った。

(2) 観測中の現地波浪と流れの概要

観測期間を通して、来襲波は観測栈橋の320m付近で砕波し次いで80m付近で2次砕波する。また沖波有義波周期は約8sであった。図-3は9月12日19時04分から10分間にAEUWGで観測された $\eta(t)$ の時系列と、数値ローパスフィルターで抽出した周期20s以上の長周期成分を示したものである。両者の波形から set-down 波の存在が明瞭に見て取れる。これについては後述の図-10により明瞭な形で図示する。

図-4は9月13日19時から2時間にわたってMDASの電磁流速計で観測されたデータを基に作成した平面流速ベクトル図である。波高測定値と異なり、水粒子速度は平面的な位置のみならず、鉛直位置の関数でもある。電磁流速計のセンサーはCH.1で底面から35.5cm、CH.2で底面から28.5cm、CH.3で底面から45.5cm、CH.9で底面から77.0cmとなっている。観測海域でCH.9からCH.2に向かって沿岸方向に北向きの流れが存在し、CH.1で沖向きの流れとなっている。

潮位変動とともにMDASの電磁流速計の流速測定位置は上下することになる。図-5は、満潮から干潮への

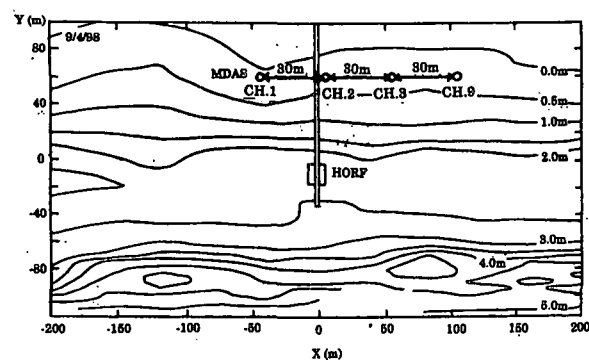


図-1 観測地点の平面図

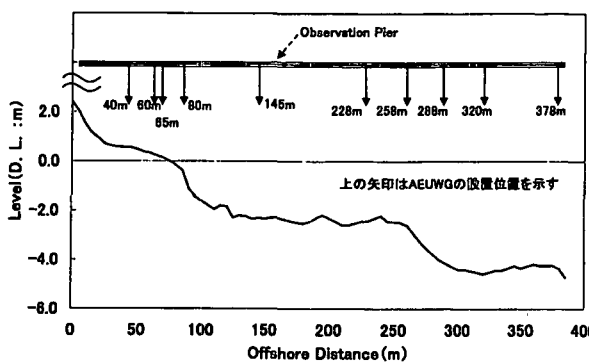


図-2 観測地点の海底地形断面図

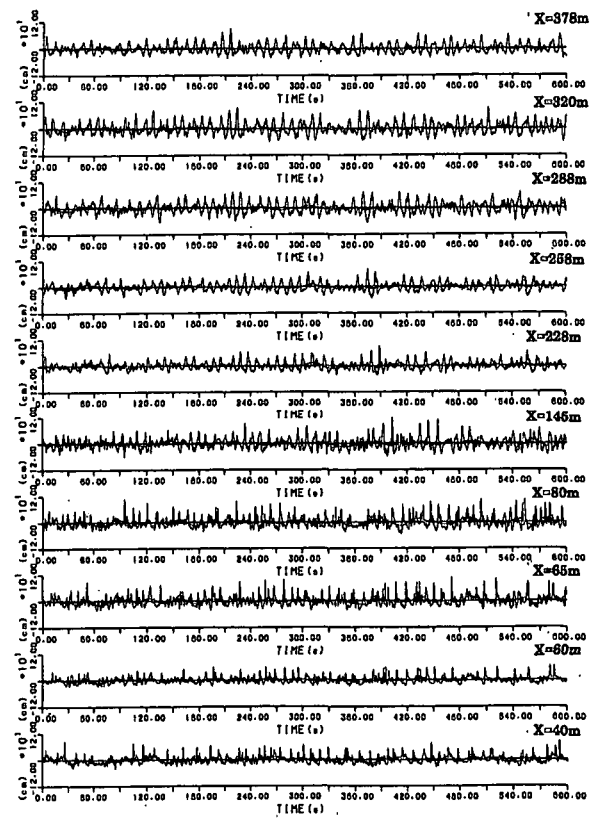


図-3 観測データの時系列

1998. 9. 13 (満潮時)

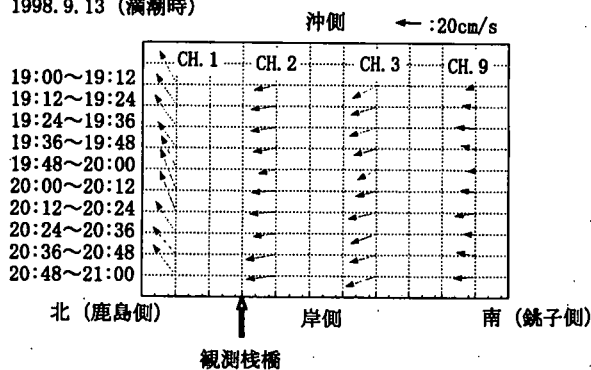


図-4 流速ベクトル図

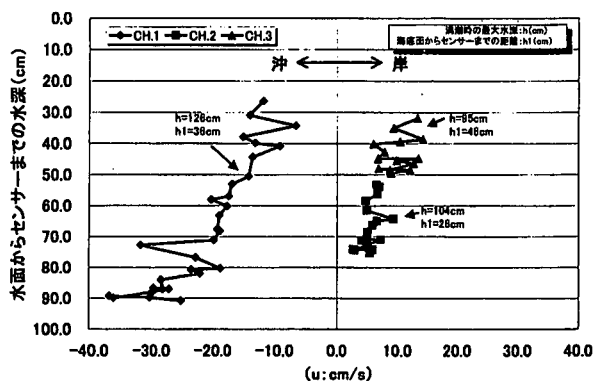


図-5 岸沖方向流速 u の鉛直分布

下げ潮時（電磁流速計のセンサーが水面から露出する）において、720s（12分）ごとの岸沖方向流速の平均値を求め、横軸にその値を、縦軸に水深をとって示したものである。CH.9は電磁流速計のセンサーが水面から露出した期間が長いので、図中には表示しなかった。CH.3は満潮時には比較的中層の流速を観測しており、CH.1では満潮時に比較的低層の流速を観測していたことになる。図-5中の各点はそれぞれ測定時間が異なるが、時間的に流速特性が異ならないと仮定すると、岸沖方向流速の鉛直分布を示していることになる。CH.1では他の測点とは異なり、全観測期間で沖向きの流れが得られている。この地点では、干潮へ向かう下げ潮の期間で、水面に向かうにつれ沖向きの流れが弱くなっていくことが

認められる。一方、CH.1とCH.3では底層でも戻り流れに相当する沖向きの流れは測定されなかった。図-4と図-5から、現地観測を行った海域ではCH.1付近に離岸流が形成されていることがわかる。

3. 解析と考察

(1) 長周期波の岸沖方向でのエネルギー特性

図-6は9月12日の満潮時にあたる19時04分から1時間のAEUWGのデータをFFT法で計算したスペクトル図である。周期約10sのところに風波の卓越周期があり、それより低周波数側でも幾つかの卓越周期が見取れる。

図-6の結果を基に $0.05\text{Hz} \leq f \leq 0.1\text{Hz}$ 、 $0.033\text{Hz} \leq f \leq 0.05\text{Hz}$ 、 $0.02\text{Hz} \leq f \leq 0.033\text{Hz}$ 、 $0.01\text{Hz} \leq f \leq 0.02\text{Hz}$ 、 $0.005\text{Hz} \leq f \leq 0.01\text{Hz}$ の各周波数帯でスペクトルの平均値を算出し、 $0.05\text{Hz} \leq f \leq 0.1\text{Hz}$ の平均値を1として、それに対する割合を示したのが図-7である。岸に近づくにつれて、エネルギー全体に占める低周波数側のエネルギーの割合が増大している。2次砕波が生じる $x=80\text{m}$ の地点より岸側では $0.02\text{Hz} \leq f \leq 0.033\text{Hz}$ の長周期成分の割合が大きくなり、 $x=60\text{m}$ においては風波のエネルギーを上回るようになることが注目される。しかし、この周波数帯のエネルギーはさらに岸側では減少し、より長い周波数成分が卓越する。最も汀線よりの $x=40\text{m}$ 地点では $0.005\text{Hz} \leq f \leq 0.01\text{Hz}$ の成分が風波のエネルギーより大きくなる。いずれにせよ、汀線近くでは周期が50s以上のinfra-gravity waveが卓越することがわかる。このことはWright-Short³⁾による散逸の海岸(Type-1)、あるいはこれに近い中間型の海岸(Intermediate Beach, Type-2)の特性と一致している。

(2) スペクトルとフェイズの特性

図-8は9月12日の満潮時にあたる18時から2時間のMDAS(CH.1)の水位 η と岸沖方向流速 u のデータからFFT法で計算したスペクトル図である。水位 η のパワースペクトルは図-6と同様な結果となっている。比較的岸に近いこの位置で岸沖方向流速 u の長周期成分

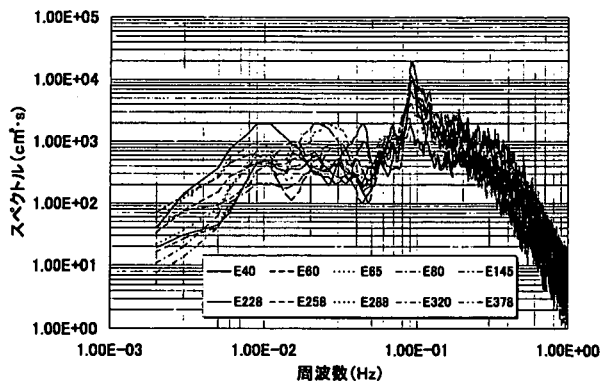


図-6 水位のパワースペクトル (AEUWG)

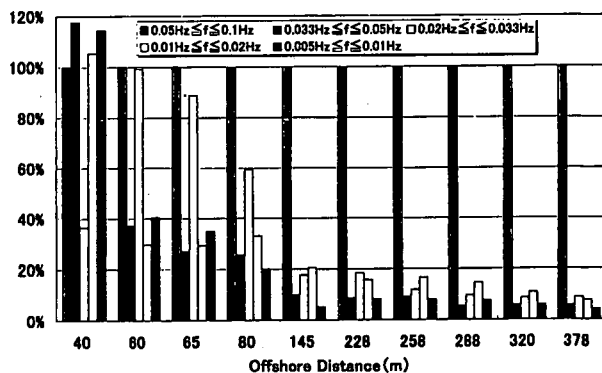


図-7 $0.05\text{Hz} \leq f \leq 0.1\text{Hz}$ のエネルギーに対する割合

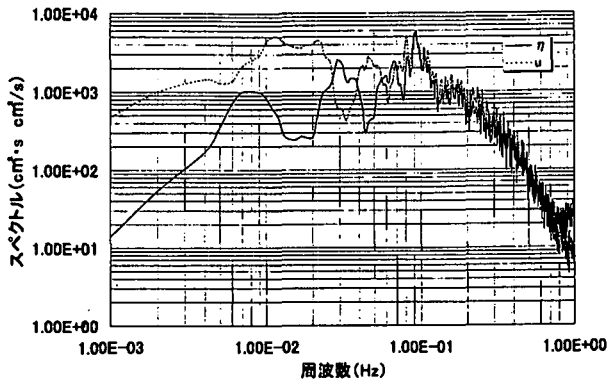


図-8 水位 η と岸沖方向流速 u のパワースペクトル (MDAS : CH.1)

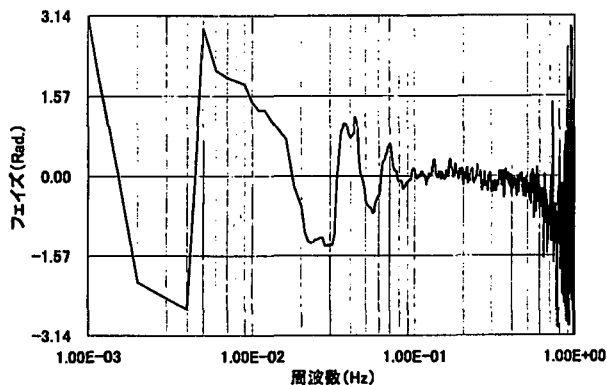


図-9 η と u のフェイズ (MDAS : CH.1)

のエネルギーが風波のエネルギーに比べ大きい結果となった。Wright-Short³⁾が行った散逸的海岸での現地観測によると、岸に近づくにつれて長周期成分の岸沖方向流速のエネルギーが強くなる結果が得られている。水位 η と流速 u を比較すると風波の周波数領域では両者の大きさはほぼ同じであるが、低周波数側で水位 η が大きくなっている周波数帯 ($f=0.03\text{Hz}$ 付近) では流速 u は小さく、流速 u が大きい周波数帯 ($f=0.015\text{Hz}$ 付近) では水位 η が小さくなっている。水位 η と流速 u のフェイズ (図-9) を見ると、周波数 $f=0.03\text{Hz}$ 付近で $-\pi/2$ 位相がずれている。このことは、 $f=0.03\text{Hz}$ の成分波が重複波の腹となる位置の近くに MDAS (CH.1) が配置されていたと考えられる。

(3) 波群と長周期波の関係

図-6 と同じデータを用いて、波群指標である GF (Groupiness Factor) を 720s ずつ区切って計算した (図-10)。図より、当初予想した波群拘束の解放とともに GF が急減する結果は見られず、岸に近づくにつれ GF の値はほぼ線形的に減少する結果となった。

図-11 は図-6 と同じデータを基に数値ローパスフィルターで抽出した周期 20s 以上の長周期成分波 $\eta_L(t)$ と GF を計算する際に算出される波群の包絡波形を表す SIWEH 波形 (波のエネルギー平滑値の時間変化) $E^*(t)$ の時系列を比較した図である。図中の破線で示した記録

をたどると、碎波帯内では両者が異符号となり明瞭に対応しているのがわかる。しかし、2次碎波後の $x=65\text{m}$ より岸側では対応関係が薄れてくる。このことから、数値ローパスフィルターで抽出された周期 20s 以上の長周期成分波 $\eta_L(t)$ は碎波帯内では波群による拘束波として伝搬し、2次碎波後は波群拘束が解かれ自由波となって

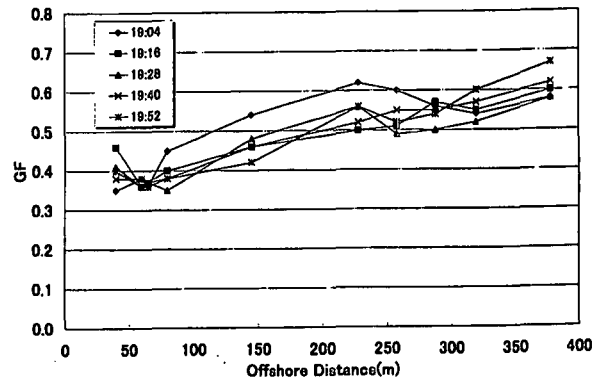


図-10 GF (Groupiness Factor)

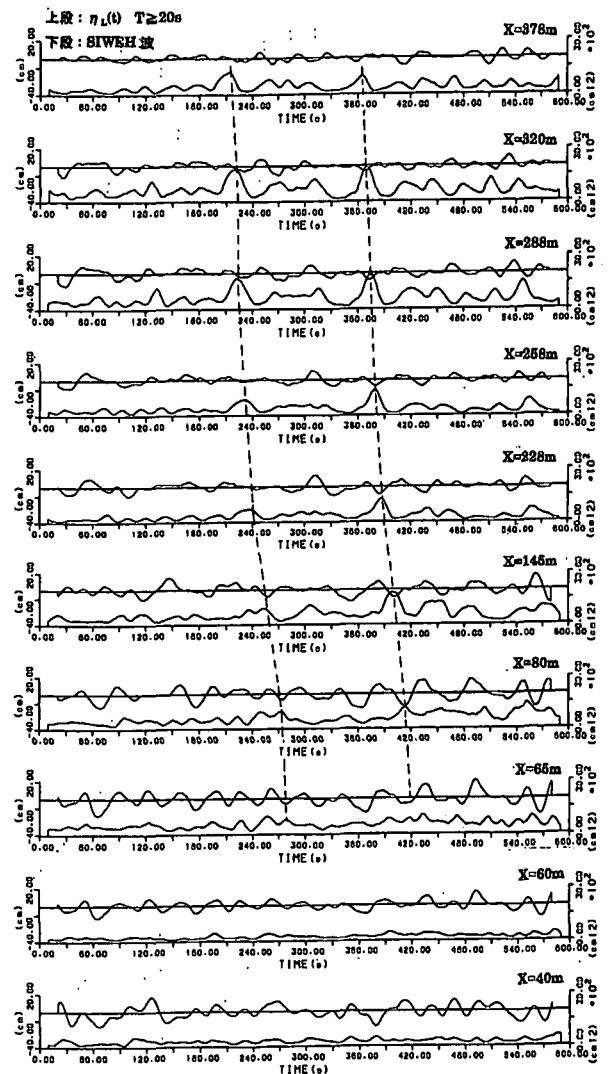


図-11 $\eta_L(t)$ と $E^*(t)$ の時系列

伝搬したと考えられる。

(4) 入射波と長周期波の関係

水位 η の RMS 値と数値ローパスフィルターを用いて $f \leq 0.05\text{Hz}$ 、 $f \leq 0.033\text{Hz}$ 、 $f \leq 0.02\text{Hz}$ 、 $f \leq 0.01\text{Hz}$ でそれぞれ抽出した波形 η_L の RMS 値の相関を図-12 に示す。水位 η の RMS 値と長周期波の水位変動の RMS 値 $\eta_{L, \text{RMS}}$ とは一般に良い相関があるが、周波数 $f \leq 0.01\text{Hz}$ の長い長周期波成分に限ると両者はあまり相関がない結果となった。

図-12 で示した η と各周波数帯の η_L の RMS 値の空間分布を示したものが図-13 である。 $f \leq 0.033\text{Hz}$ で長周期波を抽出すると $\eta_{L, \text{RMS}}$ は η_{RMS} と同様な空間分布を示すが、 $f \leq 0.02\text{Hz}$ に長周期波を限定すると入射波全体の η_{RMS} とは異なる岸沖方向に一樣に近い分布となった。これより、 $f=0.02\text{Hz}$ 付近を境として異なった特性をもつ長周期波が来襲していたと考えられ、 $f \geq 0.02\text{Hz}$ の長周期波については入射波と相関があるといえる。

(5) エッジ波

9 月 13 日の満潮時にあたる 19 時から 2 時間の MDAS (CH.1) のデータを用いてエッジ波について考察した。図-14 は水位 η 、岸沖方向流速 u 、沿岸方向流速 v のパワースペクトルを示したものである。 η 、 u に関しては図-8 と同様な結果となった。また v に関して

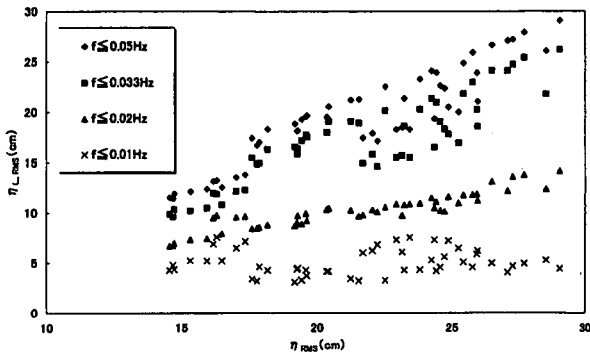


図-12 η と η_L の RMS 値の相関図

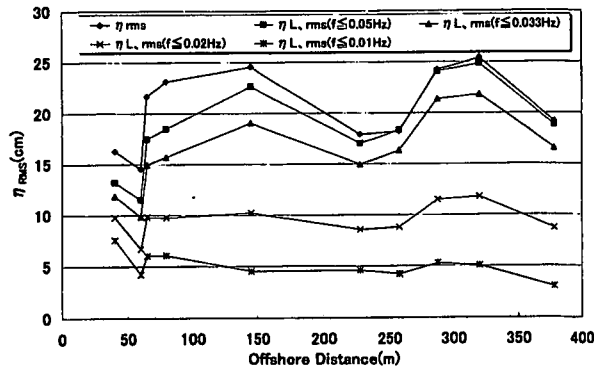


図-13 η と η_L の RMS 値の空間分布

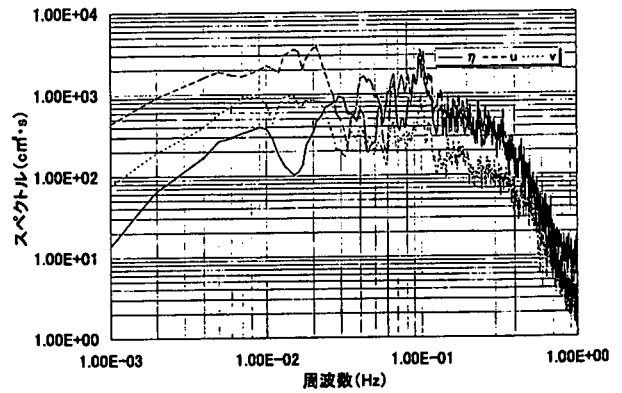


図-14 η 、 u 、 v のパワースペクトル (MDAS : CH.1)

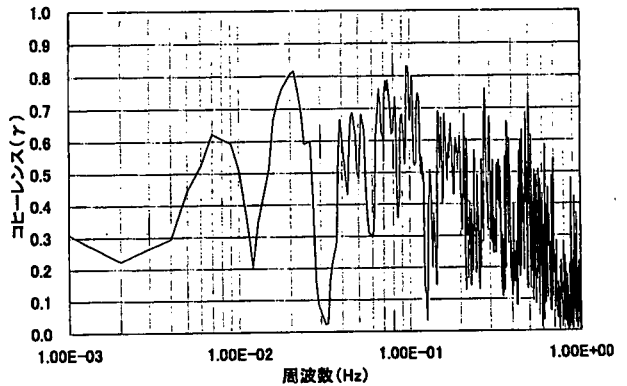


図-15 u と v のコヒーレンス (MDAS : CH.1)

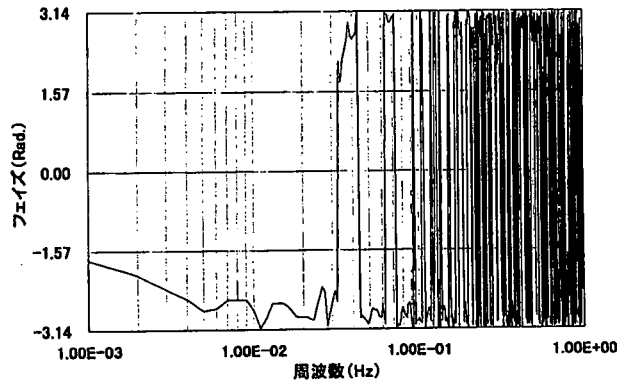


図-16 u と v のフェイズ (MDAS : CH.1)

も周期約 10s のところに風波の卓越周期があり、低周波数側にもそれぞれ幾つかの卓越周期が見られた。特に、周期 50s 以上のエネルギーの卓越している周波数領域では風波の卓越周期よりエネルギーが大きくなっている。

岸沖方向流速 u と沿岸方向流速 v のコヒーレンスとフェイズをそれぞれ図-15、図-16 に示した。エッジ波には沿岸方向に進行するものと、沿岸方向に standing モードになる重複エッジ波がある。岸沖方向流速 u と沿岸方向流速 v の位相関係は、進行エッジ波の場合 $\pi/2$ または $3\pi/2$ であり、重複エッジ波の場合 0 または π となる。図-14 のコヒーレンスの高い領域と図-16 のフェイズ

を比較してみると、周波数 $f=0.02\text{Hz}$ 付近や周波数 $f=0.007\sim 0.009\text{Hz}$ あたりでコヒーレンスが高く、位相差が π という結果となっている。図-14 のスペクトルは、これらの領域ではエネルギーが高い値を示している。以上のことから重複エッジ波の特性が示されており、エッジ波の存在が示唆される。

加藤⁴⁾は現地観測によってエッジ波の存在と特徴を明らかにしている。それによると、岸沖方向流速 u と沿岸方向流速 v の位相関係だけでなく、エッジ波の各モードの限界周波数に対応したエネルギーピークの有無や、沖方向に向かってエッジ波と思われる周波数領域が沖に向かって減衰するかどうか、また経験的固有関数による解析や、カस्पや三日月沿岸砂州などの地形特性の検討等が必要とされる。現地にエッジ波が存在していたことをより明確に判定するには、今後さらなる検討が必要と考えられる。

4. まとめ

波崎海洋研究施設の周辺海岸で現地観測を行い、長周期波の特性について検討した。主要な結論は以下の通りである。

(1) 岸に近づくにつれ長周期成分のエネルギーの波全体に占める割合が大きくなった。特に、周期 50s 以上の *infra-gravity wave* が 2 次砕波点より岸側で卓越することがわかった。

(2) 2 次砕波点より沖側では周期 20s 以上の長周期波成分は波群の包絡波形と明瞭に対応し、2 次砕波点より岸側では自由波となって伝播することがわかった。

(3) $f \leq 0.01\text{Hz}$ の長い長周期波成分は入射波の波群と相関を持たない。したがって、周期 50s 付近と周期 100s 以上では異なる特性をもつ長周期波が来襲していたと考えられる。

(5) 水平流速成分 u, v のフェイズから重複エッジ波が存在する可能性が示唆された。

現地観測を行った海岸は、時折離岸流を伴う強い海浜流の存在する海岸である。海底勾配も比較的緩やかで、バー・トラフが発達している。こうした現地の地形条件と今回得られた結論は、Wright-Short³⁾が分類した散逸

的海岸(Type-1)、あるいは中間型の海岸 (Intermediate Beach, Type-2) の特性と一致していることから、この海岸は散逸的海岸に近い中間型の海岸であるといえる。

今後は、これまで行った鹿児島県吹上浜等の現地観測結果との比較を行いたい。さらに、吹上浜や波崎のような遠浅海岸とは違った急深海岸で現地観測を行い、発生する長周期波の特性を比較検討したい。本研究室で開発した機動性に富んだ可搬式の観測機器 (MDAS) を使うことで、観測地点の地形特性・気象条件に支配される普遍的な現地波浪の特性を解明することが今後の研究課題である。

謝辞：現地観測を行うにあたって運輸省港湾技術研究所の波崎海洋研究施設の方々には施設の使用・観測データの提供などでたいへんお世話になった。また、(株)エコーの上堂園孝一氏ならびに本研究室のメンバーには現地観測・データ解析などご協力頂いた。ここに感謝の意を表します。また本研究を実施するにあたっては、(財)米盛誠心育成会研究助成金の援助を得たことを付記し、謝意を表します。

参考文献

- 1) 瀬戸口喜祥, 浅野敏之, 西隆一郎, 佐藤道郎, 中村和夫, 神田信之: 観測桟橋のない海域で現地観測を可能とする可搬式多点計測システムの開発, 海岸工学論文集, 第 44 巻, pp. 1296-1300, 1997.
- 2) 瀬戸口喜祥, 浅野敏之, 中村和夫, 西隆一郎, 佐藤道郎: 現地観測で得られた浅海域の長周期波の特性, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp. 296-300, 1998.
- 3) Wright, L. D., Short, A. D.: Morphodynamics of beaches and surf zones in Australia, Handbook of Coastal Processes and Erosion, CRC Press, pp.35-64, 1983.
- 4) 加藤一正: 漂砂と海浜地形変化に及ぼす長周期波の影響に関する研究: 港湾技研資料, No.713, 121p. 1991.

(1999. 4. 19 受付)