

現地観測で得られた浅海域の長周期波の特性

瀬戸口喜祥*・浅野敏之**・中村和夫***
西 隆一郎****・佐藤道郎*****

1. はじめに

最近浅海域での長周期波について大きな関心が寄せられている(最近の研究レビューについては、例えば、水口; 1994, 合田; 1995)。この課題は、数値シミュレーションを補助的手段とすることはあるにせよ、基本的には現地観測を主体とした解明によらざるを得ない。その意味でこの方面の研究の進展には、良質な観測データの蓄積が重要となる。しかし、報告されている観測例は、防波堤前面で測定されているものであったり、大きな地形変化がある場であったりで、長周期波の伝搬過程における特性の変化を純粋に議論できる観測例は少ないのが実状である。

本研究は、水圧式波高計と電磁流速計を組み合わせた可搬式の観測ユニットを 5 台用いて、沿岸方向の一様性が十分に確保できる海域で、多点同時観測を行ったものである。得られた波形記録から長周期波成分を取り出し、反射性・進行波性の区別、地形や風波の波群性との関係、流速との関係等について多角的な検討を行った。

2. 現地観測の概要

(1) 観測システムの概要

本研究室では、平成 7 年度から可搬式多点波浪観測システム (Multi-station Data Acquisition System: 以下 MDAS と呼ぶ) を開発してきた(瀬戸口ら, 1997)。この観測システムは、水圧式波高計と 2 次元電磁流速計からなる観測ユニット (MDAS-Data Logging Unit: 以下 MDAS-DLU と呼ぶ)、ノートパソコンとソフトウェアからなる制御ユニット、MDAS-DLU と制御ユニット間の通信を行う通信分岐ユニットから構成されている。今回は、サンプリング周波数 20 Hz で 2 時間の連続測定を行ったことから、水位 η 、岸沖流速 u 、沿岸流速 v 、それぞれについて 144000 個のデータを収録した。データにはノイズや欠落が認められず、測定器が良好に作動したこ

とが確かめられた。

(2) 観測方法

観測は鹿児島県日置郡吹上町の吹上浜(写真-1・図-1)において行われた。図-2 に示すように MDAS-DLU を 5 台岸沖方向に配置した。1997 年 9 月 11 日 14 時 17 分から 16 時 17 分まで 2 時間のデータを連続して取得した。最高潮位が観測期間の中央である 15 時 17 分になるようにした。この日の潮差は約 1.4 m であったが、2 時



写真-1 観測域全景 (吹上浜: 鹿児島県庁提供)

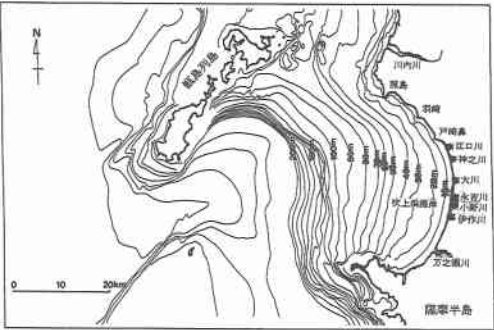


図-1 観測域 (吹上浜)

* 学生会員 工修 鹿児島大学大学院博士後期課程
** 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
**** 正会員 工修 鹿児島大学助手 工学部海洋土木工学科
***** 正会員 工博 鹿児島大学教授 工学部海洋土木工学科

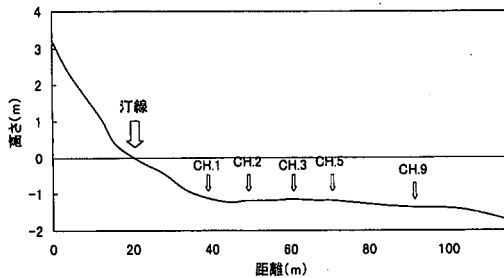


図-2 観測測線の断面図と MDAS-DLU の配置

間の観測期間内での潮位変動は約 6 cm と小さいものであった。観測日当日の天候は晴天で風は微風であり、低気圧の通過などに伴う気圧の変動もなかった。MDAS を配置した範囲における海底断面地形は、図-2 に示すようにパーの発達は認められられず、平坦な地形である。1994 年 3 月に別途測定した音響測深データから、今回の観測点を中心とする岸沖方向 1300 m、沿岸方向 2400 m の範囲では、等深線は汀線にほぼ平行であり、現地は沿岸方向に一様性が高いことがわかった。MDAS の設置水深は、CH.1 で約 1.10 m (満潮時) で、海浜の平均勾配は 38.5 m までは 1/9、それより沖側では 1/200 である。

観測時の有義波高は 0.30 m、有義波周期は 3.6 s であり、観測期間中の波浪特性の有意な変化はみられず、平均的には観測時の入射波浪は CH.1 ないし CH.2 より汀線側で碎波するものがほとんどであった。

3. 解 析

(1) 観測された波浪の特性

全測定時間 120 分間を対象として FFT 法によって水位変動のパワースペクトルを計算した。ただし、FFT は 2 の n 乗個のデータが解析の対象となるので、今回計算した $2^{17}=131072$ データは、正確には 6554 s、約 109 分間のデータを用いることになる。水位のパワースペクトルの結果の一例を図-3a に示す。周波数 $f=0.3\sim 0.4$ Hz 付近に風波の卓越周期が、また $f=0.01$ Hz 付近に長周期波の卓越周期が読みとれる。さらにこの範囲をみると、汀線側の 3 つの観測ユニット CH.1, CH.2, CH.3 ではほぼ同じ大きさのエネルギーとなるのに対し、CH.5, CH.9 と沖の測点に向かうにつれて、長周期波のエネルギーが減少していくことがわかる。長周期波の波高は自由進行波であれば、グリーンの法則より水深の 1/4 乗に比例するので、上記の性質は定性的には妥当である。図一

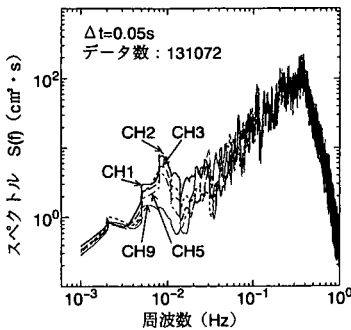


図-3a

水位変動のパワースペクトル

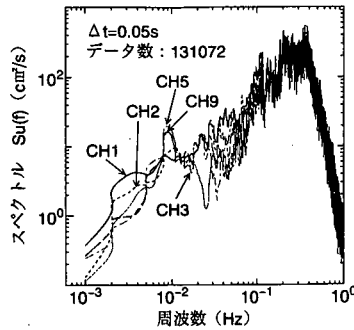


図-3b

岸沖方向流速 u のパワースペクトル

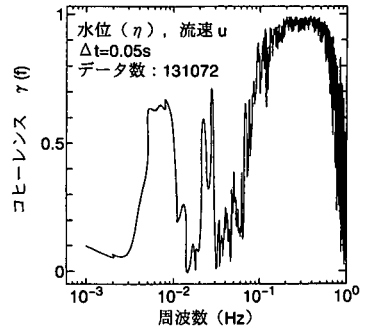


図-4

η と u のコヒーレンス (CH. 5)

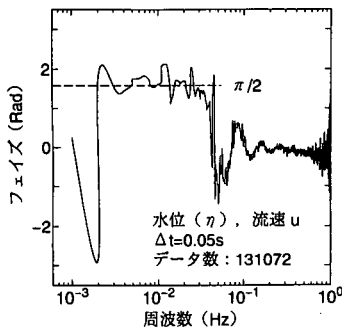


図-5a

η と u のフェイズ (CH.1 汀線側)

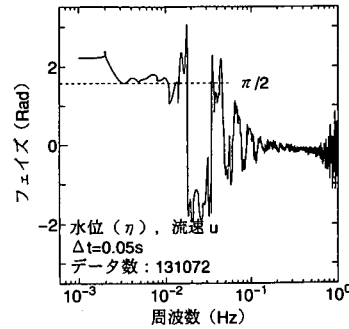


図-5b

η と u のフェイズ (CH. 5)

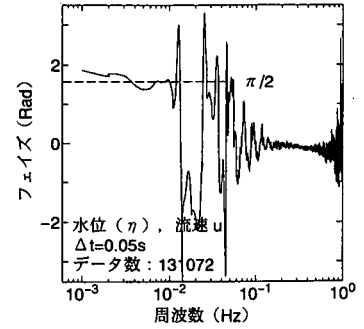
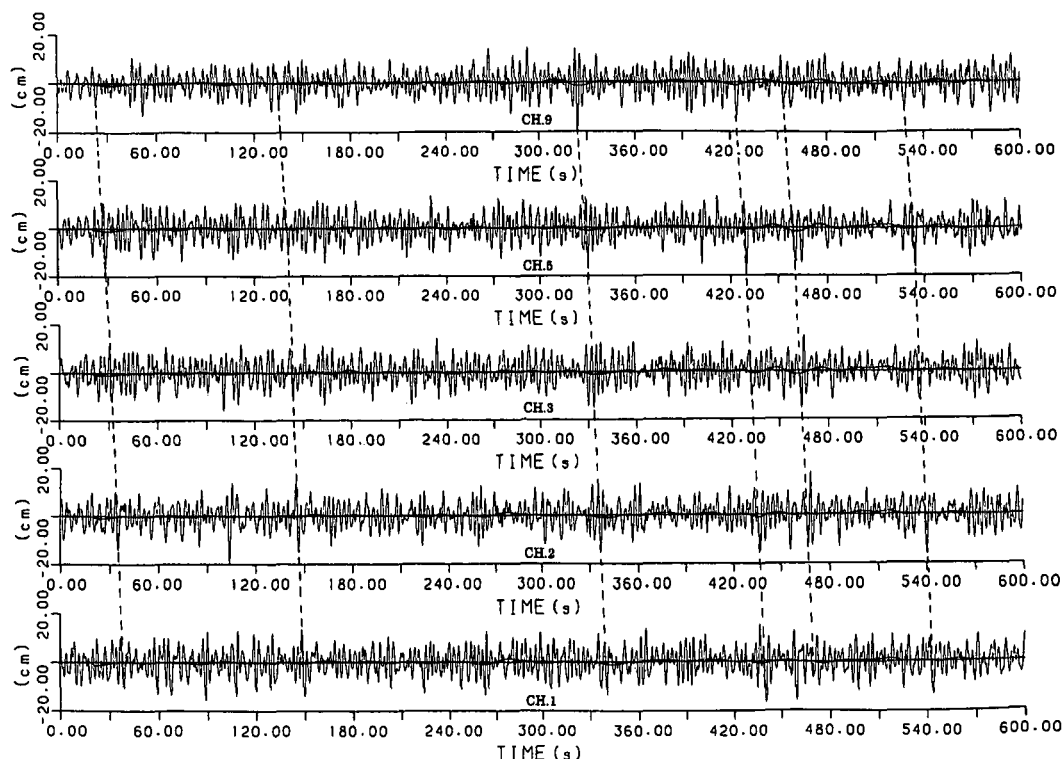


図-5c

η と u のフェイズ (CH. 9: 沖側)

図-6 η_p と η_L の時系列

3b は岸沖方向流速 u のパワースペクトルを示したものである。周波数 $f=0.01$ Hz 付近の大小関係は、水位変動に関する図-3a で示した結果とは逆に、岸近くより沖側のエネルギーの方が大きくなっていることがわかる。測定区間の平均水深 h を $h=1.2$ m とし、周波数 $f=0.01$ Hz の波の波長 L を計算すると、 $L=343$ m となる。この周波数の波が汀線で腹となる長周期波を形成すると、節の位置は $L/4=86$ m となり、CH. 9 の少し沖側に位置することがわかる。すなわち、図-3b の結果は沖側の観測点ほど岸沖方向流速 u が最大となる重複波の節の地点に近づくためと考えることができる。

図-4 は、各測点において水位変動 η と岸沖方向流速 u のコヒーレンスを計算した内の CH. 5 の結果を示したものである。周波数 $f=0.5 \sim 0.1$ Hz (周期 $T=2 \sim 10$ s) でコヒーレンスが 1 に近い値を示すことがわかる。他の測点でも同じような結果となった。また、長周期波成分のエネルギーが集中する $f=0.01$ Hz 付近でどの測点でもコヒーレンスの値が大きくなっていることが読みとれる。以上より、波や水粒子速度のエネルギーが集中するところではコヒーレンスが高く、それ以外のところでは低くなるということが出来る。エネルギーの低い領域では、そこでの運動が波動運動以外の渦や乱れの運動によって構成される割合が大きく、コヒーレンスの低下を

招くものと考えられる。

次に、各測点において水位変動 η と岸沖方向流速 u のフェイズに関して、最も汀線側の CH. 1 (図-5a)、CH. 5 (図-5b)、最も沖側の CH. 9 (図-5c) の結果を示す。周波数 $f=0.1$ Hz 以上の高周波数側でフェイズは 0 に近く、 $f=0.1$ Hz より低周波数側では $-\pi/2$ または $\pi/2$ をとり、さらに $f=0.02$ Hz より低周波数側ではどの測点でもフェイズは $\pi/2$ に近い値をとるようである。こうした領域の波は重複性を示すことがわかる。この $\pi/2$ をとる周波数領域は、最も沖側の CH. 9 の結果では $f=0.015$ Hz より低周波数側であり、他の測点と比べて狭い。5 つの測点での結果を比較すると、汀線に近づく測点ほどこの領域は広がる結果となった。MDAS-DLU の配置は主として砕波帯外の変動を測っており、沖から岸へと伝搬する長周期波は波群拘束波であると考えられる。一方、岸から沖へと反射する長周期波は波群拘束の解けた自由波である。すなわち、フェイズが $\pi/2$ となる周波数領域は、実は特性の異なる長周期波が重合している。より詳細には拘束波入射波と自由波反射波を計算機上で重合させたシミュレーションを行う必要がある。

図-6 は MDAS で測定された圧力変動の生の時系列データ η_p と数値ローパスフィルターで抽出した周期 20 s 以上の長周期波成分の波形 η_L をあわせて示したもの

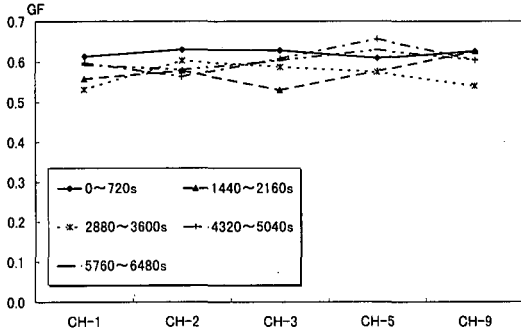


図-7 GF (Groupiness Factor)

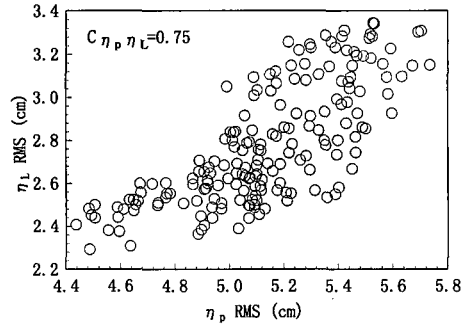


図-9 η_p の RMS 値と η_L の RMS 値の相関図

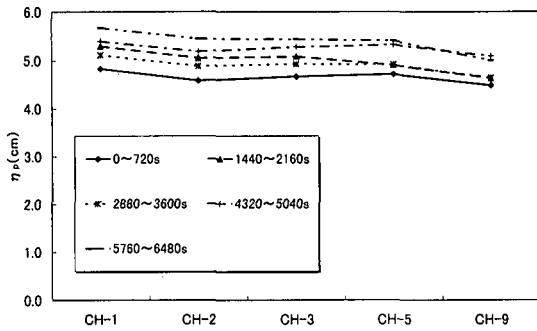


図-8 η_p の RMS 値

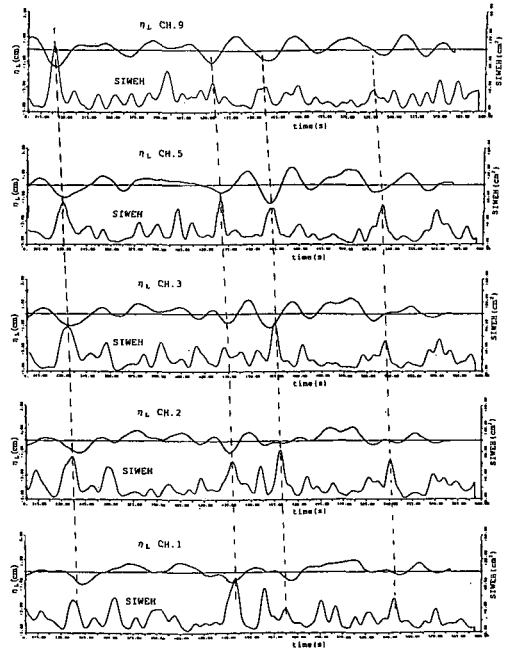


図-10 長周期波成分と SIWEH の時系列

である。図より水位変動の時系列はある程度の波群性を持っており、沖から岸への伝播過程も追跡できる。また波群が大きいところでは、長周期波成分は負となり、radiation stress に起因する set-down 波が明瞭にみとれる。これについては後述の図-10 でより明瞭な形で図示する。図-7 は観測データを 720 s (12 分) ずつ区切ってゆき、波群指標として用いられる GF (Groupiness Factor) をその区間で求めたものである。GF は次式のよう

$$GF = \left[\frac{1}{T_n} \int_0^{T_n} (E^*(t) - \bar{E}^*)^2 dt \right]^{1/2} / \bar{E}^* \quad \cdots (1)$$

$$E^*(t) = \frac{1}{T_p} \int_{-\infty}^{+\infty} \eta^2(t+\tau) Q(\tau) d\tau \quad \cdots (2)$$

$$\bar{E}^* = \frac{1}{T_n} \int_0^{T_n} E^*(t) dt = m_0 = \bar{\eta}^2 \quad \cdots (3)$$

ここで、 T_n は波の記録時間、 η は平均水面からの水位、 T_p は波のスペクトルのピーク周期、 $E^*(t)$ は波のエネルギー平滑値の時間変化 (SIWEH)、 τ はずらし時間、 $Q(\tau)$ はデータ・ウィンドウである。 $Q(\tau)$ は Funke・Mansard (1980) が提案した次式に従って計算した。

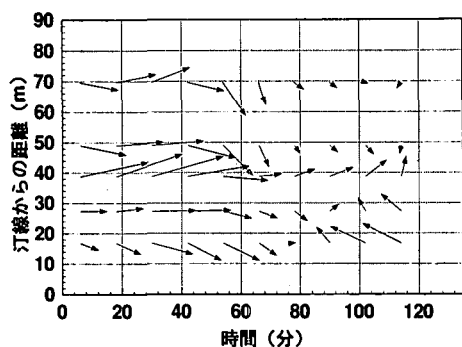
$$Q(\tau) = 1 - (|\tau|/T_p) : |\tau| \leq T_p \\ = 0 : |\tau| > T_p \quad \cdots (4)$$

図より GF の値は約 0.6 で、大きな変化はみられず、観測

中を通して波群性の波が来襲していたことがわかる。また、砕波点より汀線側では一般的に波群構造は崩れるはずであるが、図-7 ではその様子はみられない。これは、CH. 1 より砕波点が汀線側にあったためと思われる。以上のことから、波は小さいものの波群性の波が来襲しており、この波群に拘束された長周期波が存在していたと考えられる。

図-8 は圧力水頭変動 η_p の RMS 値を示したものである。RMS 値は 720 s の評価時間で求めた。 $(\eta_p)_{RMS}$ は汀線に近づくにつれて僅かに大きくなっているが、観測中の値の大きな変化は見られない。

図-9 は η_p の RMS 値と η_L の RMS 値の相関を示したもので、両者の相関係数は 0.75 という高い値が得られた。



流速ベクトル (吹上浜: H9.9.11A)

図-11 海浜流ベクトル

図-10 は (2) 式で示した SIWEH 波形 $E^*(t)$ と図-6 の長周期波の時系列 $\eta_L(t)$ を対比して示したものである。この図から $E^*(t)$ と $\eta_L(t)$ のピークは異符号ながら明確に対応することがわかる。また、図から求めた波群の伝搬速度は搬送波の群速度とほぼ一致する結果となり、来襲した長周期波は波群拘束波であったことがわかる。

(2) 海浜流

ここでは MDAS-DLU の電磁流速計によって計測された岸沖方向および沿岸方向の水粒子速度の特性について述べる。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。電磁流速計プローブは底面から 48.5 cm (CH.1 のみ) ないし 53 cm の高さにあるため、その位置での流速が測定されていることになる。また、現地は潮汐変動が存在するので、流速計の測定結果にはこの影響が含まれている。図-11 は 2 次元流速ベクトル $u(u, v)$ の時間変化を示したもので、測点の岸沖位置を縦軸に、時間を横軸にとっている。ここで u は 720 s 間で平均した値をプロットしている図より、測定地点・測定時間を問わず、岸沖平均流速より沿岸方向流速の方が大きいことが読みとれる。また、測定時間の 90 分頃から汀線近くの測点では、沿岸流の向きがそれまでの向きと逆方向に変化していることが注目される。現地では海底地形の沿岸方向の一様性は十分に保たれており、付近に防波堤などの構造物はないため、この流向の変化は海浜流セルの位置が変わったためではなく、波向きがこの時点で変化したためと考えるべきであろう。観測期間の後半では下げ潮期に入るため、周辺海域の流れ場の変化が、観測領域内の流れ場に影響した可

能性もある。また、沿岸方向流速については MDAS-DLU が碎波帯内にないため、沖で沿岸方向に流れる潮流成分と沿岸流の碎波帯外のみだしを捉えたものと考えられる。また岸沖方向流速には波群に伴う長周期流速変動の寄与も考えられる (佐藤, 1997)。

4. まとめ

本研究では、長周期波を対象とした現地観測データについて多角的な検討を行った。検討結果をまとめると以下になる。

(1) 観測された波は有義波高約 30 cm と小さく、観測中の風も微弱であったが、周波数 0.01 Hz の長周期成分が重疊することが明瞭に測得できた。これは 120 分間の長時間連続観測が可能としたものである。

(2) 観測された長周期波は波群拘束波であり、包絡波の時間波形と set-down 波はきわめて明瞭に対応した。

(3) 水位変動、水平方向流速の長周期波成分の岸沖分布および両者のフェイズの結果から低周波数領域のスペクトルピーク付近の長周期波成分は完全重複波に近い状態にあることがわかった。

(4) 重複波性を示す位相差 $\pi/2$ の周波数領域は岸近くでは広く、沖に向かうにつれ徐々に狭くなった。

(5) 岸沖方向の質量輸送、沿岸流の時間変化に海域の潮流変動が関与した可能性が示唆された。

最後に、本研究の一部は文部省科学研究費 (基盤研究 (A) (2)、研究代表者佐藤道郎) の補助を受けたことを付記し、謝意を表する。

参考文献

- 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, 水工学に関する夏期研修会講義集, B 海岸・港湾コース, 土木学会, B-6-1~B-6-20.
- 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.
- 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 (1997): 観測機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.
- 水口優 (1994): 浅海域の長周期波について, 水工学に関する夏期研修会講義集, B 海岸・港湾コース, 土木学会, B-3-1~B-3-15.
- Funke, E. R. and E. P. D. Mansard (1980): On the synthesis of realistic sea states, Proc. 17 th Coastal Engrg. Conf., ASCE, pp. 2974-2991.