

砕波帯における低周波数成分の観測研究

柿沼忠男*・伊福 誠**・大矢佳一***

1. ま え が き

海岸に来襲する波は遂には碎けて、その組織的運動を消滅すると同時に海岸の地形性によって新たな組織的運動、沿岸流や長周期波のような、を形成しようとする。近年、こうした砕波点から汀線に至る砕波帯における長周期波の存在が、その発生機構が未だ不明にもかかわらず^{1),2)}、漂砂の問題に密接に関連していることが見出されている^{3),4)}。

著者らの前二者も愛媛県の二、三の海岸において流速、圧力変動および浮遊砂濃度の観測を実施して、砕波帯における波・流れや浮遊砂の実態を把握することに努め、流速のパワースペクトルは風波のピーク周波数（周期4~5 s程度）のみならず低周波数領域（周期20~60 s程度）にかなり大きなピークを有し⁵⁾、浮遊砂濃度が断続的に高い値を生じ、その時間間隔が40~60 s程度であるという現象は低周波数領域の流速や風波のピーク周波数付近の流速に関連していること⁶⁾などを得ている。しかし、スペクトル解析は風波の周波数に焦点を合わせたものであり、低周波数成分の分解能はあまり良くない。

こうしたことから、本研究は愛媛県中予海岸と梅津寺海岸における流速、圧力変動の長時間の観測記録に基づいて砕波帯における低周波数成分の特性を把握しようとするものである。

2. 観測資料とデータ解析

(1) 観測資料

愛媛県中予海岸の平均水深1.5 mと6.5 mおよび梅津寺海岸の平均水深1.7 mの地点で、1982年と1984年の冬季節風時に2成分が測定可能な電磁誘導型流速計 MODEL 551 (MARSH McBIRNEY 社製) 2~3台(内1台圧力計 MODEL 205-2, Setra Systems 社製、内蔵)によって流速、圧力変動の記録を得た。

中予海岸： 沖側の平均水深6.5 mの地点 (St. 1) で圧力変動、平均水深1.5 mの地点 (St. 2) で流速、圧

力変動の記録を得た。St. 2において流速計のセンサは海底から62, 102 cmの高さにあり岸沖-鉛直方向、岸沖-沿岸方向流速を測定し、圧力計は76 cmの高さにある。両観測地点付近の海浜勾配は0.01と0.1であった。

梅津寺海岸： 流速計のセンサは海底から30, 45, 75 cmの高さにあり岸沖-鉛直方向、岸沖-沿岸方向、岸沖-沿岸方向流速を測定し、圧力計は49 cmの高さにある。観測地点付近の海浜勾配は0.01であった。

(2) データ解析

流速、圧力変動の長時間の記録をサンプリング間隔1 sでAD変換し、流速、圧力変動の1波ごとの解析はゼロ・アップ・クロス法で行った。

まず、パワースペクトルや方向スペクトルとともに、Moore⁷⁾に基づいて水平2成分の流速から回転スペクトルを算出して回転係数、橢円軸の安定性、水平流速の軌跡を調べた。次に、Guza⁸⁾ほかの方法⁹⁾に若干の修正を加えて圧力変動と岸沖方向流速から岸向き特性量と沖向き特性量を算出し、低周波数成分の反射率を調べた。最後に、流速、圧力変動のバイスペクトルの実部・虚部を柿沼ほか⁹⁾の方法によって算出すると同時にKim-Powersの方法¹⁰⁾によって圧力変動のバイコヒーレンススペクトルを算出して低周波数成分の非線型特性を調べた。

FFT法においてフィルタは力石・光易と桑島・永井の両フィルタ^{11),12)}を修正して用いた。すなわち、フィルタの形は放物線型、

フィルタの半幅 L はスペクトルの抽出間

隔 R の2倍である

(図-1)。以後のスペクトルは計算では

$L=20, R=10$ とした、自由度は66である。

(3) 有義波と砕波の発生頻度

表-1に両海岸で得た有義波高、有義波周期、砕波の発生頻度を示す。有義波高、有義波周期は、中予海岸St. 1, St. 2および梅津寺海岸において、0.23~0.47 m, 5.0~6.5 s; 0.59~0.88 m, 5.0~6.4 s; 0.18~0.55 m, 4.5~6.6 sであり、両海岸とも砕波形式はすべてspilling型であった。

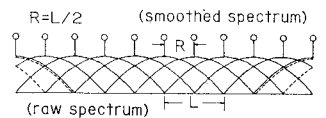


図-1 著者らの提案するフィルタ

* 正会員 工博 愛媛大学教授 工学部海洋工学科

** 正会員 工修 愛媛大学講師 工学部海洋工学科

*** 正会員 工修 若築建設(株) 技術開発部

表-1 有義波と碎波の発生頻度

データ No. () 測点 No.	時 刻	水 深 (m)	有義波		碎波の 発 生 頻 度 (%)
			波高 (m)	周期 (s)	
	18th Jan. 1982				
C82118-L1 ⁽¹⁾ ⁽²⁾	1600~1634	7.0~7.2	0.47	5.5	*
		2.0~2.2	0.76	5.2	21
C82118-L2 ⁽¹⁾ ⁽²⁾	1705~1813	6.6~6.9	0.40	5.2	*
		1.6~1.9	0.73	5.1	22
C82118-L3 ⁽¹⁾ ⁽²⁾	1832~1906	6.2~6.5	0.44	5.0	*
		1.1~1.5	0.70	5.3	20
	19th Jan. 1982				
C82119-L1 ⁽¹⁾ ⁽²⁾	1455~1603	6.7~6.9	0.35	6.0	*
		1.7~1.9	0.67	5.1	23
C82119-L2 ⁽¹⁾ ⁽²⁾	1620~1728	6.9	0.30	5.3	*
		1.9	0.66	5.2	20
C82119-L3 ⁽¹⁾ ⁽²⁾	1750~1858	6.7~6.9	0.23	5.4	*
		1.6~1.9	0.59	5.5	17
	28th Jan. 1982				
C32128-L1 ⁽¹⁾ ⁽²⁾	1028~1136	6.7~6.9	0.26	6.0	*
		1.8~1.9	0.87	5.0	2
C82128-L2 ⁽¹⁾ ⁽²⁾	1140~1248	6.4~6.8	0.27	5.3	*
		1.5~1.8	0.88	5.6	8
C82128-L3 ⁽¹⁾ ⁽²⁾	1305~1413	5.8~6.5	0.39	6.5	*
		0.8~1.5	0.83	6.4	33
	25th Jan. 1984				
B84125-L1	1355~1611	2.3~2.7	0.41	4.5	1
	27th Jan. 1984				
B84127-L1	1600~1742	2.2	0.39	4.5	0.5
B84127-L2	1755~1937	1.9~2.2	0.22	4.9	0.1
	27th Feb. 1984				
B84227-L1	1900~2116	1.5~2.0	0.34	5.1	1
B84227-L2	2135~2351	0.6~2.4	0.22	5.2	4
	2nd March 1984				
B84302-L1	1155~1411	0.9~2.5	0.18	4.8	19
	17th March 1984				
B84317-L1	545~ 801	1.2~3.0	0.40	6.2	19
B84317-L2	840~1056	2.9~3.4	0.55	6.6	5
B34317-L3	1210~1318	1.3~2.0	0.24	6.6	20

(註) *: 非碎波

3. 観測結果

(1) パワースペクトルの経時変化

図-2 は中予海岸におけるパワースペクトルの経時変化の一例を示したもので、(a) は St. 2 における上部、下部岸沖方向流速、(b) は St. 1, 2 における圧力変動である。(a) によれば、岸沖方向のエネルギー密度は上部、下部とも 0.2 Hz 付近で最大であり、0.1 Hz 付近で最小となるがそれより低周波数側では徐々に大きくなり 0.05 Hz より低周波数側ではほぼ一定である。上部は下部より大きく、0.2 Hz 付近および 0.05 Hz より低周波数側では下部の 2 倍程度である。碎波の発生頻度は L1 2%, L2 8%, L3 33% であるが、発生頻度が高いものほど低周波数側のエネルギー密度が大きい。(b) によれば、圧力変動のパワースペクトルは St. 1, 2 とも 0.2 Hz 付近でピークを示す。碎波の発生頻度が低い L1, L2 は 0.05 Hz より低周波数側でエネルギー密度はほぼ一定でピーク値の 1/50~1/20 程度であるが、碎波の

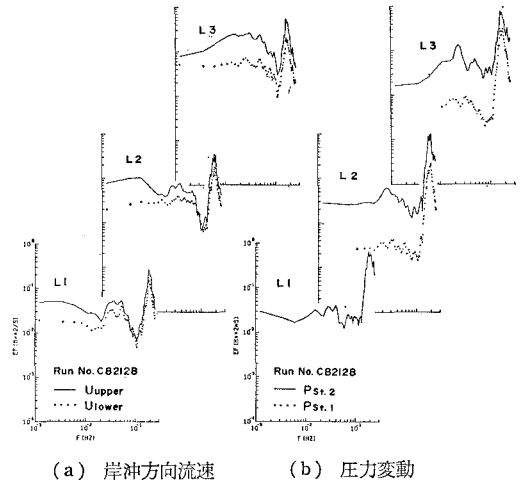


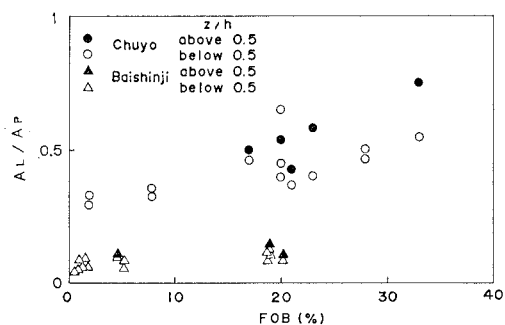
図-2 岸沖方向流速、圧力変動のパワースペクトルの経時変化(中予海岸)

発生頻度が高い L3 は 0.02 Hz 付近でエネルギー密度が増大している。St. 2 における L2, L3 のエネルギー密度のピーク値は St. 1 の 5 倍、3 倍程度である。

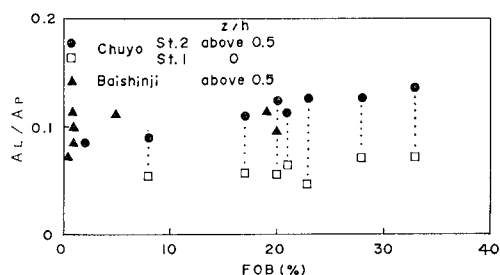
(2) 風波の周波数帯のエネルギーと低周波数帯のエネルギー

図-2 において、碎波の発生頻度が高い資料と低い資料を比較すると岸沖方向流速や圧力変動のエネルギー密度は風波のピーク周波数付近では変化が小さいのに対し、低周波数側の変化は顕著であることを得た。こうしたことから、風波の周波数帯と低周波数帯という二つの領域を設定しそれらのエネルギーについて検討する。風波の周波数帯はエネルギー密度がピーク周波数のその 1/10 以上である周波数帯、低周波数帯は 0.01~0.1 Hz の周波数帯とする。

風波の周波数帯のエネルギー A_F に対する低周波数帯のエネルギー A_L の比 A_L/A_F と碎波の発生頻度との関係を示したのが図-3 であり、(a) は岸沖方向流速、(b) は圧力変動である。図は相対高さ $z/h \geq 0.5$ (z : 海底から各センサまでの高さ、 h : データ取得期間中の平均水深) で区別している。(a) によれば、中予海岸においては碎波の発生頻度が高くなるにつれて A_L/A_F も大きくなり、低周波数帯のエネルギーの占める割合が増大する。この傾向は相対高さが 0.5 以上の場合ほど顕著である。梅津寺海岸においては中予海岸ほど顕著ではないが似た傾向があるようである。(b) によれば、中予海岸の St. 2 において碎波の発生頻度が高くなるにつれて A_L/A_F も増大し、低周波数帯のエネルギーの占める割合が大きくなる。St. 1 での A_L/A_F の値は 0.05~0.07 程度であり低周波数帯のエネルギーは風波の周波数帯に比べて小さいが、碎波帯にある St. 2 での A_L/A_F の値は 0.09~0.14 であり、低周波数帯のエネルギーの占め



(a) 岸沖方向流速



(b) 圧力変動

図—3 風波の周波数帯のエネルギー A_P に対する低周波数帯のエネルギー A_L の比と砕波の発生頻度との関係
FOB: 砕波の発生頻度

る割合は St. 1 よりも大きい。St. 1 での A_L/A_P の値はほぼ同じであるが St. 2 では砕波の発生頻度につれて大きくなることから、低周波数帯のエネルギーの増大は砕波という現象に起因するものではないかと考えられる。

(3) 回転スペクトル

中予海岸の海底から 102 cm の高さで梅津寺海岸の 45 cm の高さにおける岸沖、沿岸方向流速から回転スペクトルと楕円の軌跡を算出した。得た結果は次のようである。

反時計回り、時計回りのスペクトルは風波のピーク周波数である 0.2 Hz 付近でピークが生じ、0.01 Hz より低周波数側では時計回りのエネルギー密度が大きい。風

波のピーク周波数帯付近の水平流速成分の運動は直線に近い。砕波の発生頻度が高くなると、0.02~0.1 Hz 程度の楕円の安定性は良くなる。低周波数成分の水平方向流速の軌跡は砕波の発生頻度が高いほど大きい傾向がある。

中予海岸における水平流速成分の軌跡の一例を 図—4 に示す。風波のピーク周波数である 0.2 Hz では汀線にはほぼ直角方向の運動をしている。0.1 Hz で楕円は最も小さい。0.1 Hz より低周波数側では砕波の発生頻度が高い L3 の長軸が砕波の発生頻度が低い L2 より長い。L2 の 0.01, 0.1 Hz の運動は汀線とほぼ平行であるが、L3 では汀線と直角な方向に近づく。

(4) 特性量から求める反射率と方向スペクトルから求める反射率

特性量から求める方法

岸向き特性量と沖向き特性量: Guza (ほか⁸⁾)は長波が汀線に直角に入射する場合について、一地点における水面変動量と岸沖方向流速から“岸向き特性量”, “沖向き特性量”を算出した。彼等は岸沖方向流速が鉛直方向で一定としているが、ここでは鉛直方向に変わるとして、岸向き特性量 PC と沖向き特性量 MC を

$$PC = \left\{ \eta + \frac{u}{\sigma k(1/k^2 h + z + z^2/2h)} \right\} / 2 \quad \dots(1.1)$$

$$MC = \left\{ \eta - \frac{u}{\sigma k(1/k^2 h + z + z^2/2h)} \right\} / 2 \quad \dots(1.2)$$

で算出する。ここに、 η は水面変動量、 u は岸沖方向流速、 σ は角周波数、 k は波数、 z は静水面からの高さ、 h は水深である。

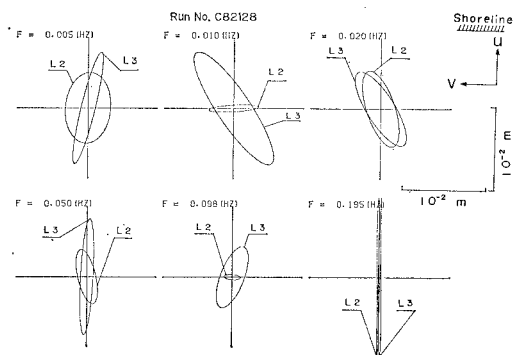
中予海岸の平均水深 1.5 m と梅津寺海岸の平均水深 1.7 m の地点で長波理論が適用できる波の最小周期はほぼ 10 s である。中予海岸と梅津寺海岸の平均水深、圧力計の設置高さをもとに波の周期を 10 s として長波理論に基づき水面変動量と圧力変動量 η_p の関係を調べると、両海岸とも圧力変動量は水面変動量の 0.96 倍程度となり、水面変動量と圧力変動量はほぼ等しい。こうしたことから、式 (1.1), (1.2) 中の水面変動量は両海岸で得た圧力変動量として岸向き特性量と沖向き特性量を算出する。

式 (1.1) と (1.2) で算出した岸向き特性量と沖向き特性量のパワースペクトルを求め、得たエネルギー密度から次式で反射率 K_{RC} を算出する。

$$K_{RC} = \sqrt{\frac{\text{沖向き特性量のエネルギー密度}}{\text{岸向き特性量のエネルギー密度}}} \quad \dots(2.1)$$

方向スペクトルから求める方法¹⁸⁾

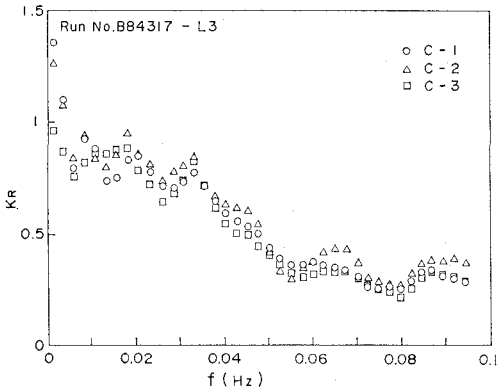
圧力変動と水平方向流速を用いて計算した方向スペクトルの主方向のエネルギー密度とその反射方向のエネルギー密度から次式で反射率 K_{RD} を算出する。



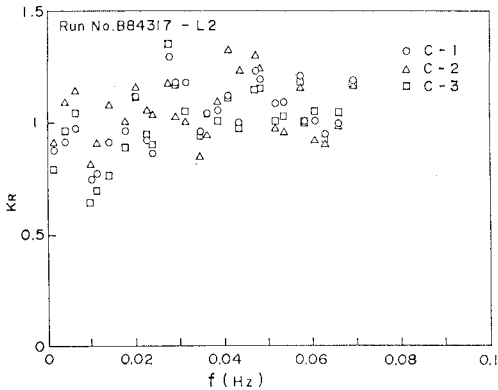
図—4 水平流速の軌跡 (中予海岸)

$$K_{RD} = \sqrt{\frac{\text{反射方向のエネルギー密度}}{\text{主方向のエネルギー密度}}} \dots (2.2)$$

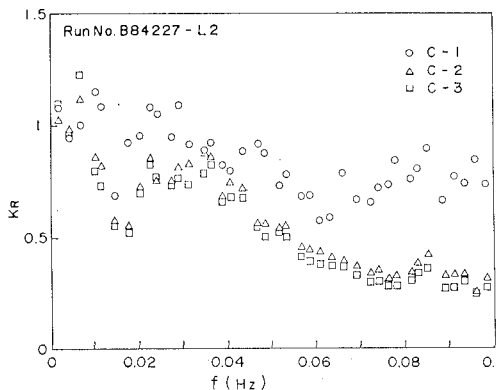
特性量から求めた梅津寺海岸における反射率の代表例を 図-5 に示す。図中の C-1, C-2, C-3 は上部, 中間部, 下部の岸沖方向流速によって求めたものである。砕波の発生頻度が 20% である (a) では三者はほぼ同じ値であり, 周波数が高くなるにつれて反射率は徐々に小さくなっている。発生頻度が 5% の (b) では三者の差



(a) 砕波の発生頻度 20%



(b) 砕波の発生頻度 5%



(c) 砕波の発生頻度 1%

図-5 特性量から求めた反射率

が大きくなり, 1 を境に変動している。発生頻度が 1% の (c) では大抵の場合 C-1 は C-2, C-3 より大きく, 三者とも 0.02 Hz 付近で反射率は一旦小さくなり, それより高周波数側では C-1 はほぼ一定であるが, C-2, C-3 は周波数が高くなるにつれて徐々に小さくなっている。C-2, C-3 のこうした高周波数側における傾向は (a) と同様であり, 値もほぼ同一である。

梅津寺海岸における特性量から求めた反射率 (C-1) と上部の水平方向流速による方向スペクトルから求めた反射率 (D-1) の一例を 図-6 に示す。周波数が高くなるにつれて両反射率は徐々に小さくなる。0.02 Hz 付近では両者の値はほぼ同一であるが, それより高周波数側では方向スペクトルから求めたものは特性量から求めたものの 1.1~1.6 倍程度である。

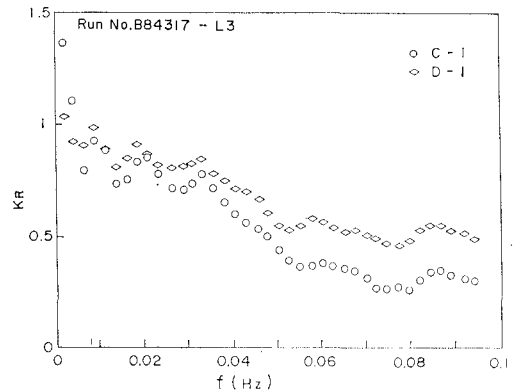


図-6 特性量から求めた反射率と方向スペクトルから求めた反射率

(5) バイコヒーレンススペクトル

図-7 は圧力変動の記録を 4 分割した際の最初の 2048 s から求めたパワースペクトルである。風波のピーク周波数より低周波数側に風波のピーク周波数のエネルギー密度のほぼ 1/20 のエネルギー密度をもつ 4 つのピークが存在する。これらのピークのうち 0.039 Hz と 0.098 Hz に着目し, それらの周波数成分波の非線型干渉の度

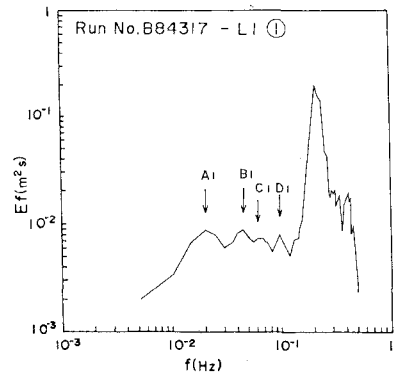


図-7 圧力変動のパワースペクトル

合いをバイコヒーレンス断面を取って調べる。バイコヒーレンススペクトル断面は図-8に示すようにバイコヒーレンススペクトル平面上にある周波数 f_1 に関して I, II, III という3つの断面で構成されるものであり、次式で表わされる領域である。

$$\left. \begin{array}{l} \text{I} \quad f_2 < f_3 < f_1 \\ \text{II} \quad f_2 < f_1 < f_3 \\ \text{III} \quad f_1 < f_2 < f_3 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

f_1 周波数について領域 I は $f_1 = f_2 + f_3$ を満足する和の周波数断面であり、低周波数側からの非線型量の寄与を示す部分、領域 II, III は $f_1 = f_3 - f_2$ を満足する差の周波数断面であり、領域 III は高周波数成分からの非線型量の寄与を示す部分である。

図-9に 0.039 Hz と 0.098 Hz のバイコヒーレンスの値を示す。(a)によれば断面 III のバイコヒーレンスの値は I, II に比べ大きいことから、高周波数側からの寄与が比較的大きい。非線型量はパワースペクトル密度のほぼ 13% を占めている。(b)によればバイコヒーレンスの値は断面 I での 0.03 Hz と 0.07 Hz の干渉(㉔), 0.098 Hz の自己相互の干渉(㉕), 断面 III での 0.02 Hz と 0.03 Hz の干渉(㉖)の位置で比較的大きい。非線型量はパワースペクトル密度のほぼ 12% を占めている。

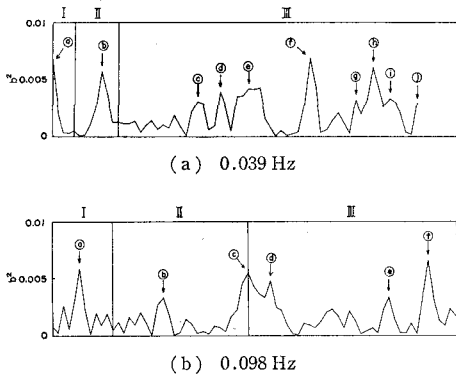


図-9 バイコヒーレンス断面

4. 結 語

以上、著者らは愛媛県中予海岸の非砕波帯、砕波帯と愛媛県梅津寺海岸の砕波帯において流速と圧力変動の観

測を実施して長時間の観測記録を得、砕波帯における低周波数成分のパワースペクトルの特性、回転スペクトル、反射率やバイコヒーレンススペクトルを砕波の発生頻度と関連させながら求めてきた。

しかし、砕波の発生頻度が高くなるにつれてなぜ風波のピーク周波数より低周波数側のエネルギーが増大するのか、反射率が求めた方法によって異なるのか、などがこの研究に要求される今後の課題である。こうした点を少しづつ解決して、現地砕波帯における低周波数成分を調べていきたいと考えている。

なお、本研究における数値計算は愛媛大学情報処理センターの FACOM M-180 IIAD によった。

参 考 文 献

- 1) Fox, M. J. H.: On the nonlinear transfer of energy in the peak of a gravity-wave spectrum—II, Proc. Roy. Soc. London, Series A 348, pp. 467~483, 1976.
- 2) Symonds, S., D. A. Huntley and A. J. Bowen: Two-dimensional surf beat: Long wave generation by a time varying breakpoint, J.G.R., Vol. 87, No. 1, pp. 492~498, 1982.
- 3) Brenninkmeyer, B. M.: Mode and period of sand transport in the surf zone, Proc. 14th Conf. Coastal Eng., pp. 812~827, 1974.
- 4) Wright, L. D., R. T. Guza and A. D. Short: Dynamics of a high-energy dissipative surf zone, Marine Geology, Vol. 45, pp. 41~62, 1982.
- 5) 柿沼忠男・伊福 誠・藤原隆一: 砕波帯における波・流れの観測 (I), 愛媛大学工学部紀要, 第10巻, 第3号, pp. 279~303, 1984.
- 6) 柿沼忠男・伊福 誠・栗原 薫: 砕波帯における浮遊砂濃度に関する二、三の観測例, 第32回海岸工学講演会論文集, pp. 321~325, 1985.
- 7) Moores, N. K.: A technique for the cross spectrum analysis of pairs of complex-valued time series, with emphasis on properties of polarized components and rotational invariants, Deep-Sea Research, Vol. 20, pp. 1129~1141, 1973.
- 8) Guza, R. T., E. B. Thornton and R. A. Holman: Swash on steep shallow beaches, Proc. 19th Conf. Coastal Eng., pp. 708~723, 1984.
- 9) 柿沼忠男・石田 昭・門司剛至: 記録にもとづく海岸波浪の非線型性の解析, 第15回海岸工学講演会講演集, pp. 73~79, 1968.
- 10) Kim, Y. C. and E. J. Powers: Digital bispectral analysis and its applications to nonlinear wave interactions, IEEE Trans. Plasma Sci., Vol. PS-7, pp. 120~131, 1973.
- 11) 力石国男・光易 恒: スペクトル計算法と有限フーリエ級数, 九州大学応用力学研究所報, 第39号, pp. 77~104, 1973.
- 12) 桑島 進・永井康平: 任意個数試料のFFT算法とそのスペクトル解析への応用, 運輸省港湾技研資料, No. 155, pp. 1~33, 1973.
- 13) 伊福 誠・柿沼忠男・油井秀人: 砕波帯における方向スペクトルの観測例, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 30~34, 1984.