

回転スペクトルを用いた碎波下での大規模渦に関する実験的研究

青 野 利 夫*・服 部 昌 太 郎**

1. ま え が き

碎波下での流体運動場を支配する要因として大規模渦構造に着目し、その機構を明らかにするための研究が、現在活発に行なわれている^{1)~6)}。

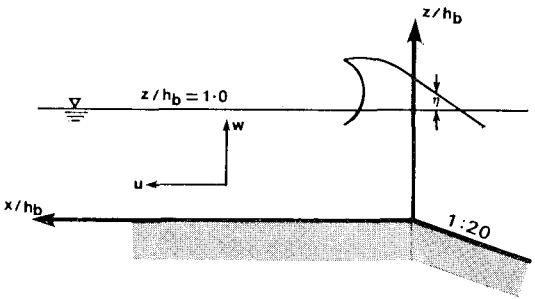
これらの研究は、殆どが位相平均波形をもとに議論を行っているが、不規則波などへの拡張性を考えると若干の問題があると考えられる。

本研究では、碎波下での大規模乱流構造を明らかにするため、碎波帯内流速場に対して、位相平均法と共に、流体粒子が回転運動を行う波動場に対して有効な手法であると考えられる回転スペクトル解析^{7),8)}を行い、位相平均法による結果との比較、検討を行う。

2. 実験装置・方法及びデータ処理法

実験は、幅 0.3m×0.5m×20m の両面 ガラス張りの二次元波動水槽に、1/20 勾配斜面と水平床とよなる模型海浜地形を設置して行った(図一1)。水面変動の測定は分圧式波高計(応答周波数 50Hz)、流速変動の測定はレーザ流速計(DISA 社製、5W アルゴンレーザ、2カラーシステム、55X型光学系システム、後方散乱方式)を用いて行った。

測定データは、サンプリング周波数 200 Hz で 90 秒間分を AD 変換し、電算処理をおこなった。実験波の諸量を表一に示す。



図一1 座標系と記号

レーザ流速計を用いた流速測定では、出力のドロップアウト⁹⁾が問題となるが、本実験ではレーザの交差部が空気中に出る波谷部から波峰部を除いてドロップアウト率が 0~5% 程度であり(碎波形式が崩れ碎波で後方散乱方式を用いたことによる。)、ドロップアウトに対する処理はとくに行わなかった。また回転スペクトルの算定は FFT 法(データ数: 8192, Nyquist 周波数: 100 Hz, 基本周波数: 0.0244, 自由度: 64, 変異係数: 0.177)を用いた。

乱れ強度(u'_{rms} , w'_{rms})は、前報¹⁾と同様式(1)を積分することによって計算した。

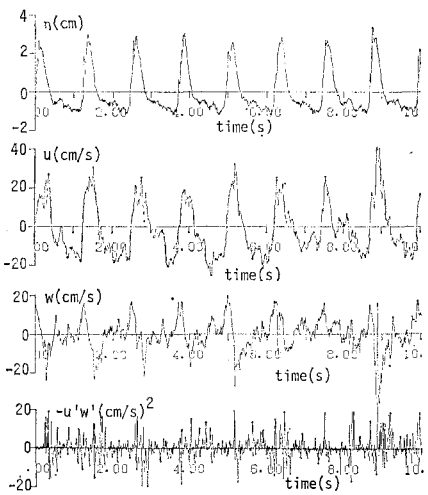
$$\left. \begin{aligned} S_u(f) &= S_u(f)(1 - \gamma_u^2(f)) \\ S_w(f) &= S_w(f)(1 - \gamma_w^2(f)) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

またレイノルズ応力は、乱れ流速間のクロススペクトル $S_{u'w'}$ を用いて、式(2)から計算した¹⁰⁾。

$$-\overline{u'w'} = \int_0^\infty |S_{u'w'}(f)| \cos(\phi_{u'w'}(f)) df \dots\dots (2)$$

表一

実験 No.	入射波波高 H_i (cm)	H_0/L_0	H_0/h_0
4	4.25	0.0153	0.94



図二 測定結果例 ($x/h_0=5$, $z/h_0=0.77$)

* 正会員 工修 中央大学助手 理工学部土木工学科
** 正会員 工博 中央大学教授 理工学部土木工学科

ここに $\gamma_{\eta u}$ は水面変動と流速変動間のコヒーレンス、 $\phi_{u'w'}$ は位相差である。

3. 実験結果と考察

3.1 砕波帯内流速場の特性

a) 位相平均流速場

図-2 はレーザー流速計による測定結果の一例で、 $\gamma_{\eta u}$ を周波数特性とする数値フィルタ法によって分離した高周波数域の乱れ流速 u' 、 w' の相関の時系列 $-u'w'$ が同時に示されている。レーザー流速計の出力結果には、高周波域での雑音の発生が認められる（スペクトル解析結果から、20 Hz 以上の成分）。これはレーザー流速計の不確定性¹¹⁾によるものと考えられる。また相関 $-u'w'$ の時系列には乱れの間欠性が顕著に認められ、その発生位相は波面後背部に集中している。本研究における位相平均は全て数値フィルタ法によって高周波成分を取り除いたものに対しておこなった。

図-3 (a), (b) は一様水深部での入射波の位相平均波形をトリガーとして、同一時刻での定常流速成分を除いた位相平均流速ベクトルと、水面波形の空間分布を $t/T=0.16, 0.40$ について示したものである。同図より、位相平均流速には大規模な残留渦の存在が認められず、波動性を強く保持しており、水口ら⁴⁾、三村ら¹²⁾の測定結果と異なる。水口らの実験は、一様勾配斜面を用いているため直接の比較は難しいが、三村らの実験が著者らと同様に水平床を用いていることから、この様な傾向の違いは砕波形式によるものが本質的であると考えられる。ただし、このことは崩れ砕波に大規模な渦が存在しないことを意味するのではなく、可視化実験

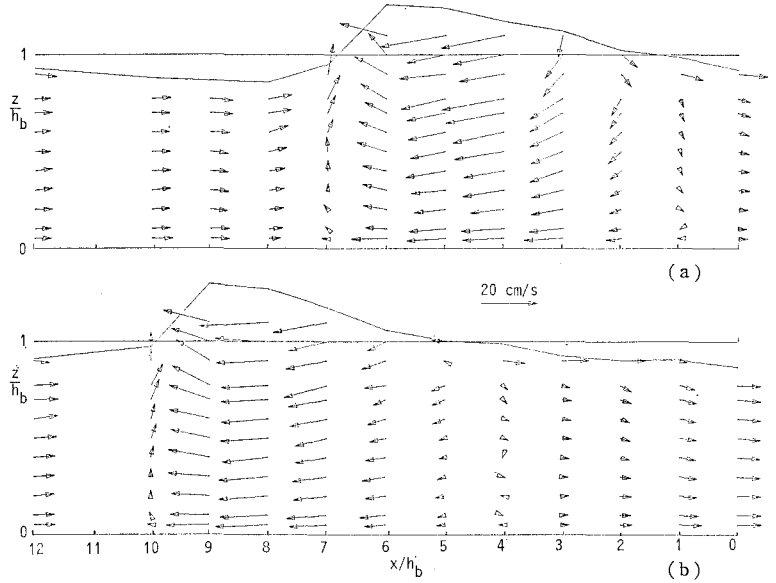


図-3 位相平均流速の空間変化

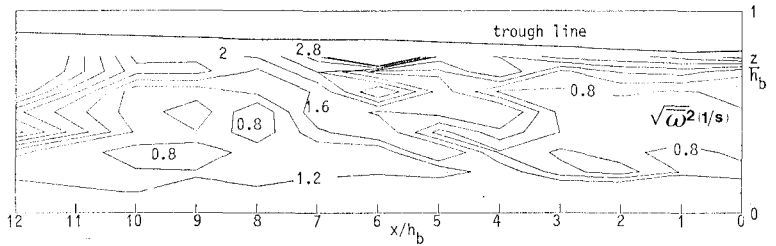


図-4 位相平均流速場の渦度分布

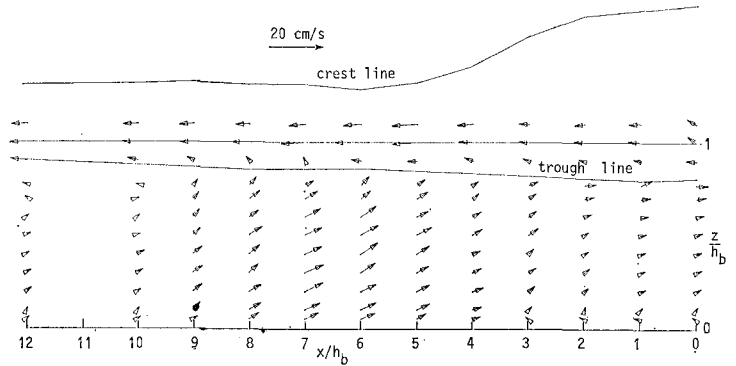


図-5 定常流速の空間分布

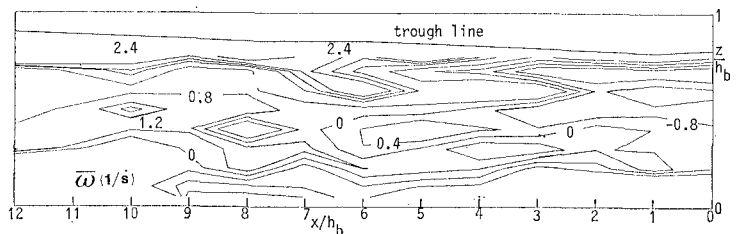


図-6 定常流速場の渦度分布

結果りなどにより崩れ砕波の場合にも大規模渦の存在が指摘されていることから、渦と波動の相対的なパワーの差が巻き砕波に比較して大きく、位相平均を行うことによって大規模渦が波動成分の中に埋もれたため位相平均から直接大規模渦がみれないことを意味する。また著者がスプリット型熱膜流速計を用いて行った結果¹³⁾からも 図-3 と同様の傾向が得られている。

図-4 は、図-3 で示した位相平均流速より計算した渦度 ω の rms 値の等値線図で、流速の空間勾配は B-spline 二次元補間式を測定データに当てはめて計算した。渦度の分布は巻き砕波の様に水面近傍で局所的に強い渦度を持っており、大規模な渦運動の存在を示している。

b) 定常流速分布

図-5, 6 は定常流速ベクトルの空間分布と渦度の等値線を示したもので、流れは乱れの最も激しい $x/h=4\sim7$ の区間で最大を示し、流向は波谷部より下方では沖向きで水面に向かう流れが卓越し、半水深近くに最大流速が発生している。また $xh_0=10\sim12$ に局所的な渦状流速場が形成されているが、渦度もこの領域で比較的大きな値を示す。

c) 乱れ強度・レイノルズ応力

図-7 は、式 (1) と (2) より計算した乱れ強度 u'_{rms} , w'_{rms} , とレイノルズ応力 $-\overline{u'w'}$ の空間分布を示したもので、底面の近傍を除いて水面近傍に乱れが集中している。また数値フィルター法の結果¹⁴⁾と異なり、乱れ強度とレイノルズ応力の空間分布の間には強い相似性が見られる。

3.2 回転スペクトルの特性

砕波下での流体粒子の速度ベクトルは、その方向が時間的に回転する。このような流体運動を行う場でのスペクトル解析は、水平・鉛直方向の流速のスペクトル解析を個別に行うことにより、速度ベクトル時系列にたいしてスペクトル解析を行う方がより多くの情報が得られると考えられる。回転スペクトルの適用例としては、吹送流と風の相互干渉¹⁵⁾や潮流解析¹⁶⁾などがあるが、波動場の解析にも有用な手法であることが指摘されている。

図-8 (a), (b) は、それぞれ砕波点と波面崩壊後の $x/h_0=5$ での回転スペクトルの計算結果例で、反時計周

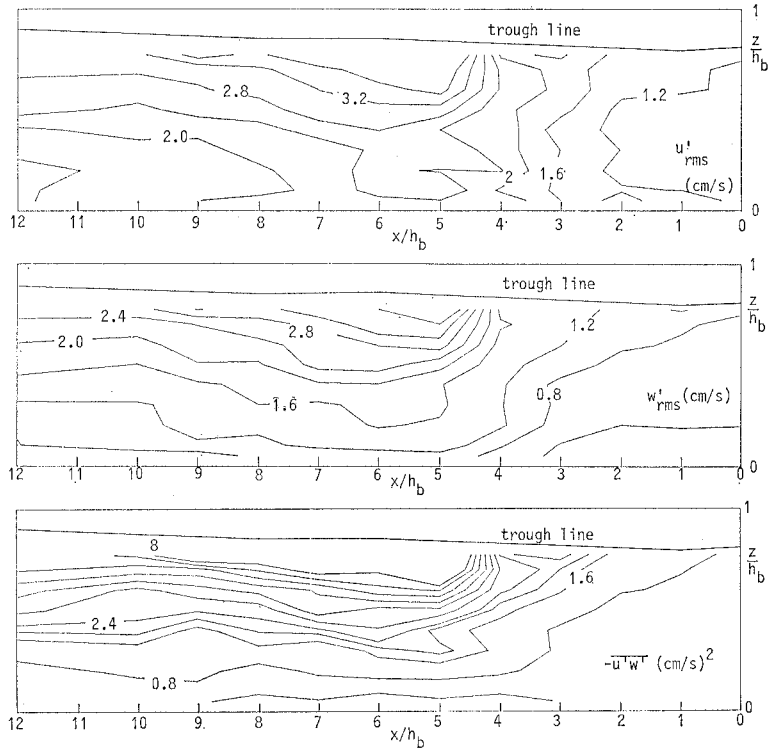


図-7 乱れ強度、レイノルズ応力の空間変化

と時計周りの回転スペクトル [$S_+(f)$ と $S_-(f)$], 全スペクトル [$S_t=S_+(f)+S_-(f)$] を示す。同図から低周波域では、 S_+ 成分は S_- 成分よりも常に大きく、波動成分による回転運動が卓越しているのが認められる。また、 S_+ と S_- のパワーの水深方向の相対的变化より、流速ベクトルの軌道は底面より水面にむかって直線から長円軌道に変化している。

砕波後の回転スペクトルの特性を更に見てみると、図-8 (b) では水面近傍で2倍調波以上の成分で S_- にピークが現れなくなり、砕波点での傾向と異なっている。この原因として、図-2 で見られるような、波面崩壊による下方へ向かう強い渦の発生が考えられるが、図-3 の位相平均流速の変化からは、前に述べた理由により十分な説明を与えることはできない。

回転スペクトルと大規模渦運動を関係づけるものとして、軌道の長軸方向の安定度が考えられる。波動成分のみであるならば、流速ベクトルの軌道の長軸方向は安定してはらずであり、安定度が低くなることは、波動成分と同程度の規模を持つ乱れが存在していることを意味する。

図-9 は、回転する流速ベクトルの長軸方向の安定度 ($E\sigma$) を図-8 と同一の測点について示したもので、砕波点では水深方向にはほぼ同じ分布をし 4 Hz 程度まで 1 に近い値をしめす。一方、砕波後の安定度は底面から水

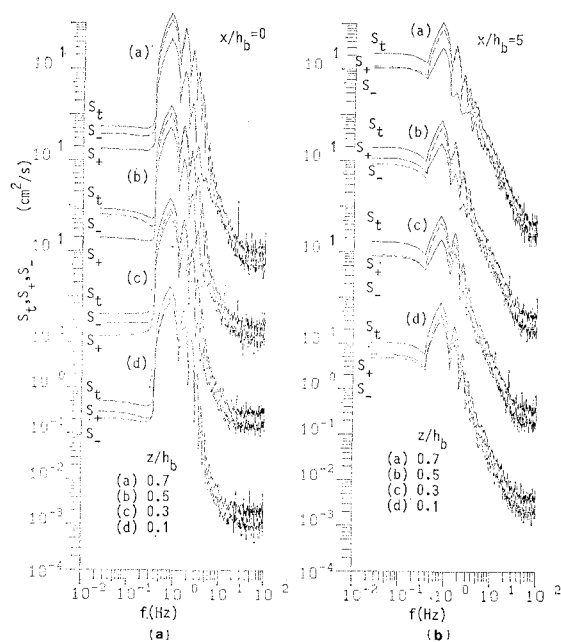


図-8 回転スペクトルの特性

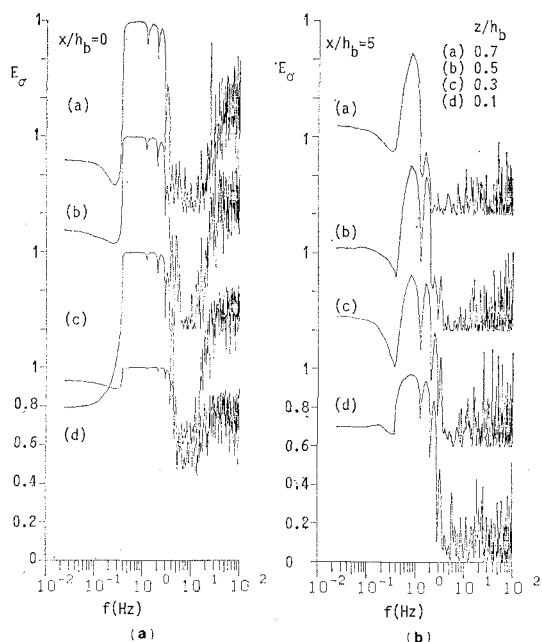


図-9 長軸方向安定度の特性

面に近づくにつれて波動成分と同じ周波数域に存在する大規模渦により急激に不安定さを増す。この傾向は他の測点についても同様で、渦度分布や乱れ強度などの分布と類似した傾向を有している。

回転スペクトル諸量と渦度分布などの分布の類似性をより明確にするため、基本周波数付近 ($f=2.4$ Hz) での長軸方向、安定度、回転係数の空間分布を示したのが図-10~12である。図-5の渦度の rms 値と図-11の安定度の分布の比較から、底面付近と砕波点付近の一部を除いて渦度の rms 値と安定度は類似した空間分布を示しており、大規模渦と安定度の間の相関性を示唆している。また 図-10の長軸方向の空間分布を見ると、波面崩壊部である $x/h_b=5$ 以後では、底面付近の $z/h_b=0.3$ 以下の領域を除いて波動として存在しておらず、この周波数での流速変動は殆ど大規模な乱れであるといえる。このことは、図-11の安定度の値がその領域で0.5以下であることから認め

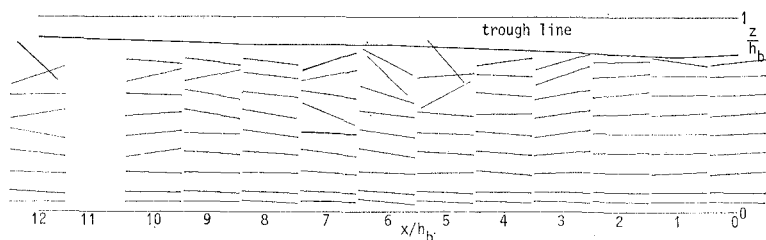


図-10 長軸方向の空間分布

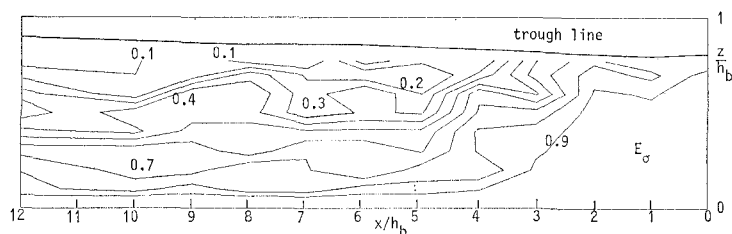


図-11 安定度の空間分布

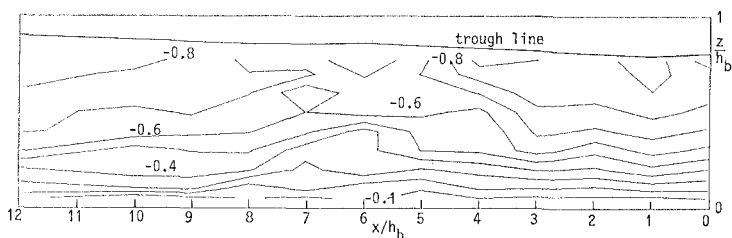


図-12 回転係数の空間分布

られる。図-12は回転係数 $C_R(f)$ $[=(S_+(f)-T_-(f))/S_0(f), C_R=1: \text{円運動}, C_R=0: \text{直線運動}]$ の空間分布を示したもので、流速ベクトルの軌道は $x/h_0=5$ までは水深方向に規則的に変化しているが、 $x/h_0=5$ を過ぎると大規模渦により空間的に大きく変り水深方向変化が不規則になってくる。

3.2 回転スペクトルと乱流諸量の関係

図-13と14は、基本周波数付近 ($f=0.8, 2.4 \text{ Hz}$) の長軸の安定度と乱れ強度・レイノルズ応力の関係を全測点について示したもので、基本周波数である $f=0.8 \text{ Hz}$ では、乱れ強度、レイノルズ応力ともあるしきい値以上の大きさにならないと安定度は低下しない。このことは砕波帯内で波動成分が、基本周波数については保存されていることを示している。 $f=2.4 \text{ Hz}$ では、値のばらつきはあるが、乱れ強度、レイノルズ応力と安定度の間には相関関係がみられる。

渦度と安定度の相似性を考慮すると、この結果から、砕波下での大規模乱流と乱れ強度、レイノルズ応力の関係が認められ、水面変動との相関から得られる式(1)の妥当性を示している。

4. あとがき

砕波下で生成される大規模乱流構造に対して、位相平均法と回転スペクトル解析を用いて、その機構解明を行った。渦度のrms値と長軸方向の安定度の空間分布の相似性から、回転スペクトルと大規模乱流構造の関係が明らかになった。また乱れ強度、レイノルズ応力と安定度の相関性から、乱流統計量と大規模乱流との関係が明らかとなり、水面変動との相関から乱流統計量の算定を行うことの妥当性がえられた。

参考文献

- 1) 青野利夫・服部昌太郎: 砕波下での大規模乱れ構造に関する実験的研究, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 6~10, 1984.
- 2) 瀬岡和夫・小谷野喜二・日野幹夫: 二成分光ファイバー流

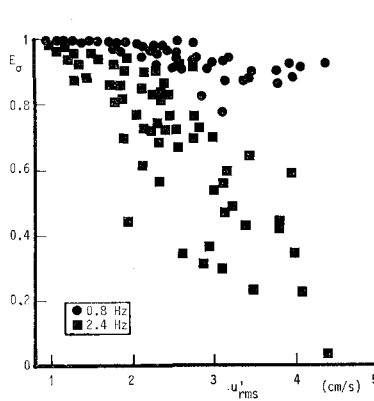


図-13 安定度と乱れ強度の関係

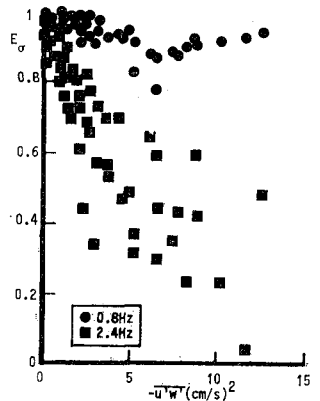


図-14 安定度とレイノルズ応力の関係

- 速計を用いた砕波帯内流速場の特性の解明, 第32回海岸工学講演会論文集, pp. 50~54, 1985.
- 3) 日野幹夫・瀬岡和夫・小谷野喜二: 崩れつつ進行する波のポテンシャル成分と渦度成分の分離方法について, 第32回海岸工学講演会論文集, pp. 55~59, 1985.
- 4) 水口 優・友金幸浩: 巻き波型砕波時の流れの場の実験的研究, 第32回海岸工学講演会論文集, pp. 55~59, 1985.
- 5) 柴山知也・樋口雄一・岡安章夫: バックウォッシュと巻き砕波による砕波帯内流速場の構造, 第32回海岸工学講演会論文集, pp. 65~69, 1985.
- 6) 酒井哲朗・田中秀明: 斜面上の砕波における水塊の空入と渦の挙動, 第32回海岸工学講演会論文集, pp. 70~74, 1985.
- 7) 日野幹夫: スペクトル解析, 朝倉書店, 1977.
- 8) 青野利夫・服部昌太郎: 砕波による乱れの統計的特性, 第15回乱流シンポジウム, pp. 225~230, 1983.
- 9) 酒井哲朗・三反畑勇: 砕波による乱れのレイノルズ応力について, 第30回海岸工学講演会論文集, pp. 30~34, 1983.
- 10) 青野利夫・服部昌太郎: 巻き同波下での大規模乱流構造に関する実験的研究, 第16回乱流シンポジウム, pp. 6~10, 1985.
- 11) 一条真古人・小橋安次郎: レーザによる乱流計測, 第14回乱流シンポジウム, pp. 244~248, 1982.
- 12) 三村信夫・岡安章夫・柴山知也・ブリーチャ, カムロンリテンソン: Plunging 砕波によって発生する砕波帯内流速場の構造, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 11~14, 1984.
- 13) 青野利夫・大橋正和・服部昌太郎: 砕波による乱れ構造の実験的研究, 第30回海岸工学講演会論文集, pp. 25~29, 1983.
- 14) Gonella, J.: A rotary-component method for analysing meteorological and oceanographic vector time series, Deep-Sea Res., Vol. 19, pp. 833~846, 1972.
- 16) 早川典夫・平田 守・中田喜三郎: 回転スペクトル解析による新潟沿岸の潮流特性, 第30回海岸工学講演会論文集, pp. 505~509, 1983.