

砕波による乱れの構造

服 部 昌太郎

1. まえがき

波形の急激な崩壊によって、波自身の持つエネルギーが放出される砕波現象は、砕波帯内の諸現象——波の変形、漂砂移動と物質輸送、海浜流——の発生に支配的な影響を持つ。このため、砕波の発生条件、砕波形態、エネルギー逸散過程などの研究が、海浜地形との関連のもと数多くなされてきた。また最近では、室内実験と現地観測で使用される流体計測技術、特に流速測定、の進歩によって、砕波帯内の流体運動に関する創意に豊んだ研究が活発になされ、貴重な知見が報告されている。しかし、砕波帯内の流体運動機構の研究が進むにつれ、砕波の乱れ構造特性の解明を抜きにしては、砕波によって発生する諸現象を十分に説明出来ないことが、多くの研究者によって指摘されている。

砕波の乱れが、不規則性、拡散性、不安定性、渦度の三次元的変化、エネルギー逸散など (Tennekes & Lumley, 1972) の従来の乱れの定義にどの程度適合し、またその構造が Peregrine ら (1978) が提案した自己保存型の自由乱流せん断流の wake や mixing layer と類似性があるのかと云った、乱れの基本的特性はまだ十分に解っていない。

非定常流体運動の構造解明に必要な流速測定技術の進歩と、交番振動流の乱流構造の流体力学的研究の進展 (例えば日野ら, 1980; Hayashi & Ohashi, 1982) とによって、砕波の時空間特性のより精細な研究が可能となる条件が整った。したがって、現時点では砕波の乱れの実験的研究はまだ少いが、今後のこの分野での研究にいささかでも役立つことを考えて、本講では現在までにえられた砕波の乱れに関する実験成果を整理し、その解説を行うこととする。本研修会では、砕波とそれに関連する諸現象の取扱い方などに関して榎木 (1973) が、また砕波帯内の諸現象に対する乱れの影響の評価などについて酒井 (1980) が講義を行っている。なお、Peregrine (1983) が砕波の流体力学的研究現況の解説を行っていることを付記する。

本講の構成は、以下のようである。

1. まえがき
2. 砕波の乱れに関する実験的研究
3. 砕波の乱れ
 - 2.1 発生過程
 - 3.2 乱れの定義

4. 碎波の乱れの時空間構造

4.1 乱れの確率密度分布

4.2 乱れ強度とレイノルズ応力

4.3 パワースペクトル

4.4 乱れの構造モデル

5. 乱れの可視化実験

6. あとがき

2. 碎波の乱れに関する実験的研究

碎波によるエネルギー逸散過程を、波高減衰などの測定結果より検討し、碎波形式による乱れ構造の変化を間接的に解明することを試みた研究が、井島ら（1956）、Horikawa & Kuo（1966）、榎木ら（1972）などによってなされている。しかし、碎波下での内部流速の測定より乱れの直接的解明を意図した研究は、最近になって本格的に行われるようになった。

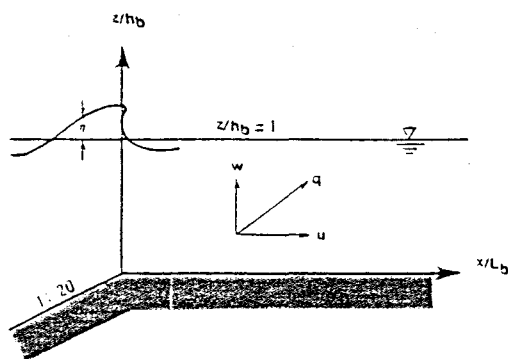
深海域より汀線までの波形と流速場の変化を系統的に記述しうるモデルを確立するため、各種の波理論や計算手法の適用限界を検討する目的で、従来より波動による水面と流速変動の時間波形の変形過程に関する実験的研究がなされている。これらの実験での流速測定は、トレーサ追跡、小型カレントメータ、熱膜流速型（HF）、超音波流速計、レーザードプラー流速計（LDA）、電磁流速計（EMC）などによってなされている。そして、室内実験に使用される HF と LDA、現地観測での EMC の安定性と信頼性の向上によって、碎波の乱れの実験を行うことが可能となった。

表一 1 は、本講で紹介する二次元波動水槽による碎波の乱れの実験で採用されている、流速測定法、乱れの定義（3.2 参照）、実験地形、沖波々形勾配を示したものである。多くの実験は一樣勾配斜面上での碎波を対象としているが、青野らは図一 1 に示す 1/20 勾配斜面と水平床とよりなる実験地形を使用している。この地形を使用する理由は、（1）碎波位置の固定化、（2）水深変化による碎波後の波形変化防止、（3）戻り流れの間欠性と斜面よりの反射の防止である。

表一 1 二次元波動水槽による実験的研究

実験者	流速計	乱れの定義	斜面勾配	H_0'/L_0 (%)	備 考
Stive	LDA	位 相 平 均	1/14	1	(1980)
灘岡ら	LDA	フ ィ ル タ ー	1/20	1～8	(1981, 82)
酒井ら	HF	移 動 平 均	1/31, 1/28	3.2, 8.8, 1.6	(1981, 82)
泉宮ら	SHF*	位 相 平 均	1/30, 1/20	2～3.4	(1981, 82)
青野ら	SHF*	位 相 平 均	1/20 と水平床 (図一 1)	2.1, 0.7	(1981, 82 b)
		数値フィルター			(1982 a, 83 a, b)

*) SHF：スプリット型熱膜流速計



図一 1 青野らの実験地形と記号説明

碎波条件，碎波後の波動，乱れ構造などが実験地形の影響を受けることが，これまでの研究で指摘されている。一様斜面上では，初期碎波後，bore 状の碎波が汀線まで進行し，乱れエネルギーの生産と逸散がほぼ平衡する“quasi-steady breaking waves” (Peregrine & Svendsen, 1978) が形成される。一方，現地海浜でも観測される碎波後の波の再生過程は，水深変化が緩やかな海浜地形上で発生する。以上の事から，本講で紹介する実験結果を検討する場合には，碎波形態，地形などの実験条件を十分考慮する必要があると考える。

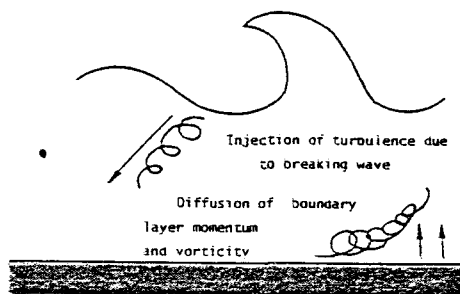
3. 碎波の乱れ

3.1 発生過程

碎波の乱れの発生過程は図-2 (Thornton, 1979) に示すように，

- (1) 波面崩壊による水塊と連行空気泡とにより，水面より持込まれる高エネルギーの乱れ，
- (2) 底面せん断力と圧力変動によって水底付近で生産され，上方に拡散する乱れ，

がある。碎波の乱れの特徴は，乱れエネルギーが繰返し水面より供給され，またこの供給量は碎波後の波の変形とともない場所的に変化することである。加うるに，碎波形式によって水面下への乱れの進入度も異なる。したがって，乱れの空間分布は，場所的，時間的に変化する。



図一 2 碎波の乱れの発生過程模式図 (Thornton, 1979)

乱れの構造をより複雑なものとする要因として、図-3に示すような碎波現象自体に内在する変動性がある。図-3はFlick ら(1981)が行った規則波による実験結果で、碎波点と碎波帯内での水面と流速時間波形の位相平均波形と測定値の変動幅の 2σ (σ :標準偏差)を示したものである。碎波の乱れに関心を持つ研究者の間では、乱れの生産源である碎波の変動性も含めて碎波の乱れと見なすか、またはその効果は波運動成分と考えて乱れではないと云った議論が、現在でもなされている。

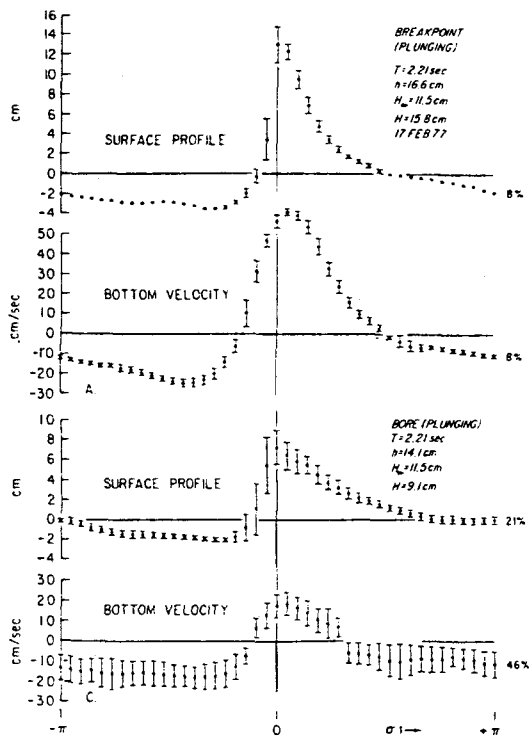


図-3 水面と水平流速変動の位相平均波形と実験値の変動(縦実線は実験値の変動の 2σ) (Flick ら, 1981) 碎波後の変動性が高い。

3.2 乱れの定義

本講で第1に検討すべき事項は、流速測定記録より乱れ成分をどのように抽出するか、すなわち乱れをどう定義するかと云うことである。定義の方法によって、碎波の乱れ構造が変る可能性もあり、また研究目的によっては乱れの定義ずけを変えることも必要となる。

非定常乱流の流速場 $\vec{q}(\vec{r}, t)$ を、時間平均、組織変動および乱れの三成分、 $\vec{q}, \vec{Q}, \vec{q}'$ に分離して、式(1)のように表わす。すなわち、

$$\vec{q}(\vec{r}, t) = \vec{q}(\vec{r}, t) + \vec{Q}(\vec{r}, t) + \vec{q}'(\vec{r}, t) \tag{1}$$

ここに、 $\vec{r}$: 位置ベクトル, t : 時間。したがって、乱れ成分 $\vec{q}$ は流速測定出力 $\vec{q} - \bar{\vec{q}}$ と組織変動成分 $\bar{\vec{Q}}$ との偏差として定義される。換言すれば、組織変動成分をどの様に定義するかと云った問題となる。

組織変動成分の代表的な定義法としては、(1) 移動平均法 (DA 法), (2) 同位相集合平均法 (PA 法), (3) フィルター法 (FL 法), (4) 波動成分分離法 (HA 法) などがあり、ここでは、(2) ~ (4) の方法について若干の検討を行うこととする (岩垣ら, 1981)。

(A) PA 法

$$\bar{\vec{Q}}(\vec{r}, t) = \langle \vec{q}(\vec{r}, t) \rangle = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{n=0}^N \vec{q}(\vec{r}, t + nT) \quad (2)$$

ここに、 T : 組織変動成分の周期

交番振動乱流などの研究 (例えば日野ら, 1980; 菅原ら, 1983) ではこの方法が採用されているが、これらの研究で対象とする組織変動は比較的規則性の高いものである。砕波現象には変動性が存在するため、PA 法を使用すると乱れ成分に組織変動成分の一部が取込まれる。青野ら (1981, 82b) は、組織成分の乱れ成分への漏れを最小とするよう PA 法に最小自乗法の考えを導入して、組織・乱れの分離を行っている。図-4 は、通常の PA 法と前記の修正 PA 法とによってえられた、水面変動 η , 水平・鉛直流速の組織変動成分 U と W ($\langle u \rangle$ と $\langle w \rangle$) および乱れ強度 σ_u と σ_w の位相変化を示したものである。図中の縦実線は、実験値の変動幅を示す。

(B) FL 法

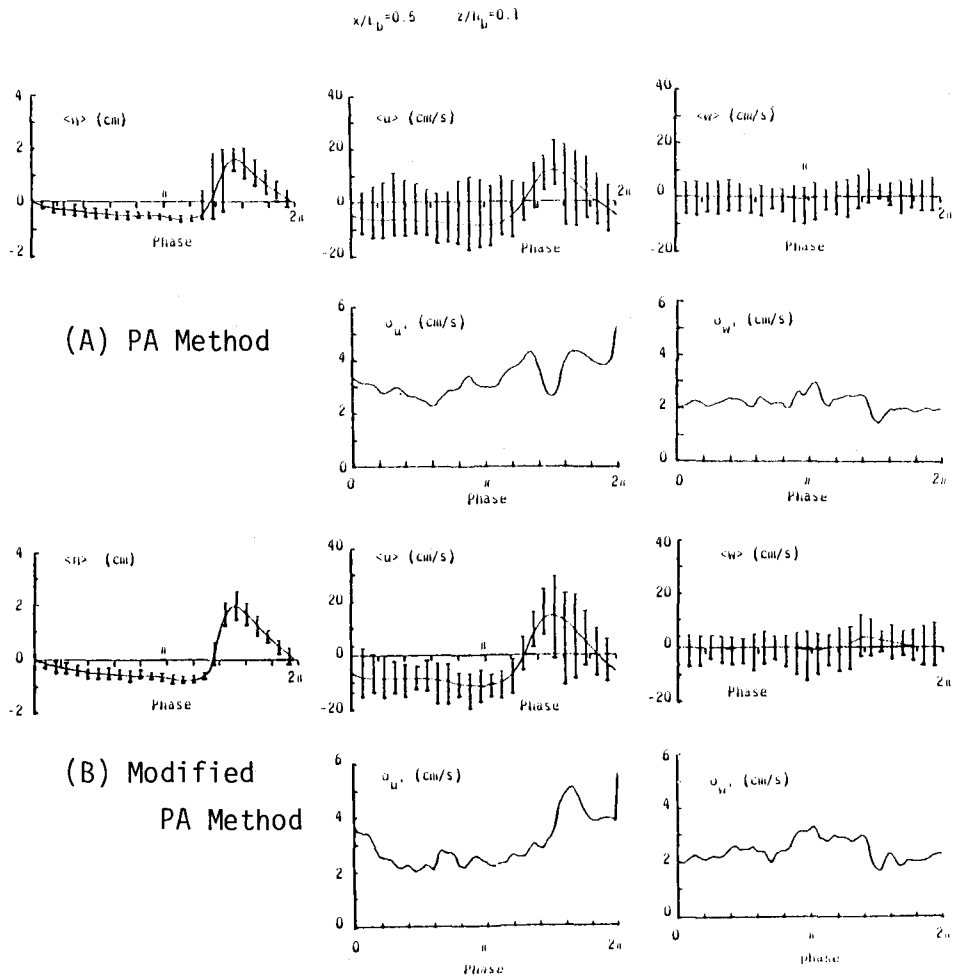
流速測定信号を band pass filter または数値フィルターに通して、組織・乱れ成分を分離する方法であるため、フィルターの周波数特性の設定条件によって分離結果が変化する。灘岡ら (1982) は、米山ら (1980) と同様に周波数帯 10~100 Hz の変動を乱れ成分と定義し、フィルターの設計を行っている。この方法によると、砕波々面脊後に存在すると考えられる低周波の乱れが、組織成分とみなされる可能性がある。数値フィルターの周波数特性の設定に物理的意味付けを強めるため、水面変動と相関の高い流速変動を組織変動成分と考え、水面・流速変動間のコヒーレンス $\gamma_{\eta u}$ と $\gamma_{\eta w}$ を周波数特性とする数値フィルターによって、組織・乱れ両成分の分離が行われている (Thornton, 1979; 水口, 1981; 青野ら, 1982a)。図-5 は、数値フィルターの設計に使用した $\gamma_{\eta u}$ と $\gamma_{\eta w}$ の鉛直方向変化を示したもので、流体運動の波動性が強い砕波点 ($x/Lb = 0$) では、 η と u ・ w 間の相関は良好である。しかし、砕波後では η ・ w 間の相関は全体的に低下する (青野ら, 1982a)。 η ・ u の相関も鉛直方向に若干低下する傾向があるが、水底付近での相関は比較的良好 (堀川ら, 1979)。図-6 は、 $\gamma_{\eta u}$ の周波数特性のみによって行った流速測定データ処理結果の例である。FL 法は、不規則波の下での乱れ成分の抽出に適している方法であると云える。

(C) HA 法

流速測定データより組織成分を直接分離するため、有限項のフーリエ級数で測定流速を近似し、こ

れと測定流速との偏差を乱れ成分とする方法である。林ら(1982)は、HA 法と PA 法との組合せによって、往復流下に発生する大規模な乱れ構造の解明を行っている。HA 法の問題点は、フーリエ級数の基本的周波数と組織変動のそれとの整合性をどの様に確保するかと云うことである。

図－7は、岩垣ら(1981)が行った上記3方法による組織・乱れ成分の分離結果の比較例である。



図－4 PA法による組織・乱れ成分の分離結果
(青野ら, 1982b) ($x/Lb=0.5, z/hb=0.1$)

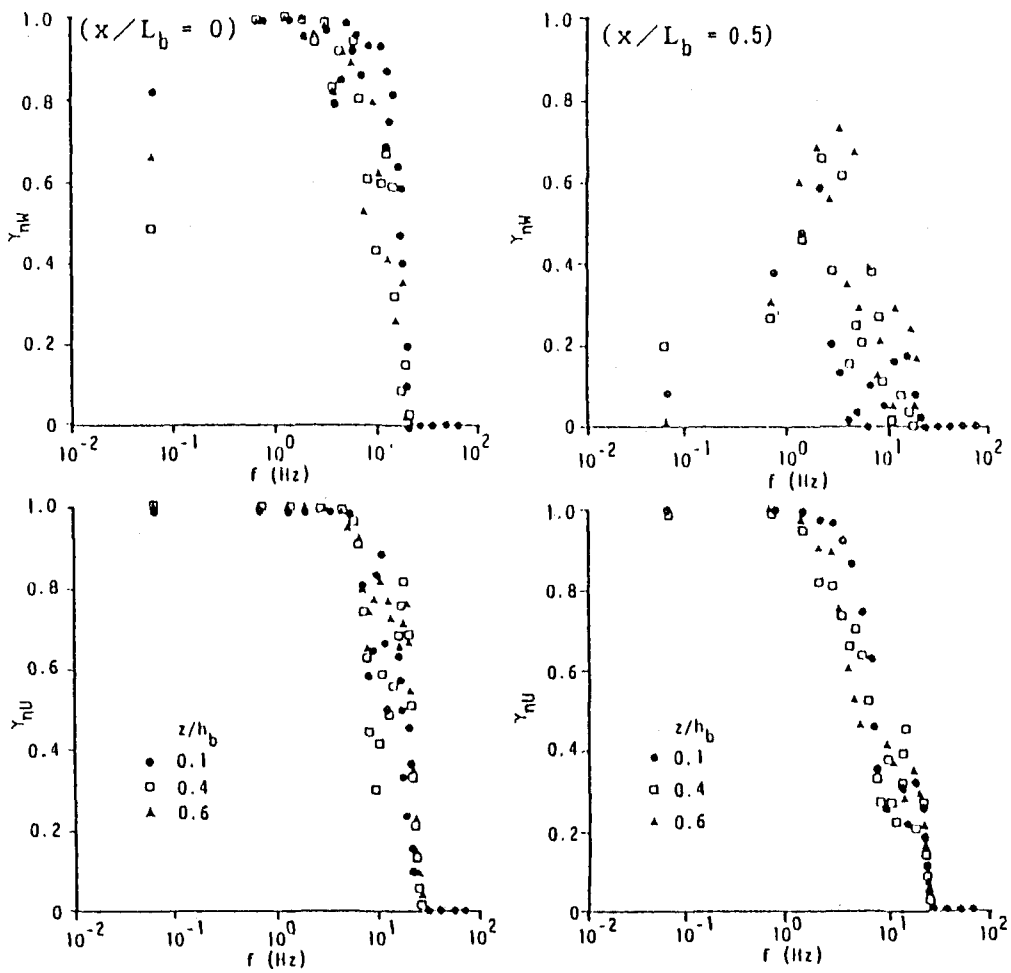
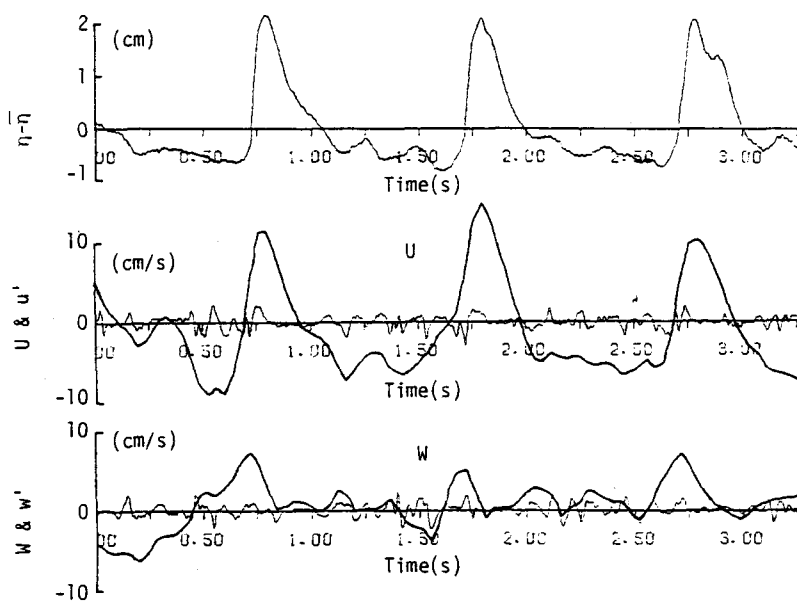
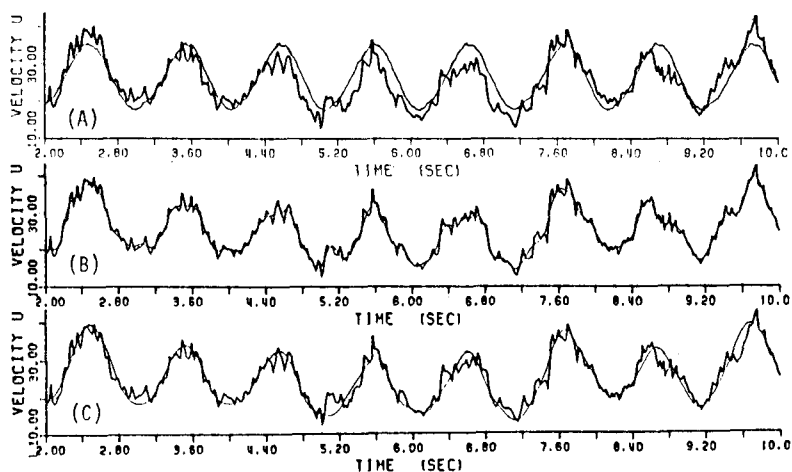


図-5 $\gamma_{\eta u}$ と $\gamma_{\eta w}$ の鉛直方向変化 (青野ら, 1982 a)



図一6 流速測定データの処理結果 ($x/L_b=0.5$, $z/h_b=0.4$, 崩れ碎波)
(青野ら, 1983b)



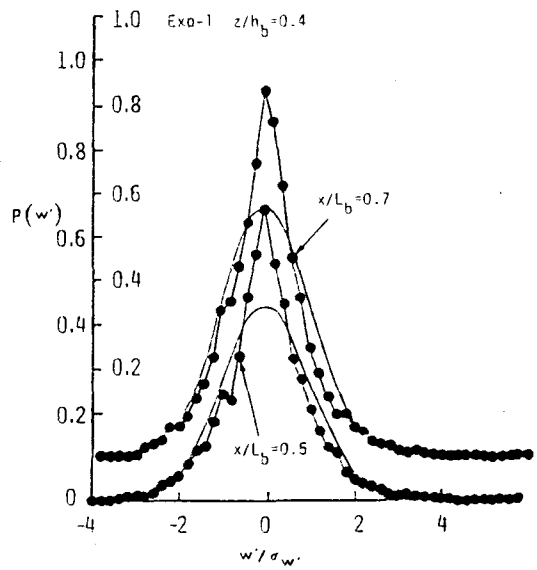
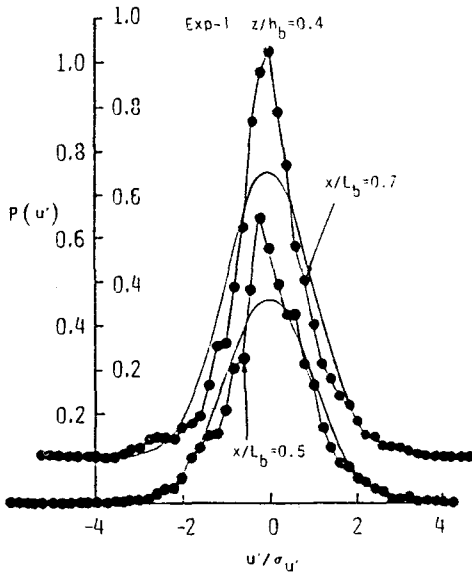
図一7 PA法(A)・FL法(B)・HA法*(C)による分離結果の比較
(岩垣ら, 1981*) 略称は筆者による。

4. 砕波の乱れの時空間構造

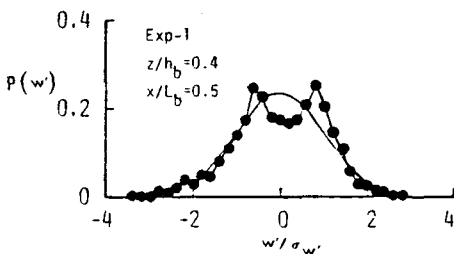
4.1 乱れの確率密度分布

砕波の乱れの確率密度分布に関する発表データ例がほとんどないため、青野ら（1983 a）の実験結果によってその統計的特性と共に、乱れ成分の抽出結果の妥当性を検討する。

図－8 は、 $\gamma_{\eta u}$ を周波数特性とした FL 法で抽出した u' と w' の確率密度分布を示したものである。図中の実曲線は、実験結果の分散値 (σ_u と σ_w) と一致させた正規分布曲線であり、横軸は、 u'/σ_u と w'/σ_w である。 $p(u')$ と $p(w')$ の分布形がほぼ同じであることから、乱れ成分の抽出法が妥当であることが認められる。また、乱れの確率密度分布と正規分布との比較より、砕波の乱れに非定常性が存在することが確認される (Bendat & Piersol, 1971)。 $p(u')$ と $p(w')$ の位相変化 (実験結果省略) より、非定常性は波峯通過時に強く、波底通過時では正規分布に近い確率密度分布となっている。図－9 は、 $\gamma_{\eta w}$ を使用して w' 成分を抽出した場合の確率密度分布で、組織成分が乱れ成分に含まれていることが明瞭に認められる。



図－8 u' と w' の確率密度分布 (青野ら, 1983 b) (崩れ砕波)



図－9 $\gamma_{\eta w}$ による分離 w' の確率密度分布 (青野ら, 1983 b) 平均値付近の 2 ケのピークが、組織成分の漏れを示す。

$p(u')$ の歪度 S_u' と偏平度 F_u'/F_G [$F_G(=3)$: 正規分布の偏平度] の空間・位相変化を、図-10 と 11 にそれぞれ示す。 $(S_w'$ と F_w'/F_G は省略) 図-10 より、碎波による崩壊波面が波底部に達すると $(x/L_b = 0.3)S_u'$ は増大し、 $x/L_b = 0.6$ 付近で最大となった後漸減することが認められる。 S_w' は碎波後漸減し、 $S_w' = 0.4$ に近づく。また図-12 は S_u' が波峰通過時に最大となることを示すが、 S_w' は逆に波底通過時に最大となっている。歪度の値より、乱れ流速による岸向きの乱れエネルギー輸送が碎波帯内に存在することが考えられる (Rotta, 1972)。灘岡ら (1981) は、定常流速成分を除いた水平方向の流速変動の歪度より、その空間分布形が碎波形式によって変化することと、岸向きのエネルギー輸送が存在することを示している。

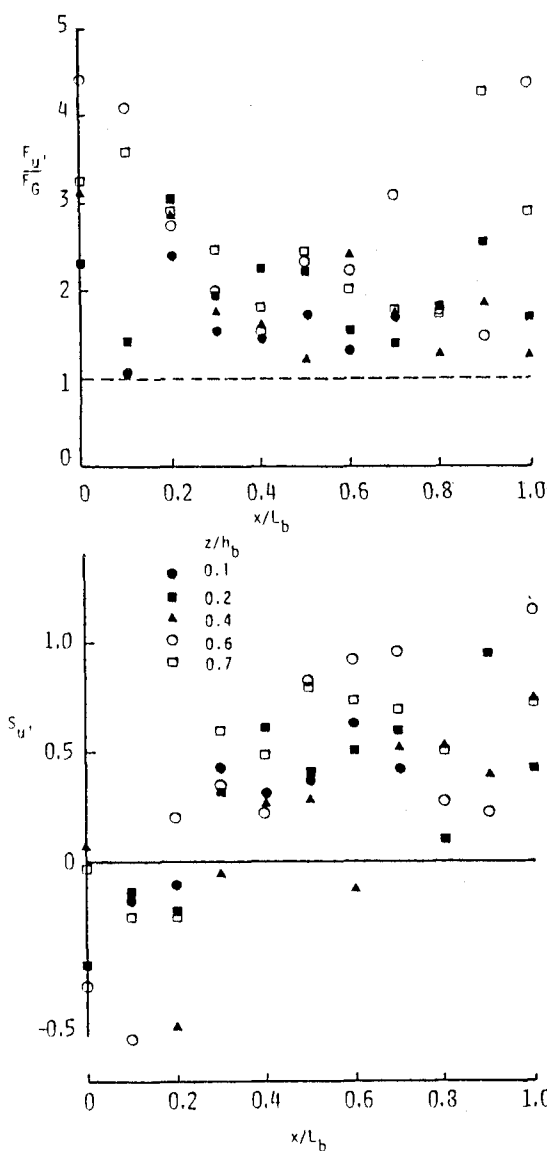


図-10 $p(u')$ の S_u' と F_u'/F_G の空間変化 (青野ら, 1983 a)

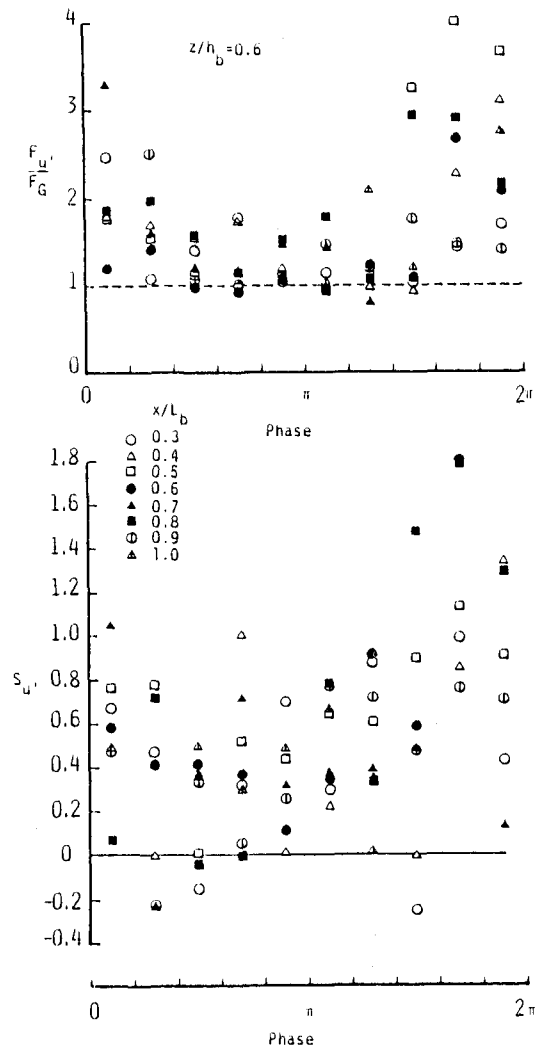


図-11 $p(u')$ の S_u' と F_u'/F_G の位相変化 (青野ら, 1983 a)

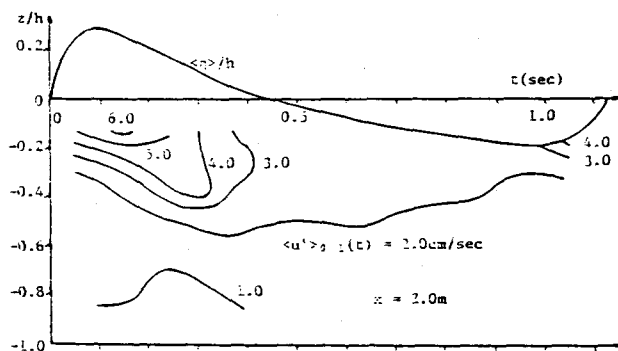


図-12 乱れの等強度分布 (D A 法) (酒井ら, 1982)

偏平度 $F_{u'}$ は、水底付近以外では碎波の進行と共に減少し、正規分布のそれに近づく。また上層部に向うに従って、水面よりの乱れの突入により偏平度は増大する。偏平度の位相変化は、 $F_{u'} \cdot F_{w'}$ 共類似の変動傾向を示し、波峰通過時に、そして碎波の突込み点近傍 ($0.4 \leq x/L_b \leq 0.7$) で乱れの間欠性と局在性が大きいことを示唆している (Klebanoff, 1954)。

4.2 乱れ強度 ($\sigma_{u'}$ と $\sigma_{w'}$) とレイノルズ応力

乱れの確率密度分布の空間・位相変化により、碎波の乱れの統計的特性の一部が明らかとなった。次いで、乱れ強度とレイノルズ応力の時空間分布を、表-1 に示した実験結果によって検討する。

図-12~14 は、乱れの等強度分布を示したもので、図-12 と 13 は一樣斜面上、図-14 は水平床上の実験結果である。これらの実験結果より、碎波波面の前面より脊面にかけて——水平方向流速の加速時より減速時——乱れが強まることが認められる。

図-15 と 16 は、碎波形式が崩れ碎波と巻き碎波の場合の乱れ強度の空間分布を示す。崩れ碎波では崩壊波面が波底部に達する付近、また巻き碎波では突込み点付近で乱れ強度が急激に増大している。一樣斜面では、水深の減少と共に水底部の乱れ強度は増大し、水面よりの乱れが水底まで達していることが認められる。一方、一樣水深での碎波では、水底付近の乱れの存在は認められるが、碎波後の波の再生化の進行と共に乱れは全体的に減衰している。 $\sigma_{u'}$ と $\sigma_{w'}$ の鉛直分布はほぼ同じであるが、碎波の突込み点付近の上層部では $\sigma_{w'}$ が $\sigma_{u'}$ より若干大きいことは興味深い。図-17 は酒井ら (1982) が測定した碎波帯内での $\sigma_{u'}$ の鉛直分布の位相変化である。

LDA を使用した実験では、水面よりの連行空気泡によって流速測定出力が drop-out する。灘岡ら (1982) は、この drop-out 信号の出現頻度の鉛直分布と乱れ強度分布との比較より、両者間に非常に高い相関があることを報告している。

碎波の乱れによって発生するレイノルズ応力の、空間分布の報告例は非常に少ない。図-15 には、乱れ強度と共にレイノルズ応力に相当する $-\overline{u'w'}$ の空間分布が示されている。碎波形式によって $-\overline{u'w'}$ の分布に変化が認められるが、水面付近では碎波点より碎波の進行方向に、 $-\overline{u'w'}$ の符号が負・

正・負と変動する。この $-\overline{u'w'}$ の変動より、図-18に示すような定常性の強い大規模な渦状の流速場が、砕波帯内に形成されていることが考えられる。

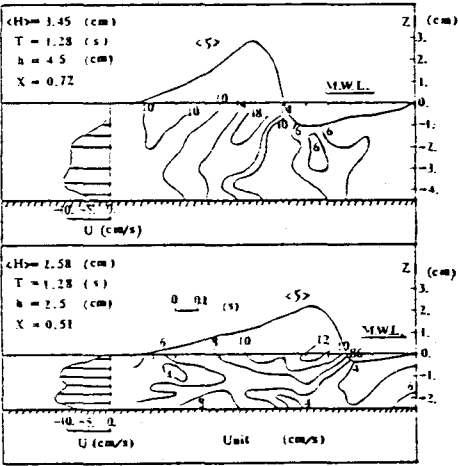


図-13 乱れ等強度の空間分布（P A 法）
（泉宮ら，1982）図中には、定常流速の鉛直分布が示されている。

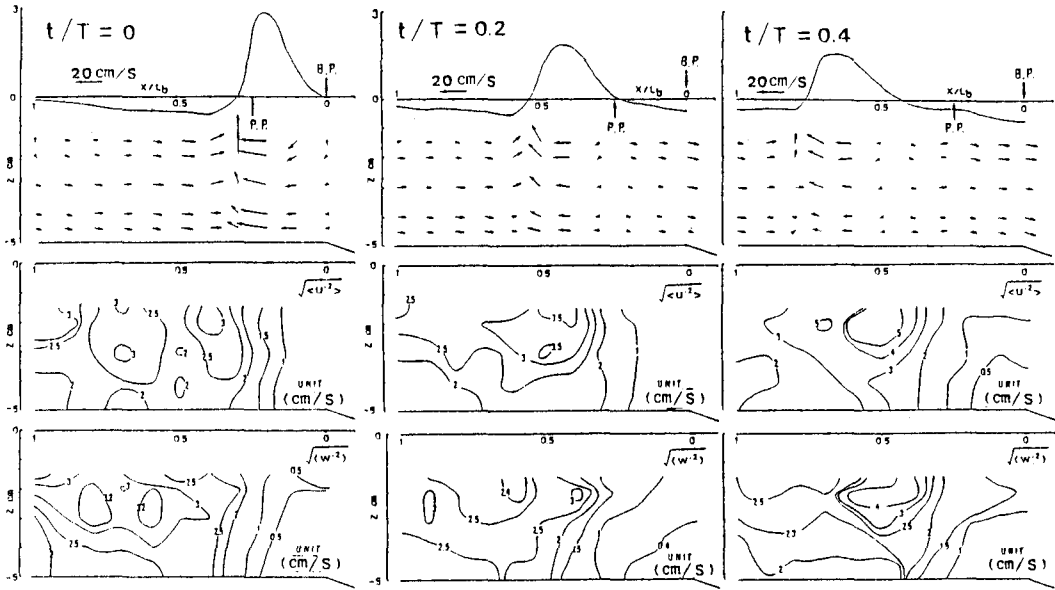
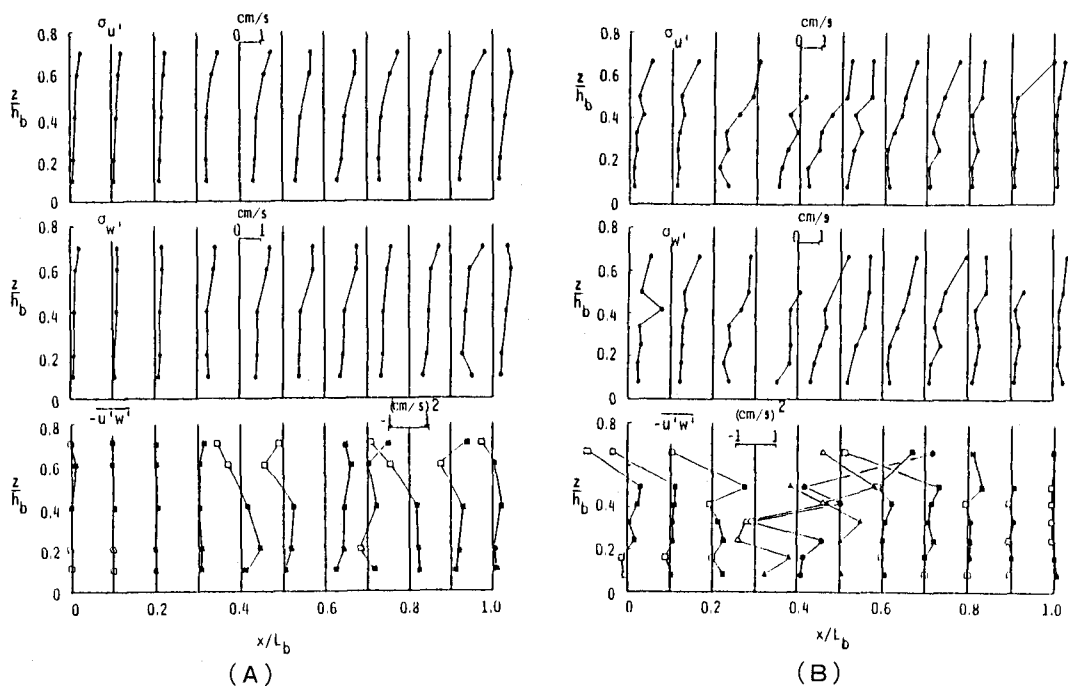
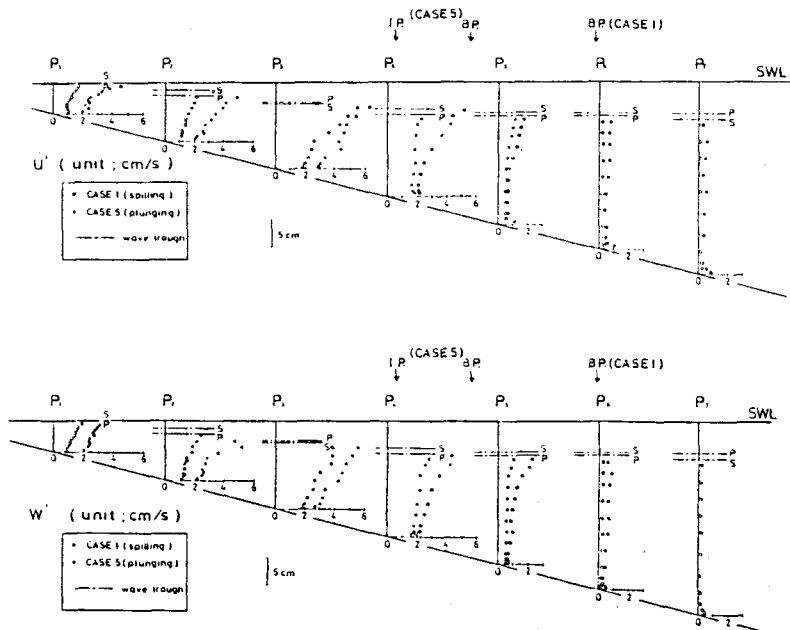


図-14 乱れ等強度の空間分布（P A 法）（青野ら，1982 b）各図の最上段は、水面形と流速ベクトルを示す。



図一15 乱れ強度の空間分布：(A)崩れ砕波の場合 (B)巻き砕波の場合 (FL法) (青野ら, 1983 b). 最下段は $-u'w'$ の分布を示す。



図一16 一様斜面上の乱れ強度の空間分布 (FL法) (灘岡ら, 1982)

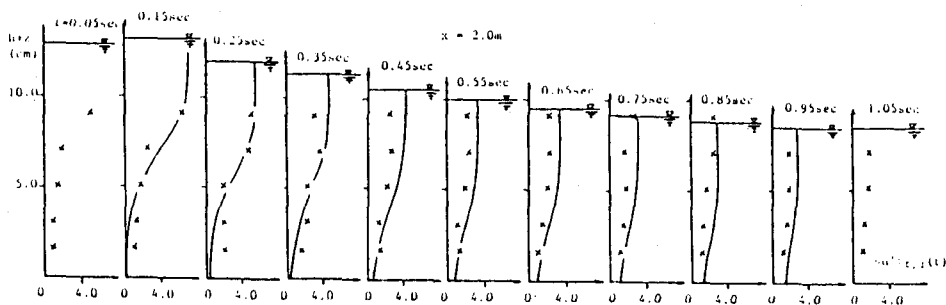


図-5 乱れの鉛直分布の位相変化 ($x=1.5\text{ m}, 2.0\text{ m}$)

図-17 乱れの鉛直分布の位相変化 (D A 法) (酒井ら, 1982) 図中の実曲線は, turbulent wake 理論モデルによる計算結果である。

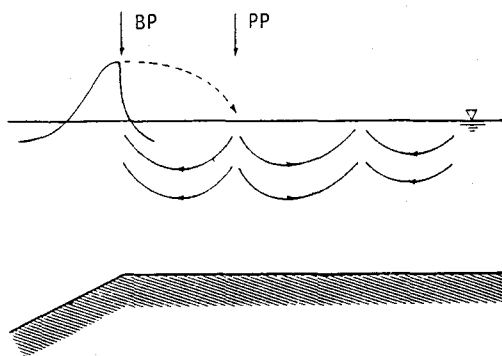


図-18 碎波帯内に形成されると想定される流速場の模式図 (青野ら, 1983 b)

4.3 パワースペクトル

碎波下での流速変動のパワースペクトルを, 模式的に示したものが図-19である。入射波の基本周波数より低周波と高周波の両方向へエネルギーの非線形伝達があり, 高周波側には高調波成分の存在を示すピークが現れる。この高調波ピークの高周波側には, 碎波のエネルギー平衡 (飽和) 域と乱れ成分のスペクトルが順次現われる。

碎波のエネルギー平衡域の周波数スペクトルは, Phillips (1958) と Thornton (1977) が導いており, それを表-2に示す。($S_\eta(f)$; $S_u(f)$, $S_w(f)$: 水面と水平・鉛直流速のスペクトル)

図-20と21は, 崩れ碎波と巻き碎波下の, 水面と流速変動のスペクトルを示したものである。また, 乱れ成分の周波数帯を調べるため, 式(3)より計算される u' と w' のスペクトル $S_{u'}(f)$ と $S_{w'}(f)$ も示されている。

$$S_{u' \text{ or } w'}(f) = S_{u \text{ or } w}(f) [1 - \gamma \eta_u^2] \quad (3)$$

図-20 と 21 とより，エネルギー平衡域のスペクトルは，

崩れ砕波の場合	$S_{\eta}(f) \sim f^{-3}$	$(f = 3 \sim 8 \text{ Hz})$
	$\sim f^{-5}$	$(f = 8 \sim 15 \text{ Hz})$
	$S_u(f) = S_w(f) \sim f^{-3}$	$(f = 3 \sim 8 \text{ Hz})$
巻き砕波の場合	$S_{\eta}(f) \sim f^{-7/3}$	$(f = 2 \sim 5 \text{ Hz})$
	$\sim f^{-5}$	$(f = 5 \sim 10 \text{ Hz})$
	$S_u(f) = S_w(f) \sim f^{-3}$	$(f = 2 \sim 5 \text{ Hz})$

また，乱れ成分の周波数帯では，

崩れ砕波の場合	$S_u(f) = S_w(f) \sim f^{-3}$	$(f = 8 \sim 50 \text{ Hz})$
巻き砕波の場合	$S_u(f) \sim f^{-5/3}$	$(f = 5 \sim 50 \text{ Hz})$
	$S_w(f) \sim f^{-5/2}$	$(f = 5 \sim 50 \text{ Hz})$

となっている。

図-22 と 23 は，現地海浜で測定した崩れ砕波と巻き砕波の水面と水平流速のスペクトルである (Thornton, 1979)。Thornton は，表面張力が代表因子である場合の水面スペクトルが $S_{\eta}(f) \sim f^{-7/3}$ となることを導びき，巻き砕波では表面張力の効果が大きいことを指摘している。

図-24 は，一様斜面上での上層部の水平・鉛直流速のスペクトルで，高周波側でのスペクトルは $-5/3$ 乗則に従っている。

二次元乱流のパワースペクトルは -3 乗則に，また等方性の乱流は $-5/3$ 乗則に従い，そのエネルギー輸送の機構が異なることが従来の研究で明らかにされている。図-20～24 の実験と実測結果より，砕波による乱れ構造は砕波形式，砕波位置よりの距離，波高と水深などに関係することが分る。

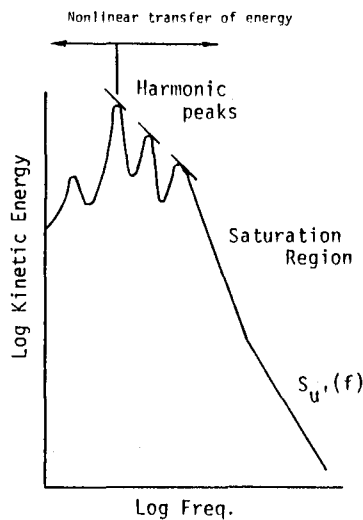
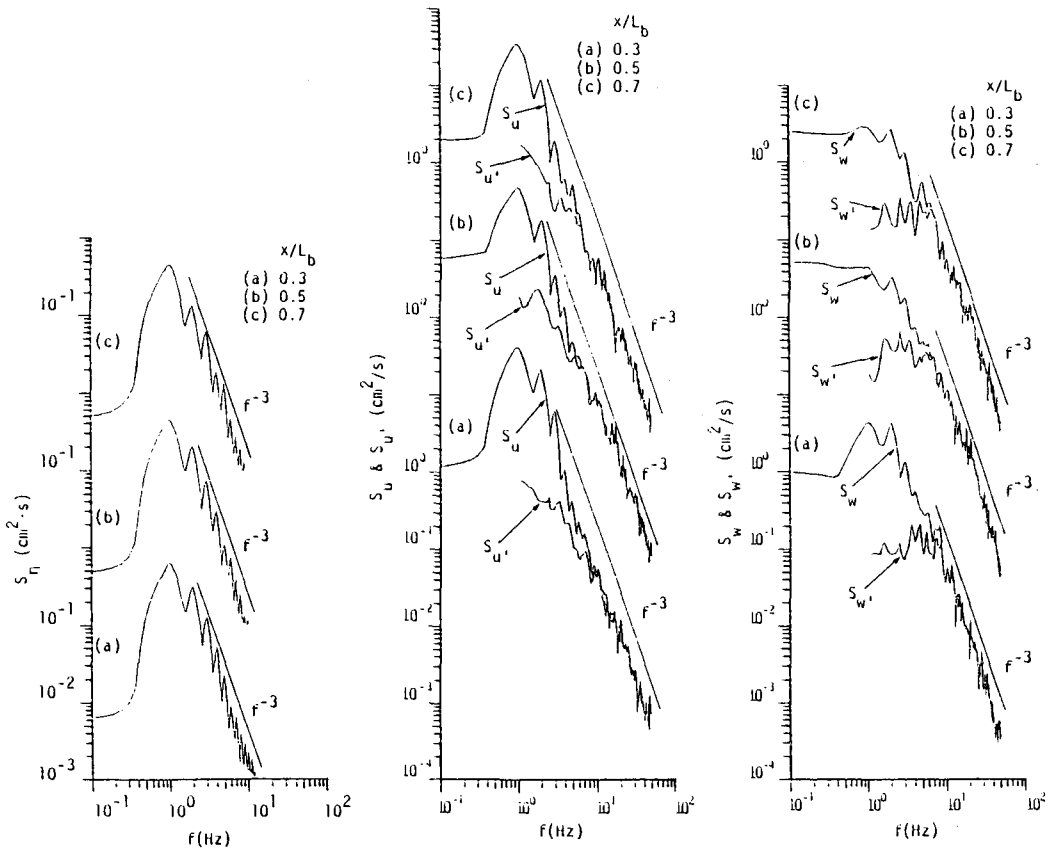


図-19 砕波下の流速変動のパワースペクトルの模式図

表一 2 砕波の周波数スペクトル

(Phillips, 1958; Thornton, 1979)

ス ペ ク ト ル		深 海 域	浅 海 域
水 面 変 動	$S_{\eta}(f)$	$\sim f^{-5}$	$\sim f^{-3}$
流 速 変 動	$S_u(f)$	$\sim f^{-3}$	$\sim f^{-3}$
	$S_w(f)$	$\sim f^{-3}$	$\sim f^{-1}$



図一20 崩れ砕波の $S_{\eta}(f)$, $S_u(f)$, $S_w(f)$ の水平方向変化 ($z/h_b=0.4$) (FFT 法)
(青野ら, 1983 b)

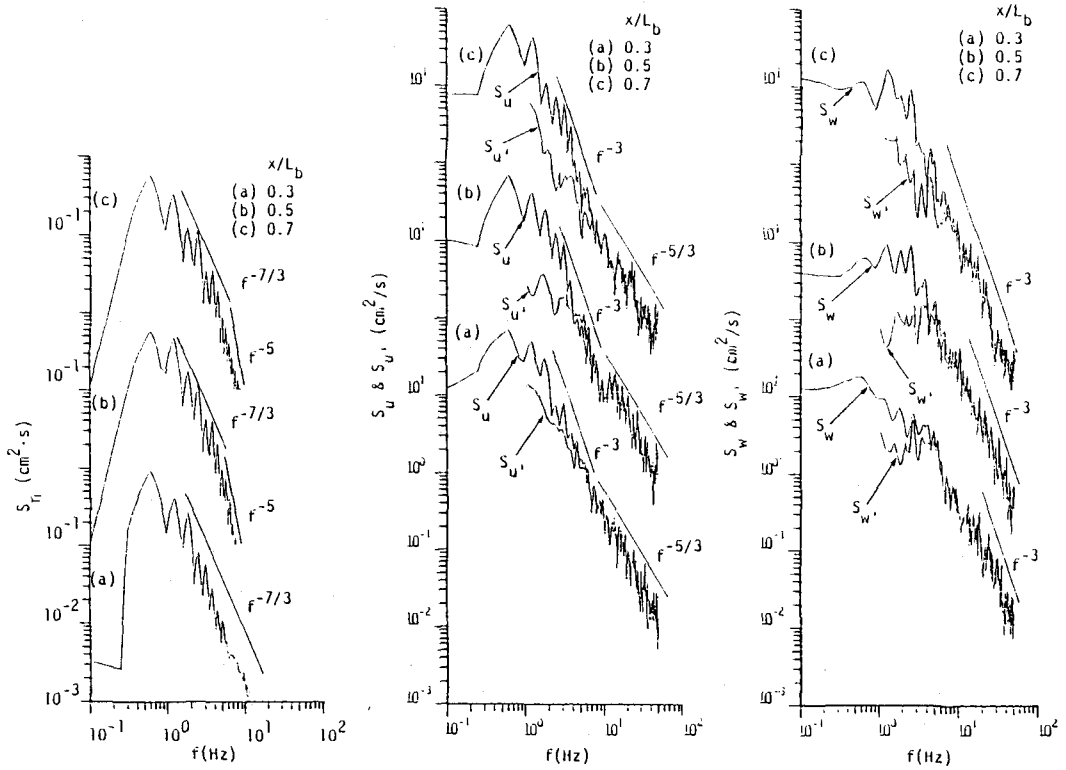


図-21 巻き砕波の $S_{\eta}(f)$, $S_u(f)$, $S_w(f)$ の水平方向変化 ($z/h_b=0.5$) (FFT 法) (青野ら, 1983b)

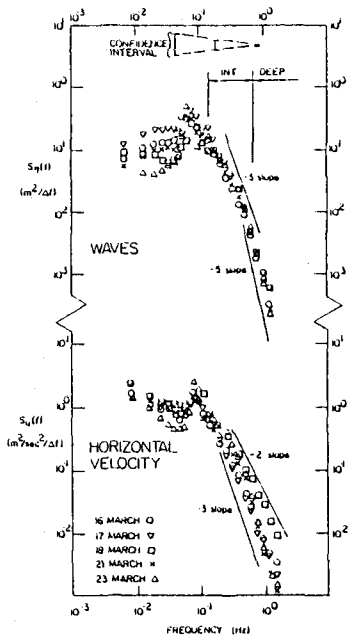


図-22 崩れ砕波のスペクトル：
現地波浪 (Thornton, 1979)

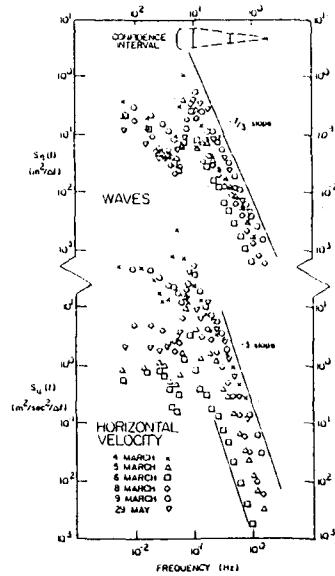


図-23 巻き砕波のスペクトル：
現地波浪 (Thornton, 1979)

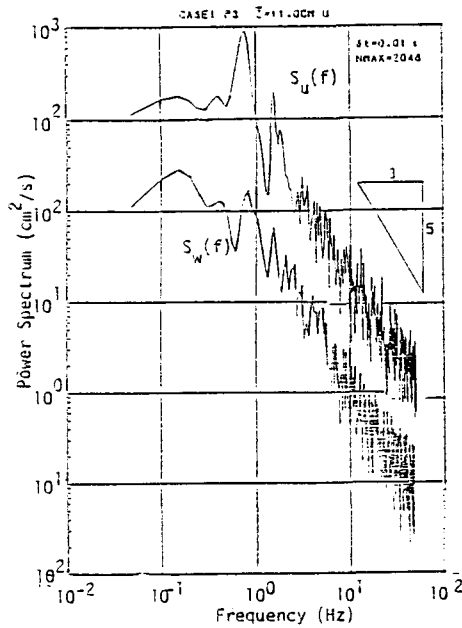


図-24 一様斜面上の砕波のスペクトル
(FFT 法) (灘岡ら, 1982)

4.4 乱れ構造モデル

砕波によるエネルギー逸散の評価には、以下の方法で乱れの効果を取込むことがなされている。すなわち、

- (1) 渦動粘性係数による評価 (井島ら, 1956; 水口ら, 1978)。
- (2) 等方性の乱れを仮定 (Horikawa & Kuo, 1966, 榎木ら, 1972)。
- (3) bore モデルの適用 (LeMéhauté, 1963, Johns, 1980; Madsen, 1981)。

これらの評価モデルの仮定は、その妥当性や物理的意味づけが実験・実測結果などによって、かならずしも十分確認されたものとは云えない。〔最近では泉宮ら(1982)が、流速測定結果より砕波帯内のエネルギー逸散過程を検討している。〕砕波帯内付近でのその他の水理現象の解明にも、乱れの効果を考慮した種々のモデルが提案されているが (酒井, 1980)、エネルギー逸散過程と同様にいずれも砕波の乱れ構造の不明確さによって、十分満足しうる段階のものに達していない。

最近の実験と実測による研究結果に基づき、砕波の乱れの鉛直分布構造モデルが提案されている。堀川ら (1979) は、阿字ヶ浦海岸での現地観測結果よりえられた水面と流速変動のスペクトルより、砕波帯内流速場の三層モデルを提案している。すなわち、

1. 上層 (upper layer) : 砕波により水面より持込まれる乱れが支配的な領域
2. 中層 (middle layer) : 上層で生産された乱れが、ある程度波の場を攪乱している領域
3. 下層 (bottom layer) : 上層の乱れが及ばず、水位変動に伴う水圧変動に従う流速変動が支配的な領域で、水底付近で生産される乱れは存在するがパワーは小さい。

これに対し、灘岡ら (1982) は室内実験結果より、以下の二層のモデルを提案した。

1. 上層 (upper layer) : bore 直下の大規模な渦状の乱れが支配的な領域で、連行気泡の混入は下方に向って減ずるが、高周波の乱れは底層にまで拡散する。
2. 底層 (bottom layer) : 上層よりの高周波の乱れと水底付近で生産された乱れとが共存する領域

上記の2モデルを、前節までに示した種々の実験結果によって見直すと、水平床上の砕波では堀川モデル、また斜面上の bore 状砕波は灘岡モデルに適合する傾向が認められる。本講の冒頭で指摘した海浜地形と砕波の乱れ構造との関係などを考慮すると、堀川・灘岡モデルの間に本質的な差があるとは云えない。

酒井らは乱れ強度の鉛直分布 (図-17) が Battjes & Sakai (1981) が行った steady breaker の乱れの鉛直分布と類似性が高いことから、turbulent wake 理論による分布モデルを提案している。

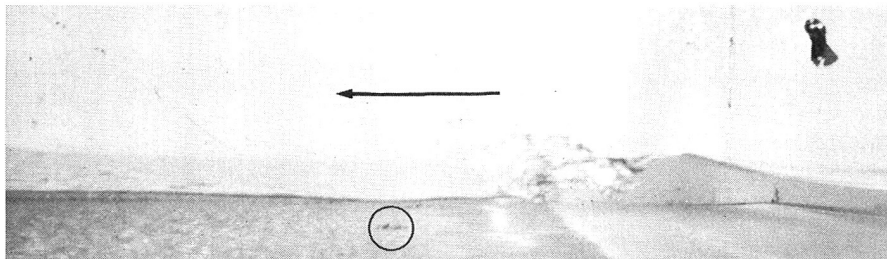
5 乱れの可視化実験

水底面付近で生産される乱れは、砕波の突込み点より岸側の領域で明瞭にその存在が認められる。また現地海浜では、砕波波面背後に底質と共に湧昇する大きな柱状の渦が観測される。

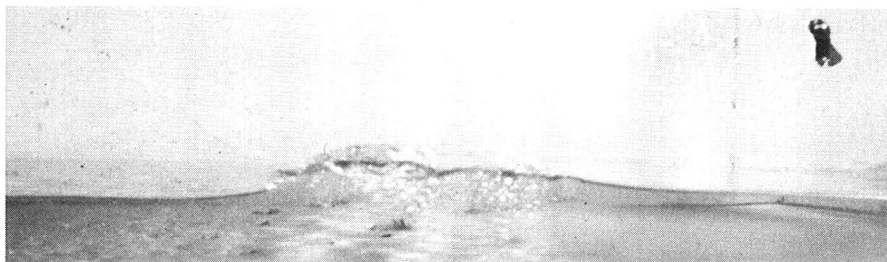
水面よりの水塊・空気泡の突入によって生産される乱れ構造の可視化は、合性洗剤を投入して行った Peregrine & Svendsen (1978)、連行空気泡をトレーサーとした Miller (1976) の実験があるが、水底付近で生産される乱れの発生と構造に着目した可視化実験は、筆者の知る限りでは青野ら (1981) のもののみである。

写真-1 (a) ~ (d) は、Thin-layered milk 法 (林ら, 1981) による水底付近での乱れの可視化実験結果である。この実験結果より、以下の事柄が解かる。波谷部通過時に小規模の乱れ (写真 (a) 中の丸印内) が砕波の突込み点より岸側の水底面に発生し、波頂部の通過時に乱れが急激に発達する。乱れの発生は波頂部通過時にみられ、砕波の突込み点付近に出来る渦対によって湧昇する。写真-2 は、水底に発生した乱れの構造を示したもので、最近注目されている組織的な乱れ構造と非常に類似した三次元構造の乱れである。この様な水底付近に発生する乱れが、水面よりの突入水塊や圧力変動によるものか、あるいは往復流境界層の場合と類似の水平流速減速時における組織的乱れの発生機構によるか、まだ明らかでない。

(a)



(b)



(c)



(d)



写真一 1 水底面付近に発生する乱れの可視化実験結果の例（青野ら，1981）



写真一 2 乱れの拡大写真（青野ら，1981）

6 あとがき

これまで、最近の砕波の乱れに関する実験的研究の成果を紹介すると共に、乱れの構造特性について若干の検討を行って来た。

本講で示した実験結果によると、予期したように、砕波の乱れには水面より持込まれる水塊と空気泡の影響が大きく作用し、その構造は場所的・時間的に変化することが解った。しかし、水平・鉛直両方向の乱れ強さの鉛直分布などの実験結果は、砕波帯内での乱れが比較的等方性のものであることを示唆する一方、乱れのパワースペクトルより見られる乱れ構造は砕波形式によっては二次元乱れの傾向が認められる。このような実験結果間に存在する矛盾は、一つには実験データ数が少ないことによるが、流速測定装置やデータ処理法などの実験方法に関係する部分もあることを指摘しておきたい。

すでに記したように、砕波の乱れ構造の研究が本格的に行われるようになったのはこの二・三年のことであり、現時点では乱れ構造に関して確定的な事を云うべき段階ではない。本講が今後の研究の一助となれば筆者の幸いである。

引用文献

- 青野利夫・大橋正和・服部昌太郎 (1982 b) : 砕波による乱れ構造の実験的研究, 第 29 回海講論集, pp. 159~163.
- 青野利夫・大橋正和・服部昌太郎 (1981) : 砕波点近傍での乱れ特性に関する実験的研究, 第 13 回乱流シンポジウム, pp. 180~183.
- 青野利夫・服部昌太郎 (1983 a) : 砕波による乱れの確率密度, 第 38 回土木学会年講概要集, II, (印刷中).
- 青野利夫・服部昌太郎 (1983 b) : 砕波による乱れの空間特性に関する実験的研究, 第 30 回海講論集 (印刷中).
- 青野利夫・服部昌太郎・上原義和 (1982 a) : 砕波による乱れの時空間特性の実験的研究, 第 14 回乱流シンポジウム, pp. 22~27.
- Battjes, J. A. and T. Sakai (1981) : Velocity field in a steady breaker, J. F. M., Vol. 111, pp. 421~437.
- Bendat, J. S. and A. G. Piersol (1971) : Randon Data : Analysis and Measurement Procedures, Wiley International, pp. 346~354. (得丸英勝他訳, ランダムデータの統計的処理, 培風館).
- Flick, R. E., R. T. Guza and D. L. Inman (1981) : Elevation and velocity measurements of laboratory shoaling waves, J. G. R., Vol. 86, No. C 5, pp. 4149~4160.
- Hayashi, T. and M. Ohashi (1982) : A dynamical and visual study on the oscillatory turbulent boundary layer, Turbulent Shear Flows 3, Springer-Verlag, pp. 18~33.
- 林 泰造・大橋正和・魚谷 忠・志水 毅 (1981) : Thin-layered milk 法による往復流境界層の可視化について, 流れの可視化, Vol. 1, No. 2, pp. 95~100.
- 日野幹雄・柏柳正之・中山哲蔵・原 輝彦 (1980) : 交番振動流における乱れの発生とエネルギー輸送機構, 東工大土木工学科研究報告, No. 27, pp. 1~63.
- 堀川清司・堀田新太郎・水口 優・磯部雅彦 (1979) : 砕波後の波にともなう流速場に関する現地観測, 第 26 回海講論集, pp. 46~50.
- Horikawa, K. and C. T. Kuo (1966) : A study on wave transformation inside surf zone, Proc, 10th ICCE., pp. 217~233.
- 井島武士・高橋智晴・中村憲一 (1956) : 実体写真観測による砕波帯の波の性質について, 第 3 回海講演集, pp. 99~116.
- 泉宮尊司・堀川清司 (1981) : 砕波帯における定常流に関する実験的研究, 第 28 回海講論集, pp. 34~38.
- 泉宮尊司・堀川清司 (1982) : 砕波によるエネルギー逸散過程に関する研究, 第 29 回海講論集, pp. 150~154.

- 岩垣雄一・浅野敏之・小谷敏樹 (1981) : 周期波と流れの共存場における乱れの定義とその特性について, 第 28 回海講論集, pp. 12~14.
- Johns, B (1980) : The modeling of the approach of bores to a shoreline, Coastal Engineering, 3, pp. 207~219.
- 金子 新・白石洋三 (1982) : 巻き砕波の下の流れと地形, 九州大学応用力学研究所報, No. 57, pp. 187~198.
- Klebanoff, P. S. (1954) : Characteristics of turbulence in a boundary layer with zero pressure gradient, NACA., TN 3178.
- Madsen, P. A. (1981) : A model for a turbulent bore, Inst. Hydrodyn. Hydraulic Eng., Tech, Univ. Denmark, Ser. Pap. 28, 149 pp.
- LeMéhauté, B. (1963) : On non-saturated breakers and the wave run-up, Proc. 8th ICCE, pp. 77~92.
- Miller, R. L. (1976) : Role of vortices in surf zone prediction; Sedimentation and wave forces, Beach and Nearshore Sedimentation, S. E. P. M. Spec. Pub. No. 23, pp. 92~114.
- 水口 優 (1982) : 不規則波における乱れ成分の分離について, 第 37 回土木学会年講概要集, II, pp. 863~864.
- 水口 優・辻岡和男・堀川清司 (1978) : 砕波後の波高変化についての一考察, 第 25 回海講論集, pp. 155~159.
- 灘岡和夫・近藤隆道・田中則夫 (1981) : LDA を用いた砕波帯内の流速場に関する実験的研究, 第 28 回海講論集, pp. 24~28.
- 灘岡和夫・近藤隆道・田中則夫 (1982) : レーザードブラー流速計による砕波帯内の流速場の構造の解明, 港湾技研報告, Vol. 21, No. 2, pp. 49~106.
- Peregrine, D. H. (1983) : Breaking waves on beaches, Ann. Rev. Fluid Mech., Vol. 15, pp. 149~178.
- Peregrine, D. H. and I. A. Svendsen (1978) : Spilling breakers, bores and hydraulic jumps, Proc. 16th ICCE, pp. 540~550.
- Phillips, O. M. (1958) : The equilibrium range in the spectrum of wind-generated waves, J. Phy. Oceanogr., Vol. 4, pp. 410~420.
- Rotta, J. C. (1972) : Turbulente Strömungen, B. G. Teubner, Stuttgart. (大路通雄訳: 乱流, 岩波書店, p. 183).
- 酒井哲郎 (1980) : 砕波による乱れ, 1980 年度水工学に関する夏期研修会講義録 B コース, B-4.
- 酒井哲郎・三反畑勇 (1981) : 二次元砕波帯における砕波による乱れの構造, 第 28 回海講論集, pp. 15~19.

酒井哲郎・稲田義和 (1982) : 砕波による乱れの時空間構造とそのモデル, 第 29 回海講論集, pp. 164~168.

榎木 亨 (1973) : 砕波特論, 1973 年度水工学に関する夏期研修会講義録 B コース, B-2.

榎木 亨・岩田好一郎・松本 昇 (1972) : 砕波後の波の変形に及ぼす乱れの効果について, 第 20 回海講論集, pp. 565~570.

Stive, M. J. F. (1980) : Velocity and pressure field of spilling breakers, Proc. 17th ICCE, pp. 547~566.

菅原基晃・吉川 昭・山口隆美 (1983) : 大動脈血液流に現われる乱流, ながれ, 2-1, pp. 3~11.

Tennekes, H. T. and J. L. Lumely (1972) : A First Course in Turbulence, The MIT Press, pp. 1~3.

Thornton, E. B. (1977) : Rederivation of saturation range in the frequency spectrum of wind-generated gravity waves, J. Phy. Oceanogr., Vol. 7, pp. 137~140.

Thornton, E. B. (1979) : Energetics of breaking waves within the surf zone, J. G. R., Vol. 84, No. C 8, pp. 4931~4938.

米山 晋・沢本正樹・山下俊彦 (1982) : 波動下での波連上の乱れ分布と浮遊砂の拡散, 第 35 回土木学会年講概要集, II, pp. 85~86.