

砕波による乱れの空間特性に関する実験的研究

青 野 利 夫*・服 部 昌 太 郎**

1. ま え が き

砕波にともなう乱流構造は、波形崩壊による水塊と連行空気塊とによって高レベルの乱れエネルギーが水面下に持込まれるため、非定常性と同時に間けつ性と空間的局在性の強いものとなる。また、砕波現象自体の持つ変動性のため、乱れの特性は一段と複雑なものとなる。

本研究では、水面変動とコヒーレントな流速変動を組織的な流速成分と定義して、流速測定記録より乱れ成分を抽出し、乱れ成分の抽出法の妥当性ととも、乱れの空間的構造特性の検討を行う。

2. 乱れ成分の抽出法

砕波下での乱流構造を解明する上で、流速測定記録より乱れ成分をどのように抽出するか、すなわち乱れの定義づけが重要となる。

非定常乱流場の流速 $q_b(x, t)$ は、通常、式 (1) のように表わされる。

$$q_b(x, t) = \bar{q}_b(x) + Q(x, t) + q'_b(x, t) \quad \cdots \cdots (1)$$

ここに、 $\bar{q}_b$, Q , q'_b : 流速ベクトルの定常、組織変動および乱れの各成分, x : 位置ベクトル, t : 時間. 式 (1) より流速の乱れ成分は、測定流速記録 $[q_b(x, t) - \bar{q}_b(x)]$ と $Q(x, t)$ との差として得られるので、組織変動成分 Q をどのように決めるかが重要となる。

従来の非定常乱流の研究で採用されている $Q(x, t)$ の定義法には、(1) 移動平均法、(2) 位相平均法、(3) フィルター法などがある。

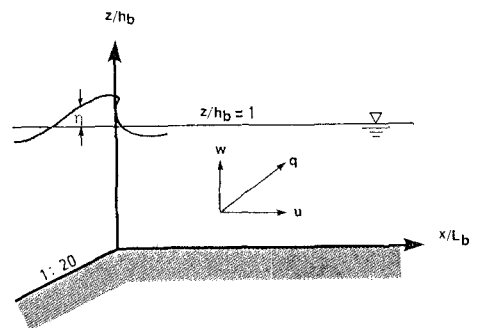
フィルター法では、フィルターの設計遮断周波数 f_c の設定法によって、抽出される乱れ特性が変化する。そこで本研究では、 f_c の決定法に物理的意味づけを与えるため、水口²⁾と同様に水面変動とコヒーレントな流速変動を流速の組織変動成分と定義し、水面特性と流速変動 $q(u, w)$ 間のコヒーレンスを周波数特性とする非再帰型の数値フィルターを使用して、流速の組織・乱れ成分の分離を行う。

3. 実験装置・方法およびデータ処理法

実験は $0.3\text{ m} \times 0.5\text{ m} \times 12\text{ m}$ の両面ガラス張り 2 次元波動水槽内に、1/20 勾配斜面と水平床とよりなる海浜地形を設置して行った。本報での実験装置・測定方法およびデータ処理法は、基本的には前報³⁾のものと同じである。図—1 に本報で使用する座標系と記号を、また表—1 に実験波の諸量をそれぞれ示す。

水面変動は容量式波高計、流速変動は split 型熱膜流速計で計測し、その出力はデータレコーダに収録した。水面・流速変動の測定データは、その 70 秒間分をサンプリング周波数 500 Hz で AD 変換した後、FACOM-M190 (中央大学電算センター) によって処理をした。

流速変動の組織・乱れ成分の分離に使用した非再帰型数値フィルターの打切り項数は $N=162 \sim 422$ で、フィルター項の相対誤差が 1/500 以下となるように項数を決めた。乱れ流速の確率密度関数 $[p(u')] \text{ と } p(w')]$ は、データ数 15 000、分割幅を u'_{rms} または w'_{rms} の 20% として計算した。水面変動 η および流速変動 u と w のパ



図—1 座標系と記号

表—1 実験波諸量

実験	T (s)	H_I (cm)	h_b (cm)	H_b/h_b
1	1.0	2.97	5.0	0.80
2	1.7	2.88	6.0	1.00

注: T : 周期, H_I : 一様水深での波高, h_b : 砕波水深, H_b : 砕波波高
実験—1 は前報³⁾と同じで、砕波型式は崩れ砕波に近いものであり、実験—2 は巻き砕波である。

* 工修 助手 中央大学理工学部土木工学科

** 工博 教授 中央大学理工学部土木工学科

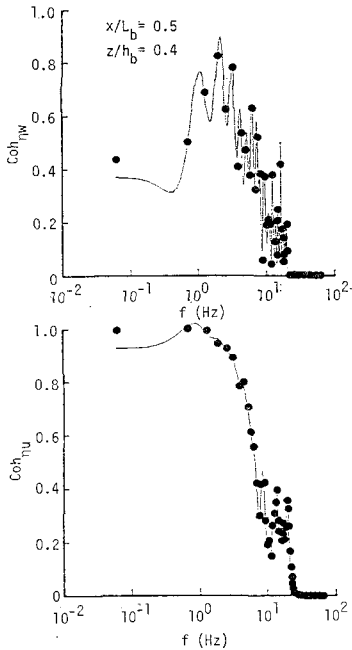


図-2 $Coh_{\eta u}$ と $Coh_{\eta w}$ の計算結果例。・印は計算値，実線は設計数値フィルターの周波数特性である。

ワースペクトル $[S_{\eta}(f), S_u(f), S_w(f)]$ は，FFT 法（データ数：8192，Nyquist 周波数：250 Hz，基本周波数：0.061 Hz，自由度：20，変異係数：0.316）により計算し，乱れ成分のパワースペクトル $[S_{u'}(f), S_{w'}(f)]$ は，それぞれ式（2）により計算した。

$$\left. \begin{aligned} S_{u'}(f) &= S_u(f)(1 - Coh_{\eta u}^2) \\ S_{w'}(f) &= S_w(f)(1 - Coh_{\eta w}^2) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

ここに， f ：周波数， $Coh_{\eta u}$ ： $\eta-u$ 間のコヒーレンス。
 $Coh_{\eta u}$ を使用した理由は，次節で述べる。

4. 流速の乱れ成分と確率密度分布

図-2 は，流速変動の組織・乱れ成分の分離に使用したコヒーレンス $Coh_{\eta u}$ と $Coh_{\eta w}$ ，また 図-3 は分離した w' の確率密度分布の計算例（実験-1， $z/h_b=0.4$ ， $x/L_b=0.5$ ）である。

$Coh_{\eta u}$ と $Coh_{\eta w}$ は場所的に変化するが，図-2 に示すように砕波後の波動場では $\eta-w$ の相互相関は $\eta-u$ に比べて低い。この原因は， η に比べて w の変動が小さく，また，砕波による一波一波の波形変動のため流速測定位置と波形との相対

位置の変化，すなわち $\eta-w$ 間の位相変動によると考えられる。したがって， $Coh_{\eta w}$ を使用して乱れ成分 w' を抽出すると，図-3 の確率密度分布に見られるように，組織（周期）変動成分が乱れ成分に洩れる結果となる。一波一波の変動が小さい砕波点近傍（ $0 \leq x/L_b \leq 0.2$ ）では $Coh_{\eta u}$ と $Coh_{\eta w}$ はほぼ同一の傾向を示すことを考慮し， w' の抽出にも $Coh_{\eta u}$ を使用することとする。図-4 は，測定流速データの処理結果の例を，水位変動とともに示したものである。

図-5 は u' と w' の確率密度分布の計算結果例で，横軸は u'/u'_{rms} （または w'/w'_{rms} ）である（ $u'_{rms} = \sqrt{u'^2}$ ， $w'_{rms} = \sqrt{w'^2}$ ）。図-5 の確率密度分布の計算結果と正規分布との比較より，砕波の乱れには非定常性が存在することがわかる⁴⁾。 u' と w' の確率密度分布の空間変化⁵⁾より，水面からの乱れエネルギー流入が活発となる $0.3 \leq x/L_b$ の区間では skewness は u' ， w' とともに正であり，乱れ流速による乱れエネルギー輸送が，水平・鉛直の正方向（岸向き）に生じていると言える⁶⁾。また，flatness は

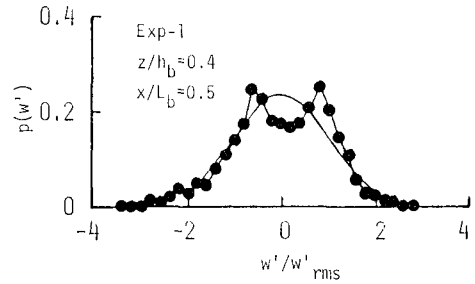


図-3 $Coh_{\eta w}$ を使用して抽出した w' の確率密度分布。実曲線は，平均値。分散が計算値と同一の正規分布曲線である（・印は計算値）。

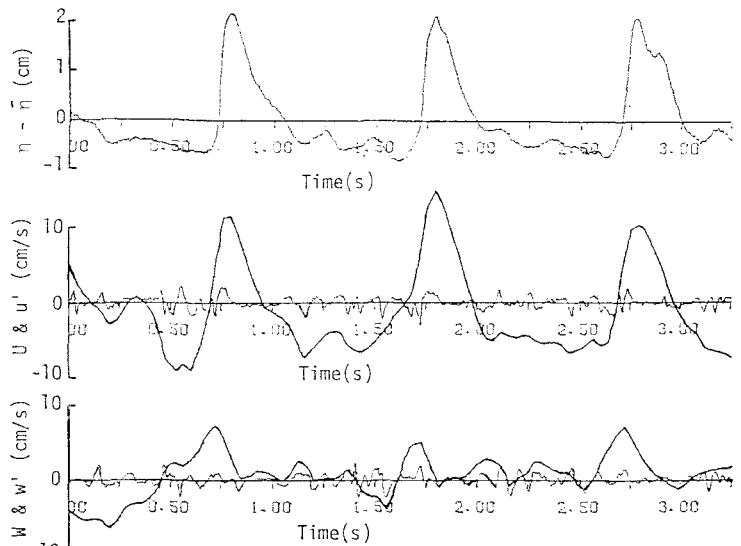


図-4 流速変動データの処理結果（実験-1， $z/h_b=0.4$ ， $x/L_b=0.5$ ）

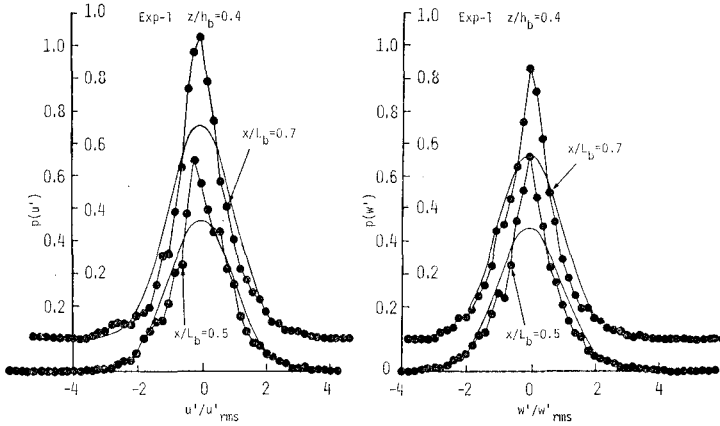


図-5 u' と w' の確率密度分布, $x/L_b=0.5$ の $p(w')$ 分布を 図-3 と比較すると, $\text{Coh}_{\eta u}$ による分離結果が改善され, $p(u')$ と分布形状がほぼ同じとなっている。

$p(u')$ に関しては, 砕波後正規分布の値に漸近する傾向が認められるが, $p(w')$ に関しては明瞭な変化傾向がなく乱れの局在性が強いと言える。以上の事より, 砕波による乱れは異方性の強いものと判断される。

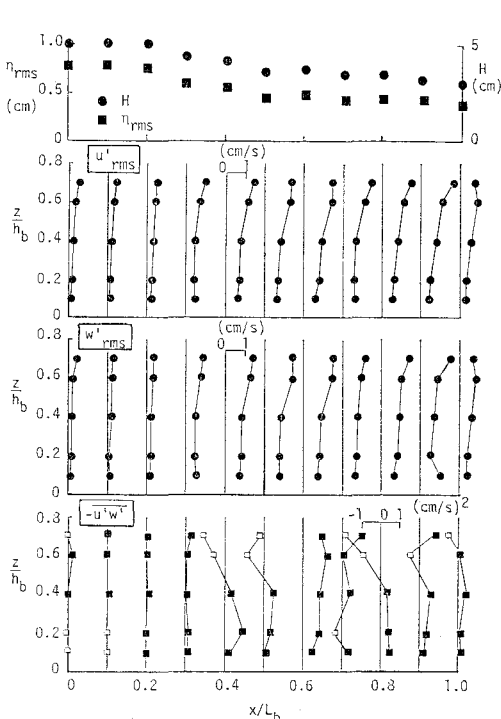
5. 乱れ強度とレイノルズ応力の空間特性

図-6 (a) と (b) は, 波高 H と水面変動の標準偏差 η_{rms} とともに, 乱れ強度 u'_{rms} と w'_{rms} およびレイ

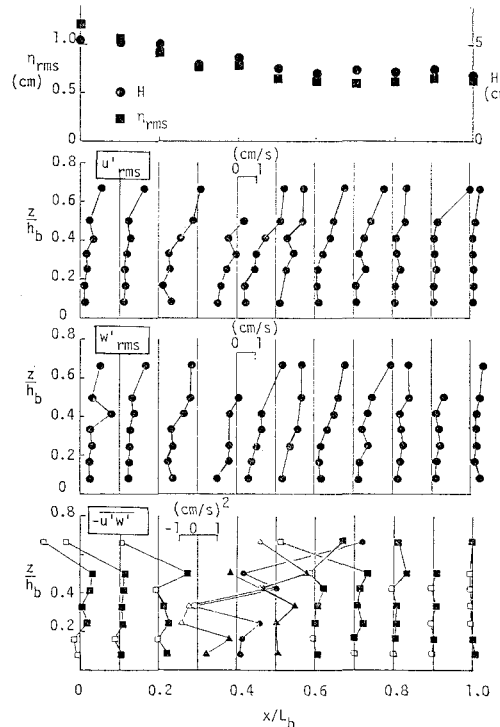
ノルズ応力に相当する $-\overline{u'w'}$ の空間分布を, それぞれ実験-1 と 2 について示したものである。

図-6 に見られるように, u'_{rms} と w'_{rms} の空間分布形状は非常に類似した傾向を示し, $0.2 \leq x/L_b \leq 0.8$ では水面より突入してくる乱れエネルギーが, 水深方向に拡散していることが認められる。特に, この区間の $z/h_b > 0.5$ での乱れ強度の増大は著しく, しかも w'_{rms} が u'_{rms} より若干大きいことは砕波の乱れの特徴の一つである。

$-\overline{u'w'}$ の空間分布にも, 実験-1 と 2 との間に類似の傾向がある。すなわち, $z/h_b > 0.4$ の水面に近い領域では, 砕波点近傍より波の進行方向に $-\overline{u'w'}$ の符号が負・正・負と変化している。 $-\overline{u'w'}$ は, 乱れの時間スケールに比べて十分長いデータ記録時間(実験-2では入射波 20 波分に相当)の平均であることを考慮すると, 前述の $-\overline{u'w'}$ の変動は, 図-7 の様な比較規模の大きい渦状の流速場が, 波形崩壊によって定常的に形成されていることを示唆する。巻き砕波(実験-2)の場合には, 砕波波面の突入により 図-7 の様な渦が生成される



(a) 実験-1



(b) 実験-2

図-6 u'_{rms} , w'_{rms} と $-\overline{u'w'}$ の空間分布。 $-\overline{u'w'}$ 分布の中黒と白抜き記号は, $-\overline{u'w'}$ の正と負を示す。

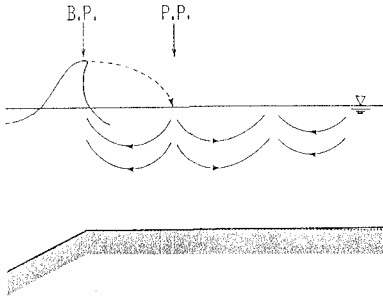


図-7 砕波によって形成される渦状の定常流速場(模式図)

ことは容易に説明しうる⁷⁾。実験-1 は砕波形式が崩れ砕波に近いものの、波頂部に弱い巻き砕波が認められるため⁸⁾、実験-2 と同傾向の分布が生じたと考えられる。

6. パワースペクトルの空間変化

図-8 は、実験-1 ($z/h_b=0.4$)、図-9 は実験-2 ($z/h_b=0.5$) の $x/L_b=0.3, 0.5, 0.7$ の3か所での流速 u と w 、および乱れ流速 u' と w' のパワースペクトルをそれぞれ示したものである。スペクトル計算結果によると $0.3 \leq x/L_b \leq 1.0$ の全測点でのスペクトル形状は、両実験とも基本的にはほとんど同じ傾向を示すことが認められた。

砕波形式が崩れ砕波に近い実験-1 では、 S_u と S_w はともに周波数域 $3 \text{ Hz} < f < 50 \text{ Hz}$ で -3 乗則に従っている。 S_u と $S_{u'}$ 、および S_w と $S_{w'}$ との比較より、 $8 \text{ Hz} < f$ の高周波域でのエネルギーは、大部分が乱れ成分のものであると言える。紙数の都合上割愛した $0 \leq x/L_b \leq 0.2$ でのスペクトルには、 $f > 20 \text{ Hz}$ の高周波側で $-5/3$ 乗則の存在が認められた(後出の図-10 より、ノイズであると推定される)。巻き砕波の実験-2 では、 S_u と S_w には以下の関係が認められる。

$$\begin{aligned} S_u &\sim f^{-3} & (2 \text{ Hz} < f < 8 \text{ Hz}) \\ &\sim f^{-5/3} & (8 \text{ Hz} < f < 50 \text{ Hz}) \\ S_w &\sim f^{-5/2} & (2 \text{ Hz} < f < 50 \text{ Hz}) \end{aligned}$$

また、 $8 \text{ Hz} < f < 50 \text{ Hz}$ の高周波域では、ほとんどが乱れ成分である。

Phillips⁸⁾ と Thornton⁹⁾ は、エネルギー平衡域での砕波の周波数スペクトルを式(3)で与えている。

$$\left. \begin{aligned} \text{深海波: } S_\eta(f) &\sim f^{-5} \\ S_u(f) &= S_w(f) \sim f^{-3} \\ \text{浅海波: } S_\eta(f) &\sim f^{-3} \\ S_u(f) &\sim f^{-3} \\ S_w(f) &\sim f^{-1} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

図-8 に見られるように、入射波の3倍周波数より高周波側では、 $u \cdot w$ のスペクトルは式(3)の関係と良好な一致を示している(S_η の計算結果より、 $3 \text{ Hz} < f <$

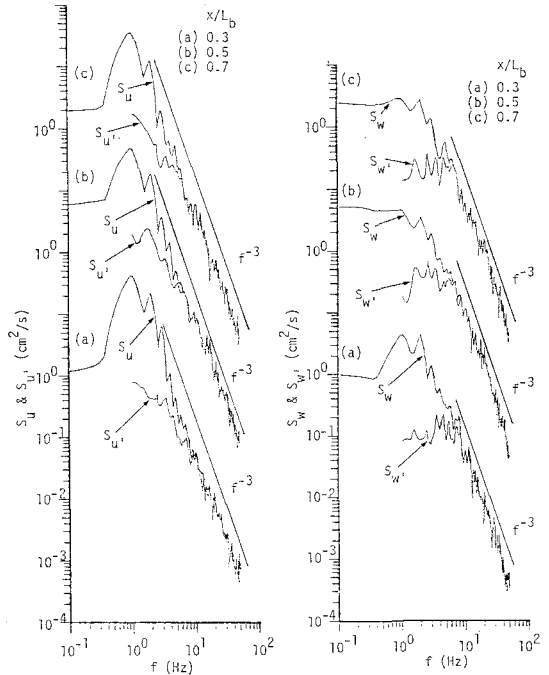


図-8 パワースペクトルの計算結果例(実験-1, $z/h_b=0.4$)

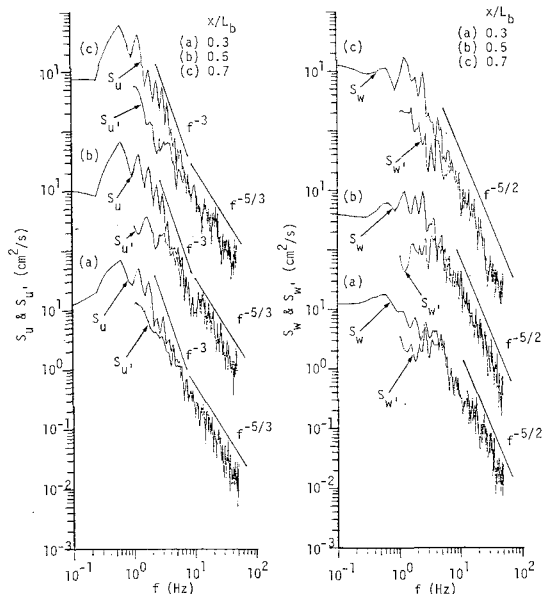


図-9 パワースペクトルの計算結果例(実験-2, $z/h_b=0.5$)

8 Hz では f^{-3} 、 $8 \text{ Hz} < f < 50 \text{ Hz}$ では f^{-5} の関係がえられた。したがって、崩れ砕波はエネルギー平衡状態で発生しているとも言える。2次元乱流のスペクトルは -3 乗則に従うことから、崩れ砕波の高周波側の乱れの構造は2次元性が高いと言える。

巻き砕波では、水塊の突入によって水面より乱れが生産されるため、自由乱流に見られる $-5/3$ 乗則に従うスペクトルが、 S_u の高周波側に認められる。一方、 S_w は $-5/2$ 乗則に従っており、 S_u と S_w のスペクトル形状の違いが、巻き砕波での乱れが異方性の強い 3 次元構造のものであることに起因するのか、或いはデータ処理法によるものか、現時点では未だ解明されていない (S_v は、 $2\text{ Hz} < f < 5\text{ Hz}$ で $-7/3$ 乗¹⁰⁾、 $f > 5\text{ Hz}$ で -5 乗則に従っている)。

エネルギースペクトルの空間変化を検討するため、

① 入射波の基本周波数 (組織変動成分)、② $f=10\text{ Hz}$ (乱れ成分)、③ $f=50\text{ Hz}$ (高周波乱れ成分) のエネルギー密度の x/L_b 方向変化を、 S_u と S_w の計算結果より実験-1 は $z/h_b=0.6$ 、実験-2 は $z/h_b=0.5$ に対して示したものが、図-10 と 11 である。図-10 と 11 より、砕波形式によるエネルギー変化の過程に、大きな差があることがわかる。すなわち、

1) 水平方向流速の組織成分は、図-6 に示される波高変化に対応して減少する。崩れ砕波では鉛直方向成分は $x/L_b=0.4$ まで急速に減少し、以後減少傾向はゆるやかとなる。一方巻き砕波のそれは、砕波の突込み点以後減少する。

2) 乱れ成分のエネルギー密度は、水平・鉛直方向とも砕波点より突込み点にかけて急増する。そして、崩れ

砕波では $0.4 < x/L_b < 0.8$ ではほぼ一定であるが、巻き砕波では $0.4 \leq x/L_b$ で急減する。

3) 50 Hz の高周波域での変化は、巻き砕波の場合には 10 Hz での変化と良好な相関を示す。しかし、崩れ砕波では、 10 Hz との明瞭な相関はなく、また $0 \leq x/L_b \leq 0.4$ ではエネルギーレベルは非常に低い。従って、崩れ砕波の S_u と S_w で $-5/3$ 乗則に従う高周波成分は、ノイズであると考えられる。

7. ま と め

本研究では、水面変動と相関の高い流速変動を流速の組織変動成分として、乱れ成分の分離を行った。 u' と w' の分離は、 Coh_{nu} を周波数特性とする数値フィルターの使用によって行うことができた。

乱れ強度、レイノルズ応力、パワースペクトルなどの乱れの統計諸量の水平・鉛直二方向の変化より、砕波の乱れの空間特性を検討した。この結果、砕波の乱れは砕波形式によって、その構造が大きく支配されていること、特にそれが砕波面の崩壊による水面からの乱れの生成過程の影響が大きいたことが明確となった。

本研究は、多くの方がたの協力と種々の有益な助言と討議の支援の下になされた。また、本研究の一部は、文部省科学研究費一般研究 C によった。

参 考 文 献

- 1) 服部昌太郎：砕波による乱れの構造，1983 年度水工学に関する夏期研修会講義集，B コース，B-5-1～24，1983。
- 2) 水口 優：不規則波浪における乱れ成分の分離について，土木学会第 37 回年次学術講演会講演概要集 II-432，1982。
- 3) 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 29 回海岸工学講演会論文集，pp. 159～163，1982。
- 4) Bendat, J. S. and A. G. Piersol: Random Data: Analysis and Measurement Procedures, Wiley International, pp. 346～354, 1971。
- 5) 青野利夫・服部昌太郎：砕波による乱れの確率密度，土木学会第 38 回年次学術講演会講演概要集 II-166，1983。
- 6) Rotta, J. C.: Turbulente Strömungen, B. G. Teubner, Stuttgart, 1972 (乱流，大路通雄訳，岩波書店，183 p., 1977)。
- 7) 榎本 亨：砕波特論，1973 年度水工学に関する夏期研修会講義集，B コース，B-2-1-37，1973。
- 8) Phillips, O. M.: The equilibrium range in the spectrum of wind-generated waves, J.F.M., 4, pp. 426～434, 1958。
- 9) Thornton, E. B.: Rederivation of saturation range in the frequency spectrum of wind-generated gravity waves, J. Phys. Oceanography, Vol. 7, pp. 137～140, 1977。
- 10) Thornton, E. B.: Energetics of breaking waves within the surf zone, J. Geophys. Res., Vol. 84, No. C8, pp. 4931～4938, 1979。

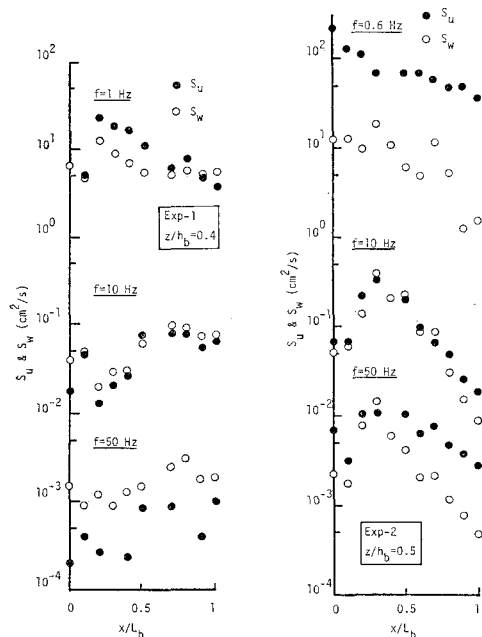


図-10 スペクトル密度の x/L_b 方向変化 (実験-1, $z/h_b=0.6$)

図-11 スペクトル密度の x/L_b 方向変化 (実験-2, $z/h_b=0.5$)