

インターナルジャンプの変動スペクトルに関する研究

岩 崎 敏 夫*・上 原 忠 保**

1. はじめに

二成層密度流の内部境界面に水深の変化が生ずる場合それはインターナルジャンプ（または internal hydraulic jump）と呼ばれ、ふつうの跳水現象（hydraulic jump）と対比される。インターナルジャンプは河口など密度差が存在していて幅が急変する場合などに存在することがあることが Stommel & Farmer¹⁾ によって示されている。Schijf & Schönfeld²⁾ は初めてインターナルジャンプにふれ、ジャンプの際エネルギー損失がある場合に不安定であることを示唆した。Yih & Guha³⁾ は上層および下層に対する各モーメント方程式によりジャンプ前後の conjugate state の数を図式的に調べ、どちらかの層の内部フルード数が卓越して大きい場合には一義的に決定されることを示した。

二層系のインターナルジャンプの場合、図-1 のような組合せが考えられるが彼らはケース 1, 2, 3 について実験を行なっている。浜田⁴⁾ はエネルギー損失の生ずる

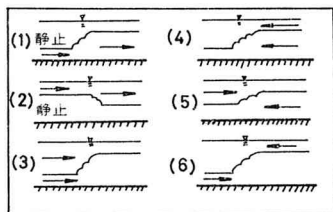


図-1 インターナルジャンプの組合せ

ジャンプを安定であると考え、上層下層同時にモーメント方程式を適用して、ジャンプの成立を吟味し、さらに、川幅の増加および境界面摩擦を考慮した時には、流れている層の水深が減少することを示した¹²⁾。椎貝⁵⁾ は Yih の解析に基づきケース 2 についてエネルギー、水面変化を求め実験を行なった。筆者の一人⁶⁾ はエネルギー損失も獲得もないジャンプが存在し得るかの立場から計算を行ない、その条件をケース 3, 4 の場合に示した。Wood⁷⁾ は Ellison & Turner の entrainment の考え方に基づくモーメントの式によって、ジャンプ下流の内部フルード数が上流の内部フルード数に依存することをケース 1 の実験で確かめている。

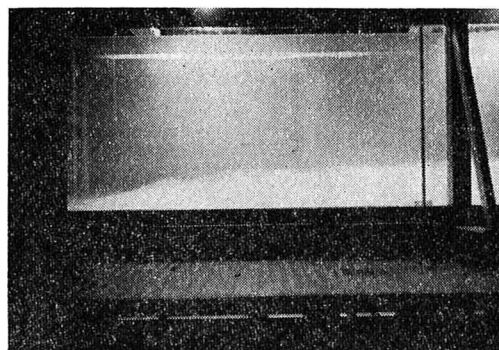


写真-1 インターナルジャンプ

これらの研究によってインターナルジャンプの際、エネルギー損失のあることはほぼ認められると思われるのであるが、ジャンプ内の損失機構は全く未知であって、特に不安定な内部境界面におけるジャンプの場合、エネルギー損失を起こすために発生すると思われる攪乱の特性は興味のある問題である。

そこで、われわれはまず、二成層境界面におけるインターナルジャンプ（ケース 1, 上層静止、下層流動）を実験水槽で発生させ、完全なインターナルジャンプが起こった場合の状況を明らかにし、次にこの状態における濃度分布を測定することにより密度分布およびスペクトルを求め、攪乱の定性的特性を考察した。

2. 実験装置および実験方法

実験装置は図-2 に示すとおりで、長さ 5.4 m、幅 0.5 m、深さ 0.8 m の実験水路、塩水および淡水の各貯水槽、ポンプ、高水槽、流量測定装置、流量調節バルブよりなっており、淡水および塩水を同時に 15 l/sec まで流すことができる。実験水路の中央部 3 m は強化ガラス (10 mm 厚)、両端部は塩化ビニル (20 mm 厚) 製である。両端部には、長さ 66 cm、幅 49.6 cm、深さ 83 cm の水槽Ⅰと長さ 70 cm、幅 49.6 cm、深さ 83 cm の水槽Ⅱが挿入され適当な高さに固定できる。各水槽と実験水路は丸ゴム (6φ) により水密が保たれているので、塩水は水槽Ⅰの下から流入し成層部を経て水槽Ⅱの下から流出する。淡水は水槽Ⅰの内部より注入され、水槽Ⅱの全水深調節用の堰より越流し、サイフォン管で排水される。

水槽Ⅰを所定の上流塩水水深 h_2 に設置し、水槽Ⅱを有効な下層取水のできる高さ h_2'' に固定してから、淡水

* 正会員 工博 東北大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 東北学院大学講師 工学部土木工学科

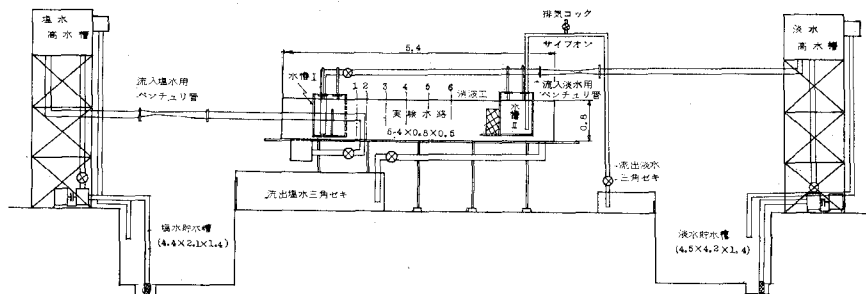


図-2 実験装置および測定断面 (単位 m)

湛水後静かに塩水を注入して成層状態をつくる。この時塩水水深は h_2 , h_2'' 以上とする。非定常時の全水深の変化を防ぐため淡水を補給しつつ流入流出各バルブの調節により流量をバランスさせながら、増加させてゆくと、ある流量で水槽Ⅰの内部に入り込んでいた塩水層が排出してジャンプが定常的に発生する。流入流出量の測定は塩水淡水とも、ベンチュリ管、三角ゼキによって行なった。

濃度分布の測定断面は水槽Ⅰの右端をジャンプの始端 $x=0$ cm とし、流下方向に $x=20, 40, 80, 120, 165, 210$ cm の6断面で行なった。測定はこれらの断面について淡水中より 1cm 間隔で塩水水深に応じて約 40 秒間である。

濃度分布の測定方法は、従来本研究室で行なわれてきたと同様で、塩水の抵抗変化を検出することによって標準溶液のキャリブレーションから密度を求めるものである。記録にはデータレコーダー(ソニー製, RFM-15, および TEAC 製, R351 F) 2台を使用した。濃度測定の際には標準溶液の入ったビーカー水面も含めて、すべてアースによって電位を同一にすることが肝要であってキャリブレーションと実測時の再現性が得られる。キャリブレーション曲線は最小二乗法で二次曲線近似により求めた。データレコーダーの記録は 45 c/sec を遮断周波数とする low pass filter によって雑音を除去した後、A-D 変換器(江藤電気製)により 0.150 sec ごとにデジタル化し、紙テープに打ち出させた。実験条件は全水深 $h=60, 70$ cm, 流入塩水水深 $h_2=2.35, 3.0, 4.0, 5.0$ cm, 流入塩水量 $Q_2=2.1\sim 5.7$ l/sec, 密度差 $\Delta\rho=0.0040\sim 0.0180$, 測定時間は平均 15 分である。

3. 実験結果および考察

(1) インターナルジャンプの発生について

2. で述べたように、流入流出各調節バルブによって塩水流量をバランスさせながら増加させてゆくと、その流量、密度差、上流塩水水深に対して conjugate downstream depth が存在し、下流塩水水深がこれに等しい時いわゆる完全ジャンプとなり、大きい時はもぐりジャンプ、小さいときは射流の状態で吹出す。これは hydraulic jump と全く同じである。

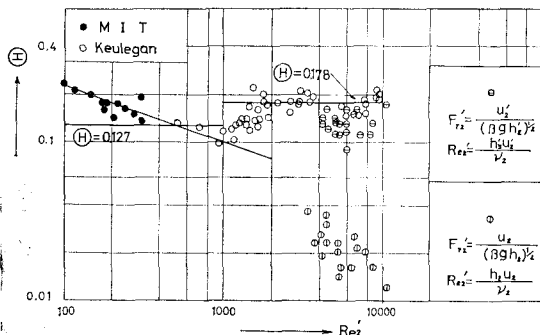
さらに完全ジャンプの場合はローラーに相当する部分が存在し、終端部から始端部にかけて塩水が落下する。落下の際塩水塊は、安定を失って一部は表面に生じた波高の小さな内部波の先端から淡水中に混合してゆき、塩水中に回収されず始端部にくさび状に溜まる。しかし、他の部分は再び塩水中に回収され、その際上層淡水も一緒に混入する。淡水混入の事実は、淡水の注水を断って実験を続けると次第に塩水水深が増加しついに淡水部分が消失すること、および時間とともに塩水が薄まってゆくことからうかがえる。Wood⁷⁾ もこの塩水のうすまりを指摘している⁷⁾。このように流出入量を等しくした場合、完全ジャンプからもぐりジャンプとなるため定常的なジャンプは持続することができない。

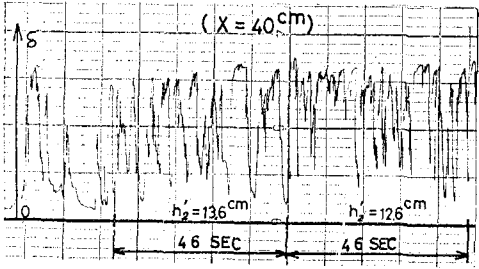
われわれは、実験を行なうにあたり流入量 Q_2 より流出量 Q_2' をわずかに多くし、さらに淡水を補給して全水深を一定に保ち、実際に濃度分布測定時間内は定常と思われるジャンプ形を維持することができた。 $4Q_2=Q_2'-Q_2$ とすると $4Q_2$ は最大 15% のオーダーである。

Keulegan は相対速度差によって内部境界面に生ずる内部波の安定条件として Keulegan 数 θ を提示した。下層流の場合, Ippen & Haleman は

$$\theta^3 = \frac{\nu_2 g \Delta\rho/\rho}{u_2^3} = \frac{1}{u_2^2/\varepsilon g h_2} \times \frac{1}{u_2 h_2/\nu_2} = \frac{1}{F_{r2}{}'^2 \cdot R_{e2}'}$$

によって限界 Keulegan 数を求めている。インターナルジャンプの射流部および常流部における Keulegan 数を

図-3 Keulegan 数と R_{e2}' 数の関係



図—4 濃度変動の記録

計算してみると図—3のようになる。ただし、常流部の水深 h'_2 は濃度変動記録で最初に50%以上を示した測点の $x=80, 120, 165$ cm の平均水深である。 R_{e2}' が大きく乱流領域に属しているが、射流部は完全に不安定領域に入っており常流部は限界値よりわずかに不安定となっている。このことはローラー部に主に混合が起きていることを裏書きしており、インターナルジャンプは激しい攪乱によって不安定な状態でのみ存在しうること、およ

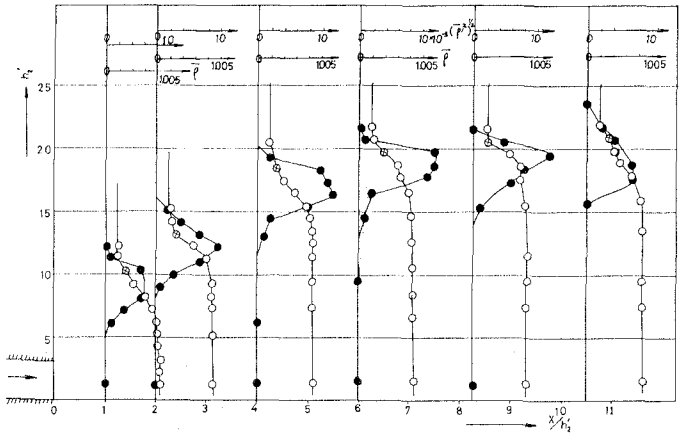
び不安定による混入は主にローラー部分に限られており、われわれの実験を行なった状況でのみ存在しうことを意味している。

(2) 密度分布・変動の強さ

図—4はローラー部に属する測点 ($x=40$ cm) の収録記録を自動平衡型記録計に再生したものである。紙テープに鑽孔された平均 40 sec 間のデータの時間的平均密度 $\bar{\rho}$ およびその変動 ($\rho' = \rho - \bar{\rho}$) の強さ $\{(\rho'^2)^{1/2}\}^{1/2}$ を内部フルード数の (1) 小さいもの, (2) 大きいものについて図—5に示す。図—5より密度は連続的に変化しており、わずかではあるが底面近くまで増加を示している。なお、⊗印はわれわれの用いた境界面である。また変動は境界面付近に集中しており、内部フルード数が大きくなると広範囲にわたっていることがわかる。以上ローラー部の攪乱による拡散および内部波が下流に伝わっており流下とともに減衰はするがその程度は hydraulic jump のように急激ではなくなり下流まで伝播する⁸⁾。

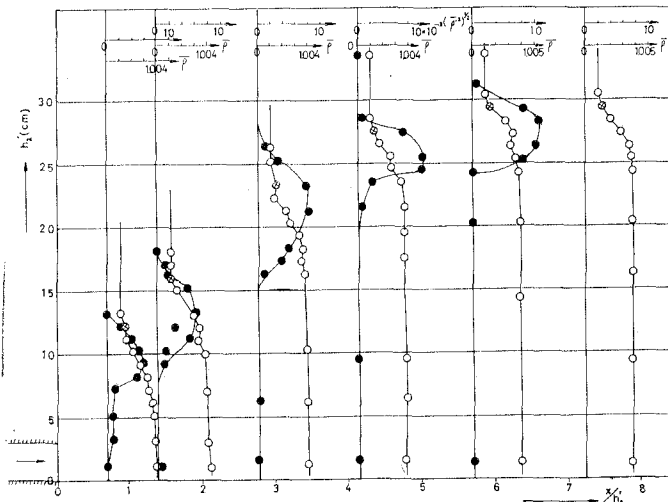
図—5 (1) 密度分布

- $\bar{\rho} (F_{r2}' = 4.6)$
- $\{(\rho'^2)^{1/2}\}^{1/2}$
- ⊗ 境界面



図—5 (2) 密度分布

- $\bar{\rho} (F_{r2}' = 6.6)$
- $\{(\rho'^2)^{1/2}\}^{1/2}$
- ⊗ 境界面



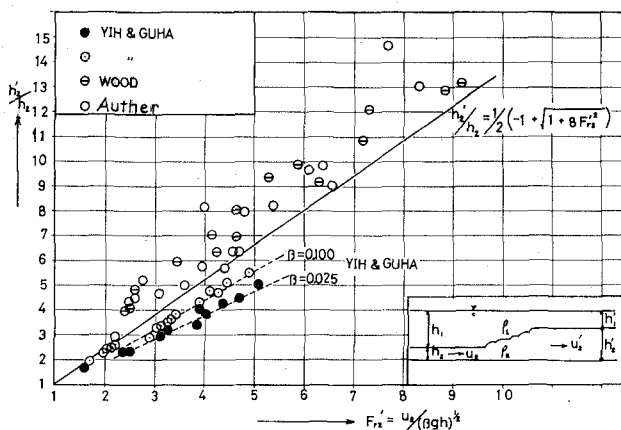


図-6 Conjugate depth

(3) Conjugate depth およびジャンプの長さ

インターナルジャンプ前後の Conjugate depth は運動量方程式，連続の式を用いて hydraulic jump と同形の理論式が得られている^{2), 4), 6)}。図-6 を参照して，

$$h_2'/h_2 = 1/2(-1 + \sqrt{1 + 8 F_{r2}'^2})$$

ここで， $F_{r2}'^2 = u_2^2 / \beta g h_2$ ， $\beta = (\rho_2 - \rho_1) / \rho_2$

またこのとき，エネルギー損失が存在して，

$$\Delta E = \rho_2 \varepsilon g \frac{(h_2' - h_2)^3}{4 h_2 h_2'} Q_2 > 0, \quad \varepsilon = (\rho_2 - \rho_1) / \rho_1$$

である。

図-6, 7 は，conjugate depth ratio h_2'/h_2 および目視観測によるローラー長 l_1 と最高点までの長さ l_2 と内部フルード数 F_{r2}' との関係を示す。実線は理論式，破線は stanisol (0.77) と CCl_4 (1.59) の混合物を塩水の代りに用いて行なった Yih & Guha²⁾の実験式で β がパラメータとなっている。われわれの実験範囲 ($\beta = 0.0040 \sim 0.0149$) では β による変化は明確にあらわれなかった。Yih & Guha の実験式はかなり小さく β の小さいほうが理論式からの差が大きい。○印は淡塩水を用いた時の Wood の実験結果であり，われわれと非常に近い値となっている。ジャンプの長さはローラー長，最高点までの長さとともに，ほぼ一定比 (4~6) である。

(4) 濃度変動のスペクトル

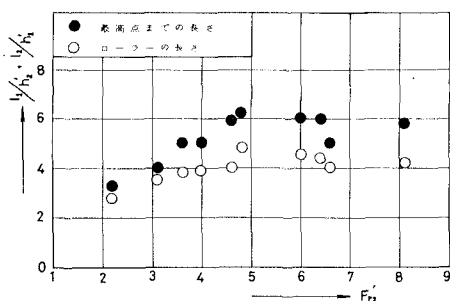


図-7 ジャンプの長さ

以上のように境界面付近には集中した濃度変動があることがわかったが，Wiener-Khinchine の関係式によってスペクトルを求めた。自由度は 30，ウィンドウは hanning である。

図-8 に流下方向のスペクトルの変化を， $x=20, 40, 80, 210$ cm について示した。図-8 (1) は $F_{r2}'=4.6$ ，図-8 (2) は $F_{r2}'=6.6$ の場合である。ここで流下方向の変化は境界面の決め方によって異なってくると思われるので平均密度の近い測点を比べてある。またスペクトルの鉛直方向の変化をローラー部に相当する $x=40$ cm と下流の $x=120$ cm についてそれぞれ 図-9 (1) および 9 (2) に示した。

図-8 (1) によると流下とともに卓越周波数が $x=20$ cm の 0.6 c/s から $x=40$ cm の 0.9 c/s へといったん高周波側へ移ったのち，下流の測点で再び低周波側へ移行していること，および流下とともに高周波側でエネルギーレベルが減少し，逆に低周波側では増加していることがわかる。またローラー部 ($l_1=70$ cm) の測点 $x=20, 40$ cm では相対的に高周波側で短周期成分が発達している。さらに， $x=20$ cm では 0.6 c/s から高周波側へかけてエネルギーは 3 乗に比例して減少し， $x=40$ cm では 0.9 c/s より 3 乗に比例して減少している。以上の 2 点は従来，提唱されている連続的密度分布の場合の内部波の -3 乗則に近い減衰を示している。下流の測点 $x=80$ cm, 210 cm のスペクトルの減衰はずっと急である。始端部からローラー部にかけて混合が激しく，下流では次第におだやかになってゆくことがわかる。

図-8 (2) をみると，図-8 (1) でみられた流下にもなる卓越周波数の移行，エネルギーレベルの傾向はいっそう，はっきりあらわれている。また全体的に短周期成分が図-8 (1) の場合よりローラー部 ($l_1=110$ cm) で発達しており， F_{r2}' が大きくなると混合が激しくなっていることがわかる。

次に、図-9 (1) によってローラー部の測点 $x=40$ cm における鉛直方向のスペクトル変化をみると、境界面より下方の測点の方が高周波側でエネルギーが大きくなっており、卓越周波数も高周波側にある。また、これらの傾向は下流の測点 $x=120$ cm においても同様であることが図-9 (2) からわかる。さらに、両図よりローラー部では高周波側でエネルギーレベルが鉛直方向で同程度のオーダーであるのに対し、下流部では大きな差があり、ローラー部で、鉛直方向に広範囲に混合が起きているものと思われる。

4. 結 論

以上、上層静止、下層上向きインターナルジャンプの実験によって得られた結果をわれわれの実験範囲内で要約すれば、

(1) インターナルジャンプは、多くの点で hydraulic jump に類似しているが、大きく相違する点は、ローラー部に攪乱が存在し、境界面の不安定が生じていることである。

(2) 上記の攪乱はきわめて不安定であって、厳密な意味での定常的なインターナルジャンプの成立は不可能である。すなわち主としてローラー部で下層塩水中に淡水が混入し、流入量と流出量のバランスしたジャンプは維持できない。

(3) 濃度変動のスペクトルを示す 図-8, 9 によればローラー部におけるスペクトルの形は従来提唱されてきた内部波のスペクトルに似た傾向がある。しかしローラー下流部のスペクトル形は、その減衰はきわめて急である。

濃度変動の測定と流況をもとにして考察を行なったがこのような大きな攪乱を伴う現象における境界面の挙動は興味ある問題であって今後さらにその機構を明らかにしてゆきたいと思っている。

最後に、データの解析などにあたり東北工業大学工学部土木工学科の阿部至雄助教授に助言をいただいた。また実験には国土開発の畑中仁一郎氏(当時東北大学学生)の助力を得た。ここに記して感謝の意を表したい。

参 考 文 献

- 1) Stommel, H. and H. G. Farmer : Abrupt change in width in two-layer open channel flow, Jour. Mar. Res., Vol. 11, No. 2, 1952.
- 2) Yih, C.S. and C.R. Guha : Hydraulic jump in a fluid system of two layers, Tellus, Vol. 7, 1955.
- 3) Schijf, J. B. and J. C. Schönfeld : Theoretical considerations on the motion of salt and fresh water, Proc. Minn. Intern. Hydr. Conv. I.A.H.R., 1953.
- 4) 浜田徳一 : 内部ジャンプについて, 第5回海岸工学講演会講演集, 1958.
- 5) 椎貝博美 : Some aspects and experiments on the density current, Trans. of J.S. C.E., No. 83, July, 1962.
- 6) 岩崎敏夫 : 密度流の諸問題, 水工学シリーズ 66-15, 1966.

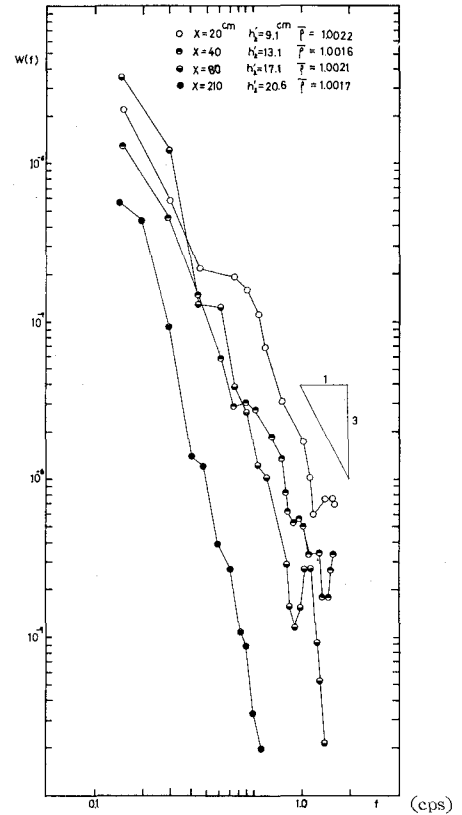


図-8 (1) 流下方向の濃度変動のスペクトル変化 ($F_{r2}=4.6$)

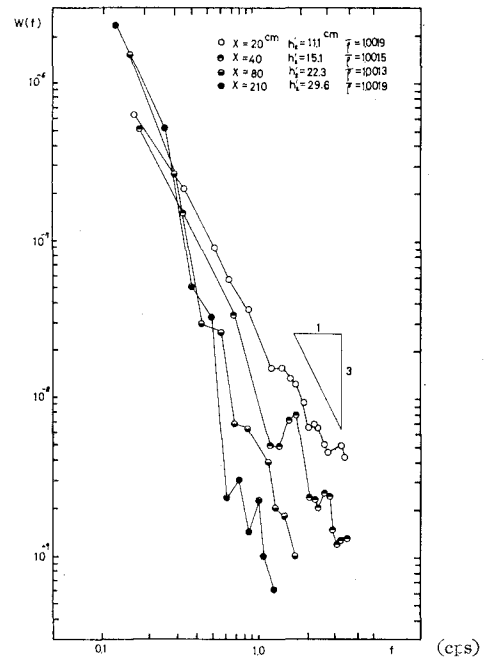


図-8 (2) 流下方向の濃度変動のスペクトル ($F_{r2}=6.6$)

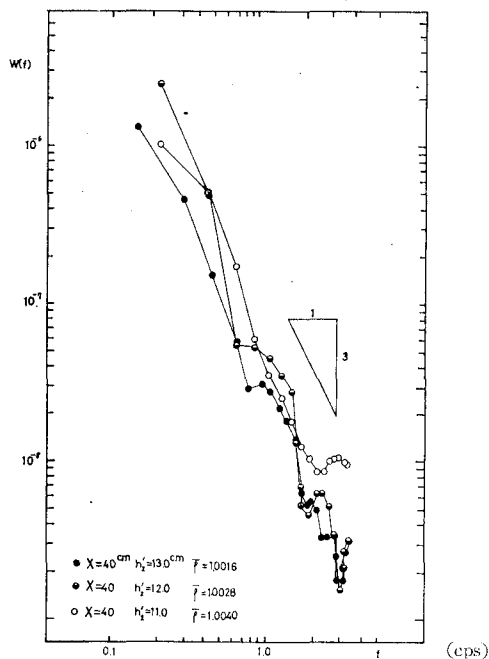


図-9 (1) 濃度変動のスペクトルの鉛直方向の変化

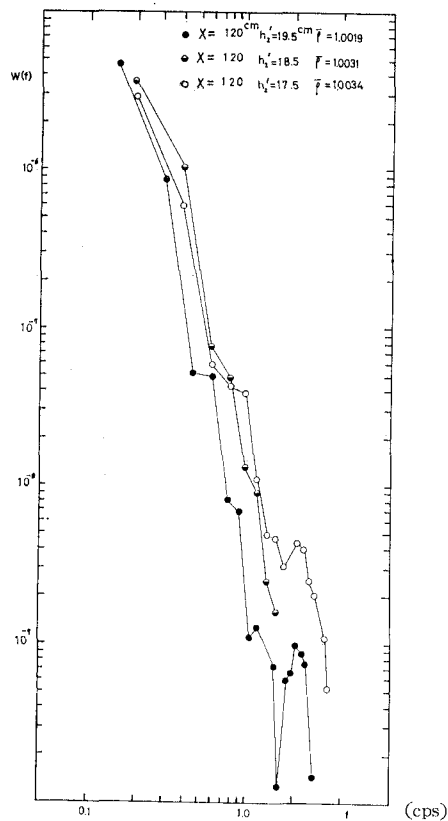
 $(F_{r2}'=4.6)$ 

図-9 (2) 濃度変動のスペクトルの鉛直方向の変化

 $(F_{r2}'=4.6)$

- 7) I. R. Wood : Horizontal two-dimensional density current, Proc. A.S.C.E., Vol. , No. HY 2, 1967.
- 8) Rouse, H., Siao, T. T. and S. Nagaratnam : Turbulence characteristics of the hydraulic jump, Trans. A. S.C.E. 124, 926~966, 1959.
- 9) 堀井明 : ランダム変動の解析, 共立KK, 1965.
- 10) Blacknan, R.B. and J.W. Turkey : The measurement

of power spectra from the point of view of communications engineering, Dover Publications, Inc. 1958.

- 11) 嶋 祐之 : 密度流論, 水工学シリーズ 65~11, 土木学会水理委員会, 1965.
- 12) 浜田徳一 : On the control section of two-layer flow, I.A.H.R., 1969 (Vol. 2).