

界面波束の発生と流速変動

Packet-Type Interfacial Wave Generation Due to Fluctuation of Internal Shear

北海道大学工学部 正員 吉田 静男

北海道大学工学部 正員 田城 徹雄

八戸工業大学工学部 正員 西田 修三

北海道大学工学部大学院 米光 昇

1. 序 文

二層流における界面波は、流れの規模にかかわらず一般に波束の形態をとり、その発生は間歇的である。この波束の発生原因については、室内規模の二層流についてのみ考察されており、定性的に以下のとおりであることが分かっている¹⁾。すなわち、まず、主流流速の増加につれ、上下層内に、流れ方向に軸を有する縦渦（層流のたて渦）が発生する。この渦は主流流速の一層の増加により横方向に振動し、最終的にスケールの大きい、集中性の強い渦に発展する。新たに生じた渦は、その直下の界面近傍の流れを加速し、一時的に high shear 流を作り出す。その流れは不安定であり、high shear 域内で波動性を帯びコヒーレント渦、すなわち、SVA に発達する。界面波はこの不安定波動の一部と考えても、又、SVA により励起された波動と考えてもよい。概略、以上である。上記の結論は主として可視化法と LDV による一点観測に基づいており、その内容は、やや定性的である。本研究では、従来実施されてこなかった、流速の多点計測を可能にさせる多チャンネル LDV と可視化法を併用し、スケールの大きい渦の通過により、どの様に流速分布が変化するかを調べ、あわせて、各 stage での流れの安定性を吟味して、界面波束の発生と流速変動の因果関係を明らかにする。

2. 実験方法

実験は exchange flow 型と salt wedge 型 2 層系について実施した。前者は既報²⁾の実験水路により、又、後者は既報³⁾の実験水路の一次元水路部のみを 10mm 厚のガラス板で製作し直した装置を用いて実現された。なお test section のスケールは、前者においては幅 10cm、全水深 13.5cm、長さ 110cm、後者においては幅 50cm、全水深 9.6cm、長さ 600cm である。

多チャンネル LDV は一つの He-Ne レーザ光源（5 mW）から出た光束を必要回数分波し、被測定位置に集光させ得る光学系（図-1）を有しており、バンドパスフィルターの中央周波数自動選別機能もあって、従来よりはるかにノイズの小さい出力を得ることができる。なお、水路幅の小さい exchange flow 型の実験では受光部にファイバーを用い、広い salt wedge 型の実験ではフォトダイオードによるダイレクト測光とした。又、測定チャンネル数は前者においては 3 ch.、後者においては 4 ch. としたが、そのうちの 1 ch. は従来のプローブタイプ LDV によって得ている。この他、波高は抵抗線方式により測定し、流れの観察は色素系法を用い、そのパターンを VTR に収録、再生する方法によって行った。

3. 実験結果及び解析

3.1 exchange flow 型 2 層系における界面波と流速変動

実験は下層密度を 1.0033gcm^{-3} の塩水とし、その層厚を 6.2 cm として実施した。全水深は 13.5cm で、自由表面を有するため、密度界面を境として、密度、流速ともに非対称構造となっている。図-2 は水路中央部で測定されたプローブタイプ LDV による時間平均の流速分布である。分布 1 は低流量下のもので界面波の発生はまったく見られない。分布 2 は shear 流の安定限界におけるもので、未だ界面上の不安定渦（SVA）も、

直下の不安定波 (SVB) も生じておらず、従って界面波も生じてはいない。分布3では流れが不安定となり、SVA, SVB 両者に随伴する界面波が (加えて、おそらく SVA, SVB から解放された界面波⁴⁾も) 発生している。この分布3に相当する流れにおいて、界面上0.8 cm, 1.3cm, 3.3cmの位置で流速の同時測定を行った結果図-3の時系列を得た。exchange flowにおいては、層厚が上下層とも同等であるため、SVAとSVBの発生は、ほぼ、同一の水理条件下で見出され、単独観測はかなり困難である。ただ、発生界面波の波束形態については同図最下列の波高記録から読みとることができる。一方、他の流速データからもある程度の間歇性を見出せるが、両要因が重畳し、波束との因果関係を調べるまでに至っていない。

波束を構成する個々の波のうち上層流の方向に伝播するものはSVAに、又、下層流の方向に伝播するものはSVBに伴われる場合が多い。従って、界面近傍の流速にはこれらの渦による変動成分が観測される可能性を有している。この事実はパワースペクトルを求めることにより明らかにできる。図-2を得るにあたり使用したデータ、及び図-3のデータをもとにパワースペクトルを求めると図-4(1)~(6)、及び、図-5を得る。いずれの図においても、 u は流れ方向の流速、 h は界面波高に関するスペクトルを指している。この結果からはSVAの周波数0.25~0.3Hzに対応する流速変動は界面直上の流速値に明瞭にうかがえるものの、界面から上方に移動するにつれ急速に減少し、感知されなくなる。しかし、SVBの周波数0.08~0.09 Hzに対応する流速変動は、下層域は勿論、上層域においても、界面からかなり遠くまで認められる。この差異は、SVBの成長がSVAに比較し著しいことに基づいているが、その力学的裏づけについては、今回示し得ない。なお、SVA (又はそれに随伴する界面波) の周波数0.25~0.3Hzの両側にスペクトルの発生を見出すことができるが、これらは、SVAとSVBの重畳によって生じたものと考えられ興味深い。しかし、現象の解明には、より多くの測点による同時計測を重ねる必要があり、ここでは問題提起にとどめておく。

3.2 salt wedge 型2層系における界面波と流速変動

実験は下層塩水の密度を 1.0033gcm^{-3} とし、淡水流量は 1100cc/s の一例について実施した。この条件下では塩水楔の長さを200~250cmに維持し実験できる。塩水楔の先端部は薄いため、後述する理由によってSVAのみ発生しSVBは生じない。そのため、楔先端部に注目すれば、SVAの発生にのみ関係する流速変動を調べることができる。なお、水路幅が50cmと広いため、層流縦渦が7~9本生じ、その個々の渦の中央部は高流速を、又、渦間の境界部では低流速を示す結果となるが⁵⁾、すべての測定は高速域で実施する様心がけた。

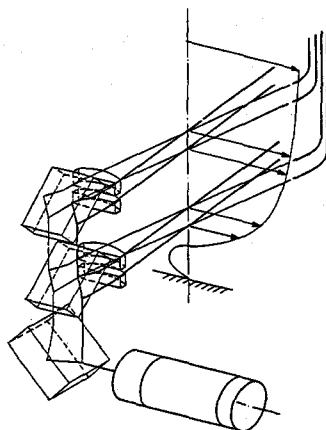


図-1 LDV光学系

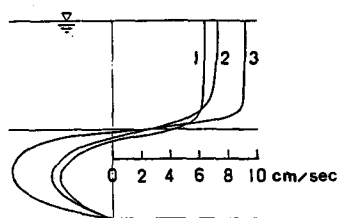


図-2 時間平均流速分布

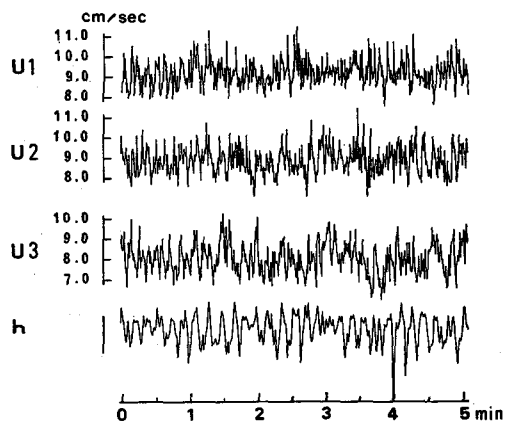


図-3 多チャンネル同時記録

図-6は塩水楔先端から36cm後方の地点で、水路床から1.55cm, 2.3cm, 3.8cm, 5.0cmの各位置で同時に計測された流速, 及び, 波高の時系列である。図中A領域はアプローチ部に縦の整流板を設置した場合の記録, B領域は金網を楔から上流2mに設置し乱れを小さくした場合の記録である。前者においては流速測定位置での塩水厚が1.05cm(最終厚0.75cm) 後者においては1.1cmとなり楔の前進が見られた。なお, A領域の観測中塩水楔厚さが漸減したが, その効果は図中波高記録の振幅の漸減と, 流速記録 u_4 の u_3 への漸近の傾向となって現れている。

可視化によって得た流況をVTRの再生によってくりかえし観察したところ, これら流速変動との間に明確な関連が見出された。たとえば, 写真-1は, 層流縦渦の不安定により生じるスケールの大きい渦であるが, このパタ

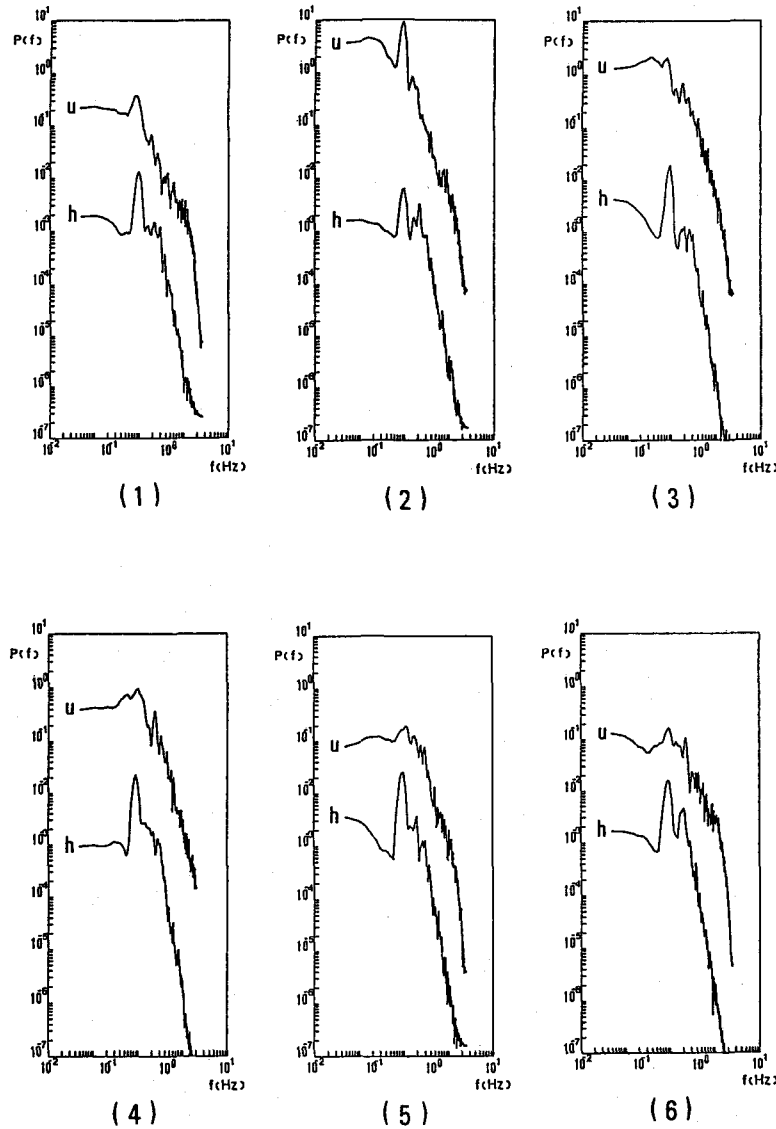


図-4 流速波高パワースペクトル

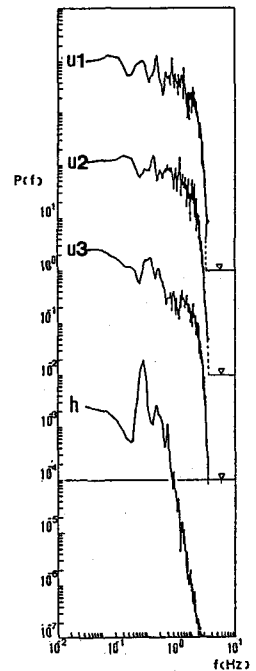


図-5 流速波高パワースペクトル

ーンの右端は、およそ図-6のP₁時刻、又、左端はP₂時刻に相当している。このときの流速分布の変動は図-7から知ることができる。同図は図-6の時刻Q₁、Q₂間で等間隔に測定値を読みとり、分布を描いたものである。なお、図中の破線は、図-6 B領域の層流データから得た分布である。

図-7からは、スケールの大きい渦の通過によって界面近傍の流れが相当high shearの状態になることが読みとれる。この一時的なhigh shear

化は流れを不安定化せしめ、界面波束をも生じさせるが、その事実は流速測定点から下流29cmに設置した界面波高計の出力（図-6最下位の記録W.P.部分）に見ることができる。同様の流速変動と界面波束の関連は図-6の記録の随所に見ることができる。

ここで流速記録から得るパワースペクトルを検討してみる。図-8には図-6の全データについてのパワースペクトルが示されている。同図の配列は図-6と同じで最上位は水路床から5cmにおける結果である。図-8からはSVAに随伴する界面波のスペクトルピークは見出されるが、それに対応する流速変動のスペクトルピークは、界面に最も近いu₄のスペクトル図にさえ出現していない。この理由は、波高の測定が、界面波の成長する地点で測定されているのに対し、流速測定は、界面波の発生が開始される最上流点に位置しているためである。従って、u₁、u₂のスペクトルピークは主として、スケールの大きい渦や、そのカスケードダウンにより生じた小スケール渦によるものと見なせる。今後、特にu₄の0.1、0.2、0.4Hzのスペクトルピークの存在、ならびに、u₂、u₃と移動するにつれて、それらのピーク周波数が高周波側に遷移する理由を検討してゆく必要がある。

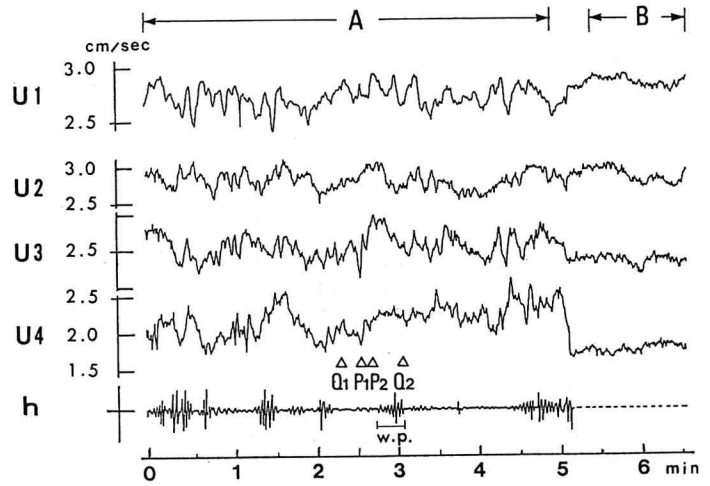


図-6 多チャンネル同時記録

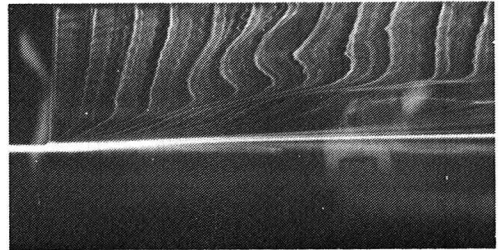


写真-1 スケールの大きい渦と周辺流れ

4. 考察

4.1 下層厚さと流れの安定化効果

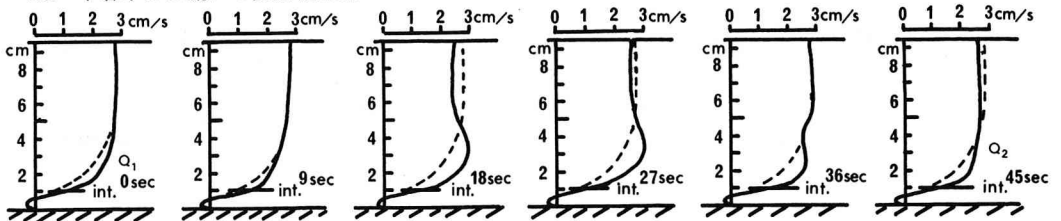


図-7 流速分布の時間変動

下層塩水厚さが小さい程界面近傍の流れが安定化することは自明の様に思える。しかし、実験によれば、楔先端部の様にきわめて下層厚さが小さいにもかかわらず SVA の発生が見出され、下層厚さと流れの安定性の関係は、けっして単純ではない。又、従来、SVA と SVB の発生は常に同時に発生するという認識がもたれてきたが、塩水楔においては、SVA や SVB だけが、なぜ、単独に存在し得るのかという問題も未解決のままである。これらの問題は、現実に近い流速分布を採用した安定性理論によって、はじめて解明することができる。たとえば、単独に SVA のみが存在し得ることは、下層厚さを減じるときの攪乱の位相速度 C を検討することにより立証できる。今、図-9 の $\tanh$ 型の流速分布を考え、変曲点を界面位置にとって下層の厚さ d を減じてゆくと図-10 に示すとおり次第に SVB に対応する C の虚部 α_i が 0 に近づき、 $d \approx 1$ ではついに安定化してしまうことが既報の計算手法の拡張によって得られる。なお表中 α は無次元波数、 ℓ は図-9 に定義された代表長さであり、 αC_i は増幅率である。この傾向は、流速分布を図-9 破線の様に、さらに現実に近い近づけても変わらず、SVA の単独発生は理論的にも裏づけ得る。

実験によれば SVA の発生は楔先端から認められるわけではなく、楔先端からやや下流にその発生限界点がある。この位置の存在も上記の計算をさらに薄い下層を想定して行なうことにより予言可能である。図-11 にその計算結果を示してあるが、これにより、 $d = 0.4\ell$ 以下になると SVA の発生因となる流れの不安定さえ消滅してしまうこと、すなわち、上記の限界点の存在を示し得る。

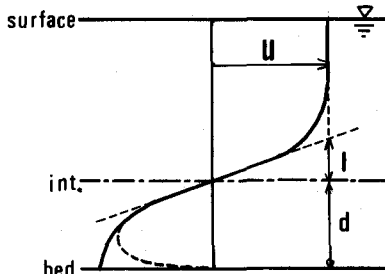


図-9 流速分布のモデル化

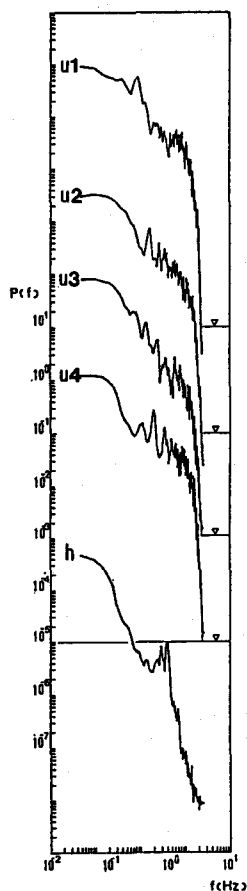


図-8 流速波高パワー
スペクトル

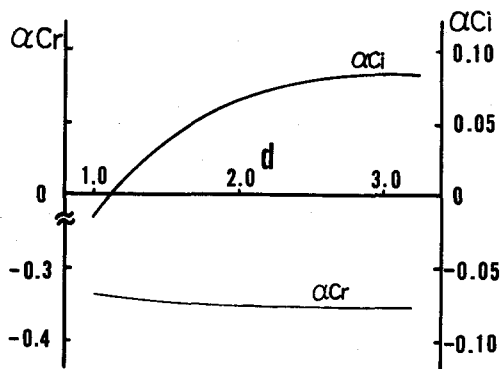


図-10 下層厚さと SVB 対応の α_C 及び α_i

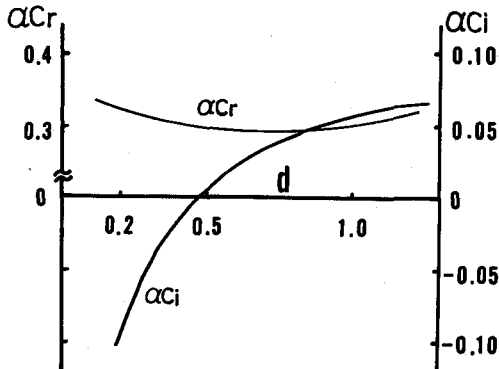


図-11 下層厚さと SVA 対応の α_C 及び α_i

4.2 流速変動による界面波群の発生の可能性

図-7に示された一連の流速分布のうち、スケールの大きい渦の通過時の最もhigh shearとなる分布について、そのままの分布形状を採用し前節と同様の計算を行なうと図-12の結果を得る。これより渦通過時に一時的にほぼ安定限界に到達することが分かる。現実にもそうである様に流速測定位置では、未だ、不安定波が生じておらず、この理論結果は事実と矛盾しない。

本格的に波が成長しはじめる位置は流速測定位置とその下流29cmに位置する波高計の間である。この位置では楔の形状効果のため流れはさらに加速され、よりhigh shearの流れが実現する。その流れはもはや安定でなく十分SVAに発展し得ると予想される。

5. 結 語

exchange flowにおける界面波束については、その存在が確認されたものの、SVA, SVBの共存による複雑な流速変動との関連については検討の余地を残した。しかし、salt wedge型の流れにおけるSVAに伴伴する界面波束の発生と流速変動の因果関係の存在については、ほぼ立証し得た。今後さらに多くのチャンネルを有するLDV光学系を開発し、SVA, SVBの共存する場における解析を進めたい。

終りにあたり、実験の補助を願った北海道大学工学部院生 満沢巨彦君、応用物理学科学生 佐藤公与君

川瀬弘幸君に感謝の意を表したい。なお、本研究は文部省科学研究費補助金（一般C）の援助を受けて遂行されたものであることを付記しておく。

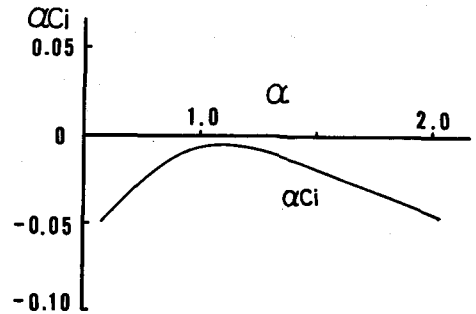


図-12 SVA発生限界点での流速に関する
SVA対応 αC_i 及び αC_i

文 献

- 1) 吉田静男・西田修三・田城徹雄：定常二層流の三次元混合過程，第28回海岸工学講演会論文集，pp.525-529，1981
- 2) 西田修三・吉田静男：二層流の安定性に関する実験的研究，第28回水理講演会論文集，pp.339-344，1984
- 3) 4) 1)に同じ
- 5) 田城徹雄・吉田静男：淡塩水二層流における界面波と微細流れ構造，第29回海岸工学講演会論文集，pp.545-549，1982