

# 河口二層流における主流の乱流構造と界面現象

田 城 徹 雄\*・吉 田 静 男\*\*

## 1. はじめに

成層密度流の界面不安定波の発生と砕波に至るまでの諸過程は、主流の乱流構造によって決定づけられている。このことは、河口二層流型の水理模型による著者ら<sup>1)</sup>の実験的研究、および、西田・吉田<sup>2)</sup>の理論的研究によって明らかにされた。本研究では、上記と同一の水理模型を用い、著者らの理論の導く一連の課題を実験的研究によって説明している。

先づ、界面不安定波の波動としての特性を確立するために、いくつかの実験結果を示して、基準としての条件を定めている。次いで、界面不安定波の発生条件が、シアを中心として定量的に説明される。さらに、同一の大域的な水理条件の下でも、主流の乱流構造が異なれば、違った界面現象が起ることを、主流に整流格子を設置した実験によって立証している。実験にあたっては、著者らの新たに開発した観測手段により、界面近傍のシアとその刻々の変化、および、主流の乱流構造に関するデータを取得している。これらのデータは、いずれも、著者らの確立した方法により統計的に処理されている。処理されて得られた結果は、界面波高計のデータとともに解析されて、二層流における主流と界面現象との相互作用を説明している。

以上の諸結果は、流体力学の相似則についての重要な結論を導く。

## 2. 実験とその条件

実験に用いた河口二層流型水理模型の設計仕様の詳細と、実験方法等については既報の論文<sup>3),4)</sup>に譲る。水路の幅は 50.0 cm、全水深は 9.6 cm、全長は 8 m であって、2 m×3 m の広さで、全水深 30 cm の海相当部を持っている。

実験条件としては、淡水厚を全水深にとった塩水楔先端の岩崎数  $\phi_L = 1.80 \times 10^3$ 、即ち、著者ら<sup>1)</sup>が第 3 ステージと呼ぶ流況を設定した。なお、塩水の密度は 1.0033

g/cm<sup>3</sup> であった。水温は、塩水、淡水とも約 12°C であった。

## 3. 界面波の特性と観測条件

成層密度流の界面不安定波の発生機構については、従来、多くの研究者<sup>7)</sup>によって諸説が提示されて来た。著者らは、界面不安定波が界面近傍の集中渦による界面変形として発生することを統一的に説明した。この集中渦は、主流によって決定づけられた剪断流不安定によって発生するのである。このことを跡づける明瞭な実験結果を図-1に示す。写真に見る界面波は、塩水楔先端部で発生する SVA を伴う IGW<sup>8)</sup> であり、写真は 1.5 sec 間隔で連続撮影されている。注目すべきことは、波高が高くなるに従い、波峰の位相速度が遅くなって上流方向に倒れるという事実である。界面付近では、上方が速く流下するという速度プロファイルとなっているにもかかわらず

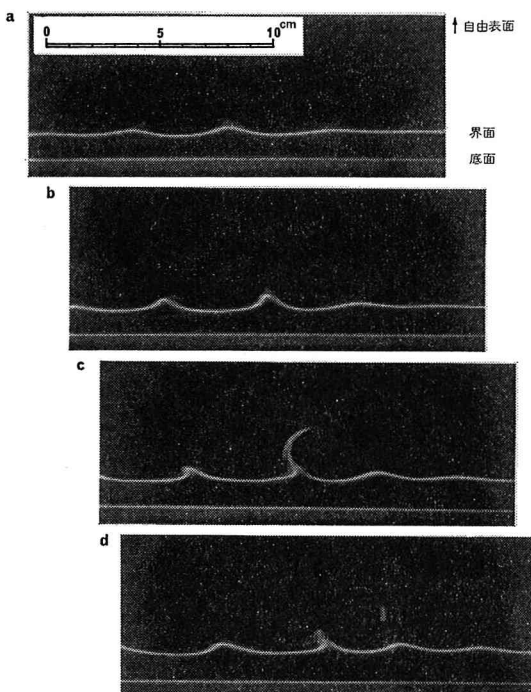


写真-1 SVA による cusped breaking 現象、(主流は左から右へ流れている。)

\* 正員 工博 北海道大学工学部非常勤講師

\*\* 正員 工博 北海道大学助教授 工学部数物系共通 工業力学第 2 講座

わらず、それに逆らってなお、明瞭に上流へ波峰を傾かせている。この事実は、界面不安定波を界面重力波一般として捉えてはならず、その砕波は界面重力波の非線形発達によっては説明し得ないことを示している。周知の様に、非線形発達をした界面重力波の波峰は、これと全く逆の挙動を示さなければならない。そして、一番下の写真—1 d に至って、界面波の直上に集中渦 SVA が存在したことが、疑う余地なく示される。これは、吉田<sup>4)</sup>の発見した SVB を伴う IGW (サイクロイド波) と対称的に一対をなしている。

また、界面不安定波は、写真—2 に示す様に 3 次元的な形状をしている。従って、界面不安定波の波速や、波長・波高・波形は、この 3 次元性を考慮した条件付サンプリング法によって測定しなければならない。そのため

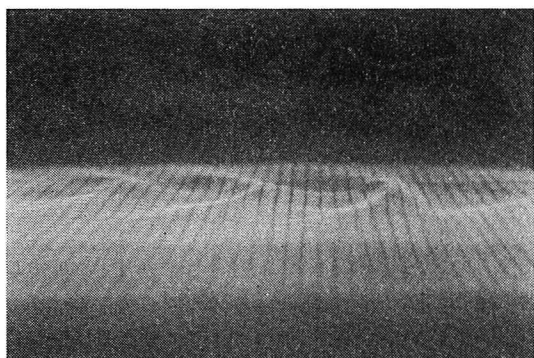
には、光学的観測手段、または 4 針波高計を用いるのが適切である。

一方、ひとたび発生した IGW は、界面重力波として相対的に独立な運動を行う能力をも持っている。その実態を捉えたのが、写真—3 の 2 枚の連続写真である。SVA と一体で成長してきた IGW は、成長すると界面波の波速で運動しようとする。そして、非線形発達をして成長し、高い渦中心を持つ様になった SVA は、主流のより高速の部分に乗ることになる。こうして、写真—3 b に見る様に、SVA は自分の作り出した IGW の前方にとび出すことが起こるのである。

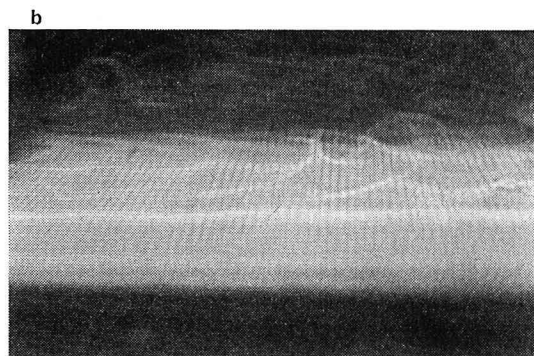
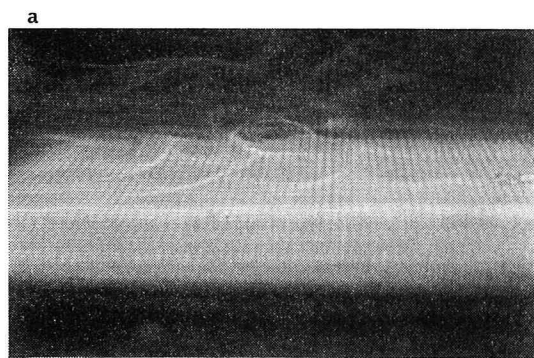
界面不安定波の波動としての諸特性を研究するには、以上の事項をよく認識した上で、基準とするに足る観測条件を定めなければならない。

#### 4. LDV を用いたシアー・メーター

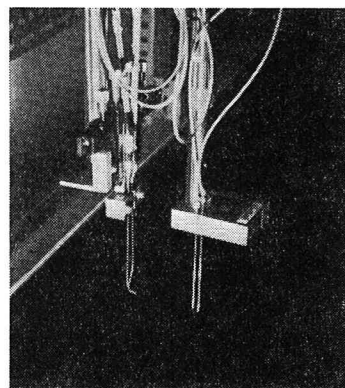
成層密度流の界面不安定波について前項の認識を得て、適切な観測条件を定めると、次に、観測の対象となっている諸現象を生み出している実体的構造を解明する観測手段が必要となる。著者ら<sup>1),5)</sup>は、先に、素子型 LDV を開発し、成層密度流の界面不安定波は主流の乱流構造に決定づけられて発生することを立証した。その発生条件として、局所瞬間 Richardson 数を提示した。本研究では、その妥当性を、より詳細な定量的測定によって検証することを意図して、素子型シアー・メーター (Probe type Shearmeter using LDV system) を作製した。以下、この装置を PS-LDV と略称する。写真—4 に、そのプローブ系の設定状態を示す。その光学系は 図—1



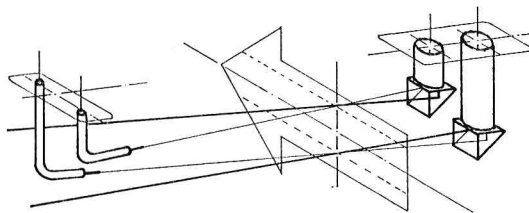
写真—2 塩水楔先端部に発生した界面波



写真—3 SVA を伴う IGW の相対的に独立な波動運動



写真—4 PS-LDV



図—1 PS-LDV の光学系

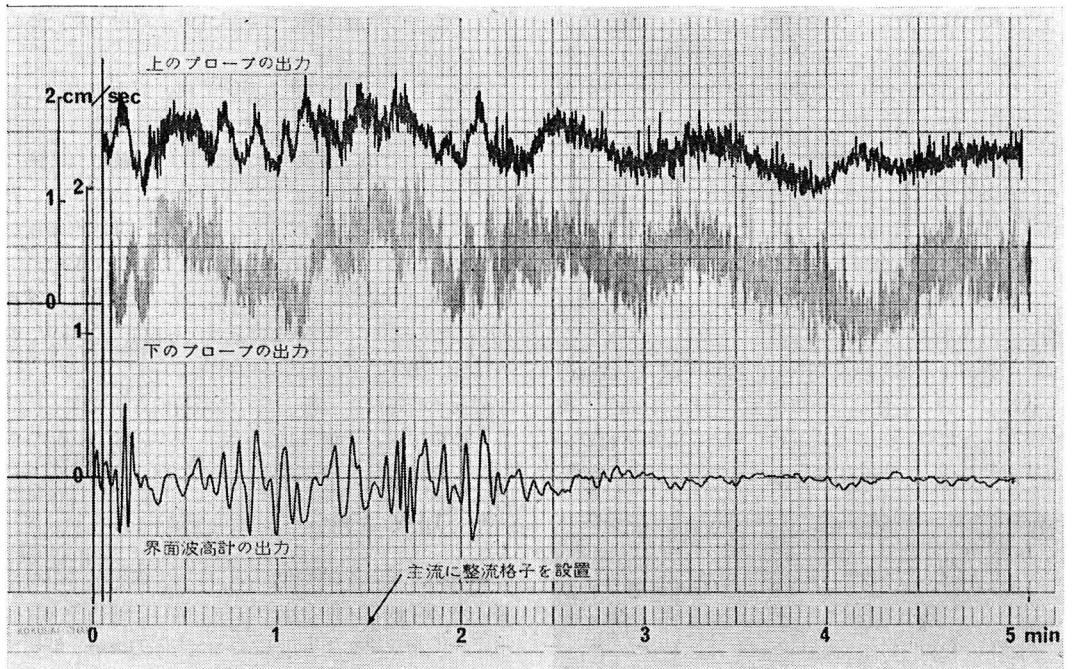


図-2 主流に整流格子を設置したときの界面の安定化の様子

に示す通りである。PS-LDV を構成するプローブの直径は  $2.0\text{mm}\phi$ 、全長は  $40\text{mm}$  である。レーザー・ビームの会合点はプローブから  $30\text{mm}$  離れていて、上下の会合点の間隔は  $2.0\text{mm}$  に設定してある。なお、プローブ系の受光ファイバーは、プローブから  $63\text{mm}$  離れている。PS-LDV の上下二つのプローブから出たおのおの2本のビームは水平な二平面内にあって、上下二つの会合点での流速を同時に測定できる様になっている。従って、通常の LDV の信号処理を行ったあと、上下2つのプローブからの出力を適切な回路によって処理すると real time のシアアが得られる。さらに、局所瞬間 Richardson 数を出力させることも容易である。

この PS-LDV の流体計測への適用性は極めて広汎なものとなるであろう。

## 5. 主流の乱流構造と界面現象

本研究では、著者らの一連の観測手段とともに、上記の PS-LDV を用いて、主流の乱流構造と界面現象を研究した。そして、界面直上で主流のシアアが強まると、SVA を伴う IGW が発生する様子が定量的に解明された。その結果、著者らは、界面不安定波の発生条件としては局所瞬間 Richardson 数のしきい値に加えて、しきい値を下まわるときの継続時間と間歇率を導入して整理すべきだと考えている。なお、この PS-LDV は流向判別ができないタイプであるため、反流の存在する界面下でのシアアを測定していない。従って、ここでは、局所瞬間 Richardson 数そのものについて定量的に検討する

ことはできない。しかし、主流の乱流によって、界面直上のシアアが強められるとき SVA を伴う IGW が発生する様子は定量的に示すことができる。

本研究では、以下に、同一の大域的な水理条件の下でも主流の乱流構造が異なれば違った界面現象が起きることを示して、主流の乱流構造の実態を解明していく。

著者等の行った実験では、大域的な水理条件が同一である、岩崎数  $\phi_L = 1.80 \times 10^2$  の流況下で、主流に整流格子を設置すると、界面不安定波の発生は極度に減少することが観測された。図-2 は、その現象を示す記録計の出力データである。

この実験では、整流格子は河口上流  $3\text{m}$  と  $4\text{m}$  の2か所に設置した。測定時の、塩水楔先端位置は河口上流  $2.20\text{m}$  であり、PS-LDV プローブの設定位置は、塩水楔先端から  $50\text{cm}$  下流の界面上  $6\text{mm}$  の主流中にあった。測定点下の塩水楔の厚さは  $14\text{mm}$  であった。

図-2 を見ると、界面直上の2つのプローブの位置での流速差が増大して激しく変動する時、それに対応して SVA を伴う IGW が発生する様子が記録されている。そこで、水路に整流格子を設置すると、この位置での界面不安定波の発生は全く見られなくなる。そして、主流の乱流の持つ大規模構造による速度変動パターンが消滅している。

この現象は、整流格子によって主流の乱流の持つ大規模構造が破壊され、それに代って、より小さい渦からなる均一な乱流場に近しい構造となることによって起る。大規模構造に代って、等方性乱流的な小さな渦が、剪断流

場の一定の速度プロファイルを維持するための運動量輸送をになうのである。従って、主流に整流格子を設置するとき、界面近傍のシアの分布の片寄り、その変動とが著しく減少し、この測定位置では剪断流不安定が起り得ず、SVA が発生しないので、界面不安定波が見られなくなるのである。

この時、整流格子によって破壊される主流の大規模構造は、大規模剪断渦であって、主流の縦渦の循環は減衰するが消滅はしないことに注意すべきである。このことは、界面上に残された高・低速の縞模様を可視化することによって確認できる。そして、界面波高計を設置し、その感度を上げて観測すると、縦渦の蛇行による高・低速帯域の揺動の周期が測定できる。このデータの場合は40～60 sec の周期となっている。

主流の乱流が減衰するとき縦渦が残留する。これは、路で層流から乱流へ移行するとき、第2ステージの初期に、縦渦が現われ高・低速帯域の縞模様を作り出すことに符合する。

次に、界面現象を決定づけている主流の乱流構造を開明するために、主流の流下方向の速度成分の変動、および同方向の界面直上の主流のシアの変動に注目し、界面波との相関について述べる。以下に示す実験結果は先と同一の実験条件で得られているが、PS-LDV の設定位置は界面上15mmとした。PS-LDV のデータ等は、著者らの確立した統計処理法である「時空相関のコヒーレンシを考慮した移動平均法」を用いて処理した。

図-3、図-4、図-5 に整流格子を設置していない場合のデータ処理結果を示す。図-3 a は、上記の観測点での、PS-LDV の出力するシアと、上下それぞれのプローブの出力から得た水平流速成分  $u_a$ 、 $u_b$ 、および、同時に記録された界面波高計の出力がプロットしてある。各出力の基準線は添字0で示してある。横軸は、実時間 sec である。この流速のデータにFFT法によりスペクトル解析をした結果を示したのが図-3 b である。

さて、図-3 a を見ると、主流に大規模剪断渦が発生して、プローブ位置の流れが一時的に減速しているところがある。このあと直ちに、大規模剪断渦によって主流の高速流体塊が界面直上に下降して流れを加速し、シアが激しく変動して極大に達すると、SVA と伴う IGW が発生しているのが見てとれる。そのときの流速変動のスペクトルを図-3 b について見ると、界面波の変動周期と極めて相関のよい、ほぼ同周期の変動と、より長周期の変動とがある。

そこで、このデータに著者らの統計処理法を適用して、時空相関のコヒーレンシを維持しつつ、長周期変動成分を分離した結果を図-4 a に示す。図-4 b はそのパワースペクトルである。ここには、主流の大規模渦

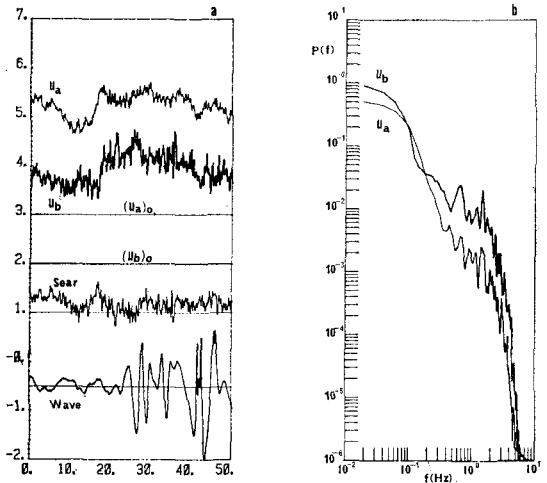


図-3

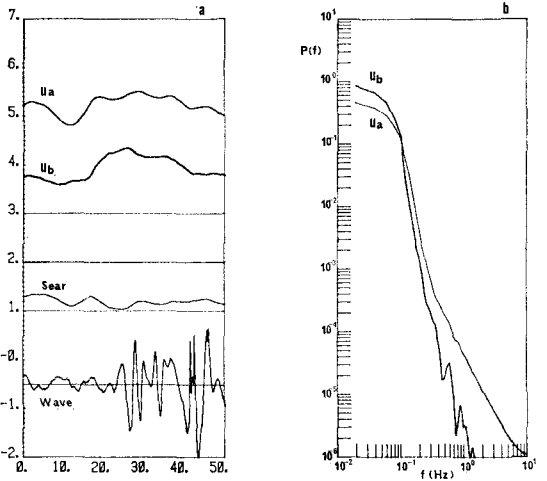


図-4

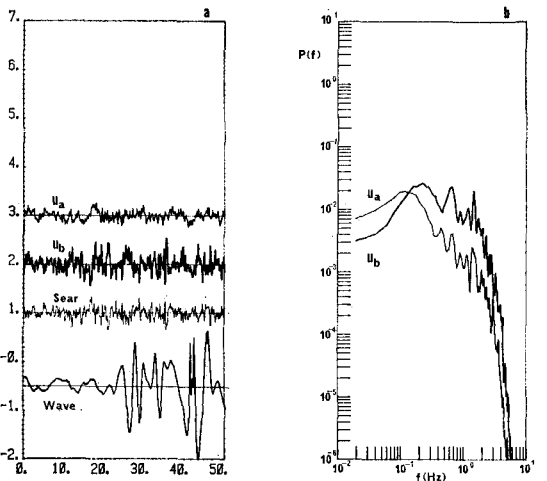


図-5

の持つ時空空間での広がり一致し、従ってまた、それによって作り出された界面波の wave packet の時空空間での広がり一致する 20 sec 程度の変動がある。これには、縦渦の蛇行によると思われるさらに長周期の変動成分が重ねられている。また、図—5 a, 図—5 b には残余の変動成分とそのパワースペクトルが示されている。この変動成分の周期は、SVA の時間空間での広がり一致し、従ってまた、界面波の周期に一致している。

長周期変動成分、すなわち、大規模剪断渦の作りだすシアーと、その変動が 図—4 a に示されている。残余の変動成分によるシアーを 図—5 a に示す。

## 6. 結 論

以上の実験的研究と解析によって、次の結論を得た。

成層密度流の界面不安定波としての特性を論じるとき、の理論上、および、実験観測上の基準を示した。

LDV を用いたシアー・メーター (PS-LDV) を開発し、この新たな観測手段によって、成層密度流の界面現象を決定づけている主流の乱流構造の実体の解明を進めた。

整流格子によって主流の乱流構造を制御する水理模型実験を行い、同一の大域的物理量の下で異なった水理現象が起きることを立証した。すなわち、同一の Froude 数の下でも主流の乱流構造が異なれば、違った界面現象が起きるのである。この実験事実と、実河川において河口部でのみ巻波を発見した吉田<sup>6)</sup>の報告との論理的考察は重要な意義を持っている。それは、流れの規模の異なる

二つの系において、大域的物理量が同一であるとき、水理現象における規模の効果を規定している主要なものが、主流の乱流構造の相異であることを示しているからに他ならない。このことは、「流体力学的相似則が成立するためには、Reynolds 数、Froude 数等の一致のみならず、主流の乱流構造の相似性が成立することが必要である。」という一般的結論を導く。

本研究は、著者等によって確立された、成層密度流の界面現象を媒介として主流の乱流構造を解明する研究方法によったものである。著者等の新しい観測手段と統計処理法は、その研究にとって一層重要な研究手段となっており、さらに前進した研究を可能にしている。

## 参 考 文 献

- 1) 田城徹雄・吉田静男：淡塩水二層流における微細流れ構造，第 29 回海岸工学講演会論文集，pp. 645～649, 1982.
- 2) 西田修三・吉田静男：二層流の安定性解析，第 29 回海岸工学講演会論文集，pp. 560～564, 1982.
- 3) 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. 625～629, 1981.
- 4) 吉田静男・段城邦彦：二層界面に発生する波動の実態，第 21 回水理講演会論文集，pp. 69～74, 1977.
- 5) 田城徹雄・吉田静男・米谷 慎：成層密度流における界面波の発生機構，第 27 回水理講演会論文集，pp. 523～530, 1982.
- 6) 吉田静男：弱混合河口二層流の界面破壊，第 27 回水理講演会論文集，pp. 555～560, 1982.
- 7) 土木学会水理委員会編：水理観測の規模の評価に関する研究報告書，p. 79, 1981.