

II — 1 密度界面の水位追尾計を用いた界面波速の測定

北海道大学工学部 正 員 吉田静男

同 学生員 柏田昌之

1. 序 文

成層密度流の中には、河口ニ層流のように密度漸変層が薄く、その鉛直スケールが問題とする現象の代表スケールに比べて十分小さい例がある。この様な流れの密度急変層は有限の厚さを有しながら界面と呼ばれ、そこに発生する波動は界面波と呼ばれる。本研究において取扱われる界面波もこの種の波動であるが、その発生条件に関しては1949年 Keulegan¹⁾により研究が開始されて以来、数多く報告されている。特に国内においては、河口からの塩分侵入の問題と深く関係することから、古くより実河川での研究が進められ、今日では室内実験の成果と相俟って、その知見もかなり深まっている。しかし、界面波発生条件を議論する上で重要な役割を果たす波速については、未だ、研究の余地がある。たとえば、平均流速分布の近似度を向上させても理論解析による位相速度は現実を良く説明し得ない。この事実が何によるかを明らかにできなければ、従来得ている界面波発生限界は真に立証されたことにはならない。本研究はこの問題の解決を目指したもので、実験にはLDAシステムと界面追尾計を用い、理論解析には $\tanh$ 曲線で近似した瞬間流速分布を採用している。

2. 実験方法

図-1に実験水路の概要を示す。幅50cm、長さ400cm、高さ20cmのテストセクションはLDAの使用を考慮して8mm厚のガラス板で製作されている。テストセクションは広い水面を有する水槽に連結されているため、淡塩2流体を用いることにより小規模河口ニ層流を実現させ得る。本研究において考察する成層構造は、この河口ニ層流に限定される。

従来の研究により、河口ニ層流の高速帯域において見出される界面波は図-2に示す種の不安定流れにより発生することが分かっている。²⁾

同図のSVA, SVB, SVCはこの不安定流れの非線形段階における流脈を示したもので集中渦の様相を呈している。これらの渦が成長し、その外縁が界面に達すると界面変形が生じ、いわゆる界面波を生じさせる。(a)のSVA及び界面波(Keulegan波)は下層、すなわち、塩水くさびの先端部で、(b)のSVB及び界面波(サイクロイド波)は下層が厚い領域で、(c)のSVC又は界面波(Thorpe波)は最大のshearが観測される河口部に見出される。また、(b)の波が発生する領域にはKeulegan波が

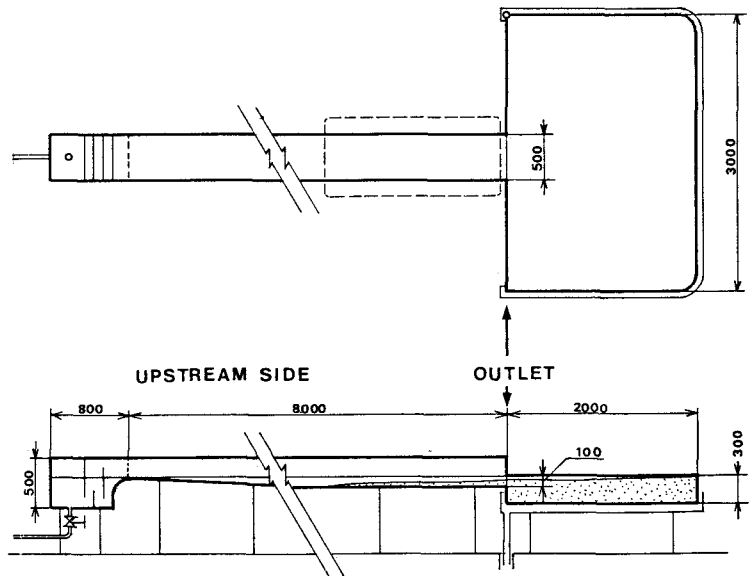


図-1 実験水路 単位mm、破線:テストセクション

伝播してくるため、通常は2種の波の重畳が見出される。今回取扱う波は、このうちの、発生初期の Keulegan 波である。

界面波速に影響を与える高速度域中心部の流速分布は図-3に示す多チャンネル LDA を用いて得た。原理的にはチャンネル数は任意に近いが、今回は界面近傍の5地点の流速を得るよう5チャンネルとした。計測方法は非接触、参照光法とした。なお、光源は5mW の He-Ne レーザ(1台)とし受光部にはフォトダイオードを用いている。

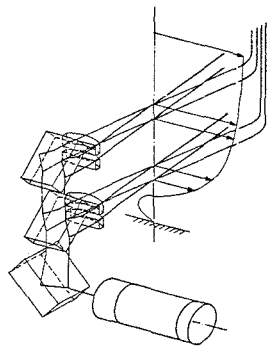
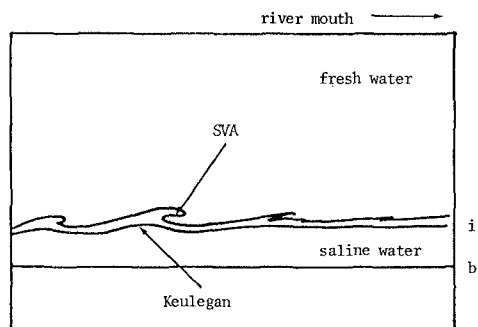
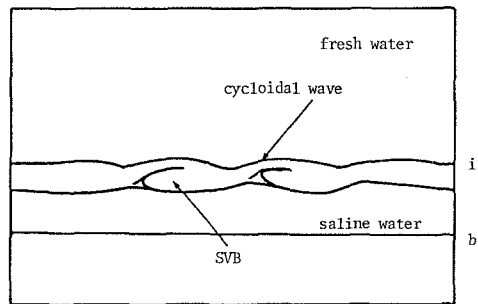


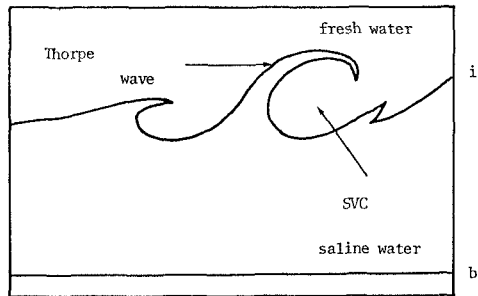
図-3 多チャンネル LDA の光学系と光路



(a)



(b)



(c)

図-2 河口二層流に見出される界面波

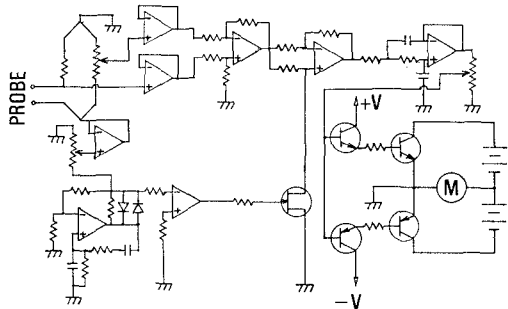
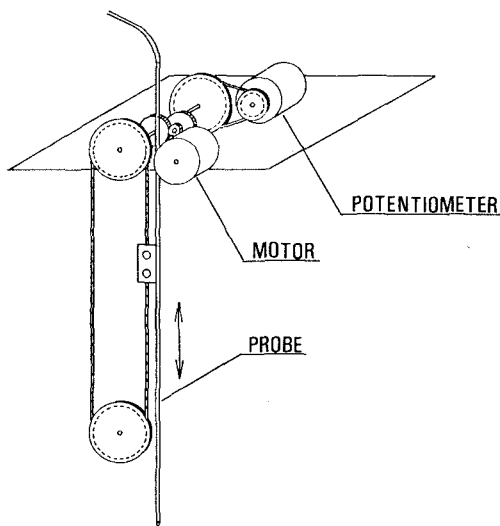


図-4 界面追尾計 制御回路及び駆動部

回路から成っている。あらかじめ上下層の中間の伝導度を追尾するよう回路定数を定めると、その伝導度になる水位までフロースが昇降し、その移動量はポテンシオメーターの抵抗変化に変換される。界面水位はこの抵抗変化を電圧の形で検出することにより決定できる。

実験条件は上層淡水密度 0.9994 g/cm^3 (15°C)、下層密度 1.0033 g/cm^3 、淡水流量 $1100 \text{ cm}^3/\text{sec}$ 、全水深 9.7 cm とした。この場合、塩水くさびの全長は図-5に示す時間経過をたどって後退する。そこで測定は後退の割合がおだやかになる時間帯に実施した。LDAはくさび先端から数cm下流(70~80cm)に、又、界面追尾計のフロースはその位置から、さらに、4, 6, 8cm下流の各位置にセットした。この配置により界面波の位相速度や振幅と瞬間流速分布の関係を調べ得る。なお、補助データとして必要なられの凍結性の確認は河口から150cm上流にLDAの1台を、又、そこから5, 8, 12, 30, 60cm下流点に他のLDAを設置し、流速時系列の検討を通して行った。

3. 実験結果

図-6(a)は河口から150cm底から4cm、及び、145cm底から4cmにおける流速の時系列である。初めを見るため、変動の位相を可能な限りそろえたが、両者の変動はきわめて良く一致している。一方、図-6(b)は両測定間隔を60cmにひろげた場合の結果で、低周波を除去すると相関はほとんど無い。さらにこれらの中間的な測点間隔の例について検討を加えると、主流の乱れの凍結性は60cmを越えない程度であることが明らかになった。図-7はLDAと界面追尾計によって得た流速と界面変動の時系列である。時系列のうち、界面波が発生する時間帯、たとえば同図A B間の流速分布の時間変動を示すと図-8を得る。界面波の発生は間歇的で波形は波束状を呈する。又、その発生時の流速分布はいつも図-8に示す変動を示すことから、その発生因は一時的な high shear (同図破線でかまれた部分)により誘発される流れの不安定に基づくものと推断できる。詳細の考察は次節で行なうとして、次に、波速や増幅の程度について述べておく。図-9は波速と波長の関係、図-10は上流地点の界面追尾計による波高Hに対する波速の関係、図-11は上流側追尾計位置の波高に対する下流側追尾計位置の波高の比である。なお、波長は谷から谷までの距離である。

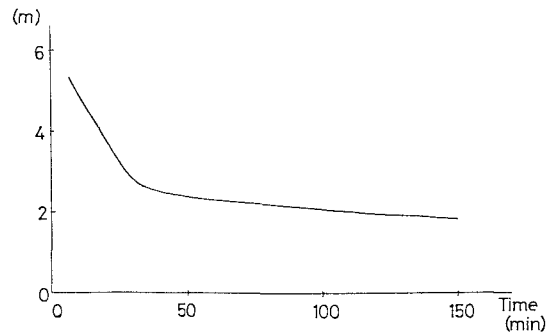


図-5 塩水くさび全長の時間変化

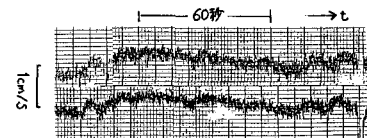


図-6(a) 2測点間の流速変化、測点間隔 5 cm、上：上流点、下：下流点での流速

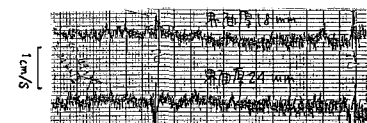


図-6(b) 2測点間の流速変化、測点間隔 60 cm、上：上流点、下：下流点での流速

4. 結果の解析

界面波速については、折線で近似した流速分布を用いた理論解析により得る例が多い。今、一例として、いたるところで安定な流れを示す二層流界面に人工的に波動を生じさせ、理論と実際の相関を検討してみる。図-12がその結果であり理論カーブ(実線)と実験値(O)との一致は明白である。問題は、同様の比較を、自然に界面波が発生する高いレイノルズ数の流れについて行なったときに見出せる。過去いずれの結果³⁾⁴⁾を見ても測定データが著しく散乱している。この不一致の主な原因としては次の3項目が考えられる。①測定誤差、②流れの不安定を説明できない流速分布モデ

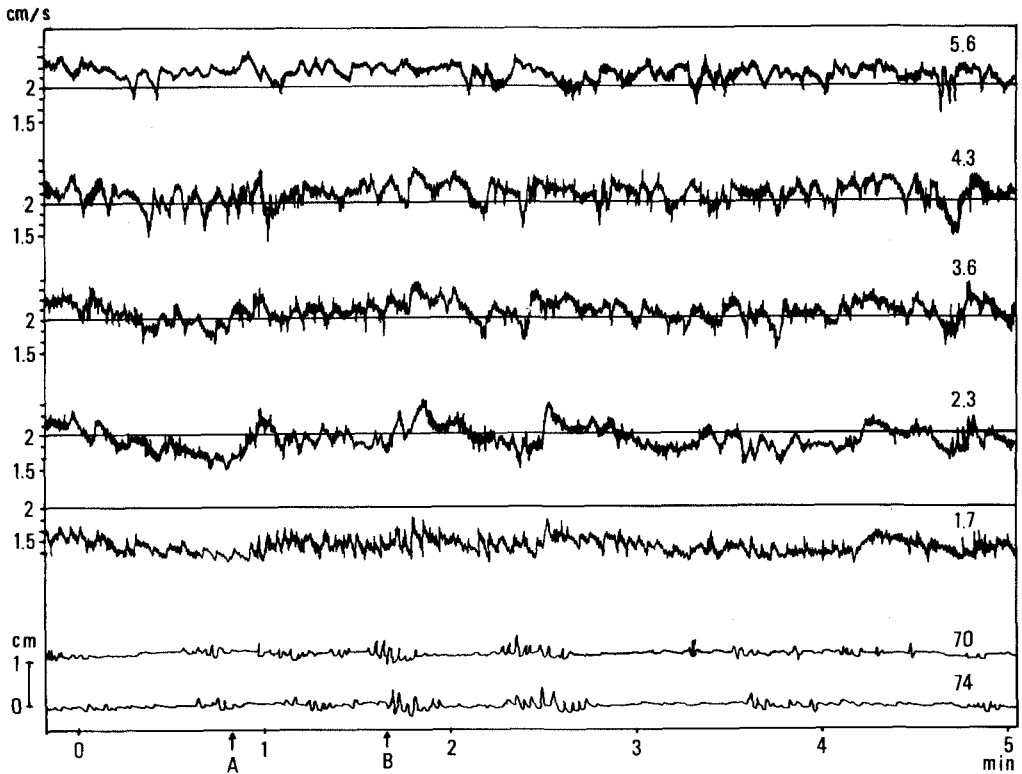


図-7 流速の時系列と界面水位変動の時系列 上から4つの時系列は流速、付された数値は底からの距離。下位2つの時系列は界面水位、付された数値はくさび先端からの距離。単位 cm。

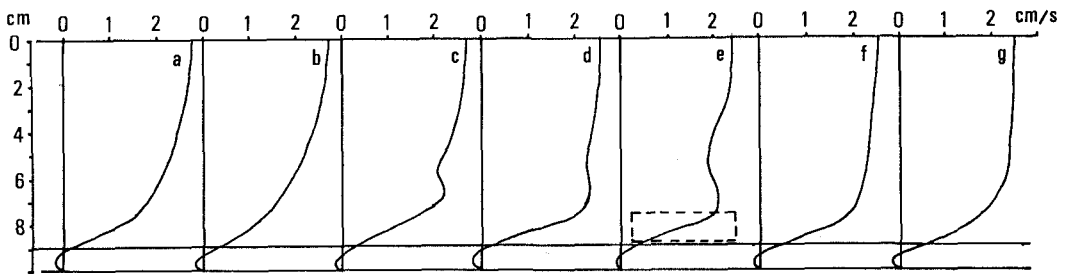
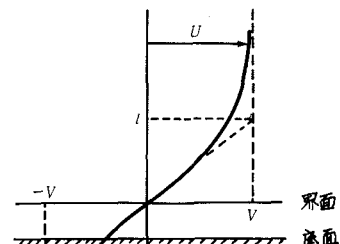


図-8 流速分布の時間変動 各ステージのレイノルズ数 Re 及びリチャードソン数 Ri は表-1 に示すとおりである。

表-1

A: $Re = 439$, $Ri = 1.98$	g: $Re = 284$, $Ri = 1.36$
B: $Re = 454$, $Ri = 2.38$	
C: $Re = 420$, $Ri = 1.47$	
d: $Re = 327$, $Ri = 1.20$	
e: $Re = 190$, $Ri = 0.86$	
f: $Re = 311$, $Ri = 1.47$	

(代表長さ l と代表流速 V の定義)



$$Re = lV/\nu$$

$$Ri = \varepsilon g l / V^3$$

$$\varepsilon = (\rho_2 - \rho_1) / \rho_2$$

ρ_1, ρ_2 : 上下層密度

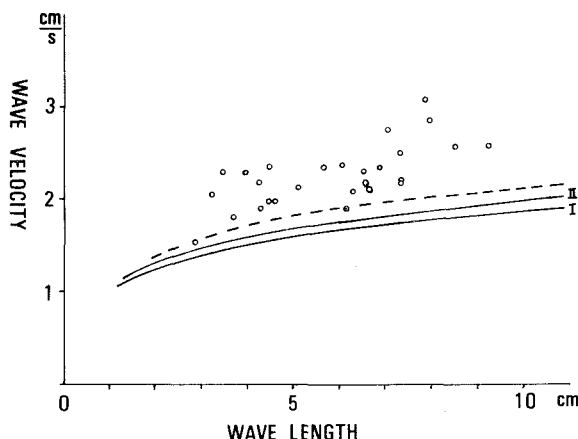


図-9 界面波の位相速度と波長の関係 ○: 実測値、実線Ⅰ: 最も小さい Ri に対する計算結果、実線Ⅱ: 最も大きい Ri に対する計算結果、破線は折れ線近似した流速分布を用いて得た計算結果。

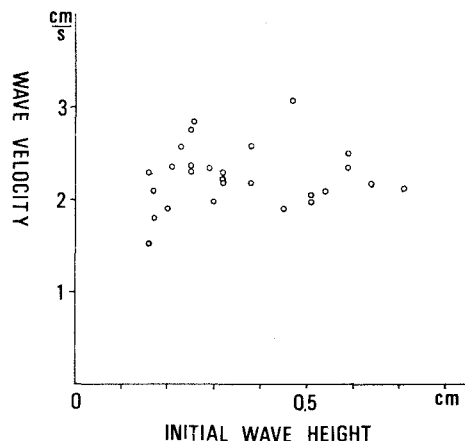


図-10 界面波の位相速度と初期波高(上流側界面追尾計により測定された波高) ○: 実測値

ルを用いて理論解析が行われてきた。③流速分布の変動を無視し、平均流速分布を考察の対象とした。④低速帯域の界面波の位相速度も同一次元で取扱った。

これに対し本研究においては界面追尾計を用いて界面波速を測定すること、及び、高速帯域を通過する界面波のみを測定対象とすることによって①と④の問題点の除去をばかった。又、②と③の問題については $\tanh$ 曲線で近似した流速分布の採用と多チャンネル LDA の使用によって解決をばかった。従って、かなり詳細な議論ができるものとする。はじめに、西田・吉田の安定性解⁵⁾の位相速度の結果を利用し、図-8 から得る流速分布のうち最も小さい Ri 数と最も大きい Ri 数の流れについて界面波の位相速度を計算する。結果は図-9 の実線で示される。最小の Ri 数を示す θ の流れに対する結果がⅠであり最大の Ri 数を示す θ の流れに対する結果がⅡである。いいかえると、界面波の発生する流れではⅠ、安定な流れで自然には界面波が発生しない場合はⅡで示される。同図からはⅠとⅡの差異が実測データの散乱に比べかなり小さいことが明らかになる。すなわち、③は当面の問題に対し本質的でないといえる。ここで、折れ線近似をほどとした平均流速分布モデルを用いて位相速度を求めてみよう。結果は図-9 の破線で示される。この計算結果とⅡの差異も決して大きくない。従って、②も当面の問題にはあまり関係しないと判断される。これら計算結果と今回の実測値を比較すると次の諸点が明らかになる。まず、波長の小さい領域では理論結果と実測結果が、ほぼ、良い一致を示すこと、更に、波長の増大につれて実測値は理論値より大きい位相速度を有するようになることがいえる。その原因をさぐるため図-10 の結果を検討すると波長の大きな波ほど波高も大きくなる傾向を見出すことができる。従って、波長の長い波についてはもはや微小振幅波理論が適用できず上記の差異を生じるものと推測される。この推測の正当性を立証する

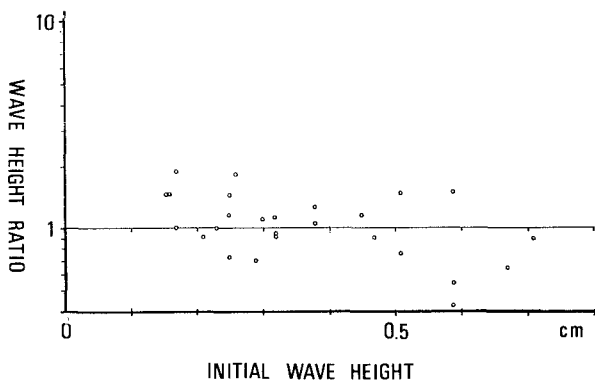


図-11 2測点における界面波の波高の比と初期波高の関係

論ができるものとする。はじめに、西田・吉田の安定性解⁵⁾の位相速度の結果を利用し、図-8 から得る流速分布のうち最も小さい Ri 数と最も大きい Ri 数の流れについて界面波の位相速度を計算する。結果は図-9 の実線で示される。最小の Ri 数を示す θ の流れに対する結果がⅠであり最大の Ri 数を示す θ の流れに対する結果がⅡである。いいかえると、界面波の発生する流れではⅠ、安定な流れで自然には界面波が発生しない場合はⅡで示される。同図からはⅠとⅡの差異が実測データの散乱に比べかなり小さいことが明らかになる。すなわち、③は当面の問題に対し本質的でないといえる。ここで、折れ線近似をほどとした平均流速分布モデルを用いて位相速度を求めてみよう。結果は図-9 の破線で示される。この計算結果とⅡの差異も決して大きくない。従って、②も当面の問題にはあまり関係しないと判断される。これら計算結果と今回の実測値を比較すると次の諸点が明らかになる。まず、波長の小さい領域では理論結果と実測結果が、ほぼ、良い一致を示すこと、更に、波長の増大につれて実測値は理論値より大きい位相速度を有するようになることがいえる。その原因をさぐるため図-10 の結果を検討すると波長の大きな波ほど波高も大きくなる傾向を見出すことができる。従って、波長の長い波についてはもはや微小振幅波理論が適用できず上記の差異を生じるものと推測される。この推測の正当性を立証する

には有限振幅波について検討を進める必要があるが、現時点ではデータ数が少なく、又、さらに精度の高い計測をする必要もあって今後の課題とせざるを得ない。しかし、先にも見たとおり、少なくとも波長が小さい、すなわち、波高の小さい界面波についてはtanhモデルを用いた線形理論の適用が可能であるといえ、従来の西田・吉田による線形安定性解析の結果が、位相速度の点から見ても正しいことが証明できたといえる。

最後に図-11の波高比の結果について若干の考察を加えておく。同結果からは、明白な急激な増幅は得難いものの、初期波高が小さい波ほど増幅される例が多いという、当然の傾向のほか、減衰する波もかなりあるということが見てとれる。特にこの後者の事実が、はたして、くさび先端からわずか数cmの間に流れの不安定が生じ、終アすることに基づくものか、あるいは、相互干渉によって他の波へエネルギーが輸送されることを意味するのかが興味深いところである。今後さらにデータの蓄積をばかり現象を解明してゆきたい。

5. 結 論

河ロ＝層流のうち、発生初期のKenelgan波についてその位相速度を、界面追尾計を用いて測定し、線形理論との比較を試した。その結果、次の結論を得た。

- 1) 界面波の波形測定においては、抵抗線法より界面追尾法が優れている。
- 2) 河ロ＝層流における流速変動はリチャードソン数に著しい影響を与え、間接的に流れを不安定にするが、発生した界面波の位相速度に与える影響は少ない。
- 3) 折線とtanh曲線で近似した流速分布を用いて理論的に得る界面波の位相速度間に大きな差はない。
- 4) 従来の界面波の位相速度の測定値が著しく散乱した主要な原因は、測定誤差、及び、低速帯域の界面波の波速と同時にプロットしたことにあると考えられる。

本研究をまとめるにあたり、北海道大学大学院高橋一浩君、藤田 健君の多大な助力を得た。記して感謝したい。

文 献

- 1) Kenelgan, G.H.: Interfacial instability and mixing in stratified flows, Part of J. of Res. of Nat. Bureau of Standards, 43, pp. 487-500, 1949.
- 2) 吉田静男: 密度界面波の特性と計測, 第4回混相流シンポジウム論文集, pp. 203-224, 1985.
- 3) Andrew T., Hamano K. and Toba Y.: Experimental Study on internal waves in a stratified flow, J. Oceanographical Soc. of Japan, Vol. 37, No. 4, pp. 179-192, 1991.
- 4) 田成徳雄・吉田静男: 淡塩二層流における界面波と微細流れ構造, 第29回海流論文集, pp. 545-549, 1982.
- 5) 西田修三・吉田静男: 二層流の安定性解析, 第29回海流論文集, pp. 550-554, 1982.

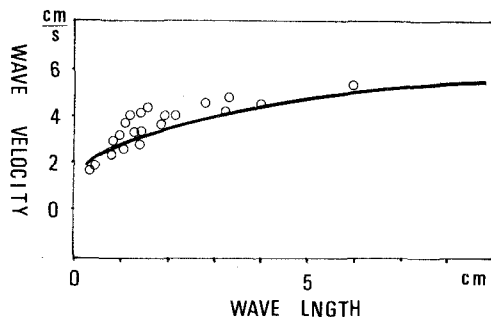


図-12 安定な二層流における人工発生界面波の位相速度と波長の関係。

実験条件: 上層厚さ 2.0 cm, 下層厚さ 2.0 cm, 上層流量 30.5 cm³/s, 水路幅 4.0 cm, 上下層密度差 0.0260 g/cm³