

二層流界面波の波速の線形解と実測値

Linear Solution and Experimental Value of Interfacial Wave Velocity in A Two Layer Flow

北海道大学工学部 吉田 静男 S.Yoshida

北海道大学大学院 柏田 昌之 M.Kashiwada

1. 序 文

密度二層流に発生する界面波については、過去数年にわたりその発生機構が検討され、この問題については理論的、実験的に一応の結論が出たように思われる。しかし、理論が線形安定性解析であることから、その安定限界や、発生初期の段階については分かっているものの、実際に観測される界面波についての詳細は明かではない。特に、線形理論が、発生した界面波の波速をどの程度正しく表現できるかについては実験の精度上の問題もあって未だ検討の余地があると考ええる。そこで本研究では、上記界面波のうち、塩水楔先端部で観測されるKeulegan波について、多チャンネルLDAシステムと、界面追尾装置によって測定し、 $\tanh$ 近似の流速分布を用いた線形安定性解析による結果と比較した。そして、それらの差異の有限振幅による効果についてある程度明確にできたので報告する。

2. 実験方法

本研究で取り扱う二層流は、淡、塩水を用いた小規模河口二層流である。実験水路は、図-1で示すような幅50cm、長さ800cm、高さ20cmのガラス製水路を河道部とし、300cm×200cmの広い水面を有する水槽を海洋部としたものである。図の破線で囲まれた部分に塩水楔が形成され、水路の水深は9.6cmである。この塩水楔には、3種の界面波¹⁾が分離して発生するが、本研究ではこの中の、楔先端部で観測される界面波（ここではKeulegan波と呼ぶことにする）について測定した。このKeulegan波は、界面近くの上層に観測される集中渦（SVA）¹⁾の発生に伴い発生し下流に伝播するが、その発生は間歇的であるため、wave packetとして観測される（図-2、図-3）。

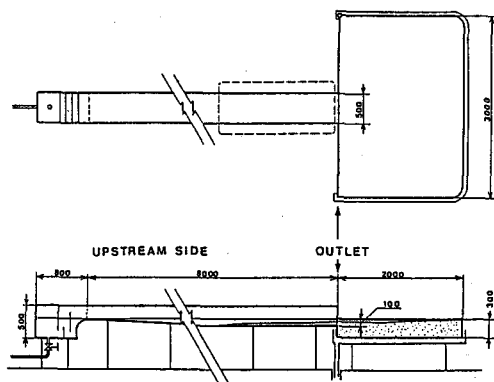


図-1 実験水路（単位mm）

界面変動の測定には界面追尾式の波高計（以下界面追尾計と呼ぶ）を用いた。これは針状プローブ先端で上、下層の中間的な電気伝導度の位置を検出し、追尾するものである。この界面追尾計を波の伝播方向（流れ方向）に2台設置しそれらの時系列から波速、波長などを求めた。さらに、水平流速の鉛直分布を求めるために、多チャンネルLDAシステムを用い、鉛直方向に5チャンネル同時計測を行い、線形安定性解析の計算に用いた。

実験は下層塩水密度 1.0033 g/cm^3 、上層淡水密度 0.9994 g/cm^3 、淡水流量は $1100 \text{ cm}^3/\text{sec}$ 、その時の楔先端は河口部より約230cmという条件で行われた。そして多チャンネルLDAシステムは楔先端より約60cm下流に設置し、さらに下流に界面追尾計を2台10.9cmの間隔で設置した。上流側の追尾計とLDAシステムとの間隔は8.4cmである。なお、各測定器の測定点は水路中央の界面波発生域で流れ方向に平行に設置した。このときの下層厚はLDAの位置で1.4cm、下流側の追尾計の位置では1.6cmであった。多チャンネルLDAの各測定点は水路底から1.6cm、2.3cm、3.4cm、4.0cm、5.6cmであり、全てのチャンネルで上層流速を測定した。

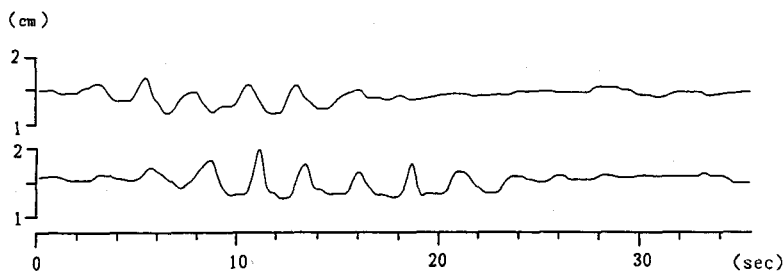


図-2 界面変位の時系列

上の時系列が上流側の界面追尾計によるもの、下の時系列が下流側によるもの
(波速が約 2 cm/sec なのでおよそその波形が推測できる)

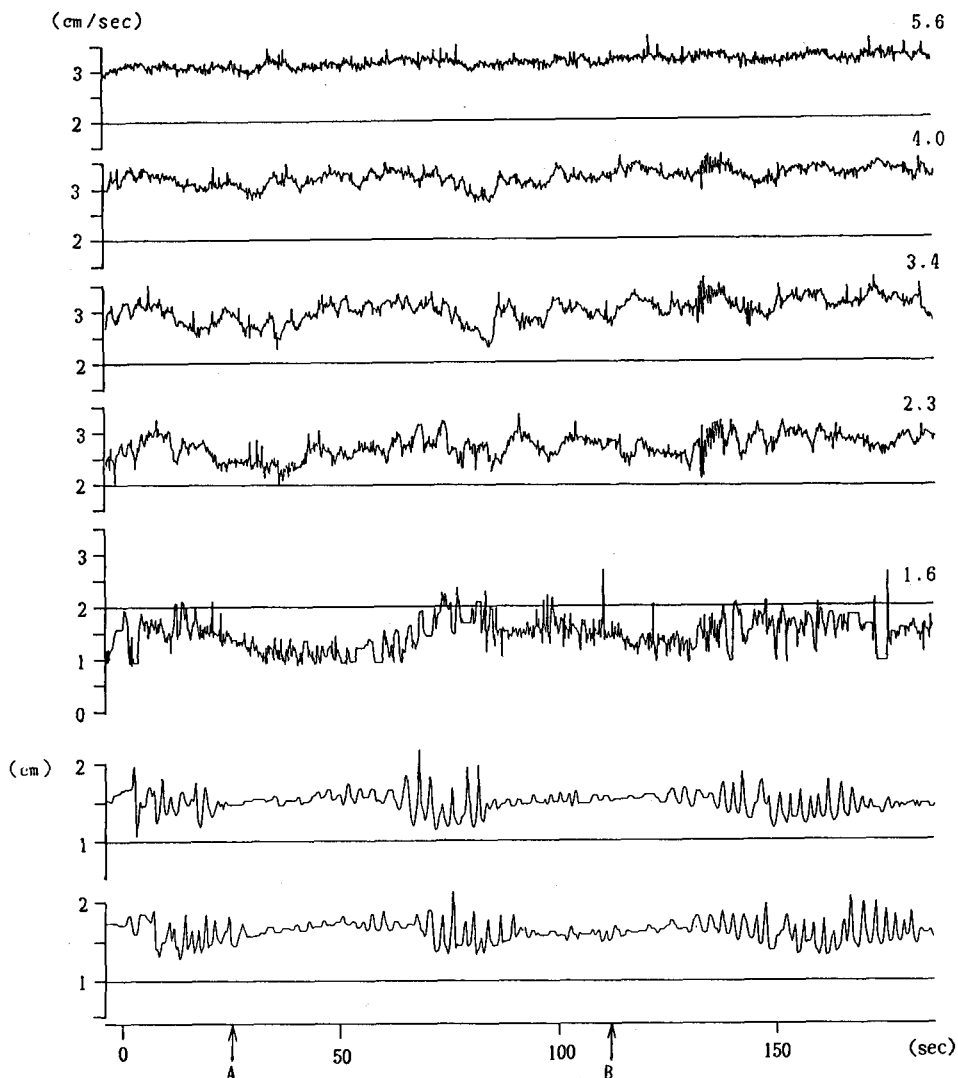


図-3 流速と界面変位の時系列

上から5つの時系列は流速、付された数値は底からの距離 (cm)
下2つの時系列は界面変位で、上が上流側、下が下流側でのもの

3. 実験結果

LDAと界面追尾計による各チャンネルの流速と界面変位の時系列の一例を図-3に示す。図中、上5つがLDAによる流速で、下の2つが界面の変位である。(なお、最下位置の流速データには、界面波が時折光路を遮ることによるデータの欠落部分を含んでいる。)この結果Keulegan波は、wave packetとして観測されることが分かる。またそのwave packet上の界面近くの流速が一時的に80%程増加し、一時的なshearの増加を生じさせることが分かる。さらにそのとき、平均界面位置が3mm程低下していることも読み取れる。図-3の時刻AからBまでについて12秒毎の流速分布を求めると図-4を得る。そしてこれらの流速分布から図-5の定義によりReynolds数、Richardson数を求めると表

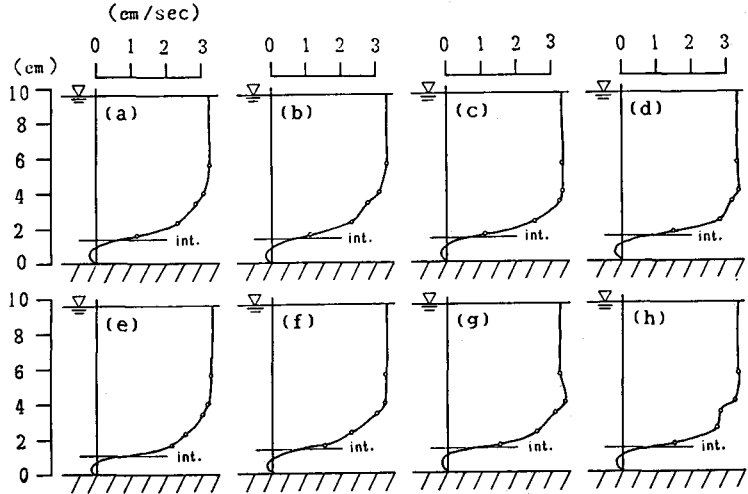


図-4 流速分布

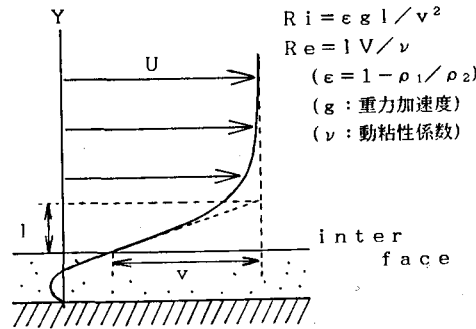


図-5 Re数、Ri数の定義

	Re数	Ri数
(a)	262	0.69
(b)	316	0.74
(c)	261	0.61
(d)	174	0.58
(e)	155	0.52
(f)	202	0.60
(g)	220	0.58
(h)	207	0.65

表-1

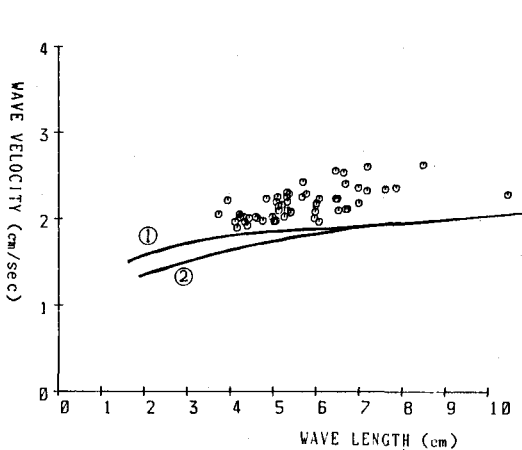


図-6 波長と波速
(○:実測値、実線①:最小のRi数に対する計算結果、
実線②:最大のRi数に対する計算結果)

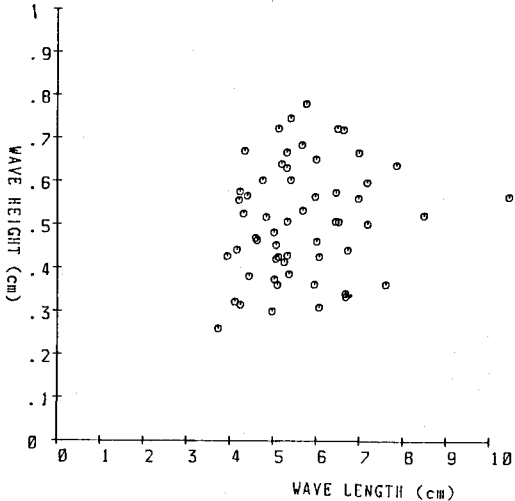


図-7 波長と波高 (○:実測値)

-1を得る。これからもKeulegan波の通過時に、 Ri 数の一時的な低下を見ることができ、このhigh shearによってKeulegan波が発生したとする過去の報告²⁾の妥当性を確かめることができる。

つぎに界面追尾計によるデータから得られた波速、波長、波高についての結果を示す。図-6が波長と波速の関係、図-7が波長と波高の関係、そして図-8が波数と単位時間当りの平均の波高増幅率 $(\log(H_2/H_1)/\Delta T)$: ここで H_1, H_2 は上、下流側の追尾計による波高、 ΔT は2追尾計間を通過する時間である) の関係である。なお波長と波高については2測点間の平均値を用い、波長は谷から谷までの距離、波高は谷から山までの高さである。

4. 考 察

波数と単位時間当りの波高増幅率の関係を表す図-8には、 $\tanh$ 近似の流速分布を用いた西田・吉田³⁾の線形安定性解析による理論値も実線で示されている。同図から今回測定されたKeulegan波の波数は、線形安定性解析によるmost unstableの波数域を中心に分散していることが分かる。従って、今回測定された界面波は上記の線形安定性解析で十分議論できるといえる。さらにその増幅率はほとんど理論値を下回っている。その理由としては、すべての波が等しく非常に不安定な流れ場で測定されているわけでないこと、また、下層厚が薄いことによる安定化の影響なども考えられる。また、さらに今回、図-9に示すように波高の大きい波ほど増幅されないという経験則を見いだしたが、その点も関与していると考えられる。

つぎに図-6の波長と波速の関係について考察する。図-6の中で実線は、上記線形安定性解析による結果である。そして実線①は、図-4の流速分布の中で最小の Ri 数を示す(e)から得られたもので、②は最大の Ri 数を示す(b)によるものである。これらの解析結果の差異は実測値に較べ小さく、実測値には理論値に較べ波長が大きいほどより大きな値を示す傾向がみられる。そして図-7から分かるように波長が大きいほど波高も大きいという傾向があることからこの差異は有限振幅による効果と考えられる。この効果をさらに明確にするため、波高と、波速の線形安定性解析による結果(実線①)との差の比 $((C-C_0)/C_0)$: ただし C は実測した波速、 C_0 はその波長での線形理論による波速) との関係を図-10に示す。同図から、かなりの分散はしているものの、波高の大きい波ほどその波速が線形の理論値よりも大きい値を有する傾向

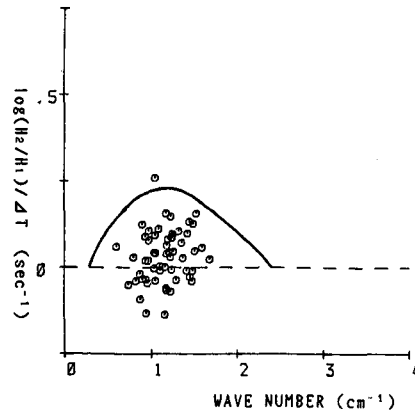


図-8 波数と単位時間当りの波高増幅率 $(\log(H_2/H_1)/\Delta T)$
(○:実測値、実線: $Ri=0.52, Re=100$ における線形安定性解析による計算結果)

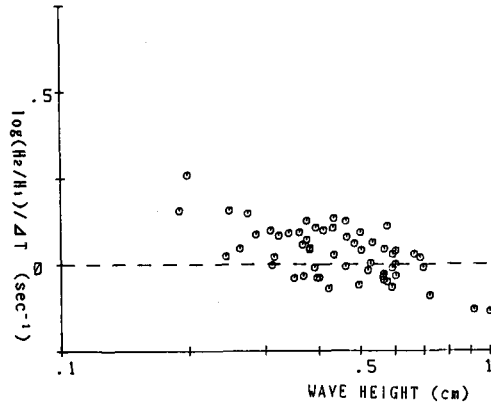


図-9 上流側界面追尾計での波高と単位時間当りの波高増幅率 $(\log(H_2/H_1)/\Delta T)$ (○:実測値)

のあることが分かる。そしてKeulegan波は、その形状(図-2)が尖った山と平らな谷をもつという特徴を有していることから、非線形波としての性質を有することは十分考えられる。しかし、その波高の波速に与える効果についてはKeulegan波のような不安定波に関しては理論的に未だ明らかではない。そこでとりあえずその形状が類似しているという定性的な理由で、安定波である内部波ソリトン⁴⁾との比較を試みた。

図-10の破線に示されるのが今回

の水深を有する、静止二層流におけるソリトンの波速である。これと今回測定されたKeulegan波の波速とはオーダーが同じであることが分かる。このことから、Keulegan波の実際の波速が線形解を上回る原因は、有限振幅による効果にあるといえる。

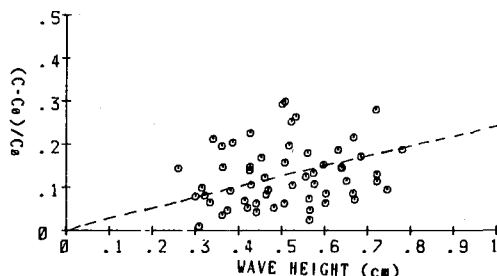


図-10 波高と波速の線形解析との差の比 $((C-C_0)/C_0)$
(O:実測値、破線:ソリトンの波速)

5. 結 論

以上の研究によってつぎのことが明らかになった。

- (1) Keulegan波の間歇的発生の原因と考えられる流速変動が、その波速と解析結果との差異に与える影響は小さい。
- (2) Keulegan波の波高の増幅率及び、発生波数はともに線形安定性解析の結果とよい一致を示した。
- (3) Keulegan波の波速は、線形安定性解析の計算結果に比べ、波高の大きな波ほどより大きな値を有する傾向があり、それは有限振幅による効果であると推測される。

なお過去の報告⁵⁾において、Keulegan波は短い周期での波速の変動を有するということから今回はできるだけ長時間の平均的な波速を求めることによってその分散を少なくしようと試みた。しかし依然としてデータが散乱するのはこの変動によるものなのか、測定誤差によるものなのかは明かでなく、今後その原因の究明と、更に精度を上げた測定が必要である。更に界面波が発生した時の理論解析において、線形解析で定義されたRi数がどこまで適用可能であるかということも疑問であり、非線形解析によって明らかにされる必要がある。

文 献

- (1) 吉田静男:密度界面波の特性と計測,第4回混層流シンポジウム論文集,pp.203-224,1985
- (2) 吉田静男・田城徹雄・西田修三・米光 昇:界面波束の発生と流速変動,第29回水理講演会論文集,pp.431-436,1985
- (3) 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.550-554,1982
- (4) G.H.Keulegan:Characteristics of Internal solitary Waves,Journal of the National Bureau of Standards vol.51 No.3,pp.133-140,1953
- (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