

波と流れの共存場における水粒子速度に関する研究

岩 垣 雄 一*・ 浅 野 敏 之**

1. 緒 言

波と流れの共存場に関する従来の研究は、主として流れの場での波の理論の展開に関心が持たれてきた。すなわち、流れが鉛直方向に流速分布を持つ場合あるいは場所的に流速が変化する場合について、流れによる波の特性の変化が議論され、多くの知見が得られている。

それに反し、共存場に関する実験的研究は少なく、理論の妥当性の実験値からの検討は行われていない。さらに波動が流れに及ぼす干渉効果、すなわち波の存在により、流れの分布や大きさが変化する効果により、従来の理論が現象を十分説明しえないことも考えられる。

波と流れの相互干渉下における、水粒子速度の特性を実験的に調べた研究には、佐藤¹⁾、van Hoften と Karaki²⁾ の研究があるが、前者は逆流について、後者は順流について行われたものであって、流れの大きさ・向き、波の諸元について系統的な議論はなされていない。

本研究は共存場における内部機構を明らかにすることを目的として、ホットフィルム流速計を用いて水粒子速度を測定したものである。当初は種々の波および流れの条件下において、多くの実験ケースについて実施する予定であったが、ホットフィルム流速計の温度や汚れによる出力のドリフトが大きく、結局、順流・逆流についてそれぞれ1ケースずつ実験を行ったにとどまった。測定された流速記録は、平均流速とそれからの偏差で定義した乱れとに分け、波の位相ごとに解析処理を行った。平均流速・乱れ強度の鉛直分布特性、波の位相による変化および平均流速の実測値と共存場における理論値との比較を行い、以下のような結果を得たので報告する。

2. 実験装置および方法

実験は図-1に示す水槽を用いて行った。出力11kWのポンプにより、水槽内に循環流を発生させるもので、

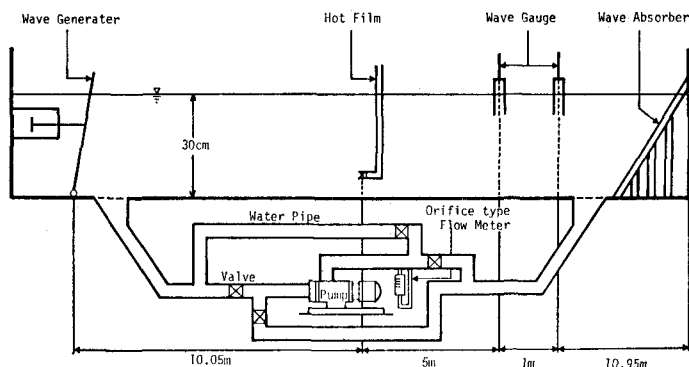


図-1 実験水槽

配管を工夫して、4つのバルブの開閉操作により、流れの向きおよび大きさを変化させようとした。この循環流発生装置により生成された流れは、ポンプのスイッチを入れて3分後には定常になり、また造波機から5m～12.5mの区間において鉛直方向にほぼ一様な流れが得られるが、それ以外の区間では流速分布に噴出・吸込みの影響が見られることを確めた。実験は流れの定常性および一様性の認められる時間および区間で行った。

流速測定はX型ブルーブを有するホットフィルム流速計を用いた。この流速計の測定原理・特性等については多くの文献³⁾に詳述されており、ここでは省略する。測定にあたって注意すべきことは、使用する水の温度変化と不純物の混入がもたらす出力のドリフトである。今回用いた装置においては、水がポンプを通してパイプ管内を循環するため、温度上昇が著しく、連続運転を行えば30分で水温が1°C程度上昇することがわかった。一方、水中の不純物の除去にあたっては、水槽内を入念に清掃するとともに、水を何度も入れ換えてから実験を開始しようとしたが、パイプ管内は掃除することができないため、完全にこの測定誤差の原因を除去できたとはいえない。Richardson ら⁴⁾は、温度および汚れの付着による出力低下は、ホットフィルムの加熱温度と周囲流体温度の比、すなわち overheating ratio を変えることにより補正が可能であると述べているが、フィルムの温度を連続的に変えることは難しいことや、汚れの付着は連続的な現象ではなく、また2本のセンサーに様に付着す

* 正会員 工博 京都大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 工修 京都大学助手 工学部土木工学科

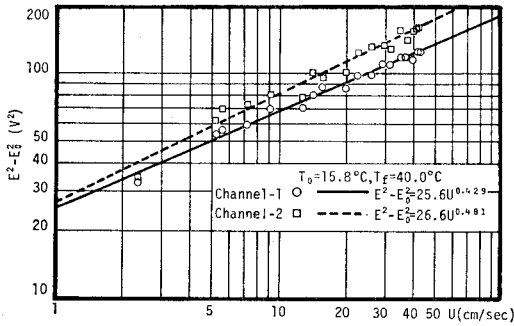


図-2 流速-出力電圧校正曲線の1例

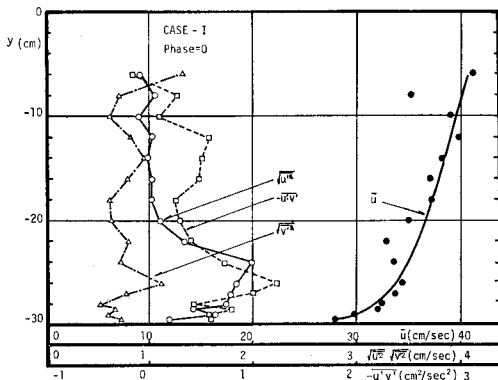
るわけではないことから、この方法は事実上不可能であると考えられる。そこで本実験においては流速-出力電圧のキャリブレーションを実験前のみならず、実験中も4, 5回行い、その時点における流体温度・汚れの付着状況に応じた校正曲線を得るようにした。図-2はこの校正曲線の1例である。

このホットフィルム流速計は、ブルーブの形状から一方方向の流れしか検出できない。波動は往復流であるが、流れを大きくすると、波と流れの共存場における水粒子の運動は常に一方方向となる。しかし波の周期が小さいと、特に逆流においては碎波しやすいので、きれいな波が得られないことを考えて、本実験では周波数約0.8 Hzの波を用い、順流時と逆流時の2つのケースを調べた。また水深は30 cmで一定とした。

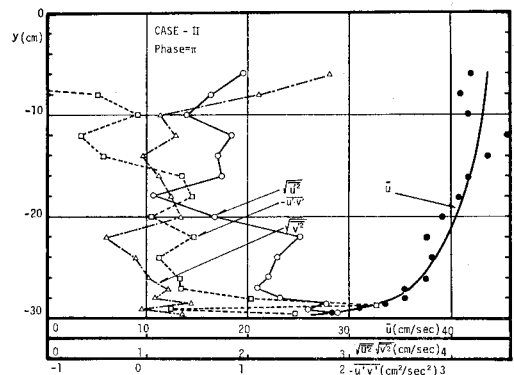
表-1 実験条件

	流れの向き	断面平均流速 (cm/sec)	周期 (sec)	平均波高 (cm)
CASE-I	順流	24.5	1.28	5.16
CASE-II	逆流	27.7	1.28	7.44

流速測定は水面下6 cmから26 cmまで2 cmおきに、さらにそれ以深は27 cm, 28 cm, 28.5 cm, 29 cm, 29.5 cmの合計16点を測定した。



(a) 順流



(b) 逆流

図-4 平均流速および乱れ強度の鉛直分布

測定時間は、1分間としたが、解析に用いたのはCASE-Iについては40 sec間の約31波分、CASE-IIについては48 sec間の約37波分の記録である。流速計および水位計からの出力を磁気テープに記録し、サンプリング間隔100 HzでAD変換した。位相を32等分し、各位相におけるアンサンブル平均値を平均流速 $\bar{u}$, $\bar{v}$ とし、各瞬間における速度成分の平均流速からのずれを乱れ成分 u' , v' と定義した。以上の解析処理は京都大学大型計算機センターにあるFACOM-M190を利用した。

3. 実験結果および考察

(1) 平均流速および乱れ強度の鉛直分布

まず流れのみの場合について測定を行い、平均流速および乱れ強度の分布として図-3のような結果を得た。平均流速 $\bar{u}$ はほぼ $U(y) = a(h^2 - (by)^2)$ (h は水深, a, b は定数) で示されるような放物線分布をしている。ここで定数 a, b は実験値と最も良く一致するように決定するもので、図-3の平均流速を示す曲線は $U = 3.11(h^2$

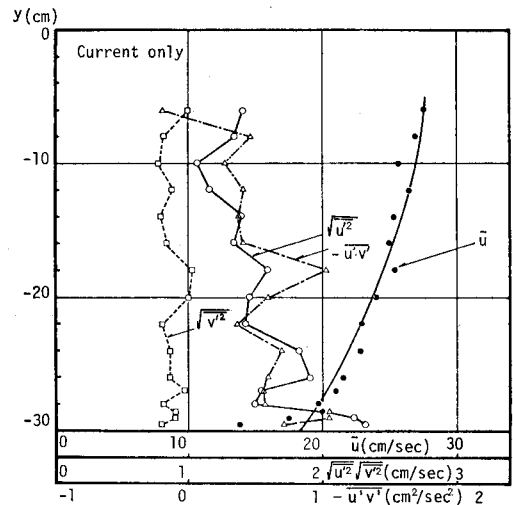


図-3 平均流速および乱れ強度の鉛直分布 (流れのみ)

$-(0.58y)^2$ であった。 x 方向の乱れ強度 $\sqrt{u'^2}$ および Reynolds stress $-\overline{u'v'}$ に関しては、水面近くでは小さく、水底付近で大きくなるのがわかる。一方、 y 方向の乱れ強度 $\sqrt{v'^2}$ は、水深を通じてその大きさはあまり変化せず、ほぼ $\sqrt{u'^2}$ の 1/2 程度の大きさである。

次に波と流れの共存場において、平均流速と乱れ強度の鉛直分布を調べたものが 図-4 (a), (b) で、これらは平均流速が最大となる時の波の位相時についてのものである。

ここで図中の平均流速を示す曲線は、実験値に合わせて引いた曲線である。両ケースとも乱れ強度 $\sqrt{u'^2}$, $-\overline{u'v'}$ は水底に近づくほど大きくなっているが、 図-4 (b) では水面付近でも乱れ強度が大きくなっており、このことは他の位相時でも一般的に見られた特性である。

本実験のように水粒子の運動が常に一方であるような流れを発生させた場合、共存する波の波高はある程度ばらつき、それを乱れとして取り扱ってしまうことも考慮に入れなければならないが、水面近くでは波と流れの干渉により、乱れの大きな流れの場が形成されていることを 図-4 の結果は示すものと考えられる。

(2) 平均流速の位相による変化

現在まで各種の流速分布を持つ流れと共存する波の理論が導かれているが、ここでは一様流および放物線分布をなす流れと共存するときの波動理論をとりあげ、実験結果との比較を行った。一様な流れの上の波の諸性質は、流れと共に移動する座標系から見れば、流れがない場合と全く一致する。したがって一般の波動理論の角周波数 σ に $\omega - kU$ を代入すれば一様流上の波動理論が得られる。ここに ω は固定座標から見た角周波数である。ここでは Laitone⁵⁾ による Stokes 波理論の展開にならって、一様流上の 3 次の Stokes 波理論を展開した。

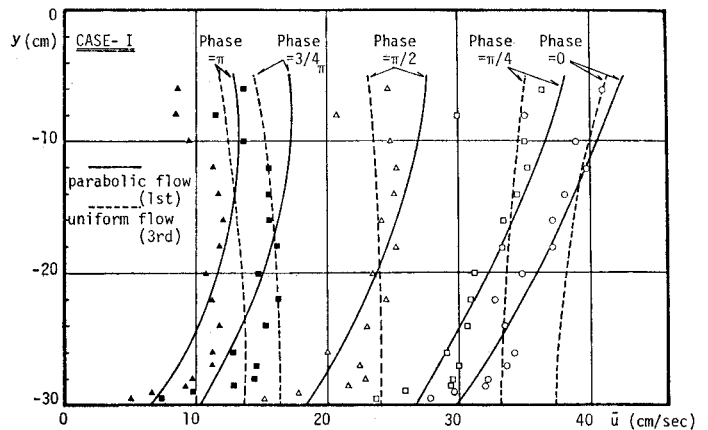
また放物線分布上の波の理論は、浜田・加藤^{6),7)} によって導かれているが、 $U(y) = a(h^2 - y^2)$ (a は定数) で示される流れの分布が、本実験の流れの分布を表現しないため、 図-3 で示したように $U(y) = a\{h^2 - (by)^2\}$ として流れを表わすことにした。こうした分布形を仮定したため、その理論式の展開にあたっては、浜田・加藤の理論式をいくらか修正する必要があった。

図-5 (a) は CASE- I すなわち順流

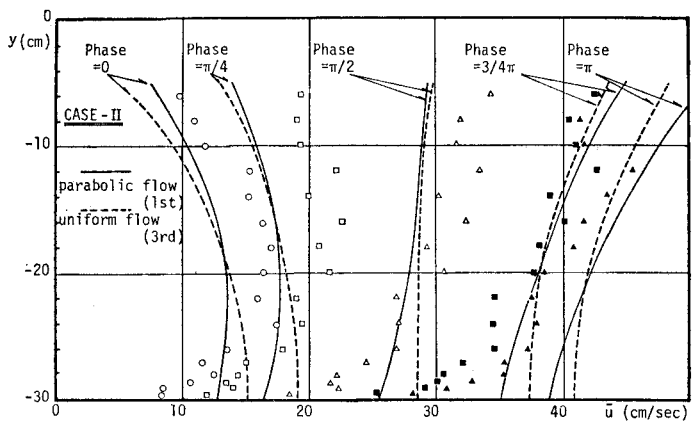
における結果であるが、放物線分布の場合の理論値は実験値と全般的に良く一致している。水面付近では放物線分布の場合より一様流の理論値の方に一致しているようであるが、これはここで用いた放物線分布の理論が一次近似であり、近似度の不足によるものと考えられる。

図-5 (b) は逆流における結果であるが、峰位相において理論値は実験値より小さく、谷位相では大きくなり、両理論による計算値の一致の程度は良くない。ただし放物線分布の形状を決定する時に、どの付近の流速の測定値と適合させるかには任意性があり、この場合も水底付近の流速値と一致するように分布形を決定すれば、共存場においても水底付近に限っては実験値と良く一致するであろう。理論値と実験値が一致しない他の理由としては、この CASE- II の場合、表-1 に示すように波高が比較的大きく、逆に波長は短縮されるため、非線形性が大きく現われ、水面付近での相互干渉が著しいことが考えられるが、さらに詳細な実験を行わなければ何とも言えないであろう。

図-6 は位相による平均流速の変化について、実験値



(a) 順流



(b) 逆流

図-5 平均流速の鉛直分布

と一様流上の Stokes 波の理論値とを比較したものである。水面に近い点での実験値の曲線は、理論値の曲線とかなり形状が異なっているが、中心部においては実験値と理論値の曲線はほぼ一致している。

(3) 位相による乱れ強度の変化

最初に $\sqrt{u'^2}$ について考察する。図-7(a), (b) は CASE-I について、図-7(c), (d) は CASE-II についての結果である。水面付近における $\sqrt{u'^2}$ の分布は双峰形を示し、波の位相が 0 および π において

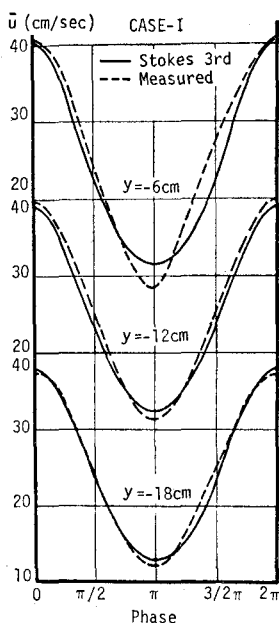


図-6 位相による平均流速の変化

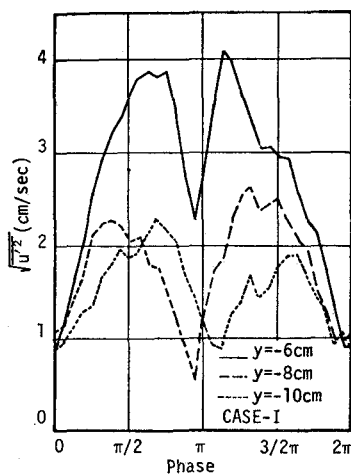
は極小となる。こうした傾向は水底に近づくにつれて見られなくなる。この性質は佐藤¹⁾, van Hoften と Karaki²⁾ の結果からも明瞭に読みとれる。

$\sqrt{v'^2}$ については、位相による傾向ははっきりしないが、佐藤も同様な結果を得ている。

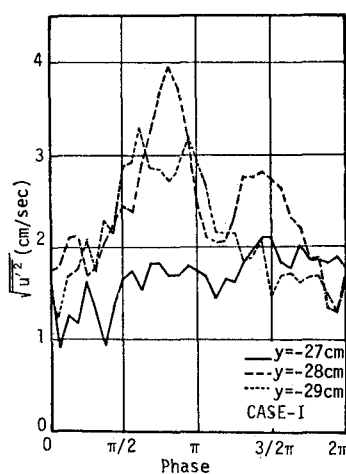
Reynolds stress $\overline{u'v'}$ については、図-7(f) に示すが、位相による傾向は明らかではない。開水路流れのように、平均流速の水深方向勾配 $\partial \bar{u} / \partial y$ が正である場合には、 $\overline{u'v'}$ の値は負となることが知られている。しかし図-7(f) では、水面に近いところほど、特定の波の位相において $\overline{u'v'}$ が正になっている部分が多いことが注目される。これは図-5 に示されるように、共存場においては水面に近いところで、 $\partial \bar{u} / \partial y$ が負となる位相があることと対応しているようにも考えられ、こうした問題はなお検討すべき興味深い事項である。

4. 結 論

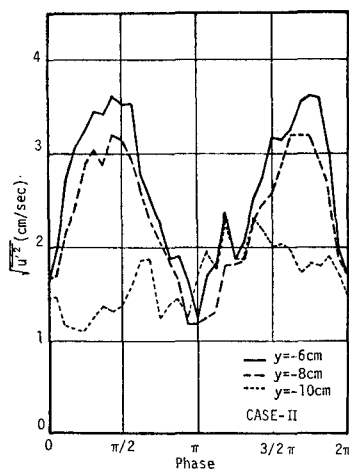
1) 乱れ強度の鉛直分布は流れ単独の場合および共存時ともに、 $\sqrt{u'^2}$, $-\overline{u'v'}$ は水底に近づくにつれ大きくなっているが、共存時の結果では水面近くにおいても乱



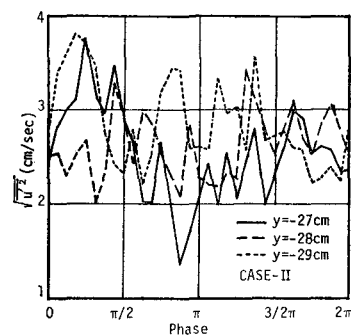
(a)



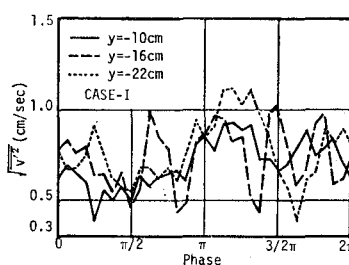
(b)



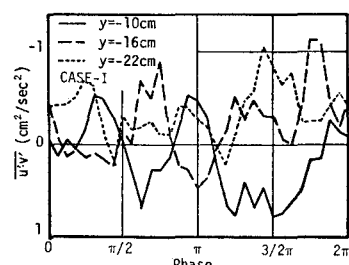
(c)



(d)



(e)



(f)

図-7 位相による乱れ強度の変化

れ強度が大きくなることがわかった。

2) 平均流速の鉛直分布に関する実験値は、順流の場合には理論値と良く一致した。またこの場合の平均流速の位相による変化についても、水深の中心部では理論値と実験値の曲線は良く一致していた。

3) 乱れ強度の位相による変化を調べたところ、乱れ強度 $\sqrt{u'^2}$ は双峰型の分布をなし、位相 0 および π では極小となることがわかった。しかし、この傾向は水底に近づくにつれて消えてしまうようである。 $\sqrt{v'^2}$, $u'v'$ の位相による変化の傾向は明確ではないが、 $u'v'$ の値は平均流速 $\bar{u}$ の勾配 $\partial\bar{u}/\partial y$ が負となる深さにおいては、正の値を得る位相の領域があることが注目された。

本研究で行った実験はわずか 2 ケースであり、結果を出すにはさらに多くの精度の良い実験結果の集積が必要であろう。今後はホットフィルム流速計に限らず、他の流速計によっても測定を行い、共存場の水粒子速度の特性を明らかにしていく予定である。また本実験では流速計の機構上、水底近傍や水面付近の水粒子速度は測定できなかったが、それぞれ漂砂現象や流れによる碎波現象をよく理解する上で重要であると考えられる。

最後にこの研究は文部省科学研究費(奨励研究)の一部であることを付記するとともに、実験およびデータ解析に熱心に協力して頂いた当時京都大学工学部学生藤谷茂君(現間組)に感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 佐藤道郎: 波が遡上する流れの水粒子運動に関する実験的研究, 第 21 回海岸工学講演会論文集, pp. 19~25, 1974.
- 2) van Hoften, J. D. A. and S. Karaki: Interaction of waves and a turbulent current, Proc. 15th Int. Conf. Coastal Eng., pp. 404~422, 1976.
- 3) 加藤 始・佐野喜久雄・高松恭文: 水中の乱流測定のための Hot-film 流速計の特性, 港湾技研資料 No. 157, pp. 1~21, 1973.
- 4) Richardson, E. V. and R. S. McQuivey: Measurement of Turbulence in Water, Proc. A.S.C.E. Vol. 94, No. HY2, pp. 411~430, 1968.
- 5) Laitone, E. V.: Limiting Condition for Cnoidal and Stokes Waves, Journal of Geophysical Research, Vol. 67, No. 4, pp. 1555~1564, 1962.
- 6) 浜田徳一・加藤 始: 流れをさかのぼる波についての一計算, 第 8 回海岸工学講演会講演集, pp. 25~29, 1961.
- 7) 浜田徳一・加藤 始: 流水の中の有限振幅波の計算, 第 10 回海岸工学講演会講演集, pp. 1~6, 1963.