

周期波と流れの共存場における乱れの定義とその特性について

岩 垣 雄 一^{*}・ 浅 野 敏 之^{**}・ 小 谷 敏 樹^{***}

1. 緒 言

波動運動場における乱れの研究は、従来渦動粘性係数の導入により、平均流速場との関連において議論されてきたが、最近、日野ら^{1),2)}や林ら³⁾は波動の代りに振動流を用い、水粒子速度場を直接測定して、それから乱れの特性を抽出することにより、いくつかの新たな知見を見出している。しかしながら、周期変動流の流速測定記録からの乱れの抽出法自体が明らかでなく、どのような抽出法が不規則性・拡散性・逸散性といった乱れが具備すべき一般的性質を持った変動を純粋に抽出できるかについて、詳細に検討した研究は見当たらない。

著者らは一昨年に波と流れの共存場における水粒子速度を実測した⁴⁾。その場合は波動の水粒子速度の変動振幅より大きな流速を持つ流れとの共存場を取扱ったが、これは水粒子運動が常に一方向で、流速計の後流渦が混入しないようにしたわけである。本研究はそのときの測定記録を用いて、乱れの抽出法とともに乱れの特性を考察したものである。乱れの抽出法としては、アンサンブル平均法、高周波数成分分離法と波動成分分離法の3つの手法をとりあげ、乱れの本質的特性に照らし、また定常流の乱れ特性との比較によって、抽出法の妥当性を検討した。逆に抽出法固有の歪みが見られず、結果の特性が無理なく解釈できる場合には、その結果は周期変動流の持つ有意な性質としてよいと考えた。こうした立場から解析・考察を行い、以下の結果を得たので報告する。

2. 解析データ

本研究で用いた記録は、一昨年に測定した時のものであり、実験の詳細は前論文⁴⁾に示してあるので、ここでは解析データについて概説する。この記録はX型プループを有するホットフィルム流速計により測定されたものであり、水深は 30 cm で、測定点は水面下 6 cm から 29.5 cm まで計 16 点である。流れの流速等の実験条件は表-1 に示すとおりである。各測定点での流速記録の

表-1 実験条件

Run No.	流れの向き	断面平均流速 (cm/sec)	波の周期 (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
CASE-III	順 流	29.4	1.03	3.31

うち、48 秒間のデータをサンプリング間隔 100 Hz で A-D 変換し、京都大学大型計算機センターの FACOM-M 190 により以後の解析を行った。

3. 乱れ変動の抽出法

(1) アンサンブル平均法 (method-A)

水粒子速度記録を波の位相ごとにアンサンブル平均することによって平均流速を求め、その偏差を乱れ変動とするものである。図-1 の (A) は水面下 29 cm の点で測定された水粒子速度の時間記録と、アンサンブル平均法によって求めた平均流速を重ねて示したものである。この方法は周期変動流における乱れの定義に広く用いられており、簡潔でわかりやすいが、造波の不整等の原因による、波高や周期のばらつきも乱れとして取り扱うという欠点がある。

(2) 高周波数成分分離法 (method-B)

この方法は乱れ成分をある一定の周波数より高い周波数の変動であると定義するものである。ここでは次式に示す非再帰型の数値フィルターを用いて、高周波数成分を分離した⁵⁾。

$$\bar{x}_n = \sum_{r=-R}^R w_r x_{n-r} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 x_n , $\bar{x}_n$ はそれぞれ濾波前、濾波後の離散化データ、 w_r は目的とする周波数応答関数 $A(f)$ から設計される数値フィルターである。

図-2 は、目的とする遮断特性として 5 Hz 以上の高周波数成分を完全に遮断するように設計された数値フィルターの、実際の遮断特性を示したものである。図よりラグ数 R が 10 と小さい場合には、期待したような鋭い遮断特性を示さないが、 $R=50$ とすれば一応十分な遮断特性が得られることがわかる。さらにラグ数 R を増加しても、ギブス現象のために完全な遮断特性を得るこ

^{*} 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

^{***} 正会員 工修 神戸製鋼所

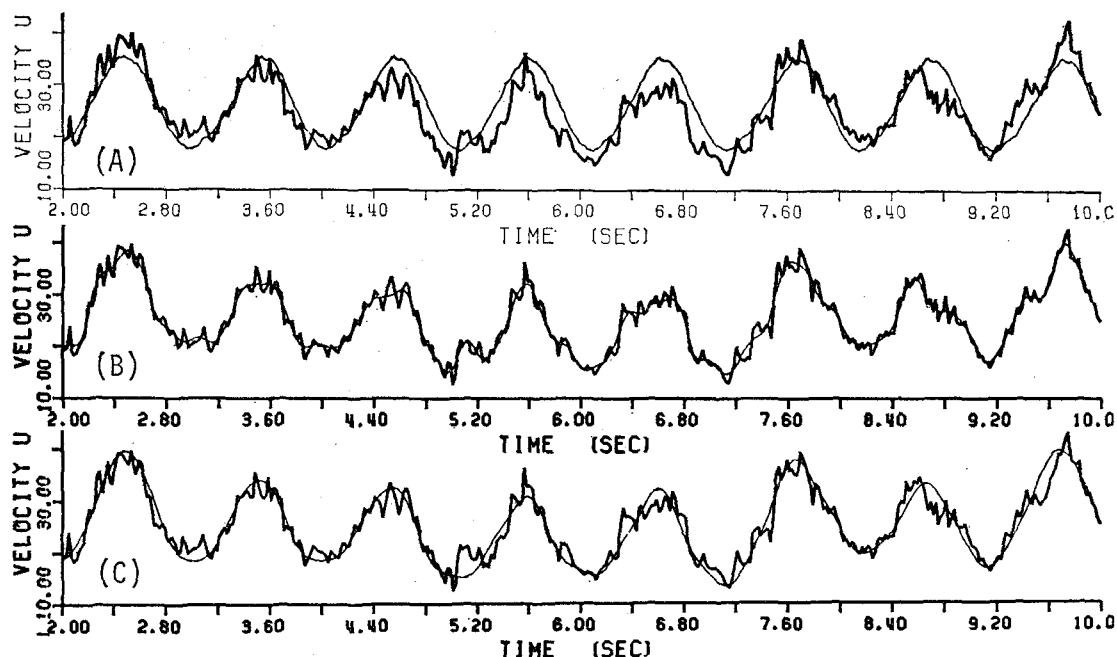


図-1 水粒子速度の時間記録と各手法で抽出された平均流速曲線 (CASE-III, $z = -29$ cm)

- (A) アンサンブル平均法
- (B) 高周波数成分分離法 ($f_h = 5$ Hz)
- (C) 波動成分分離法

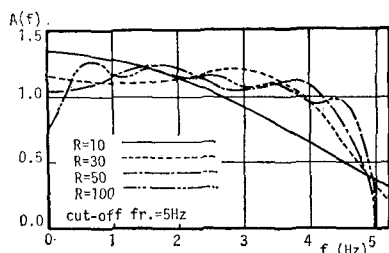


図-2 数値フィルターの遮断特性に対するラグ数の効果

とは不可能であり、よって以後の解析は、すべて $R=50$ とすることにした。

図-1 の (B) はカットオフ周波数 f_h を 5 Hz とし、水粒子速度記録と、数値フィルターで求めた平均流速を重ねて示したものである。アンサンブル平均法による結果と比較して、周期や波高の不整があっても、平均流速曲線はよく追随しており、この点では前者より優れた方法といえる。しかし乱れ変動と思われるような不規則な変動も、カットオフ周波数 f_h より低周波数の変動であれば平均流速とみなしてしまうという欠点を持つ。 f_h の設定の根拠についても明確なものはなく、また底面に近づくほど大きなスケールの乱れが発生することから、測定点の深さに応じて f_h の値も変化させる必要があると思われる。

(3) 波動成分分離法 (method-C)

この方法は手法-B よりさらに純粋に、波動の周波数成分のみをとり出すことを目的としたものである。流速変動のスペクトルのうち、波の基本周波数成分およびその高周波成分の変動は、乱れ成分も含まれているが、波動による成分が非常に大きな部分を占めると考えられる。そこで水粒子速度記録を FFT 法によりフーリエ級数展開し、そのうちの波動の基本周波数成分、2 倍成分および 3 倍成分をとり出して再合成を行い、それを平均流速とみなすものである。FFT によるフーリエ級数展開の周波数のきざみ幅 Δf は、全データ長の逆数となり、その倍数が波動の周期と必ずしも一致しない。したがって平均流速として取り出す周波数は、波の基本周波数、2 倍および 3 倍成分の周波数にある幅を持たせる必要がある。検討の結果、それぞれの周波数の両側に ± 0.1 Hz の幅を持たせれば十分であることがわかった。また波の基本周波数より低周波数側の成分は、流れや波の発生装置の非定常性や電圧降下、あるいは水槽内副振動によるものが多いと考えられ、これらは運動量交換を行う本来の乱れとは異なるので、この周波数帯は平均流速として取扱うことにした。図-1 の (C) はこの方法による平均流速曲線を示したものである。なお、フーリエ積分を有限区間で行うことは、無限に長い時間記録 $x(t)$ に箱型データウィンドーを掛けることに相当し、その結果真

のフーリエ変換を歪ませる。ここではデータの初めと終りの $1/10$ ずつの部分に、cosine 型の滑らかなデータウィンドーを掛けてからフーリエ変換するという補正を行った。

4. 抽出された乱れの特性

(1) 自己相関係数

乱れは本来ランダムな過程であるから、平均流がたとえ周期運動を行う場合にも、乱れ変動は周期的相関を持たない。したがって、水粒子速度の時間記録から平均流速成分を完全に除去すれば、ある小さな隔り時間 τ_0 に対して、 $\tau > \tau_0$ では自己相関係数は 0 となるはずである。ここでは上記の 3 手法により抽出された x 軸方向の乱れ速度 u' の自己相関係数を算出し、その結果から抽出法の妥当性を考察する。

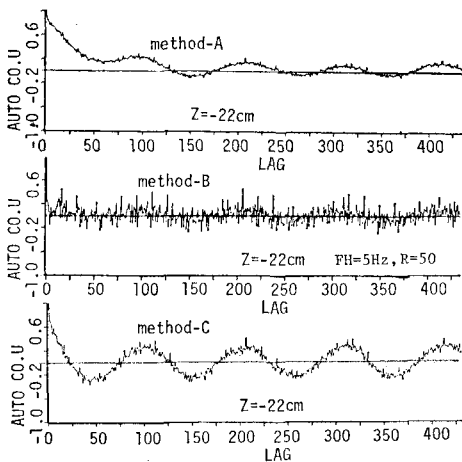


図-3 乱れ速度 u' の自己相関係数 (CASE-III)

図-3 がその結果であり、まずアンサンブル平均法による結果には、波の周期と同じ周期変動が見られることがわかる。これは図-1の(A)で示したように、水粒子速度の時間記録と平均流速曲線が、時間的にずれたり、水粒子速度の振幅が一定でないために、特定の位相で乱れとみなす偏差が大きくなることに起因すると考えられる。

手法-B による結果には、周期変動があまり見られないが、手法-C による結果には、手法-Aの結果と同様の周期的変動が見られる。これは手法-Cが手法-Bに比べて、平均流速成分とみなす周波数領域が狭いため、この成分の一部が乱れとして取り出されたと考えられる。

図-4 は手法-Bにおいて、自己相関係数に与える数値フィルタのカットオフ周波数 f_h の影響を調べたものである。 f_h を高くすると周期的変動が見られなくなるが、この測定点においては $f_h=5$ Hz 程度でも、波動成分がいくぶん抽出されずに残るようである。また測定点

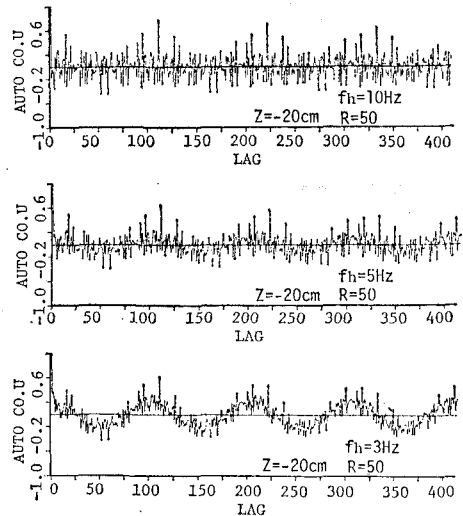


図-4 自己相関係数に対するカットオフ周波数 f_h の効果 (CASE-III)

が深くなるにつれて、同じ f_h の値でも周期的変動は見られなくなる。

(2) 乱れ速度の確率分布

定常流においては、 x 軸方向の乱れ速度 u' の確率分布は、ガウス分布と類似することが明らかにされている。周期変動流の場合の乱れ速度の確率分布がどのようなものかは不明であるが、不規則性・ランダム性という乱れの本質的特性から考えると、ガウス分布に近いと考えるのが妥当であろう。図-5 はアンサンブル平均法による結果を示すが、ほぼガウス分布と類似しており、また他の 2 つの手法による結果も同様となった。これはデータ数が多いために、乱れの抽出が適切でなくてもガウス分布に近づくものと考えられる。そこでデータ数を 250 個と少なくして、確率分布を調べたものが図-6 である。このデータは 2.5 sec 間 (約 2.5 波分) で、統計的に有意な個数ではないが、抽出法の妥当性を検討する上では、

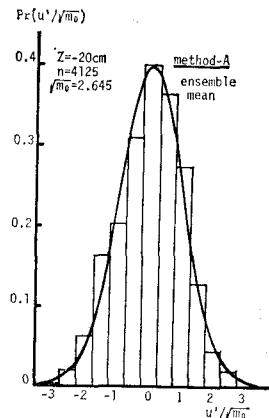
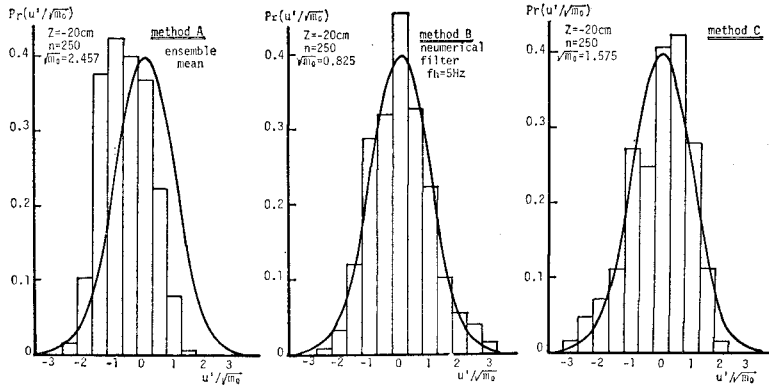


図-5 アンサンブル平均法による乱れ速度 u' の確率分布 (CASE-III)



図—6 3手法による乱れ速度 u' の確率分布の比較 (CASE-III)

こちらの方がわかりやすい。

手法-A のアンサンブル平均法の分布形はガウス分布と全く異なる。2.5 波分のデータで乱れ速度がこれほど大きく偏った分布形を示すのは、周期・波高の不整を乱れとみなしてしまうためで、もちろん別の区間のデータを用いると、その分布形はここで示した結果と全く異なる。他の2つの抽出法による結果は、データ数を少なくしてもガウス分布とほぼ類似したものとなるが、手法-B による結果では、分布型が少し尖鋭となっている。これはこの手法で抽出された乱れ速度の大きさが、比較的均等となることを示している。

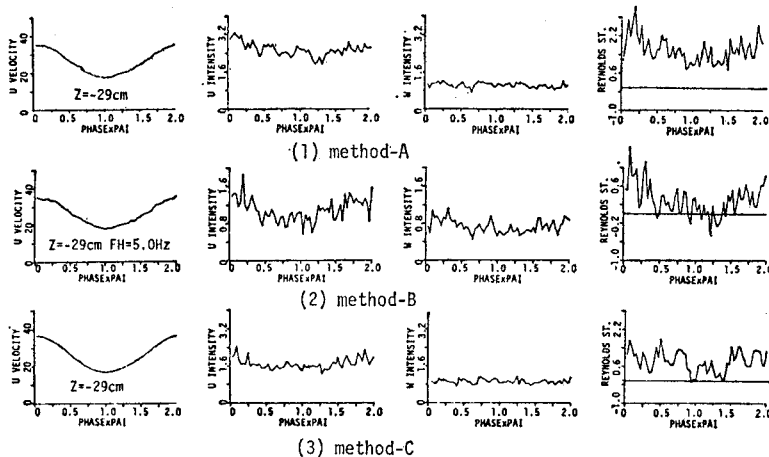
(3) 乱れ強度の位相変化

ここでは x 軸および z 軸方向の乱れ強度 $\sqrt{u'^2}$, $\sqrt{w'^2}$, およびレイノルズ応力 $-\rho u'w'$ の位相による変化について考察する。アンサンブル平均法および数値フィルターを用いた高次周波数成分分離法による結果の一部は既に発表した^{4),6)}。

図—7 は底面に近い $z=-29$ cm の測定点のデータを用いて、3つの手法による乱れ強度の位相変化を示したものである。この深さの測定データからは、手法による

結果の違いは見られず、 $\sqrt{u'^2}$ およびレイノルズ応力 $-\rho u'w'$ は平均流速の位相変化と対応した変化を示す。ここでは示さなかったが、CASE-I および II のデータを用いた場合も、同様に平均流速が大きくなるほど、 $\sqrt{u'^2}$ および $-\rho u'w'$ は大きくなる。日野らは交番振動流においては減速時に乱れが爆発的に発生すると指摘しているが、本研究の結果からはこのような性質は全く見られなかった。これは日野らが、水粒子速度が0となる位相を通して、その方向が逆転する流れを取り扱っているのに対し、本研究では水粒子運動の方向が常に一方向である点にその原因があると思われる。

図—8 は手法-B において、数値フィルターのカットオフ周波数 f_h を変化した時の、 $\sqrt{u'^2}$ の位相変化を示したものである。ここに示した水面下 6 cm の測定データでは、 f_h を 3 Hz とすると、 $\sqrt{u'^2}$ は波の峰と谷位相付近でピークを有する曲線となるが、 f_h を 5 Hz 以上とすると谷位相のピークが消え、平均流速曲線と同様の变化を示す。したがって谷位相のピークは 3 Hz~5 Hz の周波数成分によると考えられる。これより深い測定データでは、 $f_h=3$ Hz のようなカットオフ周波数が小さい場



図—7 3手法による平均流速 U , 乱れ強度 $\sqrt{u'^2}$ および $\sqrt{w'^2}$, レイノルズ応力 $-\rho u'w'$ の位相による変化

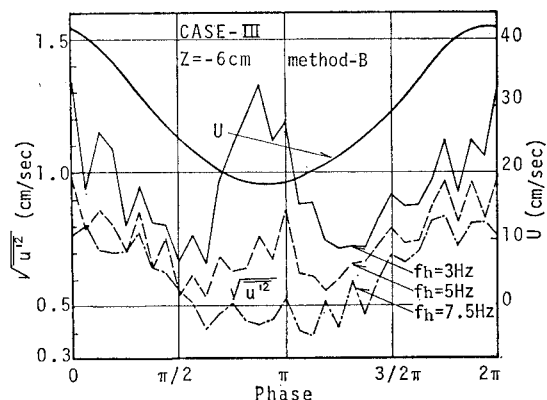


図-8 数値フィルターのカットオフ周波数 f_h と乱れ強度 $\sqrt{u'^2}$ の位相変化との関係

合でも、谷位相のピークは見られない。

(4) 乱れ強度の大きさとその鉛直分布

波の全位相を通じて平均した乱れ強度の鉛直方向分布の結果は、その一部を既に示したが⁹⁾、手法を問わず次のような性質が見出された。

$\sqrt{u'^2}$ および $-\rho u'w'$ は水底に近づくほど大きな値となり、一方、水面近くでは $\sqrt{u'^2}$ は中央部より大きな値をとるが、 $-\rho u'w'$ は負の値をとることがある。 $\sqrt{w'^2}$ は水深方向にあまり変化せず、その大きさは $\sqrt{u'^2}$ の $1/2$ 程度となる。

一方、3つの手法によって得られる乱れ強度の大きさはかなり異なる。図-9は $\sqrt{u'^2}$ についての、3つの手法による結果を示したものである。図中には、流れのみの場合の $\sqrt{u'^2}$ の測定値も合わせて示した。ここではこの定常流の結果との比較から、乱れの抽出法の妥当性を検討する。

手法-A による結果は、流れのみの場合の結果に比べて、特に水面付近で大きく、水深中央部および水底付近でもやや大きい。手法-C の結果は、水面付近では大き

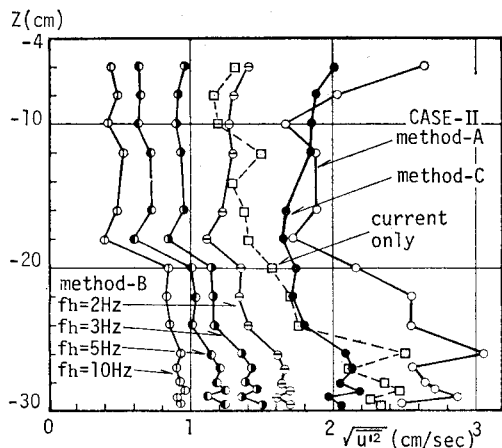


図-9 3手法による乱れ強度 $\sqrt{u'^2}$ の鉛直分布の比較

い値をとるが、水深中央部および水底付近ではほぼ同程度の値となり、3つの手法の中では最も一致度が良い。

一方、手法-B については、カットオフ周波数 f_h を 2 Hz から 10 Hz まで4通りに変化させた時の結果を示したが、いずれも流れのみの場合の結果に比べて、すべての測定点にわたってかなり小さい値となる。流れに波が重なった場合の乱れ強度が、流れのみの乱れ強度と大きく異なるとは考えられないので、この原因は抽出法の不適切さに帰すべきであろう。これよりある周波数より高周波数成分を乱れとする手法-Bは、乱れ成分の抽出が一部のみに限られるという問題点があることが明らかになった。

5. 結 言

① アンサンブル平均法は、波高や周期の不整も乱れと見なしてしまう欠点を持つ。長周期成分を数値フィルターで除去した後、アンサンブル平均をとる等の改善策を工夫しなくてはならない。② 数値フィルターによってある周波数より高周波数変動のみを乱れとして取り扱う方法は、遮断周波数の決定に明確なものがなく、また乱れ変動の一部のみしか抽出できていないことがわかった。③ 測定した時間記録をフーリエ級数に展開し、そのうち波動成分の周波数帯だけを取り出して合成する方法は、上記の2手法に比して問題点が少ないが、平均流速とみなす周波数帯の設定の仕方には検討の余地がある。④ 本実験で行った共存場の実験の範囲では、乱れ強度 $\sqrt{u'^2}$ およびレイノルズ応力 $-\rho u'w'$ は、平均流速が大きくなるほど大きくなる。また $-\rho u'w'$ は水面近くでは負となる位相領域がある。今後は波動のみの場合や、波と流れの流速比を広く変化させた実験を行い、周期変動流の乱れの特性を明らかにする必要がある。

最後に種々の御助言を頂いた酒井哲郎助教授に感謝するとともに、本研究は文部省科学研究費(奨励研究)による研究の一部であることを付記し、謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 日野幹雄・沢本正樹・高須修二: 円管内振動流の乱流遷移に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, No. 237, pp. 75~86, 1975.
- 2) 日野幹雄・柏柳正之・中山哲蔵・原 輝彦: 交番振動流の乱れの計測システム及び可視化実験について, 第25回水理講演会論文集, pp. 455~462, 1981.
- 3) 林 泰造・大橋正和・武安貞児: 往復流境界層に関する乱流特性についての実験的研究, 第25回水理講演会論文集, pp. 463~472, 1981.
- 4) 岩垣雄一・浅野敏之: 波と流れの共存場における水粒子速度に関する研究, 第26回海岸工学講演会論文集, pp. 6~10, 1979.
- 5) 日野幹雄: スペクトル解析, 朝倉書店, p. 138, 1977.
- 6) Iwagaki, Y. and T. Asano: Water Particle Velocity in Wave-Current System, Coastal Engineering in Japan, Vol. 23, pp. 1~14, 1980.