

フーリエ変換を用いた画像処理による碎波内部流速場の測定

小林智尚^{*}・日野幹雄^{**}・疋田賢七^{***}・萩原秀規^{****}

1. 緒 言

碎波帯の流体運動は大小さまざまな渦や気泡の混入などきわめて複雑な非定常運動であるが、この碎波現象に関わるエネルギー減衰や拡散、底質の巻き上げなどこの碎波体内の流体運動には解決すべき重要な課題が数多く含まれている。しかし碎波帯では水中に空気が混入されているため、レーザー流速計をはじめとする従来のオイラー流速計では計測が困難であり、さらにこれらの流速計は点計測であるために非定常流速場の流況を把握できる測定データを得るには多大の労力を要する。

これに対し、近年のコンピュータの発達にともない実用レベルまで近づいた画像処理による流速分布測定法は対象とする流体運動のある瞬間の流速分布が得られるので、碎波をはじめとする非定常現象を解明する上できわめて有効な手段である。最近では西村・武若 (1988) や真野・神尾 (1990) が相関法を用いて、また長尾ら (1991) はトレーサ法を活用して、碎波直前の流体運動や、従来より計測がきわめて困難であった気泡の混入した碎波後の流体運動の解析を試みている。しかしこれらの手法では解析にはエンジニアリング・ワーク・ステーション以上の計算機を用いなければならないほどの労力を要する場合が多く、簡便さを追求した長尾らの研究でも使用したパーソナルコンピュータ (パソコン) への負担は多大なものである。このように従来の画像処理を用いた流速分布測定法の欠点はその処理量の膨大な点にある。

本研究では、相関法と同様にトレーサを必要とせず、かつパソコンでも十分に対応可能な瞬間流速分布計測のための簡便な画像処理法の確立を目的として、2次元のフーリエ変換を用いて瞬間流速分布を得る画像処理法を構築する。

2. 画像処理の理論

(1) フーリエ変換を用いた流速分布算定法

フーリエ変換を用いて2枚の連続する画像から流速分布を算定する試みは奥野・木下 (1987) によって行われている。ここでは、奥野らにしたがって流速分布の測定原理を得る。

いま、ある画像の輝度分布を関数 $f(x, y)$ で表す。するとこの画像が $(x, y) = (a, b)$ だけ移動した画像の輝度分布は $f(x-a, y-b)$ で表される。ここで $f(x, y)$, $f(x-a, y-b)$ をフーリエ変換するとそれぞれ

$$\begin{aligned} \mathcal{F}[f(x, y)] &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) e^{-2\pi i k_x x} e^{-2\pi i k_y y} dx dy \\ &= F(k_x, k_y) \dots\dots\dots (1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathcal{F}[f(x-a, y-b)] &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x-a, y-b) e^{-2\pi i k_x x} e^{-2\pi i k_y y} dx dy \\ &= F(k_x, k_y) e^{-2\pi i (a k_x + b k_y)} \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

となる。ここで $\mathcal{F}[\]$ はフーリエ変換を表し、 k_x と k_y はそれぞれ x 方向、 y 方向の波数を、 $F(k_x, k_y)$ は $f(x, y)$ のスペクトル密度を表している。ここで、これらの比 $g(k_x, k_y)$ は

$$\begin{aligned} g(k_x, k_y) &= \frac{\mathcal{F}[f(x, y)]}{\mathcal{F}[f(x-a, y-b)]} \\ &= e^{2\pi i (a k_x + b k_y)} \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

であり、この $g(k_x, k_y)$ のフーリエ変換は

$$\begin{aligned} \mathcal{F}[g(k_x, k_y)] &= \mathcal{F}[e^{2\pi i (a k_x + b k_y)}] \\ &= \delta(x-a, y-b) \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

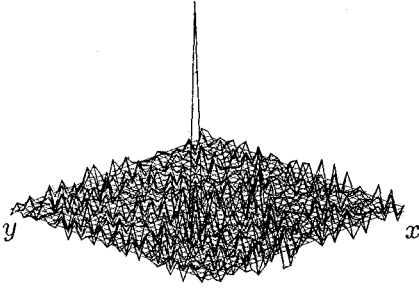
となる。ここで $\delta(x, y)$ はディラックのデルタ関数である。したがって、式 (4) で表される2次元平面の輝度の高い点の座標から式 (2) 中の (a, b) が得られ、領域内の画像の平均移動ベクトルが算定できる。実際の解析では、フーリエ変換する領域が限られるため、式 (4) に対応する座標 $(x, y) = (a, b)$ の値も有限となる。図1は本研究で実際の碎波の画像を解析している途中に得られた式 (4) に対応する輝度分布の結果である。この図からも、実際の計算においてもそのピーク値が有限で

^{*} 正会員 工修 東京理科大学助手 理工学部土木工学科

^{**} 正会員 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科

^{***} 五洋建設

^{****} 住友生命



図—1 式 (4) のデルタ関数に対応する画像処理結果

あることがわかる。そして、このピークの値は次に述べるような意味を持っている。

式 (1) から式 (4) で表される手法は流速場 (画像) が凍結していることを前提としている。しかし実際には対象とする 2 画面の撮影時間内に流体には回転をはじめとするさまざまな変形が生じており、特に本研究で対象としている砕波内部では局所的な渦運動がいたるところで生じている。この影響は式 (4) のデルタ関数で表される 2 次元平面上にノイズとして現れてくる。実際の解析結果では、2 つの画像の間に回転などの流体運動が生じた場合には、図—1 のように式 (4) で表される画像にはノイズが加わり、移動量を示す高輝度の点の輝度も低下してしまう。したがって、この輝度の大きさは算定された移動量の精度の高さも表しているといえる。

本研究ではフーリエ変換に高速フーリエ変換 (FFT) を用いて解析を行っている。これにより、本解析は従来用いられている相関法に比べ処理量がかなり少なくなり処理に要する時間も大幅に短縮できる。

また、この画像処理法を用いて解析を行う場合、1 度に対象とする領域は流速ベクトルの空間分解能を上げる意味でも小領域が望ましい。しかし小領域を対象とした場合、フーリエ変換時には少ないデータで精度良くスペクトル分布を推定しなければならない。このような制約下でのフーリエ変換には最大エントロピー法 (MEM) や AR 法が優れているが、画像解析では膨大な数のデータをあつかうため、現時点では速度の点で FFT を用いざるを得ない。そこで本研究では、FFT を用いて解析するときに、対象とする領域を大領域からはじめて目的の小領域まで数段階に分けて移動ベクトルを算定し、各々の段階での結果を参考に次の段階の領域での移動量ベクトルの算定を行っている。これにより移動ベクトルの推定速度をさほど低下させずに対象領域を小さく設定することができる。

(2) ラプラシアン・フィルタ

砕波体内の流体運動を捉える上で水面近傍の水粒子の運動を算定することは重要なことである。ところがこの水面近傍の流速分布を算定しようとしたとき、画像処理

の対象となる小領域に水面が入ってしまう。画像処理の立場からみると、この水と背景との境界である水面はある速度で運動している画像と止まっている画像の境界である。このように処理対象となる画像データ内に異なる速度の部分が含まれている場合、本研究で用いた画像処理法や相関法では流速の算定時に精度が急激に低下したり、誤った速度ベクトルを算定してしまう。そこで本研究ではこのような止まった背景を含んだ小領域での流体速度の算定を精度良く行うためにラプラシアン・フィルタによる前処理を行った。このフィルタによる前処理は水面などの境界を強調することを目的としており、これによって強調された水面近傍の水粒子は同一画面内に異なった速度で移動する背景を含んでいても比較的高精度で移動速度が算定される様になる。

このフィルタによって得られる処理画像データ $f'(x, y)$ は

$$f'(x, y) = F^2 f(x, y) \quad \dots\dots\dots (5)$$

より求められる。ここで $f(x, y)$ は原画像の輝度分布を表している。

一般の画像処理においてもこのラプラシアン・フィルタは輪郭線の強調などに用いられている。

(3) スムージング・フィルタ

相関法と同様に、式 (1) から式 (4) で表されたこのフーリエ変換による流速分布の算定方法は、さまざまな流体運動のうちの平行移動成分のみについて着目している。実際にこの画像処理法は平行移動のみが含まれた画像に対してはほぼ完全にその移動を算定できる。ところが、撮影された流体に回転運動や乱れなどが含まれていた場合、その推定の精度は急激に悪化する。これはこの画像処理方法では平行移動以外のこれらの流体運動をノイズとして扱ってしまうからである。しかし、本研究で対象にしている砕波内部はこれらの局所的な運動が非常に強い流れ場である。このような場にフーリエ変換による流速分布算定方法を直接適用しても、ある程度の精度を維持してこの場の流速分布を算定することは困難である。そこで本研究では、これらのノイズとして扱われる流体運動による精度低下を避けるために、画像データにスムージング・フィルタによる前処理を施した。

このフィルタにより得られる輝度分布 $\bar{f}(x, y)$ は次のように与えられる。

$$\bar{f}(x, y) = \frac{1}{A} \int_A f(x, y) dA \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 A は点 (x, y) 近傍の小さな空間を表している。

一般に、このスムージング・フィルタはエイリアシングを生じやすく画像そのものもぼかしてしまう。そのため画像データのノイズ除去フィルタとして一般にはこのスムージング・フィルタは用いられず、かわりにミディウム・フィルタが用いられる。しかし本研究で取り除き

たいのは流体運動そのものによるために生ずるノイズであり、通常のノイズとは異なるため、このスムージング・フィルタを用いた。

3. 画像処理による流速分布の算定

(1) 砕波時の流速分布の測定

本研究ではこの画像処理法を用いて、まず砕波点での波の流速分布の算定を行った。解析には西村ら (1988) によって得られたビデオ・テープ・レコーダー (VTR) 画像を用いた。この実験は 1/20 を有する 2 次元水路を用い、水深 16.7 cm の斜面法先で波高深比が 0.34 の孤立波を対象に行われている。撮影には高速 VTR が使われ、この VTR の画像は 220×190 画素、毎秒 1,000 で撮影されている。ここでは解析に 1/500 秒の時間間隔を有する 2 枚の画像を用いた。この画像の一つを 図-2 に示す。この砕波瞬間の波の流速分布をフーリエ変換を用いた画像解析法により推定する。その結果を 図-3 に示す。このようにこの画像処理法によりほぼ流体内部の

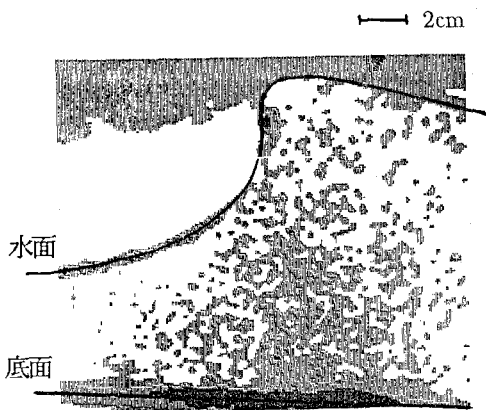


図-2 VTR 画像データ (西村・武若, 1988)

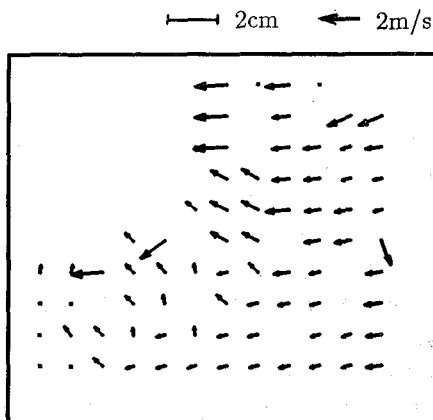


図-3 フーリエ変換を用いた画像処理解析法により算定された流速分布

全域において流速分布が比較的精度良く算定されている。しかし、波峰近傍の水面付近の流速ベクトルはそれほど高い精度では推定されていない。これは、前節 (2) 項で述べたように、画像処理対象となる小領域内の画像に運動している流体と静止している背景という 2 つの異なった移動速度を持った部分が存在するためである。そこで、ここでは前処理としてラシアン・フィルタを用いて水面の映像を強調し、水面近傍の水粒子の流速の算定を行ったのち、さらにその結果を 図-3 の結果と合成した。2 節 (1) 項において 図-1 のピークの値がその推定された移動量の精度を表すことを述べたが、ここで行った 2 つの流速分布の算定結果の合成では、同一の点での算定ベクトルのうち、図-1 に対応するピークの値が大きい方の流速ベクトルをより精度の高い算定結果として採用した。その結果を 図-4 に示す。この図から、特に波峰近傍での流速分布の算定結果が改善され、画面のほぼ全域で妥当な結果が得られたことがわかる。

(2) 連続画像撮影装置の開発

本研究で用いたフーリエ変換を用いる画像処理による流速分布の算定手法は、相関法と同様に、いかに連続した画像を得るかが高精度で流速分布の算定を行うカギとなる。とくに本研究で対象とした砕波現象のように高速で運動する流体を解析する場合、非常に短い時間間隔で画像撮影を行わなければならない。このため、通常市販されている VTR は毎秒 30 画面の撮影速度であるために使用できず、特殊な装置を用いなければならない。西村ら (1988) は高速 VTR を用いて、また真野ら (1990) は高速カメラを用いても毎秒 1,000 画面の高速撮影を行っている。これに対して、長尾ら (1991) は特殊な装置を使わず、通常のカメラとストロボスコープを用いてトレーサーを含んだ流体の映像を重ねて撮影し、トレーサー法により流速分布の算定を行っている。しかしこ

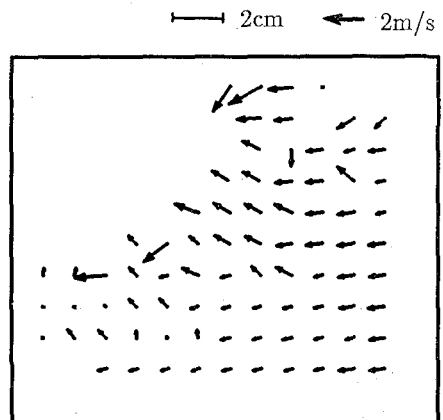


図-4 ラシアン・フィルタによる前処理した場合の結果と合成した流速分布

の方法ではトレーサーを流速算定の指標として用いているために、トレーサー抽出が困難な砕波後の無数の気泡を含んだ流体内では適用できない。そこで本研究では安価で高速撮影可能な装置の開発を目的として、一眼レフカメラのシャッター幕の特性を利用した撮影装置の開発を行った。

一眼レフカメラはフィルムの前面にある2枚のシャッター幕の移動開始時間のズレによってシャッタースピードを調整している。したがって、高いシャッタースピードで撮影したとき、この2枚のシャッター幕はスリットを作ってフィルムの前面を高速で移動するようになる。この時ストロボスコープを点滅させていれば、このストロボスコープ発光時にスリットが位置している部分のフィルム部分だけに映像が記録される。この様子をストロ

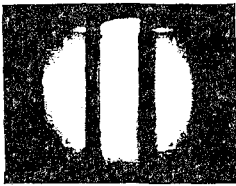


図-5 一眼レフカメラをストロボスコープに向けて撮影した映像 (シャッタースピード 1/250, ストロボスコープ発光 25,000 pulse/min)

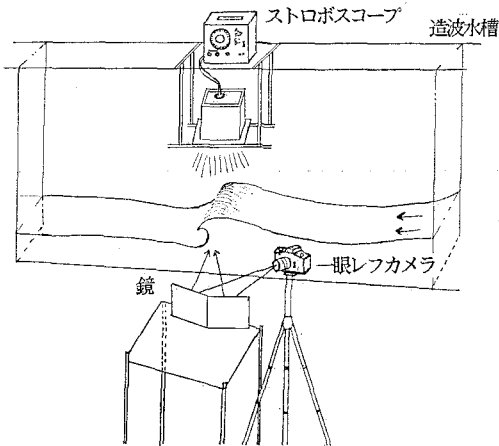


図-6 高速連続撮影装置の全体像

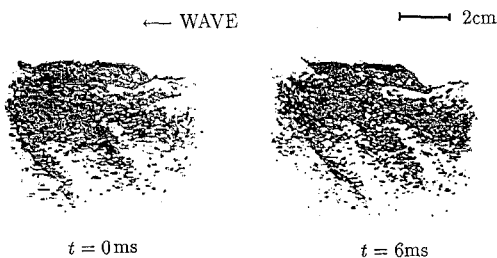


図-7 連続撮影された砕波後の気泡の運動 (タイムラグ 6 ms)

ボスコープに直接カメラを向けて撮影したのが 図-5 である。このようにこの原理を用いれば、時間的にわずかにずれた2枚の映像を撮影することができる。そして、この撮影される部分に同じ画像が写し込まれるようにカメラ前面に2枚の鏡をおいて調整した。この装置の全体像を 図-6 に示す。またこの装置により得られた砕波後の映像が 図-7 である。次に述べる砕波後の流速分布の算定にはこのシステムを用いて得られた画像データを用いる。

この方法は一般の実験装置で実現可能であるが、2枚の写真の時間間隔は使用する一眼レフカメラの性能によりほぼ決まってしまう。本研究で用いた撮影装置では 6 ms の時間間隔の映像を得ることになった。この時間間隔は後にも解析データを用いて示すが、本研究で対象としている砕波現象をとらえる上ではやや大きすぎる値である。

(3) 砕波後の斜降渦の流速分布

先に述べた撮影装置を用いて、砕波後に生ずる気泡を含んだ斜降渦の様子を撮影し、フーリエ変換を用いた画像処理法により流速分布を算定する。実験は 1/19 の勾配を有する2次元水槽を用い、水深 26 cm の砕波点から岸側約 1 m の点で見られた斜降渦の様子を撮影した。その写真の一つを 図-8 に示す。この時、ストロボスコー

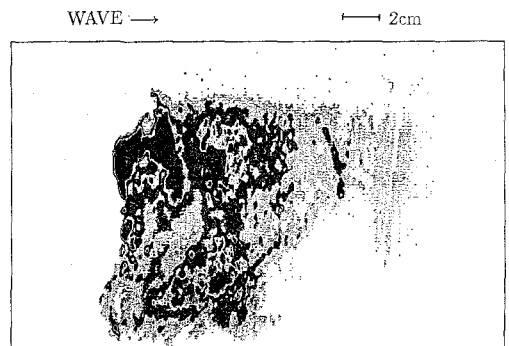


図-8 解析対象の斜降渦の映像

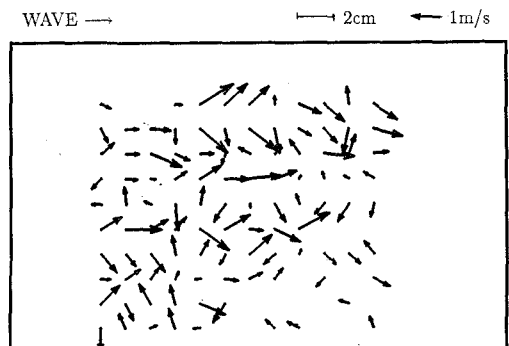


図-9 算定された斜降渦の流速分布

ープの前面にはスリットを取り付けた。したがってこの映像は斜降渦の断面内の様子を示している。

斜降渦は渦や乱れが強く、またこの測定装置で撮影される2枚の映像の時間間隔も対象とした流体運動の速度に比較して大きいため、この映像から直接フーリエ変換による画像処理方法を用いて流速分布を解析することはできなかった。そこでここではスムージング・フィルタを用いてこの画像に前処理を施し、その後この画像処理法を適応して瞬間流速分布を算定した。その結果を図-9に示す。この結果は大要的には気泡を含んだ斜降渦の様子をとらえているように見えるが、細かくみるとかなりの測定誤差を含んでおり、誤算定も見られる。この原因は撮影装置にあると思われる。すなわち問題点として、2枚の映像に時間間隔が砕波の流体運動に比べて大きすぎた点、そして撮影装置の奥行き方向の分解能がこの3次元流体運動の渦などの空長スケールよりも大きかった点などが上げられる。このように変化の激しい流体現象をとらえるにはまず2枚の映像の時間間隔をさらに小さくすることが必要である。また斜降渦のように3次元性の強い現象に対してはさらに幅の狭いスリット光を用いて、奥行きのない映像をとらえる必要がある。したがって、今後この画像処理方法を用いて精度の高い瞬間流速分布を得るためにはその画像の撮影方法を改良する必要がある。

4. 結 論

本研究では、フーリエ変換を用いた画像解析法を用いて流速分布を推定する方法を示し、さらに、この解析法

の適用範囲を広げるための前処理法としてラプラシアン・フィルタとスムージング・フィルタを取り上げた。これらのフィルタはそれぞれ水面近傍の流速の算定と、流体の回転運動や乱れなどを含む場合の流速の算定に有効であった。これらの画像処理法と前処理をもちいて、砕波点での砕波内部の流速分布と砕波後にみられる気泡を含んだ斜降渦の流速分布の測定を行った。この結果、これらの画像処理法と前処理の有効性が示されたが、一方でこれらの映像を得るための撮影法の改良の必要性が明らかにされた。

謝 辞： 貴重な画像データをこころよく本研究に提供していただいた東京工業大学工学部の武若聡助手に謝意を表します。また本研究は日産財団学術研究助成金によって行われたものであることを付記します。

参 考 文 献

- 奥野武俊・木下民法 (1987)： 画像解析を利用した流速測定の一手法，第4回流れの計測大阪シンポジウム論文要旨集，pp. 177-184.
- 長尾昌朋・片岡曉彦・沢本正樹 (1991)： VTR 画像処理とトレーサ追跡法を組み合わせた砕波内部流速場の測定，第38回海岸工学論文集，pp. 56-60.
- 西村仁嗣・武若 聡 (1988)： VTR 画像の相関解析による砕波時内部流速分布の推定，第35回海岸工学講演会論文集，pp. 45-48.
- 真野 明・神尾成也 (1990)： 相関法による砕波気泡混入領域の流動解析，土木学会論文集，第423号/II-14，pp. 171-180.