

VTR 画像の相関解析による砕波時内部流速分布の推定

西村 仁嗣*・武 若 聡**

1. 緒 言

近年、各種の流速計を用いて波動内部の流速場を精密に測定する試みがなされている。例えばレーザードップラー流速計が用いられる場合¹⁾、有限個の点については正確な測定が行われるが、流速場全体の平面的な把握には多数回の繰り返し測定が必要であり、砕波のような不安定現象では再現性の点で問題が残る。とくに渦度の検出等に際してはデータの信頼性に限界があろう。これに対して、流れを可視化して光学的に全体を記録し流速を調べる方式は、同時に多点の情報を与えるという意味ですぐれた手法であると思われる。この方面の研究は計測工学の分野で活発に進められているが、測定対象は多くの場合定常的な表面流という比較的条件のよい現象である^{2),3)}。本研究では、可視化された流れの画像を相関法を用いて解析することにより複雑かつ非定常な砕波内部の鉛直2次元流速場を捉えることの可能性を示し、拡張された技術の詳細を論じる。

2. 相関解析による速度の推定

2.1 原 理

流れの場を解析する場合、トレーサを流体中に投入し、トレーサ粒子の軌跡から速度を求める方法がある。しかしながら、通常の実験では、トレーサ識別の困難さからその数を有限個とせざるを得ない。これに対してトレーサを含む流体の画像を時空間にわたる濃淡の不規則パターンとして捉えれば、上述の問題点を回避することができる。この考え方に基づいて流速を推定するのが相関解析による速度計測であり、主に計測工学の分野でこの方面の技術開発が進められている。

その基本的な原理は、VTR 画像を離散化データに変換し、得られる時空間的な不規則パターンを相関解析することによって任意の時点、任意の空間点の流速を求めるものである。時間的な相関をとる場合には、異なる2点での時系列パターン間の相関および時間ずれから流向

ならびに流速を推定する²⁾。また、空間的な相関をとる場合には、ある空間パターンの次画面中での出現位置を平面相関解析により検索する³⁾。これは従来より行われていた個々のトレーサ追跡における認識を、人間の裁量から相関解析による自動解析に切り換えるものである。一般に前者の方法はリアルタイム処理に適しており、専用の測定機も試作されているが、比較的長時間にわたる時系列データを必要とするので非定常現象の測定には不適である。これに対して後者の方法はリアルタイム処理には適さないが、非定常流の測定にも十分応用し得る。

本研究では斜面上の砕波という極めて非定常性の強い現象をとり上げ、後者の方法の実用性を検討した。

2.2 空間相関解析

空間相関解析の基本的な考え方は、時刻 $t=t_0$ の画像中に検出対象とする部分画像（テンプレート）を設定し、時刻 $t=t_1$ の画像中の各部分画像のうちこれと最も類似度（相関値）の高い位置を検索するものである。図-1に示すように時刻 $t=t_0$ と $t=t_1$ におけるデジタル画像が得られたとする。 $t=t_0$ においてある画素を中心とする $n \times n$ の大きさの基準テンプレートを考える。ここで中心画素の位置を r_0 、テンプレート中の各画素の輝度を f_i ($i=1, 2, \dots, n^2$) とする。次に $t=t_1$ の画像に同じ大きさのテンプレートを設け、 $t=t_1$ の画像中でのテンプレート中心画素位置を r_1 、各画素の輝度を g_i ($i=1, 2, \dots, n^2$) とし、相互相関値 $R(r_1)$ を計算することを考

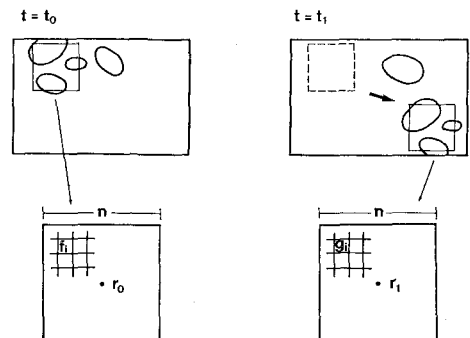


図-1 空間相関解析

* 正会員 工博 筑波大学助教授 構造工学系

** 学生員 工修 筑波大学大学院工学研究科

える。

$$R(r_1) = \frac{\sum_{i=1}^n (f_i - \bar{f}) \cdot (g_i - \bar{g})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (f_i - \bar{f})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (g_i - \bar{g})^2}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで $\bar{f}$, $\bar{g}$ は各テンプレート内での輝度の平均値である。 R を最大とする r_1 が r_0 を中心とするテンプレートの流体が移動したと推定される位置であり、速度は

$$V = \frac{r_1 - r_0}{t_1 - t_0} \quad \dots\dots\dots (2)$$

で与えられる。

この方法では検出対象が単に平行移動する場合でも、画素格子との相対的な位置関係が完全に一致しない限り相関値は1とならない。とくに、拡大、縮小等の変形を受けると相関値が低くなるか、あるいは検出不能となるので注意を要する。検出対象が有意な回転運動をする場合には、テンプレートを回転させて相関解析を行うことにより、直接流体運動の回転角を知ることができる。今回の実験では測定の時空間スケールを考え、検出対象は平行移動のみを行なったものとみなして解析を進めた。この解析で得られる速度は想定した領域のトレーサ群の平均速度であると考えられるので、テンプレートの大きさ n を大きくすると分解能が低下する。

砕波のような強度の非定常現象を測定の対象とする場合には、VTR 撮影のコマ間隔と画素ピッチの関係で、1コマ当りの流体の移動距離は高々数画素程度となる。したがって、コマ間移動距離の精度を高めるために、ピーク値近傍の相関値から詳しいピーク位置を補間する必要がある。理想的には中心画素周りの9点の相関値から平面曲線を用いて内挿すればよいが、これは多くの点で流速を求める場合には計算労力の面で大きな負担となる。ここでは、水平、鉛直各方向に2次補間を行なってピーク位置を推定した。

2.3 システム構成

本研究では砕波現象の時間スケールを考慮し、撮影にはモノクロ高速度ビデオ装置を用いた。1ms 毎の画像データはビデオデジタイズボードを通じて 320×200 画素、16階調の離散データとしてハードディスクに取り込まれる。ディスクの容量を 20 Mbyte とした場合、同時に約 180 画面のデータを格納することができる。その後、マイクロコンピュータからこのデータを呼び出し、画像処理、相関計算等の作業を行う。プログラムは主に BASIC 言語で記述されているが、データ転送、画像処理、相関計算等の比較的計算時間を要する作業部分はアセンブラ言語で書かれている。画像処理は主にフィルタ処理⁴⁾であり、加重平均フィルタとメディアンフィルタを用意した。加重平均フィルタは中心画素周り9点の画素の輝度を加重平均したものをそこの輝度とし、メデ

ィアンフィルタは周囲9点の輝度の5番目の値をそこの輝度として採用するものである。一般にメディアンフィルタは、画像中の境界を不鮮明にすることなくスパイク状ノイズを除去することができるかとされている。

2.4 相関解析例

上述の解析方法ならびにシステムを用いて速度の推定を行った例を示す。図-2 は、後述の実験と同じ条件の波動のある時点における画像を2値化表示したものである。図中の格子で覆われた部分について相関計算および検索を行った。テンプレートの大きさを 7×7 画素としたときに得られる相関値の等高線が図-3 である。比較的なめらかな相関値の分布が得られることがわかる。ただし、図中に示された相関値は100倍された値である。これより、着目したパターンは図中の矢印の示すように移動したと考えられる。

3. 砕波時の内部流速場の推定

3.1 実験方法

本研究では先行する波の戻り流れの影響で現象が複雑化するのを避けるため、孤立波を対象として実験を行った。孤立波はピストンを圧搾空気て1回駆動する方式で発生させた。全長約 14 m、幅 40 cm、静水深 16.7 cm の2次元水槽内の一端に設けられた 1/20 斜面上に波を入射させ、巻き波型砕波を発生させた。現象の2次元性を

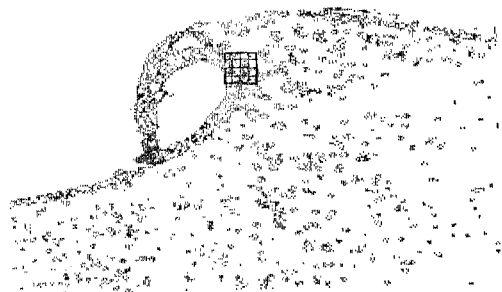


図-2 2値化された VTR 画像と検索範囲

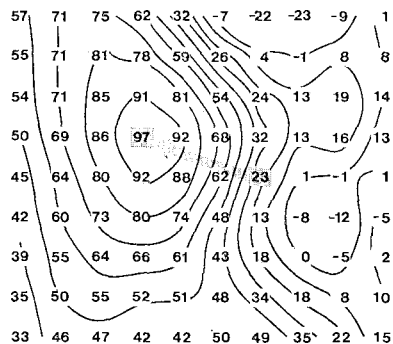


図-3 相関値の分布

高め、かつ VTR 撮影の便宜を図る目的で水路の途中からは幅員が 10 cm に狭められている。斜面法先で入射波の波高は 5.7 cm であり波高水深比は 0.34 である。波高の最大となる点は斜面法先から約 2.3 m の地点であり、観測は主にこの点の前後で行われた。

トレーサーとしては水中で懸濁状態となり、背景色および照明の工夫により高輝度かつ鮮明な VTR 画像の得られるものが理想的である。当初バルサ材の小片を用いたが、一般に木材は比重は大きく、懸濁状態を得るには媒体を塩水とする必要がある。こうした材料は入手が容易であり粒径もある程度調節可能であるが、表面が滑らかでないため、濃淡の明確な画像を得ることは比較的困難である。ここでは、トレーサーとして粒径約 2 mm、黄色のポリスチレンビーズを熱することにより比重調節したものをを用いた。これは最終的に水中で沈降あるいは浮上するものであるが、その速度は現象の速度に比して十分に小さい。相関解析を行なうためには、画像中に際立った濃淡パターンが不規則に分布していることが望ましく、これを実現するためには相当量のトレーサーを投入する必要がある。さらに画像のノイズ、ムラを除去するためには背景、水槽のガラス面等における反射を極力抑制するような照明が必要である。

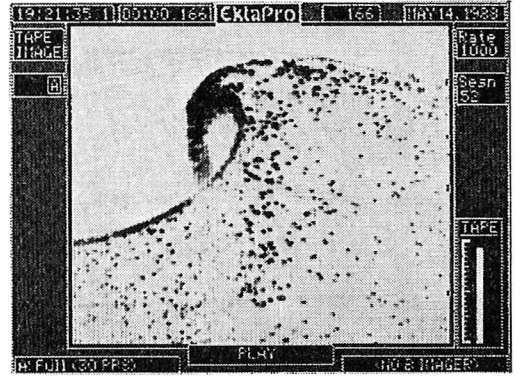
写真—1 は得られたビデオ画像を白黒反転させた形で例示したものである。水路上部より照明したため、波頂部では光が乱反射し、写真—1 中では黒く表われている。また、その下方の領域は影となってトレーサーの輝度が低下している。

3.2 速度場の推定

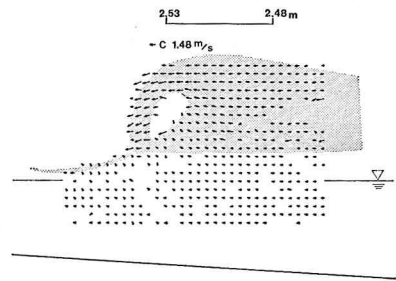
図—4 に相関解析によって推定された速度場を示す。このとき、テンプレートの大きさは 9×9 画素であり、検索は 16×17 画素の範囲で行なった。フィルターとしてはメディアンフィルターを用いた。

トレーサーの分布密度が低い等の理由により、相関値の低い領域が生じることがある。ここでは、0.7 以上の相関値が得られない場合にはデータの信頼性が不十分であると判断し、図中では空白とした。流体の移動量が小さい領域では流速推定の精度が低下するので、流体の移動速度に大きな差が存在する波動の上部と下部では、異なる時間間隔で相関解析を行った。すなわち、時間間隔は図中にハッチで示された上部領域では 1 ms、下部の残余領域では 2 ms とした。

全般的にはほぼ妥当な速度推定が行われているように見受けられるが、明らかに誤った判定がなされている箇所も散見される。このような位置でのビデオ画像を詳細に検討すると、時間的に急激な輝度の変化が見られる。これを避けるには時間空間にわたるフィルターの検討が必要であらう。波頂部下方の影の部分では相関値は相対



写真—1 VTR 画像（白黒反転）



図—4 砕波の内部流速分布の推定

的に低めとなる。

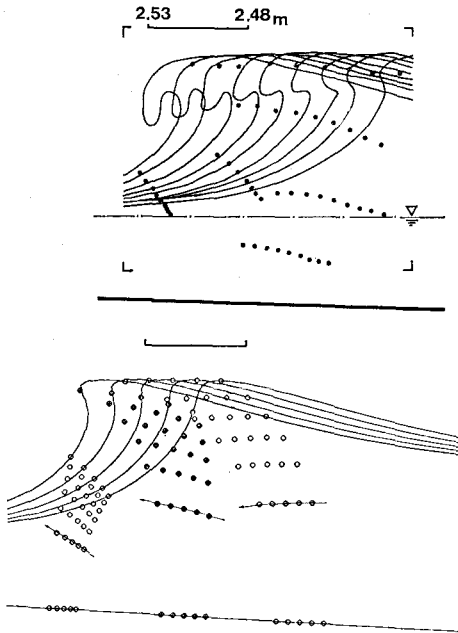
波頂部では大きな水平流速が現われ、巻き上げ部分では斜め上方に向かう流れが見られる。孤立波では流速の水平方向成分は全て岸向きである。砕波点付近での波頂近傍の流速は、次式で与えられる一様水深部での位相速度にほぼ一致している。

$$C = \sqrt{g \cdot (h + H)} \dots\dots\dots (3)$$

ここで g は重力加速度、 h は一様部水深、 H は斜面法先での波高である。上述の諸条件を代入すると $C = 1.48 \text{ m/s}$ であり、これが図中矢印で示されている。

3.3 計算結果との比較

既往の数値計算⁵⁾と本実験で得られる波形および流体粒子の軌跡を斜面の同一部について比較したものが図—5 である。各波形の時間間隔は約 10 ms である。計算では実際の現象に見られる波頂部の崩落が再現されておらず、その分早めに波面勾配が増大する傾向がある。これらの差異が計算方法の不備によるものか、あるいは計算には考慮されていない物理的な効果によるものかという点については、現時点では明かでない。しかしながら、位相速度、水粒子速度の絶対値、および水粒子の軌跡は概ね符合している。



図—5 碎波波形および水粒子の軌跡
(上: 実験結果, 下: 計算結果)

4. 結 語

本研究においては, VTR 画像の空間相関解析に基づく流速推定を試みた. この種の実験方法は, とくにソフトウェア面で未だ改良の余地があるものの, 非定常な2次元流体運動のパターンをある程度定量的な形で把握す

る上で有用なものとなり得よう.

この手法の応用の可能性は対象とする現象の時空間スケールと, 用い得る VTR 装置の時空間的分解能の関係で左右される. とくに鉛直2次元の現象を扱う場合には, 可視化のためのトレーサの選択, 水面形状が複雑になった場合の適切な照明といったいくつかの技術的な問題も残されている.

謝 辞: 画像解析による流速測定 of 諸手法に関しては筑波大学物理学系井戸川 徹教授より貴重な御教示を頂き, 啓発されたところが大きであった. また, トレーサの使用については, 筑波大学地球科学系砂村継夫助教授の御協力を頂いた. ここに記して謝意を表する. なお, この研究の一部は文部省科学研究費補助金によって行われたものであることを付記する.

参 考 文 献

- 1) 例えば, 水口 優・友金幸浩: 巻き波型碎波時の流れの場の実験的研究, 第32回海岸工学講演会論文集, pp. 60~64, 1985.
- 2) 速水健一: 相関法による2次元速度の測定, 筑波大学博士論文, 1987.
- 3) 木村一郎・高森 年・井上 隆: 相関を利用した速度ベクトル分布の画像計測, 第4回流体計測シンポジウム, pp. 49~52, 1987.
- 4) 例えば, 廣田 薫: 画像パターン認識, マグロウヒルブック株式会社, 1984.
- 5) 西村仁嗣・武若 聡: Lagrange 表記による二次元波動の数値解析, 土木学会論文集, No. 393/II-9, pp. 191~199, 1988.