

非定常乱流計測結果の動画表示法の開発

Development of Animation for Unsteady Turbulent Flow

東北大学工学部 長尾昌朋 Masatomo NAGAO
東北大学工学部 山路弘人 Hiroto YAMAJI
東北大学工学部 沢本正樹 Masaki SAWAMOTO

The method of animation for unsteady turbulent flow is developed. A large number of graphic data are compressed small enough to display the flow for long period. Applying this method for wave-current combined flow over rigid ripples, the spacial profile of Reynolds' stress $-u'v'$ is appeared like the visualization. Superimposing the mean velocity profile, the negative-production of the turbulent energy can be understood visually.

Keywords : computer graphic, unsteady turbulent flow, Reynolds' stress, negative production

1. はじめに

近年、流速計測技術やパソコンの発達により、波動場などの非定常乱流の実験ではデータのオンライン統計処理が不可欠となっている。これにより乱流諸量の分布が時系列として系統的に得られ、いくつかの連続する図として表示されるのが常である。このような静止した図では、ある瞬間での乱流諸量の空間分布を詳細に捕らえることができるが、ビデオカメラを応用した可視化実験などで見られるような微妙な流体運動は把握しにくい。また、系統的に得られた乱流特性分布の時系列データの利点を十分に活用しているとはいえない。本研究では、オンライン統計処理を用いた非定常乱流実験から得られたレイノルズ応力を可視化程度の見やすさでパソコンの画面上に動画として表示し、乱流現象の理解を深めることに資する方法を開発することを目的としている。

2. 砂連上の乱れに関する実験¹⁾

表示用に用いたデータは、波と流れの共存した場における砂連上のレイノルズ応力 $-u'v'$ である。実験は、水理実験より得られた非対称性を持つ砂連の拡大模型を風洞の上下両面に設置し、振動流と定常流を加えて行った。実験の条件を表-1に示す。流速は流れ方向に1波長分40cm、砂連底部から風洞の中心軸までの21cmの領域の500点でレーザー流速計を用いて測定し、サンプリング周波数200Hzで数値化した。平均流速・乱れ強度は100波のアンサンブル平均によって求めた。

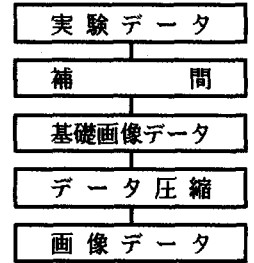
表-1 実験条件

砂連形状	砂連長	砂連高	粗度高	振動周期	流速振幅	定常流速	ストローハル数
非対称	40.0cm	5.70cm	0.10cm	1.48s	70.0cm/s	30.0cm/s	1.19

3. 動画表示法

簡単な動画表示法は、実験から得られた時系列データから1画面毎に画像データを作成し、その都度表示する方法である。この方法は実験データから画像データを作成する際に長時間の計算を必要とするので、滑らかに流体運動を表現することはできない。そこで、実験の時系列データを可視化画像のように表示し、

動画として動かして現象を理解する場合には、長時間の流体運動を滑らかに再現することが目標となる。よって、パソコンに限らずコンピューターで動画を表示する場合の問題点は、長時間の非定常現象を再現するためにどれだけ大量の画像データを取り扱えるか、また、滑らかに流体運動を再現するためにどれだけ高速に表示できるか、にある。そこで考えられる方法は、時系列データから動画表示に適した画像データをあらかじめ作成し、その画像データを高速に表示することである。この画像データの作成手順を図-1に示す。



まず初めに、500点の測定点における時系列計測データからレイノルズ応力 $-u'v'$ の空間分布を補間して、図-2に点で示す 160×84 のコンピューター画像の画素での $-u'v'$ を求める。4個の測定点を頂点とする4角形の内部を補間する方法の代表例を図-3に示す。(a)は関数 $f=a+bx+cy+dxy$ を測定点で実験データに一致するように当てはめたものである。(b)は4角形の内部の計算点と測定点との距離の逆数を重みとして実験データを平均したものである²⁾。(c)は4角形を2個の3角形に分割して3角形の内部を実験データから線形補間したものである³⁾。4角形を2個の3角形へ分割する

図-1 画像データ作成法

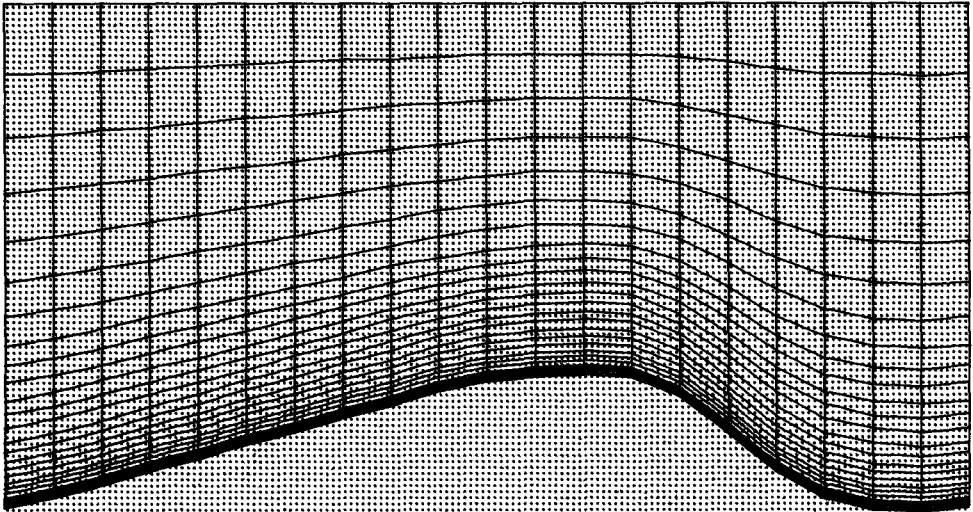


図-2 測定点と画素の位置

格子点 … 流速測定点, • … コンピューター画像の画素, 最下線は砂面を示す。

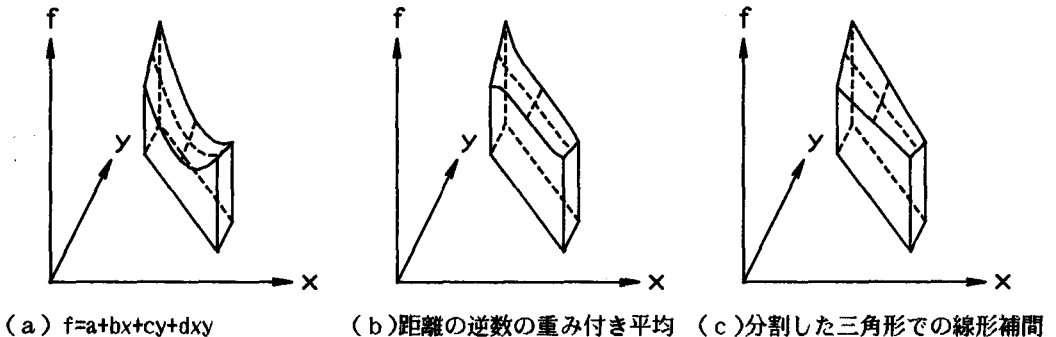


図-3 補間方法

方法は2通りあるので、2種類の補間値を平均して使用する。(a)はプログラムが簡単になるが、図のような異常な補間値を生じ易い。(c)は線形補間を基にしているので異常な補間値が発生しないが、プログラムが多少難しくなる。そこで今回は異常な補間値が発生せずにプログラムが簡単になる(b)の方法を用いた。

次に、コンピュータ画像の画素上の補間値を使用するコンピュータに適したいくつかの階調に分類し、基礎画像データを作成する。階調を制限することで基礎画像データが小さくなり、より多くの画像をより高速に取り扱えるからである。しかし、使用する階調の数が少な過ぎると表示するデータの空間分布が良く表現できないので注意が必要である。通常は階調の幅を一定とするが、階調の幅を変えることで、計測データの空間分布特性を強調することができる。一般にこのような強調は、画素上の補間値の出現確率が高いほど階調の幅を狭くして、各階調の出現確率になるべく等しくなるようする。今回はレイノルズ応力 $-u'v'$ を11階調に分類し、それぞれに連続する色(論文では濃淡)を対応させた。 $-u'v'$ が0に近い領域が多く出現するので、 $-u'v'$ が0に近いほど対応する階調の幅を狭くし、 $-u'v'$ の絶対値が大きい階調では幅を広くしている。

基礎画像データは1画面当り $160 \times 84 \times 4 \text{bit} = 6720 \text{byte}$ の大きさを持つので、パーソナルコンピュータ PC-9801のメインメモリー640KByteでは80画面程度しか取り込めず、長時間の流体運動を再現することはできない。そこで、より多くの画面を取り込めるように、基礎画像データを圧縮して実際の画像データを作成する。データの圧縮には連長圧縮法、Huffman法⁴⁾、LZW法⁵⁾等いろいろな方法がある。理想的には圧縮率が高く、復元速度が速ければ良いのだが、一般的に圧縮率と復元速度は反比例するので、流体運動を滑らかに再現するために復元速度を重視する。ここでは、同じデータが大量に並んだ場合、それをデータの値と連続する個数に置き換える連長圧縮法を用いる。この方法は圧縮率がデータの内容によって著しく変化する欠点を持つが、データの復元速度は非常に速い。今回の応用例の基礎画像データは全て $1024 \times 8 \text{bit} = 1024 \text{Byte}$ 以下の画像データに圧縮され、PC-9801のメインメモリーに500画面以上取り込むことが可能となった。

このようにして画像データを作成した結果、砂連上におけるレイノルズ応力 $-u'v'$ の1周期分1.48sの画像データ296画面をPC-9801のメインメモリーにすべて取り込み、さらに1周期分の平均流速データも取り込むことができた。写真-1に今回作成したレイノルズ応力 $-u'v'$ の空間分布を平均流速ベク

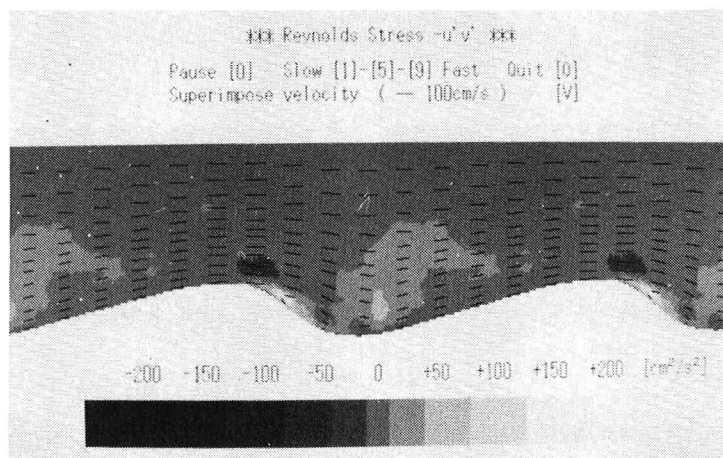
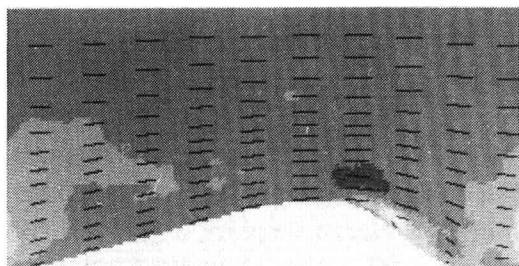
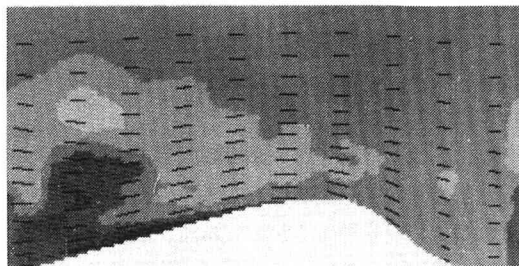


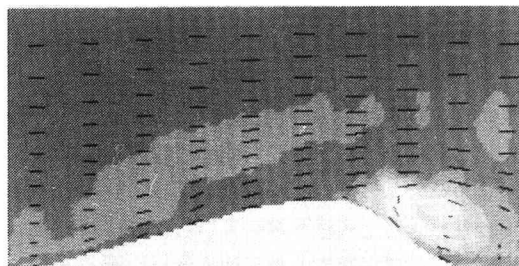
写真-1 完成したコンピュータ画像



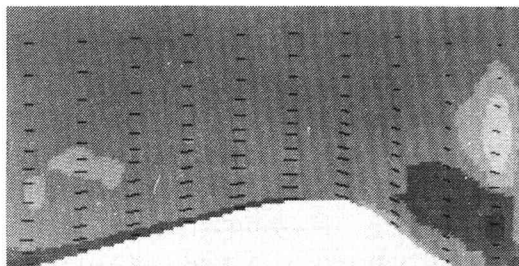
(a) 0/8位相



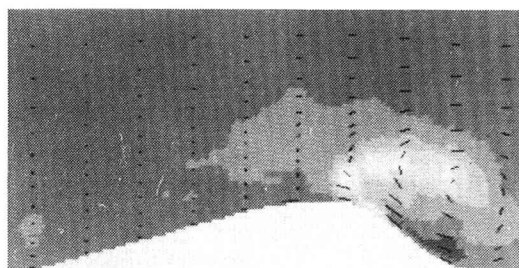
(e) 4/8位相



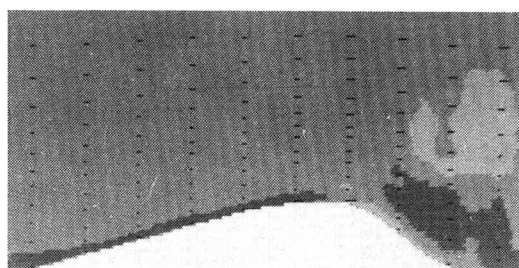
(b) 1/8位相



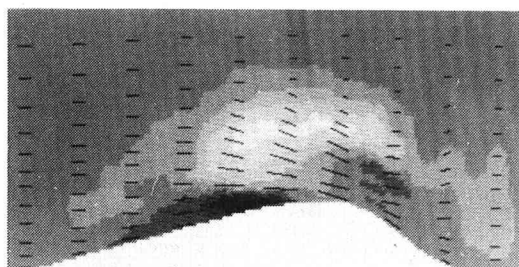
(f) 5/8位相



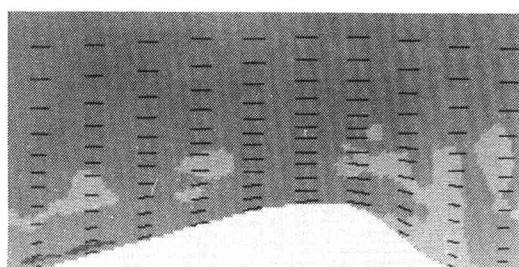
(c) 2/8位相



(g) 6/8位相



(d) 3/8位相



(h) 7/8位相

写真-2 レイノルズ応力 $-u'v'$ の空間分布と平均流速ベクトル

トルと重ねて示す。レイノルズ応力 $-u'v'$ の値は写真-1の下方のスケールの輝度に相当し、正の領域は明るく、負の領域は暗く表示している。また、砂連の下流面で発生した渦とレイノルズ応力 $-u'v'$ の正の領域が上流側へ砂連を乗り越えて移動する様子がよくわかるように、同じ画面を2個並べている。

4. 考察

写真-2に上述の方法で作成した一連のレイノルズ応力 $-u'v'$ の空間分布を示す。(a)は平均流速が下流方向に最大になった時で、以下(b)から(h)へと1/8周期0.185sずつ時間が経過している。また、レイノルズ応力 $-u'v'$ と平均流速との関連を検討するために平均流速の空間分布をベクトルとして重ね合わせている。

(a)では、砂連頂上で剝離した流れが砂連下流側で渦を形成し、それにともない正のレイノルズ応力 $-u'v'$ が発生している。砂連頂上の上にある負の $-u'v'$ の領域は、頂上付近で縮流により流速が大きくなるため高さ方向の流速勾配が負になるために生じている。この領域はすぐに消滅する。(b)では平均流速が減速し始めるため、砂連下流側で生じた渦が成長し、さらに正の $-u'v'$ の領域も成長する。(c)においては平均流速はほとんど0である。砂連下流側で生じた渦は上方へ移動しながら反転流速によって減衰する。正の $-u'v'$ の領域は渦の下部の上流方向への流速によって砂連頂上を乗り越えようとしている。

(d)では平均流速は上流方向へ加速している。正の $-u'v'$ の領域は砂連頂上まで移動している。乱れのネガティブプロダクションによって、この領域の下部の流速が大きくなっている。(e)では平均流速が下流方向へ最大となっている。ネガティブ・プロダクションによって乱れエネルギーが主流のエネルギーとなったため、正の $-u'v'$ の領域が減衰している。(f)から(h)では平均流速が上流方向から下流方向へ変化している。正の $-u'v'$ の領域はちょうど砂連1波長分上流へ移動し減衰し、消滅する。

5. おわりに

本研究では、非定常乱流現象を理解するために、実験より得られたデータを動画として表示する方法を開発した。そして以下の結論を得た。

(1) 今回開発した動画表示法で、波と流れの共存する場での砂連上のレイノルズ応力を可視化実験的に観察することが可能となり、レイノルズ応力の生成・移動・減衰の機構が明かとなった。

(2) 平均流速ベクトルを重ね合わせた結果、レイノルズ応力と流速分布の挙動からネガティブプロダクションが視覚的にとらえられた。

(3) さらに他の乱流特性量を動画として表示することで、乱流機構をよりの確に捕らえられると考えられる。

《参考文献》

- 1) Aydin, I. : Computation and analysis of unsteady turbulent flow on flat bottom and over rigid ripples, 東北大学博士論文, p.193, 1987.
- 2) 小林敏雄, 松本裕昭, 佐賀徹雄 : ステップをもつチャンネル内乱流のビジュアルシミュレーション, 流れの可視化5-18, pp.275, 1985.
- 3) 柳良二, 進藤重美 : 二次元データのカラー画像可視化システム, 流れの可視化5-18, pp.289, 1985.
- 4) Amsterdam, J. : ハフマンコーディングによるデータ圧縮 : テキスト情報を圧縮する方法とプログラム例, 日経バイト10月号, 1986.
- 5) Terry, A. W. : A technique for high-performance datacompression, IEEE Computer June, pp. 8-19, 1984.