17 流れの可視化・画像処理と 数値計算を併用した方法による 3次元流場の計測

広島大学工学部

茂里一敏

二宮伸治*

土井康明

MEASUREMENT OF THREE DIMENSIONAL VELOCITY FIELD BY MAKING USE OF FLOW VISUALIZATION AND NUMERICAL TECHNIQUES

by Kazu-hiro Mori*, Shinji Ninomiya*, Yasuaki Doi*

A new velocity measurement system has been developed which uses the image processing techniques as well as the numerical. In the present method, two-dimensional plane velocity distributions on several scanned planes are determined by digitizing the paths of hydrogen bubbles which are visualized by the laser sheet beam. Then the three-dimensional flow fields are reproduced numerically for the plane velocity distributions to satisfy the continuity condition. A feasibility application is made to measure the wake flow behind a Wigley ship hull.

1. まえがき

物体後流の3次元流場を、従来の点計測方式で計測するには膨大な時間と労力を要する。そこで本研究では、流跡画像の画像処理による面内流の同時多量計測と、数値計算の手法を相補的に用いることによる複合的計測法で、迅速かつ簡便に3次元流場を計測する可能性を検討する。

本計測法では、水素気泡とレーザーライトシートにより面内流れの可視化を行い、面内流すなわち流速ベクトルの2成分を画像解析によって計測する。計測面をそれに直交する方向にトラバースして複数断面上で計測を行い面内流速を求め、それらが連続条件を満足するように数値計算によって流場の3次元再構成をする。

この方法は、まだ開発途上であるが、その可能性について若干の知見を得たのでここに報告する。

2. 面内流の計測と解析法

Fig.1 に、本システムの処理の流れを示す⁽¹⁾。(ここでは数値計算のうち、計測不能点

* Faculty of Engineering Hiroshima University

の計算や、圧力の計算はなされていない。)

まずレーザーライトシートにより可視化した流跡線をCCDカメラで撮影し、画像入力デバイスでプロセッサ内に取り込まれた流跡線画像に対して2値化、細線化などの前処理を施して中心線画像を抽出する。

上記の処理を等時間間隔で連続する複数画面に対して行い、その画面間での同一流跡線の対応づけを行うことによりその面内の流速を算出する。

Fig.2 に実験装置の概略図を示す。レーザーライトシートは流速の垂直成分がなるべく小さくなる方向に設置し、計測面に垂直な方向に等間隔で移動することにより、流場内の複数断面の2次元流速値を計測する。

可視化のためのトレーサーとしては、梯子型電極にパルス電圧をかけて発生する水素気泡群を用いた。

本システムの評価のため、Wigley2重模型($l_{pp}=1.2m$, $B=0.12m$, $d=0.0725m$)の船尾近傍の伴流域を計測した。計測時の流速は $100mm/s$ 、水温は $30^{\circ}C$ である。

計測位置および座標系をFig.3 に示す。座標値は、半船長を基準として無次元化した。

Fig.2 Schematic arrangement of flow visualization

Fig.1 Block diagram of the present system

Fig.3 Coordinate system and the measuring plane

3. 3次元再構成計算

z方向の流速値を計算する3次元再構成は、画像計測で得られた複数の面内流速分布 ($u_0, v_0, w_0 (=0)$) を初期値として、連続条件を満足するように修正された流速場 (u, v, w) を求める。

ここでは、連続条件式を拘束条件として流速の修正量の体積積分を最小とする流速場を求める条件付き変分問題として解く⁽²⁾。

この条件を満たす汎関数は、

$$F(u, v, w, \lambda) = \int_V \{ \alpha_1^2 (u - u_0)^2 + \alpha_2^2 (v - v_0)^2 + \alpha_3^2 (w - w_0)^2 + \lambda (\partial u / \partial x + \partial v / \partial y + \partial w / \partial z) \} dV \quad \dots\dots\dots(1)$$

で与えられる。

ここで、 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ は、流速の修正量に対する重み係数で、 $\alpha_1/\alpha_3, \alpha_2/\alpha_3$ を調整することにより、 $x-z$ 方向、 $y-z$ 方向の流速の修正量の比を変化させることができる。本研究では、z方向の流速を求めることが重要なので、計算が成立する範囲内で、これらの比をなるべく大きくとる。ここでは $\alpha_1/\alpha_3, \alpha_2/\alpha_3 = 0.1 \sim 0.01$ の値を用いた。

(1) 式の停留点を求めるためには、次のオイラー方程式を解くことが必要である。

$$u = u_0 + (2\alpha_1)^{-1} \cdot \partial \lambda / \partial x \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$v = v_0 + (2\alpha_2)^{-1} \cdot \partial \lambda / \partial y \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$w = w_0 + (2\alpha_3)^{-1} \cdot \partial \lambda / \partial z \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$\partial u / \partial x + \partial v / \partial y + \partial w / \partial z = 0 \quad \dots\dots\dots(5)$$

(2) ~ (4) 式を、(5) 式に代入して得られるポアソン方程式を、境界条件

$$\lambda n_x \delta u = 0, \lambda n_y \delta v = 0, \lambda n_z \delta w = 0 \quad \dots\dots\dots(6)$$

のもとに解く。得られた λ を、(2) ~ (4) 式に代入して修正された流速場 (u, v, w) を得る。

4. 計測例と考察

複数の画像より計算した面内格子点流速分布の一部 (Fig.3-B で $z = 0.0$ 断面) を、Fig.5 に示す。この流速値は、約6秒間の計測の平均値である。画像処理装置の精度 (256x256 pixel, サンプリング間隔 = 100msec) を考慮すれば、伴流の分布は比較的良好に

再現されていると思われる。

複数面で得られた同様の面内流速分布の計測結果より3. で述べた計算方法で3次元再構成した $x = 1.025$ における $Y-Z$ 断面の計算結果と、5孔管による計測結果を合わせてFig.6 に示す。

計算境界条件は、Fig.3-B の①に示す断面で $\partial \lambda / \partial z = 0$ 、Fig.3-A の②の断面で $\partial \lambda / \partial y = 0$ 、となり他の断面では $\lambda = 0$ を満足するように与えた。五孔管による計測値と比較すると、場所によっては z 方向の流速値がかなり大きめに計算されているが、再構成された流速分布の傾向は計測の不安定な周辺部を除き、ほぼ合っている。

計測精度そのものの向上や境界条件の与え方など今後の課題も多いが、本方法は、3次元流場の有効な計測法であるといえよう。

Fig.4 Measured plane flow ($z=0.0$)

Fig.5 Comparison of velocity vectors measured by 5-hole pitot tube and by the present method. ($x=1.025$)

(a) by 5-hole pitot tube

(b) by the present method

参考文献

- (1) 茂里他、流れの可視化と画像処理を用いた流場の同時多量計測法の開発 Soc. Nav. Arch., Japan Vol 1-18 (1987.11)
- (2) 横川、石川、3次元風速場計算における反復解法、bit.(1987.11)