18 疎らで不十分な流速情報からの 3 次元瞬間像の推定

東工大・大学院 学生員 孟 岩

東工大・工学部 正員 日野 幹雄

An attempt of estimating a three dimensional instantaneous image of the coherent structure form sparse velocity data

Mikio HINO* and Yan MENG*

The turbulent velocity components (u, v) at 11 points in a reciprocating oscillatory turbulent flow have been recorded simultaneously by a set of eleven X-type hotwire probes located in a plane perpendicular to the mean flow. Using the conditional sampling technique and a new method of data analysis for the inverse estimation of flow field called the "virtual plate/load and mascon model", we reconstructed the quasi-instantaneous three dimensional image of the large-scale structure of turbulence (expressed in terms of the velocity components u, v, w). The image has been further clarified by the perspective representations visualized by the computer technique in terms of time-lines and streak-lines of fluid particle tracer. This may be the first proof of the instantaneous coherent turbulence structure directly derived experimentally from velocity measurement by probes such hot-wires and LDV.

1. はじめに

流速計により流れ場の全体像を得るには、一本ないしは数本のプローブを順次移動して、測定空間内のすべての点の速度を計測すること必要がある。しかし、このような計測方法は、層流流れや Trigger により発生する乱流遷移現象の測定に適用できるが、乱流のような繰り返し測定が出来ない流れ場に使用できない。そのために、乱流の中に存在する組織的構造の全体像を平均操作によらずに実験的に把握することはきわめて困難である。そこで、本研究では、繰り返し実験が出来ない、あるいはその意味のない場合の研究のために、数点での流速の計測データから 3 次元流れ場の瞬間像を推定する方法を開発し、また、これらの推定データに基づき、コンピュータ・シミュレーション技術を用いて、水素気泡法と同じように、3 次元乱流場を可視化した。

2. 実験装置及び測定方法

実験は図 1 に示すような幅 26 cm、高さ 10 cm、長さ 14 m の振動流風洞で行った。一端でピストンをモータで駆動することにより交番振動流が作られる。壁面に鉛直方向は Y 軸で、スパン方向は Z 軸で、ピストンの運動方向を X 軸に取る。本研究の実験条件は参考文献 2 と同じように設定した。

Fig. 1 Experiment apparatus.

* Tokyo Institute of Technology, 2-12-1 Ookayama Meguro-ku, Tokyo 152, Japan

測定は自作の定温度方式 X 型プローブの熱線風速計で行い、熱線の出力はレーザー・ドップラー流速計を用いて、キャリブレーションした。本研究で用いた A/D 変換器は最大 24 チャンネルの信号を同時刻にサンプリングでき、周波数 1KHz で使用した。

3 次元空間内の瞬間的な速度を計測するために、11 本の熱線プローブを図 2 に示したように主流に垂直な面内に配置し、瞬間的な速度成分 U 、 V を測定した。まん中の 1 本のプローブは detector probe

Fig. 2 A block diagram of the measurement system.

として設置し、大きいレイノルズ応力のピークを検

出した時に、

検出点の前後

それぞれ 50

ms ずつのデ

ータを収集し

た。図 3 はそ

の一つの計測

例であり、上

からそれぞれ

主流速 U 、速

度変動 u 、 v

およびレイノルズ応力 $-u v$

を示している。

図 4 は 11 本の熱線プローブから得られた速度変動 u 、 v

を示している。実験から得られた 11 点での速度 U 、 V のデータから 3 次元空間内の速度 U 、 V 、 W を求めるために、本研究では、我々が最近開発したデータ解析手法を用いた¹⁾。

3. データ解析手法

(a) 時系列データから空間データへの変換:

図 3 を見て分かるように、主流速は短い

区間の間ではほとんど変化していない。流れ場はこの短い区間の間に準定常と考えられるた

めに、Taylor の渦凍結仮説を用いて、速度変動 u 、 v の時系列を検出点の前後それぞれ 50

ms ずつの空間に変換した。

(b) 仮想荷重法³⁾:

「仮想法」は解空間を仮想的な荷重の重ね合わせによる弾性平板

のたわみと考え、この仮想的な弾性平板のたわみを生じさせるように任意点に配置された

仮想荷重を求め、それをもとに弾性平板上の各点のたわみを推定するものである。本研究

では弾性平板上のたわみはその点での流速 U 又は V に対応している。

(c) MASCON モデル⁴⁾:

MASCON モデルは mass consistent な場を表すモデルという意味

であり、仮想荷重法で得られた U 、 V から連続式を満たすように、付帯条件付き変分法に

よって W 成分を求める方法である。初期値 U_0 、 V_0 は仮想荷重法で求めた推定値である。

W_0 成分を測定していないので、0 とする。

Fig. 3 Simultaneous traces of mean velocity U , velocity fluctuations u, v and the instantaneous Reynolds stress $-u v$ from detection probe.

Fig. 4 Raw data of hotwire signals taken simultaneously at the 11 sampling points.

4. 実験結果及び考察

図5はデータ解析の流れを示している。まず、Taylorの渦凍結仮説を用いて、速度変動 u 、 v の時系列を空間データに変換し、そして、各YZ断面内の11点での測定データから、その断面内のほかの点での速度を内挿する。最後に、内挿して得られた3次元空間の中の u 、 v のデータから、流れの連続性を制約条件とするMASCONモデルを用いて、 u 、 v 成分の調整と残りの速度成分 w の推定を行った。

Fig. 5 Flowchart of the new data analysis method.

Fig. 6 An example of effectiveness of the new data analysis method.

図6(a)は $X=0$ のYZ断面内の11本のプローブから得られた速度変動 v の空間分布で、図6(b)は仮想荷重法による内挿結果を示している。すべてYZ断面内での u 、 v の内挿値を得た後、MASCONモデルを用いて、 u 、 v 成分を調整すると同時に残りの速度成分 w を求めた。図6(c)はその計算結果を示しており、渦が巻いているような流れ場がはっきり出てきた。

Fig. 7 Bird's eye view of the velocity vector field of the coherent structure at phase $\omega t = (9/18 - 10/18)\pi$.

この3次元乱流構造の全体像を見るために、瞬間的な速度変動 u 、 v 、 w の空間分布を図7に示した。見やすくするために、ベクトルの長さは主流速の5%以上のものしか示していない。この図を見て分かるように、図のまん中の所に低速上昇流が生じており、この低速上昇流によって強いレイノルズ応力が作られる。その右側の上流側には高速流を生じていることが分かる。また、壁面の近くに流れが回っているような様子が見える。

3次元乱流構造によって引き起こされる流れを可視化するために、コンピュータ・シミュレーション技術を用いて、水素気泡法と同じようにtime lineとstreak lineを造った。時刻 t_0 、座標 x_0 の所に発生したトレーサは時刻 t に、 $x(t; x_0, t_0)$ の位置に達する。トレーサ位置の時間変化は $dx/dt = v(t, x)$ である。ここで、 $v(t, x)$ は時刻 t 、座標 x での速度ベクトルを表しており、3節の方法で求められている。上の式を数値積分すれば、トレーサの位置が求まる。

Fig. 8 Perspective representation of time-lines generated from the vertical line perpendicular to the wall.

Fig. 9 Perspective representation of time-lines generated from the horizontal line parallel to the wall.

図8は壁面と垂直な断面内に発生したトレーサのtime lineを示しており、時間間隔 Δt は2.5msとなっている。図8(a)は下流側から見た絵で、右側に存在する強い渦によってtime lineが捻り曲げられていることがよくわかる。図8(b)は横から見た絵で、トレーサが低速上昇流によって持ち上げられている様子がはっきり見える。図9は壁面と水平な断面内に発生したトレーサのtime lineを示しており、まんなかの所での低速流れが写っていることが分かる。図10は垂直断面と水平断面内に発生したトレーサのstreak lineを示している。

5. おわりに

11本のX型の熱線プローブの同時測定データから、3次元乱流構造の瞬間像を推定し、そして、これらのデータに基づき、コンピュータ・画像解析技術を用いて、この3次元乱流構造によって引き起こされる流れ場を可視化した。今回開発した方法は、従来の可視化法と同様に、3次元渦構造の振舞いを見ることができ、しかも、可視化写真から得られない渦運動の実体も把握できる。

参考文献

- 1) 日野幹雄・孟岩・村山雅昭：東京工業大学土木工学科研究報告，No41，1989.
- 2) Hino, M., Fukunishi, Y. and Meng, Y.: Fluid Dynamics Research, Vol. 6, pp. 261-275, 1990.
- 3) 日野幹雄：東京工業大学土木工学科研究報告，No18，1975.
- 4) Sasaki, Y.: J. Meteor. Soc. Japan, Vol. 36, pp. 77-88, 1958.

Fig. 10 Streak-lines representation of the coherent structure.