

3次元組織的乱流構造の瞬間像を推定する試み

An Attempt of Estimating a Whole Instantaneous Image of the Large-scale
Structure in a Reciprocating Oscillatory Turbulent Flow

孟 岩^{*}・村山雅昭^{**}・日野幹雄^{***}

By Yan MENG, Masaaki MURAYAMA and Mikio HINO

The turbulent velocity components (u and v) at 11 points on a plane perpendicular to the mean flow in a reciprocating oscillatory turbulent flow have been recorded simultaneously by 11 X type hot-wire probes. Using conditional sampling technique and a new method of data analysis, we reconstructed the quasi-instantaneous three dimensional image of large-scale structure. The new method of data analysis consists of two steps. The first one is the spatial inter- and extra-polation of velocity components u and v by the method of "virtual load" and the second is to regulate them together with the third velocity component w so as to satisfy the continuity equation by the mass conservation technique.

Keywords: turbulence, 3D quasi-instantaneous image, coherent structure, hot-wire probes, virtual load, mascon model

1. はじめに

我々はこれまでの研究によって交番振動乱流中の3次元組織的な乱流構造の平均像を明らかにしてきた¹⁾。これらの実験は条件付抽出法によりデータを収集しアンサンブル平均して3次元構造の平均像を求めたものであった。このようなアンサンブル平均の方法で得られた3次元乱流構造の平均像は手法の制約のため主流に関して対称となっているが、この平均像が個々の組織構造の姿を正しく抽出しているかどうかは疑問が残っている。また、アンサンブル平均操作を行うため個々の渦の構造の特徴を失ってしまっている可能性がある。そこで本研究では、11本のX型の熱線プローブを同時に用いて、主流に垂直な面内に配置し、3次元空間内の瞬間的な速度 U 、 V を測定し、今回開発したデータ解析手法を用いてこれらの速度成分 U 、 V から速度成分 W を推定し、振動乱流中の3次元組織的乱流構造の瞬間像を捕らえることができた。最後に、3次元乱流構造の瞬間像とアンサンブル平均像との違いを調べ、3次元乱流構造の瞬間像の特徴を検討した。

-
- * 学生会員 東京工業大学大学院 工学部土木工学科
(〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)
- ** 学生会員 東京工業大学大学院 工学部土木工学科
(〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)
- *** 正会員 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科
(〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)

2. 実験装置及び測定方法

2・1 風洞

振動流風洞は幅26cm、高さ10cmの矩形断面を持ち長さ1.4mの亚克力製風路である。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1と同じように設定した。

2・2 流速の計測

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、3本の熱線レイク（各レイクは4, 3, 4本のX型 Hot-wire からなっている）を図-1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50msずつのデータを収集する。

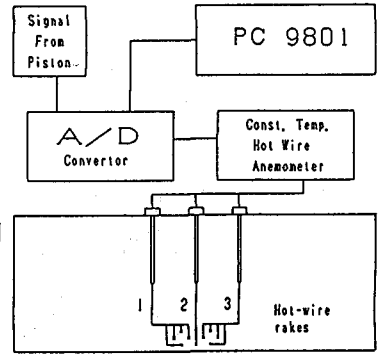


図-1 プローブの配置図

3. データ解析手法

3・1 時系列データから空間データへの変換

図-2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。縦の点線が大きなレイノルズ応力を検出した瞬間である。この図を見て分かるように、主流速は短い区間の間で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。空間データを得るために、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50msずつの空間に変換した。

しかし、これだけのデータでは3次元構造の瞬間像がはっきり見えなく、また、速度成分wを同時に測定していないので、この成分をなんらかの方法で、求めなければならない。そこで、本研究では新しいデータ解析手法を開発し、それを用いて3次元空間内の速度変動u, v, wを求めた。

3・2 仮想荷重法⁵⁾

「仮想法」は解空間を仮想的な荷重の重ね合わせによってたわんだ仮想的な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P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を各点での流速U又はVに対応させている。ある点Xに単位荷重を作用させたとき座標xのたわみをグリーン関数G(x, X)とする。P_iを点X_iの仮想荷重と考えると座標x_jのたわみ(=U_j又はV_j)は各荷重Pによるたわみの総和となるので次式のようなになる。

$$U_j = \sum_i G(x_j, X_i) P_i \quad (1)$$

実験データ(U又はV)の位置にそれぞれ仮想荷重Pがあると考え、P_iの数と式の数が一致して、結局それらの連立一次方程式をガウス、ジョルダン法で解けばP_iが求まる。

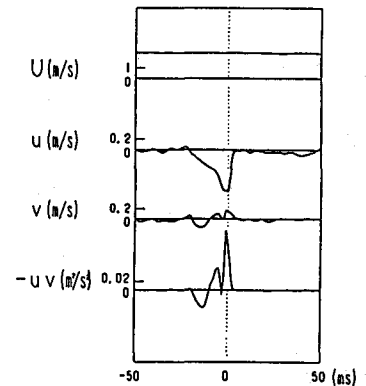


図-2 主流速U、瞬間的な速度変動

ここで、四辺自由支持の弾性平板のグリーン関数は次式となる。

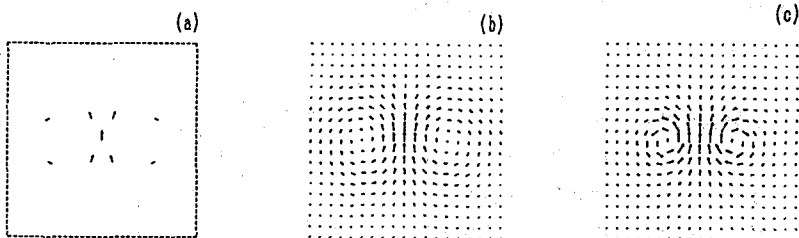
$$G\left(\frac{x}{a}, \frac{y}{b}\right) = \frac{4}{\pi^4 abD} \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{l=1}^{\infty} \frac{\sin(k\pi x/a) \sin(l\pi y/b) \sin(k\pi \xi/a) \sin(l\pi \eta/b)}{\left(\frac{k^2}{a^2} + \frac{l^2}{b^2}\right)^2} \quad (2)$$

仮想荷重 P が求まれば、(1) 式から任意点のたわみ (U 又は V) が求まる。

この方法の妥当性を調べるために、シミュレーション・データを用いて検討した。本研究では二つのランキン渦を適当に離すことにより造られた流れ場を推定対象として用いた。渦の強さ k は 3 とした。流れ場の中のいくつかの点での速度データを既知の測定データとして与えて、全体の流れ場を推定することにした。図-3 (a) は与えた測定データのベクトルを示している。図-3 (a) に示されたデータからすべての格子点における流速成分 U 、

V を仮想荷重法を用いて推定し、その結果を図-3

(b) に示した。元の流れ場は図-3 (c) に示すようであり、良好な推定結果が得られている。



3・3 MASCONモデル

MASCONモデルは mass 図-3 一對の Rankine 渦の作る流れ場を、9 点での U 、 V 成分から推定する consistent な場を表すモデル (a) 9 点で与えた速度ベクトルのデータ (b) 仮想荷重法で推定した流れ場 (c) 推定対象とした真の流れ場

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 成分を含めて流れ場を調整する方法である。これは、Sasaki⁸⁾ によって提案された方法で、連続式を付帯条件として

$$\alpha_1^2 (U - U_0)^2 + \alpha_1^2 (V - V_0)^2 + \alpha_2^2 (W - W_0)^2$$

を最小とするように U 、 V 、 W を決定しようとするものである。ここで α_1 、 α_2 は重みで、 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。Lagrange 乗数 λ を導入すれば、問題は次式の汎関数 F の極小値を求めることに帰着する。

$$F = \int_S \left\{ \alpha_1^2 (U - U_0)^2 + \alpha_1^2 (V - V_0)^2 + \alpha_2^2 (W - W_0)^2 + \lambda \left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} \right) \right\} ds \quad (3)$$

式 (3) の第一変分を 0 とおくと U 、 V 、 W は次のようになる。

$$\begin{aligned} U &= U_0 + \frac{1}{2\alpha_1^2} \frac{\partial \lambda}{\partial x} \\ V &= V_0 + \frac{1}{2\alpha_1^2} \frac{\partial \lambda}{\partial y} \\ W &= W_0 + \frac{1}{2\alpha_2^2} \frac{\partial \lambda}{\partial z} \end{aligned} \quad (4)$$

これを連続式に代入すると、次式のような λ に関する楕円型偏微分方程式を得る。

$$\frac{\partial^2 \lambda}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \lambda}{\partial y^2} + \left(\frac{\alpha_1^2}{\alpha_2^2} \right) \frac{\partial^2 \lambda}{\partial z^2} = -2\alpha_1^2 \left(\frac{\partial U_0}{\partial x} + \frac{\partial V_0}{\partial y} + \frac{\partial W_0}{\partial z} \right) \quad (5)$$

境界条件は空気の入出を許す場合、 $\lambda = 0$ となり、空気の入出を許さない場合、 $\partial \lambda / \partial n = 0$ となる。式 (5) を SOR によって解けば得られた λ によって式 (4) より U 、 V 、 W が求まる。

この方法の妥当性も調べた。シミュレーション・データは図-4 (a) に示すようなある点源から吹き出す流れ場を用いた。図-4 (b) はその 3 次元流れ場の $-YZ$ 断面内の速度ベクトル (V 、 W 成分) を示してい

る。ここで、我々はこの3次元流れ場の中の一つの速度成分 W を未知量として0とおき、そして、MASCON法を用いてその成分を再現することにした。

すなわち、流れ場の二つの速度成分から第3成分を求めることにした。図-4(c)は図-4(b)と同じ YZ 断面で、 W 成分を0とした場合の速度ベクトル(V 成分のみ)を示している。図-4(d)はMASCON法を用いてこの第3成分を求めた結果を示している。この図と図-4(b)を比べてみれば分かるように、 W 成分が非常に精度良く再現できた。

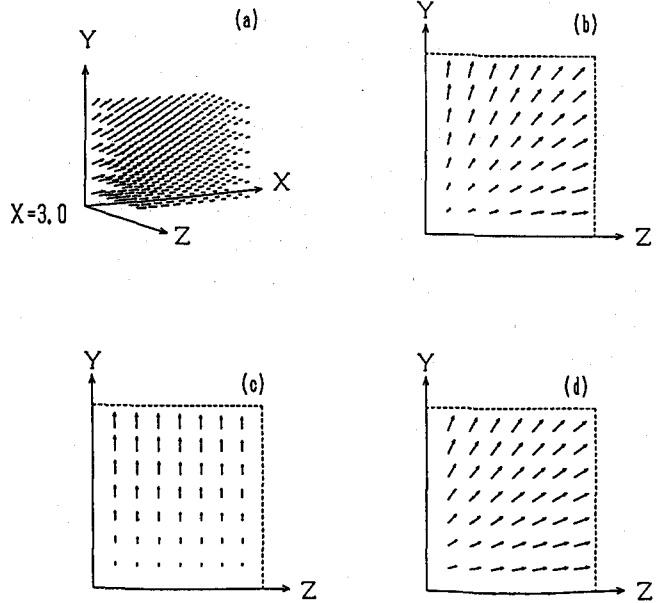


図-4 3次元場のMASCON法による流れ場の推定

(a) 点源から3次元空間に吹き出す流れ場 (b) $X=3.9$ の YZ 断面内の速度ベクトル (c) W 成分を0にした場合の流れ場 (d) MASCON法により推定した流れ場

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の凍結乱流仮説を用いて、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外挿する。最後に、内外挿して得られた3次元空間の中の u 、 v のデータから、流れの連続式を制約条件とする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。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外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。

(a) 瞬間像

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

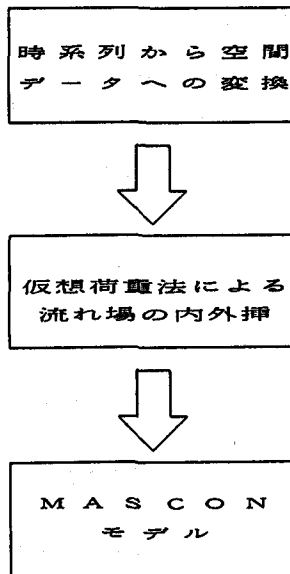


図-5 データ解析の流れ

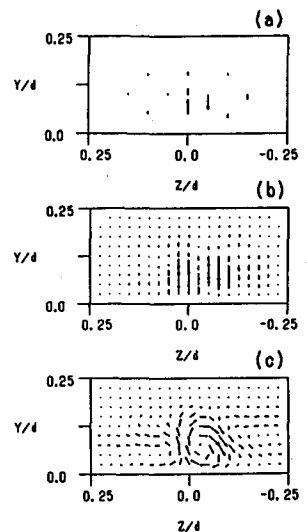


図-6 データ解析の一例

(a) 11点での速度変動 v
(b) 仮想荷重法による内挿結果
(c) MASCON法による計算結果

が見える。もっと、詳しく見るために、各断面内のベクトル図を作った。

図-8 (a)-(d)はそれぞれ $Y/d = 0.050, 0.075, 0.100, 0.125$ の XZ 平面内の速度変動 u, w ベクトル図である。これらの図を見て分かるように、図のまん中のところに低速流れがあり、その外側に高速流れが生じており、また、反対側に低速流れが存在していることが分かる。壁面の近くに流れが回転している様子が見える。

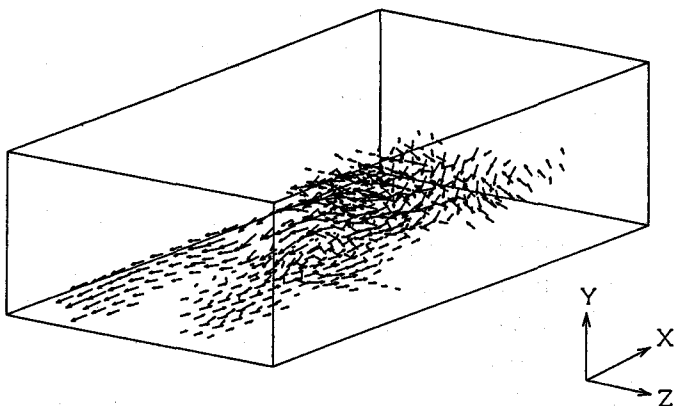


図-7 速度変動 u, v, w の3次元ベクトル図

また、壁面に鉛直な断面内の速度変動 u, v のベクトル図を作った。図-9 (a)-(e)を見て分かるように、中央断面に低速上昇流が生じており、検出用プローブから離れると、中央断面の右側の鉛直断面内に高速流れが生じていることが分かる。それに対して、中央断面の左側の鉛直断面内に低速流れが存在していることが分かる。

最後に、流下方向に垂直な断面内の v, w のベクトル図を作った。図-10 (a)-(f)はそれぞれ $X/d = -0.15, -0.10, -0.05, 0.00, 0.05, 0.10$ のところでの YZ 平面内の速度変動 v, w のベクトル図で、検出した瞬間に強い上昇流が生じており、下流側に行くほど3次元構造は弱くなっていることが分かる。

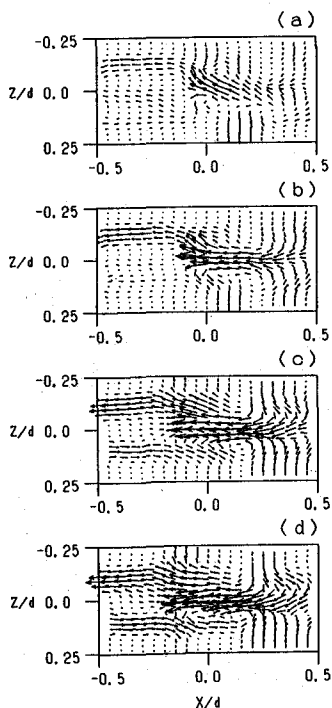


図-8 各 XZ 平面内の速度変動 u, w のベクトル図
(a) $Y/d = 0.05$ (b) $Y/d = 0.075$
(c) $Y/d = 0.10$ (d) $Y/d = 0.125$

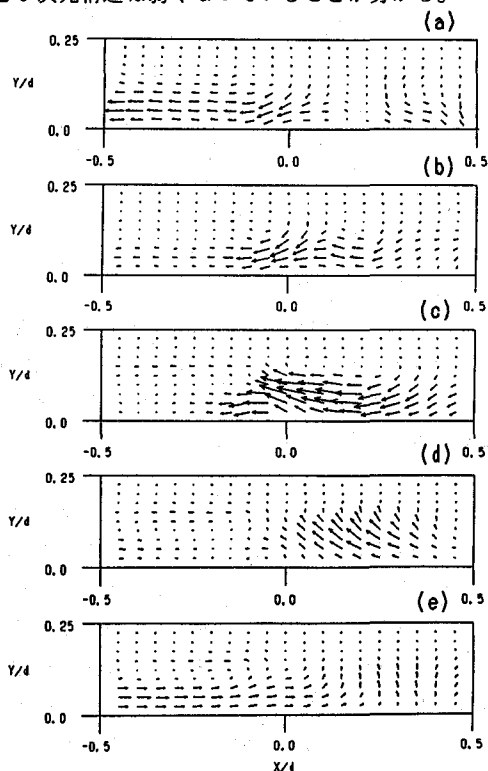


図-9 各 XY 断面内の速度変動 u, v のベクトル図
(a) $Z/d = -0.10$ (b) $Z/d = -0.05$ (c) $Z/d = 0.00$
(d) $Z/d = 0.05$ (e) $Z/d = 0.10$

(b) アンサンブル平均像との比較

今回取った個々の組織構造のデータをアンサンブル平均したら、やはり対称になっている。図-11と図-12はそれぞれ速度ベクトル u, w と v, w を示している。一個一個の構造とアンサンブル平均像はよく似ている面があるにもかかわらず、かなり違っているところもある。その一つは一個一個の構造が完全に対称となっておらず、今回取った構造のほとんどは前後あるいは左右に非対称性を持っている。また、一個一個の構造はアンサンブル平均像と比べれば、流下方向のスケールも短い。

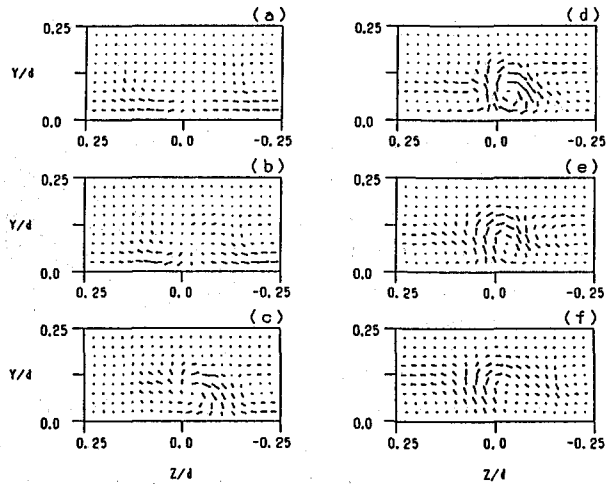


図-10 各YZ断面内の速度変動 v, w のベクトル図

(a) $X/d = -0.15$ (b) $X/d = -0.10$ (c) $X/d = -0.05$
(d) $X/d = 0.00$ (e) $X/d = 0.05$ (f) $X/d = 0.10$

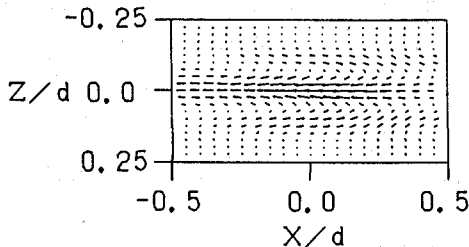


図-11 アンサンブル平均した速度変動 u, w のベクトル図 ($Y/d = 0.15$)

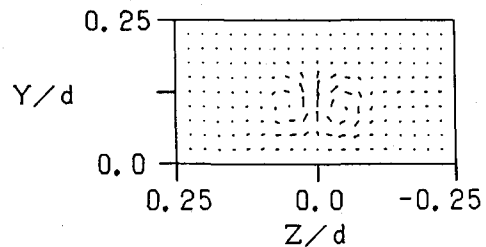


図-12 アンサンブル平均した速度変動 v, w のベクトル図 ($X/d = 0.00$)

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、仮想荷重法とMASCON法を用いて、3次元組織的乱流構造の瞬間像を捕らえることができた。3次元組織的乱流構造の瞬間像とアンサンブル平均像の形とはかなり違っている面がある。組織的乱流構造の性質の理解を深めるために一個一個の組織的乱流構造を調べる必要性があることを明らかにした。

参考文献

- 1) 孟岩・日野幹雄・福西祐 : 第32回水理講演会論文集, pp. 601-605, (1988).
- 2) 孟岩・日野幹雄・福西祐 : 第33回水理講演会論文集, pp. 559-564, (1989).
- 3) 日野幹雄 : 近似計算法としての仮想法の提案と解説 (1975)
- 4) 日野幹雄・宮永洋一 : グリーン関数および仮想法による波力と波の回折計算 (1975)
- 5) 日野幹雄 : "仮想荷重法" による降雨の短時間予測, 第29回水理講演会論文集, pp. 203-208, (1985).
- 6) 市川陽一・四方 浩 : 観測データをもとにした風の場の推定法について, 日本風工学会誌, 第14号, pp. 43-52, (1982).
- 7) Sherman C. A. : A Mass-Consistent Model for Wind Fields over Complex Terrain. Journal of Applied Meteorology, vol. 17, pp. 312-319, (1978).
- 8) Sasaki, Y. : An objective analysis based on the variational method. J. Meteor. Soc. Japan, 36, 77-88, (1958).