

## No. 4

## 乱流中の変動静圧の測定

豊田 国昭\*, 石田 貴弘\*, 平元 理峰\*, 白浜 芳朗\*

## Measurements of Fluctuating Static-Pressure in Turbulent Flows

Kuniaki TOYODA, Takahiro ISHIDA, Riho HIRAMOTO and Yoshikuni SHIRAHAMA  
*Hokkaido Institute of Technology*

A pressure probe was developed to measure fluctuating static pressure in turbulent shear flows, and the probe was applied to the detection of the three-dimensional vortical structures in a rectangular jet. The static pressure tube of 1 mm in diameter with four small holes of 0.4 mm in diameter was connected at the end to a condenser microphone. The structure and the dimension of the probe were determined so as to minimize errors in the measurements of fluctuating static pressure. The three-dimensionally complicated vortical structures in a rectangular jet were detected by measuring the phase-average fluctuating pressure over the flow field. The results suggest that the direct measurements of fluctuating static pressure are very useful to detect three-dimensional vortical structures in turbulent shear flows.

**Key Words :** pressure probe, fluctuating pressure, turbulent flow, vortical structure, jet

## 1. まえがき

乱流の実験的研究では、乱流構造に関する情報は熱線流速計などを用いた速度測定により得られることが多い。ところで、非圧縮性流れの挙動は、ナビエ-ストークスの方程式で示されているように、速度と静圧により決定されるので、流れの実験解析では速度と静圧の測定が必要である。また、近年急速に発展している数値解析の結果を実験と比較する際にも、流れ中の静圧の測定結果が必要となる。乱流モデルを構築する際に圧力・速度相関項のモデルが大きな問題となるが、この項の適切なモデリングのためにも信頼できる圧力測定が望まれる。

近年乱流構造の解明および制御へ有力な手がかりを与えるものとして組織的渦構造が注目されているが、乱流の三次元的に複雑な組織的渦構造を熱線流速計で測定することは極めて困難である。近年のDNSの結果によると、乱流中の変動静圧の低圧部が渦構造の渦度集中領域に対応することから、三次元的に複雑な渦構造が変動静圧場により明瞭になることが示されている<sup>1, 2)</sup>。したがって、乱流中の変動静圧の測定は乱流構造の詳細を知る上で有力な情報を提供するものと期待されるが、流れの中

にプローブを挿入することによる誤差を伴う測定上の困難さのために変動静圧を直接測定した例は少ない。

Kobashi<sup>3)</sup>は静圧管にコンデンサマイクロホンを取り付けた圧力プローブにより円柱後流中の静圧変動を測定し、乱流のエネルギーバランスを検討して変動静圧測定の可能性を初めて示した。その後、同様の形式の圧力プローブが開発され<sup>4-6)</sup>、噴流中の静圧変動の測定に適用されプローブの信頼性も検討されている<sup>7)</sup>。しかし、これらの測定は相関やスペクトルなどの統計量に限られ、最も重要な生情報である変動静圧の時間的变化は測定されておらず、また、これを高精度で測定できるプローブは開発されていない。また、近年、流体中の気泡の挙動をホログラフィ画像により解析し変動静圧を測定することが試みられているが<sup>8)</sup>、乱流中の変動静圧を測定するには多くの問題点がある。

本研究では、乱流中の変動静圧を精度よく測定できる圧力プローブを開発し、そのプローブにより噴流中の変動静圧を測定しその結果を検討した。

## 2. 圧力プローブ

乱流中の変動静圧を圧力プローブにより測定する際の誤差要因を考慮すると、圧力プローブの条件として次の事項が挙げられる。(1) プローブ挿入による流れの変化

\*北海道工業大学

が小さい, (2) 受圧部面積が小さい, (3) 受圧面に垂直な速度成分による誤差 (クロスフロー誤差) が小さい, 4) 圧力変換器が高精度で周波数帯域が広い。以上の条件を考慮し, (1) と (2) により圧力プローブ先端部の静圧管の直径を 1.0mm, 静圧孔径を 0.4mm とし, (4) により圧力変換器としてコンデンサマイクロホン (1/4 インチ) を用いることとした。とくに問題となる (3) のクロスフロー誤差については, この誤差が出来る限り小さい静圧管形状を実験的に検討した。

静圧管のクロスフロー誤差は, 一様流中で静圧管に対する流れの迎角を変化させて静圧管の方向特性を測定して検討された。静圧管先端形状 (半球, 円錐), 静圧孔径, 静圧管肉厚, 静圧孔数を実験的に検討し<sup>9)</sup>, 図 1 の静圧管形状を採用した。静圧管の方向特性を図 2 に示す。図より, 半球形の先端を持つ標準型静圧管と比較して, 本静圧管は広い角度範囲に渡って圧力降下が小さく, したがって, 流れ方向が変動する乱流中の静圧測定の誤差は標準型静圧管の場合より著しく小さいことが解る。このような方向特性改善の要因は, 円錐形先端形状, 静圧孔と静圧管径の比が 50%, 静圧管肉厚が薄いことにあると思われる。とくに, 第 2 と第 3 の要因による静圧孔内への流入効果により圧力降下が抑制されたものと思われる。また, 静圧孔数を 8 個 (4 個 × 2 列) とすることにより,

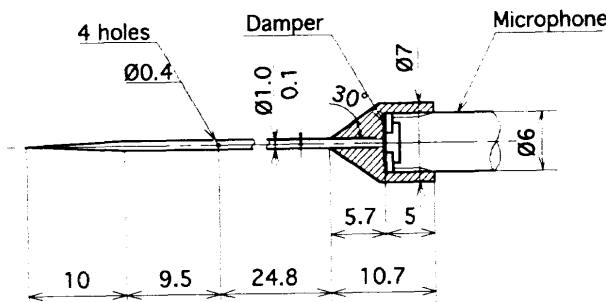


図 1 圧力プローブ

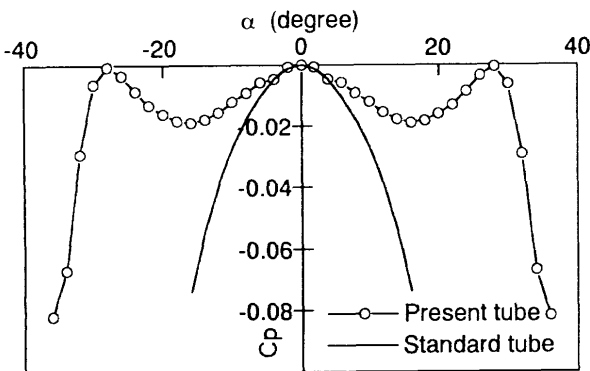


図 2 静圧管の方向特性 ( $C_p$ : 圧力係数  $= 2\Delta p / \rho U^2$ ,  $\Delta p: p_\alpha - p_{\alpha=0}$ ,  $\alpha$ : 迎角)

さらに方向特性が改善されることが確かめられている。

変動静圧測定は, 上述の静圧管後端にコンデンサマイクロホンを図 1 のように取り付けて行われた。導管部の気柱共振およびヘルムホルツ共振を減衰させるために, マイクロホン前面に厚さ 0.3mm のプラスチックのリングを介してダンパ (市販ストッキングのナイロン布地: 20 デニール・針数 380 本程度) を挿入した。また, マイクロホンは周波数帯域 5 Hz ~ 70 kHz, 感度 4.02 mV/Pa, 背極電圧 200V, 直径 6.4mm のコンデンサマイクロホン (アコー社製) である。本プローブの周波数特性は, スピーカからの音圧を用いて基準マイクロホンとの比較測定により求められ, 2.0 kHz までほぼ平坦である<sup>10)</sup>。

流れ中でのプローブの動特性は, 円柱後方の流れ場で, 近接した熱線プローブと圧力プローブにより速度と圧力変動を同時に測定して検討された<sup>10)</sup>。この際, 変動静圧の真値は次式によって速度の測定値より推定した。

$$p' = -\rho (\bar{u} - u_c) u'$$

ここで,  $p'$  は変動静圧,  $\rho$  は密度,  $\bar{u}$  は平均速度,  $u_c$  は渦の移動速度,  $u'$  は変動速度である。圧力変動の推定実効値  $\tilde{p}'_{th}$  と測定値  $\tilde{p}'_m$  の比較を図 3 に示す。 $f=2.0$  kHz 以下では測定誤差は 18% 以内で, 渦のスケール (変動の波長) と静圧管径  $D$  の比が小さくなると測定値は推定値よりも多少大きくなる。

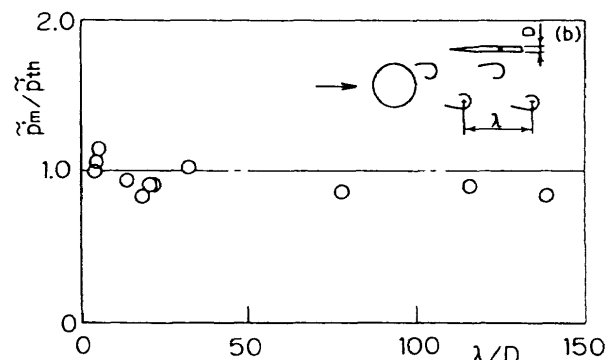
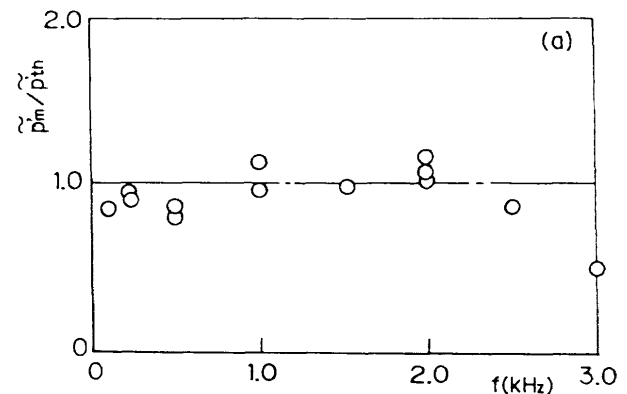


図 3 圧力プローブの動特性

### 3. 噴流測定への適用例

#### 3.1 円形噴流

実際の乱流中の変動静圧測定の実誤差を検討するために、近接した圧力プローブとX型熱線プローブにより円形噴流中の変動静圧と2方向速度を同時に測定し、速度の瞬時値より計算された流れ方向 $\alpha$ を基に変動静圧を補正した。この際、図2の静圧管方向特性を用いた。図4に変動静圧の実測値と補正值の比較を示す。図より、実測値の誤差は微小であることが解る。また、噴流中の全圧変動、静圧変動、速度の同時測定による検定結果を図5に示す。図では、全圧変動実測値が静圧変動と速度からの推定値と比較されている。この結果からも、静圧変動は十分な精度で測定されていると思われる。

合体モード ( $St=f_p De/Ue=0.85$ ,  $f_p$ : 励起周波数,  $De$ : 噴出口速度,  $Ue$ : 噴出速度) <sup>10)</sup> で励起された円形噴流中の渦構造の測定例を以下に示す<sup>12)</sup>。測定には位

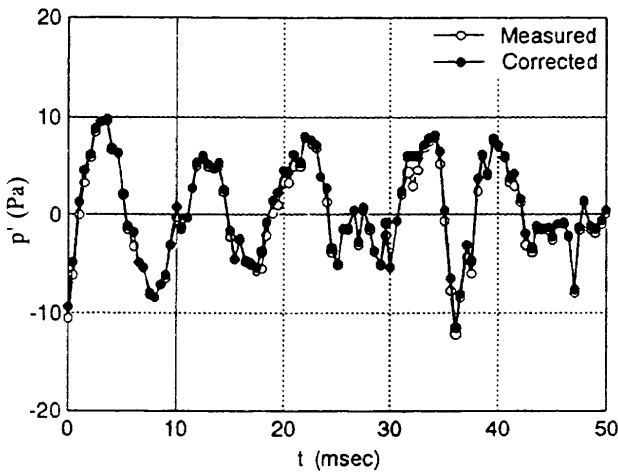


図4 変動静圧の測定値と補正值の比較  
( $Ue=8\text{ m/s}$ ,  $x/De=2.0$ ,  $r/De=0.5$ )

相平均手法を用い、同一位相における渦度場と静圧場を抽出して比較検討した。図6の比較図より、変動静圧の負圧領域が渦度集中領域とほぼ一致していることがわかる。

#### 3.2 非円形噴流

非円形噴流は混合促進手法として近年注目されているが、その効果は噴流中に生成される非円形渦構造の変形・干渉挙動によると思われる<sup>13-14)</sup>。この渦構造は三次元的に複雑な挙動を示すので、可視化および渦度測定のような従来の測定手法により渦構造を明らかにすることは現状では極めて困難である。本節では、長方形噴流中の三次元渦構造を変動静圧測定により抽出した例を述べる<sup>16)</sup>。

実験では、アスペクト比4の長方形オリフィスからの噴流について、位相平均法を用いて位相平均静圧場の測定を行った。噴出口の等価直径 $De$ に基づくレイノルズ数  $Re=Ue De/\nu$  は  $1.3 \times 10^4$  で、噴流中の渦構造を安定化し周期的に発生させるために、噴流は風洞整流部を取

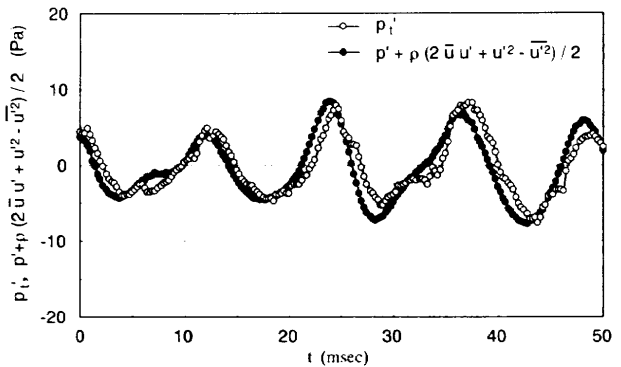


図5 全圧変動・静圧変動・速度の同時測定による検定  
( $Ue=8\text{ m/s}$ ,  $x/De=2.0$ ,  $r/De=0$ )

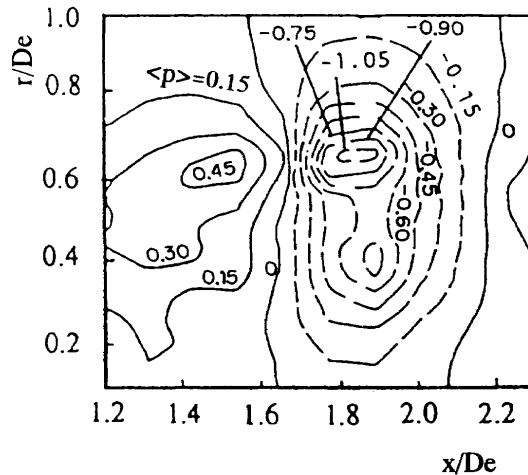
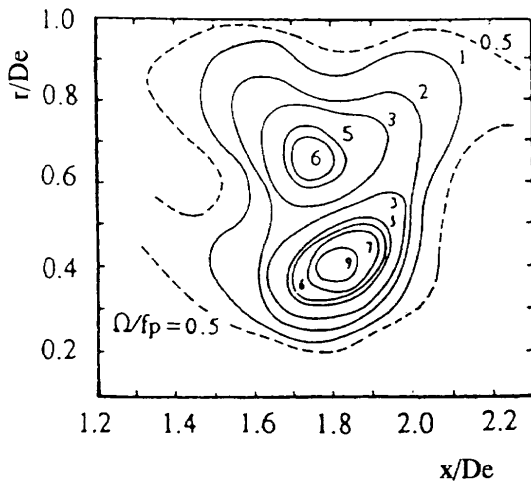


図6 円形噴流中の渦度分布と静圧分布

( $\Omega$ : 渦度,  $\langle p \rangle$ : 動圧  $\rho Ue^2/2$  で無次元化された位相平均静圧)

り付けられたスピーカにより励起された。励起周波数は  $f_n/4$  ( $f_n$ : 噴出口近傍混合層の不安定変動周波数) で、この励起により、 $f_n/4$  の周波数で発生する大規模非円形渦列の安定な干渉モード<sup>17)</sup> を生成した。

位相平均測定では、図 7 に示すように、噴流出口近傍に固定された I 型熱線信号を参照信号とし、変動圧力は流れ場中を移動する圧力プローブにより測定され、同一位相の圧力の平均値を流れ場全体で求めた。さらに、流れ方向に垂直な断面内の位相平均等圧画像に Taylor 仮説を適用し静圧場の三次元画像を作成した。この際、次式により時間変化を流れ方向距離に変換した。

$$\Delta x = -Uc \cdot \Delta t$$

ここで、 $x$  は噴出口からの流れ方向距離、 $t$  は時間、 $Uc$  は渦構造の移動速度で噴流中心速度の半分の値とした。

長方形噴流中の静圧場の三次元画像を図 8, 9 に示す。これらの図は噴流の上半部のみを示している。三次元画像を作成する際の圧力範囲は渦構造が明瞭になるような負圧領域とした。図 8 は  $x/De=1.0$  における三次元画像であり、図中の L は先行渦、T は追跡渦を示している。先行渦は自己誘起速度により端部が下流方向に傾斜

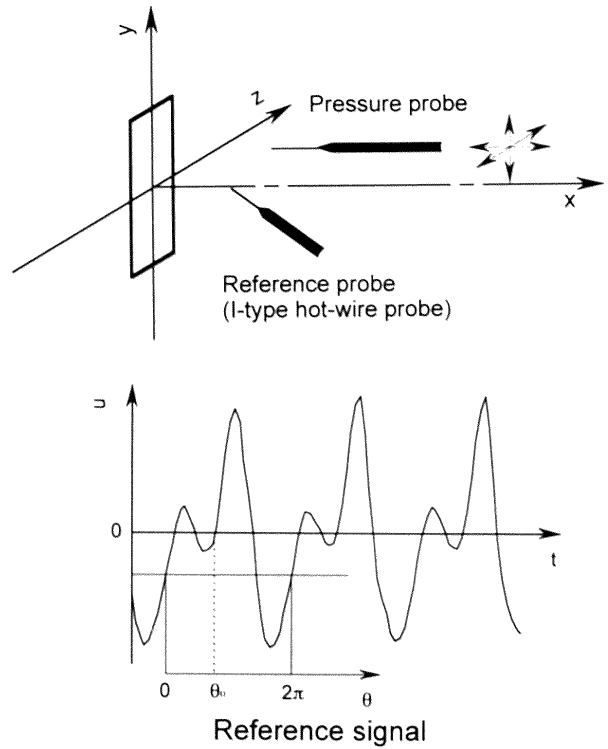


図 7 位相平均測定法

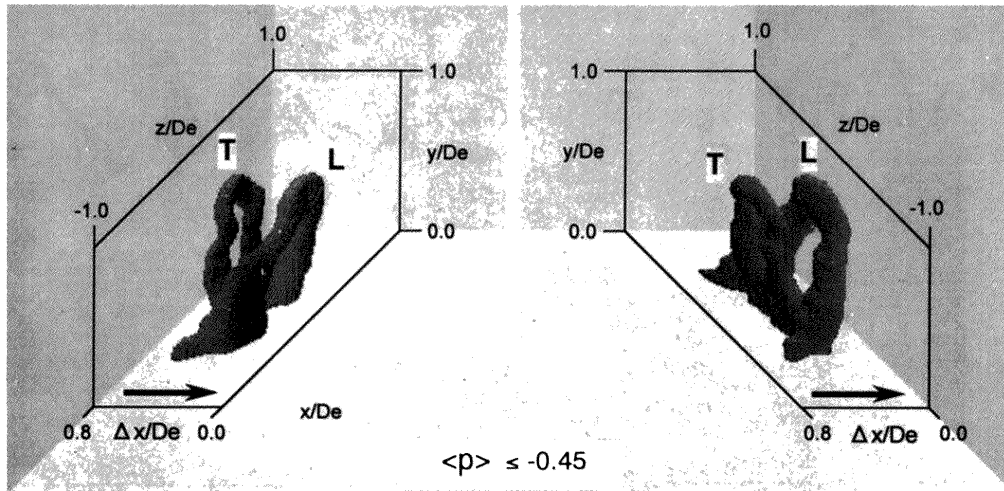


図 8 長方形噴流中の三次元静圧場 ( $x/De=1.0$ )

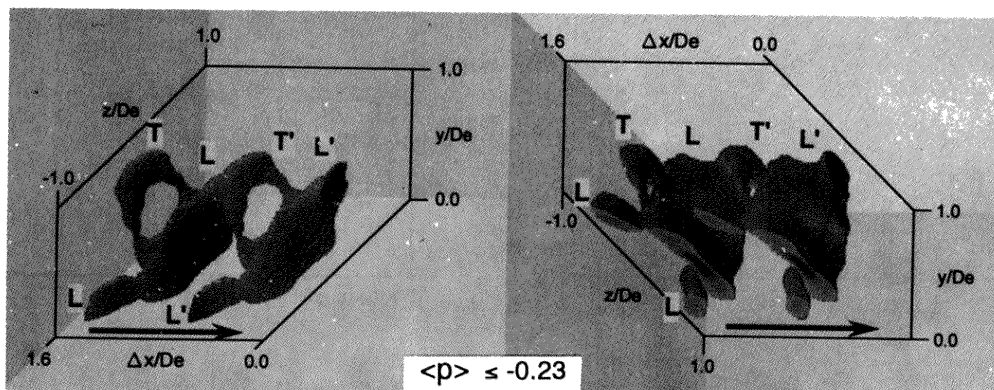


図 9 長方形噴流中の三次元静圧場 ( $x/De=1.5$ )

し、逆に追跡渦は上流方向に引き伸ばされている様子が解る。

図9は $x/De = 1.5$ における三次元画像で、2周期分をつなぎ合わせた画像である。追跡渦の先端部は上流の先行渦に巻き込まれ、流れ方向に伸長している。また、先行渦は $z$ 方向に分裂していることが推測される。

#### 4. あとがき

乱流中の変動圧力を測定する圧力プローブを開発し、各種検定により測定精度を検討した。その結果、開発した圧力プローブは乱流中の静圧変動測定に有効であることが確認された。また、圧力プローブにより長方形噴流中の変動静圧を測定し、渦構造との関連性を検討した結果、位相平均変動静圧場は複雑な三次元渦構造を抽出する手法として極めて有効であることを確認した。

本研究で示したように、変動静圧測定は乱流構造を解明するための有用な情報を提供するので、変動静圧をさらに精度良く測定するための圧力プローブの開発および乱流計測への適用の発展が望まれる。

#### 参考文献

- 1) M. Lesieur, O. Metais and P. Comte : *New Approaches and Concepts in Turbulence*, Birkhauser Verlag Basel, (1993), 61-77 (1993).
- 2) N. Kasagi, Y. Sumitani, Y. Suzuki and O. Iida : *J. Heat and Fluid Flow*, **16** (1988), 2.
- 3) Y. Kobashi : *J. Phys. Soc. Jpn.*, **12-5** (1957), 533.
- 4) T. E. Siddon : *Univ. Tront Inst. Aerosp-Rep.*, No.136 (1969).
- 5) R. E. J. Arndt and A. W. Nilsen: *ASME Paper*, #71-FE-31 (1971).
- 6) H. V. Fuchs : *J. Sound Vib.*, **22-3** (1972), 361.
- 7) W. K. George, P. D. Beuther and R. E. A. Arndt : *J. Fluid Mech.*, **148** (1984), 155.
- 8) B. Ran and J. Katz : *J. Fluid Mech.*, **262**(1994), 223.
- 9) 石田・豊田・田尾・白浜 : 日本機械学会講演論文集 No.95-19 (1995), 169.
- 10) 白浜・豊田・岡本 : 日本機械学会論文集, 59-567, B (1993), 79.
- 11) A. K. M. F. Hussain and K. B. M. Q. Zaman : *J. Fluid Mech.*, **101** (1980), 493.
- 12) K. Toyoda and F. Hussain : *Proc. 5th Asian Congr. Fluid Mech.*, (1992), 587.
- 13) C. M. Ho and E. Gutmark : *J. Fluid Mech.*, **179** (1987), 257.
- 14) F. Hussain and H. S. Husain : *J. Fluid Mech.*, **208** (1989), 257.
- 15) 豊田・白浜・小谷 : 日本機械学会論文集, 58-545, B (1992), 7.
- 16) 豊田・平元・石田・白浜 : 第27回乱流シンポジウム講演論文集 (1995), 275.
- 17) 豊田・F. Hussain : 日本機械学会論文集, 55-514, B (1989), 1542.

