乱流混合層における変動全圧・速度の同時計測

Simultaneous measurement of fluctuating total pressure and velocity in a turbulent mixing layer

○ 正 中 吉嗣 (慶大院) 正 小尾 晋之介 (慶大理工)

Yoshitsugu NAKA, Keio University, 3-14-1 Hiyoshi, Yokohama 223-8522

Shinnosuke OBI, Keio University, 3-14-1 Hiyoshi, Yokohama 223-8522

A novel technique to evaluate velocity-pressure correlation is proposed. Static pressure fluctuation is indirectly calculated from fluctuating total and dynamic pressure. The applicability is examined by the measurement in a turbulent mixing layer as well as in a wake of circular cylinder. The result is compared with directly measured fluctuating static pressure. Several statistical procedures are introduced to improve the estimated fluctuating static pressure, and it is confirmed that the correction practices is partly effective. Estimated velocity-pressure correlation with the correction practice has a similar profile to directly measured one. To obtain the quantitatively reasonable data, however, further improvement is still necessary.

Key Words: measurement technique, velocity-pressure correlation

1 緒論

乱流中の圧力変動は速度変動と同様に乱流を特徴づける重要なパラメータであり、速度の測定と同様に変動圧力測定の重要性は認識されていたが、乱流中の圧力変動を正確に測定することは難しいとされてきた。これまでに提案された変動圧力を測定するための手法の中で、白濱ら⁽¹⁾が提案した小型変動静圧プローブは、噴流での測定によってその有効性が検証され、様々な乱流場に広く適用可能であることが示された。近年、同型のプローブを用いた変動圧力測定例が複数報告されており⁽²⁻⁶⁾、乱流中の変動圧力測定が可能であることが確かめられつつある。

筆者ら⁽⁷⁾は過去の研究において、白濱ら⁽¹⁾と同型の変動静圧測定プローブと X 型熱線流速計を組み合わせ、乱流混合層の発達領域において速度・圧力相関の分布を測定した。その分布から見積もった圧力拡散項は、自己保存領域においては Rogers ら⁽⁸⁾による DNS の結果と良く一致し、計測の妥当性が確認された。しかし、この方法では圧力プローブの挿入により静圧孔付近の流れが変化することは避けられず、変動速度の測定点を静圧孔から圧力プローブの影響が及ばない程度に離れた位置に設定する必要がある。この点が、測定に必要な空間解像度を達成する上で課題となっていた。

本研究では、変動速度・圧力の同時測定における空間解像度の問題を解決するために、変動全圧と速度を同時測定し、その結果から変動静圧の時系列信号を得る手法を採用する。同様の試みはすでに行われているが⁽⁹⁻¹¹⁾、本研究では速度・圧力の同時計測に際して高い空間解像度が達成されるよう特に留意する。変動静圧測定で得られた知見を生かし、速度・圧力の同時測定手法の様々な乱流場への適用性をさらに広げることを目的として本手法の評価を行う。

2 測定原理

本研究では変動静圧の時系列信号を得るために、以下の関係を用いた。

$$\hat{p}_t = \hat{p} + \frac{1}{2}\rho\hat{u}^2 \quad (1)$$

ここで、 $\hat{p}_t$ は瞬時全圧、 $\hat{p}$, $\hat{u}$ はそれぞれ瞬時静圧、瞬時速度である。また、 ρ は流体密度を表す。本研究では微少な変動圧力

を正確に測定するため、圧力センサとしてコンデンサマイクロフォンを用いた。コンデンサマイクロフォンは変動成分のみを測定可能であるため、式 (1) にレイノルズ分解を施し、全圧、動圧、静圧の変動成分に関する関係式を導出した。

$$p_t = p + \frac{1}{2}\rho(2Uu + u^2 - \overline{u^2}) \quad (2)$$

ここで、 p_t , p はそれぞれ、変動全圧、変動静圧、 u は変動速度、 U は時間平均速度である。実際の変動静圧の計算には、この式 (2) を用いた。

3 実験方法・装置

本研究では、筆者ら⁽⁷⁾による過去の報告と同様の乱流混合層風洞、速度・圧力測定系を用いた。乱流混合層風洞の流入条件は表 1 のとおりである。座標系はスプリッタープレート後縁中心部を原点とし、流れ方向に x 軸をとり、これに直交し低速側から高速側へ向かう方向を正として y 軸を定義した。 z 軸は x , y 軸に直交するよう、右手系で定義した。測定は $x = 100\text{mm}$ 、 $-25.2\text{mm} \leq y \leq 25.2\text{mm}$ で行った。サンプリングレートは 10kHz、サンプル時間を 400 秒とした。

今回製作した全圧プローブの概要を図 1 に示す。高い空間解像度を達成するため、内径 0.4mm、外径 0.5mm のパイプを用い、これをコンデンサマイクロフォンとのジョイント部分に接合した。

変動全圧・速度の同時計測に先だって、変動全圧測定系の検定を行った。全圧プローブの角度特性、圧力測定系の周波数応答、速度・圧力プローブの相互干渉の影響を調べた。これらの計測系の基本的な特性に関しては、別稿⁽¹²⁾で報告したため、ここではその影響について概略を述べるにとどめる。今回用いた変動全圧プローブの角度特性について、圧力係数 $C_p = (P_t(\alpha) - P_t(0))/P_t(0)$ を評価したところ、流れの迎え角が $\pm 15^\circ$ 以内であれば、それに伴う誤差が 1% 以内であることを確認した。

本手法を用いて間接的に求められる変動静圧は、変動全圧と変動動圧の信号間の時間遅れに大きく影響を受ける。変動全圧信号の時間遅れの原因として、主に以下の 3 つが考えられる。

Fig. 1: Schematic of the total pressure probe (dimensions in mm).

Fig. 2: Arrangement of the total pressure probe and the X-wires hot-wire probe.

- コンデンサマイクロフォンの電気回路応答
- 全圧プローブ内部の気柱共鳴、ヘルムホルツ共振
- 速度センサと圧力センサの距離に起因した時間遅れ

これらの原因によって変動圧力信号に生ずる位相差についてはポスト処理によって除去した。その詳しい手順は別稿⁽¹²⁾に示した。

変動全圧プローブとX型熱線センサは図2に示したように2本の熱線センサの中央と全圧管の中心軸が一致するように配置した。 x 軸方向に関しては、プローブ間距離 Δx をX型熱線センサの交点から全圧管の先端までの距離と定義し、速度の平均値・変動値に全圧管の近接の影響が無いようなプローブ間距離を $\Delta x = 2\text{mm}$ と決定した。

本測定における空間解像度は、コルモゴロフスケール η_K に対して全圧管内径は $6\eta_K$ 、X型熱線流速計のセンサ間距離は $15\eta_K$ であった。また、本測定で採用したプローブ間距離 Δx は $30\eta_K$ に相当する。ここで η_K は混合層中心における熱線流速計の測定結果から、局所等方性の仮定とテイラーの凍結性仮説を適用して見積もった。

4 円柱後流における測定

変動圧力測定の妥当性を確認するため、乱流混合層での測定に先立って円柱後流に生じるカルマン渦を測定した。図3に示すとおり、円柱の直径 $d_c = 20\text{mm}$ 、測定位置は $H = 1.25d_c$ 、 $L = 1.5d_c$ とした。主流速度 $U_\infty = 6.78\text{m/s}$ 、変動圧力・速度から推定したカルマン渦周期 $f_c = 70\text{Hz}$ であった。これらのパラメータから見積もったストローハル数は0.206であった。

変動全圧・速度の同時測定と変動静圧・速度の同時測定を別々に行った。ここで、静圧プローブで測定した変動静圧を p_m 、式

Tab. 1: Inlet conditions

	U [m/s]	Tu_f [%]	θ_b [mm]	Re	H
HSS	6.78	0.86	0.88	398	1.41
LSS	3.52	1.03	1.41	330	1.69

Tab. 2: Statistics in the wake of a circular cylinder

	p_m	p_e	p_{es}
RMS	0.0611	0.0772	0.0536
Skewness	-0.0336	-0.5237	-0.0619
Kurtosis	2.8748	6.2265	3.0481
$\overline{up}$	-2.46×10^{-3}	-4.22×10^{-3}	-4.22×10^{-3}
$\overline{vp}$	-4.45×10^{-3}	-2.79×10^{-3}	-1.24×10^{-3}

Fig. 3: Schematic of the flow around a circular cylinder.

Fig. 4: PSD of fluctuating static pressure.

(2)を用いて変動全圧と変動動圧から求めた変動静圧を p_e とする。また、変動全圧と変動動圧をそれぞれフーリエ変換し、振れ幅についての差を計算した後、これを逆フーリエ変換することで得られる静圧を p_{es} とする。逆フーリエ変換の際に必要な位相の情報は、変動動圧のものをそのまま採用した。変動静圧 $\overline{p_m}$ 、 $\overline{p_e}$ 、 $\overline{p_{es}}$ のパワースペクトルを図4に示す。 $\overline{p_m}$ 、 $\overline{p_e}$ 、 $\overline{p_{es}}$ のピーク周波数はほぼ一致しているが、 $\overline{p_e}$ の分布は渦放出周波数以外の周波数における値が $\overline{p_m}$ 、 $\overline{p_{es}}$ の2倍程度となっている。

次に、変動静圧のRMS, Skewness, Kurtosis, $\overline{up}$, $\overline{vp}$ を表2に示す。速度は主流速度 U_∞ 、圧力は $\frac{1}{2}\rho U_\infty^2$ を用いて無次元化

Fig. 5: RMS values of the fluctuating total pressure.

した。 $\overline{up_{es}}$, $\overline{vp_{es}}$ に関して、 p_{es} を求める際に行った操作によって時間の情報は失われるため、 p_{es} と速度の相関を直接計算することはできない。そこで、 $\overline{up_e} = \overline{up_{tm}} - \overline{up_d}$ として、 $\overline{up_{tm}}$ と $\overline{up_d}$ について上と同様の手順で $\overline{up_{es}}$ を推定した。 $\overline{vp_{es}}$ についても同様に推定した。

p_m , p_e , p_{es} の統計量を比較すると、 p_e の Skewness, Kurtosis は p_m と比べてかなり大きい。一方で p_{es} の RMS, Skewness, Kurtosis は p_m の値に近い結果となった。パワースペクトルや種々の統計量から判断して、 p_e がノイズを多く含むような結果となったのは、全圧と動圧の時系列信号に存在する波形の歪みの影響であろうと考えられる。一方で p_{es} に関しては、瞬間的な波形の歪みが周波数空間で統計的に処理されるため、その影響が小さくなったと考えられる。速度・圧力相関に関して、今回の結果から定量的な評価はできないが、符号と値のオーダーに関しては一致したので、変動全圧・速度から速度・圧力相関を見積もる手法に関して一定の指針を得たと言える。

5 結果

乱流混合層における変動全圧・速度の同時測定結果について述べる。比較のため、別途変動静圧・速度の同時測定を行った。今回の測定位置 $x=100\text{mm}$ では、平均速度・レイノルズ応力の分布形状はほぼ自己保存性を達成していることが確認されている⁽⁷⁾⁽¹²⁾。

変動全圧の RMS 値を図 5 に示す。直接測定した変動全圧を p_{tm} 、変動静圧と速度の同時測定結果から式 (2) の関係を用いて見積もった変動全圧を p_{te} とする。これらの変動全圧の RMS 値の分布を比較すると、 p_{tm} は p_{te} よりも明らかに小さく、混合層中心で p_{tm} は p_{te} の 66% 程度であった。この差の原因が、直接測定した全圧変動の振幅が真の値よりも小さいためであるならば、直接測定した変動全圧に含まれる変動動圧成分と、速度から見積もった変動動圧が釣り合わず、これらを差し引いて得られる変動静圧に変動動圧の成分が残ることが懸念される。そこで、以下のように定義される変動圧力係数 Γ を定義し、 Γ 倍した変動全圧を用いて変動静圧を見積もった。

$$\Gamma = \frac{\sqrt{(p_m + p_d)^2}}{\sqrt{p_{tm}^2}} \quad (3)$$

ここで、 p_m , p_d はそれぞれ直接測定した変動静圧、変動動圧、 p_{tm} は直接測定した変動全圧である。

静圧変動の RMS 値の分布を図 6 に示す。変動静圧プローブを用いて直接測定したものを p_m 、全圧測定の結果から見積もった変動静圧を p_e とする。また、式 (3) で定義した変動圧力係数

Fig. 6: RMS values of the fluctuating static pressure.

Fig. 7: Skewness of the fluctuating static pressure.

Γ を用いて補正した全圧を用いて見積もった変動静圧を p_c とする ($p_c = \Gamma p_t - p_d$)。また、円柱後流における測定結果に対して行ったのと同じように、式 2 の計算を周波数空間で行った結果として得られる変動圧力を p_{es} , p_{cs} とする。これらは、それぞれ p_e , p_c に対応している。変動静圧の分布形状について p_e は p_m に比べて相当大きく、混合層中心の値で約 3.1 倍となった。また、 p_c の分布は p_e の分布とほとんど変わらず、補正の効果は明らかではない。 p_{es} と p_{cs} に関して、 p_c , p_e よりも変動は小さく、 p_{cs} の最大値は p_m の最大値の約 2 倍程度である。

次に、変動静圧の skewness を図 7 に示す。せん断層の中で skewness は負の値を取ることが知られているが、 p_e の skewness は $1.2 \leq \eta_\theta \leq 3.7$ の領域で正の値を取っている。一方で、 p_c の skewness はせん断層中で常に負となり、skewness に関しては補正の効果が認められた。 p_{es} と p_{cs} の分布は p_e と p_c とそれぞれ同じ傾向を示した。定量的には、 p_{cs} の skewness の絶対値は p_c よりも小さく、 p_m と同程度であった。

速度・圧力相関 $\overline{up}$, $\overline{vp}$ の分布を図 8 に示す。直接測定した $\overline{up_m}$, $\overline{vp_m}$ は原点について対象をとっているが、 $\overline{up_e}$, $\overline{vp_e}$ に関しては、どちらもせん断層中心でピークを取るような分布をしている。一方、補正した変動全圧から得た $\overline{up_c}$, $\overline{vp_c}$ に関しては、 $\overline{up_e}$, $\overline{vp_e}$ と比較して、定性的に $\overline{up_m}$, $\overline{vp_m}$ により近い分布形状となった。特に $\overline{vp}$ に関しては $\overline{vp_m}$ と同様にせん断層を横切る間に増減を繰り返す分布で、定量的にも近い値を取っている。

このことから、 Γ による補正によって、全圧と動圧のアンバランスが幾分解消されたと言える。しかし、本研究で変動全圧から見積もった変動静圧には、全圧管で測定した変動全圧に含まれる変動動圧成分と、熱線流速計で測定した速度から見積もった変動動圧のアンバランスによって動圧の成分が残っていると考えられ、このアンバランスを解消することが今後の課題

Fig. 8: Velocity-pressure correlation: $\overline{up}_m$, $\overline{up}_e$ and $\overline{up}_c$ (top); $\overline{vp}_m$, $\overline{vp}_e$ and $\overline{vp}_c$ (bottom)

である。また、見積もった変動静圧や速度・圧力相関について定量的な議論を行うには、全圧・動圧測定に含まれる不確かさについて詳しく調べる必要がある。

6 結論

本研究では、速度・圧力の同時測定の空間解像度を改善するために新たな測定方法を提案し、その評価を行った。得られた結論は以下の通りである。

- 変動速度・全圧の同時測定系を構築し基本的な性能の検定結果を示した。
- 円柱後流において変動全圧・速度の同時測定を行い、変動静圧を得た。結果を直接測定した変動静圧と比較して、本手法の有効性を確認した。
- 直接測定した変動全圧は、ピーク値で比較して変動静圧と動圧から見積もった値の 66%程度であった。
- 変動全圧の値を変動圧力係数 Γ を用いて補正したところ、得られる変動静圧の統計的性質は直接測定した結果に近づけることができた。
- 速度・圧力相関 $\overline{up}_e$, $\overline{vp}_e$ の分布は $\overline{up}_m$, $\overline{vp}_m$ と定性的にも異なる結果となったが、変動圧力係数 Γ を用いて変動全圧の振幅を補正することで、分布の定性的な傾向は直接測定したものに近づけることができた。

7 謝辞

本研究の一部は、日本学術振興会 科学研究費補助金 特別研究員奨励費（課題番号 19-5711）による補助のもとで行われた。

参考文献

- (1) 白濱 芳朗, 豊田 国昭, 1993, “変動圧力測定プローブの開発”, 日本機械学会論文集 B, 59-567, 3381-3387.
- (2) Tsuji, Y. and Ishihara, T., 2003, “Similarity scaling of pressure fluctuation in turbulence”, *Phys. Rev. E*, 68, 026309
- (3) Tsuji, Y., Fransson, J. H. M., Alfredsson, P. H., and Johansson, A. V., 2007, “Pressure statistics and their scaling in high-Reynolds-number turbulent boundary layers”, *J. Fluid Mech.*, 585, 1-40.
- (4) 辻 義之, 今飯田 純, 阿部 浩幸, 2006, “乱流中の変動圧力の計測について”, 日本機械学会論文集 B, 72-719, 1710-1717.
- (5) 飯田 明由, 加藤 千幸, 大田黒 俊夫, 下出 新一, 1998, “静圧変動計測による空力音源解析”, 日本機械学会論文集 B, 64-623, 2057-2065.
- (6) 酒井 康彦, 森口 優, 田中 伸彦, 山本 陸, 久保 貴, 長田 考二, 2006, “二次元乱流噴流の速度・圧力場の特性に関する研究”, 日本機械学会論文集 B, 72-724, 2948-2954.
- (7) Naka, Y., Omori, T., Obi, S. and Masuda, S., 2006, “Simultaneous measurements of fluctuating velocity and pressure in a turbulent mixing layer” *Int. J. Heat and Fluid Flow*, 27, 737-746.
- (8) Rogers, M. M., Moser, R. D., 1994, “Direct simulation of a self similar turbulent mixing layer”, *Phys. Fluids*, 6 (2), 903-922.
- (9) Komerath, N. M., Hegde, U. G. and Strahle, W. C., 1983, “Turbulent static pressure fluctuations away from flow boundaries” *AIAA Journal*, 23-9, 1320-.
- (10) Giovanangeli, J.-P., 1988, “A new method for measuring static pressure fluctuations with application to wind-wave interaction” *Experiments in Fluids*, 6, 156-164.
- (11) Naseri, M. and Nitsche, W., 1991, “A Probe for Measuring Pressure Fluctuations in Flows” In *Proc. ICIASF '91*, Rockville, MD, Oct. 27-31, 1991, 25-33.
- (12) Naka, Y. and Obi, S., 2007, “Development of a miniature probe for velocity-pressure correlation measurement” In *Proc. TSFP-5*, Garching, Germany, August.