乱流境界層に接する隙間に発生する圧力変動*

毛利 隆之^{*1}, 長沼 健治^{*2}Pressure Fluctuation Occurring at the inside of Slots
beneath Turbulent Boundary LayersTakayuki MORI^{*3} and Kenji NAGANUMA^{*3} Naval Systems Research Center, TRDI, Ministry of Defense,
2-2-1 Naka-Meguro, Meguro-ku, Tokyo, 153-0061 Japan

This paper presents results of an experimental study on pressure fluctuation occurring at the inside of narrow slots beneath turbulent boundary layers. Experiments were carried out at a Reynolds number range of $3 \times 10^4 < Re_\theta < 1.25 \times 10^5$ using a large re-circulating water tunnel. Fluctuating pressure was measured for three types of slots; two spanwise slots of 1 mm and 3 mm width and a streamwise slot of 1 mm width. In case of spanwise slots, measured pressure spectra show 4-6 dB lower values than those measured on smooth surface. However, obtained two-point cross-spectral densities reveal that pressure fluctuations at the inside of the spanwise slot are more coherent than those measured on smooth surface. In case of streamwise slot, pressure fluctuation levels increase remarkably at a low frequency range.

Key Words: Pressure Fluctuation, Turbulent Boundary Layer, Slot, Cross-spectral Density

1. 緒 言

配管の継ぎ目, 建物のドアの隙間など, 壁面乱流にさらされる隙間が振動の原因になることは経験的に知られている。しかしながら, そのような隙間内に発生する圧力変動について系統的に調査した例は, 著者らの知る限り極めて少ない。

本研究の目的は, スパン方向および主流方向に設置された隙間内部に発生する圧力変動の周波数特性, 相関特性を実験的に明らかにすることである。本研究では, スパン方向に設置された開口のうち, 圧力変動レベルが平滑面上と比較して顕著に増加し, 明瞭な卓越周波数が現れる場合を“キャビティ”, 主流方向の長さが短く, 顕著な非定常性が現れない場合を“スパン方向隙間”と定義する。さらに, スパン方向隙間と同様な幅を有し, 主流方向に長い開口を“主流方向隙間”と定義する。

乱流により壁面に発生する圧力変動については, 平滑面や粗面上の乱流境界層について多くの研究^{(1)~(4)}

がある。キャビティに関しても, 卓越周波数に関する研究⁽³⁾⁽⁵⁾などの研究がなされている。しかしながら, 本研究における隙間については研究の対象としていない。

壁面圧力変動を構造振動の起振力として捉えた場合, 圧力変動のレベルだけでなく, 圧力変動の流れ方向, スパン方向の相関が重要な因子である⁽³⁾。例えば, 乱流境界層による圧力変動は, 流れ方向に主流の60~70%の位相速度を持って伝播し, スパン方向の相関は流れ方向と比較し大幅に弱い^{(1)~(4)}。隙間に発生する圧力変動について, 相関の強さを含めて乱流境界層の場合と比較することは, 振動防止・低減の観点から非常に有益である。

以上の観点より, 本研究では乱流境界層に接した隙間内部に発生する圧力変動について周波数特性, 空間的な相関特性を実験的に明らかにすることを目的とした。実験は大型低雑音回流水槽において, 運動量厚さを代表寸法としたレイノルズ数 $Re_\theta = 3 \times 10^4 \sim 1.25 \times 10^5$ の範囲で実施した。

2. 実験装置および方法

実験は, 防衛省技術研究本部艦艇装備研究所の大型低雑音回流水槽⁽⁶⁾(フローノイズシミュレータ, 以下

* 原稿受付 2009年4月17日。

^{*1} 正員, 防衛省技術研究本部 艦艇装備研究所(〒153-0061 東京都目黒区中目黒2-2-1)。^{*2} 防衛省技術研究本部 艦艇装備研究所。
E-mail: tmori@cs.trdi.mod.go.jp

Fig. 1 Side view of the tunnel test section and stainless plate for fluctuating pressure measurement

(A-A' Cross-sectional view)

(Top view)

Fig. 2 Stainless plate attached to the top wall of the water tunnel test section for fluctuating pressure measurement (unit: mm)

FNS と略記)で実施した。FNS の計測胴寸法は縦横 2 m, 長さ 10 m であり, 計測胴における最大流速は 15 m/s, 主流乱れは 0.3% 以下, 主流速度の設定誤差は ± 0.02 m/s 以内である。また, 本実験における水温変化は, 流速 15 m/s 計測時を含め 0.2°C 以内であった。

圧力変動計測は, 計測胴入口から約 6 m 下流において, 計測胴上面に形成される乱流境界層を対象に実施した(図 1)。

図 2 に圧力変動計測用に製作された, 計測用平板の

概要を示す。計測用平板は, ステンレス製で, 300 mm $\times$ 300 mm の開口を介し, 計測胴スパン中央に設置された。平板の表面は機械加工により平滑に仕上げられており, 計測胴への設置にあたっては, 段差に留意したほか, 計測胴本体との隙間には, 平滑化のためアルミテープを貼付した。

計測用平板には, 幅 3 mm, 深さ 25 mm の隙間が, 向きを変えて 2 つ設けられており, いずれも厚さ 1 mm のスペーサにより隙間幅の変更, 隙間の平滑化ができる構造になっている。これらの隙間では圧力変換器の取り付け位置が異なり, 片方には隙間内部の側面に, もう片方には隙間から 5 mm 離れた平板表面に, 複数の圧電型圧力変換器(PCB 製, HSM 112 A 22, 受圧面直径 5.5 mm)が取り付けられている。また, 変動圧力計測用平板の取り付け方向を 90 度変えることで, 流れ方向隙間とスパン方向隙間の双方についてデータが取得可能である。圧力変換器からからの出力は, シグナルコンデショナ(PCB 482 A 22), A/D 変換器(小野測器 BS 2000)を介し, サンプル周波数 10.24 kHz, ダイナミックレンジ 24 bit で 4 チャンネル同時に取り込んだ。周波数分析はサンプル数 2 048, 120 回の集合平均より算出した。なお, 計測用平板には, 加速度ピックアップ(プリュエルケアー製 BK 4384)が取り付けられ, 隙間の有無, 隙間幅の違いにより振動レベルに有意な差がみられないことを確認している。また, 計測胴内における音響的な雑音レベル(圧力変動)は, いずれの試験条件でも計測胴壁面での圧力変動のレベルと比較し 30 dB 以上低いことを確認している。

本研究では, 圧力変動計測とともに計測位置における境界層の速度分布を計測した。流速計測は, 計測用平板取り付け位置に厚さ 120 mm のアクリル窓を設置し, 光ファイバーレーザドップラ流速計システム(DANTEC 65 X 50)を用い実施した。光源は 10 mW, 波長 633 nm の He-Ne レーザであり, プロブの焦点距離は空中で 310 mm である。計測点のコントロールボリュームの長さは 0.7 mm であり, 対象とした境界層に対し, 70~300 wall unit に相当する。信号処理にはパーストスペクトラムアナライザ(DANTEC, BSA-F 60)を使用した。各計測点での流速は 1 000 サンプルの平均値とし, アクリル窓の光学的精度を含めた計測の不確かさは, $\pm 1\%$ 以下である。

さらに本研究では, スパン方向隙間とキャビティの違いを明らかにするため, 艦艇装備研究所の小型回流水槽(FNS と管路形状が相似, 計測胴断面 233 mm $\times$

233 mm)を用い、開口長さを変位させた予備実験を行った。開口寸法は、深さ $D=40$ mm、スパン方向幅 $W=233$ mm であり、開口長さ L は 0 mm (平滑面)～160 mm ($L/D=4$) の間で調節可能である。開口の後端面および主流に接する表面には、FNS での実験で使用されたものと同じ圧電型圧力変換器が取付けられている。開口入口の境界層は、発達した乱流境界層であり、運動量厚さ θ を代表寸法としたレイノルズ数は、8 300 (主流速度 5 m/s) である。小型回流水槽での実験装置の詳細、キャビティの場合の圧力変動等の詳細については別報⁽⁷⁾で報告している。

3. 実験結果

3・1 隙間とキャビティの比較 隙間、キャビティ、平滑面の圧力変動特性の特徴を明らかにするため、それぞれの周波数特性を比較した結果を図 3 に示す。本結果のみ、小型回流水槽で得られた結果であり、既存の研究⁽³⁾⁽⁵⁾との比較のため、代表寸法は運動量厚さ θ としている。また、周波数、圧力変動レベルを主流速度 U_0 、主流の動圧 q で無次元化している。キャビティ ($L/D=1$, $D=40$ mm) では、平滑面と比較して圧力変動レベルが大幅に増加するが、隙間 ($L/D=0.1$) の場合は、平滑面の場合よりも変動レベルは低下する。キャビティの結果では、 $f\theta/U_0=0.018$ 付近に卓越周波数が認められる。線形安定性理論より、この卓越周波数はせん断層の不安定性に起因するものと考えられ⁽³⁾、既存の研究⁽⁵⁾とほぼ一致する。隙間における結果では、 $f\theta/U_0=0.016$ 付近に電気ノイズ (=50 Hz) による卓越周波数が認められるが、キャビティの場合に現れる、明瞭なスペクトルの盛り上がりは見出されない。

3・2 境界層速度分布 図 4 に、FNS での実験における隙間入口境界層の速度分布を示す。主流速度は境界層外縁で定義し、壁面からの距離 y 、流速 u は、摩擦速度 u_τ で無次元化している。いずれの流速においても、Spalding の式⁽⁸⁾と良く一致し、きわめて一般的な速度分布を呈している。表 1 に、本実験での各設定流速における境界層特性値を示す。

3・3 平板表面での圧力変動特性 図 5 に、隙間がない場合に得られた、圧力変動の周波数特性を示す。以下の結果では、周波数、圧力変動レベル共に、排除厚さ δ^* 、主流速度 U_0 、主流の動圧 q で無次元化している。いずれの流速の結果も、 $\omega\delta^*/U_0 < 5$ (ω : 振動角速度) において、Willmarth and Wooldridge⁽¹¹⁾の結果 ($d/\delta^*=0.33$, d : 受圧面直径) とよい一致を示している。本実験では、Willmarth and Wooldridge と

Table 1 Boundary layer parameters

U_0 (m/s)	δ^* (mm)	θ (mm)	Re_θ	d/δ^*
3	13	10.3	31,000	0.42
5	12.6	10.2	50,000	0.44
8	11.5	9.2	73,000	0.48
15	10.5	8.4	125,000	0.52

Fig. 3 Pressure spectra measured for a slot, smooth surface (TBL) and cavity. The results were measured in a small water tunnel ($U_0=5$ m/s, $Re_\theta=8\,300$, $L/D=0.1$ for the slot and $L/D=1$ for the cavity)

Fig. 4 Velocity profile of the turbulent boundary layer at the location of fluctuating pressure measurement

比較し d/δ^* が大きいため、圧力変換器の寸法影響による計測値の低下が、若干低い周波数 ($\omega\delta^*/U_0=6$ 付近) から現れている。一般に周波数が増加し、圧力変動の波長が圧力変換器直径と同程度以下に短くなると、圧力変換器受圧面で変動が打ち消し合い、計測値

Fig. 5 Dimensionless smooth wall pressure spectra for various free stream velocities

Fig. 6 Normalized streamwise cross-spectral density of wall pressure fluctuation for smooth wall

は実際より低下する。一般に、 $\omega \delta^+ / U_0 < 1.2$ では、圧力変換器の寸法影響は小さいとされており⁽³⁾、本実験では、流速 3 m/s で $\omega \delta^+ / U_0 = 2.88$ (約 100 Hz)、流速 15 m/s で $\omega \delta^+ / U_0 = 2.3$ (同 520 Hz) 以下がその周波数域に担当する。

図 6 および図 7 は、流れ方向、スパン方向にそれぞれ L_x , L_z 離れた 2 点間圧力変動のクロススペクトル密度をパワースペクトル密度 $p(\omega)$ で正規化したものである。正規化されたクロススペクトル密度は、2 点間圧力変動について、周波数ごとの相関の程度を示す。図は、既存の研究⁽²⁾ にならい、周波数は 2 点間の距離 L_x , L_z と変動の位相速度 U_c で無次元化している。本結果は、流れ方向、スパン方向ともに、2 点間距離、主流速度によらず同一の傾向を示し、無次元周波数の増加とともに相関は指数関数的に減少する。スパン方向の相関の低下は、流れ方向よりも急激である。これらの様相は、より低いレイノルズ数で得られた既存の結果⁽²⁾⁽³⁾ と、ほぼ一致する。

Fig. 7 Normalized spanwise cross-spectral density of wall pressure fluctuation for smooth wall

3・4 隙間内部での圧力変動特性 図 8 に、各隙間内部の側面における圧力変動のパワースペクトルを、平板表面での結果と比較して示す。主流速度は流速 8 m/s、パワースペクトル、周波数は図 5 と同様に無次元化した。

スパン方向隙間内部での結果は、幅 $b=1$ mm, 3 mm とともに同様な傾向である。いずれの結果も、平板表面での計測値と比較し変動レベルの顕著な増加は見られず、明瞭な卓越周波数も見出されない。 $\omega \delta^+ / U_0 < 8$ の低周波数帯域では、レベルは 4~6 dB 低いものの、平板表面の圧力変動と同一の周波数特性を有する。しかしながら、 $\omega \delta^+ / U_0 > 8$ では、平板表面上の場合よりも計測値が高くなり、周波数特性に明瞭な違いが現れる。これは、隙間内圧力変換器の場合、受圧面が主流方向と垂直な側面上にあるため、平板表面に設置された圧力変換器と比較し、圧力変換器直径の影響が現れにくいためである。しかしながら、 $b=3$ mm の結果では、 $\omega \delta^+ / U_0 > 14$ の高周波数領域で計測値の顕著な低下が見られる。これは、周波数の増加に伴い、圧力変動の波長が隙間の開口幅以下になり、圧力変換器の直径と同様に、隙間幅がローパスフィルターとして作用したためと推察される。圧力変動の位相速度を $0.6 U_0$ と仮定すると、圧力変動の波長が隙間幅 ($b=3$ mm) よりも短くなる周波数域 ($f > 0.6 U_0 / b$) は $\omega \delta^+ / U_0 > 14$ に対応し、図 8 の結果と一致する。一方、流れ方向隙間内の圧力変動は、低周波数域で変動レベルが顕著に増加する傾向がみられ、 $\omega \delta^+ / U_0 = 0.3$ 付近でピークを示し、周波数の増加とともに急激に減衰する。流れ方向隙間は、スパン方向幅が極めて小さいキャビティ (長さ 135 mm, 深さ 25 mm, 幅 1 mm) と考えられ、内部に発生した循環流が低周波数域の圧力変動を増加させている可能性がある。今後、隙間形状の

Fig. 8 Dimensionless power spectra of pressure fluctuation measured at the inside of the slots of various width and direction ($U_0=8$ m/s)

Fig. 9 Dimensionless wall pressure power spectra obtained at various locations around the 1 mm width spanwise slot

影響等について、より詳細な研究が必要である。

図9は、 $b=1$ mmのスパン方向隙間の周囲で計測された圧力変動のパワースペクトルの比較である。計測は、5 mm下流の平板表面上、および隙間上流側側面と下流側側面で実施し、比較のため隙間がない場合の平板表面上での結果を示している。これらの計測は、計測用平板の向きを必要に応じ反転させて実施した。スパン方向隙間が下流の平板表面圧力変動に影響を及ぼす範囲は狭く、5 mm下流の平板表面上の圧力変動には、隙間がない場合と有意な差異が認められない。隙間の上流側、下流側壁面の圧力変動を比較すると、低周波数域で、上流側側面の変動レベルが下流側よりも若干高いが、全般に差は小さい。

図10, 11は、 $b=1$ mmの隙間内で計測された圧力変動のパワースペクトルの流速依存性である。スパン方向、流れ方向隙間ともに、流速によらず図5と同様

Fig. 10 Dimensionless power spectra of pressure fluctuations at the inside of the 1 mm width slot for various velocities

Fig. 11 Dimensionless power spectra of pressure fluctuations at the inside of the 1 mm width streamwise slot for various velocities

の無次元化で整理できる。

3.5 スパン方向隙間での相関特性 以下では、スパン方向隙間内で計測された圧力変動のスパン方向の相関を、平滑面の場合と同様に、正規化されたクロススペクトル密度を用いて評価する。

図12は、幅 $b=1$ mm, 3 mmの隙間内圧力変動に対して得られた、正規化されたクロススペクトル密度である。 $b=1$ mm, 3 mmいずれの場合も、圧力変動のスパン方向の相関は、乱流境界層の場合と比較してはるかに強く、かつ広い周波数範囲で有意な相関が認められる。正規化されたクロススペクトル密度は、2点間の距離(L_x)が同じであれば、流速による違いは小さく、ほぼ同一の傾向を示す。乱流境界層に接する表面圧力変動では、クロススペクトル密度は、 L_x によ

Fig. 12 Normalized cross-spectral density of pressure fluctuations at the inside of spanwise slots

らず同一の傾向を示したのに対し、隙間内圧力変動では傾向が異なり、 $L_z=36$ mmでの減衰傾向は、 $L_z=18$ mmと比較して著しい。図12の結果は、スパン方向隙間内部の圧力変動が、乱流境界層に接する表面での圧力変動、あるいはキャビティ後端面での圧力変動⁽⁷⁾と比較し、広い周波数範囲でスパン方向に高い相関をもっている事を示唆している。本実験結果のみでは、隙間内部で強い相関を有する圧力変動が発生する機構は明らかではないが、理論的な考察や、隙間壁面の材料を変えた実験など、さらなる研究が必要と考えられる。

図13に、 $b=1$ mmの隙間において計測された、スパン方向に離れた2点間の圧力変動の位相差を示す。 $L_z=18$ mm, 36 mmともに位相差は小さく、隙間内で圧力変動の位相は揃っている。図12および図13の結果は、スパン方向隙間の内部の圧力変動が、スパン方向に強い相関をもち、かつ同位相で変動することを示しており、構造振動発生観点から、より詳細な研究が必要と考えられる。

Fig. 13 Variations of phase angle of pressure fluctuation with spanwise distance ($b=1$ mm)

4. 結 言

乱流境界層に接する隙間内の圧力変動について、周波数特性、相関特性を実験的に解明した。実験は大型回流水槽を用い、レイノルズ数 $Re_\theta=3 \times 10^4 \sim 10^5$ において実施した。主な知見は以下のとおりである。

(1) スパン方向隙間内部には、乱流境界層と同様な周波数特性を有する圧力変動が発生する。圧力変動のレベルは、乱流境界層の場合と比較し4~6 dB低い。

(2) 流れ方向隙間内部における圧力変動は、低周波数域で大きく増加し、周波数の増加とともに急激に減少する。

(3) スパン方向隙間、流れ方向隙間ともに、圧力変動のパワースペクトルは、乱流境界層の場合と同様な無次元化で整理できる。

(4) スパン方向隙間内部の圧力変動は、乱流境界層に接する表面での圧力変動と比較し、スパン方向に強い相関を有する。

文 献

- (1) Willmarth, W. W. and Wooldridge, C. E., "Measurement of the fluctuating pressure at the wall beneath a thick boundary layer", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 14 (1962), pp. 187-210.
- (2) Bull, M. K., "Wall-pressure fluctuations associated with subsonic turbulent boundary layer flow", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 28 (1967), pp. 719-754.
- (3) Blake, W. K., "*Mechanics of Flow-Induced Sound and Vibration*", Vol. 1 and Vol. 2 (1986), Academic Press.
- (4) Keith, W. L. and Bennet, J. C., "Low-frequency spectra of the wall shear stress and wall pressure in a turbulent boundary layer", *AIAA Journal*, Vol. 29, No. 4 (1991), pp. 526-530.
- (5) Lin, J. C. and Rockwell, D., "Organized Oscillations of Initially Turbulent Flow past a Cavity", *AIAA Journal*, Vol. 39, No. 6 (2001), pp. 1139-1151.
- (6) Mori, T., Naganuma, K., Yakushiji, R., Kimoto, R. and Nagaya, S., "Hydrodynamic and hydroacoustic characteristics of the Flow Noise Simulator", *Proceedings of the 5th ASME-JSME Fluids Engineering Conference*, (2007), San Diego, USA.
- (7) Mori, T. and Naganuma, K., "Experimental investigation of the three-dimensional nature of turbulent flow over a rectangular cavity", *Journal of Fluid Science and Technology*, Vol. 4, No. 3 (2009), pp. 746-757.
- (8) Spalding, D. B., "A Single Formula for the Law of the Wall", *Transactions of the ASME, Journal of Basic Engineering*, Vol. 23 (1961), pp. 405-408.