

## S 字形状曲り管内における排気脈動流に対する管路形状の影響 Effect of Duct Geometries on Pulsating Exhaust Flow in S-shaped Ducts

- 大木 純一, 広大院, 広島県東広島市鏡山 1-4-1, E-mail: m142031@hiroshima-u.ac.jp  
池口 雅文, 広大院, 広島県東広島市鏡山 1-4-1, E-mail: m153470@hiroshima-u.ac.jp  
尾形 陽一, 広島大, 広島県東広島市鏡山 1-4-1, E-mail: yogata@hiroshima-u.ac.jp  
西田 恵哉, 広島大, 広島県東広島市鏡山 1-4-1, E-mail: nishida@mec.hiroshima-u.ac.jp  
山本 亮, マツダ, 広島県安芸郡府中町新地 3-1, E-mail: yamamoto.ryo1@mazda.co.jp.jp  
中村 和博, マツダ, 広島県安芸郡府中町新地 3-1, E-mail: nakamura.kazu@mazda.co.jp.jp  
柳田 春菜, マツダ, 広島県安芸郡府中町新地 3-1, E-mail: fujii.ha@mazda.co.jp.jp  
横畑 英明, マツダ, 広島県安芸郡府中町新地 3-1, E-mail: yokohata.h@mazda.co.jp.jp  
Junichi OKI, Hiroshima University, Kagamiyama 1-4-1, Higashi-Hiroshima  
Masafumi IKEGUCHI, Hiroshima University, Kagamiyama 1-4-1, Higashi-Hiroshima  
Yoichi OGATA, Hiroshima University, Kagamiyama 1-4-1, Higashi-Hiroshima  
Keiya NICHIDA, Hiroshima University, Kagamiyama 1-4-1, Higashi-Hiroshima  
Ryo YAMAMOTO, Mazda, 3-1 Shinchi, Fuchu-cho, Aki-gun, Hiroshima  
Kazuhiro NAKAMURA, Mazda, 3-1 Shinchi, Fuchu-cho, Aki-gun, Hiroshima  
Haruna YANAGIDA, Mazda, 3-1 Shinchi, Fuchu-cho, Aki-gun, Hiroshima  
Hideaki YOKOHATA, Mazda, 3-1 Shinchi, Fuchu-cho, Aki-gun, Hiroshima

The present study is concerned with experimental and numerical investigation of pulsating exhaust flow from an automotive engine. In our experiments, exhaust flow is generated in two S-shaped ducts, which consist of two bends and straight parts, and PIV is employed to measure streamwise velocity fields at first and second bends. Numerical simulations are performed with RNG k- $\epsilon$  model. It is shown that the secondary flow consists of a pair of counter-rotating vortices at the first bend outlet, and that the complex vortical structure appears at the second bend outlet. We found that the straight part between two bends strongly affects the flow field after the second bend. Mechanism of secondary flow formation is discussed by introducing radial directional force  $F_r$ , which acts on fluid in a bend.

### 1. 緒言

自動車エンジンの排気管内に生じる脈動流の挙動は、触媒の活性や劣化および空燃比の制御などといった機能に影響を与える。また、曲り管内流れは基本的な流れの一つであり、工学的な分野で広く応用されていることから、多数の実験的、数値解析的研究が報告されている。

例えば、90°曲り管内の乱流に関しては、管路断面内の速度ベクトルを熱線流速計や Particle Image Velocimetry (PIV) を用いて計測した例がある<sup>(1),(2)</sup>。層流かつ脈動条件下では、90°曲り管内に生じる二次流れの強さと脈動の振動数との関連性が実験および数値解析によって調査されている<sup>(3)</sup>。また、正方形断面を有する曲り管内の層流脈動流を対象とした数値解析的研究<sup>(4)</sup>では、主流方向速度分布や渦構造、ならびに壁面せん断応力について検討している。2つの曲りを有する S 字形状管路内の定常流に関しては、実験<sup>(5),(6)</sup>のおよび数値解析<sup>(8)</sup>による研究がなされており、これらは下流側に位置する第2の曲り通過後の二次流れ構造などを調べている。また、自動車エンジンの吸排気流れに焦点を当てた研究としては、触媒コンバータ通過後の主流方向速度に関する研究<sup>(9),(10),(11)</sup>が多く、曲りによって生じる二次流れまで検討した研究<sup>(12)</sup>は少ない。

本研究では、自動車エンジンの排気系を模した S 字形状の曲り管路において、実機エンジンからの排気流れを対象に、PIV を用いた速度場計測を行う。また、Computational Fluid Dynamics (CFD) による数値解析を行うことで、曲りによって生じる渦構造について検討し、その生成メカニズムを明らかにする。

### 2. 実験装置と方法

実験装置の概略を図1に、解析対象とした管路形状を図2に示す。2つの曲り(第1, 第2曲り)と直管路で構成される正方形断面を有する S 字形状管路内に、4気筒ガソリンエンジンからの脈動排気が供給される。エンジンは燃料の噴射、および着火を行わず、インバータモータによって駆動されるので常温の排気が発生する。PIV を用いて曲りにおける主流方向速度場を計測し、計測断面は管軸に水平かつ、管路断面の中央に位置している。トレーサー粒子には酸化マグネシウム (MgO) 粉末を用いた。Nd:YAG レーザー (Solo 120XT, New Wave Research) の照射と CCD カメラ (PCO.1600, PCO AG) による撮影のトリガーとしてエンジン第1気筒の点火信号を用いることで、エンジンの運転と PIV 計測の同期を実現している。また、管路入口付近における速度を熱線流速計 (0251R-T5, KANOMAX) により測定し、さらに Q-スイッチ信号と同時計測することで、PIV の計測タイミングを調整した。図5 (熱線流速計による測定結果) に示すように、管路内の速度は脈動するが、本論では速度が最大の時刻における結果を示す。なお、エンジンの回転数は 1500 rpm とした。

図2に示すように、Test-section 1, Test-section 2 と呼称される2種類の管路形状を用い、それぞれ異なる長さの直管部を有する。本論では、2つの曲り間に位置する直管部が第2曲り後の流れ場を与える影響を検討する。

ここで、 $t$  : 時間,  $x_i$  : デカルト座標系,  $\rho$  : 密度,  $u_i$  :  $x_i$  方向の速度,  $P$  : 圧力,  $e$  : 比内部エネルギー,  $K$  : 熱伝導係数,  $T$  : 温度である。また、 $\sigma_{ij}$  は応力テンソルであり、粘性係数  $\mu$  とクロネッカーのデルタ  $\delta_{ij}$  を用いて次式で表される。

$$\sigma_{ij} = \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) \quad (4)$$

図 4 は数値解析で使用した管路形状である。前述の実験を再現するために S 字形管路 (黄) に加えて、下流側に設置された排気管 (赤), および排出ダクト (水色) を計算領域としている。管路入口における速度の境界条件には熱線流速計による計測結果 (図 5) を用い、入口温度は 300 K とした。排気ダクト出口の境界条件として 0.1 MPa の圧力値を与えた。乱流モデルとして RNG k- $\epsilon$  を採用し、壁面境界では速度の壁法則を適用した。また、管路壁面は断熱であると仮定した。

本計算における Reynolds 数 ( $Re = U_{max} \cdot D_h / \nu$ ) は、Test-section 1 で  $Re = 67400$ , Test-section 2 で  $Re = 65200$  である。なお、 $U_{max}$  は脈動速度の最大値,  $D_h$  は水力直径 (32 mm),  $\nu$  は動粘性係数である。また、脈動の無次元振動数を表す Womersley 数 ( $\alpha = (D_h/2) \cdot (\omega/\nu)^{0.5}$ ) は、 $\alpha = 70.9$  であり、 $\omega$  はエンジン回転数に基づく角振動数とした。

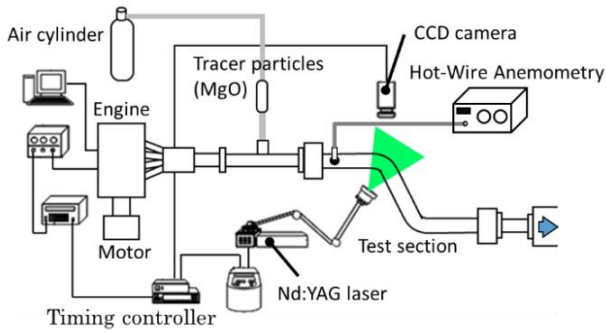
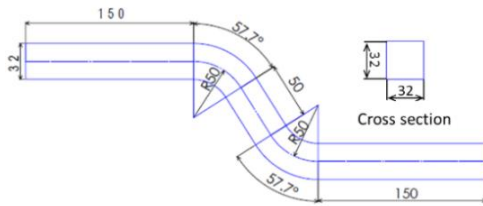
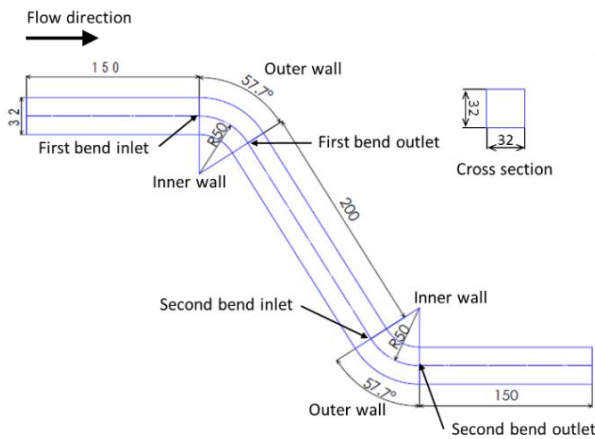


Fig. 1 Schematic of the flow rig and set-up for the experiments (PIV and Hot-Wire Anemometry).



(a) Test-section 1



(b) Test-section 2

Fig. 2 Drawings of two S-shaped ducts for test sections. All lengths shown in the figure are in mm.

### 3. 数値解析

数値解析には、Convergent Science, Inc. で開発された汎用 CFD コード CONVERGE を使用した。図 3 に示すように、CONVERGE では直交格子が生成され、境界における格子はカットセル法に基づき配置される。本計算での格子幅は 1 mm とした。式(1)~(3)に示す圧縮性流体の基礎方程式はコロケート格子系の有限体積法で離散化され、圧力と速度の連成解法には PISO 法が用いられる。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho e}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j e}{\partial x_j} = -P \frac{\partial u_j}{\partial x_j} + \sigma_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( K \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \quad (3)$$

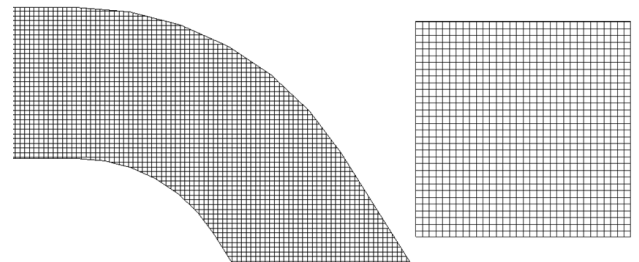
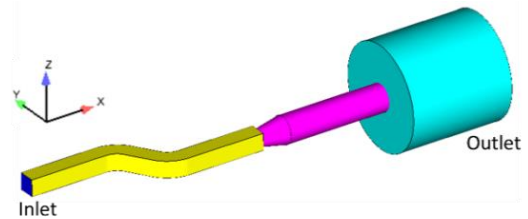
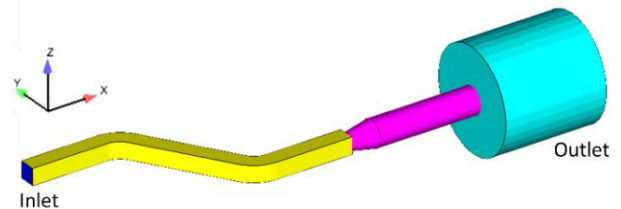


Fig. 3 Computational grid of first bend on the left and the cross section on the right.



(a) Test-section 1



(b) Test-section 2

Fig. 4 Ducts geometries for the numerical simulations.

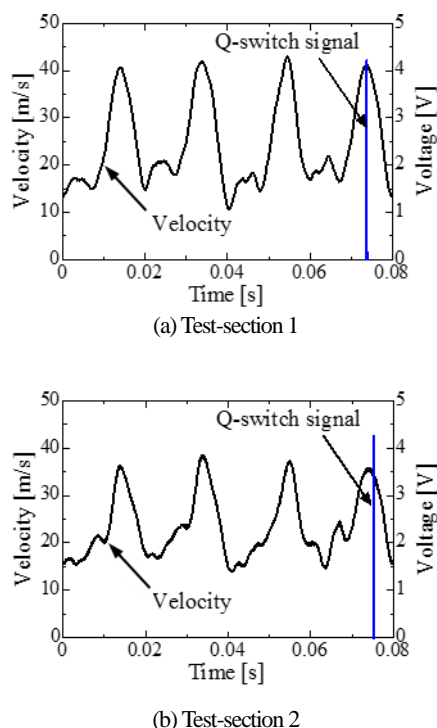


Fig. 5 Velocity histories measured by hot-wire and Q-switch signals of the PIV laser.

#### 4. 結果と考察

##### 4. 1 主流方向速度

Test-section 1 について PIV で得られた速度場を図 6 に示す。曲りの内壁側では低圧な領域が形成され、それにより生じる主流方向の圧力勾配によって流体が加速される<sup>(1)</sup>ため、第 1, 第 2 曲りともに内壁側に高速域が観察される。図 7 は Test-section 2 における PIV 計測結果である。図 7(a) から分かるように、第 1 曲り後の直管部では、曲り内壁側の高速域が外壁側にわずかに移動する傾向が認められ、図 7(b) の第 2 曲り前では図 6(b) の Test-section 1 と比較して、より偏った速度分布を示している。これは第 1 曲りで生成される二次流れに起因すると解釈される；二次流れの詳細は次節に示す。また、第 2 曲り後の直管部における速度分布の挙動は第 1 曲りと異なり、高速域の移動が観察されない。この傾向は図 6(b) の Test-section 1 においても認められる。

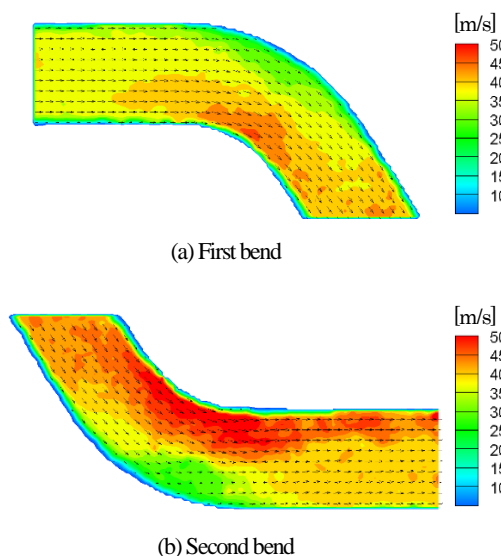


Fig. 6 Experimental results of streamwise velocity fields for Test-section 2.

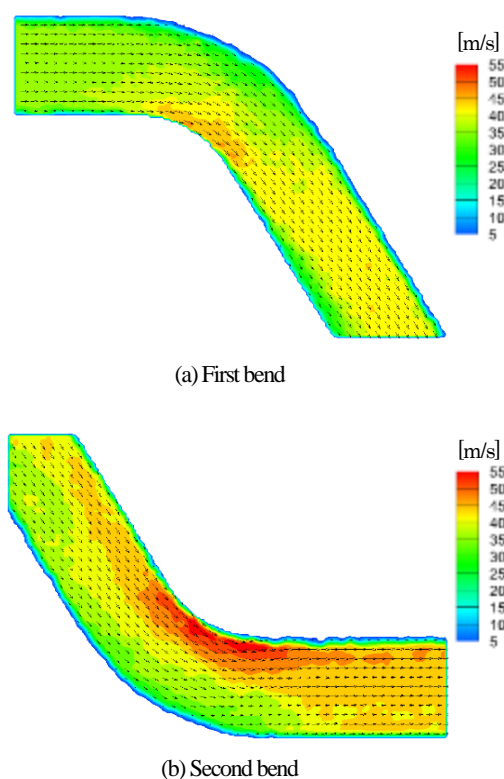


Fig. 7 Experimental results of streamwise velocity fields for Test-section 2.

図 8, 9 にそれぞれ Test-section 1, 2 の CFD による計算結果を示す。CFD は PIV で得られた図 6, 7 の速度場の特徴を比較的良好的に再現していることが分かる。ここで、図 10 に示す第 1, 第 2 曲り部の壁面垂直方向軸上における主流方向速度について、PIV 計測結果と CFD 計算結果を比較した Test-section 1, 2 のグラフをそれぞれ図 11, 12 に示す。CFD は壁面近傍以外で PIV と比較的良好的な一致を示すが、壁面近傍では高く見積もっている。この原因として次の 2 つが考えられる。第 1 に、PIV 計測時に管路壁面でレーザー光が乱反射することで壁面付近での粒子像撮影が困難となり、十分な計測精度が得られないことが挙げられる。第 2 に、本計算の壁面境界条件として、 $k-\epsilon$  モデルと併用される速度の壁法則を適用したことが挙げられ、壁面近傍の速度計測、ならびに壁面近傍の格子幅も含めてさらなる検証が必要である。

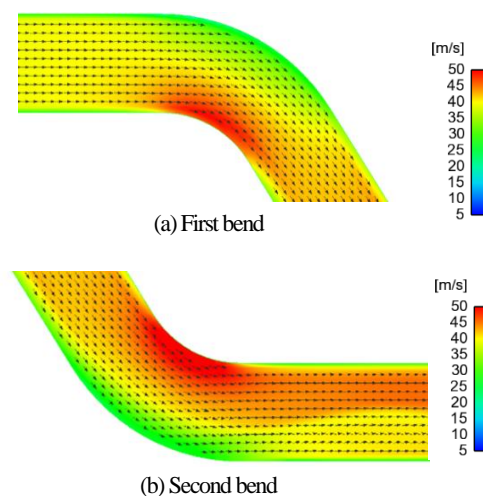


Fig. 8 Numerical results of streamwise velocity fields for Test-section 1.

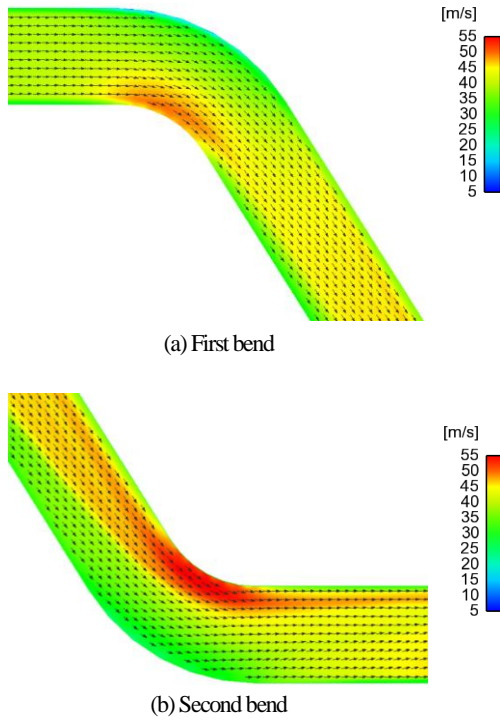


Fig. 9 Numerical results of streamwise velocity fields for Test-section 2.

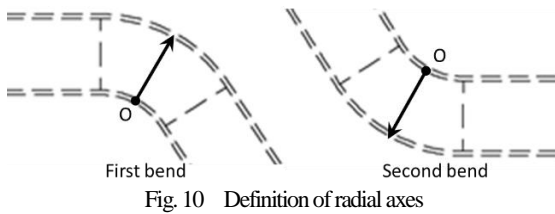


Fig. 10 Definition of radial axes

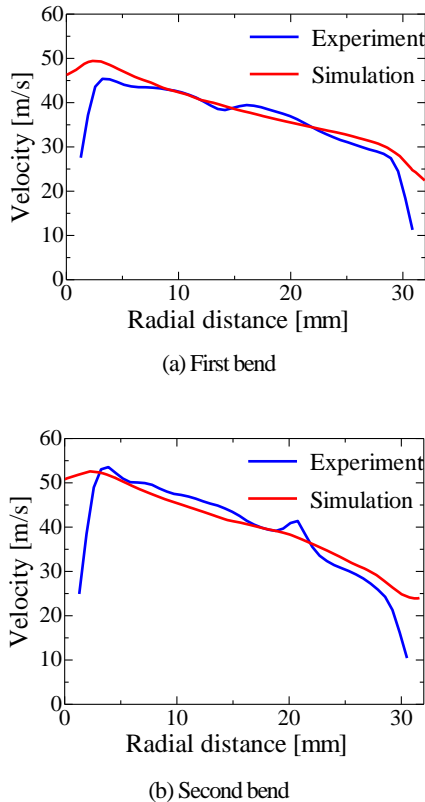


Fig. 11 Velocity profiles along radial axis for Test-section 1.

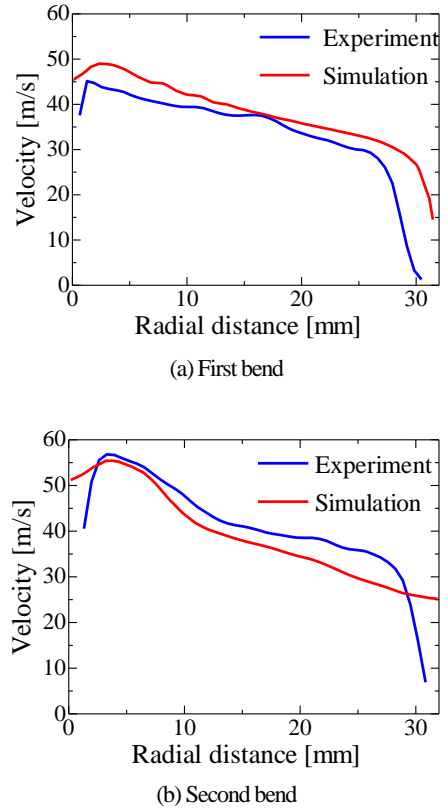


Fig. 12 Velocity profiles along radial axis for Test-section 2.

#### 4. 2 3次元渦構造と二次流れ

曲りによって生じる渦構造を同定するために、速度勾配テンソルの第2不変量を用いる。第2不変量  $Q$  は速度勾配テンソルの対称成分であるひずみ速度テンソル  $S_{ij}$ 、非対称成分の  $\Omega_{ij}$  を用いて次式で表される。

$$Q = \frac{1}{2}(\Omega_{ij}\Omega_{ij} - S_{ij}S_{ij}) \quad (5)$$

図 13, 14 はそれぞれ Test-section 1, 2 の計算結果における  $Q = 1.0 \times 10^5 [1/s^2]$  の等値面を示しており、管内の3次元渦構造が確認される。両形状とも第1曲りの内壁側で発生した2本の渦管が直管部を通じて第2曲りまで到達し、第2曲り通過後はより多数の渦管が現れる。また、第2曲り後の等値面の様相は、直管部が長い Test-section 2 (図 14) の方が密に分布している。

次に、管路断面内の速度と渦度場を用いて渦構造の詳細な特徴を述べる。図 15, 16 は、各形状に対して面内速度(二次流れ)をベクトルで、渦度ベクトルの断面に直交する成分をカラーコンターで表している。渦度ベクトル  $\omega$  は速度ベクトル  $\mathbf{u} = (u, v, w)$  を用いて次式で定義される。

$$\omega = \text{rot } \mathbf{u} = \left( \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z}, \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (6)$$

図中で使用した断面は各曲りの入口、および出口に位置する(図 2 参照)。図 15(a)から分かるように、Test-section 1 の第1曲り入口では、曲り外壁から内壁へ向かう流れが断面の全域を占める。前述の通り、曲りの内壁側では低圧な領域が形成されるため(外壁側では高圧)、曲率半径方向の圧力勾配によって曲り入口付近の流体は外壁から内壁へ加速される。曲り内部では、圧力勾配による力とは逆向きの遠心力が流体に作用するので、図 15(b)に示す第1

曲り出口では、内壁から外壁へ向かう流れが断面の広範囲を占める。上下の壁面近傍では圧力勾配方向の流れが存在するため、一対の循環流が形成され、壁面近くで渦度の絶対値が大きくなる。図 15(c)の第 2 曲り入口では、第 1 曲り入口と同様に圧力勾配方向の外壁から内壁に向かう流れが誘起される。しかし、図 15(d)に示す第 2 曲り出口の二次流れは第 1 曲り出口とは様相が異なり、上下の壁面付近の渦に加えて外壁側に一対の渦が形成される。これは、断面の中央付近にも関わらず圧力勾配方向の外壁から離れる流れが一部残留していることに起因する。この特徴的な二次流れは、定常条件における S 字形管路を用いた実験<sup>7)</sup>でも確認されていることから、管路形状が主因で現れる現象であると解釈される。

Test-section 2 (図 16) についても各断面でほぼ同様の二次流れが観察されるが、図 16(d)に示す第 2 曲り出口では、断面中央部に存在する外壁から離れる流れを占める領域が Test-section 1 より大きい。したがって、第 2 曲り出口に特有の一対の渦は、Test-section 1 より強くなっていることが分かる。

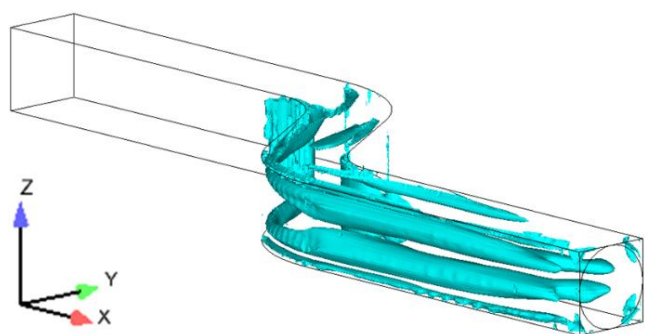


Fig. 13 Isosurface of second invariant ( $Q = 1.0 \times 10^5$  [1/s<sup>2</sup>]) for Test-section 1.

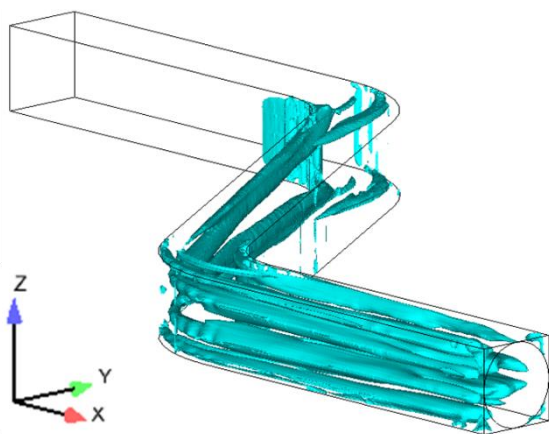
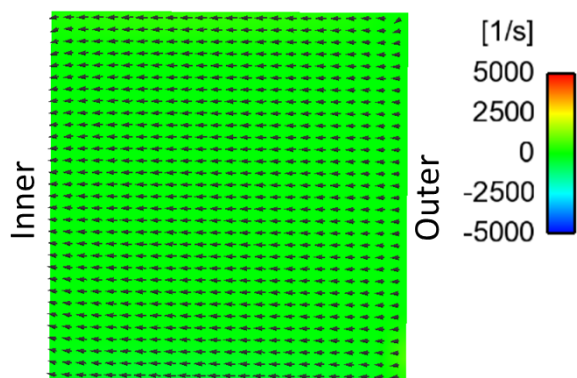
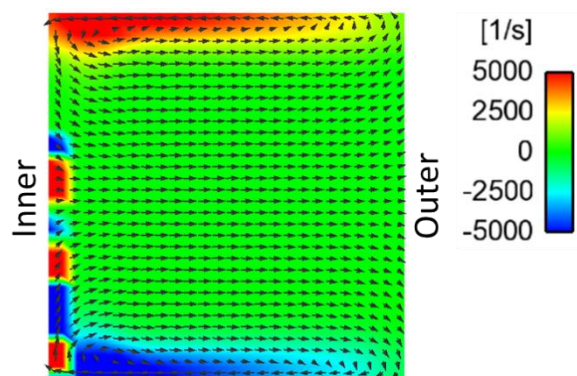


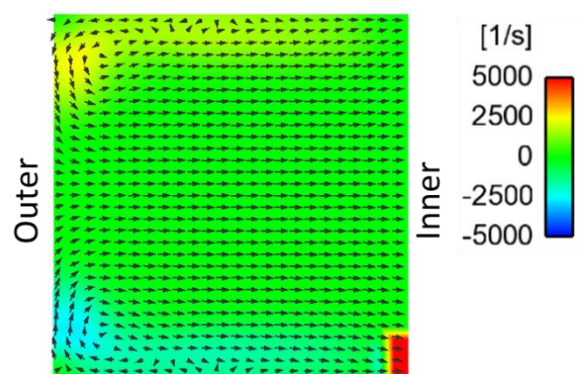
Fig. 14 Isosurface of second invariant ( $Q = 1.0 \times 10^5$  [1/s<sup>2</sup>]) for Test-section 2.



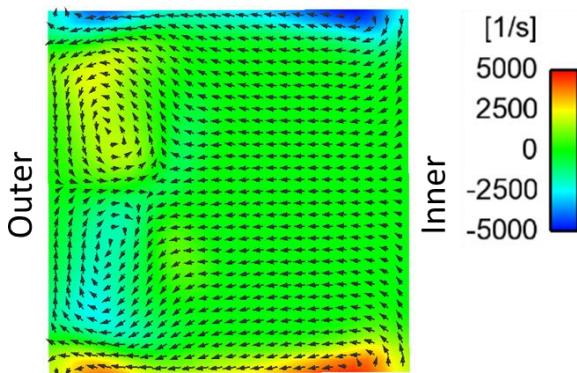
(a) First bend inlet



(b) First bend outlet



(c) Second bend inlet



(d) Second bend outlet

Fig. 15 Numerical results of in-plane velocities and vorticity contours for Test-section 1.

4. 3 圧力勾配と遠心力

本節では二次流れの直接的な発生要因である曲率半径方向の圧力勾配と遠心力を検証する。曲りにおいて流体に作用する力（単位質量あたり）は次式で見積もられる。

$$F_r = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} + \frac{U^2}{r} \quad (7)$$

ここで、 $\rho$ は密度、 $P$ は圧力、 $r$ は曲率中心からの距離、 $U$ は主流方向速度である。上式右辺第1項は曲率半径方向の圧力勾配、第2項は遠心力を表す。 $F_r$ の値が大きいほど、流体が内壁から外壁へ加速されることを意味している。図17に示すように、曲り入口断面内の中心に位置する $r_A$ 軸と中心から離れた $r_B$ 軸を定義し、各軸上における $F_r$ 値をプロットすると図18、19のようなグラフになる。図18に示す第1曲りでは、両形状とも $F_r$ は正の値であり、軸の位置違いによる差は見られない。したがって、第1曲り入口の外壁から内壁へ向かう流れは $F_r$ によって逆転され、図15(b)、16(b)のような様相を呈す。図19(a)に示すTest-section 1の第2曲りについては、軸の位置違いによる $F_r$ 値の差は小さいが、図19(b)に示すTest-section 2の第2曲りでは、断面中央に位置する $r_A$ 軸上の $F_r$ が $r_B$ 軸上よりも小さくなっている。断面内で相対的に小さい $F_r$ は流れを逆転させるに至らず、図16(d)のように外壁から離れる流れが残留する。

ここで、図20に直管部における管路断面の主流方向速度分布を示す。両形状とも、第1曲りによって一対の渦を含む二次流れが誘起されることを示したが、下流に向かうにつれて高速域が二次流れに従って移動するので、第2曲り入口に位置する断面での速度分布は直管部が長いTest-section 2の方が偏っている。このことは、断面内で主流方向速度と $F_r$ が相対的に低下する領域が発生することを意味しており、第2曲り出口で複雑な渦構造を誘起する要因となる。

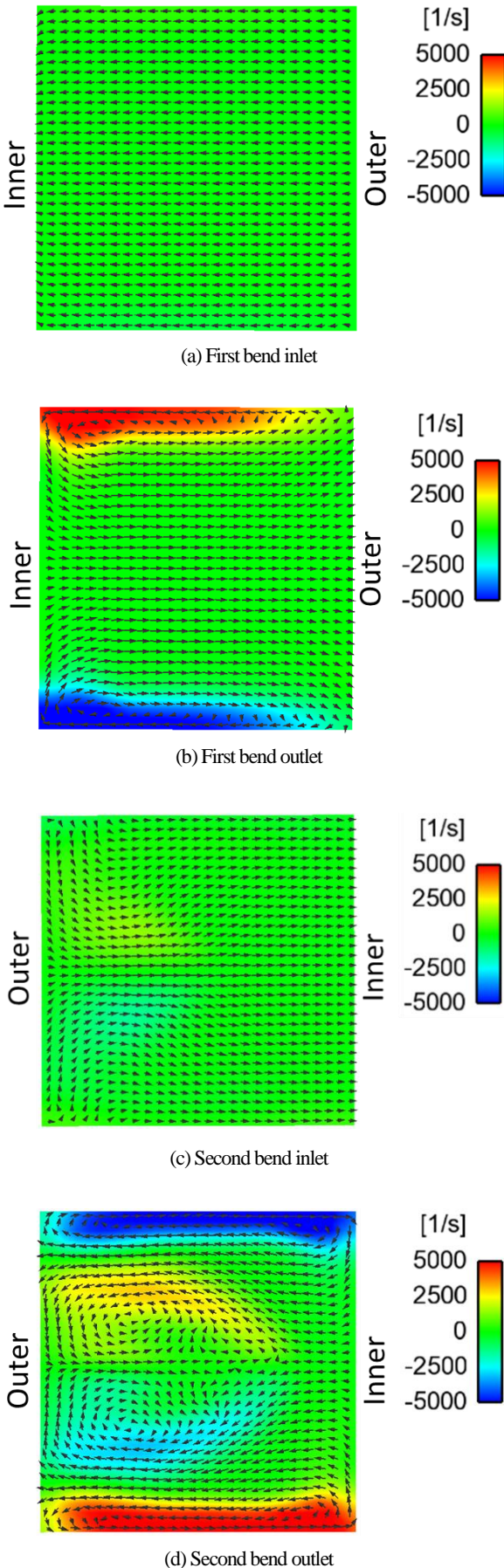


Fig. 16 Numerical results of in-plane velocities and vorticity contours for Test-section 2.

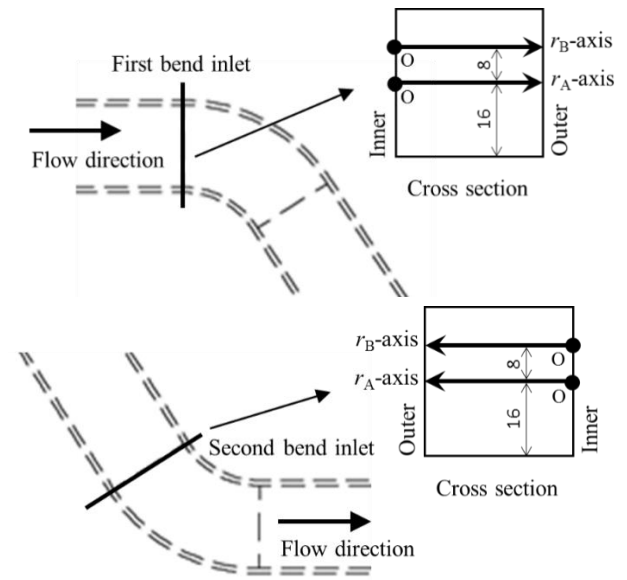
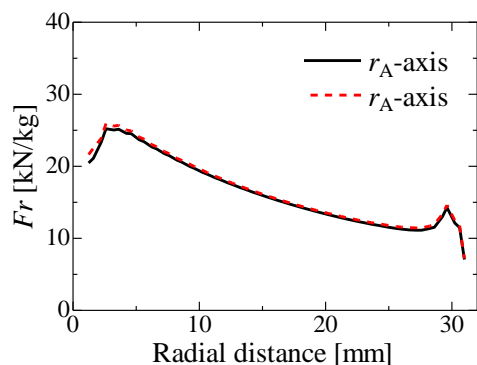
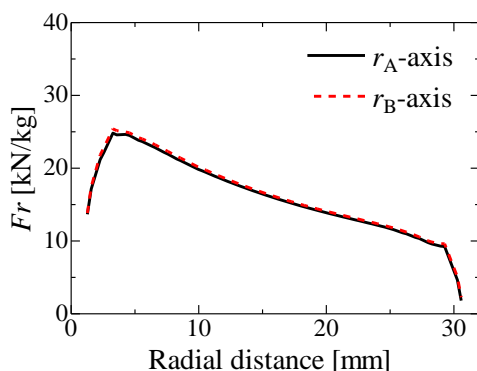


Fig. 17 Definition of  $r_A$ -axis and  $r_B$ -axis

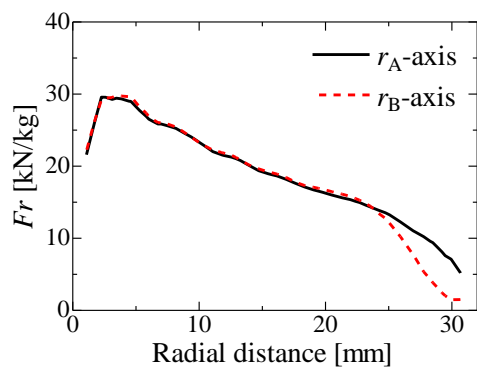


(a) Test-section 2

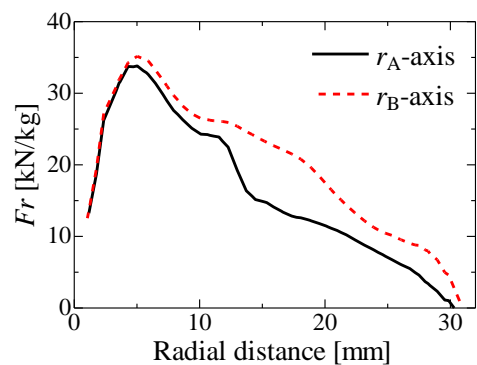


(b) Test-section 1

Fig. 18 Profiles of  $F_r$  at first bend inlets for both test sections.



(a) Test-section 1



(b) Test-section 2

Fig. 19 Profiles of  $F_r$  at second bend inlets for both test sections.

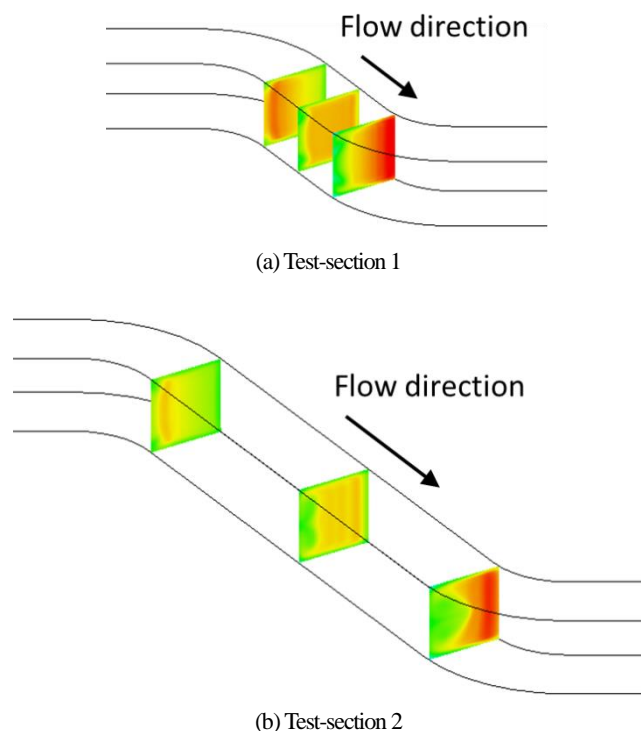


Fig. 20 Streamwise velocity distribution in the straight part.

## 5. 結言

実機エンジンを用いて、直管部長さが異なる2種類のS字形管路内の主流方向速度場をPIVにより計測した。また、数値解析を行うことで管内渦構造は示し、二次流れの挙動を検討した。本研究で得られた主な結論を以下に示す。

- (1) 主流方向の速度分布では、各曲りの内壁側に高速域が発生する。
- (2) 曲り内壁側の高速域は、第1曲り後に外壁側へ移動するが、第2曲り後はその傾向が観察されない。これは二次流れの違いによるものと解釈される。
- (3) CFD計算結果は、壁面近傍以外で主流方向速度を比較的良好に予測できる。
- (4) 第1曲り出口の二次流れでは、遠心力方向の内壁から外壁へ向かう流れが断面の大部分を占め、一対の渦が生成される。
- (5) 第2曲り出口の二次流れでは、圧力勾配方向の外壁から離れる流れが一部残留し、より複雑な渦構造が生成される。この渦は直管部が長いTest-section 2で顕著に現れる。
- (6) 第2曲り出口の複雑な渦構造は、直管部で主流方向速度分布が偏り、遠心力が相対的に小さくなる領域が発生することに起因する。このことは、曲りで流体に作用する曲率半径方向の力 $F_r$ を導入することで確認できる。

## 参考文献

- (1) Sudo, K., Sumida, M. and Hibara, H., "Experimental investigation on turbulent flow in a circular-sectioned 90-degree bend," *Experiments in Fluids*, 25, (1998), 42-49.
- (2) Sakakibara, J. and Machida, N., "Measurement of turbulent upstream and downstream of a circular pipe bend," *Physics of Fluids*, 24, (2012), 041702.
- (3) Timité, B., Castelain, C. and Peerhossaini, H., "Pulsatile viscous flow in a curved pipe: Effects of pulsation on the development of secondary flow," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 32, (2010), 879-896.

- (4) 角田勝, 須藤浩三, “く形断面曲り管内脈動流 (第 1 報, 縦横比が 1 の場合の数値解析),” 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 51, No. 469, (1985), pp. 2872-2878.
- (5) Taylor, A. M. K. P., Whitelaw, J. H. and Yianneskis, M., “Developing Flow in S-Shaped Ducts I -Square Cross-Section Duct,” NASA Contractor Report, (1982), 3550.
- (6) Ng, Y. T., Luo, S. C., Lim, T. T. and Ho, Q. W., “On swirl development in a square cross-sectioned S-shaped duct,” Experiments in Fluids, 41, (2006), 975-989.
- (7) Ng, Y. T., Luo, S. C., Lim, T. T. and Ho, Q. W., “On the relation between centrifugal force and radial pressure gradient in flow inside curved and S-shaped ducts,” Physics of Fluids, 20, (2008), 055109.
- (8) 杉山均, 秋山光庸, 村上泰隆, “正方形断面を有する S 字形状管路内乱流の平均場解析,” 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 63, No. 607, (1997), pp. 86-93.
- (9) Liu, Z., Benjamin, S. F. and Roberts, C. A., “Pulsating Flow Maldistribution within an Axisymmetric Catalytic Converter – Flow Rig Experiment and Transient CFD Simulation,” SAE TECHNICAL PAPER SERIES, (2003), 2003-01-3070.
- (10) Hwang, I., Myung, C., Park, S., In, C. and Yeo, G., “Theoretical and Experimental Flow Analysis of Exhasut Manifolds for PZEV,” SAE TECHNICAL PAPER SERIES, (2007), 2007-01-3444.
- (11) Persoons, T., Van den Bulck, E. and Hoefnagels, A., “Experimental Study of Pulsating Flow in a Close-Coupled Catalyst Manifold on a Charged Motored Engine using Oscillating Hot-Wire Anemometry,” SAE TECHNICAL PAPER SERIES, (2006), 2006-01-0623.
- (12) Kalpakli, A., Örlü, R., Tillmark, N. and Alfredsson, P. H., “Pulsatile turbulent flow through pipe bends at high Dean and Womersley numbers,” Journal of Physics: Conference Series, 318, (2011), 092023.