

令和 4 年 5 月 19 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K03931

研究課題名(和文) エンジン曲り管内高周波脈動流の熱流動特性を用いた排気系の損失低減設計

研究課題名(英文) Design for loss reduction in exhaust systems using thermal-hydraulic characteristics of high-frequency pulsating flow in engine curved pipes

研究代表者

尾形 陽一 (OGATA, Yoichi)

広島大学・先進理工系科学研究科(工)・准教授

研究者番号：10323792

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：直管・曲り管内の定常流およびエンジン運転条件に相当する高周波変動脈動流の流動場、熱伝達特性を検証した。曲り管では、定常・脈動流共に管路に沿った流速の第1モードと、剥離・逆流を表す第2モードが支配的で流動場が構成される。曲り内側での流速増加に伴う境界層厚さの減少、高温流体コアの外壁側への衝突で1周期平均局所熱流束が増大する。実機のような最大流速が大きい位相では熱伝達が促進される一方、最小流速がゼロに近い位相では抑制され、管路全体の熱伝達特性は直管と曲り管で大きな差異は無い一方、曲り形状での局所的な壁面熱流束増大を抑えることが重要な要素である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

自動車レシプロエンジンの熱効率向上、およびエミッション低減に向けて、曲り管で構成されるエキゾーストマニホールドから排出される脈動乱流に伴う温度場・壁面熱伝達特性は、下流に設置されている三元触媒の性能に大きく影響することから、高周波で変動する流動場と局所壁面熱伝達の相関を明らかにすることで損失低減対策にも繋がる。

研究成果の概要(英文)：The flow field and heat transfer characteristics of steady and pulsating flows at high frequencies corresponding to operating conditions of an actual engine are verified in straight and curved pipes simulating an actual engine. In curved pipes, flow field consists of the first mode of flow velocity along the pipe and the second mode with separation and reversed flow for both steady and pulsating flow. The decrease in boundary layer thickness due to the increase in flow velocity inside the bend and the impingement of the hot fluid on the outer wall side increases the one-period average local heat flux. While heat transfer is enhanced in phases with high maximum flow velocities, it is suppressed in phases where the minimum flow velocity is close to zero, and while there is no significant difference between straight and curved pipes in terms of overall heat transfer characteristics, suppressing the localised wall heat flux increase in curved geometries is an important factor.

研究分野：流体工学

キーワード：脈動流 熱伝達

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

自動車レシプロエンジンの熱効率向上に向けて、エンジンシリンダの冷却損失と併せて、排気系を流れる高温排気ガスから外へ逃げる熱を如何に低減するかが研究課題であり、ターボチャージャーを用いたエネルギー再利用等の研究報告も為されてきた。

しかし、多気筒エンジン排気系の一部のエキゾーストマニホールドは、複雑に曲った複数の管が合流する形状であり、排気バルブの開閉に伴い管内の高温排気ガスはエンジン回転数に相当する高周波の平均場と更に高周波成分の乱れ・サイクル変動を含み、ジェット流・再循環領域の周期性が熱伝達の非正常性にも大きく影響するが、管内の流速場(剥離、渦、スワールスイッチング等)挙動の実験計測がほぼ皆無であり、排気管壁面上の強制対流熱伝達メカニズム、クランク角特性の理解は不十分である。更に冷却された排気ガスから壁面に凝縮薄水膜が生成され、脈動流を受けて飛散・液膜分裂が生じ管内流動・温度場、壁面熱伝達にも影響すると考えられる。

エキゾーストマニホールド・触媒・エキゾーストパイプ・マフラー全体の内部流速場をPIVで取得、もしくはDNS/LESを用いた3次元乱流シミュレーション(CFD)で内部流動場・温度場を求めることは現実的には未だ大きな困難が在るが、実機エンジン模擬の運転周波数・流量、曲り管形状での流動・温度場、凝縮薄水膜飛散を計測・CFDの両面から解明することで、実用的な3次元CFD用壁面熱伝達モデル、及び1次元排気損失評価モデルの構築が期待出来る。

### 2. 研究の目的

自動車レシプロエンジンの熱効率向上に於いて問題となる「排気損失」はエンジンシリンダ冷却損失と同程度で全体損失の30%程を占めるが、エキゾーストマニホールドの様な複数回曲り・複数本が合流する管からの熱流動は強制対流・乱流境界層発達が支配的と考えられ、排気系平均温度勾配(熱流束)の低減設計には流動・温度場の非正常特性を把握する必要がある。

PIV (Particle Image Velocimetry) などの速度計測、CFD (数値流体解析)を用いた生体等の低数波数脈動流の評価に関する既往報告は多くあるが、これまでS字曲り管内を流れる実機エンジン回転数相当の高周波数振動・乱流脈動流に対しPIV計測・CFD解析を行い、流動加速～最大流速時のLyne渦型二次流れの成長、減速～最小流速時の曲り部水平面内剥離現象の発生メカニズムに関する新知見を示した。本研究では更に熱流動と温度場相関を明らかにし、排気損失低減要素の明確化、及び排気系設計指針の確立を研究目的とする。

### 3. 研究の方法

本研究では、直管・曲り管内の常温・高温流動場の基礎的挙動特性を明らかにするため、風洞から発生する定常流、および定常流からエンジン運転条件を模擬した時間変動する脈動流に替えられた空気流動を直管・曲り矩形管内に流し、流動特性と空間平均熱伝達特性の評価を行う。高温気流の実験では温度制御が可能な熱風発生器と脈動発生装置を用いる。

常温での曲り管内の定常・脈動気流の流動場計測、および曲り管内の定常・脈動高温気流の温度場・区間平均熱伝達を、曲り管内の常温定常・脈動気流の流動場計測用透明アクリル製流路、および高温気流の温度場計測用アルミニウム製流路で計測を行う。高温気流の計測は熱電対を用いて面内温度分布を求め、商用ソフトを用いた壁面内の熱伝導と管内乱流場の連成シミュレーション(Conjugate Heat Transfer: CHT)を行い、実験との比較検証、流動場と温度場・熱伝達の相関の考察を行う。

### 4. 研究成果

(1) 図1に第一・第二曲り部の脈動気流における各位相での流速ベクトルを示す。二つの曲がりを持つS字管では、脈動の最大流速時には定常流の様な管路に沿った流速場が見られるが、減速時には第一曲り部の内側壁面近傍で剥離渦の様な逆流が生じ始め、最小流速時には流路中央まで渦が広がる。また、第二曲がり部でも減速に伴い曲り内側から逆流が生じ、最小流速時には曲り外側壁面まで管路全体に広がっている。脈動流では、定常流で見られる曲り部で生じる遠心力に伴う管軸垂直方向の圧力勾配と共に、圧力の時間変動に伴い開放端となる管路出口付近を始め、管軸方向の逆圧力勾配で生じる軸方向の逆流の影響も受けることから、圧力分布の時間・空間変動が脈動流の速度分布形成に支配的な要素となることが推測される。定常流・脈動流共に速度成分に対する主成分解析(POD)を用いて流速場をモード分解することで、脈動の最大流速時には最もエネルギーが大きい、管路に沿った流速の第1モードの次にエネルギーが大きい第2モードの時間係数の値が正負で振動することから、順方向流と剥離・逆流の両方を示すモードが主で構成されていることが分かる。

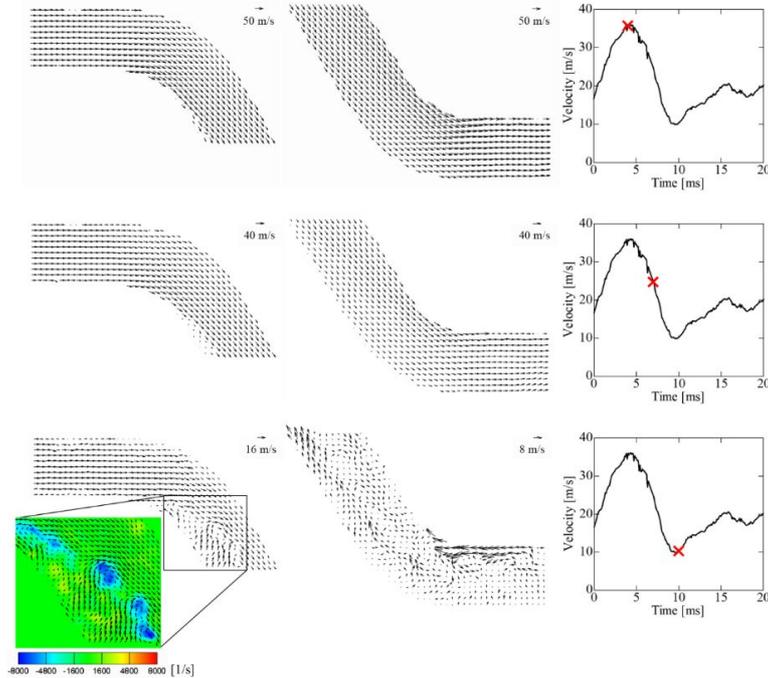


図1 第一・第二曲り部の脈動気流における各位相での流速ベクトル

(2) 一方、脈動流における伝熱評価を行う際に、管入口 - 出口間のエネルギー収支については、直管・曲り管を各々上流直管部・曲がり部・下流直管部に分け、定常乱流下での区間内平均熱流束の評価を、各区間の代表断面内温度分布計測から行った。また、金属製管路内の流速場・温度場を推測する為に、商用ソフトを用いた壁面内の熱伝導と管内乱流場の連成シミュレーション（Conjugate Heat Transfer：CHT）を行った。流動場は RNG  $k-\epsilon$ 、管路内壁の境界条件として流速は壁法則、壁面乱流熱流束は Han & Reitz モデルを用いた。また、壁面内を伝わった熱流束が、管路外壁から室温の雰囲気へ流れる自由対流の熱伝達係数を  $h = 14$  と設定したが、管路を流れる流体の軸方向温度低下が本実験計測結果と整合することを確認した。定常気流のレイノルズ数は実験と同様に  $Re = 60000$  とし、脈動流では、実験で 1 周期時間平均気相流速ベースのレイノルズ数が同様に 60000 となる様な時間波形が形成されることを熱線流速計で確認し、CHT で管路流入断面の速度境界条件として用いている。図 2 に  $90^\circ$  曲りを有する金属製管路内定常気流の（左）流速分布、（中央）温度分布の CHT 結果、（右）曲り部の寸法および管路上の局所位置を示す。図 2 より、曲り部で高温流体コアが外壁に衝突し、内側壁面近傍では剥離の様な遅い流速分布となるが、高温部も流動に乗って外壁に衝突する効果と、断面内に生じる Dean 渦の様な二次流れが外壁に衝突する二つの効果で熱伝達も局所的に促進される。

(3) また、図 3 に直管内脈動流の断面中心温度の時間変化、図 4 に直管（Straight pipe）と  $90^\circ$  曲り管（Curved pipe）における定常・脈動流の熱伝達と熱流束を実験と CHT で比較している。曲り管の Dean 数は  $De = 31,000$ 、Womersley 数は  $Wo = 43.1$  である。径  $13 \mu m$ 、 $25 \mu m$  の 2 種類の熱電対で温度時間変化を計測するが、一次遅れを仮定した応答時間の補正を用いた温度推定値を示している。本実験条件のレイノルズ数範囲における直管での平均ヌッセルト数  $Nu$  のレイノルズ数およびプラントル数依存性は、従前の研究で多数の実験相関式が提案されているが、Gnielinski (1976) は定常乱流場での壁面摩擦係数も考慮した相関式であり、約 20% 程度以内の範囲で本計測・CHT 共に整合している。局所熱伝達促進の様子が図 4（左）の局所ヌッセルト数にも示されている。実験計測と CHT は概ね場所の依存性・ヌッセルト数の値共に整合しており、曲り管では曲り部外側付近で、局所ヌッセルト数が定常流の値より約 60% 程の増加が見られ、熱伝達が促進されることが分かる。

図 4（右）に定常気流と、脈動流の 1 周期平均壁面熱流束の比較を示す；図 4（左）より下流まで掲載している。熱流束は各区間の平均熱流束である。定常気流と同様に、脈動流も曲り部で平均局所熱流束が増大する。曲り管では、加速時に曲り内側での流速増加に伴う速度境界層・温度境界層厚さの減少、および(2)で前述の高速流体の外壁側への衝突に伴い、曲り部で熱伝達が増える一方、曲り後の曲り内側での剥離領域、および減速時は膨張に伴い低温流体が流れてくることから、雰囲気温度との差異も小さくなり、外部への熱伝達も小さくなる。また、管路出口近傍では脈動流特有の開放端からの逆流も熱伝達抑制効果に繋がる。管全体の熱収支としては直管に対する明確な熱伝達促進は見られず、冷却損失の観点からは問題にはならないと考えられるが、区間平均熱流束だけでなく局所壁面熱流束の直接計測を、実験条件を更に追加して研究を

進めていく必要がある。

脈動流での熱伝達は多数の既往研究が報告されているが、本研究課題のエンジン実機運転条件相当の高  $W_o$  数かつ周囲温度が常温で、エキゾーストマニホールドの様な複雑な曲がりを持つ系では、最大流速が大きい脈動流では速度・温度境界層が薄く熱伝達促進がある一方、最小流速がゼロに近い様な遅い流速では再層流化、剥離等での抑制が想定される。また、直管に対して曲り部の局所的な熱伝達促進効果がエネルギー損失に繋がると考えられる。実機エンジンで用いられる理論  $Nu$  数に対する実効  $Nu$  数の比 (CAF: convective augmentation factors) までの評価には至らなかったが、脈動流においても水平断面内だけでなく、垂直断面で生じる Dean 渦, Swirl Switching などの特徴的な内部流動が、熱伝達にどの程度影響を及ぼすかを把握することで、実機で用いられる空気断熱層を挟む様な二重構造管での伝熱特性にも同様の評価が可能と考えられる。また、管内気液二相流流動場では、直管および曲り管について一様な定常・脈動気流下において、エンジン排気系で想定される薄水膜を模擬した水膜挙動を上面から高速度カメラで撮影、液膜挙動の比較を行った。曲り管では曲り部内側の気流速度増加に伴う液滴発生頻度の増加、および脈動気流下では気流と逆方向のエントレイン・液滴発生が生じることが分かり、気液が存在する時の熱伝達においても影響を及ぼす可能性も考えられ、二相流での熱伝達特性研究に今後繋げていく。

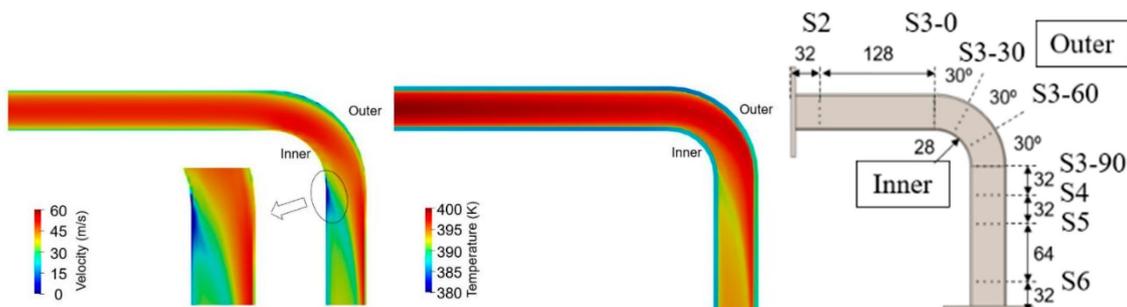


図2 90度曲り管における定常気流挙動(CHT) . 左:流速,中央:温度,右:曲り部

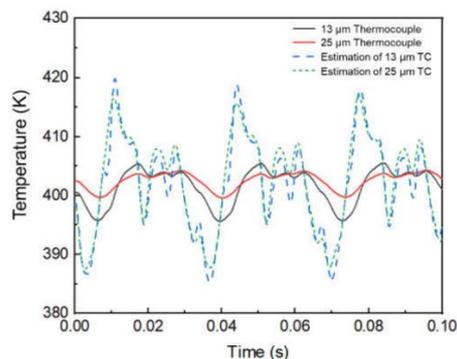


図3 直管内脈動流の断面中心温度の時間変化. 実線:熱電対,破線:推定値

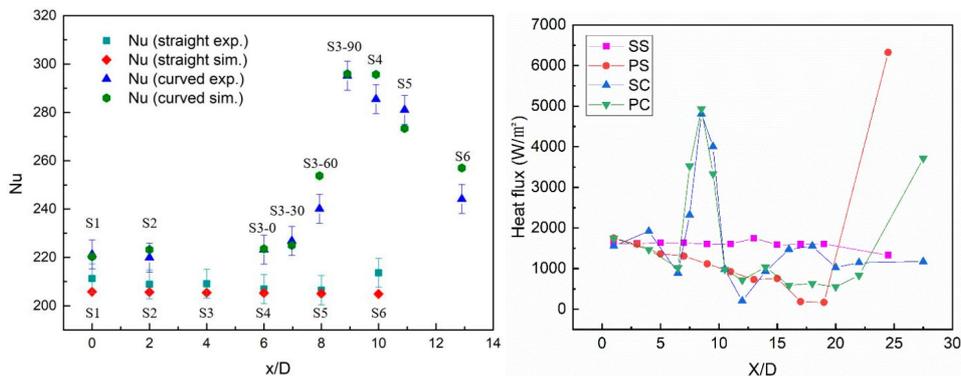


図4 直管・90度曲り管における局所熱伝達・熱流束.(左)定常気流での局所  $Nu$  数, (右)局所壁面熱流束. SS:定常直管,PS:脈動直管,SC:定常曲管,PC:脈動曲管

<引用文献>

Oki, J., Kuga, Y., Ogata, Y., Nishida, K., Yamamoto, R., Nakamura, K., Yanagida, H, and Yokohata, H.: Stereo and time-resolved PIV for measuring pulsatile exhaust flow from a motorized engine. Journal of Fluid Science and Technology, 13, No. 1: pp. JFST0005, 2018.  
 Guo, G., Kamigaki, M., Zhang, Q., Inoue, Y., Nishida, K., Hongou, H., Koutoku, M., Yamamoto, R.,

Yokohata, H., Sumi, S., and Ogata, Y. : Experimental study and conjugate heat transfer simulation of turbulent flow in a 90° curved square pipe. *Energies*, 14(1), 2021

Tagawa, M., Shimoji, T. Ohta, Y., : A two-thermocouple probe technique for estimating thermocouple time constants in flows with combustion, In situ parameter identification of a first-order lag system, *Rev.Sci.Instrum*, 69, 3370-3378 (1998).

Guo, G., Kamigaki, M., Inoue, Y., Nishida, K., Hongou, H., Koutoku, M., Yamamoto, R., Yokohata, H., Sumi, S., and Ogata, Y. : Experimental study and conjugate heat transfer simulation of pulsating flow in straight and 90° curved square pipe. *Energies*, 14(13), No.3953, 2021

石野, 鈴木, 阿部, 大岩, 山口 : 管内脈動流の流動および伝熱特性, 日本機械学会 B 編, 62, p1928-1936(1996)

井口, 近江, 西沢 : 長方形管内乱流脈動流れの再層流化, 日本機械学会 B 編, 51, p1384-1392(1985)

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

|  |                       |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名<br>Guo Guanming, Kamigaki Masaya, Zhang Qiwei, Inoue Yuuya, Nishida Keiya, Hongou Hitoshi, Koutoku Masanobu, Yamamoto Ryo, Yokohata Hieaki, Sumi Shinji, Ogata Yoichi | 4. 巻<br>14            |
| 2. 論文標題<br>Experimental Study and Conjugate Heat Transfer Simulation of Turbulent Flow in a 90° Curved Square Pipe   | 5. 発行年<br>2020年       |
| 3. 雑誌名<br>Energies   | 6. 最初と最後の頁<br>94 ~ 94 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.3390/en14010094   | 査読の有無<br>有            |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている (また、その予定である)   | 国際共著<br>-             |

|  |                         |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名<br>Oki Junichi, Kuga Yukika, Yamamoto Ryo, Nakamura Kazuhiro, Yokohata Hideaki, Nishida Keiya, Ogata Yoichi | 4. 巻<br>104             |
| 2. 論文標題<br>Unsteady Secondary Motion of Pulsatile Turbulent Flow through a Double 90° -Bend Duct                   | 5. 発行年<br>2019年         |
| 3. 雑誌名<br>Flow, Turbulence and Combustion  | 6. 最初と最後の頁<br>817 ~ 833 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1007/s10494-019-00088-y   | 査読の有無<br>有              |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている (また、その予定である)   | 国際共著<br>-               |

|   |                        |
|---|------------------------|
| 1. 著者名<br>OKI Junichi, KUGA Yukika, OGATA Yoichi, NISHIDA Keiya, YAMAMOTO Ryo, NAKAMURA Kazuhiro, YANAGIDA Haruna, YOKOHATA Hideaki | 4. 巻<br>13             |
| 2. 論文標題<br>Stereo and time-resolved PIV for measuring pulsatile exhaust flow from a motorized engine                                | 5. 発行年<br>2018年        |
| 3. 雑誌名<br>Journal of Fluid Science and Technology   | 6. 最初と最後の頁<br>JFST0005 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1299/jfst.2018jfst0005   | 査読の有無<br>有             |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難  | 国際共著<br>該当する           |

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 5件）

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Guo Guanming, Kamigaki Masaya, Inoue Yuuya, Nishida Keiya, Hongou Hitoshi, Koutoku Masanobu, Yamamoto Ryo, Yokohata Hideaki, Ogata Yoichi |
| 2. 発表標題<br>NUMERICAL AND EXPERIMENTAL STUDIES OF HEAT TRANSFER FOR STRAIGHT AND 90 DEGREE CURVED SQUARE DUCT   |
| 3. 学会等名<br>The 31st International Symposium on Transport Phenomena (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2020年  |

|   |
|---|
| 1 . 発表者名<br>Ogata Yoichi, Nakada Shotaro, Akiyama Kyosuke, Ma Ji, Wu Qing, Nishida Keiya, Yamamoto Ryo, Nakashima Akira, Nakamura Kazuhiro, Marui Kentaro, Nishimura Masato, Yokohata Hideaki |
| 2 . 発表標題<br>Study of air-water interface behavior in straight and curved rectangular ducts  |
| 3 . 学会等名<br>The 31st International Symposium on Transport Phenomena ( 国際学会 )  |
| 4 . 発表年<br>2020年  |

|  |
|--|
| 1 . 発表者名<br>K. AKIYAMA, S. NAKADA, K. MA, K. NISHIDA, R. YAMAMOTO, K. NAKAMURA, K. MARUI, H. YOKOHATA, Y. OGATA      |
| 2 . 発表標題<br>STUDY OF WAVE AND BREAKUP FORMATION ON WATER FILM BY STEADY AND PULSATING GAS FLOW IN A RECTANGULAR DUCT |
| 3 . 学会等名<br>The 30th International Symposium on Transport Phenomena ( 国際学会 )   |
| 4 . 発表年<br>2019年   |

|  |
|--|
| 1 . 発表者名<br>Junichi OKI, Yukika KUGA, Ryo YAMAMOTO, Kazuhiro NAKAMURA, Hideaki YOKOHATA, Keiya NISHIDA and Yoichi OGATA      |
| 2 . 発表標題<br>DES of pulsatile turbulent flow through a double 90° bend pipe for flow analysis of an automotive exhaust system |
| 3 . 学会等名<br>WCCM 2018 ( 国際学会 )   |
| 4 . 発表年<br>2018年   |

|   |
|---|
| 1 . 発表者名<br>Kuga Y., Oki J, Inoue Y., Nishida.K., Ogata.Y., Yamamoto.R., Yanagida.H. and Yokohata.H.                              |
| 2 . 発表標題<br>Experimental study on unsteady vortical structure in pulsating flow within a bend duct using time-resolved stereo PIV |
| 3 . 学会等名<br>12th European Fluid Mechanics Conference ( 国際学会 )   |
| 4 . 発表年<br>2018年  |

〔図書〕 計1件

|  |                 |
|--|-----------------|
| 1. 著者名<br>金子 成彦、草鹿 仁、高林 徹、溝淵 泰寛、南部 太介、尾形 陽一、高木 正英、川内 智詞、小橋 好充、周 ペイ寛、堀 司、神長 隆史、森井 雄飛、橋本 淳（共著） | 4. 発行年<br>2019年 |
| 2. 出版社<br>コロナ社   | 5. 総ページ数<br>290 |
| 3. 書名<br>基礎からわかる 自動車エンジンのシミュレーション  |                 |

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

|           | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号)                      | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号)                          | 備考 |
|-----------|--|--|----|
| 研究<br>分担者 | 西田 恵哉<br><br>(NISHIDA Keiya)<br><br>(90156076) | 広島大学・先進理工系科学研究科(工)・特任教授<br><br><br><br>(15401) |    |

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

|         |         |
|---------|---------|
| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|