

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 30 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23760155

研究課題名(和文) 噴流中の Flapping 現象と界面構造に着目した混合/拡散現象の効率化

研究課題名(英文) Enhancement of the mixing and diffusion in a turbulent jet focused on the flapping phenomena and turbulent/non-turbulent interface

研究代表者

寺島 修 (Osamu, Terashima)

名古屋大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：50570751

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円、(間接経費) 1,020,000円

研究成果の概要(和文)：噴流の混合・拡散効率の向上を目的に、二次元乱流噴流中に発生するコヒーレント構造の一つである Flapping 現象および乱流/非乱流領域界面近傍の構造に着目してこれらの現象が混合・拡散効率にもたらす影響について調べた。新たに開発した速度/圧力を同時計測技術を用いて上記現象を調べた結果、Flapping 現象の発生はスカラー量(熱)や乱れエネルギーの噴流外への輸送を顕著にするとともに、乱流領域と非乱流領域との界面の構造に変化をもたらすことが明らかとなった。また、圧力変動波を噴流中に導入することで Flapping 現象の発生周期や持続時間に変化をもたらす、Flapping 現象を制御できる可能性が見出された。

研究成果の概要(英文)：In this study, for the enhancement of the mixing and diffusion in a turbulent jet, the role and effect of a large-scale coherent vortex structure in a plane turbulent jet, which is intermittently observed and called "flapping motion", and the structure of turbulent/non-turbulent interface are investigated experimentally. The experiment is performed by simultaneously measuring the velocity and pressure in the self-preserving region of the jet. Experimental results show that the arising of the flapping motion enhances the diffusion of the scalar (heat), momentum, and turbulent energy to the outer side of the jet. Further, it also causes the change of the structure of the turbulent/non-turbulent interface. The controlling of the flapping motion is also performed by generating the pressure waves with using a small speakers. The results show that the arising interval and duration of the flapping motion can be controlled by the pressure waves.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：噴流 乱流 計測技術 界面 圧力変動 秩序構造

1. 研究開始当初の背景

流体中に噴出された流れ(噴流)が周囲の流体と混合・拡散する現象は、燃焼器や反応容器などの各種工業装置内の流れや大気・海洋での汚染物質の拡散など、様々なところで見られる。この現象を明らかにすることは、噴流の混合・拡散現象の制御による省エネルギー化や二酸化炭素排出量の削減に貢献するため、昨今の地球温暖化防止に対する関心の高まりからも非常に有益である。このため、多くの研究者が噴流の混合・拡散現象の制御に取り組んできた。

従来の研究に対し、本研究では乱流噴流中に発生するコヒーレント構造の一つである Flapping 現象に着目した噴流の混合・拡散現象の制御手法について明らかにする。Flapping 現象とは、噴流中心軸を挟んで両側に正の軸方向変動速度を持つ流体塊と負の軸方向変動速度を持つ流体塊が対になって存在し、その変動速度の符号が時間と共に交互に反転して分布する現象である。申請者は事前に行った実験により、この現象が発生した際に噴流と周囲流体との界面の構造が変化し、非発生時に比べ界面における速度勾配やスカラー勾配が大きくなる可能性を見出した。界面における勾配の増大は運動量やスカラーの周囲流体への輸送の促進をもたらすため、この Flapping 現象を意図的に発生させることで混合・拡散現象の効率化を目指した。

2. 研究の目的

本研究では、噴流の混合・拡散効率の向上を目的に、乱流噴流中に発生する Flapping 現象の発生要因、発生が混合・拡散効率にもたらす効果、MEMS デバイスによる発生の制御の可否、発生の制御による混合・拡散効率の向上量、の4つを明らかにする。

3. 研究の方法

Flapping 現象の発生要因については、事前に行った研究により、乱流噴流中に発生する Flapping 現象の発生に規則性は無く、ランダムに発生する現象であることが明らかとなった。このため、Flapping 現象の効率的な制御法の確立に向けその発生要因を明らかにするため、Flapping 現象が発生する際の吹出し口近傍およびせん断層中の圧力変動、速度変動の特徴を明らかにする。計測は事前に開発した速度/圧力同時計測用プローブを改良して行い、圧力変動、速度変動の測定結果に対し Wavelet 解析などの統計評価手法を施すことで Flapping 現象の発生に強く影響する変動の強さ、周波数を明らかにする。

Flapping 現象の発生が混合・拡散効率にもたらす効果については、Flapping 現象発生時と未発生時の運動量およびスカラーの周囲流体への輸送量の変化を明らかにする。運動量の輸送量の評価は Flapping 現象発生時の噴流の拡がり角度および乱れエネルギーの輸

送量で評価し、スカラー量の輸送量の評価は加熱噴流の周囲流体への温度の輸送量で評価する。また、合わせて Flapping 現象発生時の噴流と周囲流体との界面の内部構造を調べ、界面の厚さ・界面内の物理量を計測し、Flapping 現象未発生時との界面構造の差異を明らかにする。

Flapping 現象の制御の可否については、上記の研究により得られた知見を元に MEMS デバイスに入力する信号の強さや周波数を決定し、MEMS デバイスを用いた Flapping 現象の制御の可否を明らかにする。また、入力信号の振幅および周波数をパラメータとした制御を行い、これらが噴流に及ぼす影響を明らかにし、Flapping 現象の制御に最適な変動圧力と変動周波数を決定する。

Flapping 現象の制御による混合・拡散効率の向上量については、Flapping 現象の制御による混合・拡散効率の向上量を明らかにする。

4. 研究成果

平成 23 年度は、(a)速度/圧力同時計測用プローブの小型化、(b)Flapping 現象発生時の変動速度と変動圧力の特徴抽出、(c)Flapping 現象発生時の界面構造の解明、(d)Flapping 現象発生時の変動圧力の多点同時計測、の4点を行うことを目標とした。(a)については当初の予定通り外径が 0.3 mm の静圧管を製作し、検査体積が従来に比べて 60%小さい速度/圧力同時計測用プローブを製作した。このプローブによる計測結果は従来のプローブによる計測結果と一致し、プローブの計測精度が確認された。(b)については当初の予定通り Flapping 現象発生時の乱流領域と非乱流領域との界面近傍の物理量(速度・圧力)の分布を計測した。(c)については当初の予定通り Flapping 現象発生時の変動圧力の多点同時計測を行った。速度と圧力の多点同時計測結果に対し、固有直交展開法(POD)と統計評価法(LSE)を組み合わせた複合解析を行った結果、噴流中における圧力拡散による乱れエネルギー輸送は、噴流中のコヒーレント構造の第1~第3モードにより支配されていることが明らかとなった。このコヒーレント構造の第1~第3モードは Flapping 現象に対応しているため、Flapping 現象が圧力拡散による乱れエネルギー輸送に寄与しているものと考えられる。

平成 24 年度は、(e)Flapping 現象発生時のスカラー輸送と界面構造の解明、(f)Flapping 現象の制御手法の考案と制御効果の評価、の2点を行った。(e)については、スカラーとなる加熱噴流を生成するためのヒーターと加熱噴流の温度制御装置の選定、設置、および温風の状態の確認を行い、正しく温風を発生させることができていないことを確認した。また、噴流中の温度計測用の温度計の製作も行った。さらに、Flapping 現象発生時のスカラー(熱)輸送について、噴流中の温度の空間二点同時計測、およびその結果

に対する POD 解析の実施により, Flapping 現象が二次元噴流中の熱輸送に大きく寄与していることを明らかにした。(f)については, Flapping 現象を制御するためのデバイスとなる薄型スピーカの選定と回路の設計, 製作を行った。

平成 25 年度は, (g) Flapping 現象の制御とその効果の確認, (h) Flapping 現象発生時の界面構造の解明, の 2 点を中心に研究を行った。(g)については, 小型スピーカにより発生させた音波によるアクティブ制御を試みた。スピーカは噴流吹き出し口近傍に設置し, 音波の周波数は 20Hz から 40Hz の間で変化させた。制御の結果, 噴流の自己保存領域で確認されて Flapping 現象の発生頻度, 持続時間が増加し, Flapping 現象を制御できる見通しを得た。また, 発生させる音波の位相を適切に制御することで Flapping 現象の制御をより効率よく行える見通しも得た。一方, スピーカが小型・薄型であるため発生させる音波の周波数や出力特性に制限があり, 効率的な制御が行えない課題も抽出された。(h)については, Flapping 現象発生時の乱流/非乱流界面の構造を, 条件付き抽出法を用いた多点速度/圧力同時計測により調べた。その結果, Flapping 現象発生時は未発生時に比べて界面近傍における乱れエネルギーの乱流輸送過程が活発になった一方, 圧力輸送過程が抑制されることが明らかとなった。さらに, Flapping 現象発生時は, 乱流/非乱流界面近傍に存在する速度やスカラー量が急激に変化する領域(界面層)の大きさも大きくなる傾向が見られた。以上 2 点より, Flapping 現象を効率的に制御することで, 二次元噴流の乱流/非乱流界面近傍における乱れエネルギーの乱流輸送過程や圧力輸送過程の制御が実現できる可能性が得られた。

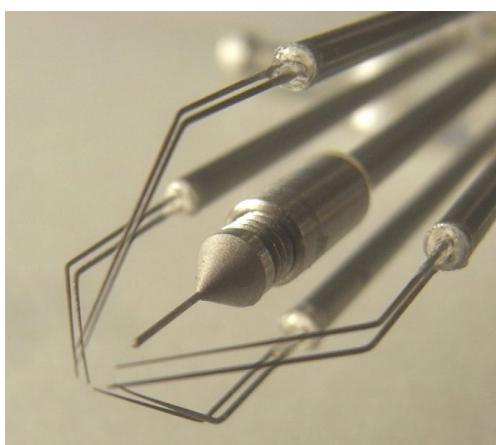


図 1 速度-圧力同時計測用プローブ

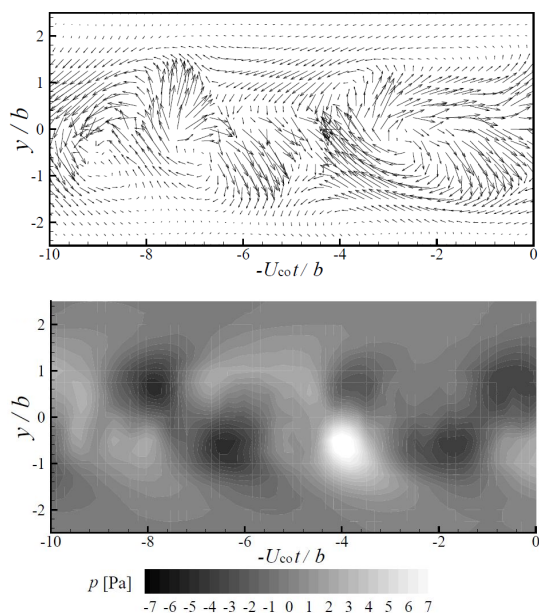


図 2 Flapping 現象発生時の速度場(上)と圧力場の様子

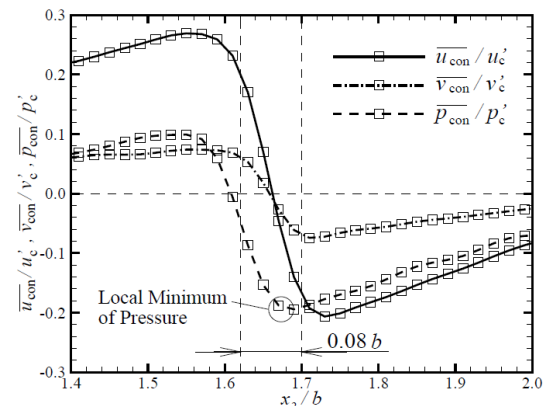


図 3 乱流領域と非乱流領域との界面近傍の変動速度と変動圧力の分布

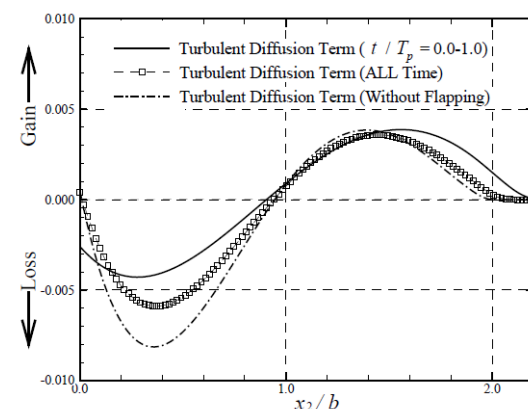


図 4 Flapping 現象発生時の乱れエネルギーの乱流輸送の様子

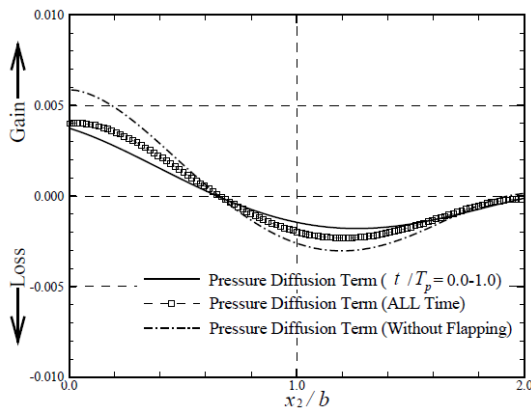


図 5 Flapping 現象発生時の乱れエネルギーの圧力輸送の様子

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 19 件)

Yuichi SHOJI, Osamu TERASHIMA, Yasuhiko SAKAI, Kouji NAGATA, Effect of pressure fluctuation at nozzle exit on flapping phenomena in a two-dimensional jet, ASME-JSME-KSME 2011 Joint Fluids Engineering Conference, 査読有, Paper No. AJK2011-16034, 2011, 3005-3011

DOI: 10.1115/AJK2011-16034

庄司裕一, 寺島修, 酒井康彦, 長田孝二, 計測精度の向上を目的とした速度・圧力同時計測用プローブの改良, 日本実験力学学会論文集, 査読有, 11 巻, 2011, 229-234

DOI: 10.11395/jjsem.11.229

Kazuhiro ONISHI, Osamu TERASHIMA, Yasuhiko SAKAI, Kouji NAGATA, The development of extremely-compact static pressure probe for the simultaneous measurement of pressure and velocity in the turbulent flows, ASME-JSME-KSME 2011 Joint Fluids Engineering Conference, 査読有, Paper No. AJK2011-31101, 2011, 79-82

DOI: 10.1115/AJK2011-31011

Osamu TERASHIMA, Yasuhiko SAKAI, Kouji NAGATA, Study on the Interfacial Layers between the Turbulent/Non Turbulent Regions in Two Dimensional Turbulent Jet, ASME-JSME-KSME 2011 Joint Fluids Engineering Conference, 査読有, Paper No. AJK2011-21003, 2011, 3727-3735

DOI: 10.1115/AJK2011-21003

寺島修, 酒井康彦, 長田孝二, 二次元乱流噴流の速度 圧力同時計測, 日本機械学会論文集 B 編, 査読有, 78 巻, 2012, 553-565

DOI: 10.1299/kikaib.78.553

寺島修, 酒井康彦, 長田孝二, Flapping 現象発生時の二次元乱流噴流の諸特性, 日本機械学会論文集 B 編, 査読有, 78 巻,

2012, 541-552

DOI: 10.1299/kikaib.78.541

寺島修, 大西一弘, 酒井康彦, 長田孝二, 高木正平, 定温度型熱線流速計の周波数応答特性を向上させる試み, 日本機械学会論文集 B 編, 査読有, 78 巻, 2012, 862-866

DOI: 10.1299/kikaib.78.862

Osamu TERASHIMA, Yasuhiko SAKAI, Kouji NAGATA, Simultaneous measurement of velocity and pressure in a plane jet, Experiments in Fluids, 査読有, 53 巻, 2012, 1149-1164

DOI: 10.1007/s00348-012-1351-z

寺島修, 酒井康彦, 長田孝二, 庄司裕一, 大西一弘, 二次元乱流噴流の乱流領域と非乱流領域との界面に関する研究, 日本機械学会論文集 B 編, 査読有, 78 巻, 2012, 1235-1247

DOI: 10.1299/kikaib.78.1235

安藤祐斗, 大西一弘, 寺島修, 長田孝二, 酒井康彦, 乱流噴流拡散場での瞬間速度-瞬間温度計測のための熱線-冷線複合プローブ開発に関する研究, 数理科学会論文集, 査読有, 13 巻, 2012, 9-15

寺島修, 渡辺徹, 森田潔, 阿部行伸, 酒井康彦, 長田孝二, 大西一弘, 変動圧力計測による流体中伝搬/発生音の評価, 日本実験力学学会論文集, 査読有, 13 巻, 2013, 52-59

DOI: 10.11395/jjsem.13.52

大西一弘, 寺島修, 酒井康彦, 長田孝二, 伊藤靖仁, 熱線流速計による乱流噴流の計測, 日本実験力学学会論文集, 査読有, 13 巻, 2013, 35-39

DOI: 10.11395/jjsem.13.35

Osamu TERASHIMA, Kazuhiro ONISHI, Yasuhiko SAKAI, Kouji NAGATA, Improvement of Constant Temperature Anemometer and Measurement of Energy Spectra in a Plane Turbulent Jet, ASME 2012 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 査読有, Paper No. IMECE 2012-86509, 2012, 1205-1211

DOI: 10.1115/IMECE2012-86509

大西一弘, 寺島修, 酒井康彦, 長田孝二, 伊藤靖仁, 乱流中の速度三成分と変動圧力の同時計測, 日本機械学会論文集 B 編, 査読有, 79 巻, 2013, 541-554

DOI: 10.1299/kikaib.79.541

Osamu TERASHIMA, Yasuhiko SAKAI, Kouji NAGATA, Yasumasa ITO, Kazuhiro ONISHI, Yusuke GOTO, Kensuke MIURA, Measurement of fluctuating temperature and analysis of eigenmodes by KL expansion in a heated plane jet, 4th International Conference on Jets, Wakes and Separated Flows, 査読有, Paper No. 1093, 2013

ISBN: 978-4-88898-234-4
Kensuke MIURA, Kouji NAGATA, Yasuhiko SAKAI, Osamu TERASHIMA, Yasumasa ITO, On the enhancement of mixing and diffusion in an axisymmetric jet by means of vortex generators, 4th International Conference on Jets, Wakes and Separated Flows, 査読有、Paper No. 1007, 2013

ISBN: 978-4-88898-234-4
Osamu TERASHIMA, Yasuhiko SAKAI, Kazuhiro ONISHI, Kouji NAGATA, Yasumasa ITO, Kensuke MIURA, Improvement of the constant temperature anemometer and measurement of energy spectra in a turbulent jet, Flow Measurement and Instrumentation, 査読有、35 巻、2014、92-98

DOI: 10.1016/j.flowmeasinst.2013.12.003

大西一弘、寺島修、酒井康彦、長田孝二、伊藤靖仁、速度/圧力多点同時計測結果への POD-LSE 複合解析の適用による二次元噴流の乱れエネルギー輸送の評価、日本機械学会論文集 B 編、査読有、80 巻、2014、FE0010

DOI: 10.1299/transjsme.2014fe0010

Osamu TERASHIMA, Kazuhiro ONISHI, Yasuhiko SAKAI, Kouji NAGATA, Yasumasa ITO, Simultaneous measurement of all three velocity components and pressure in a plane jet, Measurement Science and Technology, 査読有、25 巻、2014、1-17

DOI: 10.1088/0957-0233/25/5/055301

[学会発表](計 21 件)

Osamu TERASHIMA, Yasuhiko SAKAI, Kouji NAGATA, Study on the interfacial layers between the turbulent/non turbulent region in two dimensional turbulent jet, ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2011, 2011 年 7 月 25 日、アクトシティ浜松

Yuichi SHOUJI, Osamu TERASHIMA, Yasuhiko SAKAI, Kouji NAGATA, Effect of pressure fluctuation at nozzle exit on flapping phenomena in a two-dimensional jet, ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2011, 2011 年 7 月 25 日、アクトシティ浜松

Kazuhiro ONISHI, Osamu TERASHIMA, Yasuhiko SAKAI, Kouji NAGATA, The development of extremely-compact static pressure probe for the simultaneous measurement of pressure and velocity in the turbulent flows, ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2011, 2011 年 7 月 25 日、アクトシティ浜松

Osamu TERASHIMA, Yasuhiko SAKAI, Kouji NAGATA, The statistical analysis of flapping phenomenon in a two-dimensional turbulent jet, 7th Turbulent Shear Flow Phenomenon, 2011 年 7 月 30 日、カナダ・オタワ・オタワコンベンションセンター

安藤祐斗、大西一弘、寺島修、長田孝二、酒井康彦、瞬間温度測定用冷線プローブのアスペクト比と線径の違いが測定精度に及ぼす影響について、数理科学会講演会、2011 年 8 月 27 日、東京電機大学
大西一弘、寺島修、酒井康彦、長田孝二、二次元噴流の速度三成分・静圧同時計測、2011 年度日本機械学会年次大会、2011 年 9 月 13 日、東京工業大学

Osamu TERASHIMA, Yasuhiko SAKAI, Kouji NAGATA, Yuichi SHOUJI, Kazuhiro ONISHI, Pressure Measurement Near the Interface of Turbulent /Non Turbulent Region, CCS Symposium (ポスター)、2011 年 11 月 1 日、名古屋大学

Kazuhiro ONISHI, Osamu TERASHIMA, Yasuhiko SAKAI, Kouji NAGATA, Investigation of Turbulent Phenomenon by the Measurements of Fluctuating Pressure with a Small Microphone, Thermal and Fluid Engineering Conference 8, 2012 年 3 月 21 日、韓国・ソングドコンベンションセンター

Osamu TERASHIMA, Yasuhiko SAKAI, Kouji NAGATA, Simultaneous measurement of the velocity and pressure near the turbulent/non-turbulent interface, 2nd UK-JAPAN Bilateral and 1st Ercoftac Workshop, 2012 年 3 月 26 日、英国・インペリアルカレッジロンドン(招待講演)
安藤祐斗、酒井康彦、寺島修、長田孝二、大西一弘、軸対称噴流の速度・温度同時測定と噴流混合に関する研究、第 61 期日本機械学会東海支部講演会、2012 年 3 月 15 日、名古屋工業大学

Kazuhiro ONISHI, Osamu TERASHIMA, Yasuhiko SAKAI, Kouji NAGATA, The influence of the coherent structure on turbulent energy transport in a plane jet, 9th European Fluid Mechanics Conference, 2012 年 9 月 9 日、ローマ大学

Osamu TERASHIMA, Yasuhiko SAKAI, Kouji NAGATA, Yasumasa ITO, Kazuhiro ONISHI, On the pressure diffusion process in a turbulent plane jet, China-Japan Turbulence Work Shop, 2012 年 10 月 15 日、西安バンボレイクホテル(招待講演)
Kazuhiro ONISHI, Osamu TERASHIMA, Yasuhiko SAKAI, Kouji NAGATA, Simultaneous Measurement of Pressure and Three-Velocity Components by the Combination of Micro-Fabricated Probe

and Two X-type Hot-wires in Turbulent Flows, ISEM12, 2012年11月8日、台湾・グランドホテル台北

Osamu TERASHIMA、Kazuhiro ONISHI、Yasuhiko SAKAI、Kouji NAGATA、Improvement of constant temperature anemometer and measurement of energy spectra in a plane turbulent jet, ASME 2012 International Mechanical Engineering Congress & Exposition, 2012年11月9日、米国・ヒューストン・ジョージブラウンコンベンションセンター

大西一弘、寺島修、酒井康彦、長田孝二、二次元噴流のコヒーレント構造がもたらす乱れエネルギー輸送に関する研究、日本機械学会第90期流体工学部門講演会、2012年11月17日、同志社大学

大西一弘、寺島修、酒井康彦、長田孝二、伊藤靖仁、二次元噴流のコヒーレント構造がもたらす乱れエネルギー輸送機構の解明、第62期日本機械学会東海支部講演会、2013年3月18日、三重大学

Osamu TERASHIMA、Yasuhiko SAKAI、Kouji NAGATA、Yasumasa ITO、Kazuhiro ONISHI、Yusuke GOTO、Kensuke MIURA、Measurement of fluctuating temperature and analysis of eigenmodes by KL expansion in a heated plane jet, 4th International Conference on Jets, Wakes and Separated Flows, 2013年9月17日、名古屋大学

Kensuke MIURA、Kouji NAGATA、Yasuhiko SAKAI、Osamu TERASHIMA、Yasumasa ITO、On the enhancement of mixing and diffusion in an axisymmetric jet by means of vortex generators、4th International Conference on Jets, Wakes and Separated Flows, 2013年9月17日、名古屋大学

後藤優典、寺島修、酒井康彦、長田孝二、伊藤靖仁、三浦健介、KL展開による加熱二次元噴流の温度場の固有モード解析、日本機械学会91期流体工学部門講演会、2013年11月9日、九州大学

Osamu TERASHIMA、Yasuhiko SAKAI、Kouji NAGATA、Yasumasa ITO、Experimental verification of turbulence models for pressure diffusion process in a plane jet、American Physical Society Division of Fluid Dynamics 66th Annual Meeting, 2013年11月24日、米国・ヒューストン・デービットローレンスコンベンションセンター

- 21 Osamu TERASHIMA、Yasuhiko SAKAI、Kouji NAGATA、Yasumasa ITO、Investigation of turbulent energy transport by applying POD-LSE complementary method, American Physical Society Division of Fluid Dynamics 66th Annual Meeting, 2013年

11月24日、米国・ヒューストン・デービットローレンスコンベンションセンター

6. 研究組織

(1) 研究代表者

寺島 修 (TERASHIMA, Osamu)

名古屋大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：50570751