

機関番号：12608
研究種目：基盤研究（S）
研究期間：2006～2010
課題番号：18106004
研究課題名（和文）高解像複合光学計測と大規模グリッドDNSによる成層・混相乱流燃焼の構造解明と制御
研究課題名（英文）A Study on Turbulent Stratified/Multiphase Combustion by High Resolution Combined Laser Diagnostics and Large-Scale GRID DNS
研究代表者
宮内 敏雄（MIYAUCHI TOSHIO）
東京工業大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号：50016664

研究成果の概要（和文）：

各種燃焼器の高効率化と低環境負荷化は、近年問題となっている地球・都市環境問題の解決に必要不可欠である。本研究では、世界最大級の高精度数値シミュレーションと種々のレーザ計測技術を組み合わせた世界最先端の高解像複合光学計測を用いて、実用燃焼器の高効率化と低環境負荷化に重要となる成層・混相乱流燃焼機構を明らかにし、それに基づく燃焼制御法を提案した。

研究成果の概要（英文）：

High efficiency and low emission combustors are indispensable to solve the global and regional environmental issues. In this research project, turbulent stratified/multiphase combustion mechanism, which is significant for the development of the combustor, are clarified by utilizing high resolution combined laser diagnostics and large-scale GRID DNS which are the most sophisticated in the world. Based on the clarified mechanism, a strategy for the combustion control is shown.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	24,500,000	7,350,000	31,850,000
2007年度	16,900,000	5,070,000	21,970,000
2008年度	13,600,000	4,080,000	17,680,000
2009年度	13,200,000	3,960,000	17,160,000
2010年度	10,800,000	3,240,000	14,040,000
総計	79,000,000	23,700,000	102,700,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：環境技術，二酸化炭素排出削減，エネルギー効率化

1. 研究開始当初の背景

各種燃焼器の高効率化と低環境負荷化の実現は、近年問題となっている地球・都市環境問題の解決に必要不可欠である。多くの実用燃焼器内の流れは乱流状態にあるが、乱流燃焼機構には未解明な点が数多く残されており、乱流燃焼機構自体を効率良く制御する

ことによる実用燃焼器の高効率・低環境負荷化を行う試みは殆ど行われていない。直噴エンジンや予混合圧縮着火(HCCI)エンジン等の新燃焼法を採用した燃焼器では、乱流構造が燃焼特性を支配する種々の素過程に大きな影響を与えている。直噴エンジンでは、乱流による燃料噴霧の分散とそれらの蒸発・混

合による燃料濃度変動を有した予混合気が成層乱流燃焼し、それらの特性が大域的な燃焼特性を決定している。しかし、各素過程の詳細は未だ明らかにされておらず、試行錯誤的な設計に留まっている。

2. 研究の目的

本研究では、詳細化学反応機構を考慮に入れた超大規模直接数値計算(DNS)、高解像度粒子画像速度計(PIV)と複数ラジカルの高時間分解能平面レーザ誘起蛍光法(PLIF)等を組み合わせた複合光学計測を用いて、燃料液滴の分散・蒸発・混合及び燃焼過程、不均一燃料濃度及び不均一温度分布を有する予混合気の自着火及び火炎伝播機構等の実用的な燃焼器の高効率化と低環境負荷化に重要となる成層・混相乱流燃焼機構を明らかにし、それらに基づく高度乱流燃焼制御技術確立することを目的としている。

3. 研究の方法

燃料液滴の蒸発・混合及び燃焼過程、不均一燃料濃度及び不均一温度分布を有する予混合気の自着火及び火炎伝播機構等の成層・混相乱流燃焼機構の素過程を、詳細化学反応機構を考慮に入れたグリッド・コンピュータによる超大規模 DNS、高解像度 PIV と複数ラジカル PLIF を組み合わせた複合光学計測を用いて明らかにする。

4. 研究成果

(1)大規模グリッド DNS による乱流中での予混合気の着火・火炎伝播機構と液滴分散・蒸発及び混合過程の解明

【乱流中での不均一予混合気の着火・火炎伝播機構の解明】詳細化学反応機構と輸送係数・物性値の温度依存性を考慮に入れて、水素・空気、メタン・空気、ヘプタン・空気予混合気を対象として乱流中での自着火・火炎伝播の二次元 DNS を行い、空間的な当量比変動が予混合気炎の自着火と火炎伝播機構に与える基本的な影響を明らかにした後、DNS を三次元に拡張し、図 1 に示すように乱流のコヒーレント微細渦と火炎伝播機構の関係を明らかにした。さらに、着火遅れ時間は、乱流運動による歪み速度の大きさと強い相関があること、また統計的に同一の乱流場であっても着火領域の乱流特性により着火遅れ時間が大きく左右され、一点で着火したとしても複数箇所から時間遅れを伴って燃焼が開始されるなど従来未解明であった着

火・伝播機構の詳細を世界で初めて明らかにした。さらに上述の DNS を HCCI エンジンにおける自着火・火炎伝播機構の解明に拡張した。図 2 に示すように、自着火温度以上の温度を有する予混合気の燃焼機構に対する空間的な温度変動及び当量比変動の影響を、水素・空気及びメタン・空気予混合気に対して検討し、自着火・火炎伝播特性は当量比変動及び温度変動強度に大きく依存し、自着火と火炎伝播が空間的に混在することを明らかにした。これを定量的に評価するために、反応動力学に基づく自着火領域と火炎伝播領域の判別法を提案した。当量比変動及び温度変動強度の増加と共に火炎伝播領域の割合は増加するが、温度変動への依存性が極めて強いことを明らかにした。この結果は極めて独創的かつ新規性のあるものであり、今後 HCCI エンジンの実用化の障害となっている着火制御の克服に非常に重要なものである。

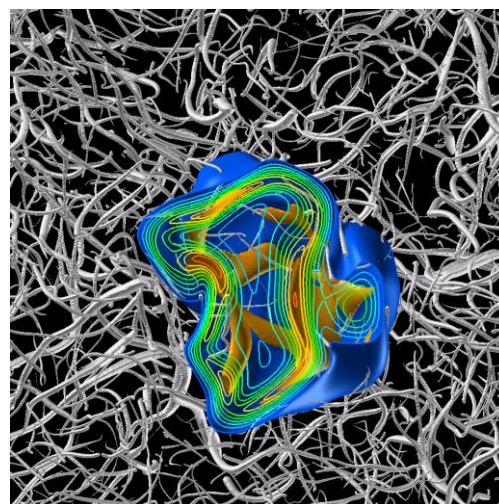


図 1：乱流中での予混合気着火及び火炎伝播の三次元 DNS一局所熱発生率と乱流コヒーレント微細渦

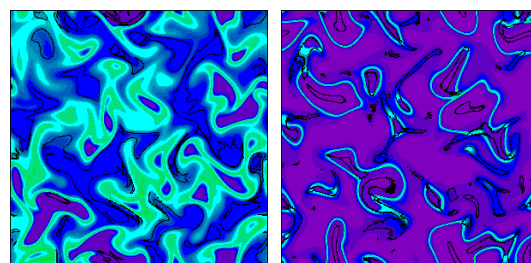


図 2：不均一メタン・空気予混合気の自着火・火炎伝播の DNS. 左：当量比変動，右：温度変動（実線：自着火領域と火炎伝播領域の境界）

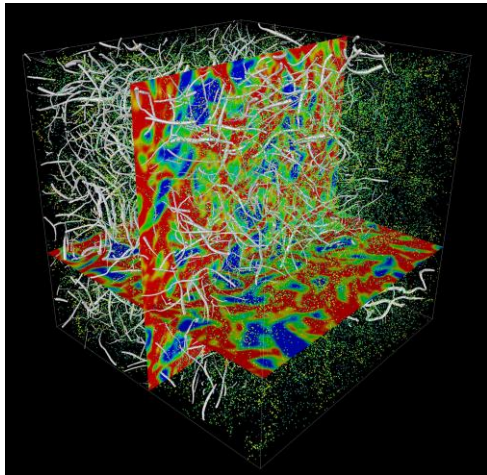


図3：乱流中での液滴分散・蒸発及び混合過程の DNS—乱流コヒーレント微細渦と粒子分散及び蒸発化学種分布—

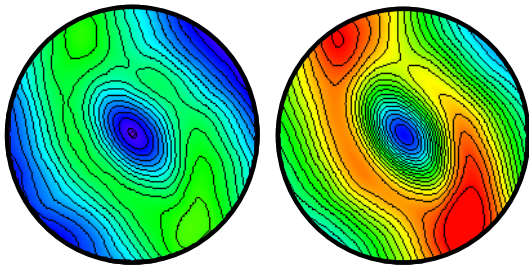


図4：コヒーレント微細渦の回転平面内における蒸発化学種の濃度分布(異なる液滴時間スケールの場合)

【乱流中での液滴分散・蒸発・混合・燃焼過程の解明】燃料としてデカンを対象として乱流中での液滴分散・蒸発及び混合過程の DNS を行い(図3), 乱流コヒーレント微細渦が液滴分散及び微細スケールにおける蒸発化学種分布を支配していることを明らかにした. コヒーレント微細渦は, 乱流中での液滴分散に大きな影響を与え, 特定の時間スケールを有する液滴は微細渦周囲に局在する. 液滴分散のみならず, 蒸発した化学種の濃度分布にも大きな影響を与え(図4), 液滴の時間スケールによってマイクロ・スケールの混合過程が大きく異なることを世界で初めて明らかにした. これらは, 高効率燃焼器の最適設計に有用な結果である. さらに蒸発したデカンや前述のヘプタン等の高級炭化水素の乱流燃焼の DNS を実現するために, 反応項の取り扱いに陰解法を導入することで, DNS に要する計算時間の大幅な短縮を実現した.

(2) 高解像複合光学計測による不均一予混合気の乱流燃焼機構と液滴分散, 蒸発及び混

合過程の解明

【乱流中での不均一予混合気の火炎伝播機構の解明】不均一予混合気の火炎伝播機構を明らかにするには, 局所的な火炎要素の伝播速度と乱流構造を明らかにする必要がある. 本研究では, ダブルパルス CH PLIF 計測法と高解像度ステレオ PIV 法を組み合わせることで火炎伝播速度と速度三成分の同時計測法を確立し, さらに OH PLIF 計測を加えて局所的な火炎要素の伝播速度と乱流構造の同時計測(図5)に世界で初めて成功した. また, 二平面 CH PLIF 計測法を開発し, これと一平面 OH PLIF を組み合わせることで, 乱流予混合火炎の三次元構造を計測可能な複合光学計測法を確立し, 乱流予混合火炎の瞬時三次元火炎構造(図6)を世界で初めて明らかにした.

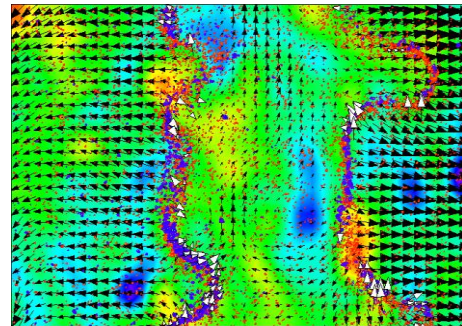


図5：ダブルパルス CH PLIF, OH PLIF 及び高解像度ステレオ PIV の同時計測(黒矢印：面内流体速度, 色分布：面外流体速度, 白矢印：局所燃焼速度, 青：第1CH分布, 赤：第2CH分布)

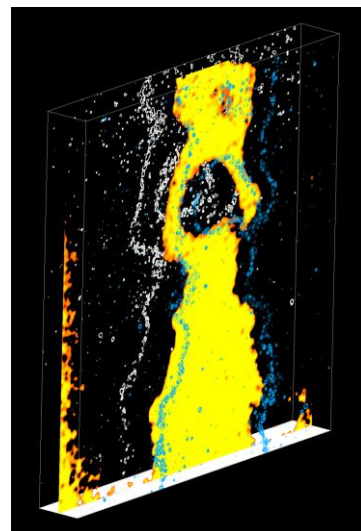


図6：二平面 CH PLIF, 一平面 OH PLIF 及び流体速度三成分の同時計測結果の例(白：第1平面火炎面, 黄色：第2平面未燃予混合気, 青：第3平面火炎面)

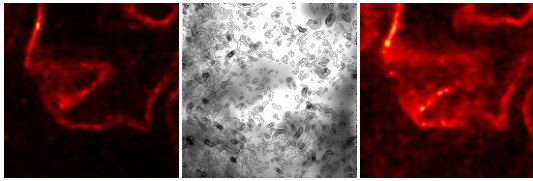


図7：二平面 CH PLIF，一平面 OH PLIF 及び二波長二平面 PIV 同時計測（左：第1平面火炎面，真中：第2平面既燃領域及び歪み速度，右：第3平面火炎面）

さらに、複合光学計測法を二平面 CH PLIF，一平面 OH PLIF 及び二波長二平面ステレオ PIV 同時計測（図7）に拡張し、乱流予混合火炎の局所火炎構造と火炎近傍の乱流構造等との関係を明らかにした。これらの複合光学計測法は世界最先端であり、極めて先駆的である。また、不均一予混合気の局所火炎構造と壁面近傍の乱流火炎構造などを明らかにするために、燃焼器内の乱流強度を制御可能で、しかも光学計測が可能な定容容器燃焼器を新たに開発し、これまでに開発した複合光学計測技術を用いて壁面近傍の火炎伝播特性及び消炎特性等の基本特性を明らかにした。

【乱流中での液滴分散・蒸発・混合・燃焼過程の解明】燃料噴霧燃焼における雰囲気の酸素濃度と温度の不均一性が燃焼と排気に与える影響を解明するために、燃焼室内部の温度と酸素濃度分布を独立に変化させることができる燃焼器を新たに製作し、有害排出物の生成が着火までに噴霧内へ導入される酸素とエンタルピの量により支配されることを明らかにした。また、温度分布の不均一性がメタン・空気予混合気の燃焼特性に与える影響を明らかにした。

(3) ICエンジンの完全シミュレーションに関する研究

ICエンジン内乱流燃焼のDNSを実現するために、世界初の試みとしてDNSを閉容器内乱流燃焼に拡張し、水素・空気予混合火炎とメタン・空気予混合火炎と壁面の干渉機構（図8）を検討した。閉容器内予混合火炎の局所火炎構造、壁面近傍での消炎機構及び熱損失特性、さらには容器内の圧力上昇と火炎構造及び乱流構造の関係など、これまで未解明であったICエンジン内乱流燃焼の素過程を明らかにした。さらに、ICエンジン内燃焼の完全シミュレーションを実現するために、DNSを実際のエンジンと同程度の大きさを対象とした三次元定容容器内乱流燃焼（図9）に拡張

し、局所火炎構造と壁面熱損失の関係、壁面での消炎機構、容器内圧力上昇と乱流火炎構造との関係などを明らかにするとともに、これらのDNS結果から、ラージ・エディ・シミュレーション(LES)検証用データベースを構築した。このような実機の完全シミュレーションを目指した取り組みは先進的であり、当該分野の研究者に大きなインパクトを与えている。

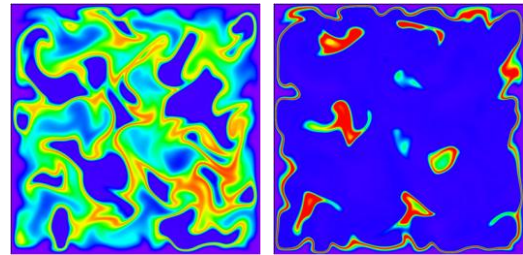


図8：閉空間内温度不均一メタン・空気予混合気の自着火・火炎伝播のDNS. 左：HCCI燃焼中の熱発生率分布，右：左図から3 μ s後の熱発生率分布

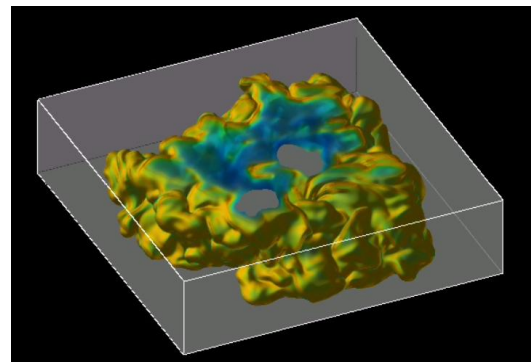


図9：三次元定容容器内の水素・空気予混合気着火・火炎伝播のDNS

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 37 件）

① M. Shimura, T. Ueda, G.-M. Choi, M. Tanahashi and T. Miyauchi, Simultaneous Dual-plane CH PLIF, Single-Plane OH PLIF and Dual-plane Stereoscopic PIV Measurements in Methane-Air Turbulent Premixed Flames, Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 33, pp. 775-782, 2011, 査読有

② H. Fukumoto, T. Seo, M. Shimura, N. Fukushima, M. Tanahashi and T. Miyauchi,

DNS Investigation on Autoignition and Flame Propagation in HCCI Combustion Journal of Fluid Science and Engineering, Vol. 6, pp. 45-55, 2011, 査読有

③ 店橋護, 志村祐康, 福島直哉, 多次元多変量光学計測による乱流予混合火炎の可視化, 可視化情報学会誌, 31 巻, pp. 15-20, 2011, 査読有

④ T. Aizawa and H. Kosaka, Effects of Fischer - Tropsch diesel fuel on soot formation processes in a diesel spray flame, International Journal of Engine research, Vol. 11, pp. 79-87, 2010, 査読有

⑤ 小酒英範, 山口紘, 雰囲気酸素濃度・温度の不均一性がディーゼル燃焼に及ぼす影響 (第 3 報, 酸素濃度と温度の不均一の影響), 日本機械学会論文集 (B 編), 76 巻, 761 号, pp. 155-160, 2010, 査読有

⑥ T. Ueda, M. Shimura, M. Tanahashi and T. Miyauchi, Measurement of Three-Dimensional Flame Structure by Combined Laser Diagnostics, Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 23, pp. 1813-1820, 2009, 査読有

⑦ 小酒英範, 津田里志, 山口紘, 雰囲気酸素濃度・温度分布の不均一性がディーゼル燃焼に及ぼす影響 (第 2 報, 温度の不均一性の影響), 日本機械学会論文集 (B 編), 75 巻, 752 号, pp. 287-295, 2009, 査読有

⑧ M. Sato, M. Tanahashi and T. Miyauchi, Particle Dispersion and Coherent Fine Scale Eddies in Turbulence, Journal of Fluid Science and Technology, Vol. 3, No. 1, pp. 149-160, 2008, 査読有

⑨ M. Tanahashi, T. Seo, M. Sato, A. Tsunemi and T. Miyauchi, Huge Direct Numerical Simulation of Turbulent Combustion - Toward Perfect Simulation of IC Engine -, Journal of Computational Fluids Engineering, Vol. 13, No. 4, pp. 114-125, 2008, 査読有

⑩ M. Tanahashi, S. Taka, M. Shimura and T. Miyauchi, CH Double-Pulsed PLIF Measurement in Turbulent Premixed Flame, Experiments in Fluids, Vol. 45, No. 2, pp. 323-332, 2008, 査読有

⑪ 小酒英範, 河内陽平, 大西毅, 相澤哲哉, 感熱燐光体を用いたディーゼル機関燃焼室壁面温度の画像計測, 日本機械学会論文集 (B 編), 74 巻, 738 号, pp. 490-497, 2008, 査

読有

⑫ T. Aizawa and H. Kosaka, Laser-Induced Phosphorescence Thermography of Combustion Chamber Wall of Diesel Engine, SAE International Journal of Fuels and Lubricants, Vol. 1, No. 1, pp. 549-558, 2008, 査読有

⑬ G.-M. Choi, J.-S. Yang, D.-J. Kim, M. Tanahashi and T. Miyauchi, Estimations of Local Heat Release Rate in the Methane-Air Premixed Flames, Thermochemica Acta, Vol. 455, pp. 34-39, 2007, 査読有

⑭ T. Miyauchi and M. Tanahashi, Current State and Perspective of Turbulent Combustion Research, Journal of Fluid Science and Technology, Vol. 2, pp. 514-524, 2007, 査読有

⑮ Y. Wang, M. Tanahashi and T. Miyauchi, Coherent Fine Scale Eddies in Turbulence Transition of Spatially-Developing Mixing Layer, International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 28, pp. 1280-1290, 2007, 査読有

⑯ 小酒英範, 西田健太郎, 相澤哲哉, 雰囲気酸素濃度・温度分布の不均一性がディーゼル燃焼に及ぼす影響 - 第 1 報, 酸素濃度の不均一性の影響, 日本機械学会論文集 (B 編), 73 巻, 736 号, pp. 2593-2599, 2007, 査読有

⑰ S.-J. Kang, M. Tanahashi and T. Miyauchi, Dynamics of Fine Scale Eddy Clusters in Turbulent Channel Flows, Journal of Turbulence, Vol. 8, Paper # 52, 2007, (<http://www.informaworld.com/smpp/content~db=all~content=a788287968~frm=titleink>) 査読有

⑱ 宮内敏雄, 店橋護, 乱流燃焼研究の現状と展望, 日本機械学会論文集 (B 編), 72 巻, 724 号, pp. 2838-2844, 2006, 査読有

⑲ 窪山達也, 小酒英範, 相澤哲哉, 松井幸雄, 急速圧縮膨張装置を用いた直接噴射式ディーゼル機関の壁面熱損失に関する研究 - 第 1 報, 雰囲気酸素体積分率と密度が熱損失に及ぼす影響 -, 日本機械学会論文集 (B 編), 72 巻, 721 号, pp. 2315-2322, 2006, 査読有

⑳ S.-J. Kang, M. Tanahashi and T. Miyauchi, Elliptic Feature of Coherent Fine Scale Eddies in Turbulent Channel Flows, Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 20, No. 2, pp. 262-270, 2006, 査読有

[学会発表] (計 91 件)

- ① T. Miyauchi, T. Kubota, M. Sato and M. Tanahashi, Fine Scale Eddy Cluster and Hierarchical Structure in Homogeneous Isotropic Turbulence, 8th Sino-Japan Workshop on Turbulence, 2009. 4. 5-9, Awaji, Japan, (Invited Lecture)
- ② M. Tanahashi, S. Ishimoto, M. Sato, T. Seo and T. Miyauchi, Fractal Geometry and Mixing Transition in Turbulent Free Shear Flow, 8th Sino-Japan Workshop on Turbulence, 2009. 4. 5-9, Awaji, Japan, (Invited Lecture)
- ③ M. Tanahashi, Huge Direct Numerical Simulation of Turbulent Combustion -Toward Perfect Simulation of IC Engine-, Korea-Japan Workshop on Computational Fluid Dynamics, 2008. 10. 24, Seoul, Korea, 招待講演
- ④ M. Tanahashi, DNS Approaches for Investigation of Turbulent Combustion in PCCI and HCCI Engines, 7th International Conference on Modeling and Diagnostics for Advanced Engine Systems (COMODIA), 2008. 7. 31, Hokkaido, Japan, 招待講演
- ⑤ 店橋護, 乱流燃焼の大規模直接数値シミュレーション -エンジン内燃焼の完全シミュレーションを目指して-, 第 21 回数値流体力学シンポジウム, 2007. 12. 19-21, 東京都千代田区, 招待講演
- ⑥ 店橋護, TSUBAME による乱流及び乱流燃焼の大規模直接数値計算, NEC C&C システム S P 研究会, 2007. 12. 5, 東京都江東区, 招待講演
- ⑦ 店橋護, 乱流燃焼の DNS と複合レーザ計測, 日本機械学会熱工学コンファレンス, 2007. 11. 23-24, 京都府京都市, キーノート講演
- ⑧ 店橋護, 乱流熱物質輸送現象の超大規模直接数値シミュレーション, 第 13 回計算数理工学フォーラム, 2007. 9. 28, 東京都目黒区, 招待講演
- ⑨ T. Miyauchi, Laser Diagnostics and DNS of Turbulent Premixed Flames, 5th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena, 2007. 8. 27-29, Garching, Germany, キーノート講演
- ⑩ 宮内敏雄, 乱流燃焼場の高精度レーザ計測, 第 19 回内燃機関シンポジウム, 2007. 1. 9-11, 東京都目黒区, 招待講演

⑪ T. Miyauchi, Time-Resolved Digital Particle Image Velocimetry for Turbulence Research, 5th International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer, 2006. 9. 25-29, Dubrovnik, Croatia, 基調講演

⑫ T. Miyauchi, M. Tanahashi, T. Hirayama and S. Taka, Time-Resolved Digital Particle Image Velocimetry for Turbulence Research, Turbulence, Heat and Mass Transfer 5, 2006. 9. 25-29, Dubrovnik, Croatia

[図書] (計 6 件)

- ① 宮内敏雄, 朝倉書店, 乱流工学ハンドブック(編集), 2009, pp. 1-606.
- ② 宮内敏雄, 朝倉書店, 乱流工学ハンドブック(分担), 2009, pp. 376-382.
- ③ 店橋護, 朝倉書店, 乱流工学ハンドブック(分担), 2009, pp. 44-49, 55-59, 179-181.
- ④ T. Miyauchi and Y. Takeda, 編集, Japan, National Committee for IUTAM, Science Council of Japan, Theoretical and Applied Mechanics, Vol. 56, 2008.
- ⑤ 店橋護, 朝倉書店, 計算力学ハンドブック(分担), 2007, pp. 334-341.
- ⑥ 宮内敏雄, 店橋護, 丸善, 機械工学便覧 - α 6- 計算力学 (分担), 日本機械学会編, 2007, pp. 159-160.

[その他]

ホームページ等

<http://www.navier.mes.titech.ac.jp/kaken-s/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宮内 敏雄 (MIYAUCHI TOSHIO)

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号: 50016664

(2) 研究分担者

店橋 護 (TANAHASHI MAMORU)

東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号: 40242276

小酒 英範 (KOSAKA HIDENORI)

東京工業大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号: 50225413