

機関番号：34310

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008～2010

課題番号：20360105

研究課題名（和文） 非定常非蒸発・蒸発噴霧特性の微視的解明とその火炎の三次元数値予測

研究課題名（英文） Microscopic Clarification of a Non-Steady Non-Evaporating and Evaporating Spray and 3-D Numerical Simulation of a Burning Non-Steady Spray

研究代表者

藤本 元 (FUJIMOTO HAJIME)

同志社大学・理工学部・教授

研究者番号：90051630

研究成果の概要（和文）：非定常噴霧の基本的データである粒径を、スペックルキラー・超望遠拡大レンズ系を通じて大判フィルム上に撮影して測定した結果、1) 噴霧周縁部のみならず噴霧軸付近においても世界最小の精度5[μm]で粒径測定が可能である。2) 噴霧内大規模渦構造の可視化が可能である。3) 大規模渦外縁部には大粒径、渦内部には小粒径の液滴が分布する。事などが判明した。また、二重露光法によって液滴速度の検出が可能になった。尚、粒径測定にはレーザホログラフィ法適用を試みたが、再生画像を得る際のフィルタの選択に問題があり、今後の課題である。

三次元数値予測に関しては、既存の非定常噴霧用コードKIVAにLarge Eddy Simulation (LES)を組み込み、適切な分裂および燃焼モデルを採用して計算を実施した結果、1) 実験結果に現れる大規模渦構造の再現が可能である。2) 蒸発時の噴霧内混合分率、燃焼火炎内の温度・熱発生率の分布が得られた。3) 熱発生率経過では、予混合的燃焼期間の傾向は実験結果がほぼ予測可能であるが、拡散的燃焼期間についてはなお改善の余地がある。等の結果が得られた。

研究成果の概要（英文）：The fundamental data of droplet size in a non-steady spray was captured on a film with large size through a speckle killer and a telescopic lens system with super high spatial resolution. The main conclusions are 1) it is able to measure droplet size with the accuracy of 5 [μm] which is just the minimum in the world not only at the spray envelope but also at near the spray axis, 2) it is capable to visualize the vortex structure with large scale in a spray, 3) the large droplets exist at the vortex envelope and the small ones do inside the vortex and 4) it is possible to measure the velocity of droplets by photographing them with double exposure through the same system. The laser holography was applied to measure droplets size as 3D information. However, there is the problem of the selection of filter to obtain the reconstruction image. This is the next step of the selection of a suitable filter.

The results of 3-D numerical calculation based on KIVA code where the technique of Large Eddy Simulation (LES) was built in with suitable model of the break-up and that of burning show that 1) it is possible to express the vortex structure with large scale appeared in a non-steady spray, 2) it is capable of presenting the time history of mixture fraction, temperature and rate of heat release, and 3) on the time history of rate of heat release it is able to representing the period of premixed burning, however,, it must be improve the prediction of the period of diffusion burning.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	6,900,000	2,070,000	8,970,000
2009年度	6,700,000	2,010,000	8,710,000
2010年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
総計	15,000,000	4,500,000	19,500,000

研究分野：噴霧燃焼工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：非定常噴霧，超望遠拡大撮影，レーザホログラフィ，二重露光，数値予測，混合率分布，温度分布，熱発生率

1. 研究開始当初の背景

(1) 従来の非定常噴霧の液滴径測定は，レーザドップラ流速計や望遠接写によっていた．前者はピンポイント測定であり，後者は噴霧周縁部に測定が限定されているため，当該噴霧全体にわたる新しい液滴径および液滴測定法が必要である．

(2) 従来の非定常噴霧の数値予測では，当該噴霧の最大の特徴である大規模渦構造の表現が不可能であった．従って噴霧形成後の蒸発，周囲気体との間の拡散と混合，火炎発生，燃焼への過程も十分には予測されないため，新しい予測スキームが必要である．

2. 研究の目的

(1) 非定常噴霧の超拡大撮影法を考案し，当該噴霧の時空間的粒径分布の測定を行う．液滴速度は二重露光法によって求める．また，デジタルレーザホログラフィ法を当該噴霧に適用することを試みる．

(2) 非定常噴霧の蒸発，燃焼過程の三次元数値予測を実施する．

3. 研究の方法

(1) 非定常噴霧の超拡大撮影およびレーザホログラフィによる非定常噴霧の粒径測定

2007年度に終えた科研費で作成した超高解像度撮影系を改良し，世界最小の測定粒径 $5[\mu\text{m}]$ を得た．実験前には，規格化されたガラスビーズを用いて撮影系の検定を行った．

図1は実験の光学系である．光源はNd:Yagレーザの第2高調波 $532[\text{nm}]$ である．スペックル除去装置は撮影画像上のスペックルを

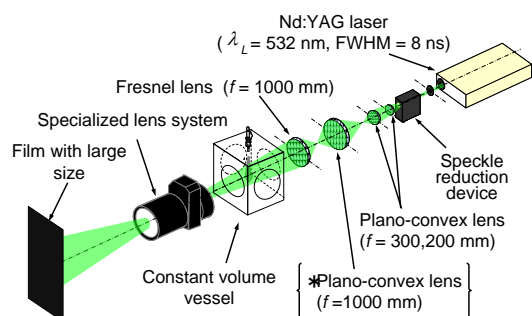


図1 実験の光学系

除去する役割を持つ．噴霧は大形フィルム ($6[\text{in}] \times 8[\text{in}]$) 上に撮像される．二重露光撮影では，2台のNd:Yagレーザを用い，1台は第2高調波，他は第3高調波 $355[\text{nm}]$ を $500[\mu\text{s}]$ 発振させた．他は図2と同様である．

実験は常温高压容器内で行い，燃料噴射系は通常の小型高速圧縮点火機関のコモンレールおよび噴射ノズルを用い，主噴射および排気ガス規制対応のパイロット噴射の噴霧を測定対象にした．

実験条件を表1にまとめる．

表1 実験条件

Fuel oil		n-tridecane
Ambient gas		CO_2
Ambient temperature	T_a [K]	Room temperature
Ambient pressure	p_a [MPa]	2.0
Ambient density	ρ_a [kg/m^3]	39.5
Injection pressure	p_{inj} [MPa]	87.5
Injection duration	t_{inj} [ms]	0.46
Injection fuel amount	m_f [mg]	3.67
Nozzle type		Single hole nozzle
Nozzle hole diameter	d_n [mm]	0.20
Nozzle hole length	L_n [mm]	0.80
Photograph timing	t/t_{inj}	3.0,5.0,7.0

(2) 非定常非蒸発・蒸発・燃焼噴霧の三次元数値予測

既存の当該噴霧のコード KIVA では，Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS) 法によるため，その特色である大規模渦構造の表現は不可能である．

そこで，KIVA に Large Eddy Simulation (LES) の手法を組み込んだ Sone らの KIVALES によって当該噴霧の数値予測を行う．支配方程式は，圧縮性を考慮した連続の式，運動量保存式，内部エネルギーおよび化学種保存式で，それぞれにトップハットフィルタが，また燃焼計算に備えて密度加重平均が適用されている．SGS 応力モデルには $k-\Delta$ モデル，SGS スカラモデルには勾配拡散モデルを用いた．各方程式の離散化は，Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE) 法による有限体積法で行う．時間進行は Phase A, B, C に分け，Phase A では生成項のみの時間発展，Phase B では拡散項と圧力項を SIMPLE 法で隠的に計算する．方程式のソルバには共役勾配法を適用する．Phase C では，サブサイクルを用いて準2次精度風上差分法 (QSOU) により移流項を計算する．

液滴群には、パーセルの概念である、Discrete Droplet Model (DDM) でラグランジアン的に、その速度変化は運動方程式で計算する。液滴の抗力係数算出にさいしては剛体の仮定を、衝突合体モデルは Amsden らのモデルを用い、液滴におよぼす周囲気体速度は須藤らの Velocity Interpolation によって計算する。数値予測には、種々の分裂および燃焼のモデルを適用し、移流スキームの影響も考察し、静止雰囲気中での計算を実施し、実験との比較を行った。メッシュは非蒸発噴霧の場合は半径方向、周方向と軸方向にそれぞれ $60 \times 60 \times 200$ 、蒸発および燃焼噴霧に対しては、計算時間の関係から $30 \times 30 \times 100$ とする。

移流スキームは、Partial Donor Cell (PDC), Interpolated Donor Cell (IDC), QSOU, Cubic-interpolated Pseudoparticle (CIP) を検討するが、CIP の場合は、運動方程式の移流項だけに適用し、その他の式については計算の不安定性を避けるために QSOU を採用する。

非定常燃焼噴霧の場合、着火は Shell モデルを用い、ダムケラ数 $Da \leq 1.0$ の化学反応律速領域すなわち予混合的燃焼領域では Characteristic Time-scale Combustion (CTC) モデル、 $Da > 1.0$ の乱流混合律速領域つまり拡散的燃焼領域では Flamelet Time Scale (FTS) モデルを適用し、火炎領域は混合分率が 0.001 以上とする。計算結果の蒸気相可視化には Volume Rendering 法を用い、液相についてはパーセルを球とする。乱流渦の同定ではラプラシアン $\Delta p = 1.0 \times 10^9 [\text{Pa}/\text{m}^2]$ の等値面を渦構造と定義する。

表 2 に計算対象の実験条件を挙げる。

Parameter	Value
Hole diameter [mm]	0.20
Injection pressure p_{inj} [MPa]	77
Injection duration t_{inj} [ms]	1.8
Fuel amount m_{inj} [mg]	12.0
Ambient gas	N_2
Ambient pressure p_{amb} [MPa]	1.5
Ambient temperature [K]	300
Ambient density ρ_{amb} [kg/m^3]	17.3
Fuel	n-tridecane

4. 研究成果

(1) 非定常噴霧の超拡大撮影およびレーザホログラフィによる非定常噴霧の粒径測定

図 2 は粒径別に表示した分布、図中の四角の領域の拡大部の同様の分布が図 3 である。液滴は噴霧の大規模渦によって分級される。20[μm]以下の小および中粒径の液滴は噴霧

全体にわたって出現するが、大粒径の液滴は噴霧先端部および大規模渦の外縁部に分布する。大規模渦の内部には小粒径の液滴が存在する。また、主噴射の場合も同様の傾向である。

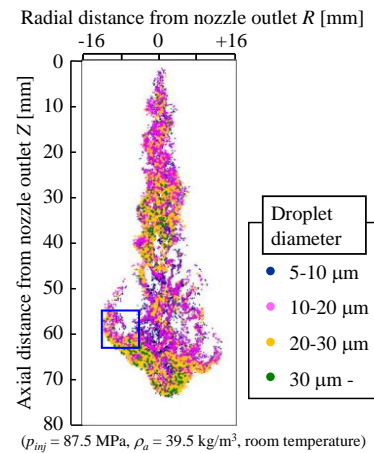


図 2 噴霧全体の液滴分布

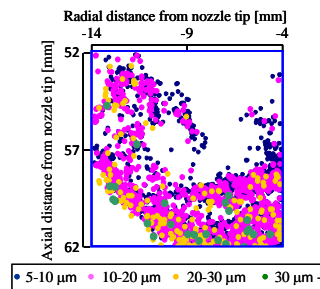


図 3 大規模渦中の液滴分布

図 4 は主噴射の場合の撮影が像と粒径別の液滴分布である。この分布はパイロット噴射の場合と同様である。

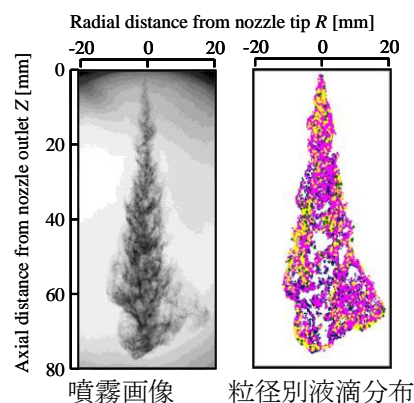


図 4 主噴射

二重露光撮影では同一画像上で対応する液滴の判別が可能であった。それによって液滴の移動速度が算出される。

尚、デジタルレーザホログラフィ用のレンズ系を構築し、非定常非蒸発噴霧に適用す

ることを試みたが、再生画像構成のさいに用いたウィナフィルタではノイズ除去に十分ではなく、粒径測定にはいたらなかった。今後の課題である。

(2) 非定常非蒸発・蒸発・燃焼噴霧の三次元数値予測

図5はKIVALESによる三次元渦管構造で、実験の噴霧画像に対応する。

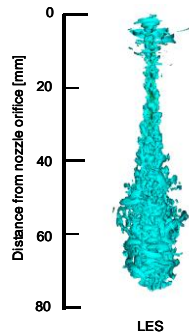


図5 KIVALESによる三次元渦管構造

図6に、他の移流項スキームに比べて噴霧写真状況に最も一致するCIPの場合の予測結果を示す。PDC, QSOUでは数値粘性の影響が過大であること、IDCの場合、計算過程で数値振動が発生して気相の速度勾配が過大に見積もられ、実験の画像と一致しない。

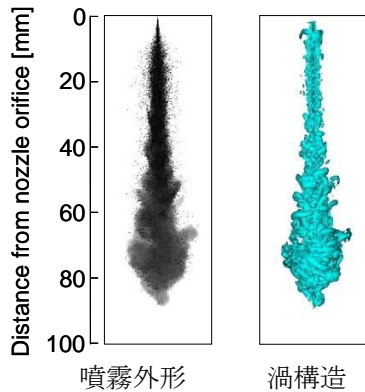


図6 CIPの場合の噴霧外形と渦構造

予測の結果による噴霧先端到達距離は、いずれの場合も実験値よりも長くなる。また噴霧体積はいずれも実験値にほぼ等しい。

図7は、分裂モデルのWAVE(係数 $B_f=10$)モデルおよびKelvin-Helmholtz and Rayleigh-Taylor Breakup (KHRT)モデルによる数値予測と実験の噴霧画像である。時間は噴射期間に対する無次元時間 t/t_{inj} ある。両予測と画像の対応は非常に良い。

Modified Taylor-Analogy (MTAB)モデルでは、噴射初期に噴霧外縁に輸送される液滴が後続の液滴群に移流されず、噴射期間中を

通じて噴霧上流側に滞留する。WAVE(係数 $B_f=40$)の場合、液滴群が高い運動量をもちつつ飛行するため、噴射期間中の噴霧先端部に槍状の形状が現れる。したがって、両モデルの噴霧画像にたいする一致性が悪い。

温度、混合率、ダムケラ数、CTCとFTSを用いたそれぞれの熱発生率、CTCおよびFTSの計算結果を合成した熱発生率(CTC+FTS)の噴霧内分布を、図8に示す。

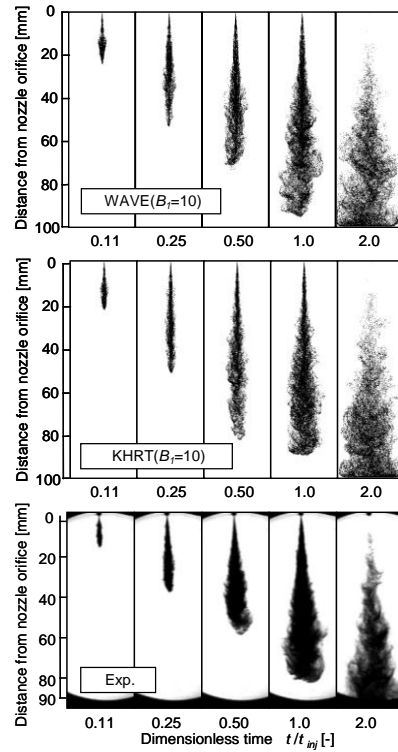


図7 分裂モデルの影響

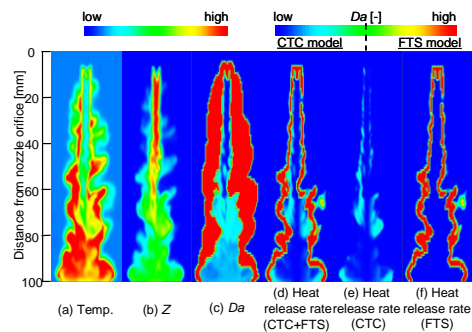


図8 各種の噴霧内分布

蒸発噴霧の混合率は、噴霧上流域の噴霧軸近辺で高い。温度は噴霧の中流域から先端部にかけて高くなる。ダムケラ数は噴霧周縁部で大である。すなわち、この領域で化学反応律速の予混合的燃焼が進行する。これは当噴霧の連続高速度撮影画像の傾向に一致する。CTC, FTS, CTC+FTSによる結果は、ダムケラ数の分布に対応する。

図9に熱発生率の実験と計算によって得た時間経過を示す。CTC+FTSは、ダムケラ数によってCTCおよびFTSをスイッチングして計算した熱発生率である。

第一ピークすなわち予混合的燃焼期間はCTC+FTSの手法によれば、実験と良い一致を見る。第二ピークすなわち拡散的燃焼期間では、予測値は実験場合より低く、またFTSではとくに噴射終了後に実験値よりも大になる。これは、数値粘性の影響が大きいためである。

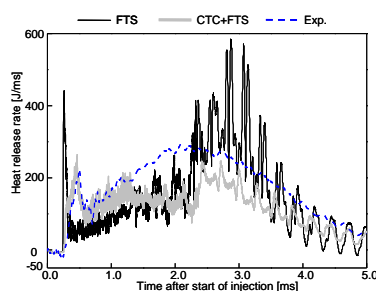


図9 熱発生率時間経過の予測と実験結果の比較

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4件：いずれも査読有)

1. 入江恭亮, 町田和也, 堀司, 森吉泰生, 千田二郎, 藤本元, 燃焼形態を考慮した燃焼モデルによるディーゼル噴霧火炎のLES解析, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 45巻, 3号, 120-126頁, (2010).
2. Fujimoto, H., Hori, T., Senda, J., Nakagawa, H., Kamata, S., Katsuta, K., Visualization of Micro Structure in a Diesel Spray by Use of Photography with High Spatial Resolution, SAE Technical Paper, No. 2008-01-2465, pp.1-9, (2008).
3. Hori, T., Kuge, T., Senda, J., Fujimoto, H., Effect of Convective Schemes on LES of Fuel Spray by Use of KIVALES, SAE Technical Paper, No. 2008-01-0930, pp.61-69 (2008).
4. 鎌田修次, 勝田圭一, 堀司, 千田二郎, 藤本元, 高解像度撮影法によるディーゼル噴霧構造の可視化, 微粒化, 17巻, 58号, 59-66頁, (2008).

[学会発表] (計24件)

1. 矢野, 丸林, 堀, 千田, 藤本, 多重露光によるディーゼル噴霧構造の計測, 第19回微粒化シンポジウム, 2010年12月22日, 日本大学理工学部
2. 羽鳥, 町田, 堀, 千田, 藤本, LES解析を用いたディーゼル噴霧における分裂モデルの最適化, 第19回微粒化シンポジウム, 2010年12月22日, 日本大学理工学部
3. Fujimoto, H., Irie, K., Machida, K., Hatori, S., Senda, J., Hori, T., Simulation of Non-evaporating, Evaporating and Burning Diesel Spray by Use of KIVALES”, The 13th International Symposium on Technology for Next Generation Vehicle, 2010.11.19, 全南大学校 (韓国光州市) 招待講演
4. 町田, 羽鳥, 堀, 千田, 藤本, 乱流特性時間がディーゼル噴霧火炎のLES解析に与える影響, 第21回内燃機関シンポジウム, 2010年11月12日, 岡山大学創立五十周年記念館
5. 矢野, 丸林, 堀, 千田, 藤本, ディーゼル噴霧構造の時空間計測手法の確立, 第21回内燃機関シンポジウム, 2010年11月11日, 岡山大学創立五十周年記念館
6. Fujimoto, H., Adachi, H., Yano, T., Hori, T., Senda, J., 2-D Detection of Droplets in a Diesel Spray with Super High Resolution, 10th International SAOT Workshop on Optical Metrology ” Spray Diagnostics” 2010年10月12日, Erlangen University, (ドイツErlangen市) 招待講演
7. 矢野, 丸林, 堀, 千田, 藤本, ディーゼル噴霧構造の時空間計測への展開, 2010年日本機械学会年次大会, 2010年9月8日, 名古屋工業大学
8. 町田, 羽鳥, 堀, 森吉, 千田, 藤本, 移流スキームがディーゼル噴霧のLES解析に与える影響, 2010年日本機械学会年次大会, 2010年9月7日, 名古屋工業大学
9. Fujimoto, H., Adachi, H., Yano, T., Hori, T., Senda, J., Spatial Droplets Size Distribution in a Diesel Spray Taken by Photography with Super High Resolution, 23rd Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, ILASS Europe, 2010年9月7日, Brno University of Technology, (チェコBrno市) 招待講演
10. 足立, 矢野, 堀, 千田, 藤本, ディーゼル噴霧特性の超高解像度計測, 2009年度日本機械学会年次大会, 2010年3月16日, 神戸大学
11. 町田, 入江, 堀, 森吉, 千田, 藤本, 4次精度のルンゲクッタ法を用いた非蒸

- 発場におけるディーゼル噴霧の LES 解析, 第 18 回微粒化シンポジウム, 2009 年 12 月 18 日, 九州大学医学部百年講堂
- 1 2. 足立, 矢野, 堀, 千田, 藤本, 超高解像度撮影法を用いたディーゼル噴霧液滴の三次元計測手法の構築, 第 18 回微粒化シンポジウム, 2009 年 12 月 18 日, 九州大学医学部百年講堂
 - 1 3. Hori, T., Moriyoshi, Y., Senda, J., Tanaka, H., Irie, K., Machida, K., Fujimoto, H., Application of Large Eddy Simulation to Diesel Spray Validation using Rayleigh Scattering Method, KSAE 2009 Annual Conference and Exhibition, 2009 年 11 月 24 日, 仁荷工科大学校 (韓国仁川市)
 - 1 4. 矢野, 足立, 堀, 千田, 藤本, 超高解像度撮影法を用いたディーゼル噴霧液滴の空間分布計測, 2009 年自動車技術会秋季大会, 2009 年 10 月 9 日, 仙台国際センター
 - 1 5. 入江, 町田, 堀, 森吉, 千田, 藤本, 燃焼形態を考慮した燃焼モデルによるディーゼル噴霧火炎の LES 解析, 第 79 回マリンエンジニアリング学会学術講演会, 2009 年 9 月 18 日, メルパルク広島
 - 1 6. 入江, 町田, 堀, 森吉, 千田, 藤本, 特性時間スケールを考慮した Flamelet モデルによるディーゼル噴霧火炎の LES 解析, 第 20 回内燃機関シンポジウム, 2009 年 9 月 2 日, 早稲田大学理工学部
 - 1 7. Fujimoto, H., Hori, T., Katsuta, K., Adachi, H., Senda, J., 2-D Spatial Distribution of Droplets in a Diesel Spray by Means of Direct Photography with Super High Resolution, 2009 International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, 2009 年 7 月 29 日, Vail Conference Center (米国 Vail 市)
 - 1 8. 勝田, 堀, 千田, 藤本, 超高解像度撮影法を用いたディーゼル噴霧構造の観察, 第 17 回微粒化シンポジウム, 2008 年 12 月 19 日, 慶應義塾大学
 - 1 9. 田中, 堀, 入江, 千田, 藤本, レイリー散乱光撮影および KIVA-LES によるディーゼル蒸発噴霧の濃度分布解析, 2008 年自動車技術会秋季大会, 2008 年 10 月 23 日, 名古屋国際会議場
 - 2 0. 堀, 田中, 入江, 千田, 藤本, Large Eddy Simulation によるディーゼル蒸発噴霧の解析 (レイリー散乱光撮影による計算精度の検証), 第 78 回マリンエンジニアリング学会学術講演会, 2008 年 9 月 17 日, ウェルシティ長崎
 - 2 1. 勝田, 鎌田, 堀, 千田, 藤本, 高解像度撮影法を用いたパイロット噴霧計測, 2008 年度日本機械学会年次大会, 2008 年 8

月 5 日, 横浜国立大学

- 2 2. Hori, T., Tanaka, H., Irie, K., Senda, J., Fujimoto H., Large Eddy Simulation of Diesel Spray Flame using KIVALES with Flamelet model and CIP scheme, 7th International Conference on Modeling and Diagnostics for Advanced Engine Systems (COMODIA) 2008, 2008 年 7 月 29 日, 北海道大学
- 2 3. 堀, 田中, 入江, 千田, 藤本, Flamelet モデルによるディーゼル噴霧火炎の LES 解析, 2008 年自動車技術会春季大会, 2008 年 5 月 23 日, パシフィコ横浜
- 2 4. Hori, T., Tanaka, H., Senda, J., Fujimoto, H., Large Eddy Simulation of Diesel Spray Flame using KIVALES with Flamelet Model and CIP scheme, IEA Combustion Agreement Fuel Spray Workshop in Detroit, 2008 年 4 月 18 日, Cobo Hall (米国 Detroit 市)

[その他]
ホームページ等
<http://comb.doshisha.ac.jp>

6. 研究組織

- (1) 研究代表者
藤本 元 (FUJIMOTO HAJIME)
同志社大学・理工学部・教授
研究者番号: 9 0 0 5 1 6 3 0
- (2) 研究分担者
千田 二郎 (SENDA JIRO)
研究者番号: 3 0 2 2 6 6 9 1
同志社大学・理工学部・教授
- (3) 連携研究者
無し