

# レーザ応用計測技術の工業応用展開プロジェクト

出口 祥啓<sup>1\*</sup>, 木戸口 善行<sup>1</sup>, 名田 譲<sup>1</sup>, 太田 光浩<sup>1</sup>

## Project toward development of industrial application on laser diagnostics

by

Yoshihiro Deguchi, Yoshiyuki Kidoguchi, Yuzuru Nada, Mitsuhiro Ota

The demands for lowering the burdens on the environment will continue to grow steadily. It is important to monitor controlling factors in order to improve the efficiency of industrial systems and machinery such as engines, boilers and gas turbines. In particular, detailed measurement techniques for their parameters such as temperature and species concentrations are necessary to elucidate the overall nature of industrial systems. In Tokushima University the project named “Development of Industrial Applications on Laser Diagnostics (DIALD)” has been promoted for the purpose of elucidating the mechanisms and improving the efficiency of engines, boilers, gas turbines and so on. In this project, laser diagnostics such as computed tomography-tunable diode laser absorption spectroscopy (CT-TDLAS), laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS), Raman spectroscopy and time-of-flight mass spectrometry (TOFMS) have been developed and applied to practical industrial fields. A consortium on CT-TDLAS including 11 institutes (2015 fiscal year) has also been organized and several joint researches have been performed toward practical applications. This report shows the research results of CT-TDLAS in the field of combustion analyses and applications to engines, boilers and gas turbines are discussed as a part of applications in the DIALD project.

**KEY WORDS:** spark ignition engine, measurement, 2D Concentration and Temperature, TDLAS, CT

### 1. ま え が き

地球温暖化、化石燃料の枯渇、環境汚染等の防止の観点から、様々な分野で地球環境保全やエネルギーの有効利用の重要性が指摘されている。このような背景から、ボイラ、エンジン、ガスタービンなど、工業的に活用されているエネルギー生産手段の高効率化が急務となっている。このニーズに対応するためには、使用されている工業システムのキーとなる制御因子を明確化し、その制御を行うことが重要となる。例えば、燃焼現象を用いた機器では、温度分布や各種成分濃度分布を可視化し、燃焼の内部構造を明らかとすることが必要

となる。

近年、高感度・高応答の計測手段として、レーザ応用計測技術が研究開発されてきている<sup>(1)-(4)</sup>。徳島大学でも、レーザ応用計測技術の工業応用展開プロジェクト(Development of Industrial Applications on Laser Diagnostics : DIALD)の一環として、半導体レーザ吸収法 (TDLAS: tunable diode laser absorption spectroscopy)<sup>(5)</sup>、レーザ誘起ブレイクダウン法 (LIBS: laser-induced breakdown spectroscopy)<sup>(5),(6)</sup>、ラマン散乱法<sup>(7)</sup>、飛行時間型質量分析法 (TOFMS: time-of-flight mass spectrometry) <sup>(6)</sup>などの工業プロセスへの応用展開を進めている。また、半導体レーザ吸収法に CT(Computed Tomography)を組合せた CT 半導体レーザ吸収法<sup>(1), (5), (8)-(17)</sup>を研究開発し、自動車、重工業分野などを含む 11 機関 (2015 年度) によるコンソーシアムを設立して基礎技術開発とボイラ、エンジン、ガスタービンなどへの応用展開を図っている。本報告では、

1) 徳島大学大学院理工学研究部

Graduate school of Science and Technology, Tokushima University

\*連絡先：〒770-8506 徳島県徳島市南常三島町 2-1

徳島大学大学院理工学研究部

[ydeguchi@me.tokushima-u.ac.jp](mailto:ydeguchi@me.tokushima-u.ac.jp)

徳島大学における CT 半導体レーザ吸収法の開発状況を報告するとともに、ボイラ、エンジン、ガスタービンなどへの応用展開に関して説明する。

## 2. 理論

### 2.1. 吸収法

吸収法は気体分子が化学種に特有の波長の赤外線を吸収する性質及びその吸収量の温度・濃度依存性を利用した計測法であり、入射光が光路長の一様な吸収媒体を通過するとき、入射光と透過光の強度の比( $I_\lambda/I_{\lambda 0}$ )により濃度や温度を計測することができる。この関係は Lambert-Beer 則に従う<sup>(1)</sup>。

$$I_\lambda / I_{\lambda 0} = \exp\{-A_\lambda\} \\ = \exp\left\{-\sum_i \left( n_i L \sum_j S_{i,j}(T) G_{v,i,j} \right)\right\} \quad (1)$$

ここで  $A_\lambda$  は吸光度、 $n_i$  は成分  $i$  の分子数密度、 $L$  は光路長、 $S_{i,j}(T)$  は  $j$  遷移における吸収線強度、 $T$  は温度、 $G_{v,i,j}$  は吸収線のブロードニング関数であり、通常 Voigt 関数で表される<sup>(1)</sup>。吸収線強度は温度と濃度に依存し、スペクトル形状から温度をスペクトル強度から濃度を算出することが可能となる。スペクトル形状の評価では、温度・圧力の変化に伴う吸収線のブロードニング効果を適切に取り扱う必要がある。

### 2.2. CT

吸収法では、光を照射した光路上で吸収が起こるため、信号強度は光路上の積算値となる。吸収法を用いて 2 次元分布を求めるためには、CT の適用が必要となる。図 1 に CT 解析格子形状を示す。太実線が解析セル、破線が解析するレーザラインを示している。1 成分を考慮した場合、各吸収ラインにおける信号強度は以下の関係式で表わされる<sup>(14) (17)</sup>。

$$A_{\lambda,p} = \sum_q n_q L_{p,q} \alpha_{\lambda,q} \quad (2)$$

ここで  $A_{\lambda,p}$  はパス  $p$  における吸光度、 $n_q$  はグリッド  $q$  における分子数密度、 $L_{p,q}$  はグリッド  $q$  を通る  $p$  方向のパス長、 $\alpha_{\lambda,q}$  はグリッド  $q$  における吸収係数である。本研究では、初期の温度、水蒸気濃度を仮定し、式(1)-(2)を用いて繰り返し計算を行うことにより、実験スペクトルと理論スペクトルの誤差が最小となるよう、温度、濃度分布を収束させる手法を用いている<sup>(14) (17)</sup>。本手法では、計測領域上の温度、濃度を変数とし、式(3)の値が最小となる多変数を決定する。また、理論スペクトルには、HITRAN データベース<sup>(18)</sup>を改良したデータベースを用い、精度向上を図った。

$$Error = \sum \left\{ (A_{\lambda,q})_{theory} - (A_{\lambda,q})_{experiment} \right\}^2 \quad (3)$$

## 3. 実験装置

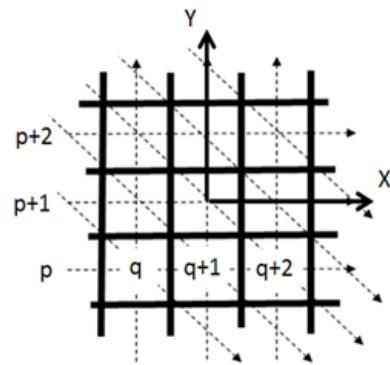


Fig. 1 CT grid and laser path

実験に用いた装置を図 2-3 に示す。本報告では、基礎試験装置として、小型エンジン、定容燃焼器を用いた試験結果を報告する。実験で使用した 16 パス CT 計測セル及び光学系配置を図 2 に示す。レーザ光はファイバスプリッタにより分岐され、コリメータで  $\phi 70\text{mm}$  の測定場に照射される。透過光はフォトダイオード(浜松フォトニクス, G8370-01)によって検知され、記録計(日置電気, メモリハイコーダ 8861)に取り込んだ。

小型エンジン排ガス中  $\text{NH}_3$  計測装置を図 3(a) に示す<sup>(14)</sup>。本実験では  $\text{NH}_3$  添加排ガスでの時系列 2 次元濃度を計測した。実験で用いたエンジン(富士重工業, EX13)の排管は内径 40mm、長さ 160mm で、その中心に位置する  $\text{NH}_3$  噴射管は内径 8mm である。計測セルのレーザ照射面と  $\text{NH}_3$  噴射口の距離は 10mm とし、エンジンをアイドリング状態(1200~1300rpm)で計測を行った。 $\text{NH}_3$  噴射口からは濃度 2% (バッファガス:  $\text{N}_2$ ) の  $\text{NH}_3$  ガス(流量 60 l/min)を断続的にエンジン排ガス中に噴射した。光源には  $\text{NH}_3$  及び  $\text{H}_2\text{O}$  の吸収帯である 1512nm、及び 1388nm の半導体レーザモジュール (NEL, 1512nm: NLK1S5GAAA, 1388nm: NLK1E5GAAA) を用いた。 $\text{H}_2\text{O}$  用レーザは温度計測用として使用した。各半導体レーザはレーザ温度及び印加電流をコントロールし、レーザ発振波長を制御した。

定容燃焼器を用いた試験装置を図 3(b) に示す<sup>(17)</sup>。定容燃焼器に図 2 に示す CT 計測セルを設置した。燃料にはメタンと空気の混合気を使用し、初期圧を大気圧、当量比を 1 とし、点火プラグを放電させて燃料ガスに点火し、燃料ガスの火炎伝播により燃焼室内圧力を上昇させた。高圧域における 2 次元温度分布計測の特性評価のため、DFB 型 (NTT エレクトロニクス社 NLK1E5GAAA : 1388nm 及び NLK1S5GAAA : 1343nm) 及び外部共振型 (Santec 社 HSL -200-30-TD : 1330nm~1370nm) の 2 種類のレーザを用いた。

## 4. 実験結果および今後の展開

### 4.1. 時系列 2 次元濃度計測結果<sup>(14)</sup>

図 4 に CT 半導体レーザ吸収法を用いた時系列 2 次元  $\text{NH}_3$

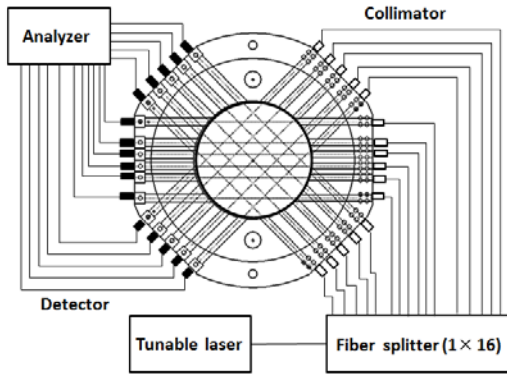
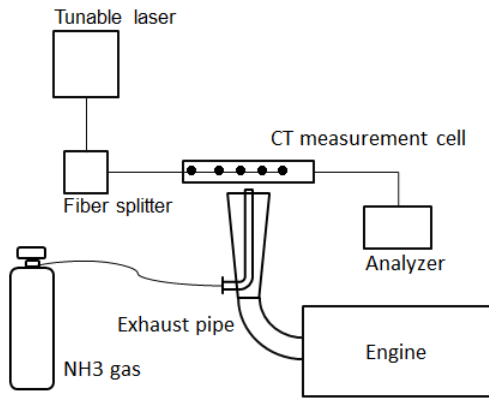
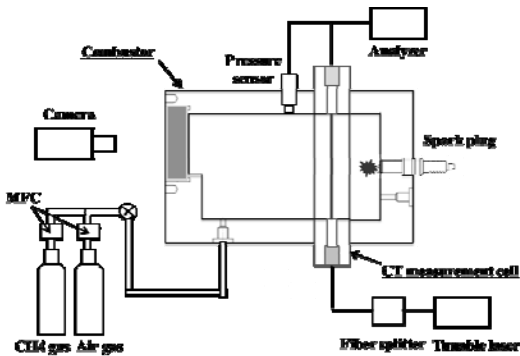


Fig. 2 16 path CT measurement cell



(a) Engine exhaust measurement



(b) Constant-volume high pressure combustor

Fig. 3 Experimental Apparatus

濃度計測結果を示す。本試験では、エンジン排ガスに  $\text{NH}_3$  を添加して時系列 2 次元  $\text{NH}_3$  濃度計測を実施している。また、1512nm 及び 1388nm の半導体レーザー光を合波し、1 波形中に  $\text{NH}_3$  と  $\text{H}_2\text{O}$  のスペクトルを同時に計測して温度と濃度の同時計測を行った。 $\text{NH}_3$  の添加は、計測開始後 0.5 秒後から行い、6 秒後に添加を一時的にストップした。図 4 より、計測セルの中央部に高濃度域が存在し、中央部から 7mm 付近にかけて濃度は低下している。10mm 近辺以降、濃度はほぼ検出されていない。また、計測開始後 0.5 秒、6 秒での濃度変化を的確に捉えており、エンジン排ガス中にて時系列 2 次元  $\text{NH}_3$  濃度計測が可能であることを実証した。

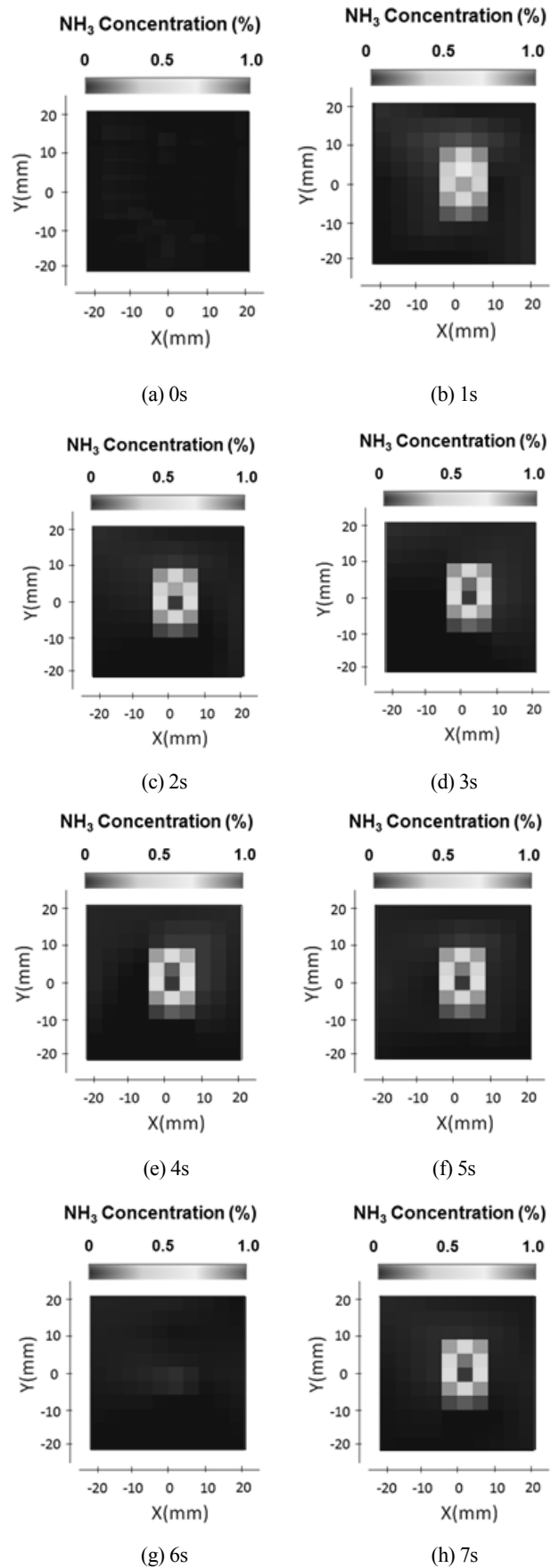


Fig. 4 2D  $\text{NH}_3$  concentration measurement results<sup>(14)</sup>

#### 4.2 高温・高圧域における2次元温度分布計測結果<sup>(17)</sup>

定容燃焼器を用いて、高温・高圧域における2次元温度分布計測を実施した。図5に燃焼させた際の点火プラグへのトリガ信号と圧力波形を、図6に火炎認識可能画像を基準とした燃焼画像を示す。点火プラグを用いた着火後、30ms後に火炎が定容燃焼器内壁に到着し、90msに最高圧に達している。図7にCT半導体レーザー吸収法を適用することにより得られた $t=30\text{ms}$ 及び $t=100\text{ms}$ における2D温度分布計測結果を示す。本試験にて高温・高圧火炎中において、時系列2次元温度計測が可能であることを実証した。

CT半導体レーザー吸収法は、時系列2次元温度・濃度計測が可能である他、レーザーの波長スキャン毎に計測対象領域を透過するレーザー光強度を補正できる特長を有しており、実用燃焼機器における窓汚れや光軸ずれなどの影響をキャンセルできる。図8にエンジン、ボイラ、ガスタービンへの適用構想を示す。これら燃焼機器において、時系列2次元温度・濃度分布はシステムの性能向上に重要な要因であり、CT半導体レーザー吸収法コンソーシアムにて、上記燃焼機器を含めた工業システムへの実用化を推進している。

#### 5. まとめ

レーザー応用計測技術の工業応用展開プロジェクトの一環として推進している半導体レーザー吸収法コンソーシアムの開発状況を報告した。CT半導体レーザー吸収法は、時系列2次元温度・濃度計測が可能であり、エンジン排ガス並びに定容燃焼器での計測により、高温・高圧を含む幅広い条件下で本手法

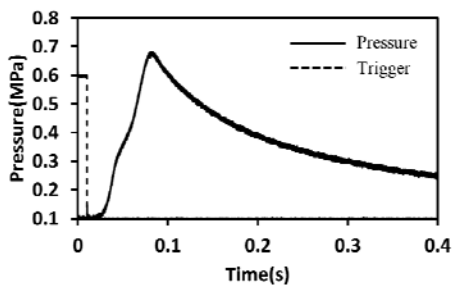


Fig. 5 Pressure history in combustor<sup>(17)</sup>

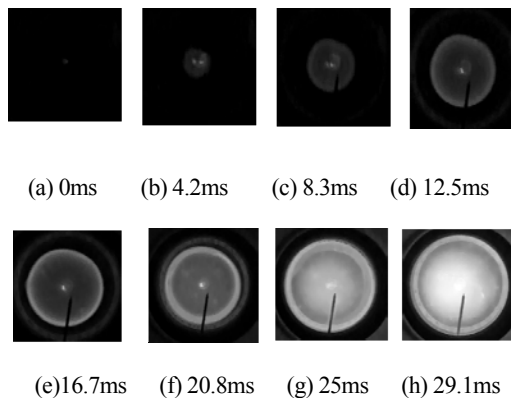
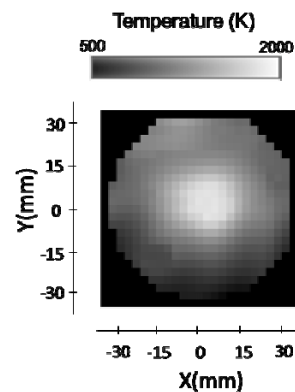


Fig. 6 Photographs of flame measured by the CCD camera<sup>(17)</sup>

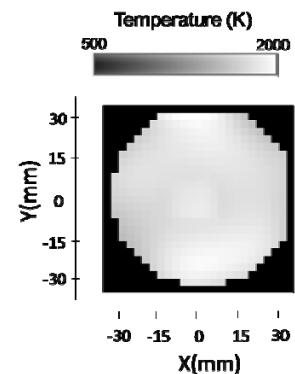
の有効性を実証した。また、レーザーの波長スキャン毎に計測対象領域を透過するレーザー光強度を補正できる特長を有しており、実用場への適用で生じる窓汚れや光軸ずれなどの影響をキャンセルできる。今後、エンジン、ボイラ、ガスタービンなどの燃焼機器を含めた各種工業システムへの実用化を推進する予定である。

#### 参考文献

- (1) Y. Deguchi : Industrial applications of Laser Diagnostics, Chapter 6, CRS Press, Taylor & Francis, (2011).
- (2) M. Yamakage, K. Muta, Y. Deguchi, S. Fukada, T. Iwase, and T. Yoshida : Development of Direct and Fast Response Exhaust Gas Measurement, SAE Paper 2008-1298, (2008).
- (3) Y. Deguchi, M. Noda, M. Abe, and M. Abe : Improvement of Combustion Control through Real-time Measurement of O<sub>2</sub> and CO Concentrations in Incinerators Using Diode Laser Absorption Spectroscopy, Proceedings of the Combustion Institute, Vol.29, pp.147-153, (2002).
- (4) Y. Zaatar, J. Bechara, A. Khoury, D. Zaouk, and J.-P. Charles : Diode laser sensor for process control and environmental monitoring, Applied Energy, Vol.65, pp.107-113, (2000).



(a)  $t=30\text{ms}$



(b)  $t=100\text{ms}$

Fig. 7 2D temperature distributions measured by CT-TDLAS with DFB type laser diode<sup>(17)</sup>

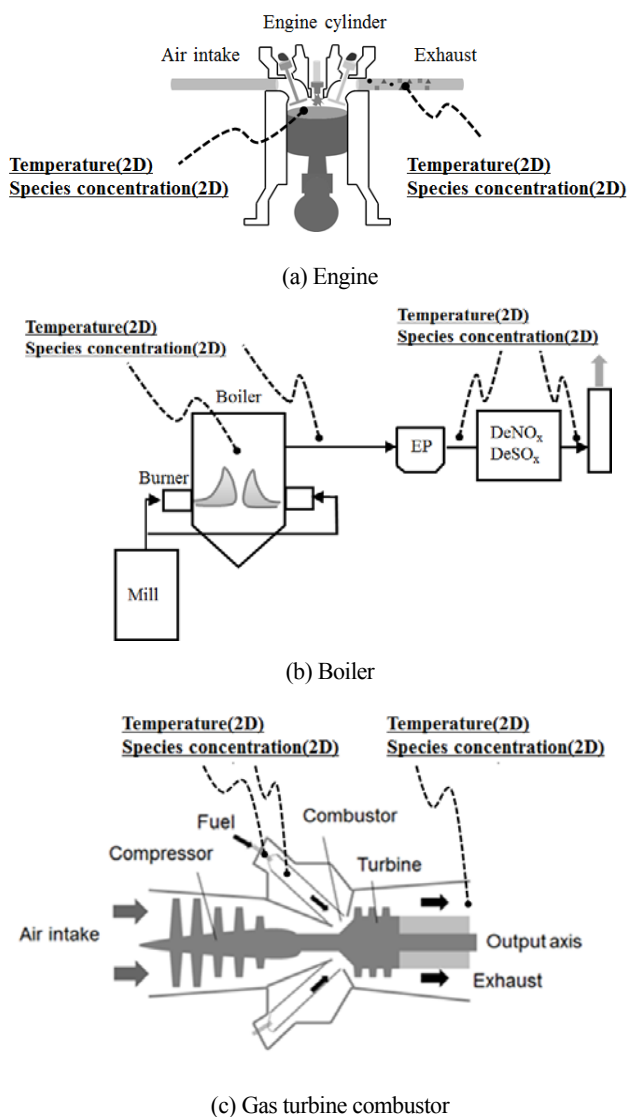


Fig. 8 Applications of CT-TDLAS to practical combustors

- (5) Y. Deguchi, T. Kamimoto, Z.Z. Wang, J.J. Yan, J.P. Liu, Hiroaki Watanabe and Ryoichi Kurose: Applications of laser diagnostics to thermal power plants and engines, *Applied Thermal Engineering*, Vol.73, No.2, pp. 1453–1464, (2014).
- (6) Z.Z. Wang, Yoshihiro Deguchi, Junjie Yan and Jiping Liu : Comparison of the Detection Characteristics of Trace Species Using Laser-Induced Breakdown Spectroscopy and Laser Breakdown Time-of-Flight Mass Spectrometry, *Sensors*, Vol.15, pp.5982-0860, (2015).
- (7) T. Kamimoto, Yoshihiro Deguchi, Y. Shisawa, Y. Kitauchi, Y. Eto : DEVELOPMENT OF FUEL COMPOSITION MEASUREMENT TECHNOLOGY USING LASER DIAGNOSTICS, *Applied Thermal Engineering*, Vol.102, pp. 596–603, (2016).
- (8) P.Wright, N. Terzijaa, J. L. Davidsona, S. Garcia-Castillo, C. Garcia-Stewart, S. Pegrumb, S. Colbourneb, P. Turnerb, S. D.

Crossleyc, T. Litt, S. Murrayc, K. B. Ozanyana, and H. McCanna : High-speed chemical species tomography in a multi-cylinder automotive engine, *Chemical Engineering Journal*, Vol.158, No.1, pp. 2–10, (2010).

- (9) Lin Ma, Xuesong Li, Scott T. Sanders, Andrew W. Caswell, Sukesh Roy, David H. Plemmons, and James R. Gord :50-kHz-rate 2D imaging of temperature and H<sub>2</sub>O concentration at the exhaust plane of a J85 engine using hyperspectral tomography, *Optics Express*, Vol.21, No.1, pp. 1152-1162, (2013).
- (10) Cai,W. and Kaminski,C.F.: A tomographic technique for the simultaneous imaging of temperature, chemical species, and pressure in reactive flows using absorption spectroscopy with frequency agile Lasers; *Applied Physics Letters*, Vol.104, pp.034101/1 - 034101/5, (2014).
- (11) An, X., Kraetschmer T.,Takami, K., Sanders S. T., Ma, L., Cai, W., Li X., Roy S. and Gord, J.R. : Validation of temperature imaging by H<sub>2</sub>O absorption spectroscopy using hyperspectral tomography in controlled experiments; *Applied Optics*, Vol.50, No.4, pp.A29 -A37, (2011).
- (12) Ma, L., Li, X., Sanders S. T., Caswell, A.W., Roy, S., Plemmons, D.H. and Gord J.R.: 50-kHz-rate 2D imaging of temperature and H<sub>2</sub>O concentration at the exhaust plane of a J85 engine using hyperspectral tomography; *Optics Express*, Vol.21, No.1, pp. 1152-1162, (2013).
- (13)出口, 安井, 足立: CT 利用半導体レーザー吸収法によるリアルタイム 2 次元温度計測のエンジン排ガスへの適用, *自動車技術会論文集*, Vol.44, No.2, pp.251-256, (2013).
- (14) 出口, 神本, 清田: CT 半導体レーザー吸収法を用いた 2 次元濃度計測の精度評価”, *自動車技術会論文集*, Vol.45, No.6, pp. 965-970, (2014).
- (15) 神本 崇博, 出口 祥啓, Doowon Choi, 安井 大祐, Joonhwan Shim : CT 半導体レーザー吸収法を用いた 2 次元温度計測の精度検証, *自動車技術会論文集*, Vol.45, No.1, pp.75-81, (2014).
- (16) 神本, 出口, 清田: CT 半導体レーザー吸収法を用いた高温域における 2 次元温度分布計測の特性評価, *自動車技術会論文集*, Vol.45, No.6, pp.971-976, (2014).
- (17) 神本, 出口, 高木琢,木戸口,名田: CT 半導体レーザー吸収法を用いた高温・高圧域における 2 次元温度分布計測の特性評価, *自動車技術会論文集*, Vol.46, No.6, pp.1031-1037, (2015).
- (18) L.S. Rothman, I.E.Gordon, A.Barbe, et al.: The HITRAN2008 molecular spectroscopic database, *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, Vol.110, p. 533-572, (2009).