

CT 半導体レーザー吸収法を用いたエンジン筒内の 2次元時系列温度分布計測*

出口 祥啓¹⁾ 高木 琢²⁾ 神本 崇博³⁾ 岡本 智美⁴⁾ 渡邊 直人⁵⁾

Time-series Two-dimensional Temperature Measurement Inside the Engine Cylinder Using Computed Tomography-Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy

Yoshihiro Deguchi Taku Takagi Takahiro Kamimoto Tomomi Okamoto Naoto Watanabe

The non-contact and time-series two-dimensional (2D) temperature measurement method has been developed using computed tomography-tunable diode laser spectroscopy (CT-TDLAS) to elucidate the engine combustion phenomena. 2D temperature were evaluated by H₂O absorption spectra measured inside an engine cylinder using a 16-path CT cell. The 16-path CT cell was installed between the engine head and engine cylinder without structural change of the single-cylinder engine. Wide-wavelength scanned multi-path laser beams were simultaneously introduced to the engine cylinder and simultaneous time-series two-dimensional temperature distributions were reconstructed to elucidate the engine combustion phenomena. It was demonstrated that time resolved temperatures of multi-laser path were measured at 0.1-4MPa pressure conditions and time resolved 2D temperature distributions were successfully reconstructed using a revised H₂O absorption data base.

KEY WORDS: heat engine, spark ignition engine, measurement, 2D Concentration and Temperature, TDLAS, CT (A1)

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, エンジンのように燃焼現象をエネルギー生産手段として活用する場において, その構造や過渡的な振舞いを詳しく解明することが急務となっている. このニーズに対応するためには, 温度分布や各種成分濃度分布を可視化し, 火炎の詳細構造を明らかにすることが必要である. エンジン負荷時における排気ガス温度分布やエンジン筒内の燃焼現象の解明, 未燃ガス排出低減等を実現させるために, エンジン構造を変化させることなく, エンジン筒内において 2 次元温度・濃度分布を高応答で時系列的に計測することが望まれる.

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おり, 半導体レーザー吸収法を活用した高応答・多成分同時(CO₂, NH₃, NO, CO, CH₄, 温度)計測が開発されている⁽¹⁾⁽⁵⁾. このような技術開発により, エンジンの過渡応答現象は解明されつつあり, エンジン立上げ時の排気ガス挙動は徐々に把握可能となってきている⁽¹⁾⁽²⁾⁽⁵⁾. 一方, レーザ誘起蛍光法などの多くの手法がエンジン筒内計測にも応

用されてきているが, 計測用窓の組み込みなど, 計測用にエンジンの改造を要し, エンジン構造を改造することなく, 筒内の時系列温度・濃度分布を計測できる手法の開発が望まれている. 本研究では, エンジン筒内の燃焼特性を明確にするため, 半導体レーザー吸収法に CT(Computed Tomography)を組合せた CT 半導体レーザー吸収法⁽⁶⁾⁽¹⁸⁾を活用し, エンジン筒内における 2 次元時系列温度計測を実施した. この方法では, エンジンヘッド下部に CT 計測セルを挟み込むことにより, エンジン構造を改造することなく, エンジン筒内の 2 次元温度・濃度分布が計測できるメリットを有する. 広波長域を高速にスキャン可能なレーザー光を複数パス計測場に照射し, 画像再構築を行うことにより, エンジン筒内における 2 次元時系列温度計測を達成した.

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⁽¹⁾.

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

*2016年6月20日受理. 2016年5月26日自動車技術会春季学術講演会において発表.

1)・2)・3) 徳島大学 (770-8506 徳島県徳島市南常三島町 2-1)

4) スズキ(株) (224-0046 神奈川県横浜市都筑区桜並木 2-1)

5) スズキ(株) (432-8611 静岡県浜松市南区高塚町 300)

ここで A_i は吸光度, n_i は準位 i に存在する分子数密度, L は光路長, $S_{ij}(T)$ は準位 i から j への遷移における吸収線強度, T は温度, G_{ij} 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⁽¹⁾. 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⁽¹⁶⁾⁻⁽¹⁸⁾.

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. 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⁽⁶⁾⁻⁽¹⁸⁾.

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

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)-(3)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⁽¹⁶⁾⁻⁽¹⁸⁾. 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⁽¹⁹⁾を改良したデータベースを用い⁽¹⁷⁾, 精度向上を図っている.

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

3. 実験装置

図1にエンジン筒内温度計測システム概要を, 図2にCT計測セルにおけるレーザーパス配置を, 表1にエンジン運転条件を示す. 温度計測に必要な水蒸気吸収スペクトルを計測するために1330-1370nmを波長掃引可能な外部共振器型波長可変半導体レーザー(Santec社 HSL-200-30-TD)を使用した. レーザのスキャン周波数は30kHzである. エンジン筒内のような高圧場ではブロードニング効果により吸収線の重なりが生じ, 吸収線の評価が難しくなるが波長掃引範囲が広いレーザーを使用することで対応することが可能である⁽¹⁷⁾. 照射されたレーザー光はレーザー分光器で16分波され, コリメータ(THORLABS, 50-1310-APC)でエンジン筒内に照射される. 透過光はフォトダイオード(浜松フォトニクス, G8370-01)およびアンプによって検知され, データ収集装置(HIOKI, MR8741)でセーブされる. 計測された信号にCT解析を適用し, エンジン筒内における2次元温度分布を算出した.

計測セルの厚みは10mmとし, 計測セルをエンジンヘッドの下部に挟み込む形で測定部をエンジンに設置した. また, 圧縮比が低下しないよう, 計測セルの厚みを考慮してピストン冠面部を製作した. 16本のレーザーパスは4分割型石英窓(図2(b)参照)を介してエンジン筒内に照射される. 石英窓を4分割とすることで, 窓の耐圧性を向上するとともに, 計測セル内面をエンジン筒内と同径として, ピストンが計測セル内を上下可能な構造としている. 使用したエンジンは, ポート噴射式の火花点火エンジンであり, モータリング条件およびエンジン着火条件にて試験を行なった. また, 着火条件での試

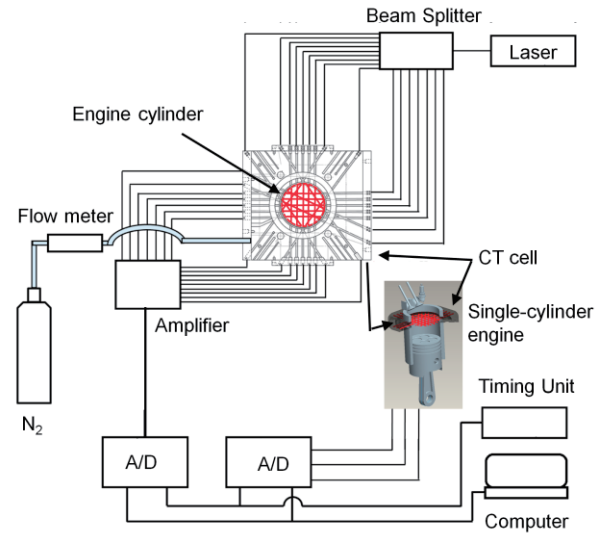
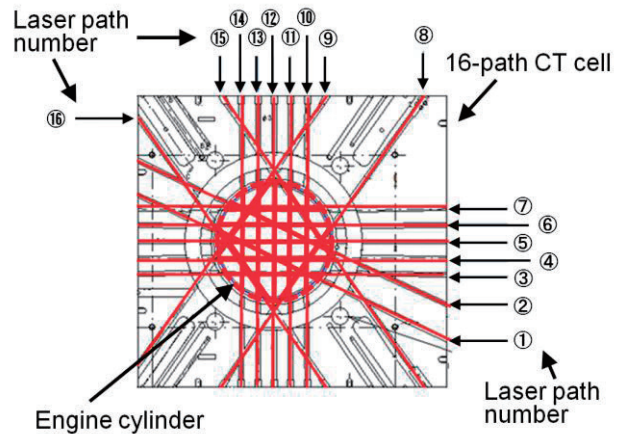
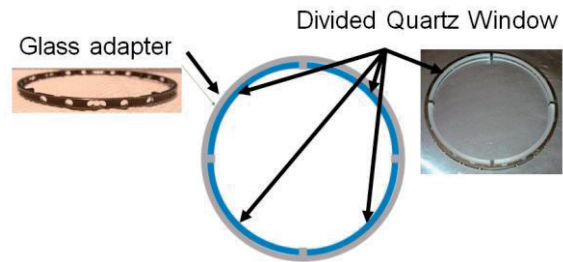


Fig. 1 Experimental Apparatus



(a) 16 laser path configuration in engine cylinder



(b) CT cell window structure

Fig. 2 Structure of CT cell

験では、ガソリンを燃料とし、回転数を 1200-3000rpm, 平均有効圧 200-500kPa, EGR 率 0-17% で運転を行った。

Table 1 Experimental conditions

Test NO.	Operation	Revolution (rpm)	Mean effective pressure (kPa)	EGR ratio (%)
1	Motoring	1200	-	-
2	Firing	1200	200	0
3	Firing	1200	400	0
4	Firing	3000	500	0
5	Firing	2000	300	0
6	Firing	2000	300	17

4. 実験結果および考察

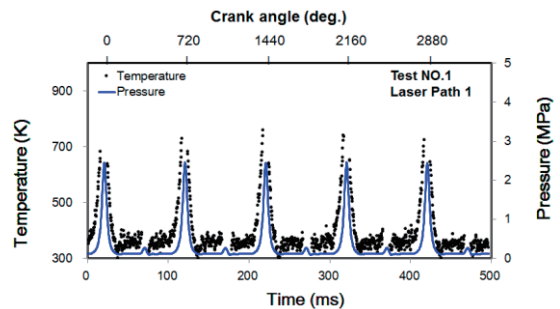
図 3(a) にモータリング条件 (Test NO.1, 回転数 1200rpm) におけるレーザパス 1 の温度計測結果を示す。レーザのスキュー周波数が 30kHz のため、0.033ms 毎にデータが得られるが、吸収スペクトル解析結果に対し 1ms の移動平均を行い、0.33ms 毎の温度データをプロットしている。また、図中の最初の上死点をクランクアングル 0 度としたクランクアングルを併記している。ピストンが上死点近傍で CT 計測セル内部を通過し、レーザ光がピストンでカットされるため、上死点近傍の温度は計測できていない。計測結果より、圧力上昇と共に温度が上昇していることが確認できる。また、図 3(b) に圧力値から求めた断熱温度 (比熱比は空気の値を使用) と計測された温度計測結果との比較を示す。圧縮過程の時間が 20ms と短く、筒内壁面との熱伝達の影響は壁近傍に限られるため、圧縮過程におけるレーザパス上の平均温度は、断熱温度にて近似できる。半導体レーザー吸収法を用いて計測された温度は断熱温度と良い一致を示している。吸気行程に対し、両温度の標準偏差は 19 K であった。

Test NO.2 (回転数 1200rpm) におけるレーザパス 1, 5, 7, 12, 15 での温度計測結果を図 4 に示す。着火による温度上昇が確認される。各パスでの計測される温度の時間履歴はほぼ同一の波形を示しており、計測領域の温度がほぼ一定であることを示している。Test NO.2-6 におけるレーザパス 5 での温度計測結果を図 5 に示す。回転数の違いにより、各条件で異なった温度上昇サイクルが計測されており、本計測法が十分な時間応答性を有しているとともに、高回転条件・高負荷条件においても良好な計測が可能であることを確認した。また、回転数、平均有効圧の違いにより、温度波形が異なった特性を示すことも確認できる。例えば、平均有効圧が高い条件では、着火後の膨張過程で高い温度が維持されていることが確認される。

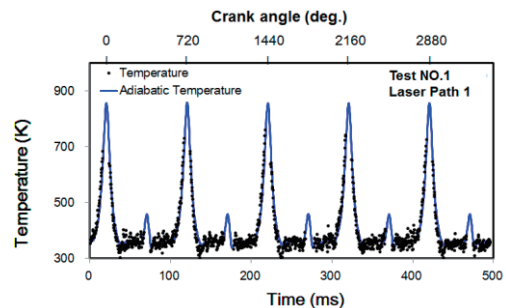
図 6 に Test NO.1 (モータリング条件, 回転数 1200rpm) において画像再構築を行い算出した 2 次元時系列温度分布を、図 7 に Test NO.2 (着火条件, 回転数 1200rpm) における 2 次元時系列温度分布を示す。計測の空間分解能は、レーザパス

数に依存し、その分解能は、各レーザパスの重なりを考慮したレーザパス間隔に依存する⁽¹⁷⁾。今回の 16 パス計測セルでは、計測領域の中心部にて 4mm 程度、筒内壁面近傍で 8mm 程度の空間分解能を有している。

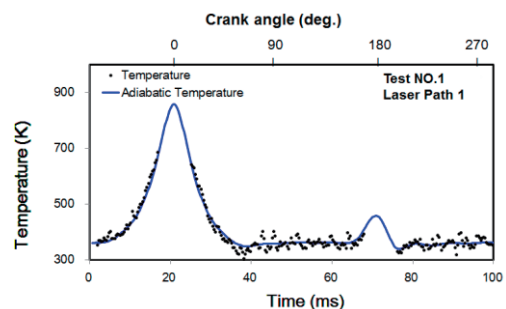
各計測条件において、1 本のレーザ光強度が弱く (レーザパス 8)、精度確保のため、レーザパス 8 を除く 15 本のレーザパスデータを用いて画像再構築を行っている。モータリング条件では、計測領域全面でほぼ均一な温度分布が得られている。また、Test NO.2 における温度分布も、計測領域全面でほぼ均一となっている。これは、着火後において、火炎が燃焼筒内に伝搬した後の温度を計測しているためであり、圧力低下と共に、温度も低下していく結果となっている。今後、同条件における CFD との比較やレーザパス数増加による空間分解能の向上、エンジン筒内における濃度・温度同時計測などを実施していく予定である。



(a) Time resolved temperature of laser path 1

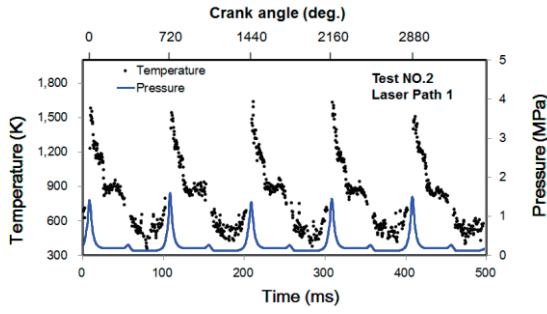


(b) Comparison between measured temperature using TDLAS and adiabatic temperature

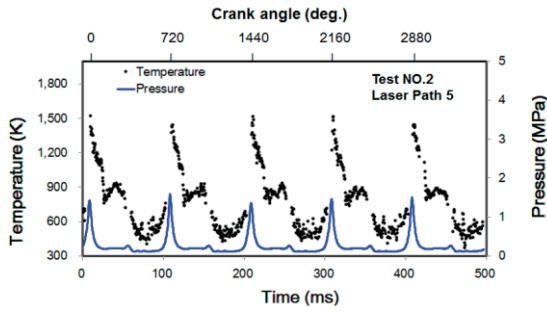


(c) Comparison between measured temperature using TDLAS and adiabatic temperature (0-100ms)

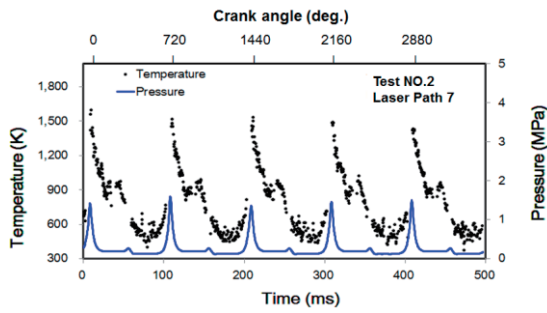
Fig. 3 Experimental results of test NO.1 (laser path 1)



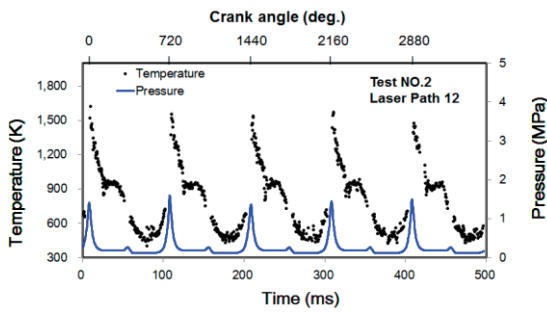
(a) Time resolved temperature of laser path 1



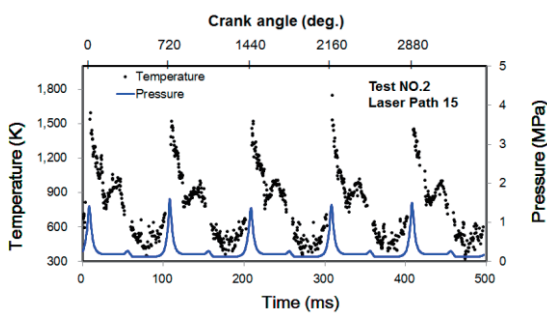
(b) Time resolved temperature of laser path 5



(c) Time resolved temperature of laser path 7

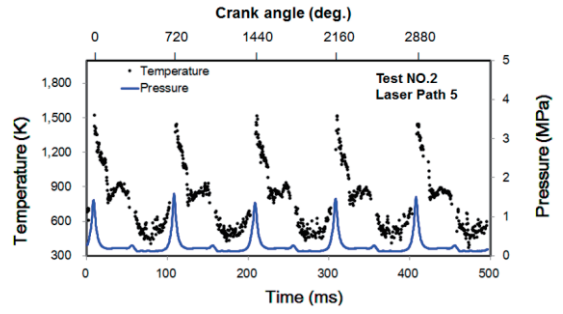


(d) Time resolved temperature of laser path 12

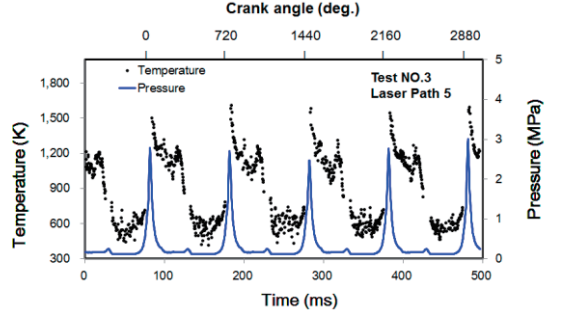


(e) Time resolved temperature of laser path 15

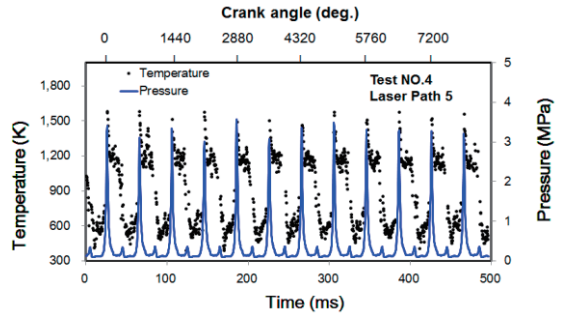
Fig. 4 Experimental results of test NO.2 (laser path 1, 5, 7, 12, 15)



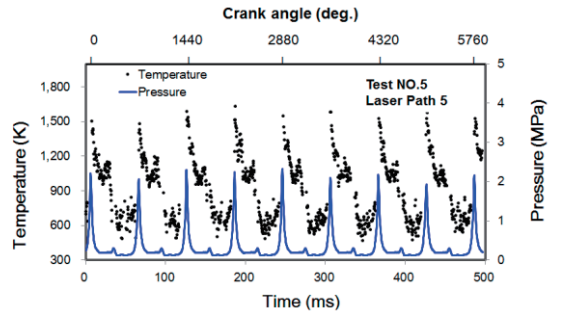
(a) Time resolved temperature of test NO. 2



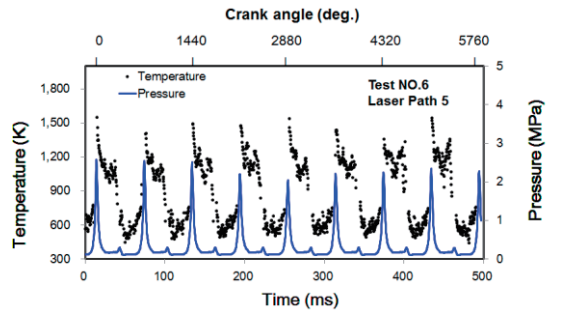
(b) Time resolved temperature of test NO. 3



(c) Time resolved temperature of test NO. 4

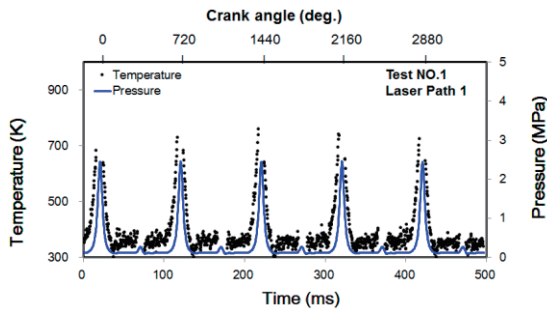


(d) Time resolved temperature of test NO. 5

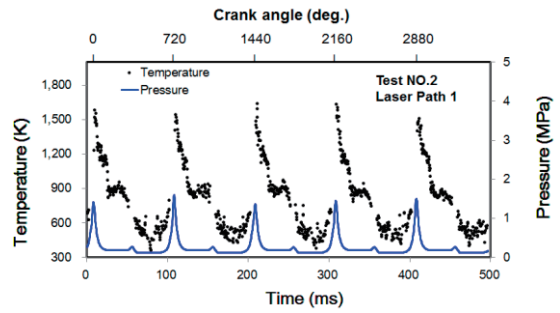


(e) Time resolved temperature of test NO. 6

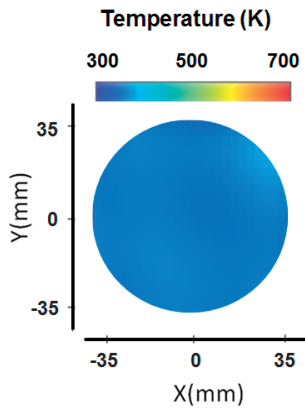
Fig. 5 Experimental results of test NO.2-6 (laser path 5)



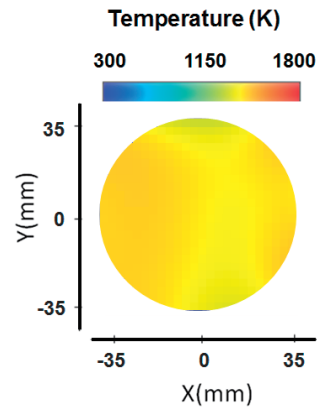
(a) Time resolved temperature of laser path 1



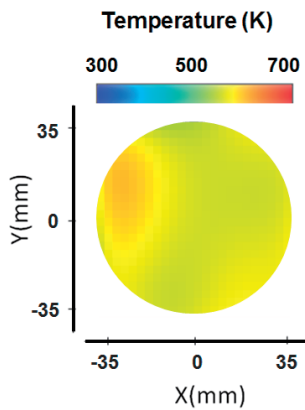
(a) Time resolved temperature of laser path 1



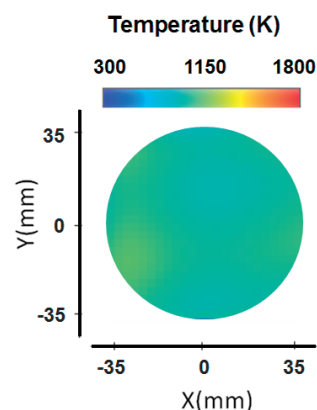
(b) Reconstructed 2D temperature at 3ms (Crank angle:-135deg.)



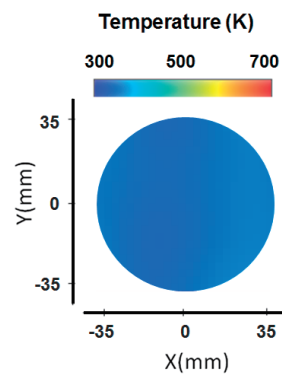
(b) Reconstructed 2D temperature at 13ms (Crank angle:29deg.)



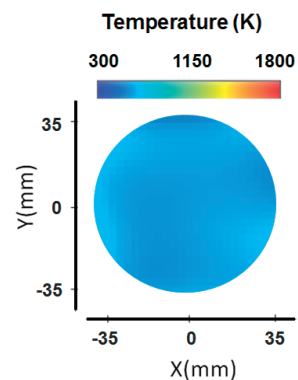
(c) Reconstructed 2D temperature at 16ms (Crank angle:-41deg.)



(c) Reconstructed 2D temperature at 29ms(Crank angle:144deg.)



(d) Reconstructed 2D temperature at 59ms (Crank angle:269deg.)



(d) Reconstructed 2D temperature at 63ms(Crank angle:389deg.)

Fig. 6 Experimental results of reconstructed 2D temperature (test NO.1)

Fig. 7 Experimental results of reconstructed 2D temperature (test NO.2)

5. ま と め

CT 半導体レーザー吸収法を用いて、単気筒エンジン筒内の温度計測を実施した。主な結果を以下に示す。

- 1) 単気筒エンジンに適用可能な CT 計測セルを開発した。4 分割型石英窓構造を採用することにより、エンジン構造を改造することなく、筒内の 2 次元温度計測を可能とした。
- 2) モータリング条件において、エンジン筒内を透過する複数レーザーパスを用いた温度計測が可能であることを実証した。また、各パスにて計測される温度は、圧力値から求めた断熱温度と良い一致を示すことが確認された。両温度の標準偏差は 19 K であった。
- 3) モータリング条件および着火条件において、2 次元時系列温度計測が可能であることを実証した。本研究の 16 パス計測セルでは、計測領域の中心部にて 4mm 程度、筒内壁面近傍で 8mm 程度の空間分解能を有している。レーザーパス数増加により空間分解能を向上することが可能である。

参 考 文 献

- (1) Y. Deguchi : Industrial applications of Laser Diagnostics, Chapter 6, CRS Press, Taylor & Francis, p.167-208, (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 O₂ and CO Concentrations in Incinerators Using Diode Laser Absorption Spectroscopy, Proceedings of the Combustion Institute, Vol.29, p.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, p.107-113, (2000).
- (5) 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, p. 2-10, (2010).
- (6) 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 H₂O concentration at the exhaust plane of a J85 engine using hyperspectral tomography, Optics Express, Vol.21, No.1, p. 1152-1162, (2013).
- (7) 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, p. 1453-1464, (2014).
- (8) 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, p.034101/1 - 034101/5, (2014).
- (9) 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 H₂O absorption spectroscopy using hyperspectral tomography in controlled experiments; Applied Optics, Vol.50, No.4, p.A29 -A37, (2011).
- (10) 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 H₂O concentration at the exhaust plane of a J85 engine using hyperspectral tomography; Optics Express, Vol.21, No.1, p. 1152-1162, (2013).
- (11) Pal, S. and McCann, H: Auto-digital gain balancing: a new detection scheme for high-speed chemical species tomography of minor constituents; Measurement Science and Technology, Vol.22, No.11, p.115304/1-115304/13, (2011).
- (12) Tsenkis, S. A., Tait, N. and McCann, H.: Spatially resolved and observer-free experimental quantification of spatial resolution in tomographic images; Review of Scientific Instruments, Vol.86, No.3, p. 035104/1-035104/17, (2015).
- (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, p.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, p. 965-970, (2014).
- (15) 神本, 出口, Choi, 安井, 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, p.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, p.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, p.1031-1037, (2015).
- (18) 出口, 神本, 高木, モハマト サフェール アラム タハ: CT 半導体レーザー吸収法の空間分解能及び精度評価, 自動車技術会論文集, Vol.47, No.2, p.279-285, (2016).
- (19) 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).