

CT半導体レーザー吸収法を用いたエンジン筒内、排気計測技術

出口 祥 啓*・神 本 崇 博**・岡 本 智 美***・渡 邊 直 人****

*** 徳島大学大学院社会産業理工学部 徳島県徳島市南常三島町 2-1
 **** スズキ (株) 神奈川県横浜市都筑区桜並木 2-1
 ***** スズキ (株) 静岡県浜松市南区高塚町 300
 **, Graduate School of Technology, Industrial and Social Sciences, Tokushima University, 2-1 Minamijosanjimacho, Tokushima, Japan
 ***, SUZUKI MOTOR CORPORATION, 2-1 Sakuranamiki, Tsuzuki-ku, Yokohama, Kanagawa, Japan
 ****, SUZUKI MOTOR CORPORATION, 300 Takatsuka-cho, Minami-ku, Hamamatsu, Shizuoka, Japan

* E-mail: ydeguchi@tokushima-u.ac.jp
 キーワード: エンジン (engine), 燃焼 (combustion), 2次元温度 (2 dimensional temperature), 画像再構成 (computed tomography), 半導体レーザー吸収法 (tunable diode laser absorption spectroscopy).
 JLE 0005/18/5705-0318 © 2018 SICE

1. 緒言

エンジン燃焼場において、燃料の自着火や火炎伝播現象を制御するためには、エンジン筒内や排ガスの温度、濃度分布を明らかとし、その構造や過渡的な振舞いを詳しく解明することが重要である。近年、高感度・高応答の計測手段として、レーザー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、エンジン立上げ時の排ガス挙動などが把握可能となっている^{1), 2), 5)}。一方、半導体レーザー吸収法は、レーザーパス光路の積分値しか計測できないという欠点を有する¹⁾。そのため、計測対象機器の構造を大幅に改造することなく、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た。このニーズに対応するため、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)}が開発され、各種燃焼場や流れ場における2次元時系列温度・濃度計測が可能となっている。この方法では、エンジンなどの計測対象機器にCT計測セルを挟み込むことにより、エンジンの構造を大幅に改造することなく、2次元温度・濃度分布が計測できるメリットを有する。本報告では、CT半導体レーザー吸収法のエンジン排ガス¹³⁾、エンジン筒内2次元温度計測¹⁸⁾への適用例を紹介する。

2. CT半導体レーザー吸収法の理論

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およ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⁾。

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

ここで A_{λ} 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、 $S_{i,j}(T)$ は準位 i から j への遷移における吸収線強度、 T は温度、 $G_{vi,j}$ 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^{15)~17)}。

2.2 CT

吸収法では、光を照射した光路上で吸収が生じるため、吸収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、図1に示すように、複数のレーザーパスを計測対象場に照射し、CTを適用することが必要となる。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 $A_{\lambda,p}$ はレーザーパス 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、 $L_{p,q}$ はレーザーパス p 上のグリッド 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、濃度を仮定し、(1)~(3)式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), 17)}。本手法では、計測領域上の温度、濃度を変数とし、(3)式の値が最小となる多変数を決定した。

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

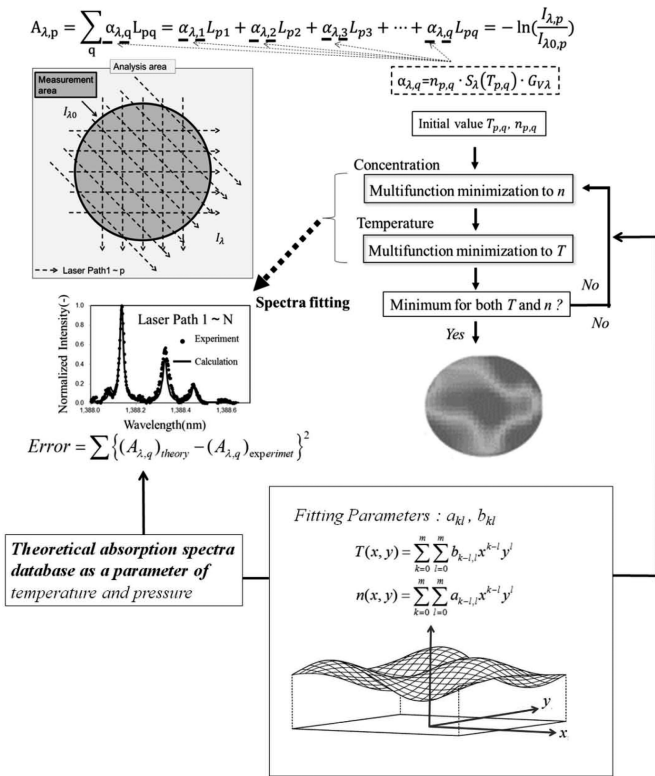


図1 CT アルゴリズム

計算時間短縮のため、初期値データベースを構築し、データベースの一次結合から最適な初期値を選定するアルゴリズムを採用するとともに、温度分布 $T(x,y)$ 、濃度分布 $n(x,y)$ を以下の2次元多項式にて近似し、 a, b を変数としてCT解析を行い、CT解析の安定化を図った。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¹⁶⁾、精度向上を図った。

$$n(x,y) = \sum_{k=0}^m \sum_{l=0}^m a_{k-l} x^{k-l} y^l \quad (4)$$

$$T(x,y) = \sum_{k=0}^m \sum_{l=0}^m b_{k-l} x^{k-l} y^l \quad (5)$$

3. エンジン排ガス計測への応用例¹³⁾

本研究では、CT-TDLAS の尿素 SCR システムへの適用を目的に、ガソリンエンジン排ガスを用いた時系列2次元 NH_3 濃度計測を実施した。光源には NH_3 および H_2O の吸収帯である 1512 nm、および 1388 nm の半導体レーザーモジュール (NEL, 1512 nm: NLK1S5GAAA, 1388 nm: NLK1E5GAAA) を用いた。 H_2O 用レーザーは温度計測用として使用した。各半導体レーザーはレーザー温度および印加電流をコントロールし、レーザー発振波長を制御した。実験で使用した16パス計測セルおよび光学系配置を図2(a), (b)に示す。レーザー光はファイバスプリッタにより分岐され、コリメータで $\phi 70$ mm の測定場に照

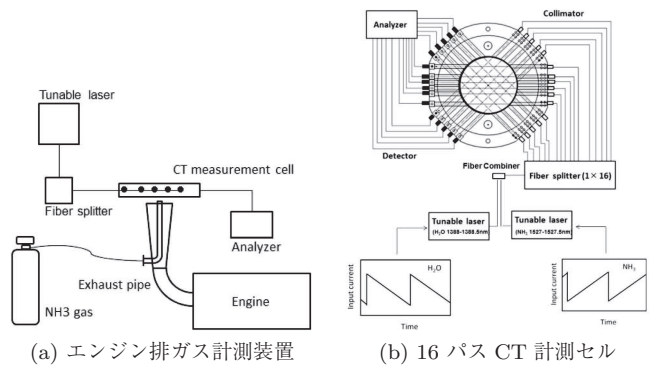


図2 エンジン排ガスにおける NH_3 濃度計測試験装置

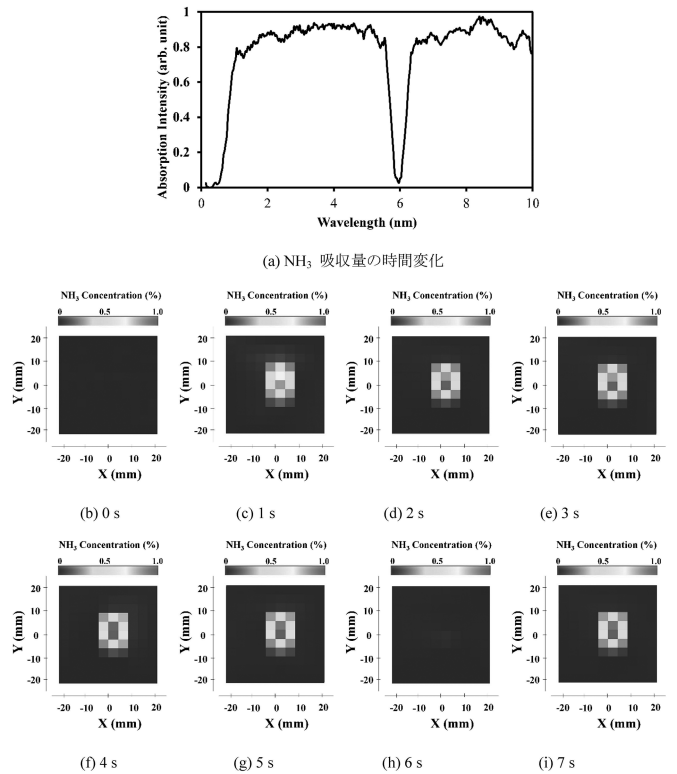


図3 0-7秒における2次元 NH_3 濃度の時間変化

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。 NH_3 計測では 1512 nm および 1388 nm の半導体レーザー光を図2(b)のように合波して温度、 NH_3 濃度の同時計測を実施した。1388 nm 域の H_2O 吸収スペクトルより温度を、1512 nm 域の NH_3 吸収スペクトルより NH_3 濃度を計測できる。図3にエンジン排ガスに NH_3 を添加した場合の吸収強度の時間変化と時系列2次元 NH_3 濃度計測結果を示す。 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3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。また、計測開始後0.5秒、6秒での NH_3 濃度変化を的確に捉えており、エンジ

ン排ガス中での時系列2次元濃度計測が可能であることを実践できた。

4. エンジン筒内温度計測への応用例¹⁸⁾

図4にエンジン筒内温度計測システム概要とCT計測セルにおけるレーザパス配置を、表1にエンジン運転条件を示す。高圧下での水蒸気吸収スペクトルを計測するために、1330~1370 nmを波長掃引可能な外部共振器型波長可変半導体レーザ (Santec社 HSL-200-30-TD, 波長スキャン周波数:30 kHz) を使用した。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を使用することでブロードニングした吸収スペクトルの評価が可能となる。照射されたレーザ光は分波器で16分波され、コリメータ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 (日置電気, メモリハイコーダ 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10 mm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。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、着火条件での試験では、ガソリンを燃料とし、回転数を1200~3000 rpm, 平均有効圧200~500 kPa, EGR率0~17%で運転を行った。

図5にモータリング条件 (試験条件1, 回転数1200 rpm) におけるレーザパス1の温度計測結果を示

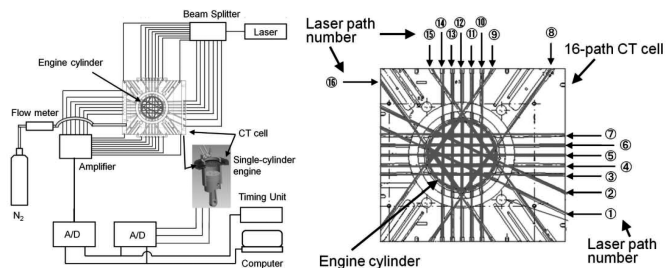


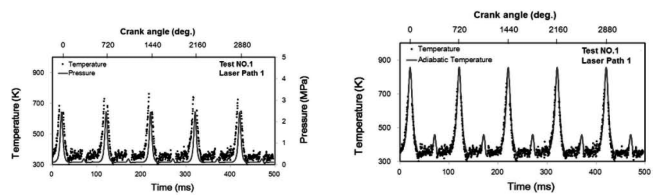
図4 エンジン筒内の2次元時系列温度計測装置

表1 試験条件

試験条件	作動条件	回転数 (rpm)	平均有効圧 (kPa)	EGR率 (%)
1	モータリング	1200	-	-
2	着火	1200	200	0
3	着火	1200	400	0
4	着火	3000	500	0
5	着火	2000	300	0
6	着火	2000	300	17

す。レーザのスキャン周波数が30 kHzのため、0.033 msごとにデータが得られるが、吸収スペクトル解析結果に対し1 msの移動平均を行い、0.33 msごと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5(b)に圧力値から求めた断熱温度 (比熱比は空気の使用) 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20 ms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。

試験条件2~6におけるレーザパス5での温度計測結果を図6に示す。回転数の違いにより、各条件で異なる温度上昇サイクルが計測されており、本計測法が十分



(a) レーザパス1の時系列温度 (b) 計測結果と断熱温度との比較

図5 試験条件1における時系列温度計測結果 (レーザパス1)

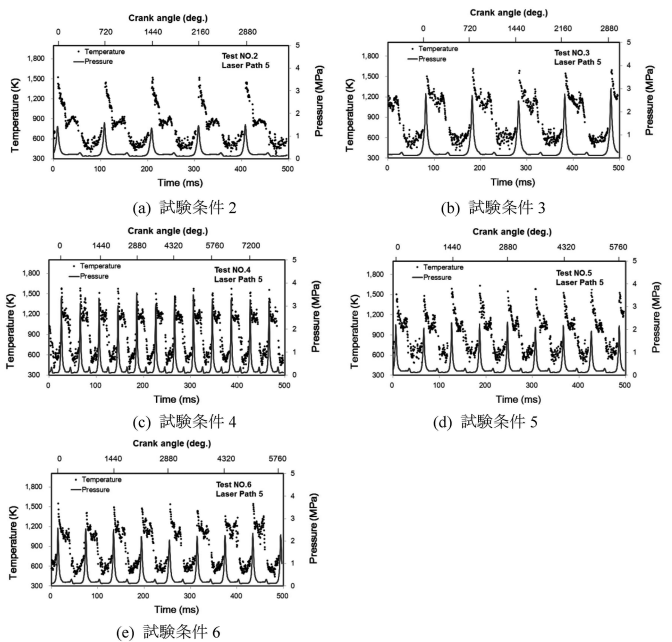
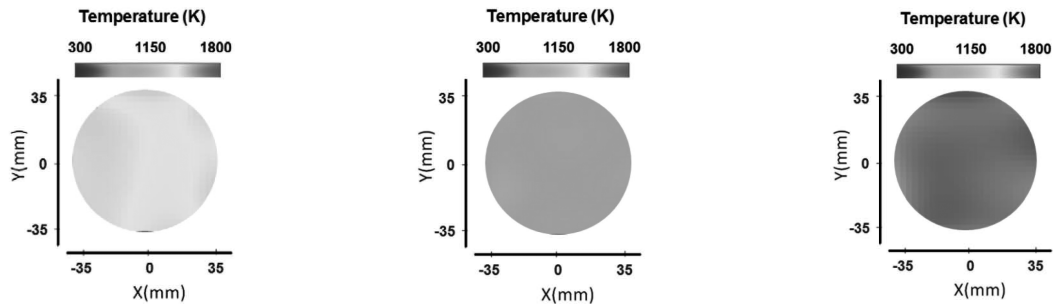


図6 試験条件2-6における試験条件1における時系列温度計測結果 (レーザパス5)



(a) 13 ms (クランクアングル:29°) (c) 29 ms (クランクアングル:144°) (d) 63ms (クランクアングル:389°)

図7 試験条件2における2次元温度再構成結果

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。たとえば、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7に試験条件2(着火条件、回転数1200 rpm)における2次元時系列温度分布を示す。

試験条件2における温度分布は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。

5. まとめ

半導体レーザー吸収法にCTを組み合わせたCT半導体レーザー吸収法に関し、エンジン排ガス、エンジンエンジン筒内2次元温度計測への適用例を紹介した。本手法では、微粒子が存在する場や高温・高圧場を含む広い燃焼場条件で、2次元・時系列温度・濃度計測が可能である。今後、エンジンの過渡現象の解明や高効向上に応用展開していくものと考えられる。(2018年4月3日受付)

参考文献

- 1) Y. Deguchi: *Industrial applications of Laser Diagnostics*, Chapter 6, CRS Press, Taylor & Francis, 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*, **29**, 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*, **65**, 107/113 (2000)
- 5) P. Wright, N. Terzija, J. L. Davidson, S. Garcia-Castillo, C. Garcia-Stewart, S. Pegrumb, S. Colbourne, P. Turner, S. D. Crossley, T. Litt, S. Murray, K. B. Ozanyana, and H. McCanna: High-speed chemical species tomography in a multi-cylinder automotive engine, *Chemical Engineering Journal*, **158**-1, 2/10 (2010)
- 6) L. Ma, X. Li, S. T. Sanders, A. W. Caswell, S. Roy, D. H. Plemmons, and J. 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*, **21**-1, 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*, **73**-2, 1453/1464 (2014)
- 8) W. Cai and C. F. Kaminski: 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*, **104**, 034101/1 - 034101/5 (2014)
- 9) X. An, T. Kraetschmer, K. Takami, S. T. Sanders, L. Ma, W. Cai, X. Li, S. Roy, and J. R. Gord: Validation of temperature imaging by H₂O absorption spectroscopy using hyperspectral tomography in controlled experiments; *Applied Optics*, **50**-4, A29/A37 (2011)
- 10) S. Pal and H. McCann: Auto-digital gain balancing: a new detection scheme for high-speed chemical species tomography of minor constituents, *Measurement Science and Technology*, **22**-11, 115304/1-115304/13 (2011)
- 11) S. A. Tsekenis, N. Tait, and H. McCann: Spatially resolved and observer-free experimental quantification of spatial resolution in tomographic images, *Review of Scientific Instruments*, **86**-3, 035104/1-035104/17 (2015)
- 12) 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*, **44**-2, 251/256 (2013)
- 13) 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*, **45**-6, 965/970 (2014)
- 14) 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*, **45**-1, 75/81 (2014)
- 15) 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*, **45**-6, 971/976 (2014)
- 16) 神本, 出口, 高木, 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*, **46**-6, 1031/1037 (2015)
- 17) 出口, 神本, 高木, モハンマド 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*, **47**-2, 279/285 (2016)
- 18) 出口, 高木, 神本, 岡本, 渡邊: 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, *自動車技術会論文集*, **48**-1, 35/40 (2017)
- 19) I. E. Gordon, L. S. Rothman, R. V. Kochanov, et al.: The HITRAN2016 molecular spectroscopic database, *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, **203**, 3/29 (2017)

