

CT 半導体レーザー吸収法の空間分解能及び精度評価*

出口 祥啓¹⁾ 神本 崇博²⁾ 高木 琢³⁾ モハマト サフェール アラム タハ⁴⁾

Spatial Resolution and Accuracy Evaluation of CT Tunable Laser Absorption Spectroscopy

Yoshihiro Deguchi Takahiro Kamimoto Taku Takagi Mohammad Safiul Alam Toaha

Two dimensional temperature and concentration measurement technology using computed tomography-tunable diode laser spectroscopy (CT-TDLAS) has been evaluated theoretically and experimentally in terms of the spatial resolution and measurement accuracies. 2D temperature and concentration measurement characteristics were evaluated by H₂O and CH₄ absorption spectra. There were several key parameters to determine the spatial resolution and measurement accuracies of CT-TDLAS. The molecular database used to determine 2D concentration and temperature was one of them and it was shown that the revision of these spectroscopic data to match the measurement results led to better measurement accuracies of concentration and temperature. The CT algorithm to control the spatial fluctuation frequency of concentration and temperature was also important to prevent spurious solutions by the inverse analysis.

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工学的に応用する場において、その構造やその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、燃焼の内部構造を明らかとすることが必要である。これらの燃焼現象の要素の中でも、温度・濃度はプロセス制御する上で非常に重要なパラメータであり、燃焼構造や燃焼機器の性能に大きく影響を及ぼす因子である。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、燃焼ガスにおいて 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。また、尿素 SCR (Selective Catalytic Reduction) システムでは、効率の向上や NH₃ スリップを防止するために NO_x 量にバランスする適切な NH₃ 制御が求められる。このニーズに対応するためには、過渡的な NH₃ 挙動を分布状で可視化することが重要となる。

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

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ガス挙動は徐々に把握可能となってきた⁽¹⁾⁽²⁾⁽⁵⁾。この技術は、計測部の平均値を求める手法であるが、近年、本技術に CT(Computed Tomography)を組合せ、計測断面の分布を求める方法も開発されてきており、エンジン排ガスなどへの適用が図られてきている⁽¹⁾⁽⁵⁾⁽¹⁴⁾。しかしながら、本方法では、CTによる画像再構築を行う必要があるため、空間分解能や精度の評価方法が難しいという課題を有している。

本研究では、半導体レーザー吸収法に CT を組合せた CT 半導体レーザー吸収法において、高温・高圧場を含む領域において 2 次元温度・濃度計測を対象に、CT 解析法の観点から空間分解能や精度の評価に対する議論を行った。CT 半導体レーザー吸収法では、計測精度に影響する複数の要因が存在し、その中には、吸収波形(強度)計測時の実験上の誤差、HITRAN データベース⁽¹⁵⁾などの誤差、CT 解析における画像再構成時の誤差などが存在する。本論文では、主に HITRAN データベース⁽¹⁵⁾などの誤差、CT 解析における画像再構成時の誤差を評価した。

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_t/I_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⁾。

*2015 年 10 月 1 日受理。2015 年 5 月 21 日自動車技術会春季学術講演会において発表。

1)・2)・3)・4) 徳島大学(770-8506 徳島県徳島市南常三島町 2-1)
(Email : ydeguchi@me.tokushima-u.ac.jp)

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

ここで A_{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, $G_{V_{i,j}}$ 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⁽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.

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. CT は X 線や光などを利用して対象場の複数経路の吸収を計測し, その結果をコンピュータで解析することで対象断面を再構成する技術である. 図 1 に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⁽⁵⁾⁽⁹⁾.

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

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. 図 2 に計算の手順を示す. 吸収線のブロードニングは温度, 圧力その他, 共存物質の影響も受けるため, ブロードニング現象を正確に把握することは難しい. そのため, スペクトルフィッティングなど, 吸収線のブロードニングの影響を受け難い解析方法を選定することも重要となる. 本研究では, この影響を考慮し, 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, 各グリッドにおける温度, 濃度を収束させる手法を用いている⁽⁸⁾. これは, 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内容となり, 解析手法としてシプレックス法を用いた⁽¹⁶⁾. また, 各計算領域において, レーザパス配置を考慮したスムージングを実施し, CT 計算における安定化を図った.

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

3. 実験装置

実験に用いた装置を図 3 に示す. 本研究では, 基礎試験装置として, 吸収セル, 一次元バーナ, 定容燃焼器, 噴流ノズル

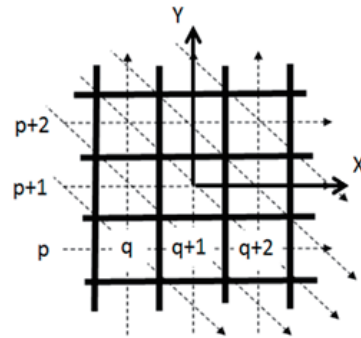


Fig. 1 CT grid and laser path

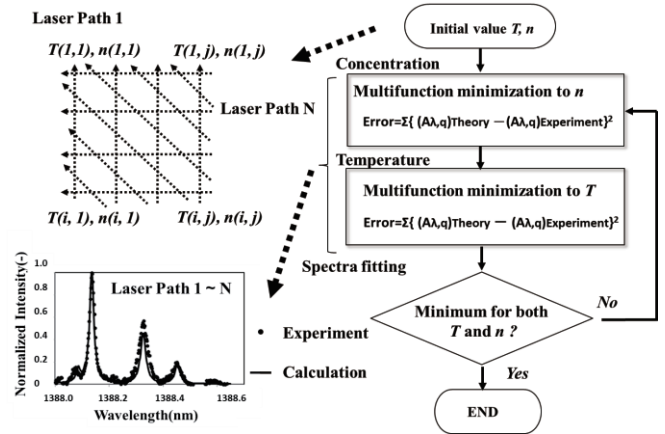
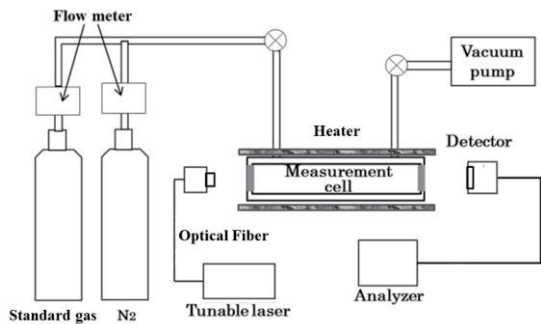
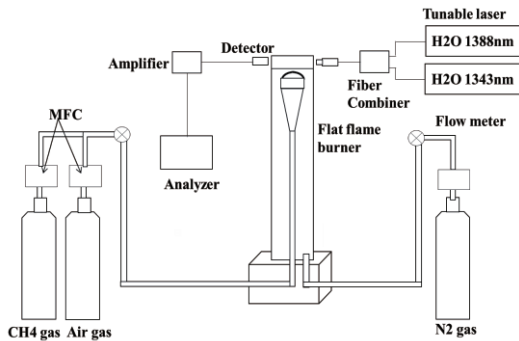


Fig. 2 CT -algorithm

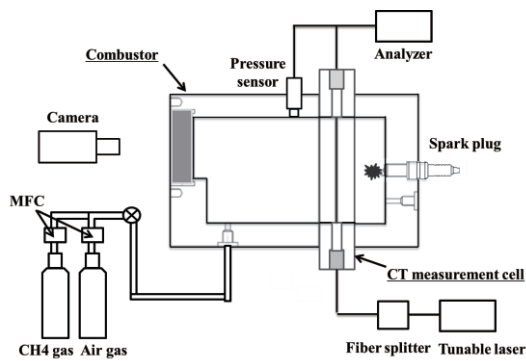
を用いた. 吸収セルを用いた試験(図 3(a))では, 計測対象の標準ガスを使用して濃度及び温度依存性評価を実施した. 実験方法としては, N_2 ガスで濃度を調整した標準ガスを計測セルに導入し, 計測セル内にレーザを通過させてその透過光を検出し, 吸収量を測定した. 一次元バーナ(図 3(b))を用いた試験では, メタンと空気の当量比を 0.95 で一定とし, 流量を各々 $1.6 \times 10^{-5} \sim 2.7 \times 10^{-5} \text{ (m}^3/\text{s, ntp)}$, $16 \times 10^{-5} \sim 27 \times 10^{-5} \text{ (m}^3/\text{s, ntp)}$ に設定して, 火炎を形成させた. 一次元バーナ径は 45mm とし, フラットフレーム火炎の周囲には $33 \times 10^{-5} \text{ (m}^3/\text{s, ntp)}$ の窒素を流した. また, フラットフレーム上部にステンレスメッシュを設置して測定部での火炎温度可変させた. 定容燃焼器(図 3(c))を用いた試験では, 定容燃焼器に CT 計測セルを挟み込み, 各計測パスでの吸収量を測定した. 燃料にはメタンと空気の混合気(当量比 1)を使用し, 初期圧を変化させて, 燃料ガスに点火し, 火炎伝播により燃焼室内圧力を上昇させた. 噴流ノズル試験(図 3(d))では, 図 4 に示す CT 計測セルのレーザ照射面から 3mm の位置に内径 8mm の噴射管 ($X=Y=0\text{mm}$) を設置し, 1% の CH_4 ガス(バッファーガス: N_2) を $1.7 \times 10^{-5} \text{ (m}^3/\text{s, ntp)}$ で噴出した. また, 内径 65mm の円管より周囲流として N_2 ガスを $33 \times 10^{-5} \text{ (m}^3/\text{s, ntp)}$ にて流した. 計測セル断面での CH_4 濃度を CT 半導体レーザ吸収法及びサンプリング法にて計測し, 両結果を比較した. サンプリング法では, 内径 2mm のサンプリング管を用い, $Y=0\text{mm}$ にて X を変化させてサン



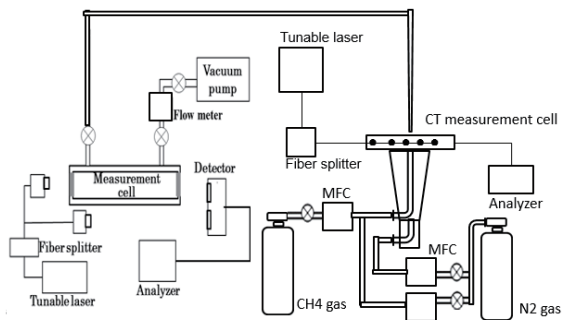
(a) Absorption measurement cell



(b) Flat flame burner



(c) Constant-volume high pressure combustor



(d) Jet flow

Fig. 3 Experimental Apparatus

プリングし、半導体レーザー吸収法にてサンプリングしたガス中のCH₄濃度を計測した。光源にはH₂O、CH₄、及びNH₃の吸収帯である1343nm (H₂O)、388nm (H₂O) 及び1635nm (CH₄)の半導体レーザー (NEL, 1343nm: NLK1S5GAAA, 1388nm:

NLK1E5GAAA, 1635nm: NLK1U5EAAA) を用いた。また、高圧場での計測では、1330nm~1370nmを波長掃引可能な外部共振器型半導体レーザー(Santec社HSL-200-30-TD)を使用した。レーザーのスキャン周波数は1~30kHzとした。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、吸収スペクトルデータを記録計(日置電気, メモリハイコーダ8861)に取り込んだ。

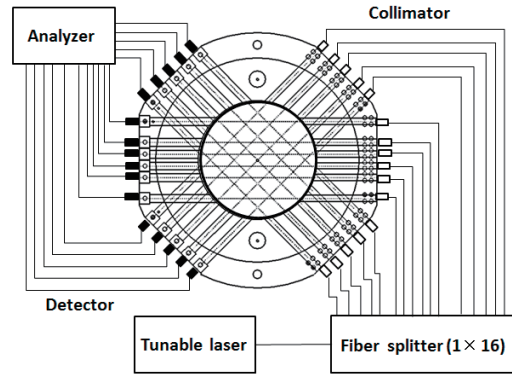


Fig. 4 16 path CT measurement cell

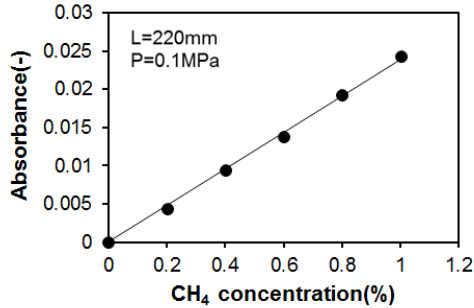
4. CT-TDLAS 計測精度評価

4.1. 半導体レーザー吸収法に関する計測精度

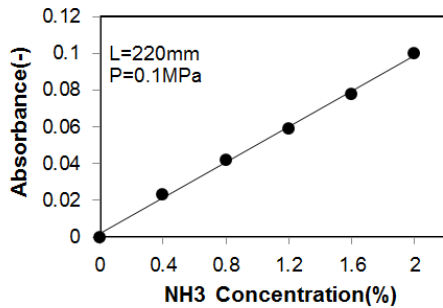
半導体レーザー吸収法では、温度・圧力が一定の場合において、吸光度と濃度には良い比例関係が存在する。1635nm域のCH₄吸収スペクトルと、1512nm域のNH₃吸収スペクトルの吸光度と濃度の関係を図5に示す。本結果は、吸収セル(図3(a))を用い、常温、常圧条件における実験により取得した。各成分の吸収スペクトルは対象成分に特有な波長に現れ、吸光度と濃度には良い比例関係が存在する。また、半導体レーザー吸収法では、高速で波長を掃引することにより、窓汚れの影響などを除去できる利点を有する。通常、吸収スペクトルが明確に確認できる場において、温度・圧力が一定であれば、吸光度と濃度には良好な比例関係が存在するが、温度・圧力が変化する場では、圧力ブロードニングなどの効果を考慮する必要がある。

エンジンなどの燃焼場において、温度・圧力の影響を考慮する場合、通常、測定対象成分に対してHITRAN⁽¹⁵⁾などのデータベースを用いてその影響を評価するが、その過程で計測精度が低下することが多い。HITRANデータベースと実験にて得られた吸収スペクトルが異なる例として、800Kにおける1343nm域のH₂O吸収スペクトルを図6に示す。本計測では吸収セル(図3(a))を用い、1343nmのDFBレーザーを用いた。HITRANデータベースから計算されるスペクトルと実験結果にはスペクトル形状に差異が見られ、精度を向上するためには、HITRANデータベースの修正が必要となる。また、温度・圧力が変化する場では、吸収線のブロードニング現象を把握することが計測精度を確保するために不可欠となる。図7に波長域1355-1365nmにおける圧力ブロードニング計測結果

を示す。本計測には吸収セルを用い、外部共振器型半導体レーザーにてスペクトルを評価した。圧力の上昇に伴い、吸収スペクトルが広がる事が確認できる。本研究では、図 3(a), (b) の吸収セル、一次元バーナを用いて、温度範囲：300-2000K、圧力範囲：0.1-0.9MPa までの H₂O 吸収スペクトルを計測し、



(a) CH₄



(b) NH₃

Fig.5 Relationship between absorbance and concentration

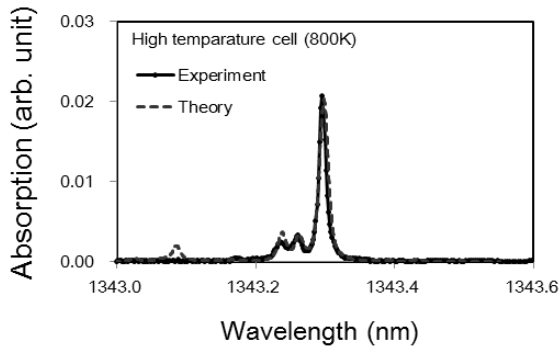


Fig.6 Comparison between experimental and theoretical absorption spectra of water vapor at 800K

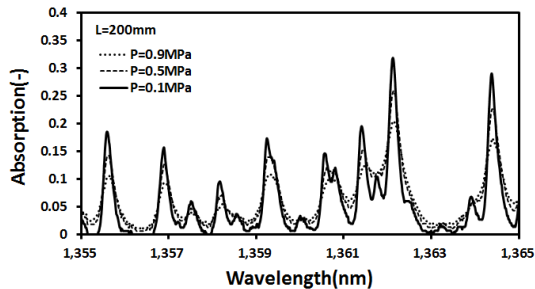
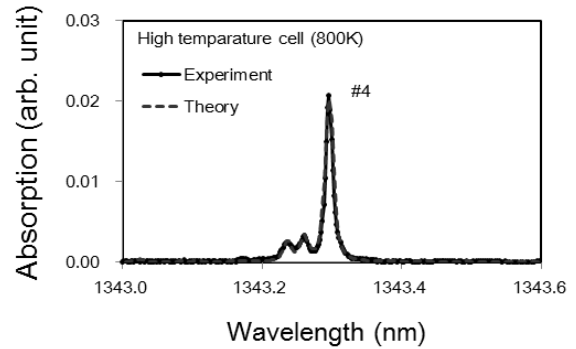
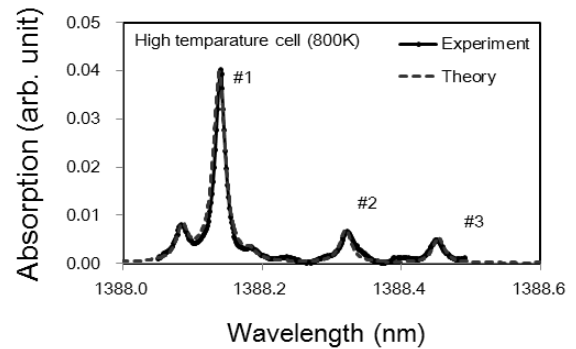


Fig.7 Pressure broadening of H₂O absorption spectra

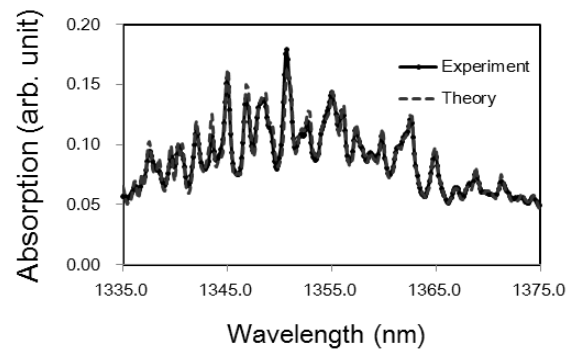
HITRAN データベースの修正を行い、修正版 HITRAN データベースを構築した。吸収セル (図 3(a)) を用いて計測した 1343nm 及び 1388nm 域の H₂O 吸収スペクトル (800K, 0.1MPa) 及び定容燃焼器 (図 3(c)) を用いて計測した H₂O 吸収スペクトル (3.2MPa, 1335.0-1375.0nm) を図 8 に示す。



(a) Experimental and theoretical absorption spectra between 1343.0-1343.6nm measured using absorption measurement cell (0.1MPa, 800K)



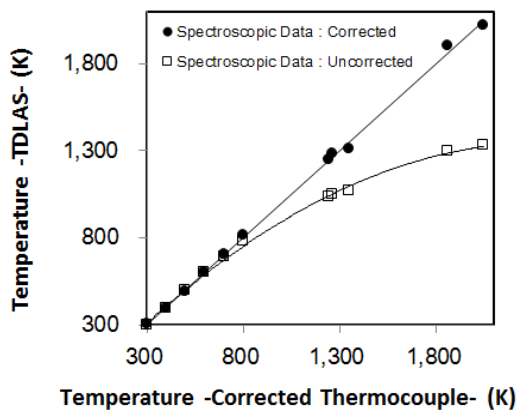
(b) Experimental and theoretical absorption spectra between 1388.0-1388.6nm measured using absorption measurement cell (0.1MPa, 800K)



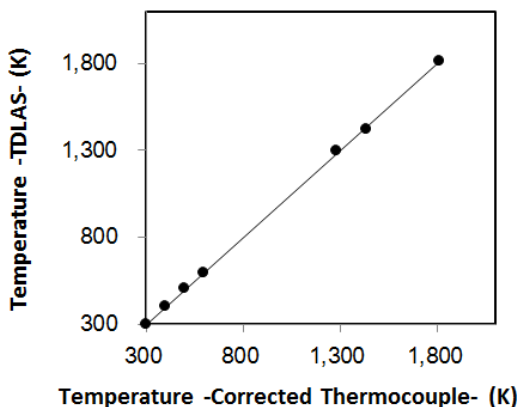
(c) Experimental and theoretical absorption spectra between 1335.0-1375.0nm measured using constant-volume high pressure combustor (3.2MPa, fitted temperature : 1320K)

Fig.8 Comparison between experimental and theoretical absorption spectra using revised HITRAN database

図 8(a), (b)では, 1343nm 及び 1388nm 域の DFB レーザを合波して同一スペクトル上に 1343nm と 1388nm のスペクトルを計測可能としている。図 8(c)では, 外部共振器型半導体レーザーを使用した。また, 理論スペクトルの計算には, 修正版 HITRAN データベースを使用した。実験結果から確認されるように, 修正版 HITRAN データベースを用いることにより, 実験値と理論値は良い一致を示すことが確認できる。また, 高圧場では, 吸収線のブロードニング現象により, スペクトルの重なりが生じ, 1nm 程度の波長域では, 明確なスペクトルを計測できなくなる。このようにブロードニングが顕著となる領域では, 広波長域を高速スキャン可能な外部共振器型半導体レーザーを評価することが重要となる。図 3(a), (b)の吸収セル(800K 以下の温度域), 一次元バーナ(800K 以上の温度域)を用いて計測したスペクトルを用いて算出した温度と熱電対(輻射補正あり)を用いた計測温度との比較を図 9 に示す。図 9(a)は, 1343nm 及び 1388nm 域の DFB レーザを, 図 9(b)では, 外部共振器型半導体レーザーを用いた結果である。また, 温度算出には, 修正版 HITRAN データベースを用いており,



(a) DFB laser (1343.0-1343.6nm, 1388.0-1388.6nm)



(b) External cavity diode laser (1335.0-1375.0nm)

Fig.9 Comparison between CT-TDLAS and thermocouple measurement results using absorption measurement cell and flat flame burner (0.1MPa)

図 9(a)では, 通常の HITRAN データベースを用いた結果もプロットした。データベースの修正を行わない場合, 大きな温度誤差を生じる結果となるが, 修正版 HITRAN データベースを用いることにより, 特に高温域において温度計測精度が向上することが確認できる。

4.2. CT による濃度・温度画像再構成に関する精度評価

CT 半導体レーザー吸収法では, CT による濃度・温度画像再構成時に誤差を生じやすい。これは, 画像再構成が基本的に逆問題となり, 解が一意的に定まらないためである。再構成画像の精度を向上するためには, 入射するレーザーパスを増やす(間隔を狭める)と共に, 異なる角度からの入射を行うことが有効であり, 2 方向のみのレーザー光入射では, 再構成画像に誤差が混入し易くなる。CT 半導体レーザー吸収法及びサンプリング法を用いて計測した, 計測セル断面での CH_4 濃度を図 10 に示す。本計測では, 噴流ノズル(図 3(d))を用いた。 CH_4 噴射管は CT 計測セルの中央 ($Y=X=0\text{mm}$) に設置されており, CT 半導体レーザー吸収法では, 16 パスを用いた画像再構成結果において, 2 次元分布及び $Y=0\text{mm}$ の結果を示している。両計測法共に, $X=0\text{mm}$ を中心として CH_4 が検知されている。なお, CT 半導体レーザー吸収法では, $X=\pm 4\text{mm}$ における CH_4 濃度の急速な立ち上がりが検知できていない。これは用いたレーザーパス数に依存する空間分解能の影響によるものである。CT 再構成において, 空間分解能を向上しすぎると, 図 10(c) に示すように解析結果にハンチングが生じる結果となる。空間分解能は, レーザーパス配置に依存し, 各レーザーパスの重なりを考慮したレーザーパス間隔の中に, 極小値が 2 つ以上存在する空間分解能を与えると, 解析結果にハンチングや発散が生じやすくなる。今回のレーザーパス配置では, 各方向(3 方向)のレーザーパスを 7-12 mm 間隔で配置しており, 計測領域の中心部にて 3-4mm の空間分解能(この空間内に極小値が 2 つ以上存在しない)を有する結果となる。なお, 解析結果の一意性を確保するために, 入射するレーザーパスの方向を 3 以上とすることも重要となる。また, 画像再構成では, 特定の計測パスに測定誤差が生じた場合, 計測誤差の影響がそのパスの光路上のみでなく, 他の領域にも波及する傾向を有するため, 注意を要する。

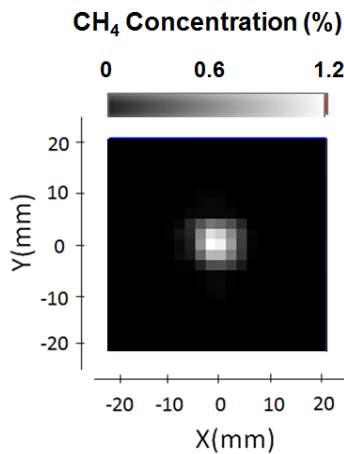
CT 解析において, 式(3)にて定義される誤差の変化を図 11 に示す。誤差を最小とする多変数(計測領域内の温度, 濃度)を求める解析方法として, その解を探索するシンプレックス法⁽¹⁶⁾を用いているため, 繰り返し数に伴い誤差が増減する領域が存在するが, 最終的に誤差が一定の値に収束することが確認できる。本研究では, 誤差が一定値以下(図 11 において 0.2 以下)であること, 一定繰り返し数(50 回)内で誤差が一定範囲(標準偏差 15%以下)に安定することを収束判定とした。不適切な初期値を使用した場合や特定の計測パスに測定誤差が生じた場合, 繰り返し計算が発散したり, 式(3)の誤差が大

きな値を有することになる。CTによる濃度・温度画像再構成に関する精度を確保するためには、この誤差の特性を把握し、本誤差を一定の値以内に収めることが重要となる。

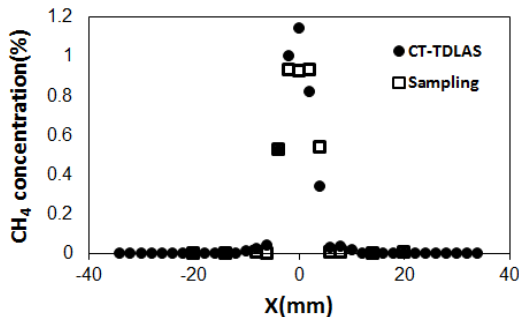
5. ま と め

半導体レーザー吸収法にCTを組合せて、各パスの光吸収量から高応答で2次元温度・濃度分布を算出するCT半導体レーザー吸収法の計測精度評価を行い、以下の結果を得た。

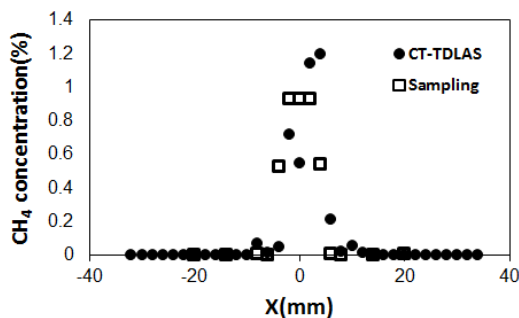
- 1) 計測精度を左右する要因として、吸光度測定精度、測定対象分子のデータベースの精度、CTの解析精度が重要となる。



(a) Reconstruction result of CH₄ concentration using CT-TDLAS



(b) CT Spatial resolution : 4mm



(c) CT Spatial resolution : 2mm

Fig.10 Comparison between CT-TDLAS and sampling results of CH₄ measurement

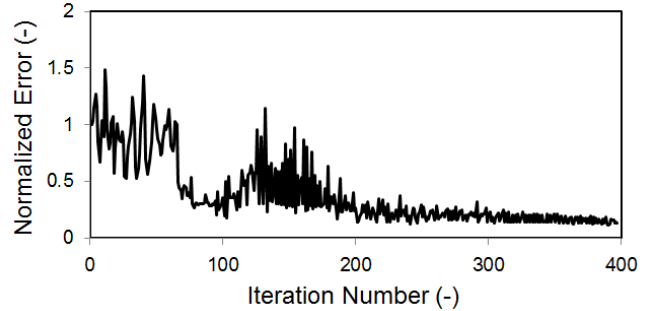


Fig. 11 Reconstruction error evolution of CT algorithm

る。温度・圧力が変化する計測対象場では、測定対象分子のデータベース構築が計測精度確保のため不可欠となる。

- 2) 空間分解能は、主に入射するレーザーパス数、入射角度、CT解析アルゴリズムに依存する。レーザーパス間隔以上の空間分解能を得ることはできず、画像再構成において、レーザーパス間隔以下の空間分解能を有さないよう、CTアルゴリズムを構築することが重要となる。
- 3) CTによる濃度・温度画像再構成に関する精度を確保するためには、CT解析誤差の特性を把握し、本誤差を一定の値以内に収めることが必要となる。

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) Tsekenis, 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) 出口祥啓, 神本崇博, 清田祐介: 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).
- (14) 神本崇博, 出口祥啓, 清田祐介: 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).
- (15) 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).
- (16) Nelder J. A., and Mead, R. A.,: Simplex method for function minimization; *The Computer Journal*, Vol.7, Issue 4, p.308–313, (1965).