

# CT半導体レーザー 吸収法とその応用

徳島大学

出口祥啓, 神本崇博

電力中央研究所

泰中一樹, 丹野賢二

## 1 緒言

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とすることが必要である。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(CO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, NO, CO, CH<sub>4</sub>, 温度)計測が開発されている<sup>1-5)</sup>。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<sup>1,2,5)</sup>。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<sup>1)</sup>。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<sup>6-18)</sup>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、計測対象機器にCT計測セルを挟み込むことにより、計測対象機器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。CT(Computed Tomography)を組合せたCT半導体レーザー吸収法は、エンジン筒内2次元温

度計測にも展開されてきている<sup>19)</sup>。本報告では、CT半導体レーザー吸収法の高温・高圧燃焼場並びに微粉炭燃焼場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>。

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

ここで $A_{\lambda}$ は吸光度、 $n_i$ は単位 $i$ に存在する分子数密度、 $L$ は光路長、 $S_{i,j}(T)$ は単位 $i$ 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<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<sup>16-18)</sup>。

## 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、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<sup>6-18)</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)–(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、濃度分布を取束させる手法を用いている<sup>16-18)</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>20)</sup>を改良したデータベースを用い<sup>17)</sup>、精度向上を図っている。

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

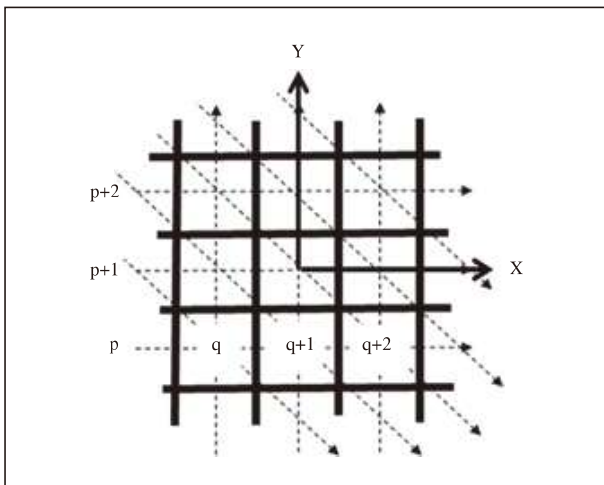


図1 CT grid and laser path

## 3 高温、高圧燃焼場への応用例

実験に用いた装置を図2に示す。本研究では、高温・高圧燃焼場試験装置として、定容燃焼器を用いた。定容燃焼器に図3に示す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。光源には $H_2O$ の吸収帯である1330 nm~1370 nmを高速でスキャン可能な外部共振器型半導体レーザー(Santec

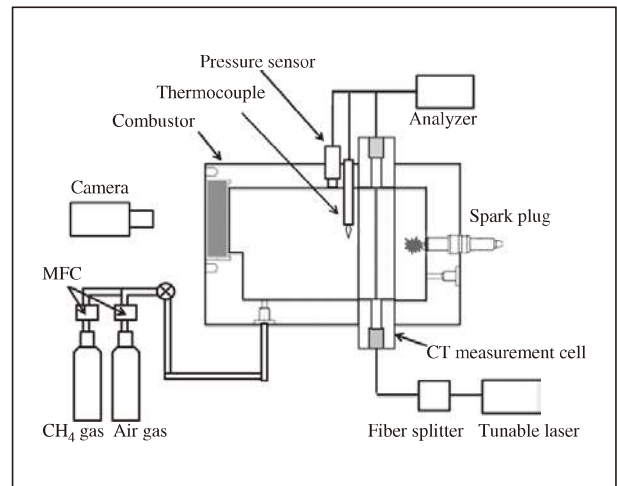


図2 Experimental apparatus of constant volume combustor.

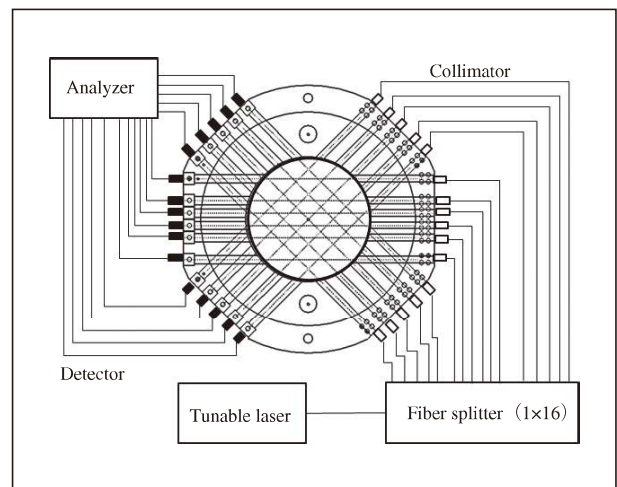


図3 16 path CT measurement cell.

社, H<sub>2</sub>O: HSL-200-30-TD) を使用した。レーザーのスキ  
 ャン周波数は30 kHzとした。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 (Optizone, C-20-S-1-  
 C-200-2-L-0.95-S) で対象物に照射される。透過光はフ

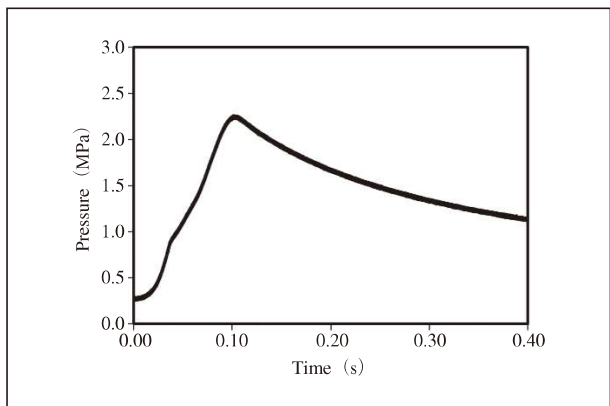


図4 Pressure time history of high pressure combustion

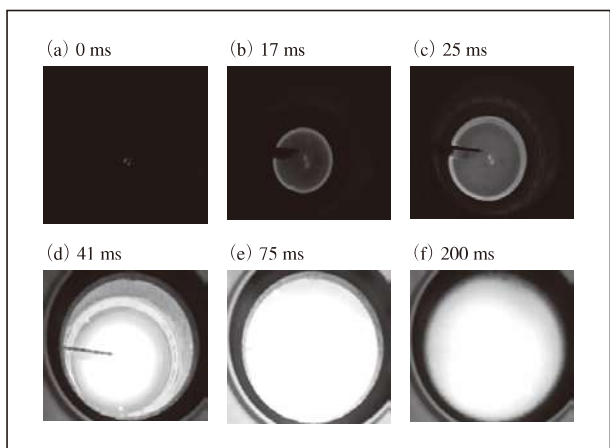


図5 Photographs of high pressure flames

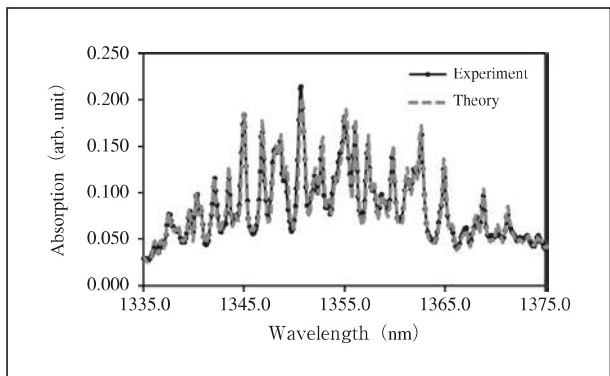


図6 H<sub>2</sub>O absorption spectrum at t=200 ms (Laser path 4, Pressure: 1.8 MPa)

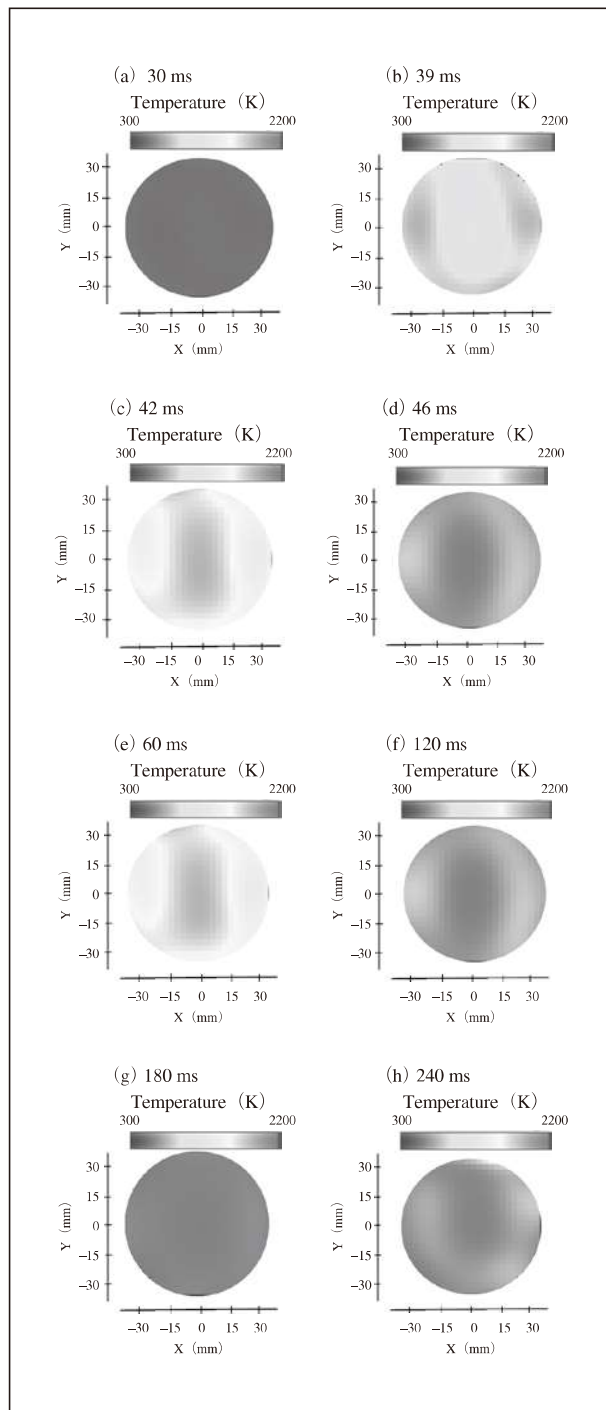


図7 Time series 2D temperature distributions measured by CT-TDLAS.

フォトダイオード（浜松フォトニクス, G12180-010A）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。各パスの吸収スペクトルは、CTアルゴリズムに使用され、2次元時系列温度及び濃度分布が求められる。図4、図5に燃焼時の圧力波形及び燃焼画像を示す。点火プラグによる着火時点をも $t=0$  msとした。図6に200 msにおいてCT計測セルを用いて計測された水蒸気スペクトル計測結果及び理論スペクトルとのフィッティング結果を示す。波長掃引範囲の広い外部共振型半導体レーザーでは圧力上昇に伴いブロードニングした吸収スペクトルを評価可能であ

り、1 MPa以上の高圧場でも温度計測が可能となる。図7にCT半導体レーザー吸収法をより得られた2次元温度分布計測結果を示す。燃焼器内で火炎が球状に広がり、 $t=35$  ms近傍でCT計測セル断面に火炎が到達し、 $t=180$  ms以降、温度が低下していくことが分かる。

#### 4 微粉炭燃焼場への応用例

図8 (a), (b) に実験装置の概略図を示す。実験装置は、燃焼炉、微粉炭バーナ、保安用メタンバーナ、計測セクションで構成されている。燃焼炉は内径250 mm、長さ

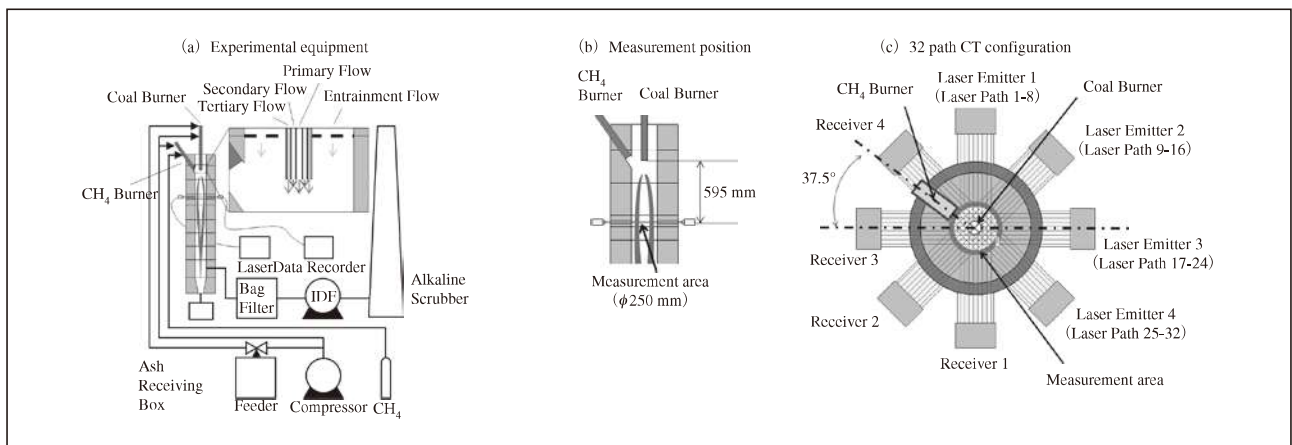


図8 Experimental apparatus of pulverized coal burner

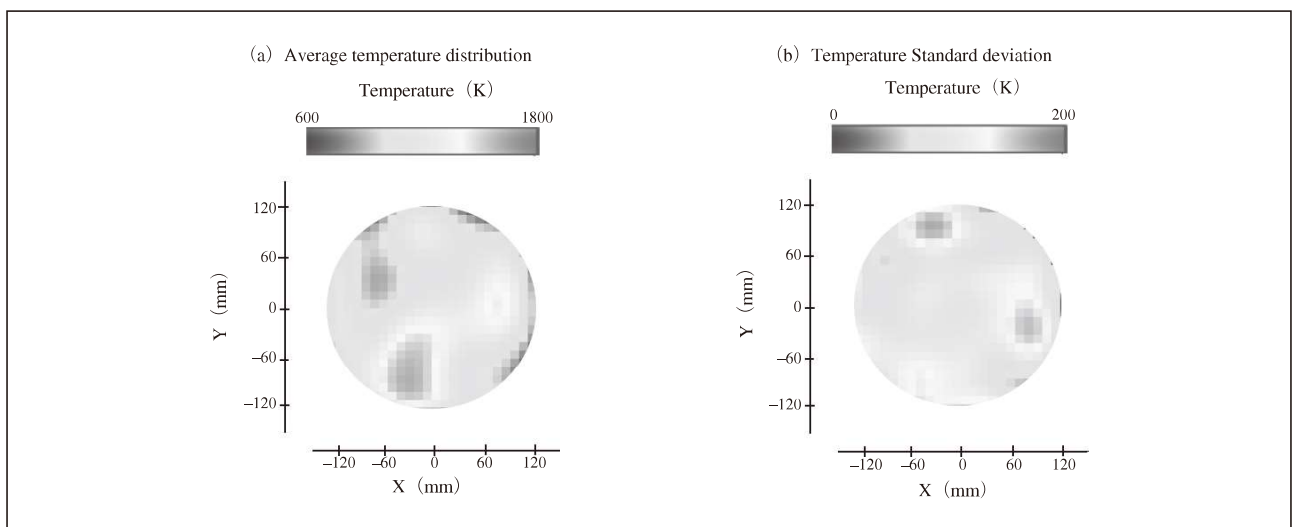


図9 Average temperature and temperature standard deviation of pulverized coal flame

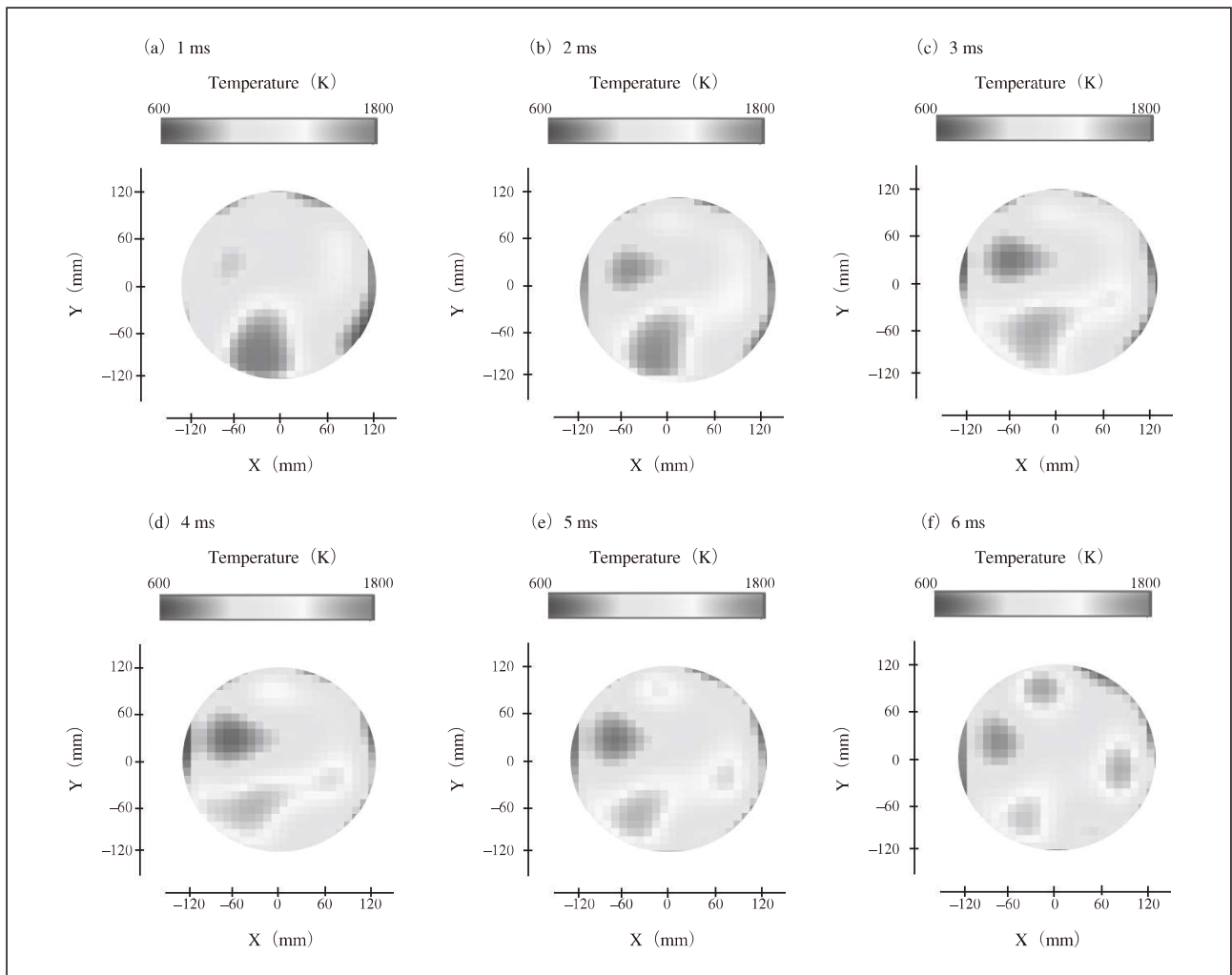


図10 Time series temperature distribution of pulverized coal flame

2,300 mmの円筒縦置炉である。図8 (c) に32パスCT計測セルの概略図を示す。このセルは、炉の組み替えによって任意の高さで計測が可能であり、微粉炭バーナ先端から595 mmの位置を計測した。水蒸気の吸収スペクトル計測には、波長を1388.0 nmから0.6 nmおよび1342.9 nmから0.6 nm走査可能なDFBレーザー (NTTエレクトロニクス社, NLK1S5GAAA) を用いた。図9及び図10に微粉炭燃焼場における2次元温度分布の計測結果を示す。半導体レーザー吸収法では、レーザー波長を高速でスキャンしているため、微粉炭などの粒子による光の減衰の影響を補正でき、2次元温度分布が定量的に再構成されていることが確認できる。本手法は、1 ms以下

の高応答性を有するため、時系列温度分布およびその平均、標準偏差の分布を求めることができる。本手法により、微粉炭燃焼場という粒子が存在する場での時系列温度分布を計測できることが実証された。

## 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、各種燃焼場への適用例を紹介した。本手法は、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・濃度計測が可能となる。本手法は燃焼場の他、各種流れ場やCVD