

自動車排ガス浄化効率向上のための CT 半導体
レーザー吸収法を用いた NH_3 濃度の 2 断面同時計
測と CFD への応用

2020 年 3 月

徳島大学大学院

先端技術科学教育部

知的力学システム工学専攻

機械創造システム工学コース

松井 仁

目次

第1章 緒言	2
1.1 動向	
1.2 CT利用半導体レーザ吸収法の適用	
1.3 2断面による2次元温度・濃度分布計測の必要性	
第2章 理論	4
2.1 吸収法	
2.2 コンピュータトモグラフィー(CT)	
2.3 半導体レーザ吸収法(TDALS)	
2.4 CT半導体レーザ吸収法(CT-TDALS)	
2.5 数値流体シミュレーション(Computed Fluid Dynamics : CFD)	
第3章 実験及びシミュレーションの内容	11
3.1 実験による4重円管を用いた濃度分布計測	
3.2 実験によるNH ₃ 濃度分布2断面同時計測	
3.3 NH ₃ 濃度分布2断面シミュレーション	
第4章 実験及びシミュレーションの結果・考察	20
4.1 実験による4重円管を用いた濃度分布計測	
4.2 実験によるNH ₃ 濃度分布2断面同時計測	
4.3 NH ₃ 濃度分布2断面の実験とシミュレーションの比較	
4.4 CT-TDLASの精度評価	
第5章 結言	44

参考文献

謝辞

第1章 緒言

1.1 動向

近年，世界的に地球環境保護やエネルギーの有効利用に対する取り組みへの関心が高まっており，自動車業界においても様々な燃費規制の導入や排出ガス規制の強化が世界的に進められている．この世界的な規制強化の流れの中で，2015年に起きたドイツ・フォルクスワーゲン社の排出ガス試験不正問題に端を発した，ディーゼルエンジンに対する排出ガス規制の厳格化によって，自動車各社は窒素酸化物(NO_x)や粒子状物質(PM)を始めとした排出ガスを効率的かつ安定的に浄化するための技術開発が早急に求められている^[1]．このディーゼルエンジンの排出ガスに浄化に対して，図 1.1.1 に示すような尿素 Selective Catalytic Reduction(SCR) という装置が多く用いられている．この装置は排気ガスに対して尿素水を噴霧し，尿素水の分解によって得られた NH_3 と触媒によって NO_x を無害な窒素と水に分解するものである．しかし，この尿素 SCR を効率的に使用するためには，触媒入口の NH_3 の分布が非常に重要であり，自動車開発の中でこの NH_3 分布の予測及び可視化が必要とされている．

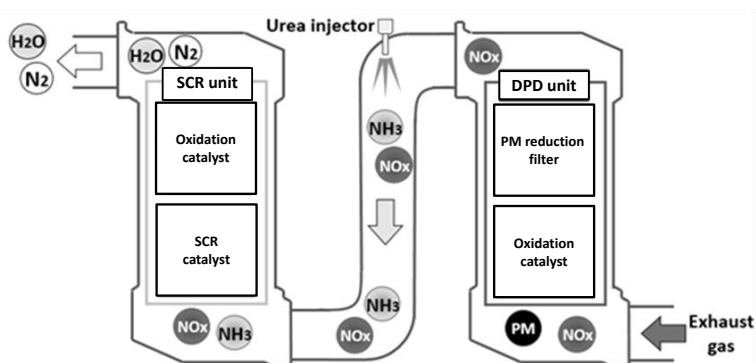


図 1.1.1 尿素 Selective Catalytic Reduction (SCR) 概略図

1.2 CT利用半導体レーザー吸収法の適用

近年，成分濃度や温度を知るための手法として，古くから使われてきた分光法に代わり，レーザーを用いたレーザー分光法が非常に多くの場面で用いられるようになってきている．レーザー分光法は従来の分光法と異なり，燃焼系や複雑な化学反応系における原子や分子の温度・濃度計測に対して，高い時間的・空間的分解能を有しており，極めて高感度での検出が可能である．このレーザー分光法による代表的な計測手法として，コヒーレント・反ストークス散乱(CARS : Coherent Anti-Stokes Raman Spectroscopy)^{[2],[3]}，レーザー誘起蛍光法(LIF : Laser-Induced Fluorescence)^[4-7]等の手法が研究開発されている．これらの計測法の中で

も、半導体レーザーを利用した吸収分光法は高耐久で安価な計測方法として知られ、高応答かつ温度や各種気体(NO, NH₃, CO, CO₂, CH₄等)の同時計測を目指した開発が行われている^[8-38]。しかし、先行研究の課題として以下のような問題点があった。

- ・ 単一吸収線での減衰量評価を行う手法の場合、環境変化(温度・圧力)による光強度の変化に弱く、正しく計測が実施できない場合がある。
- ・ 単一ガス成分濃度の計測には適しているが、複数のガス成分を含む場合には適用できない。
- ・ 温度・多成分ガス濃度の同時計測が出来ない
- ・ バックグラウンドがとりにくく、計測誤差の補正が難しい

そこで出口らはこれらの問題点を解決すべく、半導体レーザー吸収法(Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy : TDLAS)と CT(Computed Tomography)を組み合わせ、各レーザーパスの光吸収量から CT を用いて 2 次元温度・濃度分布を計測する手法を開発した。この手法は複数波長の吸収スペクトルを用いた TDLAS による吸収量について CT による分布の再構築を行うことで、対象となる分子の温度・濃度同時計測並びに断面分布の高応答での計測を可能としている^[39-56]。本研究ではこの技術の自動車用ディーゼルエンジンへの応用を視野に、更なる改良を図る。

1.3 2 断面による 2 次元温度・濃度分布計測の必要性

自動車の開発において流体シミュレーション(Computed Fluid Dynamics : CFD)は車両・エンジン問わず様々な場面で活用されている。これは排ガス後処理装置の開発においても例外では無く、先に述べた尿素 SCR の NO_x 浄化性能の改良にも多く CFD は多く用いられている。しかし、CFD を使ったシミュレーションによって NH₃ の触媒入口の濃度分布を予測しても、以下のような問題から効果的に CFD を活用出来ていない。

- ・ CFD での計算結果が正しいかどうか実機試験で確認することが難しい。
- ・ 単一断面での計測だけでは流れの様子が十分観察出来ない。
- ・ 上記の理由から、実機試験の結果を用いた CFD の精度改善を実施出来ない

先に述べたように単一断面での NH₃ 濃度分布については計測技術が確立されつつあり^[39-56]、実際のディーゼルエンジン及び尿素 SCR での計測に向けた取り組みが行われている。しかし単一断面での計測だけでは排気管内の流れを十分観察出来ず、CFD の精度改善に向けた取り組みを十分に行うことが出来ない。そこで本研究では、CFD の更なる効率的な活用を目指して、複数断面での 2 次元 NH₃ 濃度計測技術の開発と実施する。この技術は NH₃ 濃度の計測による尿素 SCR の性能評価だけでなく、CFD との検証による CFD の精度向上といった応用が期待でき、自動車から排出される NO_x や CO₂ の低減等、環境問題や温室効果ガスの削減といった問題に対して、有益な技術となると考える。

第2章 理論

2.1 吸収法 (Absorption Spectroscopy)

H₂O, CO₂, O₂, NH₃ 等多くの気体分子は, 分子の振動・回転エネルギー遷移に起因した特定波長の赤外線・近赤外線を吸収するという性質を持っている. この吸収量には温度・濃度に対する依存性があることが知られており, この性質を利用してその吸収量から特定の気体分子の温度・濃度を計測する手法を吸収法と呼ぶ. この時, 気体分子によって吸収される吸光量は気体分子の濃度と光路長に比例することが知られている(ランベルト・ベールの法則). そのため, 図 2.1.1 のように入射光が一樣な光路長を透過する際の光の強度比 (I/I_0) を計測することで, 式(2.1.1)から温度・濃度の計測が可能となる.

$$\frac{I_\lambda}{I_{\lambda_0}} = \exp\{-A_\lambda\} = \exp\left\{-\sum_i \left(n_i L \sum_j S_{i,j}(T) G_{v_i,j} \right)\right\} \quad (2.1.1)$$

ここで A_λ は吸光度, n_i はエネルギー準位 i に存在する分子数密度, L は光路長, $S_{i,j}(T)$ はエネルギー準位 i から j への遷移における吸収線強度, T は気体分子の温度, $G_{v_i,j}$ 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.

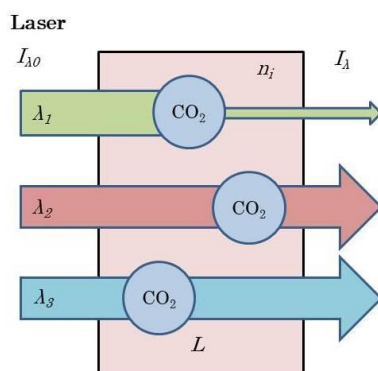


図 2.1.1 吸収法のイメージ

2.2 NH₃ と H₂O の吸収スペクトル

本研究において, 気体の濃度と温度を同時に計測するため, NH₃ と H₂O の吸収スペクトルを使用した. 図 2.2.1(a) が示す通り, NH₃ の吸収スペクトルは 1512.22nm の波長に存在し, NH₃ の濃度計測にはこの波長のレーザーを使用した. また, 図 2.2.1(b) は圧力 0.1MPa,

光路長 220mm の条件における NH₃ の濃度と吸光度の関係を示しており、線形近似した直線に対して R² で 0.9978 非常に高い相関性を持っていることから、NH₃ 濃度と吸光度の関係は線形であると考えることが出来る。

また、図 2.2.2 は HITRAN データベース^[57]に基づく、H₂O の理論吸収スペクトルを示している。吸収スペクトルは、1388.135 nm (#1)、1388.326 nm (#2)、1388.454 nm (#3) の 3 つの波長に存在しており、これらの波長を気体温度の計測に使用する。

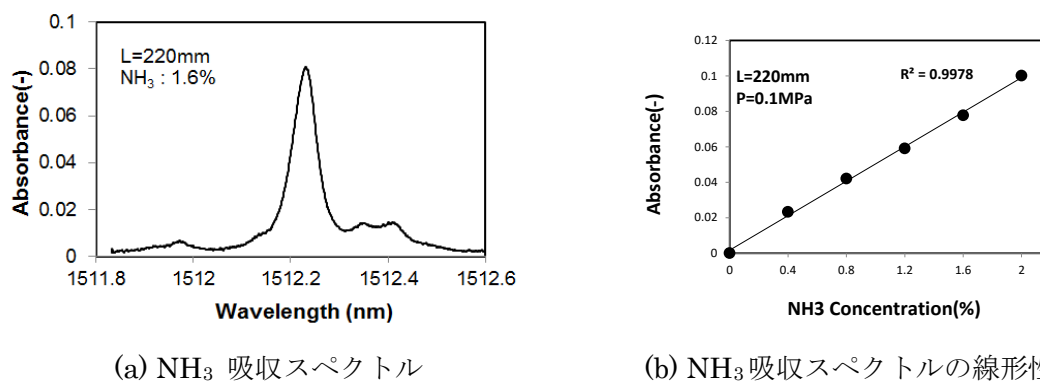


図 2.2.1 NH₃ 濃度と吸光度と比例関係

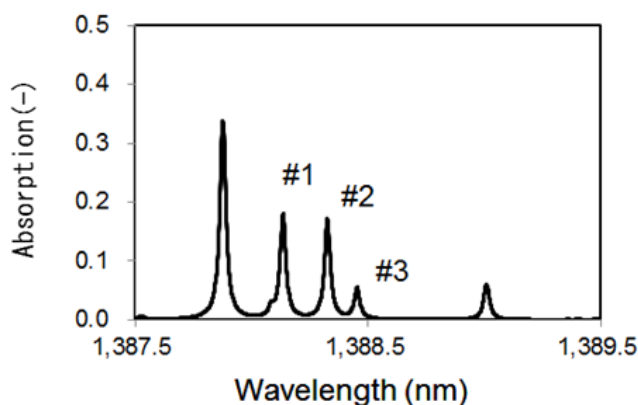


図 2.2.2 H₂O 理論吸収スペクトル
(#1:1388.135nm, #2:1388.326nm, #3:1388.454nm)

2.3 半導体レーザ吸収法 (TDLAS)

半導体レーザ吸収法の概要を図 2.3.1 に示す。半導体レーザは入力電流によって高速に出力波長をスキャン可能という特徴を持っており、半導体レーザ吸収法(TDLAS: Tunable Diode Laser Absorption)はこの特徴を活かして分子の吸収線形状を計測することで、様々な分子の濃度や温度を測定する分光計測法である。TDLAS は高速・短時間での計測、非接触での計測が可能で、熱電対等の温度センサの使用が困難な高温・高圧場への適用も可能で、燃焼計測分野で先端的な計測として用いられている。

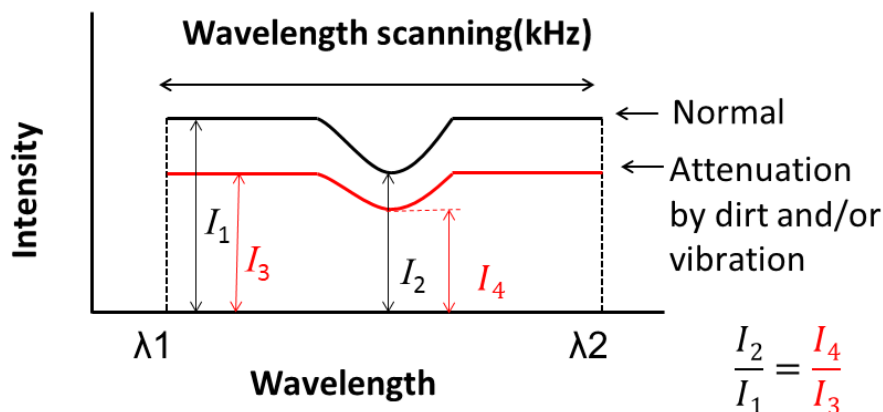


図 2.3.1 半導体レーザー吸収法原理

2.4 CT 半導体レーザー吸収法 (CT-TDLAS)

排ガス後処理装置の効率向上において、触媒入口の NH_3 濃度の分布が非常に重要であるが、従来の半導体レーザー吸収法はある空間内の気体濃度を 1 つのパスの吸光度によって計測しており、2 次元での濃度分布を求めることは出来なかった。そこで、本研究においては、空間分布を再構成する手法である CT 法を用い、これと複数パスによる TDLAS 法を組み合わせることによって、2 次元での NH_3 濃度分布計測を実施した。図 2.4.1 に示すようなレーザーパスと解析格子を考えた場合、各レーザーパスにおける信号強度は式(2.4.1)の関係式で表される。

$$A_{\lambda,p} = \sum_q n_q L_{p,q} \alpha_{\lambda,q} \quad (2.4.1)$$

ここで $A_{\lambda,q}$ 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 方向のパス長である。図 2.4.2、図 2.4.3 に CT の計算手法を示す。計測された一組の吸収スペクトルは、温度と濃度を計測するための理論的な吸収スペクトルと比較される。統合された吸収スペクトルは温度と濃度の両方に依存しており、その温度分布は 2 つ以上の異なる吸収の値から計算されることになっている。それぞれの解析格子上の温度や NH_3 濃度は、式(2.4.2)が示す通り、理論値と実験値の周波数 1512.0-1512.6nm における吸収スペクトルの誤差を最小化することで求め、その誤差最小化には多変量関数最小化の手法が用いられる。

$$Error = \sum \left\{ (A_{\lambda,p})_{theory} - (A_{\lambda,p})_{experiment} \right\}^2 \quad (2.4.2)$$

解析格子上の温度と NH₃, H₂O の濃度分布の組は, 図 2.4.2 に示すようにそれぞれの誤差を別々に最小化する形で決定される. この時, 多項式に由来するノイズを低減する手法として, レーザビームの揺らぎによるノイズを低減する場合と同様の方法が用いられている. また, 図 2.4.3 に誤差の最小化を行う際の濃度分布初期値の決定手順を示す. この初期値は, 実験結果から得られた吸収スペクトルとの誤差が最小になるように, 初期値データベースからいくつかの濃度分布を選び出し, これに重み付けを行うことで組み合わせられた値が用いられる. このアルゴリズムは, 濃度分布を求める際に行う収束計算で発生する, 初期値依存性を回避することにも役立つものである.

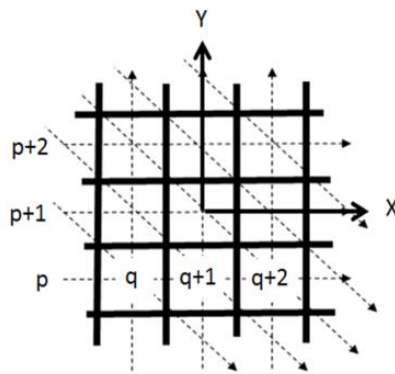


図 2.4.1 レーザパスと CT 格子

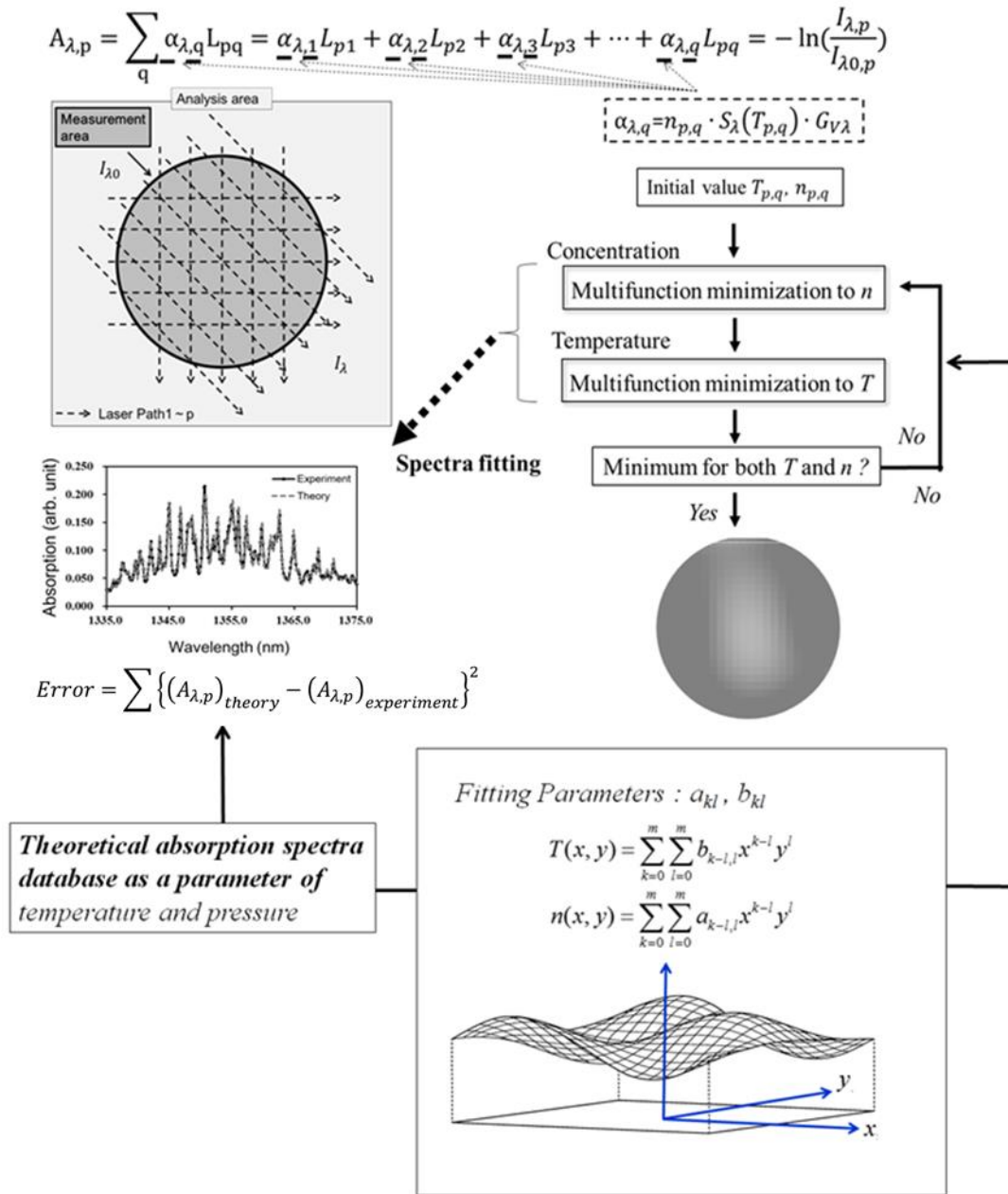


図 2.4.2 CT アルゴリズム(スペクトルフィッティング)

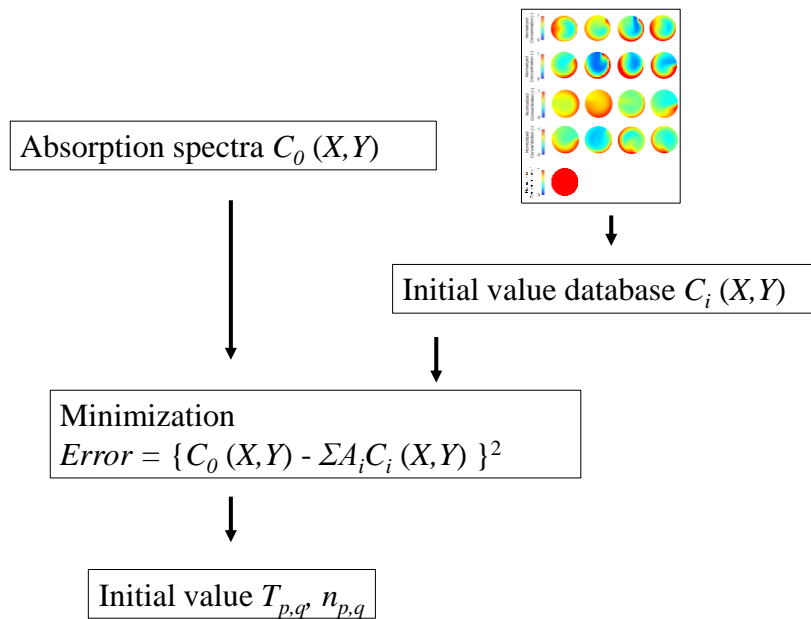


図 2.4.3 CT アルゴリズム(初期値設定)

2.5 数値流体シミュレーション (Computed Fluid Dynamics : CFD)

実際のエンジン開発においてコンピュータを使用したシミュレーションは広く活用されており，特に流体を対象としてシミュレーションは **Computed Fluid Dynamics(CFD)** と呼ばれる．CFD は吸排気管の流れやガスの分配，エンジン筒内の燃焼等様々な場面で使用され，本研究では商用コード(**SCRYU/Tetra V12** : ソフトウェアクレイドル)を用いて実機試験相当のシミュレーションを実施する．なお，CFD で考慮した保存式は以下の通りで，これらの保存式から流体の流れや濃度の分布を計算している [58]．

質量保存式：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \rho u_i = 0 \quad (2.5.1)$$

運動量保存式：

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_j \rho u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i \quad (2.5.2)$$

拡散物質の保存式：

$$\frac{\partial \rho C}{\partial t} + \frac{\partial u_j \rho C}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \rho D_m \frac{\partial C}{\partial x_j} + \rho \dot{d} \quad (2.5.3)$$

乱流エネルギー・乱流消失率の式 (k-ε 方程式)：

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial u_i \rho k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_s - G_{S1} - G_{S2} - G_{S3} - \rho \varepsilon \quad (2.5.4)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial u_i \rho \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} (G_s - G_{S1} - G_{S2} - G_{S3}) - C_2 \frac{\rho \varepsilon^2}{k} \quad (2.5.5)$$

$$G_s = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}, \quad G_{S1} = \frac{2}{3} \rho k \frac{\partial u_i}{\partial x_i}, \quad G_{S2} = \frac{2}{3} \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right)^2, \quad (2.5.6)$$

$$G_{S3} = \frac{\mu_t}{\sigma_t \rho^2} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \frac{\partial P}{\partial x_i}$$

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.5.7)$$

σ_k	σ_ε	C_1	C_2	C_3	C_μ	σ_t
1	1.3	1.44	1.92	0.0	0.09	0.9

また、数式中で使われている各文字は以下の通り。

x_i	： 位置座標	[m]
u_i	： x_i 方向の流速	[m/s]
t	： 時間	[s]
ρ	： 流体の密度	[kg/m ³]
μ	： 粘性係数	[Pa·s]
σ_{ij}	： 応力テンソル	
g_i	： 重力加速度	[m/s ²]
k	： 乱流エネルギー	[m ² /s ²]
ε	： 乱流消失率	[m ² /s ³]
C	： 拡散物質の濃度	[-]
D_m	： 拡散係数	[m ² /s]
\dot{d}	： 拡散物質の発生項	[1/s]

第3章 実験及びシミュレーションの内容

3.1 実験による 4 重円管を用いた CH₄ 濃度分布計測

CT 及び半導体レーザ吸収法の濃度分布計測に対する精度検証を行うため，図 3.1.1 のような 4 重円管に対して，図中のコンターに示すような濃度の異なる CH₄ ガスを噴射し，サンプリング及び CT 計測を行う．窓付き 32 パス計測セルを図 3.1.2 に、精度検証用 4 重円管を図 3.1.3 に、パイプ写真を図 3.1.4 に示す．また，図 3.1.5 に試験装置図、図 3.1.6 に試験装置写真、図 3.1.7 に CH₄ 吸収波形，図 3.1.8 に CH₄ 吸収量と濃度の関係（実験値）を示す．

ガス濃度測定のためのサンプリングは，プローブから吸引したガスを別の確認用計測セルへ取り込む（CH₄、N₂ 及びサンプリング速度はほぼ同じに調整）ことによって行う．取り込んだガスは，CH₄ の吸収帯である 1635nm 域のレーザ(周波数 1kHz)を透過させ，この吸収量を検出することにより CH₄ の濃度を計測する．また，ここで得られた CH₄ 濃度の測定結果と CT 計測セルで計測された 2 次元濃度分布結果の比較を行う．このようにして得られた CH₄ 濃度分布の結果から，CT 解析次数の影響、座標変換の影響を評価する．

- ① 使用装置：CT 計測セル(図 3.1.2)、精度検証用パイプ(図 3.1.3)
- ② 標準ガス：N₂+CH₄、常温
- ③ 評価項目：サンプリング結果との比較、CT 解析次数の影響、座標変換の効果把握

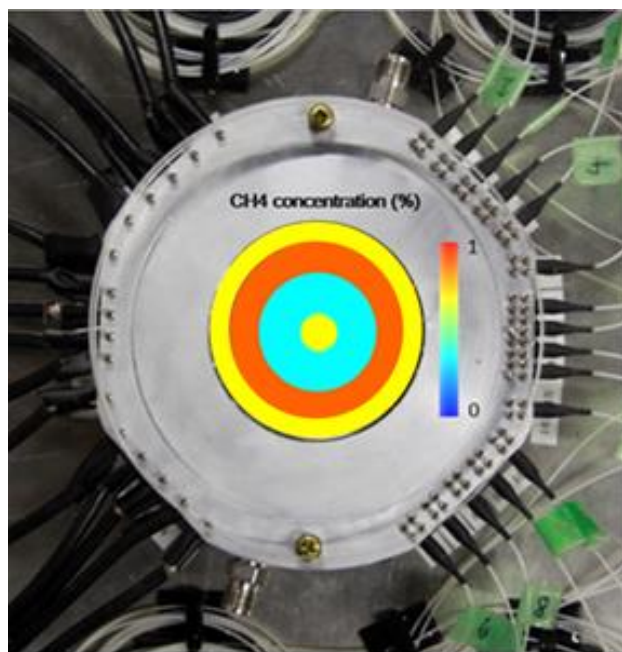


図 3.1.1 CT-TDLAS 精度検証用 4 重円管による CH₄ 濃度分布計測

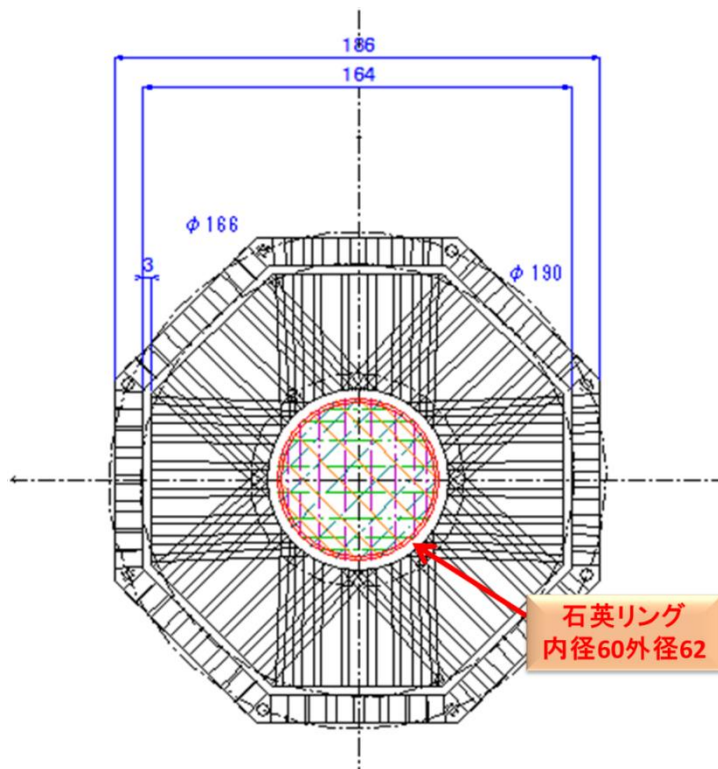
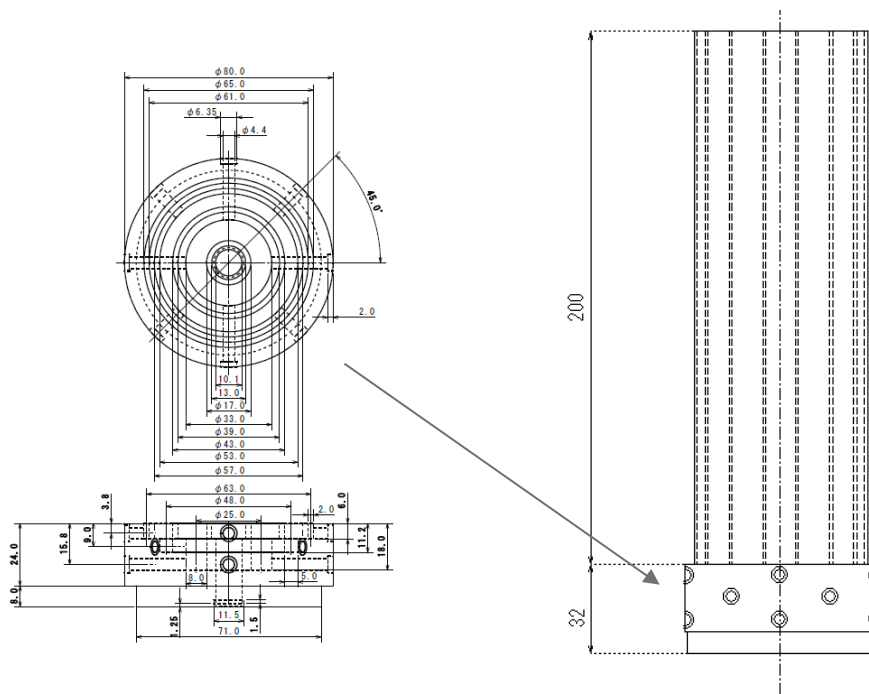


図 3.1.2 窓付き 32 パス計測セル

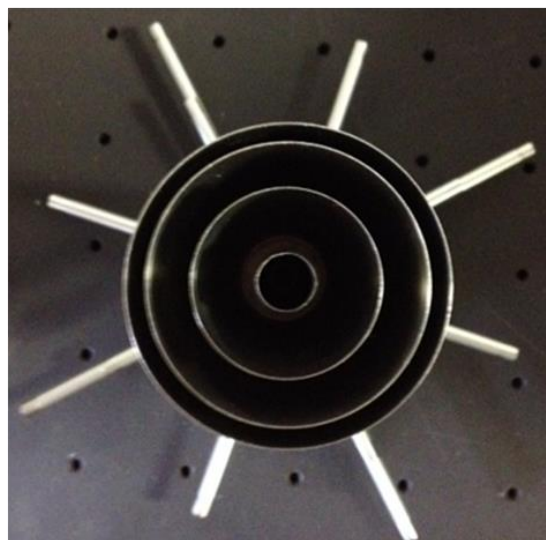


パイプ位置：中心

図 3.1.3 精度検証用パイプ設計図



(a) 全体図



(b) 上面(パイプ：中心)

図 3.1.4 精度検証用パイプ写真

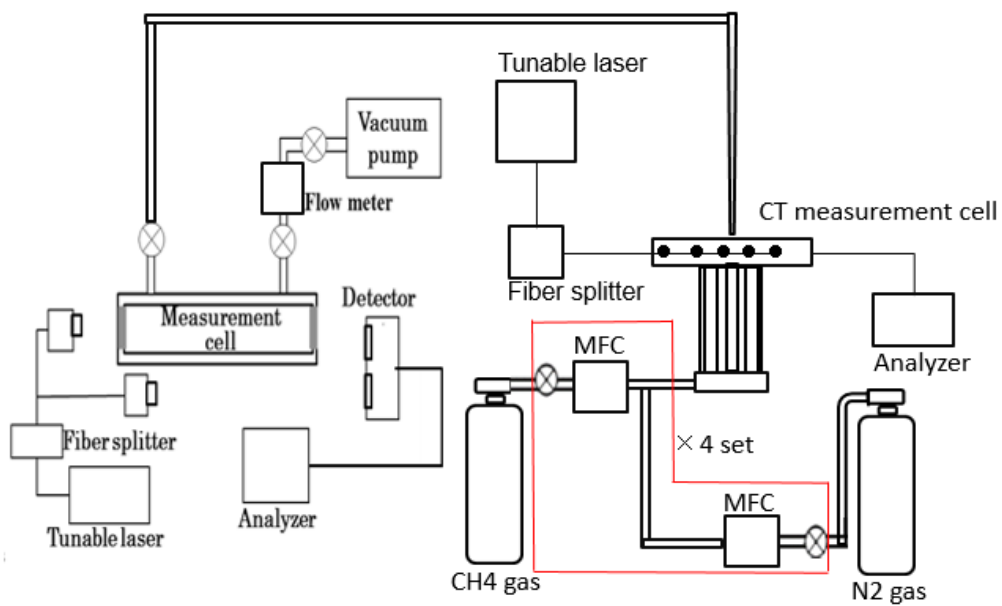


図 3.1.5 サンプルング試験装置概略図

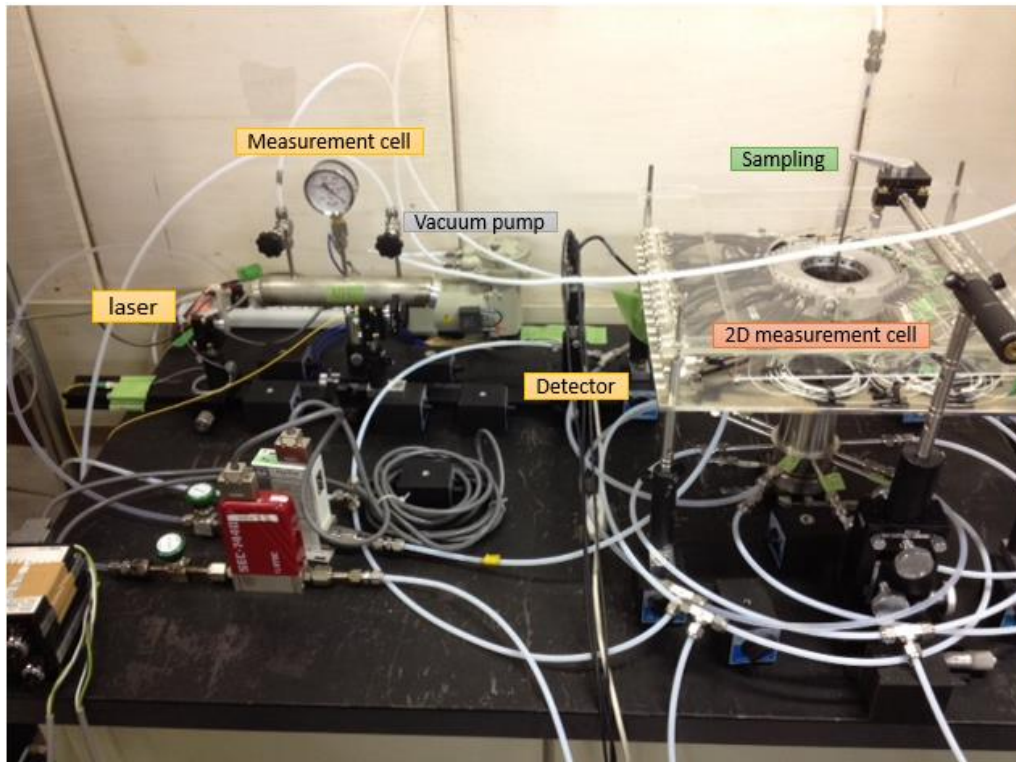


図 3.1.6 サンプルング試験装置写真

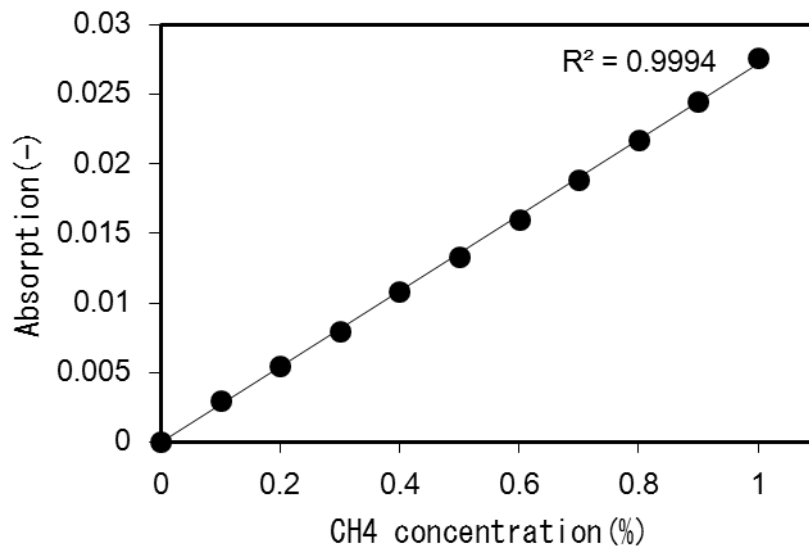


図 3.1.7 CH₄吸収量と濃度の関係 (実験値)

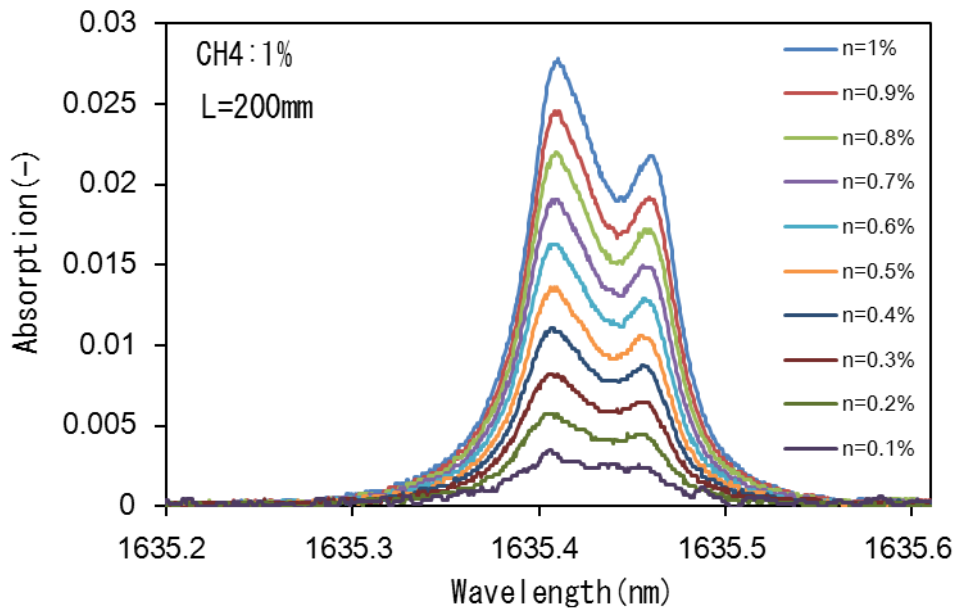


图 3.1.8 CH₄ 吸收波形

3.2 実験による NH₃ 濃度分布 2 断面同時計測

実際のディーゼルエンジン排出ガス後処理装置の開発では、排気管が曲がった後の流れの分布や NH₃ 濃度分布を詳細に把握する必要がある。そこで本研究では、図 3.2.1 に示す通り 32 パス計測セルを 2 つ重ねて配置し 2 断面同時に NH₃ 濃度計測を行うことで、排気管曲げパイプ通過後の NH₃ 濃度分布の旋回挙動を詳細に把握することを試みる。なお、計測条件は以下の通り。NH₃ 噴射位置、流量などを変化させた計測を行うとともに時系列での計測の実施や、計測の再現性の確認を実施する。

- ① 使用装置：CT 計測セル(図 3.2.1, 図 3.2.2, 図 3.2.3), 延長装置(図 3.2.4)
- ② 標準ガス：N₂+NH₃(2%), 常温
- ③ NH₃ 噴射位置：r=0mm, 10mm,
- ④ NH₃ 流量：30L/min, 60L/min
- ⑤ 計測回数：各 2 回
(r=10mm、30L/min は NH₃ 噴射開始から終了までの動画
データを取得：2 回)
- ⑥ 評価項目：直角曲げ配管による NH₃ 濃度分布特性(旋回挙動)
- ⑦ 比較対象：シミュレーション結果との比較, CT 解析次数の影響, 座標変換の効果把握

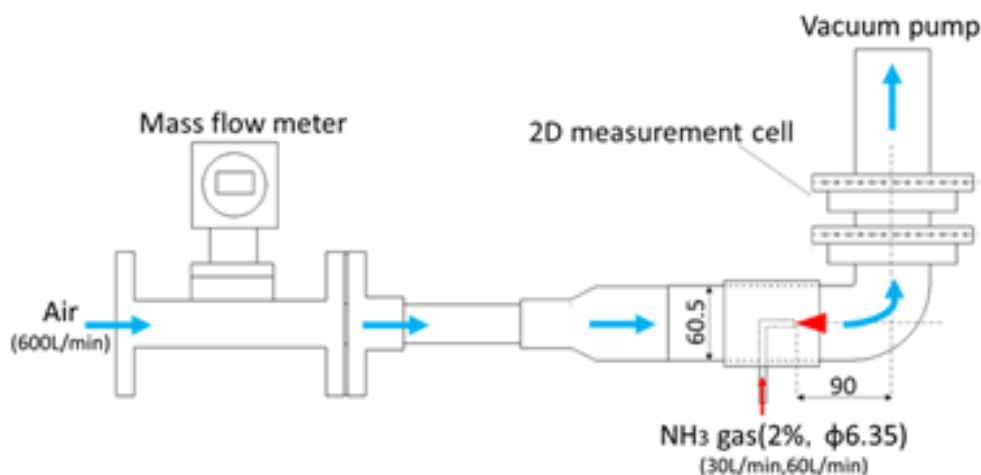


図 3.2.1 曲がり管 NH₃ 濃度計測システム概要

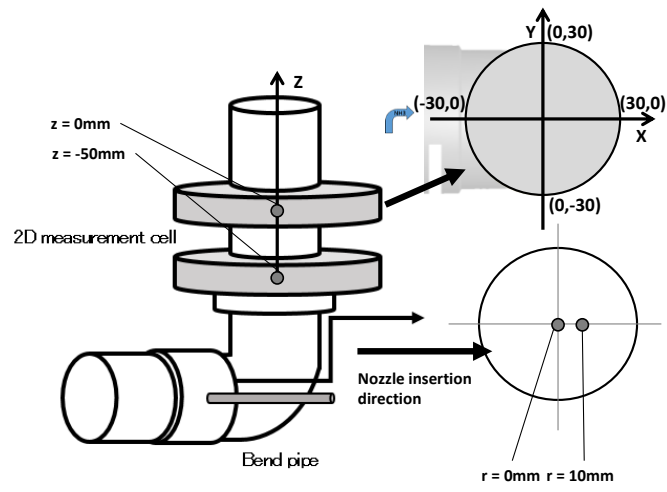


図 3.2.2 NH₃噴出ノズル位置

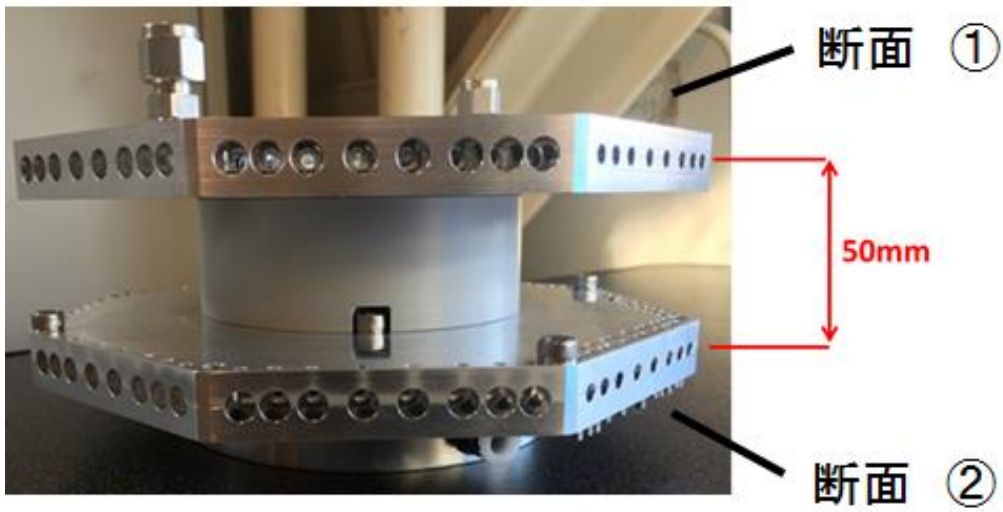
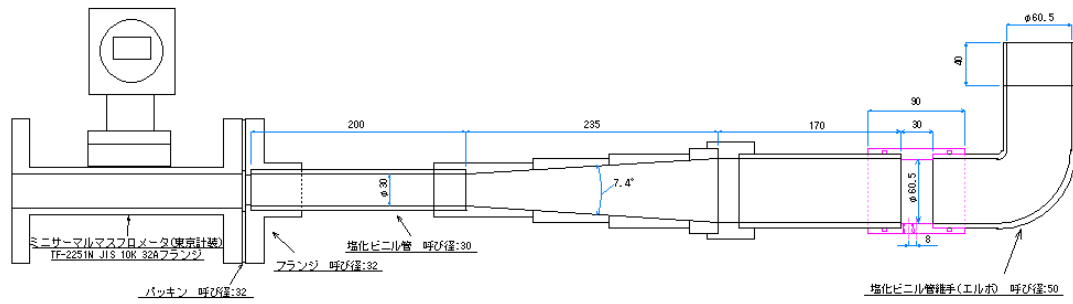
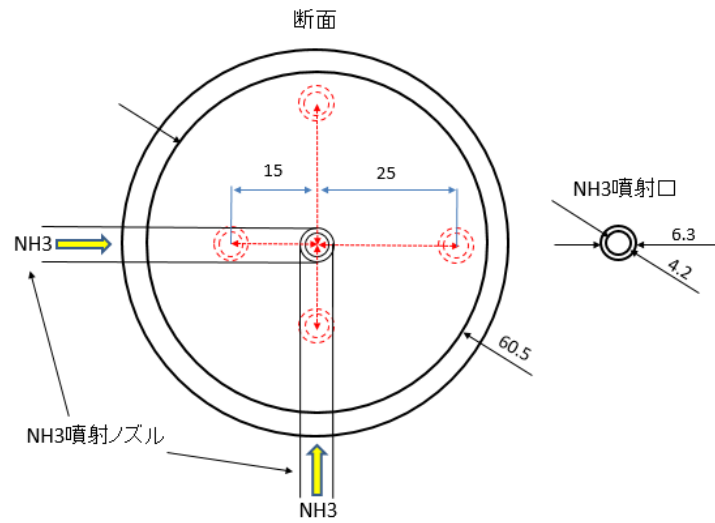


図 3.2.3 2 断面計測セル



(a)装置全体図



(b) NH₃噴射位置の移動範囲

図 3.2.4 テーパー部延長装置

3.3 シミュレーションによる NH₃ 濃度分布 2 断面同時計測

図 3.3.1 に示すように、実験と同様の曲がり管を用いた計測装置を模したシミュレーションモデルを作成し、実験と同様の表 3.3.1 に示す条件及びモデルで NH₃ 濃度分布予測のシミュレーションを実施する。また表 3.3.1 に示す通り、シミュレーションでは商用コード (SCRYU/Tetra V12 : ソフトウェアクレイドル) を用いて計算を行う。また、メッシュ数は 116 万メッシュ、メッシュサイズは 3mm、使用した乱流モデルは標準 k-ε モデルである。

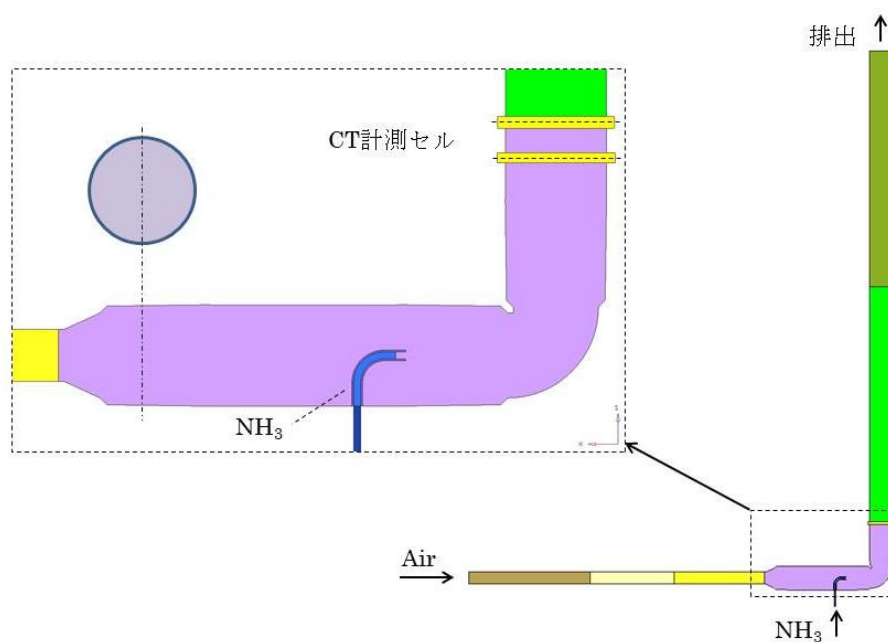


図 3.3.1 シミュレーションモデルの概略

表 3.3.1 CFD シミュレーション計算条件

コード	SCRYU/Tetra V12
メッシュ数	1.16 million
メッシュサイズ	3mm
乱流モデル	Standard k-ε
入口側境界条件 (空気)	体積流量 : 600L/min
入口側境界条件 (NH ₃)	体積流量 : 30L/min, 60L/min
出口側境界条件	静圧 : 0Pa
Wall stress	対数測 滑り無 Non-slip

第4章 実験及びシミュレーションの結果・考察

4.1 実験による4重円管を用いた濃度分布計測と精度評価

4.1.1 X-Y座標系を用いたCT解析次数の影響把握

精度検証用に準備した，4重円管を用いてCH₄濃度のサンプリングを行った．そのサンプリング結果について各円管内は一定のCH₄濃度であるとして，そこから2次元の濃度分布を仮定した上で，その値を用いてCT解析を行った結果を図4.1.1.1，図4.1.1.2に示す．図4.1.1.1が示す通り，実験値の濃度を近似する場合，14次が最も上手く関数の当てはめが行われている．また濃度分布に対しても，図4.1.1.2(a)の実験値の濃度分布に対して，X-Y座標系を用いた近似手法によって濃度分布を再構築した場合，図4.1.1.2(b)のようにCT解析次数を14次以上の次数にする必要があることが判明した．図4.1.1.2(c),(d)が示すように，それよりも低次の10次や8次の解析次数では，中央付近の濃度分布が14次の場合と比べて非常に不明瞭になっており，実験の濃度分布を再現できないことがわかる．

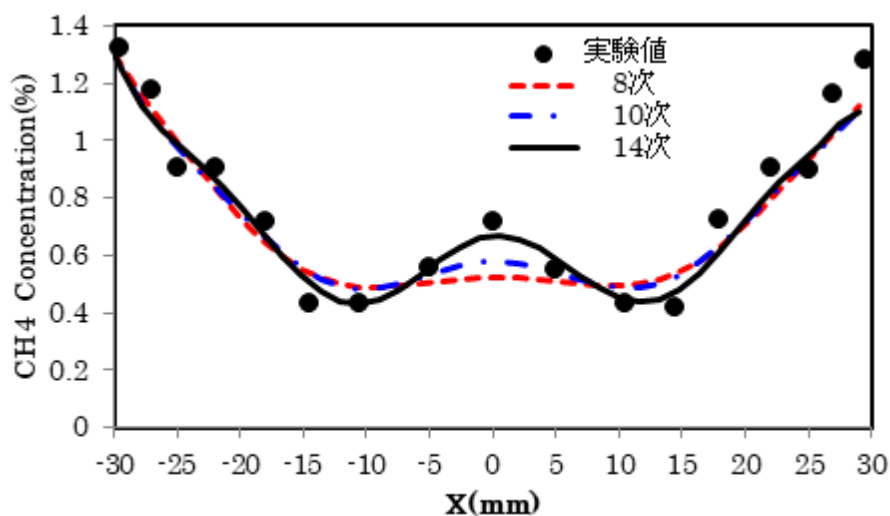


図 4.1.1.1 X-Y 座標系を用いた CH₄ 濃度分布への CT 解析次数の影響

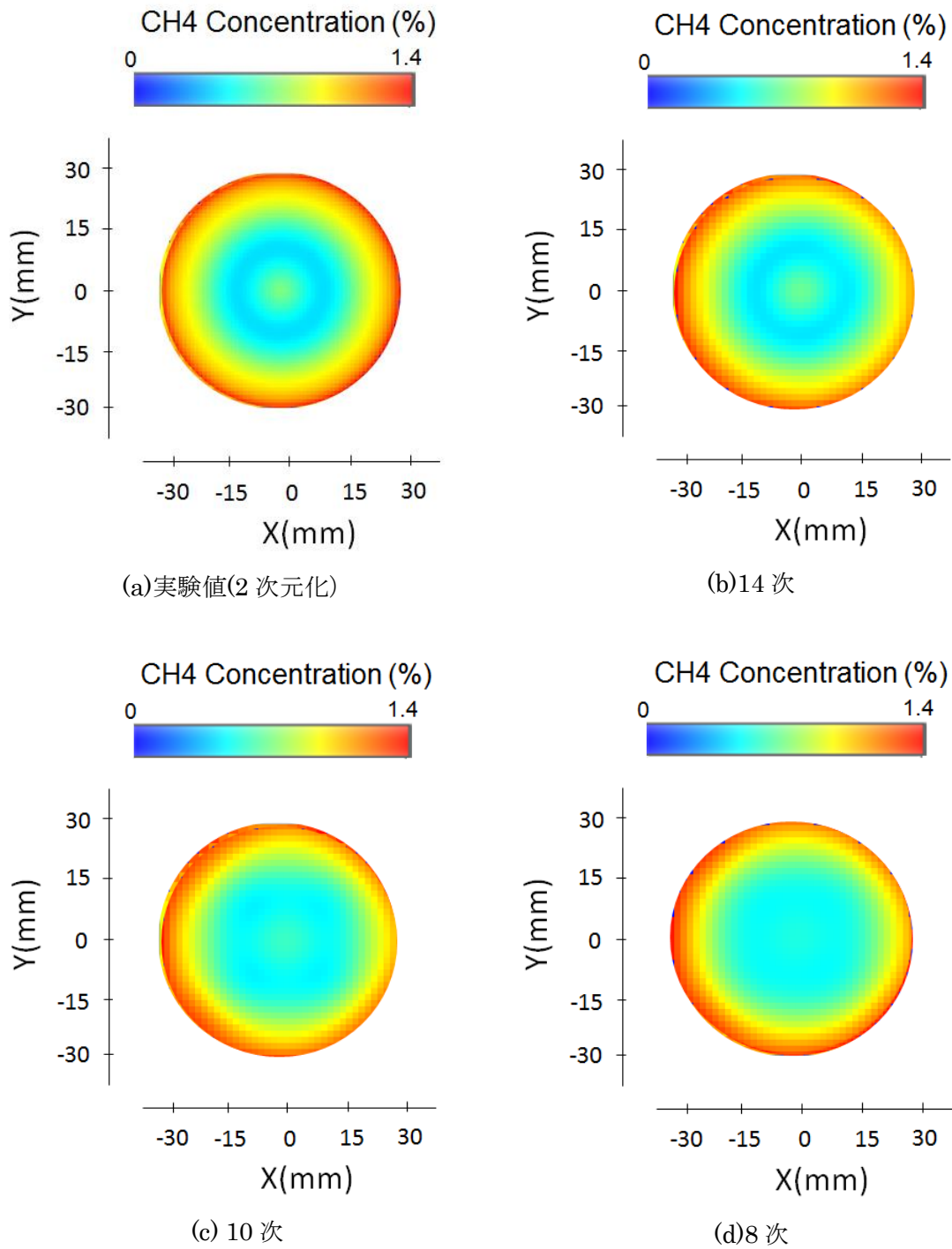


図 4.1.1.2 X-Y 座標系を用いた CH₄濃度分布への CT 解析次数の影響

4.1.2.4 重円管を用いた CH₄ 濃度分布計測試験

図 4.1.2.1 に、パイプの配置及びサンプリング点の位置関係を示し、図 4.1.2.2、図 4.1.2.3 に実験結果(CT : 14 次)及び CH₄ 濃度分布の実測結果を示す。図 4.1.2.2 が示す通り、4 重円管で現れる濃度分布は概ね取得できていると判断出来る。しかし、図 4.1.2.3 が示すように、14 次でも上手くサンプリング結果に追従出来ない箇所があり、これによって実験結果の濃度分布がやや鈍った分布を示していると考えられる。

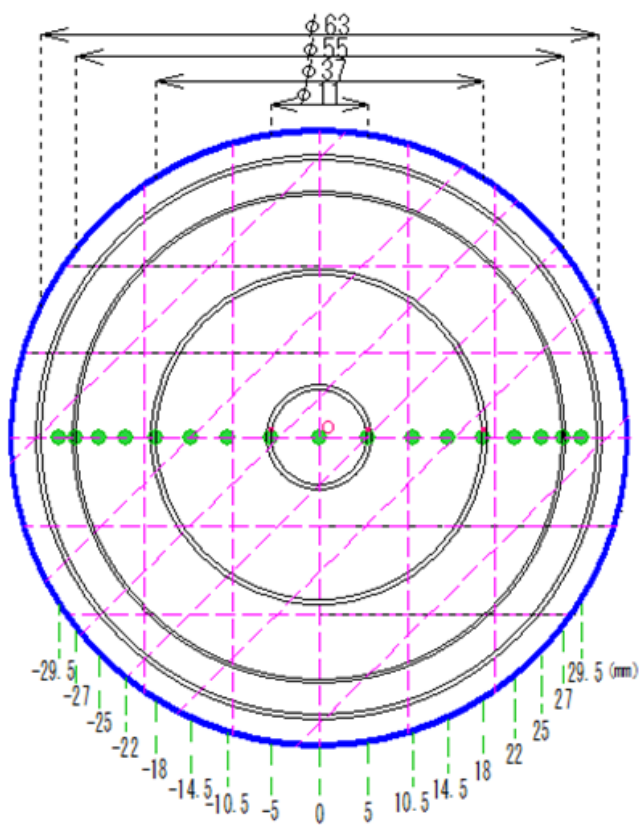


図 4.1.2.1 パイプ配置及びサンプリング点

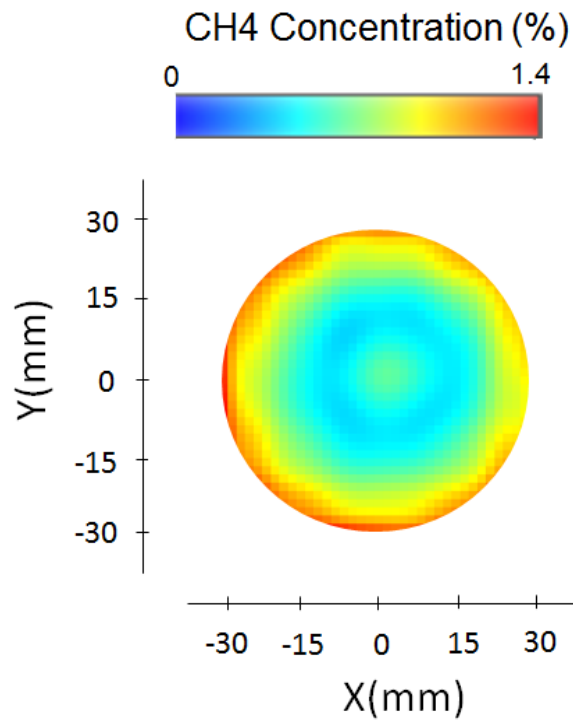


図 4.1.2.2 実験結果(CT:14 次)

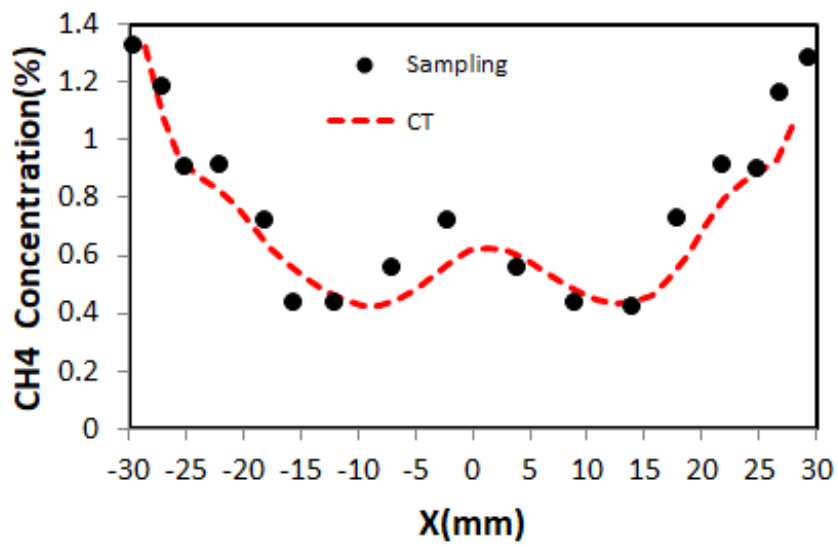


図 4.1.2.3 CH₄濃度計測結果

4.2 実験による NH₃ 濃度分布 2 断面同時計測

32 パス計測セルを用いて 2 断面の NH₃ 濃度分布について、定常での計測結果を図 4.2.1 から図 4.2.4 に示す。この時の NH₃ 濃度分布の計測条件は、3.2 節で述べた通り。各 NH₃ 濃度分布の計測結果が示すように、全ての試験条件、計測断面においてパイプの壁面近傍の NH₃ 濃度が高い領域が存在しており、その領域は試験条件や計測断面毎に異なった場所に位置している。また、 $r=0\text{mm}$, $30\text{L}/\text{min}$ の条件での時系列の NH₃ 濃度分布を図 4.2.5, 図 4.2.6 に、 $r=10\text{mm}$, $30\text{L}/\text{min}$ の条件での時系列の NH₃ 濃度分布を図 4.2.7, 図 4.2.8 に示す。断面毎の NH₃ 濃度分布が時間経過とともに変化している様子が表れており、濃度分布の時間変化が捉えられていると考えられる。

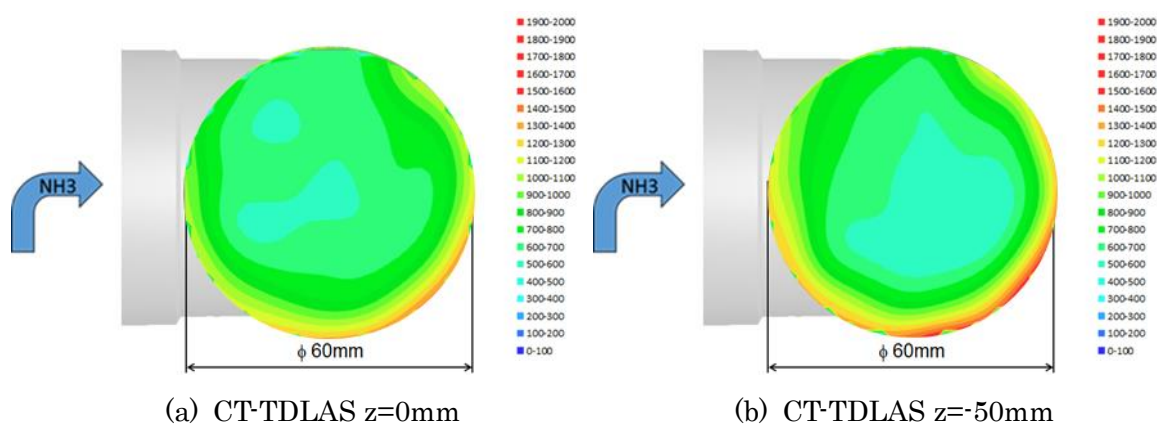


図 4.2.1 2 次元 NH₃ 濃度分布 CT-TDLAS ($r=0\text{mm}$, $30\text{L}/\text{min}$).

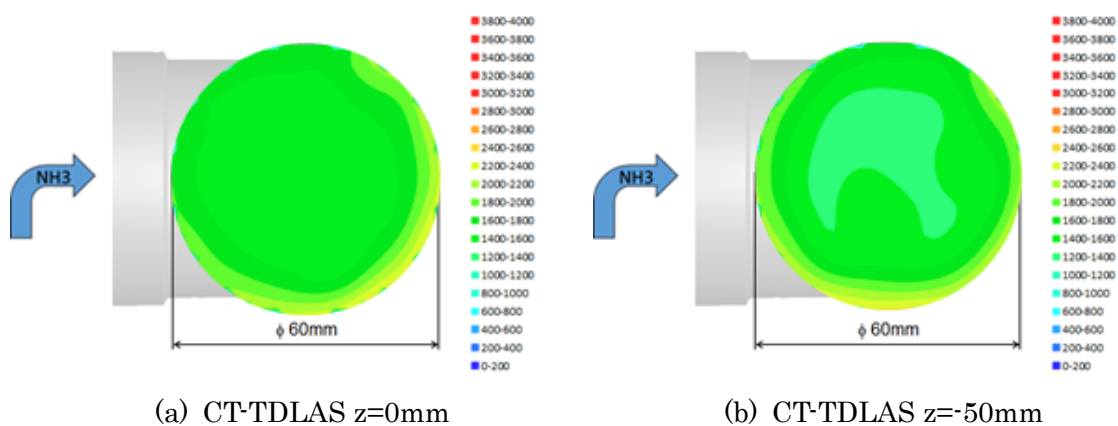


図 4.2.2 2 次元 NH₃ 濃度分布 CT-TDLAS ($r=0\text{mm}$, $60\text{L}/\text{min}$).

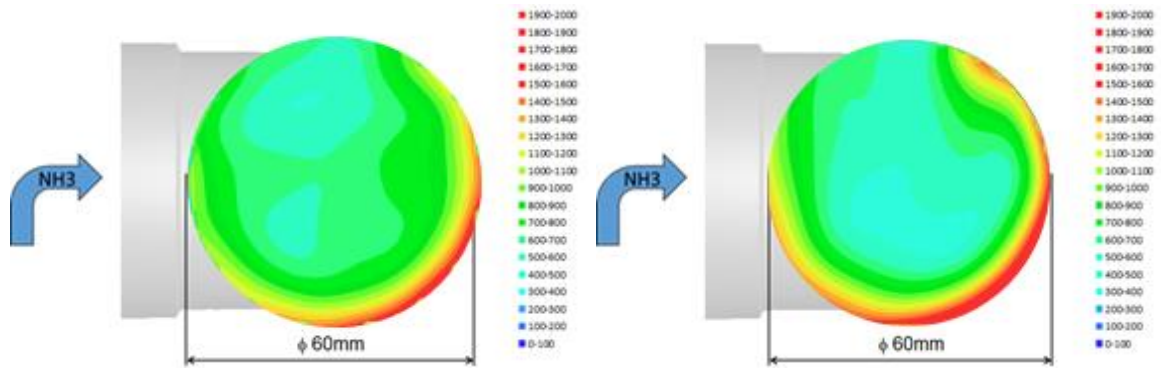


图 4.2.3 2 次元 NH_3 濃度分布 CT-TDLAS ($r=10\text{mm}$, $30\text{L}/\text{min}$).

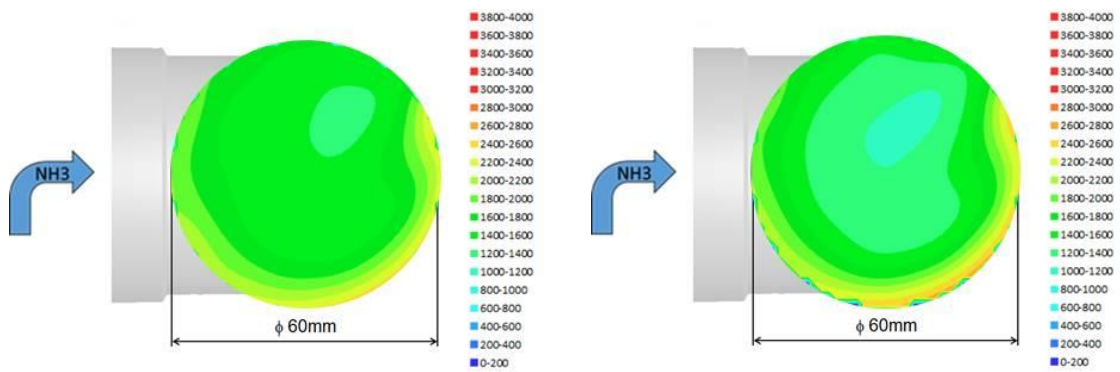
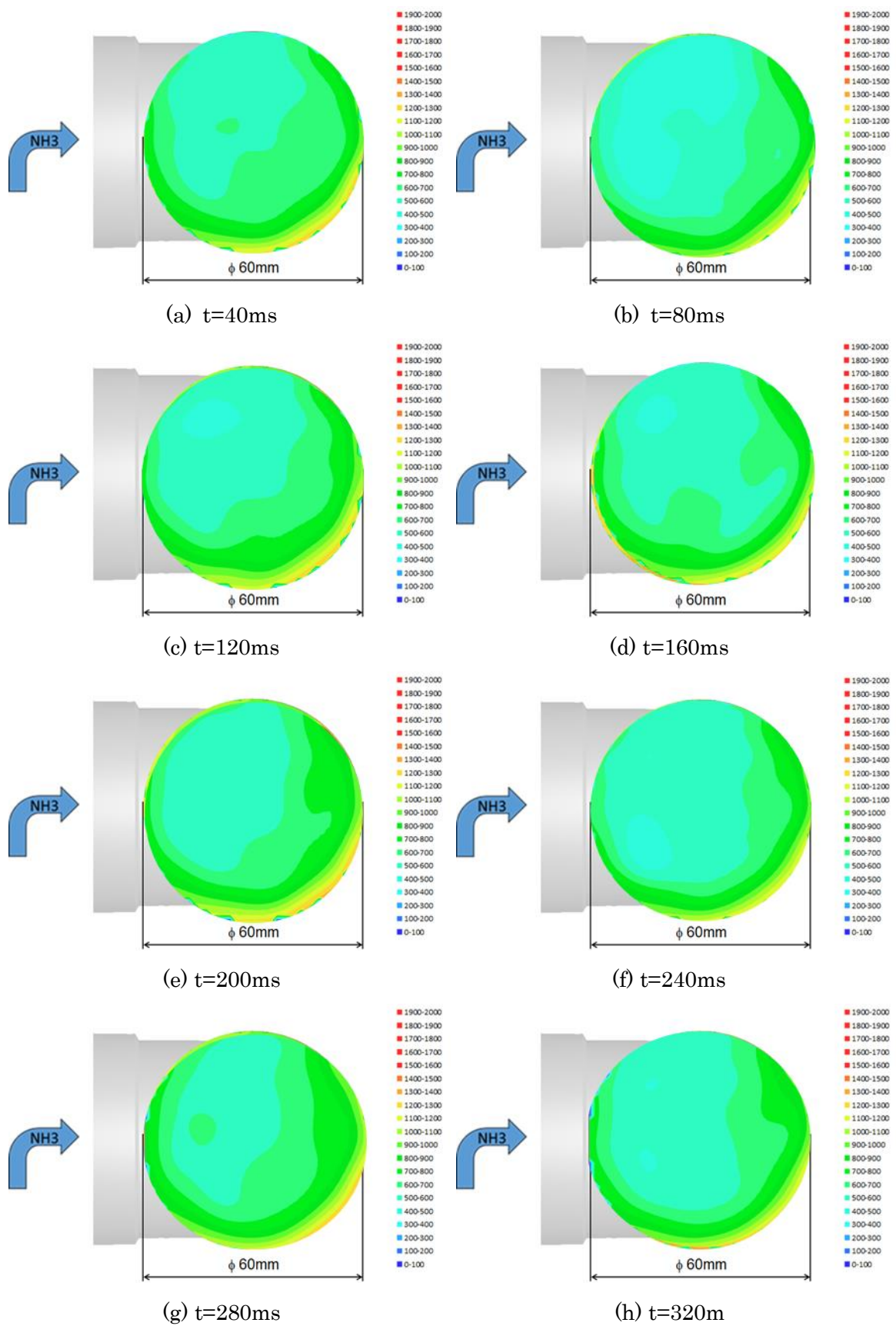


图 4.2.4 2 次元 NH_3 濃度分布 CT-TDLAS ($r=10\text{mm}$, $60\text{L}/\text{min}$).



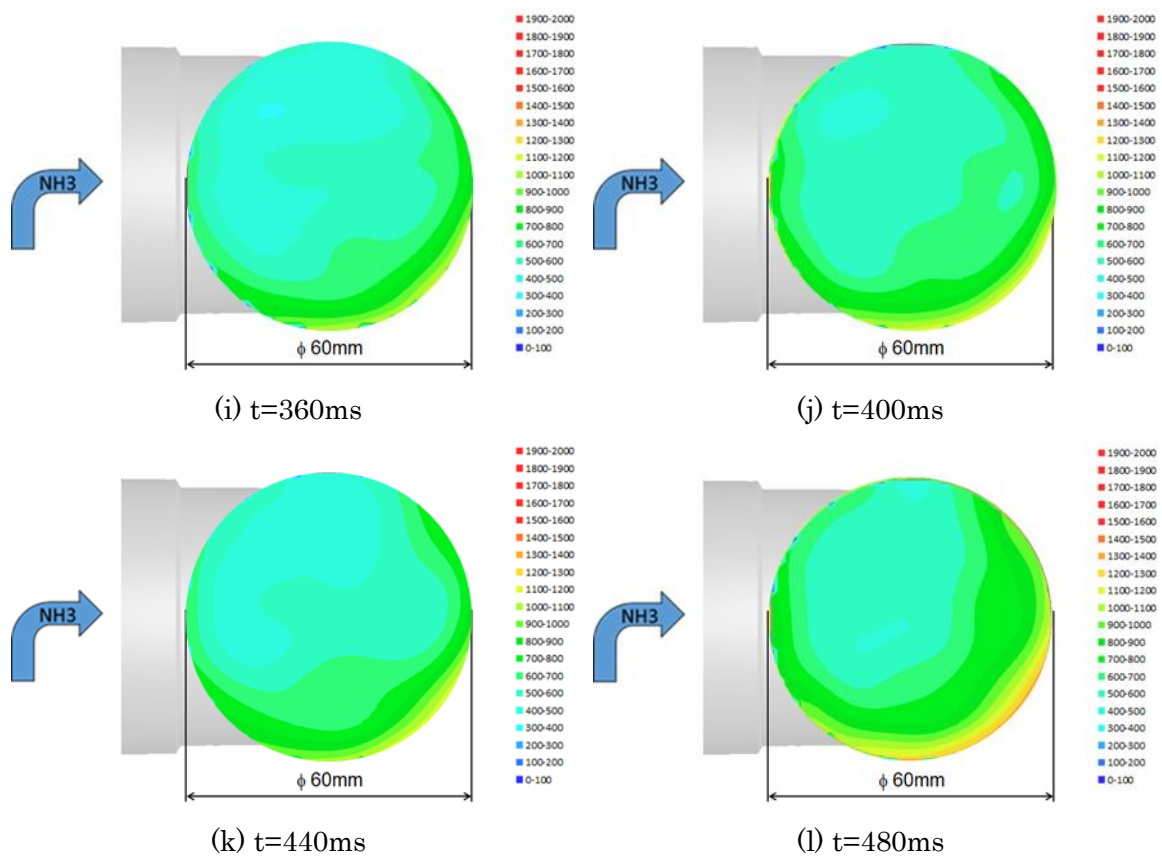
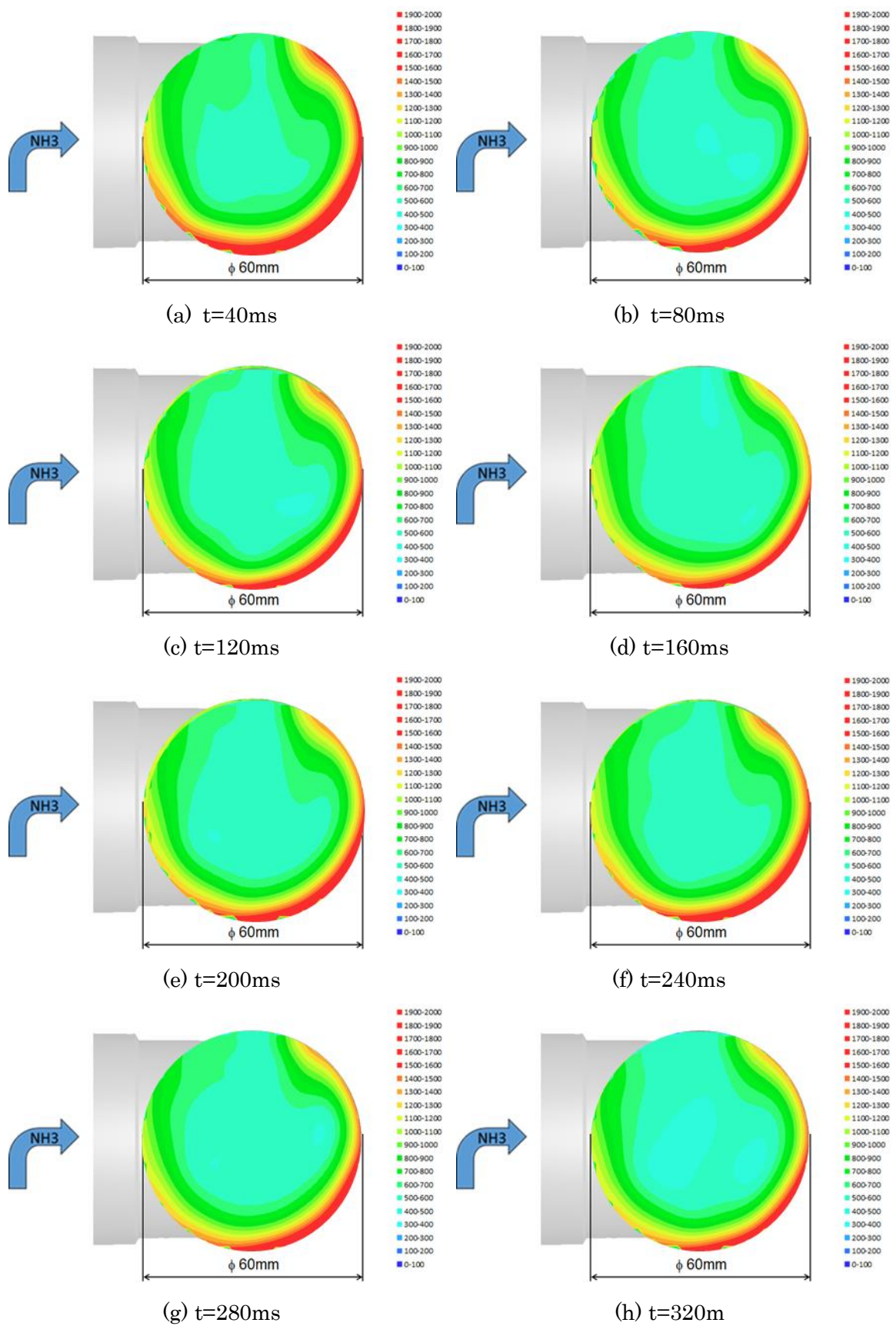


图 4.2.5 时系列 2 次元 NH_3 浓度分布 CT-TDLAS ($r=0\text{mm}$, $30\text{L}/\text{min}$, $Z=0\text{mm}$)



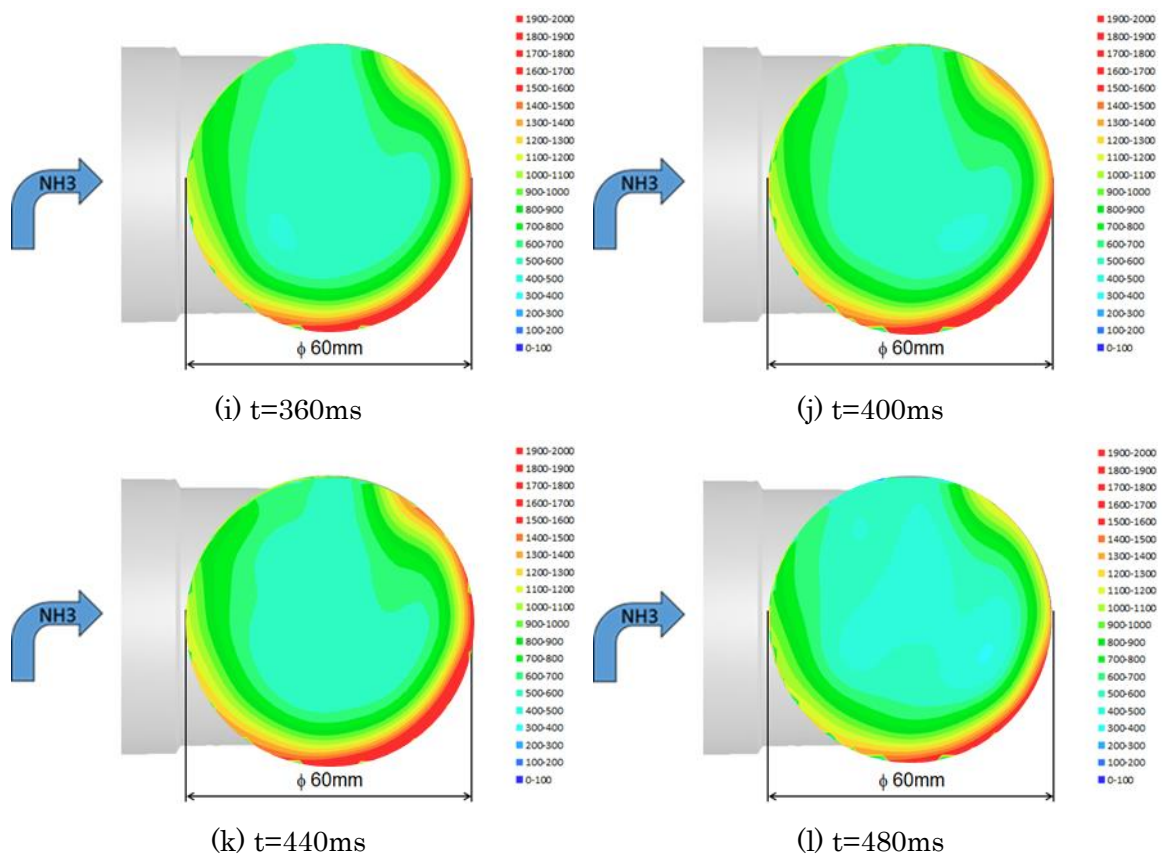
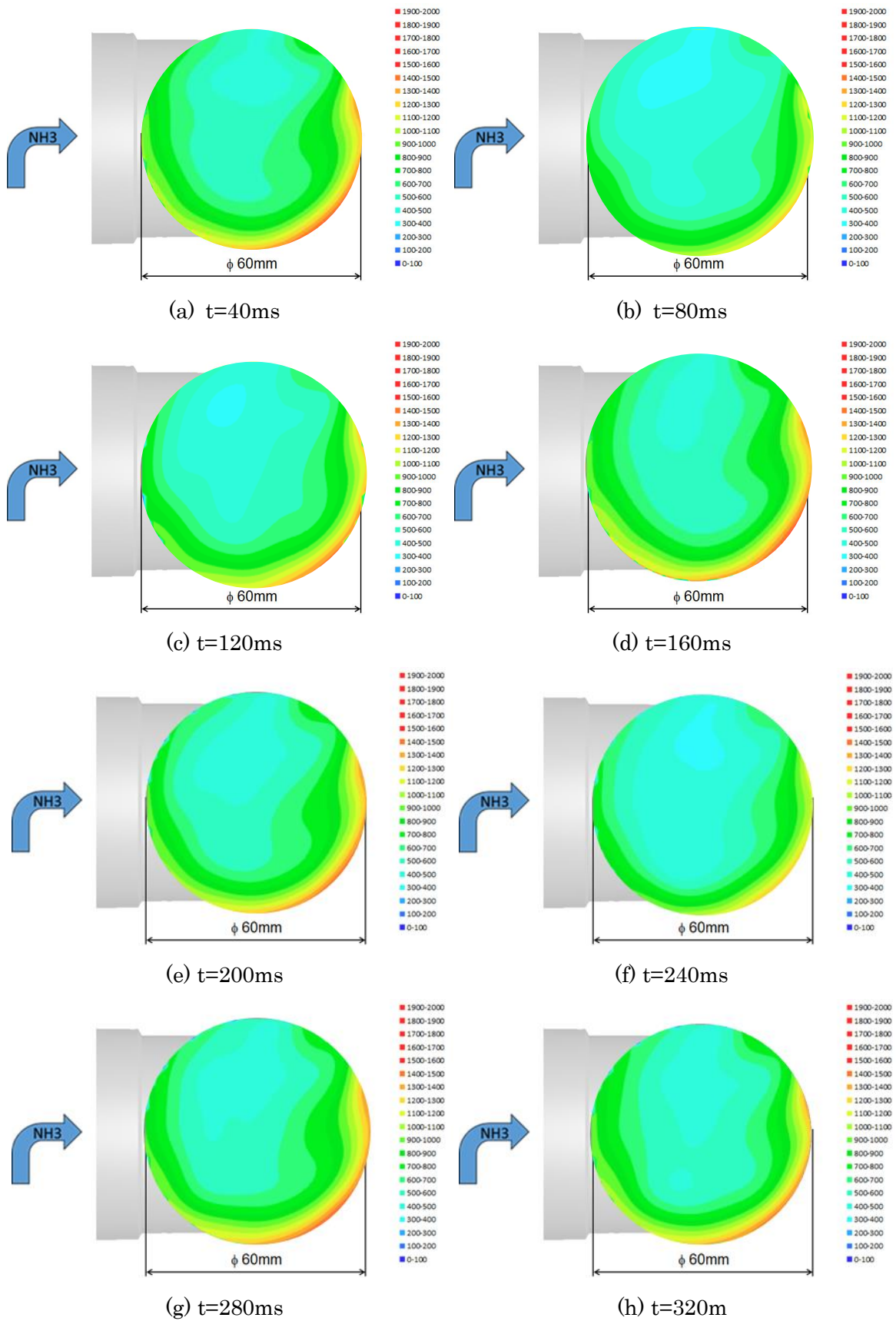


图 4.2.6 時系列 2 次元 NH₃ 濃度分布 CT-TDLAS (r=0mm, 30L/min, Z=-50mm)



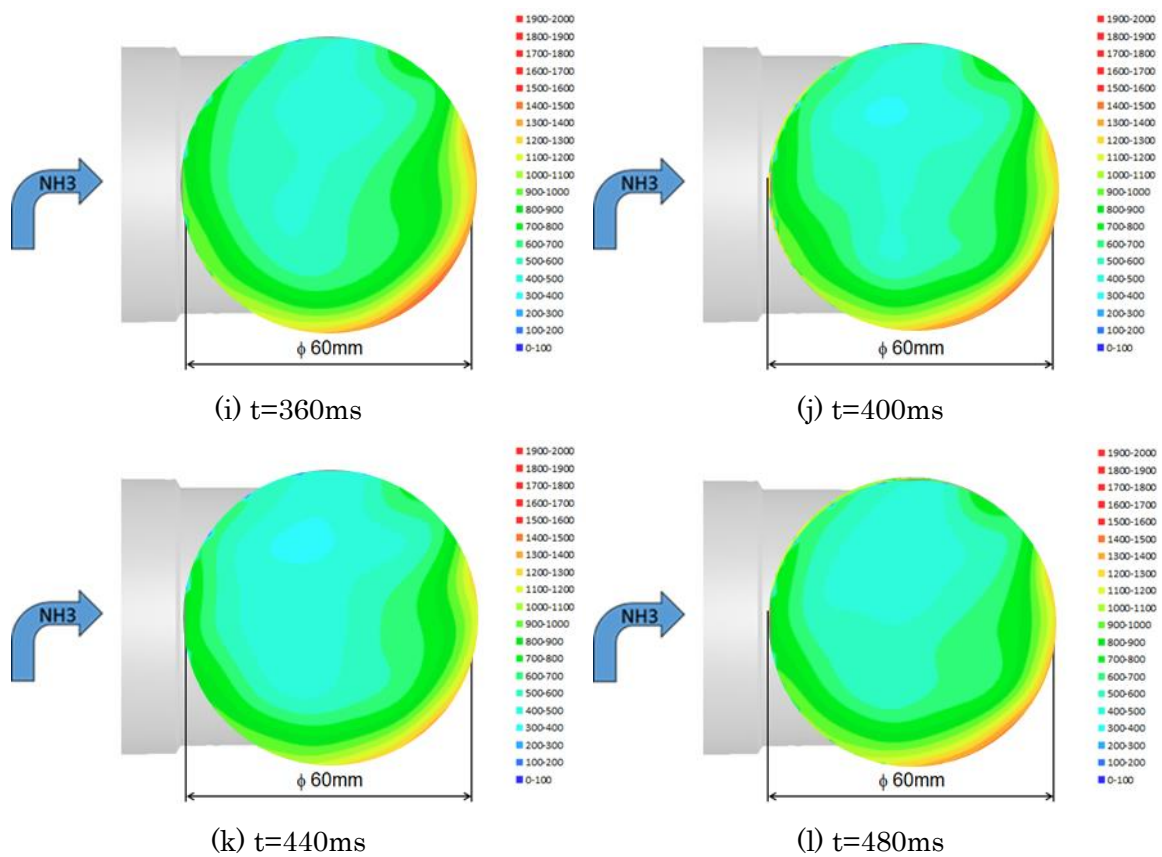
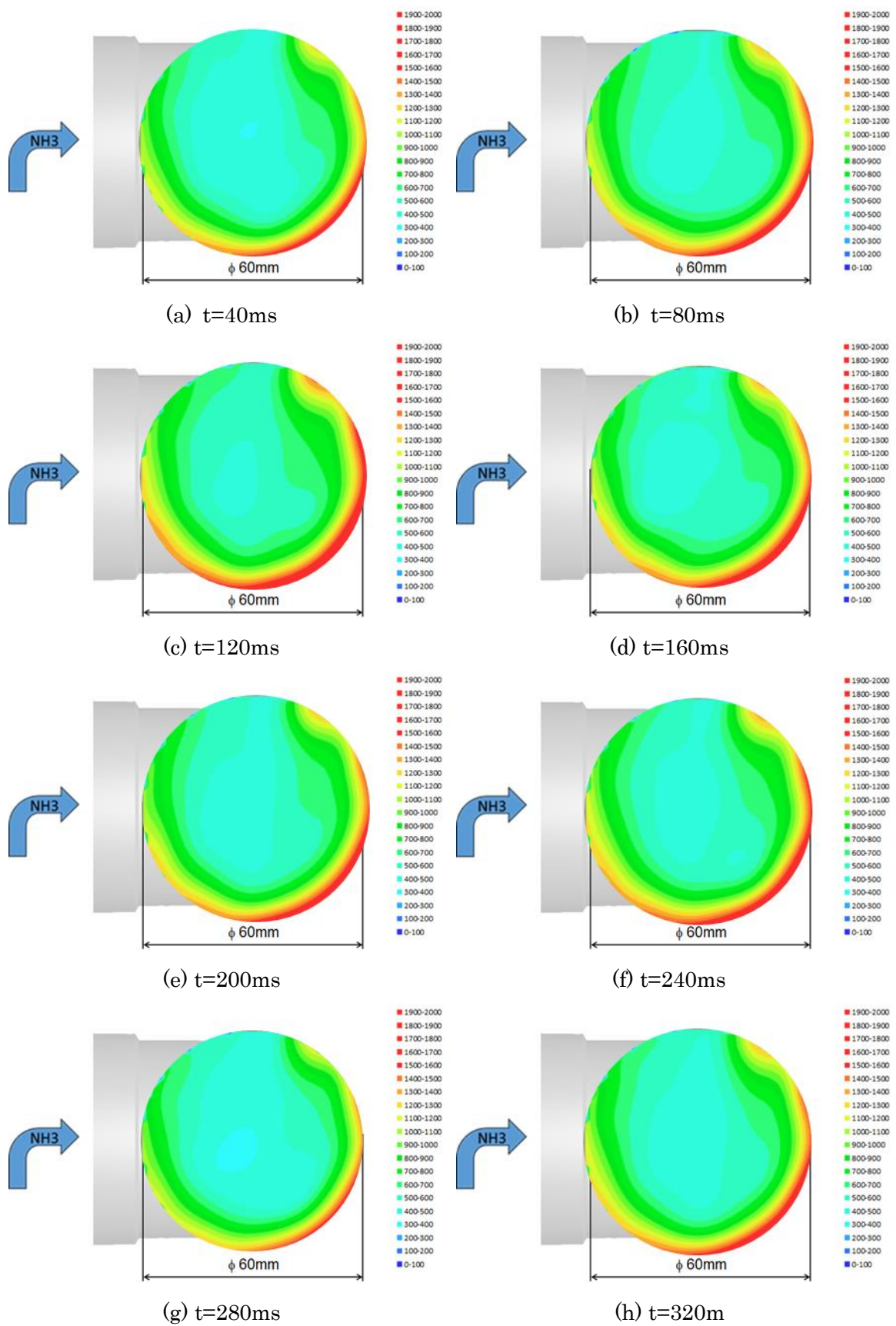


图 4.2.7 時系列 2 次元 NH_3 濃度分布 CT-TDLAS ($r=10\text{mm}$, $30\text{L}/\text{min}$, $Z=0\text{mm}$)



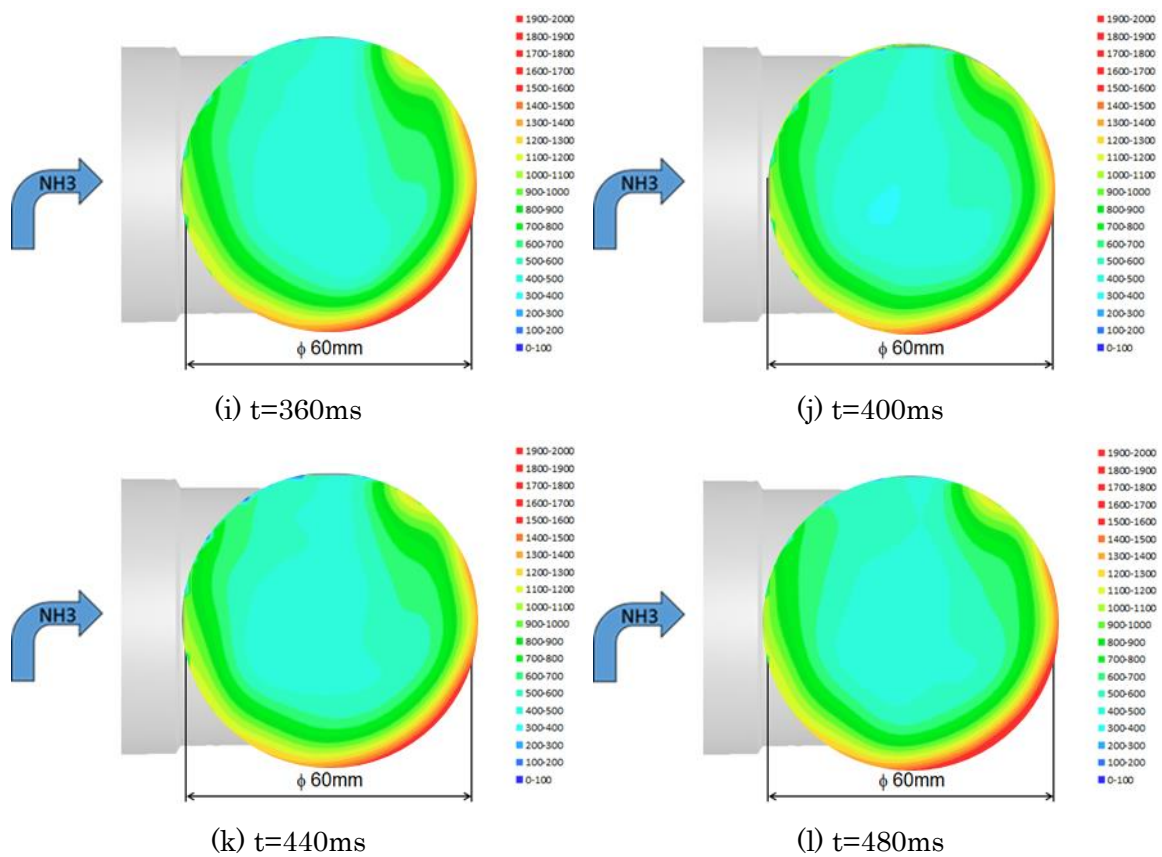


图 4.2.8 時系列 2 次元 NH_3 濃度分布 CT-TDLAS ($r=10\text{mm}$, $30\text{L}/\text{min}$, $Z=-50\text{mm}$)

4.3 シミュレーションによる NH₃ 濃度分布 2 断面同時計測

図 4.3.1 から図 4.3.4 に 4.2 節で実施した NH₃ 2 断面同時計測と同様の条件で実施したシミュレーションについて、NH₃ 濃度分布の結果を示す。この結果を図 4.2.1 から図 4.2.4 の試験結果と比較すると、NH₃ が高濃度になっている領域は、各試験条件・計測断面とも非常に近い場所に位置していることがわかる。加えて、試験条件毎の 2 次元の NH₃ 濃度分布についても比較を行うと、非常に似通った流れのパターンを示していることもわかる。また、図 4.3.5 から図 4.3.8 は $y=0\text{mm}$ における CT-TDLAS の計測結果と CFD の計算結果に関する 1 次元の NH₃ の濃度分布を示している。両者の結果を詳細に比較すると、濃度に一定の差異が見られる。しかし、パイプ壁面近傍($x=-30,30\text{mm}$)の NH₃ 濃度が高くなる領域に関しては、CT-TDLAS、CFD とともに似通った傾向を示している。

濃度分布に関しては CT-TDLAS と CFD で似た傾向を示した一方で、双方の濃度分布は計測断面毎に 2 つの違いが見られた。まず 1 つ目は、上部側の断面($z=0\text{mm}$)の NH₃ 濃度分布の方が下部側の断面($z=-50\text{mm}$)と比べて、一様度が高くなっているのが図 4.3.1 - 図 4.3.4 からわかる。2 つ目の違いは、上部側断面に存在する NH₃ が高濃度になっている場所が、下部側断面に存在する NH₃ 高濃度の場所から一定の角度ズレた場所に存在することが、図 4.3.3 と図 4.3.4 からわかる。これらの現象は、流れの旋回によって引き起こされており、CT-TDLAS による計測結果、CFD による計算結果の両方で観測された。

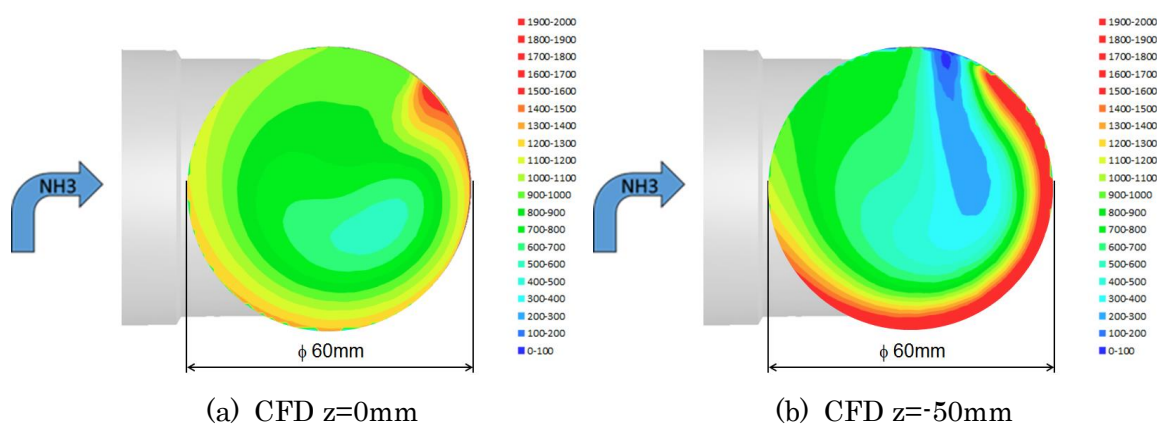
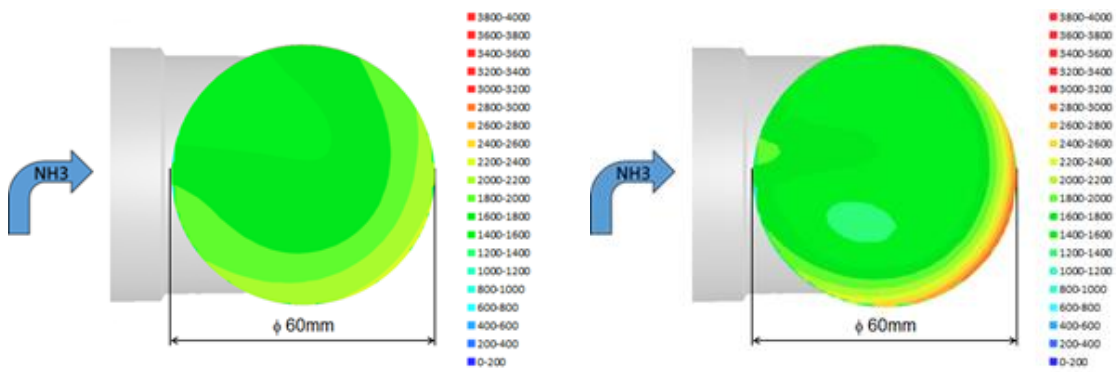


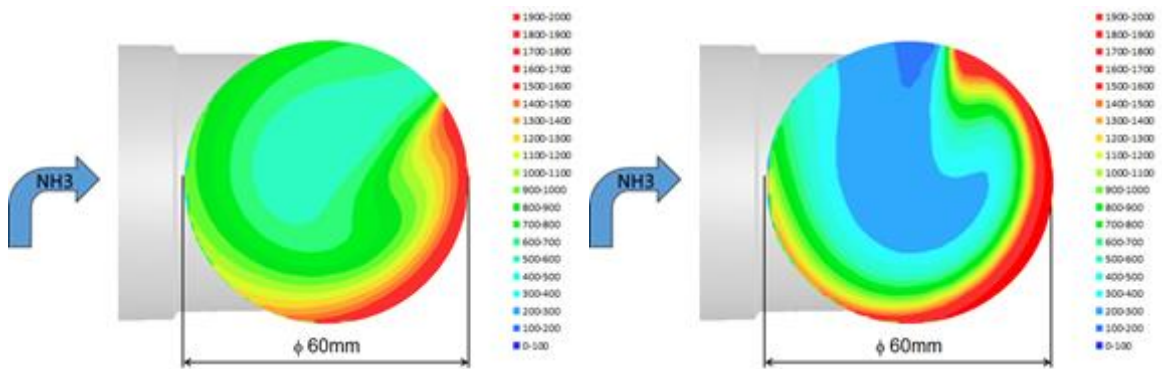
図 4.3.1 2 次元の NH₃ 濃度分布 CFD ($r=0\text{mm}$, $30\text{L}/\text{min}$).



(a) CFD $z=0\text{mm}$

(b) CFD $z=-50\text{mm}$

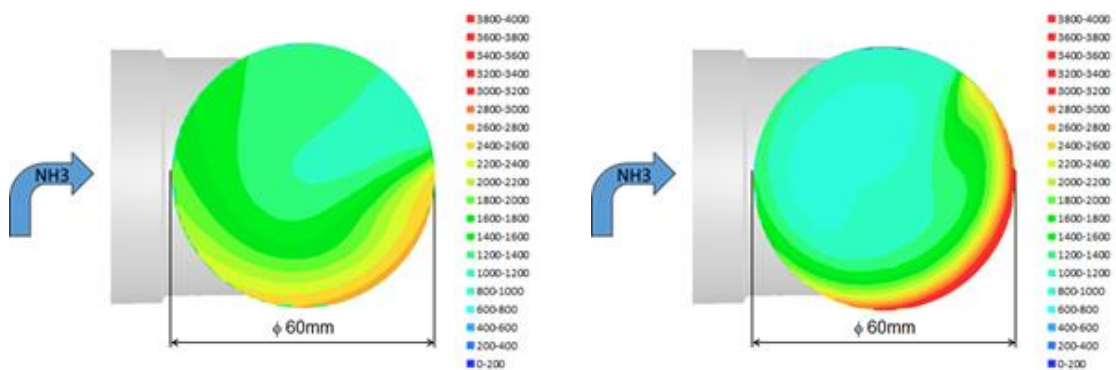
図 4.3.2 2次元の NH_3 濃度分布 CFD・理論値解析 ($r=0\text{mm}$, $60\text{L}/\text{min}$).



(a) CFD $z=0\text{mm}$

(b) CFD $z=-50\text{mm}$

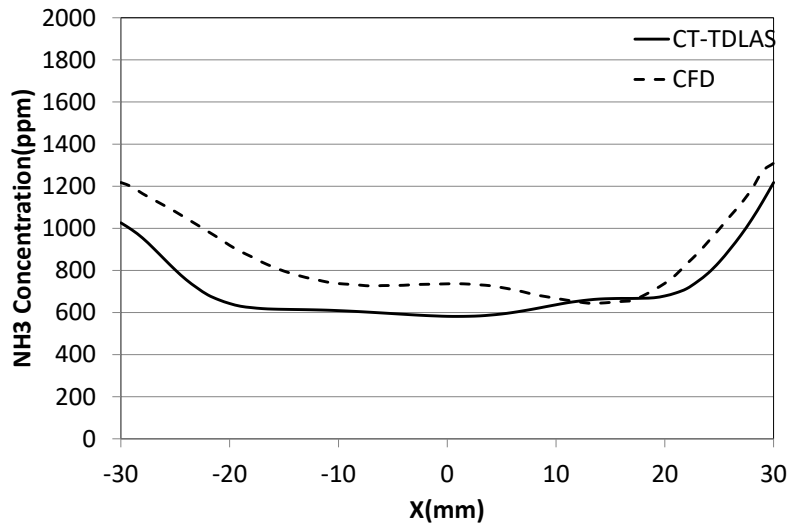
図 4.3.3 2次元の NH_3 濃度分布 CFD ($r=10\text{mm}$, $30\text{L}/\text{min}$).



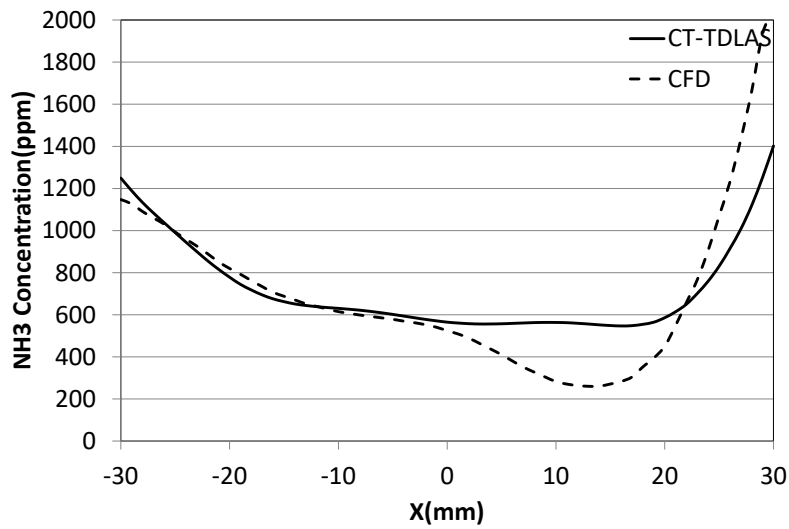
(a) CFD $z=0\text{mm}$

(b) CFD $z=-50\text{mm}$

図 4.3.4 2次元の NH_3 濃度分布 CFD ($r=10\text{mm}$, $60\text{L}/\text{min}$).

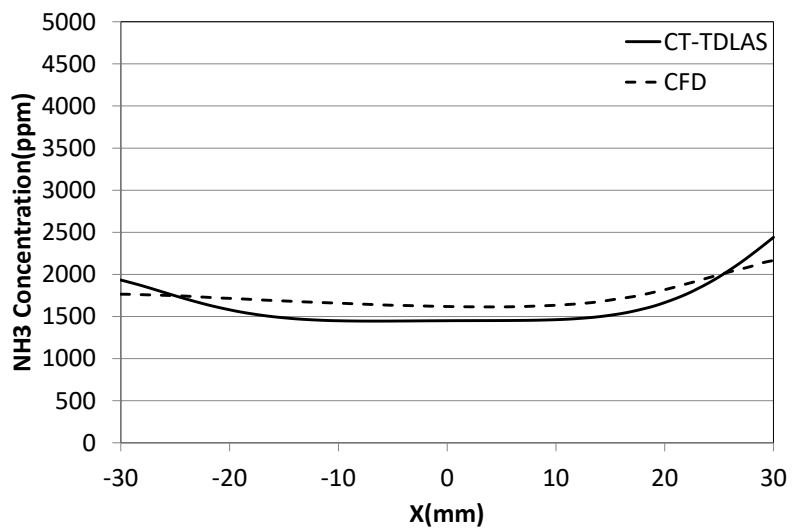


(a) $z=0\text{mm}$

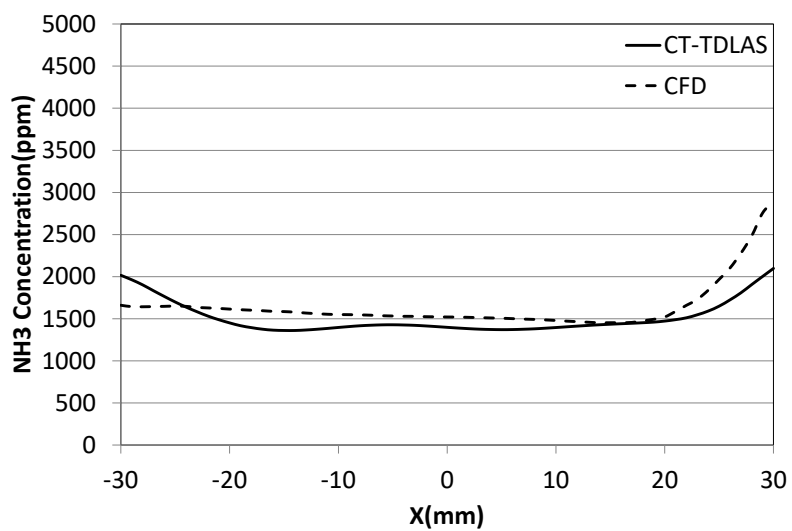


(b) $z=-50\text{mm}$

図 4.3.5 CT-TDLAS と CFD の 1D NH_3 濃度分布
($y=0\text{mm}$, $r=0\text{mm}$, $30\text{L}/\text{min}$).

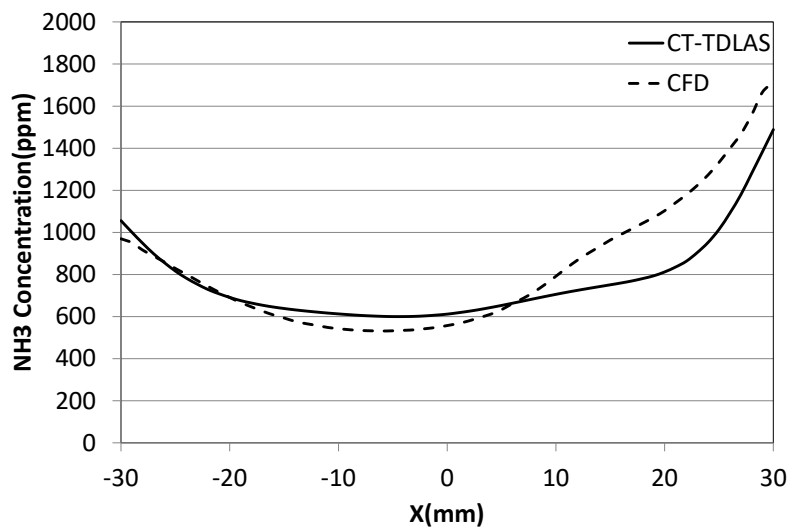


(a) $z=0\text{mm}$

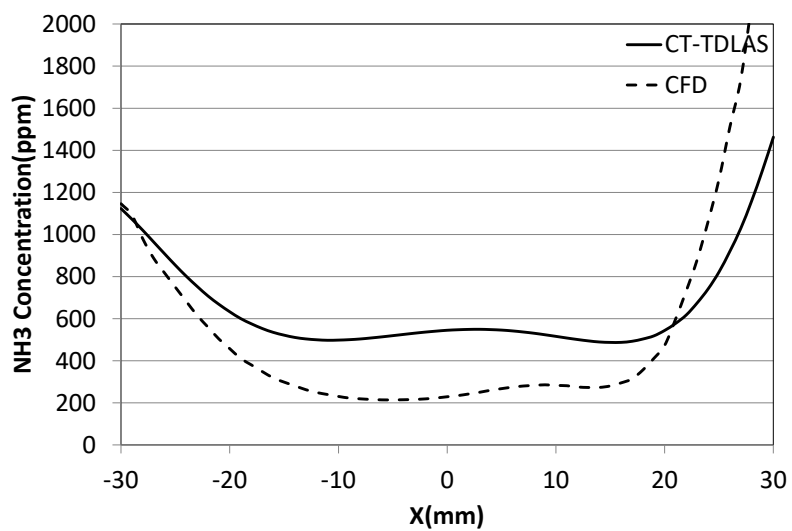


(b) $z=-50\text{mm}$

図 4.3.6 CT-TDLAS と CFD の 1D NH_3 濃度分布
($y=0\text{mm}$, $r=0\text{mm}$, $60\text{L}/\text{min}$).

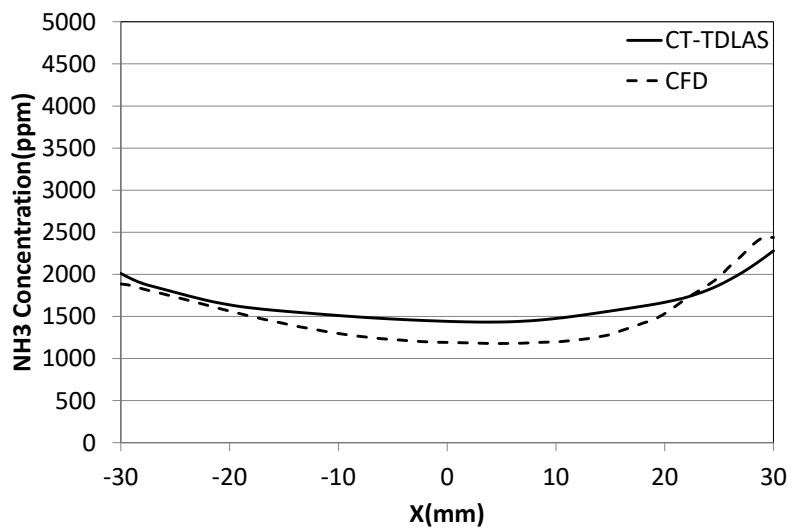


(a) $z=0\text{mm}$

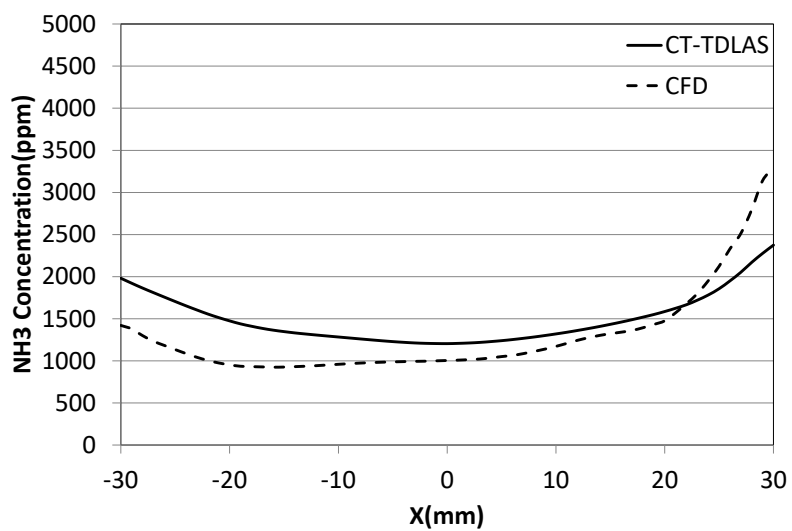


(b) $z=-50\text{mm}$

図 4.3.7 CT-TDLAS と CFD の 1D NH_3 濃度分布
($y=0\text{mm}$, $r=10\text{mm}$, $30\text{L}/\text{min}$).



(a) $z=0\text{mm}$



(b) $z=-50\text{mm}$

図 4.3.8 CT-TDLAS と CFD の 1D NH_3 濃度分布
($y=0\text{mm}$, $r=10\text{mm}$, $60\text{L}/\text{min}$).

4.4 CTによる濃度分布再構成時の精度評価

CTによる濃度分布再構成時の精度評価について、本研究では3つの指標を用いる。1つ目は半値全幅(Full Width at Half Maximum : FWHM)と呼ばれる指標である。この指標は異なる2つの濃度分布があった場合に、その値を比べることでその分布の分解能を評価することが出来る。そこで本研究では、元データの濃度分布とCTで再構成したデータによる濃度分布からFWHMの値を算出しこれを比較することで、濃度分布の分解能を評価する。2つ目の指標は、差分の2乗和(Sum of squared Difference : SSD)と呼ばれる指標である。この指標は式(4.4.1)のように定義されており、もしこの値が0に近い値を示した場合、2つの濃度分布はほとんど同じであることを表す。3つ目の指標は平均値を引いた後に正規化相互相関を計算する(Zero Normalized Cross-Correlation : ZNCC)指標である。この指標は式(4.4.2)、式(4.4.3)のように定義されており、もしこの値が1に近い値を示した場合は、2つの濃度分布がほぼ同じパターンをしており、両者の濃度分布の相関が非常に高いことを示す。

$$SSD = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{M-1} \left\{ (n_{i,j})_{\text{virtual}} - (n_{i,j})_{\text{CT-TDLAS}} \right\}^2}{NM}} / n_R \quad (4.4.1)$$

$$ZNCC = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{M-1} \left\{ (n_{i,j} - \bar{n})_{\text{virtual}} \times (n_{i,j} - \bar{n})_{\text{CT-TDLAS}} \right\}}{\sqrt{\sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{M-1} (n_{i,j} - \bar{n})_{\text{virtual}}^2 \times \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{M-1} (n_{i,j} - \bar{n})_{\text{CT-TDLAS}}^2}} \quad (4.4.2)$$

$$\bar{n} = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{M-1} n_{i,j}}{NM} \quad (4.4.3)$$

ここで $n_{i,j}$ は各計算領域における濃度を表し、 n_R は代表濃度を表す。また、 N は解析における X 軸上メッシュの総数、 M は Y 軸上のメッシュ総数を表す。

先に述べた4重円管の試験に関して、元の濃度分布(ガウス分布)とCTで再構成した濃度分布を図4.1.1に示す。これらの濃度分布は元の濃度分布が12mm、CTで再構成した濃度分布が13.2mmと異なるFWHMの値を持っている。しかし、これらの濃度分布は非常に似通っており、CTによる画像再構成は、FWHMで12mmの分解能があると判断出来る。

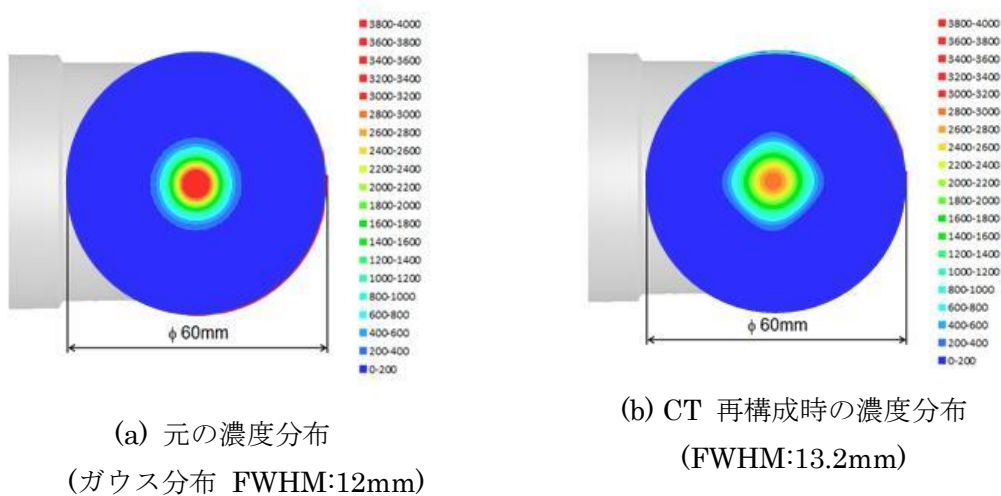
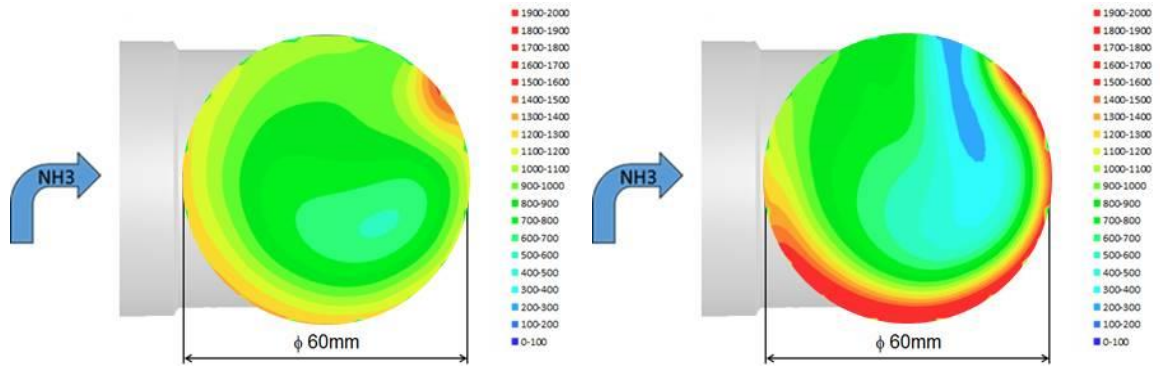


図 4.4.1 CT 再構成時の FWHM による精度評価

図 4.4.2 から図 4.4.5 は 2 断面同時計測に関する CFD 結果を用いて、CT の精度評価を行うため NH₃ 濃度分布の再構成した結果(理論値 : CT 再構成)を示している。また、表 4.4.1 は CT 再構成の濃度分布と CFD で計算した濃度分布について、それぞれの試験条件に関する NH₃ 濃度分布における SSD と ZNCC の評価結果を示している。表 4.4.1 が示す通り、全ての SSD の値は 0.1 を下回っており、また ZNCC の値は 1 条件(30L/min, r=10mm, Z=-50mm)を除いてすべて 0.9 を上回っている。加えて図 4.3.1～ 図 4.3.4 と図 4.4.2～図 4.4.5 が示す通り、理論値解析と CFD で計算した NH₃ の濃度分布は SSD・ZNCC が良好な一致性を示している通り、非常に似通った分布になっていることがわかる。

表 4.4.1 CFD と理論値(CT 再構成)間の SSD と ZNCC に関する評価結果

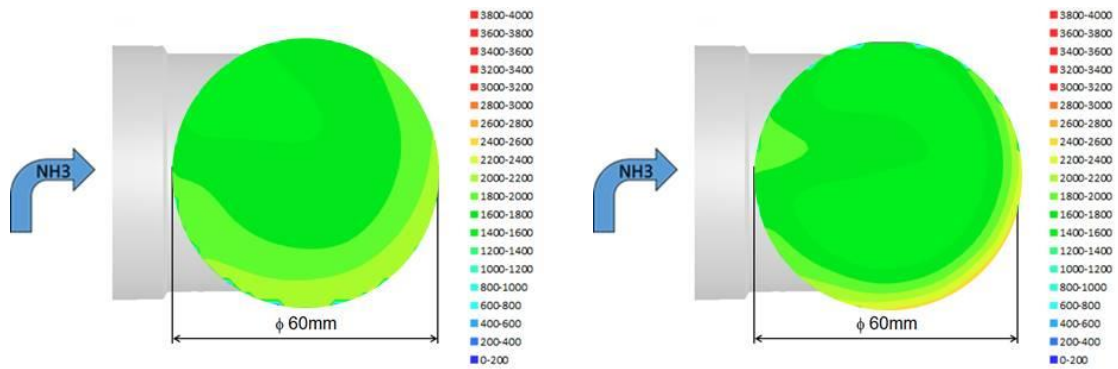
Evaluation of All measurement points (39x39=1521)				
NH ₃ flow	Nozzle position	Cell position	SSD	ZNCC
30L/min	r = 0mm	Z = 0mm	0.0295	0.947
30L/min	r = 10mm	Z = 0mm	0.0307	0.981
60L/min	r = 0mm	Z = 0mm	0.0092	0.980
60L/min	r = 10mm	Z = 0mm	0.0171	0.989
30L/min	r = 0mm	Z = -50mm	0.0825	0.890
30L/min	r = 10mm	Z = -50mm	0.0758	0.940
60L/min	r = 0mm	Z = -50mm	0.0265	0.912
60L/min	r = 10mm	Z = -50mm	0.0338	0.971



(a) Theoretical $z=0\text{mm}$

(b) Theoretical $z=-50\text{mm}$

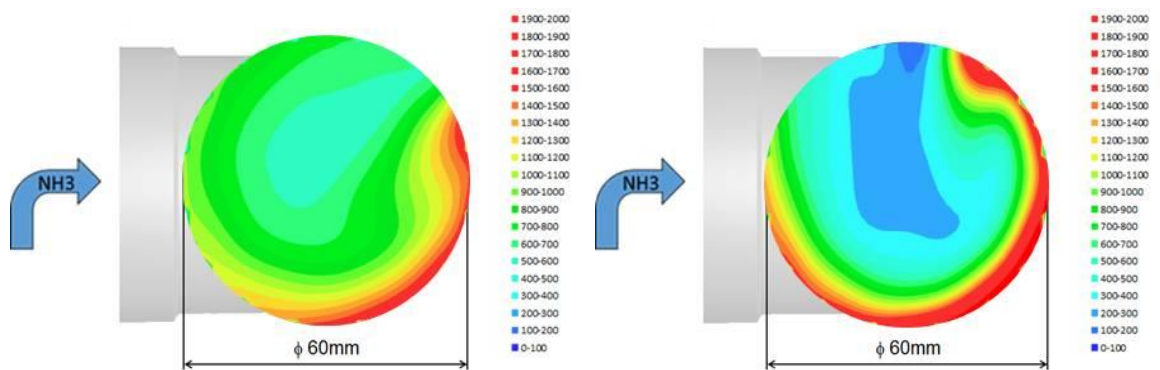
図 4.4.2 2次元の NH_3 濃度分布 理論値解析 ($r=0\text{mm}$, $30\text{L}/\text{min}$).



(a) Theoretical $z=0\text{mm}$

(b) Theoretical $z=-50\text{mm}$

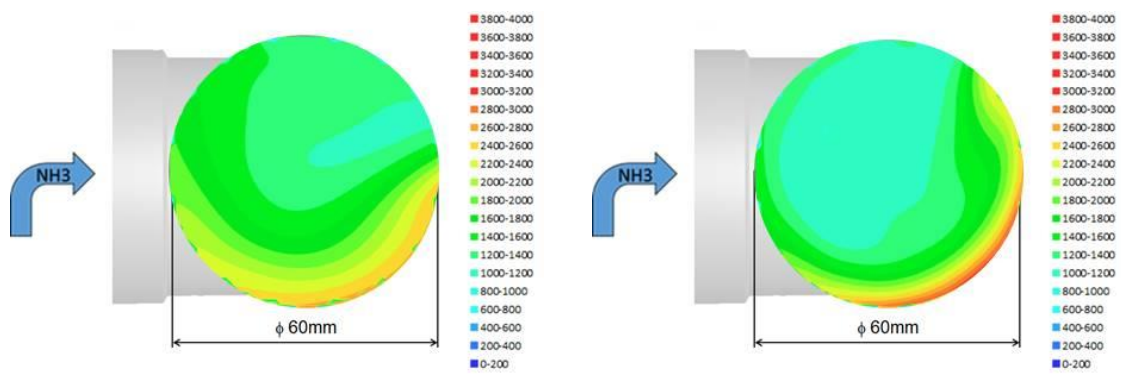
図 4.4.3 2次元の NH_3 濃度分布 理論値解析 ($r=0\text{mm}$, $60\text{L}/\text{min}$).



(a) Theoretical $z=0\text{mm}$

(b) Theoretical $z=-50\text{mm}$

図 4.4.4 2次元の NH_3 濃度分布 理論値解析 ($r=10\text{mm}$, $30\text{L}/\text{min}$).



(a) Theoretical $z=0\text{mm}$

(b) Theoretical $z=-50\text{mm}$

図 4.4.5 2次元の NH₃濃度分布 理論値解析 ($r=10\text{mm}$, $60\text{L}/\text{min}$).

第5章 結言

半導体レーザー吸収法と CT を組み合わせ、これを用いて 4 重円管でのガス濃度計測や精度評価、2 断面同時計測可能な技術開発を行い、ディーゼルエンジンの排出ガス後処理装置(尿素 SCR)へ応用展開するための試験及びシミュレーション(CFD)との比較検証を行った。2 次元のガス濃度分布の計測においては、計測した 2 次元ガス濃度分布の精度、また実際のエンジン開発においては CFD の精度改善が重要課題であるが、本研究を通じて以下の結果を得た。

1)4 重円管を用いた CT 半導体レーザー計測法(CT-TDLAS)を用いて CH_4 濃度計測を実施し、14 次の多項式を用いて濃度分布を再構築することで、CT-TDLAS が実験結果を再現可能な手法であることを実証した。また、その精度検証結果から、排ガス後処理触媒の性能計測に運用可能な分解能を持つことを実証した。

2)2 断面の 32 パス CT 計測セルを用いて NH_3 濃度分布計測を実施し、断面毎に異なる濃度分布を示す様子を捉えることが可能であった。また、過渡の濃度分布変化についても捉えることが可能なことを示した。

3)2 断面 32 パス CT 計測セルの NH_3 濃度分布計測結果と CFD との試験結果の比較を実施した結果、両者が類似した濃度分布を示した。

4)2 断面 32 パスの CFD の試験結果を元に CT で濃度分布の再構築を行い、CT 手法の精度検証を行った結果、非常に高い精度で濃度分布が構築されることを示した。

参考文献

- [1] 李 昺錫, 荻田 裕矢, 佐藤 進・小酒 英範, Cu/zeolite 触媒系の HC-SCR システムにおける NO_x 浄化性能に関する研究, *自動車技術会春季講演会予稿集* (2015), S409
- [2] Braeuer, A., and Leipertz, A., Two-dimensional Raman mole-fraction and temperature measurements for hydrogen-nitrogen mixture analysis. *Applies optics*, Vol.48, No.4 (2009), pp.B57-B64. (doi: [10.1364/AO.48.000B57](https://doi.org/10.1364/AO.48.000B57))
- [3] Jehlickaa, J., Viteka, P., Edwardsb, H.G.M., Heagravesb, M., and Capounc, T., Application of portable Raman instruments for fast and non-destructive detection of minerals on outcrops. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, Vol. 73, No. 3 (2010), pp. 410–419. (doi: [10.1016/j.saa.2008.09.004](https://doi.org/10.1016/j.saa.2008.09.004))
- [4] Aramaki, M., Ogiwara, K., Etoh, S., Yoshimura, S., and Tanaka, M.Y., Measurement of neutral flow velocity in an ECR plasma using tunable diode laser LIF spectroscopy combined with saturated absorption spectroscopy. *Journal of Physics, Conference Series* **227** (2010), 012008
- [5] Williams, B., Ewart, P., Wang, X., Stone, R., Ma, H., Walmsley, H., Cracknell, R., Stevens, R., Richardson, D., Fu, H., and Wallace, S., Quantitative planar laser-induced fluorescence imaging of multi-component fuel/air mixing in a firing gasoline-direct-injection engine: Effects of residual exhaust gas on quantitative PLIF. *Combustion and Flame*, Vol. 157, No. 10 (2010), pp. 1866–1878.(doi: [10.1016/j.combustflame.2010.06.004](https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2010.06.004))
- [6] Luong, M., Zhang, R., Schulz, C., and Sick, V., Toluene laser-induced fluorescence for in-cylinder temperature imaging in internal combustion engines. *Appl. Phys. B* **91** (2008), pp.669–675.(DOI: [10.1007/s00340-008-2995-5](https://doi.org/10.1007/s00340-008-2995-5))
- [7] Lachaux, T., and Musculus, M. P.B., In-cylinder unburned hydrocarbon visualization during low-temperature compression-ignition engine combustion using formaldehyde PLIF. *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 31, No. 2 (2007), pp. 2921–2929.(doi: [10.1016/j.proci.2006.07.044](https://doi.org/10.1016/j.proci.2006.07.044))
- [8] Allen, M.G., Carleton, K.L., Davis, S.J., Kessler, W.J., Otis, C.E., Palombo, D.A., and Sonnenfroh, D.M., Ultrasensitive dual-beam absorption and gain spectroscopy: Applications for near-infrared and visible diode laser sensors. *Applied Optics*, Vol.34, No. 18 (1995), pp.3240-3249. (doi: [10.1364/AO.34.003240](https://doi.org/10.1364/AO.34.003240))
- [9] Oh, D.B., and Hovde, D.C., Wavelength-modulation detection of acetylene with a near-infrared external-cavity diode laser. *Applied Optics*, Vol.34, No. 30 (1995), pp.7002-7005. (doi: [10.1364/AO.34.007002](https://doi.org/10.1364/AO.34.007002))
- [10] Kohns, P., Stoermann, R., Budzynski, E., Walte, R.N., Knoop, J., and Kuester, R., In-situ measurement of the water vapor concentration in industrial ovens by an user-friendly semiconductor laser system. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, Vol.3098 (1997), pp.544-551. (doi: [10.1117/12.281202](https://doi.org/10.1117/12.281202))
- [11] Mihalcea¹, R.M., Webber, M.E., Baer, D.S., Hanson, R.K., Feller, G.S., and Chapman, W.B., Diode-laser absorption measurements of CO₂, H₂O, N₂O, and NH₃ near 2.0 μm. *Applied Physics B*, Vol.67, No. 3 (1998), pp.283-288. (doi: [10.1007/s003400050507](https://doi.org/10.1007/s003400050507))
- [12] Winnewisser, G., Drascher, T., Giesen, T., Pak, I., Schmulling, F., Schieder, R., The tunable diode laser: a versatile spectroscopic tool. *Spectrochimica Acta Part A*, Vol. 55, No. 10 (1999), pp.2121-2142. (doi: [10.1016/S1386-1425\(99\)00084-0](https://doi.org/10.1016/S1386-1425(99)00084-0))

- [13] Barrass S., Gérard Y., Holdsworth R.J., and Martin P.A., Near-infrared tunable diode laser spectrometer for the remote sensing of vehicle emissions. *Spectrochimica Acta Part A*, Vol. 60, No. 14 (2004), pp.3353–3360. (doi: [10.1016/j.saa.2003.11.038](https://doi.org/10.1016/j.saa.2003.11.038))
- [14] Liu, X., Jeffries, J. B., Hanson, R. K., Hinckley, K. M., and Woodmansee, M. A., Development of a tunable diode laser sensor for measurements of gas turbine exhaust temperature. *Applied Physics B*, Vol. 82, No. 3 (2006), pp.469-478, (doi: [10.1007/s00340-005-2078-9](https://doi.org/10.1007/s00340-005-2078-9))
- [15] Anderson, T. N., Lucht, R. P., Priyadarsan, S., Annamalai, K., and Caton, J. A., In situ measurements of nitric oxide in coal-combustion exhaust using a sensor based on a widely tunable external-cavity GaN diode laser. *Applied Optics*, Vol. 46, No. 19(2007), pp.3946-3957. (PMID: [17571131](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/17571131/))
- [16] Gieseler, H., Kessler, W.J., Finson, M., Davis, S. J., Mulhall, P. A., Bons, V., Debo, D. J., and Pikal, M. J., Evaluation of Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy for In-Process Water Vapor Mass Flux Measurements During Freeze Drying. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, Vol. 96, No. 7 (2007), pp.1776-1793. (doi: [10.1002/jps.20827](https://doi.org/10.1002/jps.20827))
- [17] Lackner, M., Tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS) in the process industries-a review. *Reviews in Chemical Engineering*, Vol. 23, No. 2(2007), pp.65-147. (doi: [10.1515/REVCE.2007.23.2.65](https://doi.org/10.1515/REVCE.2007.23.2.65))
- [18] Magnuson, J. K., Anderson, T.s N., and Lucht, R. P., Application of a Diode-Laser-Based Ultraviolet Absorption Sensor for in Situ Measurements of Atomic Mercury in Coal-Combustion Exhaust. *Energy & Fuels*, Vol. 22, No. 5(2008), pp. 3029-3036. (doi: [10.1021/ef800372k](https://doi.org/10.1021/ef800372k))
- [19] Schaeffer, S.M., Miller, J.B., Vaughn, B.H., White, J.W.C., and Bowling, D.R., Long-term field performance of a tunable diode laser absorption spectrometer for analysis of carbon isotopes of CO₂ in forest air. *Atmospheric Chemistry and Physics*, Vol. 8, No. 17(2008), pp.5263-5277. (doi: [10.5194/acp-8-5263-2008](https://doi.org/10.5194/acp-8-5263-2008))
- [20] Schneid, S.C., Gieseler, H., Kessler, W.J., and Pikal, M.J., Non-Invasive Product Temperature Determination Primary Drying using Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, Vol. 98, No. 9(2009), pp.3406–3418. (doi: [10.1002/jps.21522](https://doi.org/10.1002/jps.21522))
- [21] Goldenstein, C.S., Strand, C.L., Schultz, I.A., Sun, K., Jeffries, J.B., and Hanson, R.K., Fitting of calibration-free scanned-wavelength-modulation spectroscopy spectra for determination of gas properties and absorption lineshapes. *Applied Optics*, Vol.53, No.3(2014), pp. 356-367. (doi: [10.1364/AO.53.000356](https://doi.org/10.1364/AO.53.000356))
- [22] Goldenstein, Spearrin, R. M., Schultz, I. A., Jeffries, J. B., and Hanson, R. K. , Wavelength-modulation spectroscopy near 1.4 μm for measurements of H₂O and temperature in high-pressure and -temperature gases. *Measurement Science and Technology*, Vol.25, No.5(2014), pp, 055101. (doi:[10.1088/0957-0233/25/5/055101](https://doi.org/10.1088/0957-0233/25/5/055101))
- [23] Pogány, A., Klein, A., and Ebert, V., Measurement of water vapor line strengths in the 1.4–2.7 μm range by tunable diode laser absorption spectroscopy. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, Vol.165(2015), pp. 108-122. (doi: [10.1016/j.jqsrt.2015.06.023](https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2015.06.023).)
- [24] Pogány, A., Wagner, S., Werhahn, O., and Ebert, V., Development and Metrological Characterization of a Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy (TDLAS) Spectrometer for Simultaneous Absolute Measurement of Carbon Dioxide and Water Vapor. *Applied Spectroscopy*, Vol.69 (2015), pp.257-268. (<https://www.osapublishing.org/as/abstract.cfm?URI=as-69-2-257>.)

- [25] Blume, N.G., and Wagner, S., Broadband supercontinuum laser absorption spectrometer for multiparameter gas phase combustion diagnostics. *Optics Letters*, Vol.40, No.13 (2015), pp. 3141-3144. (doi: [10.1364/OL.40.003141](https://doi.org/10.1364/OL.40.003141).)
- [26] Liu, C., Xu, L., and Cao, Z., Measurement of nonuniform temperature and concentration distributions by combining line-of-sight tunable diode laser absorption spectroscopy with regularization methods. *Applied Optics*, Vol.52, No.20 (2013), pp.4827-4842. (doi: [10.1364/AO.52.004827](https://doi.org/10.1364/AO.52.004827).)
- [27] Bolshov, M.A., Kuritsyn, Yu.A., Romanovskii, and Yu.V., Tunable diode laser spectroscopy as a technique for combustion diagnostics. *Spectrochimica ACTa - Part B Atomic SpeCTroscopy*, Vol.106, No.1 (2015), pp. 45-66. (doi:[10.1016/j.sab.2015.01.010](https://doi.org/10.1016/j.sab.2015.01.010).)
- [28] Kasyutich, V.L., Poulidi, D., Jalil, M., Metcalfe, I.S., and Martin, P.A., Application of a cw quantum cascade laser CO₂ analyser to catalytic oxidation reaction monitoring. *Applied Physics B*, Vol.10, No.2 (2013), pp.263-269. (doi:[10.1007/s00340-012-5154-y](https://doi.org/10.1007/s00340-012-5154-y).)
- [29] Proschek, V., Kirchengast, G., Schweitzer, S., Brooke, J.S.A., Bernath, P.F., Thomas, C.B., Wang, J-G, Tereszchuk, K.A., Abad, G. G., Hargreaves, R.J., Beale, C.A., Harrison, J.J., Martin, P.A., Kasyutich, V.L., Gerbig, C., Kolle, O., and Loescher, A., Retrieval and validation of carbon dioxide, methane and water vapor for the Canary Islands IR-laser occultation experiment. *Atmospheric Measurement Techniques*, Vol.8 (2015), pp.3315-3336. (doi:[10.5194/amt-8-3315-2015](https://doi.org/10.5194/amt-8-3315-2015).)
- [30] Linnerud, I., Kaspersen, P., and Jæger, T., Gas monitoring in the process industry using diode laser spectroscopy. *Applied Physics B: Lasers and Optics*, Vol.67, No.3 (1989), pp.297-305. (doi: [10.1007/s003400050509](https://doi.org/10.1007/s003400050509).)
- [31] Ma, J., Cheesman, A., Ashfold, M. N. R., Hay, K. G., Wright, S., Langford, N., Duxbury, G., and A.Mankelevich, Y., Quantum cascade laser investigations of CH₄ and C₂H₂ interconversion in hydrocarbon/H₂ gas mixtures during microwave plasma enhanced chemical vapor deposition of diamond. *Journal of Applied Physics*, Vol.106, No. 3 (2009), pp.033305/1-033305/15. (doi: [10.1063/1.3176971](https://doi.org/10.1063/1.3176971).)
- [32] Hopfe, V., Sheel, D.W., Spee, C.I.M.A., Tell, R., Martin, P., Beil, A., Pemble, M., Weissi, R., Vogth, U., and Graehlerta, W., In-situ monitoring for CVD processes. *Thin Solid Films*, Vol. 442, No.1-2 (2003), pp. 60-65. (doi:[10.1016/S0040-6090\(03\)00943-X](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(03)00943-X).)
- [33] Deguchi, Y., Noda, M., and Abe, M., 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, No.1 (2002), pp.147-153. (doi:[10.1016/S1540-7489\(02\)80023-2](https://doi.org/10.1016/S1540-7489(02)80023-2))
- [34] Sur, R., Sun, K., Jeffries, J.B., Socha, J.G., and Hanson, R.K., Scanned-wavelength-modulation-spectroscopy sensor for CO, CO₂, CH₄ and H₂O in a high-pressure engineering-scale transport-reactor coal gasifier. *Fuel*, Vol.150 (2015), pp.102-111. (doi:[10.1016/j.fuel.2015.02.003](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.02.003).)
- [35] Chao, X., Jeffries, J. B., and Hanson, R. K., Real-time, in situ, continuous monitoring of CO in a pulverized-coal-fired power plant with a 2.3 μm laser absorption sensor. *Applied Physics B*, Vol. 110, No.3 (2013), pp.359-365. (doi: [10.1007/s00340-012-5262-8](https://doi.org/10.1007/s00340-012-5262-8).)
- [36] Goldenstein, C.S., Almodóvar, C.A., Jeffries, J.B., Hanson, R.K., and Brophy, C.M., High-bandwidth scanned-wavelength-modulation spectroscopy sensors for

- temperature and H₂O in a rotating detonation engine. *Measurement Science and Technology*, Vol.25, No.10 (2014), pp.105104. (doi:[10.1088/0957-0233/25/10/105104](https://doi.org/10.1088/0957-0233/25/10/105104).)
- [37] Goldenstein, C. S., Schultz, I. A., Spearrin, R. M., Jeffries, J. B., and Hanson, R. K., Scanned-wavelength-modulation spectroscopy near 2.5 μm for H₂O and temperature in a hydrocarbon-fueled scramjet combustor. *Applied Physics B*, Vol. 116, No.3 (2014), pp.717-727. (doi:[10.1007/s00340-013-5755-0](https://doi.org/10.1007/s00340-013-5755-0).)
- [38] Spearrin, R. M., Goldenstein, C. S., Schultz, I. A., Jeffries, J. B., and Hanson, R. K., Simultaneous sensing of temperature, CO, and CO₂ in a scramjet combustor using quantum cascade laser absorption spectroscopy. *Applied Physics B: Lasers and Optics*, Vol.117, No.2 (2014), pp. 689-698. (doi:[10.1007/s00340-014-5884-0](https://doi.org/10.1007/s00340-014-5884-0).)
- [39] Deguchi, Y., Industrial applications of Laser Diagnostics (2011) CRS Press; Taylor & Francis: New York, USA.
- [40] Deguchi Y., Yasui D. and Adachi A.: Development of 2D temperature and concentration measurement method using tunable diode laser absorption spectroscopy, *Journal of Mechanics Engineering and Automation*, Vol.2, No.9 (2012), pp.543-549.
- [41] Deguchi, Y., Kamimoto, T. and Kiyota, Y., Time resolved 2D Concentration and temperature measurement using CT tunable laser absorption spectroscopy, *Flow Measurement and Instrumentation*, Vol.46, Part B (2015), pp. 312-318.
- [42] Deguchi, Y., Kakagi, T., Kamimoto, T., Okamoto T and Watanabe N., Time-series Two-dimensional Temperature Measurement Inside the Engine Cylinder Using Computed Tomography-Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy, *Transactions of the Society of Automotive Engineers of Japan*, Vol.48, No.1 (2017), pp. 35-40.
- [43] Kamimoto T., Deguchi Y. and Kiyota Y., High temperature field application of two dimensional temperature measurement technology using CT tunable laser absorption spectroscopy, *Flow Measurement and Instrumentation*, Volume 46, Part A (2015), pp. 51-57.
- [44] Kamimoto, T., Deguchi, Y., Choi, D. and Shim, J., Validation of real-time 2D temperature measurement method using CT tunable diode laser absorption spectroscopy, *Heat Transfer Research*, Vol.47, No.2 (2016), pp. 193-202.
- [45] Ma, L. and Cai, W., Numerical investigation of hyperspectral tomography for simultaneous temperature and concentration imaging, *Applied Optics*, Vol. 47, No.21 (2008), pp. 3751-3759.
- [46] Wang, F., Cen, K., F, Li, N., Jeffries, J. B., Huang, Q. X, Yan, J. H. and Chi, Y., Two-dimensional tomography for gas concentration and temperature distributions based on tunable diode laser absorption spectroscopy, *Measurement Science and Technology*, Vol.21, No.4 (2010), 045301.
- [47] Kasyutich, V.L., and Martin, P.A., Towards a two-dimensional concentration and temperature laser absorption tomography sensor system, *Applied Physics B: Lasers and Optics*, Vol. 102, No.1 (2011), pp. 149-162.
- [48] 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.40 (2011), A29-A37.
- [49] An, X., Brittelle, M. S., Lauzier, P. T., Gord, J. R., Roy, S., Chen, G. and

- Sanders, S. T., Demonstration of temperature imaging by H₂O absorption spectroscopy using compressed sensing tomography, *Applied Optics*, Vol.54, No.31 (2015), pp. 9190-9199.
- [50] 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, No.3 (2015), 034101.
- [51] Jatana, G.S., Magee, M. , Fain, D. , Naik, S.V., Shaver, G.M. and Lucht, R.P., Simultaneous high-speed gas property measurements at the exhaust gas recirculation cooler exit and at the turbocharger inlet of a multicylinder diesel engine using diode-laser-absorption spectroscopy, *Applied Optics*, Vol.54, No.5 (2015), pp. 1220-1231.
- [52] McCann, H., Wright, P. and Daun, K., *Industrial Tomography: Systems and Applications* (2015) Inc. Elsevier: Cambridge, UK, pp. 135-174.
- [53] 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 (2013), pp. 1152-1162.
- [54] Seidel, A., Wagner, S., Dreizler, A. and Ebert, V., Robust, spatially scanning, open-path TDLAS hygrometer using retro-reflective foils for fast tomographic 2-D water vapor concentration field measurements, *Atmospheric Measurement Techniques*, Vol. 8, No.5 (2015), pp. 2061-2068.
- [55] Rieker, G.B., Li, H., Liu, X., Liu, J.T.C., Jeffries, J.B., Hanson, R.K., Allen, M.G., Wehe, S.D., Mulhall, P.A., Kindle, H.S, Kakuho., A, Sholes, K.R., Matsuura, T. and Takatani S., Rapid measurements of temperature and H₂O concentration in IC engines with a spark plug-mounted diode laser sensor, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 31, No.2 (2007), pp. 3041-3049.
- [56] Stritzke, F., Diemel, O., and Wagner, S., TDLAS-based NH₃ mole fraction measurement for exhaust diagnostics during selective catalytic reduction using a fiber-coupled 2.2- μ m DFB diode laser, *Applied Physics B: Lasers and Optics*, Vol. 119, No.1 (2015), pp. 143-152.
- [57] Rothman, L.S., Gordon, I.E., Barbe, A., ChrisBenner, D., Bernath, P.F., Birk, M., Boudon, V., Brown, L.R., Campargue, A., Champion, J.P., Chance, K., Coudert, L., Dana, V., Devi, V.M., Fally, S., Flaud, J.M., Gamache, R.R., Goldman, A., Jacquemart, D., Kleiner, I., Lacombe, N., Lafferty, W.J., Mandin, J.-Y., Massie, S.T., Mikhailenko, S.N., Miller, C.E., Moazzen-Ahmadi, N., Naumenko, O.-V., Nikitin, A.V., Orphal, J., Perevalov, V.I., Perrin, A., Predoi-Cross, A., Rinsland, C.P., Rotger, M., Simeckova, M., Smith, M.A.H., Sung, K., Tashkun, S.A., Tennyson, J., Toth, R.A., Vandaele, A.C., and VanderAuwera, J., The HITRAN2008 molecular spectroscopic database, *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, Vol. 110 (2009), pp. 533-572.
- [58] 株式会社ソフトウェアクレイドル, *SCRYU/Tetra Version12 ユーザーズガイド基礎編* (2015).
- [59] Wright, P., Terzijaa, N., Davidsona, J. L., Garcia-Castillo, S., Garcia-Stewart, C., Pegrumb, S., Colbourneb, S., Turnerb P., Crossleyc, S. D., Litt, T., Murrayc, S., Ozanyana, K. B. and McCanna, H., High-speed chemical species tomography in a multi-cylinder automotive engine, *Chemical Engineering Journal*, Vol.158, No.1 (2010), pp 2-10.

- [60] Yamakage, M., Muta, K., Deguchi, Y., Fukada, S., Iwase T. and Yoshida T, Development of direct and fast response exhaust gas measurement *Flow Measurement and Instrumentation SAE Paper* (2008), 20081298.

謝辞

本研究および学位論文の作成に当たり、指導教官である出口祥啓教授をはじめ、多数の方々のご指導、ご協力により成り立っていることをここに示し、感謝の意を表します。特に、指導教官としてご指導頂いた出口祥啓教授に厚く御礼申し上げます。他、関係者には多大なるご指導、ご助言をいただきました。ここに謝意を示します。

・徳島大学工学部理工学科機械科学コース

出口 祥啓 教授
神本 崇博氏
村本 之絵氏

・いすゞ自動車 CAE デジタル開発推進部

宇田川 和正氏
酒井 順司氏