

窒素酸化物及び粒子状物質に係る排出ガス診断装置の実用性に関する
調査研究

株式会社 堀場製作所

1・調査研究の目的

大都市圏における窒素酸化物（NO_x）及び粒子状物質（PM）による大気環境の改善のため、自動車排出ガス低減対策のありかたが検討されており、ディーゼル自動車の排出ガス低減対策等、新たな排出ガス試験法の導入等により許容限度目標値に沿って低減をはかることが適当であるとされている。従来、排出ガスの測定については室内におけるシャーシダイナモ・エンジンダイナモ上での定常モード試験条件により行われて来ている。一方、実際の市街地においては道路勾配・路面状態・外気温等、実験室とは異なる環境条件であるため定常モード試験結果を適用することは実走行の状態と乖離してしまうため、実走行環境下での排出ガス診断が必要不可欠である。一方で、実走行状態で排出ガス測定が可能な車載型排出ガス測定装置は、定常モード試験で利用されている測定装置に準じた測定性能、精度を得られることが期待されているため、従来からの測定原理を変えずに車載型とすることとなり、測定装置の大きさ、重量など車両を選ばずに設置するまでには至っていないのが現状である。この状況を打破するためには小型、軽量で容易に車載可能となる測定方法を調査検討し、排出ガス診断装置として実用化できる可能性があるか評価していく必要がある。測定精度が多少不十分であっても、いわゆるハイエミッターカー等の過度に汚染物質を排出している車両を捕捉したり、排ガス低減対策が行われていない使用過程車の排出ガス傾向を得ることが可能となる必要がある。

本調査では初年度に引き続き、ディーゼル車のテールパイプに実装することによるノンサンプリング排出ガス診断装置の実用性に関して調査研究を行った。

2・平成18年度の調査研究計画とその結果の概要

初年度の調査研究では NO_x および CO₂ の赤外吸収波長帯域の発光光源・検出器として、小型化の可能性がある赤外 LED/PD デバイス開発およびこれらを用いた NDIR 法による NO_x 及び CO₂ 計測法の調査研究を実施したが、NO_x 用赤外 LED については開発試作したデバイスの有意な赤外発光を認められず、平成 18 年度はデバイスを構成する化合物半導体薄膜結晶の成膜再検討を行ない、デバイスの再試作により NDIR 法の小型化の可能性を見極めた。また、NDIR 法での NO_x 計測の検討とは別に、NO_x の紫外域吸収を利用した NDUV 法による計測の検討を実施し、実験室の机上レベルでの計測システムの構成検討および計測方式のを調査検討した。さらに、PM 計測法および NO_x 計測法をテールパイプに実装する場合の課題である PM 粒子の付着による光学窓の汚れ防止の検討、および妥当性について調査検討した。

(1) 粒子状物質診断光学系の改良設計

前方散乱法を用いた粒子状物質（PM）計測光学系において、PM の付着による光学マドの曇りに起因する信号感度低下やノイズ増大及び排出ガスによる診断装置の温度上昇による測定値のばらつきが課題であった。このため、過去の委託研

究において試作した簡易型 PM 診断装置でのマドの汚れの定量的評価及び測定時の装置各部の温度測定をシャーシダイナモ上で実車を用いて行い、エアパージ機構を含むマドの汚れについて対策案を検討し、改良設計、試作をおこなった。また、改良試作装置によりシャーシダイナモ上での実車測定及び路上試験を実施して改良試作の問題点の抽出を実施し、簡易型 PM 測定装置の実用化の可能性を検討した。

(2) NDIR 方式小型 NO_x 計測の可能性の検討

小型軽量な診断装置に必要な省電力の赤外光源として、昨年度の調査研究において試作した NO_x 計測用 5 μ m 帯 LED (光源) および PD (光検出器) のさらなる改良試作を実施し、LED、PD の性能評価及び NO ガスに対する吸光測定を実施することにより、LED を用いた NDIR 法に測定装置小型化の可能性を調査検討した。

(3) NO_x の紫外吸収を利用した計測法の可能性検討と診断装置の試作、評価

220nm 付近の NO の紫外吸収帯を利用して NDUV 法による NO_x 計測の可能性を検討した。NDIR 方式以外の計測法として NDUV 法の可能性を評価し、小型軽量な計測装置の構成に必要な各種コンポーネントを比較検討した。その結果、紫外域光源として現時点で市販され利用可能な重水素ランプ、キセノンフラッシュランプ等の小型光源を用いて、シリコン半導体検出器による NO の紫外線吸収を計測することによる計測の可能性を検討した。これら NDUV を構成するデバイスは現時点では十分に小型簡易なものは少なく、LED を用いた UV 光源についても現時点では入手不可能であるが、近い将来実現される可能性がある。UV 光源、波長選択フィルタ、ガスセル、検出器、および信号処理電気系をシステムとした NDUV 法による簡易 NO_x 診断装置の机上モデルの設計、試作、および NO_x 計測性能の机上評価を行った。

(4) CO₂ 計測用 LED (光源) および PD (光検出器) を用いた診断装置の構築

ディーゼルエンジンの状態をモニターするために必要な CO₂ ガス濃度計測は、昨年度の調査研究により 4 μ 帯赤外 LED 光源を用いたノンサンプリングが可能なオープンパス方式の机上モデル実験結果として CO₂ 濃度 16% のサンプルを $\pm 1\%$ の精度で計測できる可能性を確認できている。今年度は、屋外での実走行試験時に課題になると考えられる、高温の排出ガスによる LED、PD 素子への温度影響の低減及び実車実装可能な CO₂ 診断装置の設計、試作とそれらを用いた机上評価を行った。

(5) 診断装置光学システム一体化設計検討

窒素酸化物計測、および粒子状物質の計測に加えて、ディーゼルエンジンの負荷状態を同時モニターすることが必要とされるため、半導体赤外光源を用いた NDIR 法 NO_x 計測、あるいは NDUV 法を用いた NO_x 計測光学系に加えて、半導体赤

外 LED を用いた CO₂ 計測光学系および PM 診断用の光学系を一体化したテールパイプ実装診断装置光学システムの設計検討を行った。

(6) テールパイプ実装上の課題の調査検討と、実験室机上診断モデルの設計試作

NDUV 法を含めた NO_x 計測、NDIR 法を用いた CO₂ 計測及び PM 診断装置のテールパイプ実装上の基本的な問題点を調査検討し、その問題点に対応した実験室レベルの机上実験を通じて、机上診断装置の改良による実用化試験機の構成を検討し、実際の屋外での路上走行試験による実用化可能性の総合評価を念頭に課題を抽出した。

3・粒子状物質計測光学系の改良設計

(1) 現状の PM 計測光学系の性能評価

①評価条件

評価に用いた PM 計測光学系（センサーユニット）は、過去の委託調査研究で試作したものであり図 3-1 にその構造図を示す。 $\phi=65\text{mm}$ の排ガスパイプに PM 計測のための LED 光源（AlGaInP 赤色 670nm）及び透過光及び散乱光を受ける Si フォトダイオード（PD）を含む光学系で構成されている。また、排ガスによるレンズの汚れを防止するため、レンズの前に蜂の巣状の細いパイプを束ねたガス整流素子（ $\phi=12.7\text{mm}$ ）を設置しパージガスを流す構成となっている。



図 3-1 PM 光学系構成図

センサーユニットの評価は、ディーゼル乗用車のテールパイプに取り付け、シャーシダイナモ（C/D）上で走行させることによって行った。計測には平成 4 年式トヨタランドクルーザー（排気量：2500cc、ターボ車）を使用し、C/D の条件は被測定車両に合わせて計測を実施した。

運転条件に関しては、事前に目視による PM 量の確認を行い、PM をより多く発生する運転モード（30 秒間隔で発進・停止の繰り返し）にて実施した。

②シャーシダイナモ上での課題抽出実験結果

PM をより多く発生させる運転モードにて人が乗車し運転したときの PM 計測

装置各部の温度変化、透過光 PD 及び散乱光 PD 出力変化の一例を図 3－2 に示す。

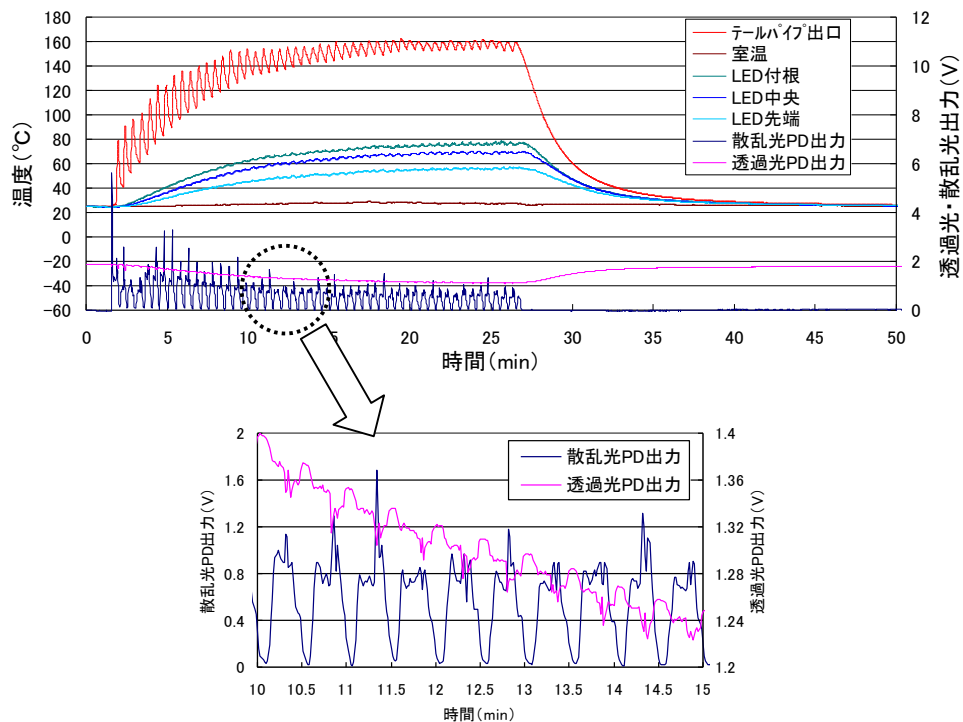


図 3－2 PM 計測装置各部の温度変化、透過/散乱光 PD 光出力変化（一例）

図 3－2 から分かるように、発進停止の間隔で PM 計測装置各部の温度変動及び排ガス中に含まれる PM による透過光及び散乱光の出力変動が観測された。さらに運転の経過時間とともに、各部の平均温度は上昇し、ほぼ 40 回（20 分）程度で発進停止によって起こる周期変動を除けばほぼ定常状態になった。この定常状態においてセンサーユニットの LED 素子部の温度は、室温 24℃、テールパイプ出口 160℃において 57℃となり、約 33℃の温度上昇を示した。また、透過光出力に関しても経過時間と共に出力の低下が観測されたが、運転を停止し室温まで戻った時点においても透過光出力は運転開始前に戻らなかった。

③透過光信号低下原因の検討

センサーユニット光学系の信号出力低下の原因としては、①LED 及び PD 素子特性の温度依存性、②センサーユニット光学系への PM 付着による汚れが考えられる。これら原因の寄与率を分離させる為に上記の実車実験をセンサーユニットが室温まで冷えるのを待って繰り返し 3 回実験を行った。

図 3－3 に透過光 PD 出力と LED（又は PD）素子部温度の相関を示す。ここで紫、黄、水色の点データが各運転時の計測データであり、実線は LED のメーカー提供の光出力温度依存性から見積られる計算値である。ここで PD 感度の温度依存性は LED に比べ小さいと考えられるため省略した。図から分かるように、

運転時に素子が室温 24℃から 60℃程度まで上昇すると 30%程度の出力低下が発生するが、LED 光出力温度依存性の計算とほぼ一致していることが分かった。このことから透過光 PD 出力の周囲温度に対する出力変動は、温度補正によりキャンセルすることが出来ると考えられる。図 3-4 には室温に戻った時に測定した透過光 PD 出力とアクセル回数との関係を示す。PM を意図的に多く発生させる運転モードでの耐久試験であったが、アクセル回数 500 回で約 50%の感度低下が生じた。

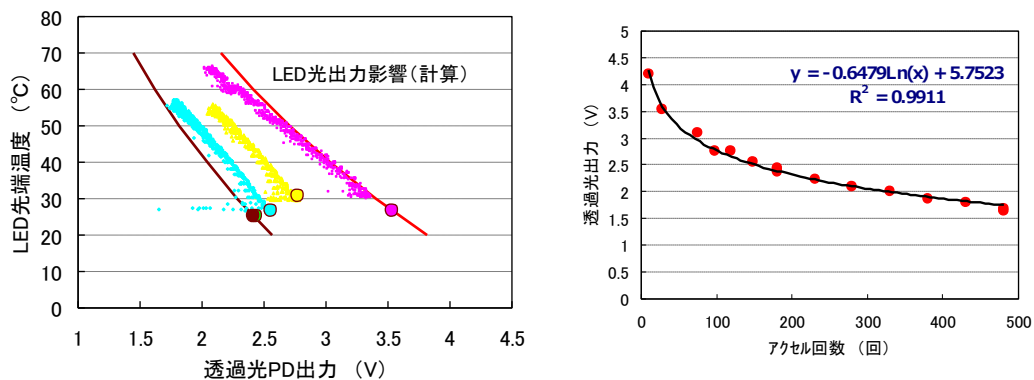


図 3-3 透過光 PD 出力と LED 素子部温度との相関 図 3-4 透過光出力のアクセル回数依存性

(2) PM 計測装置の改良設計

①二重管構造による熱分離

素子温度が上昇する理由は、テールパイプからの熱伝導及び高温の排ガスによりセンサーユニットが熱せられる為である。この二つの要因を除く為の構想としてセンサーユニット保持部と排ガスが流れる領域とを分離した二重管構成のセンサーユニットを着想し熱シミュレーションを行い、その結果より改良センサーユニットを設計した。

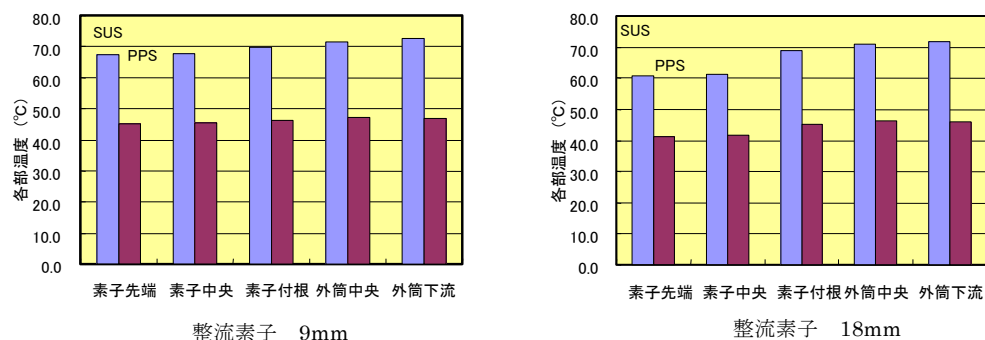


図 3-5 CAE によるセンサーユニットの温度分布の計算結果

熱シミュレーション計算における詳細条件は割愛するが、排ガス温度が 200℃として整流素子にパージガスを 6 L/min 流し、内筒と外筒間にも外気が入る条件に

て計算した。図 3-5 に、二重管を固定する材質の違い（SUS、PPS）及び整流素子の長さ依存性に関して計算した結果を示す。二重管固定の材質として耐熱性樹脂である PPS は SUS の熱伝導率 $21.2(\text{kcal/m}\cdot\text{hr}\cdot^{\circ}\text{C})$ と比較して約 100 分の 1 であり、熱分離する為の固定軸材料として有効であることが分かった。また、整流素子を長くし LED (PD) 素子部を外筒から離すことによっても素子温度の上昇が抑えられることが分かったがその寄与は PPS 樹脂の効果に比べて低いことが分かった。

②光学系汚れ分析

光学系汚れの分析は、前に述べたシャーシダイナモ上で実車試験し PM の付着したセンサーユニットを分解清掃し光強度回復程度より各部分の汚れの影響割合を推定し、センサーユニット光学系各部での光損失割合を求めた。

図 3-6 に各部分を清掃後の透過光 PD 出力、図 3-7 にそれから推定されるセンサーユニット光学系の各部分での光損失割合をそれぞれ示す。

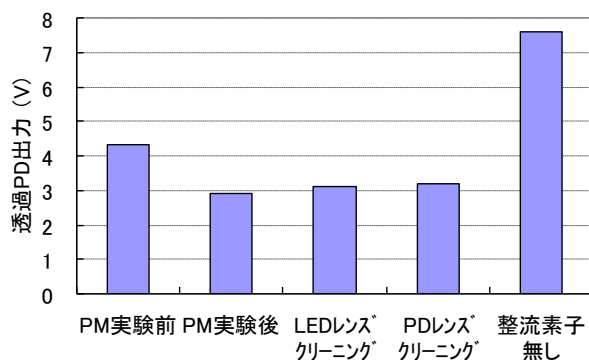


図 3-6 光学系汚れ具合による透過光 PD 出力

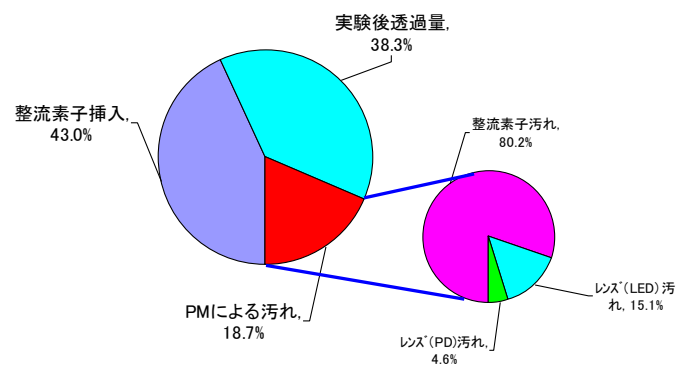


図 3-7 光学系損失分析

図 3-6 においては、実車試験前に PD 出力が 4.33V から試験終了後 2.91V に低下したユニット光学系を各パーツごとに清掃し組立、PD 出力の回復程度を測定したものである。図 3-7 ではこれをユニット光学系の損失割合として計算した。これから分かるように、PD 出力の 18.7% が排ガス中の PM 粒子の汚れにより低下することがわかる。また、その低下の主要因は整流素子に付着した PM 粒子による影響が大きく、全体の 80% 程度を占めていることがわかる。このことから、整流素子への PM 付着の低減が安定した測定に必要な課題であることがわかる。

③整流素子汚れ状態分析

整流素子への PM 付着状態を分析するために、2 種類の整流素子を準備し PM 付着状態を比較した。実験は上記 (1) で行った条件と同じで、アクセルを 500 回、30 秒間隔で発進・停止の繰り返し実施する条件で行った。

今回の実験に使用した整流素子の形状を表 3－1 にまとめた。ここで、インナーパイプとは前述した整流素子内側に挿入されているガスを均一方向に流れるようにさせるためのパイプのことを指す。この 2 種類の整流素子は、インナーパイプの内径が同じで厚みの異なるものを準備した。その実験前後での整流素子の状態比較の顕微鏡写真を図 3－8 に示す。

表 3－1 整流素子形状比較

	内径(mm)	外径(mm)	厚み(mm)	インナーパイプ本数
整流素子 A	0.8	1.2	1	65
整流素子 B	0.8	1	0.5	111

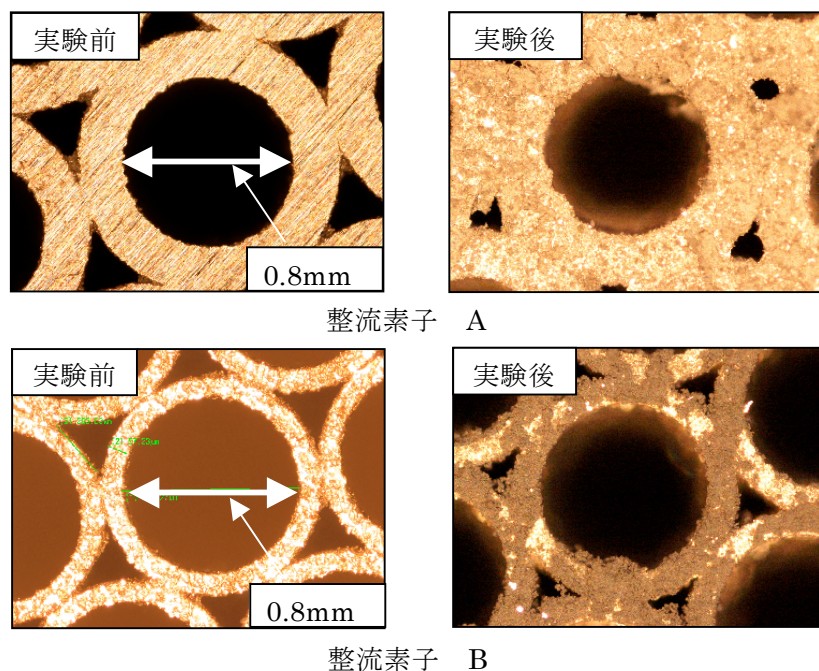


図 3－8 実験前後での整流素子の状態比較顕微鏡写真

顕微鏡写真にて実験前後の状態を比較すると整流素子 A・B で PM 粒子の付着状態に差が見られることがわかり、整流素子 A においてはインナーパイプ間の隙間にも PM 粒子の付着が広がっていていることがわかる。PM 粒子付着のメカニズムとしては、実験初期に排ガス中の PM 粒子がインナーパイプ表面へ付着し、その後繰り返しアクセルを吹かすことにより初期に付着した PM 粒子に排ガス中の PM 粒子がさらに堆積するという事が予想される。このことから、インナーパイプ厚が薄いほど PM 粒子が付着しにくいということが推測される。

(3) 改良型 PM 計装置の設計・試作及び評価

①改良型 PM 計測装置の特徴

図 3－9 に試作した改良型 PM 計測装置の設計図及び構成図を示す。

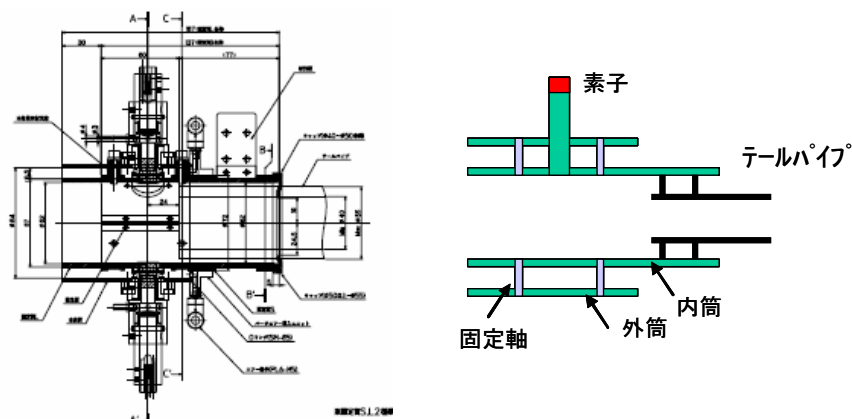


図 3－9 改良型 PM 計設計図及び構成図

改良型 PM 計測装置はこれまでの検討結果から以下の特徴を有する。

- ①二重管構成にし、計測部と排ガス流通部とを分離した
- ②二重管の外筒と内筒を固定する支柱を熱伝導度の小さい材料にした
- ③センサーユニットの清掃を容易にするため、LED、PD 部をワンタッチ着脱が可能な構成にした
- ④ハニカム寸法を最適化するためにハニカム交換が容易な構成にした

②改良型 PM 計測装置の性能確認実験

改良型 PM 計測装置を用いて、従来の PM 計測装置と同様にシャーシダイナモ上で実車試験を行った。使用した車両、運転モード等は従来型の実験時と同条件で実施した。先ず、比較のために固定材が SUS の場合のセンサーユニットの各部分の温度上昇を測定した結果を表 3－2 に示す。

表 3－2 センサーユニット素子部の温度上昇比較（室温 24℃）

各部温度(℃)	単管	二重管(SUS固定)	
テールパイプ出口	155	155	180
素子付根	77	62	77
素子	57	45	57

室温 24℃、テールパイプ出口温度 155℃において単管（従来型 PM 計測装置）と SUS 固定の二重管（改良型 PM 計測装置）を比較すると、素子部温度がそれぞれ 57℃（室温からの上昇分 33℃）、45℃（同 21℃）と改善されていることがわかる。更に SUS 固定の二重管の場合はテールパイプ出口温度が 180℃のときほぼ単管と同じ温度上昇になっており約 25℃程度改善されていることが分かった。

（４）実ロード走行試験における課題抽出実験

①実験システム及び実験条件

図 3－10 に実験に使用したシステム構成写真を示す。基本的な装置構成はシャーシダイナモ上での実験と同じで、PM 計測装置及び整流素子に流すパージエアーポンプ電源はバッテリーから供給し実験した。また、実験は一般道（郊外道路）を 5 時間走行し評価した。

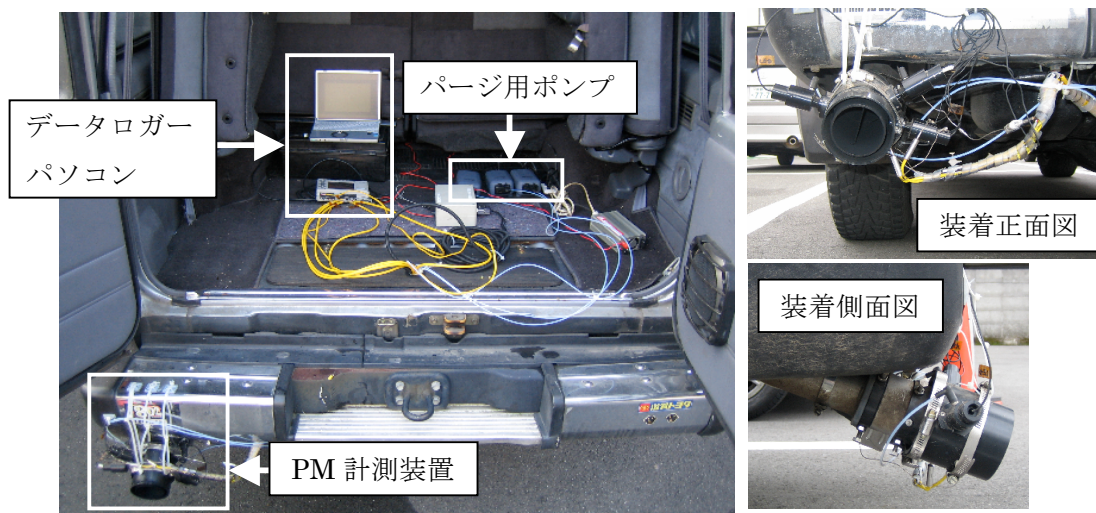


図 3-10 実ロード走行試験システム写真

②実験結果

実ロード走行での実験結果は、シャーシダイナモ上の実験結果と比較して信頼性の有るデータを得ることが出来なかった。これは、実ロード試験において気温が 5℃以下での測定となったため排出ガス中に含まれる水分が PM 計測装置内壁面に結露した事による光学系への影響のためとだと考える。具体的には、結露により計測装置内壁に水分が付着し、その水分が水滴となり整流素子内に進入した。ラボ内での実験では分からなかった新たな問題点がわかった。PM 計測装置自体の耐久性及びテールパイプへの取り付け状態の耐久性に関しては、total 20 時間程度走行試験を実施したが、センサーユニット光学系の歪み及びゆりみは発生せず、また、信号に対して振動影響が出る等の問題は発生しなかった。

(5) まとめと今後の課題

PM 計測装置を用いて、現状の問題点の抽出を実施した。その結果、計測のために必要な課題として、PM 計測装置の排ガスによる温度上昇及び排出ガス中に含まれる PM 粒子による光学系の汚染対策が必要であることが分かった。これらの対策を熱シミュレーションから解析し、二重管構造を採用した診断装置を製作し、素子部の温度上昇を 20℃下げられることを確認した。一方、PM 粒子による光学系の汚染問題に関しては、整流素子のインナーパイプ形状と PM 粒子の付着状態とを解析することによりこれらの関係を確認した。また、実ロード走行試験においては信頼性の有るデータを得ることは出来なかったが、改良型 PM 計測装置の耐久性を確認することが出来た。

4・NOx 計測用 5μm 帯 LED(光源)および PD(光検出器)の改良試作開発

(1) NO 計測用 LED の特性評価

試作素子特性評価は室温において実施した。LED のダイオード特性及び発光素子としての光出力特性・発光スペクトル特性を測定し、昨年度試作した素子と本年度改良試作した素子とを比較した。

先ず、ダイオード特性に関して評価を実施した。その結果を図 4－1 に示す。この結果から、昨年度の試作ではダイオード特性を示さず、順方向・逆方向ともに電流が流れてしまっているが本年度試作センサにおいては改善されていることがわかる。次に、LED の発光強度に関しては昨年度試作した素子では発光が観測する事ができなかったが本年度試作した素子においては得ることが出来た。これは、発光層 InAlSb の結晶成長の最適化が図られ、結晶品質が向上しているためだと考えられる。本年度試作した素子の発光強度スペクトルを図 4－2 に示す。

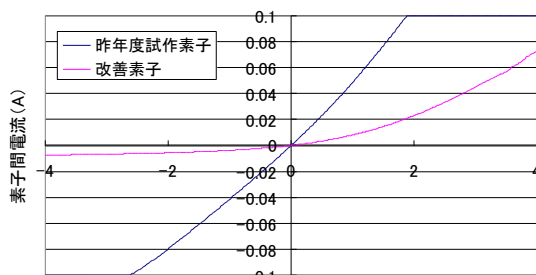


図 4－1 NO-LED の I-V 測定比較
(QinetiQ Proprietary)

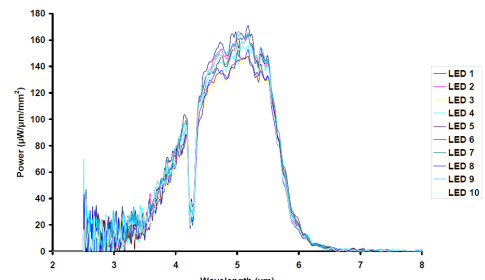


図 4－2 本年度 NO-LED の発光強度スペクトル
(QinetiQ Proprietary)

(2) NO ガスに対する吸光測定

①測定実験系及び条件

オープンパス机上モデル実験で使用した実験構成図を図 4－3 に示す。

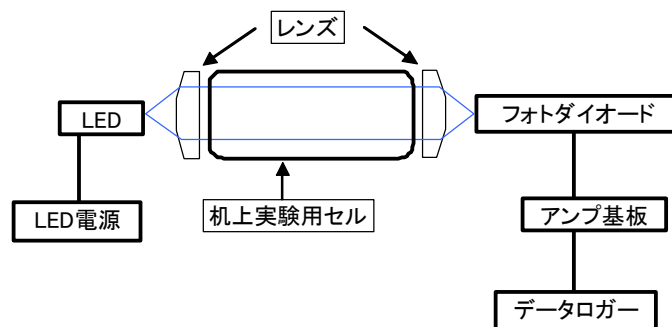


図 4－3 実験構成図

LED と PD の素子間隔は 95mm (サンプルセル長 70mm)、使用したレンズは Si 製で焦点距離 $f = 12.2\text{mm}$ 、レンズ径 $\phi = 12\text{mm}$ (有効径 $\phi = 10\text{mm}$) のものを使用した。また、ガス吸収が得られる有効な体積は 5.5cm^3 。ガスセルは CaF_2 窓を張ったサンプルセルを使用し、セル内壁面での反射光の影響がない状態で実験した。LED の発光周波数は 170Hz、Duty50%で動作させて測定した。また、PD 出力は本年度作成したパルス・DC 変換回路を用いて検出し、データロガーを用いて測定した。

②NO ガス及び干渉ガスの吸光測定結果

先ず、スパンガスとして NO ガス濃度 4776ppm を用いて吸光測定を行ったが吸

光が小さいため、吸光信号がノイズレベルに埋もれてしまい測定することが出来なかった。次に、NO ガスの濃度を 4.84%まで高くして測定を試みた。ゼロ～フルスケール間で検量線の中央での曲がり角が 10%程度有ることが分かった。また、信号の SN 比を確認したが、ノイズレベルが NO ガス濃度換算 4000ppm 程度有る事がわかった。この結果から NO ガス濃度 4776ppm でガス吸光が観測できなかった理由がわかる。次に、H₂O の干渉を測定した。その結果、H₂O 濃度 2.31%に対し NO ガス濃度換算 440ppm 程度有る事が分かった。このことから現状の測定システムではガス感度性能に加え、H₂O 干渉の除去が課題であることがわかる。

(3) まとめと今後の課題

改良試作素子において、NO ガスの吸収帯 (5.3 μm) での発光が得られ、NO ガスの検出に成功した。しかし、測定可能濃度に関して、現状の目標に対して一桁高い濃度の NO ガスしか計測できなかった。また、赤外で NO を測定する際の干渉成分である H₂O の干渉が大きくこの干渉を排除することが課題として挙げられる。

5・NO_xの紫外吸収を利用した計測の可能性検討と試作、評価

(1) 紫外域での NO ガス計測の可能性検討

①紫外域での NO ガス及び干渉ガスの吸光度比較

NO ガスの紫外域での吸収は 230nm 以下の深紫外域から真空紫外域渡っており、吸収幅の狭い吸収線が連続的にある。また、この波長域には NO だけでなく、干渉成分に上げられる SO₂、NO₂ 等の吸収帯がある。その各種ガスの吸光度比較結果を図 5－1 に示す (比較しやすいように NO₂ のみ別軸にて示した)。

このグラフから分かるように、深紫外領域で NO を検出しようとする上図の吸収スペクトルから干渉成分の吸光度を考慮した上で吸収ピーク波長を選択する必要がある事がわかる。

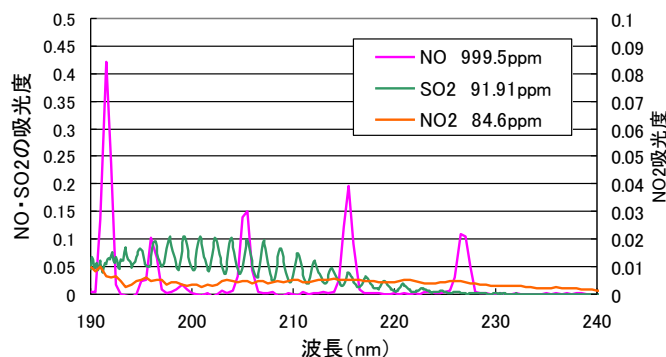


図 5－1 NO・NO₂・SO₂ ガス吸光度比較

②NO 測定光学系

第 3 章で述べた PM 測定装置に取り付けられる構造を考慮して診断装置を設計・製作した。図 5-2 に今回製作した診断装置の写真及び測定概念図を示す。測定システムに関しては、図 5-2 に示すように、光源に Xe フラッシュランプを用いて、ランプからの発光を光ファイバーにより測定セルまで導入する。測定セル側でレンズにて平行光にしてからセルに導入し、セルを通過した光をバンドパスフィルター（以下では BPF という）に通した後、Si フォトダイオードを用いて検出する構成になっている。サンプルセル長 62mm、使用したレンズは合成石英製で $f=20\text{mm}$ 、 $\phi=15\text{mm}$ （有効計 $\phi 10$ ）のものを使用した。また、ガス吸収が得られる有効な体積は 0.49cm^3 、ガスセルは合成石英窓を張ったサンプルセルを使用し、セル内壁面での反射光の影響がない状態で実験した。Xe フラッシュランプの発光周波数は 10Hz で動作させ、光出力は Si フォトダイオードにより検出し、測定はオシロスコープもしくはデータロガーを用いて観測した。また、診断装置の光学系は机上実験後 PM 診断装置に取り付けて測定できるよう設計し、机上評価後車載計測が出来るように考慮した。

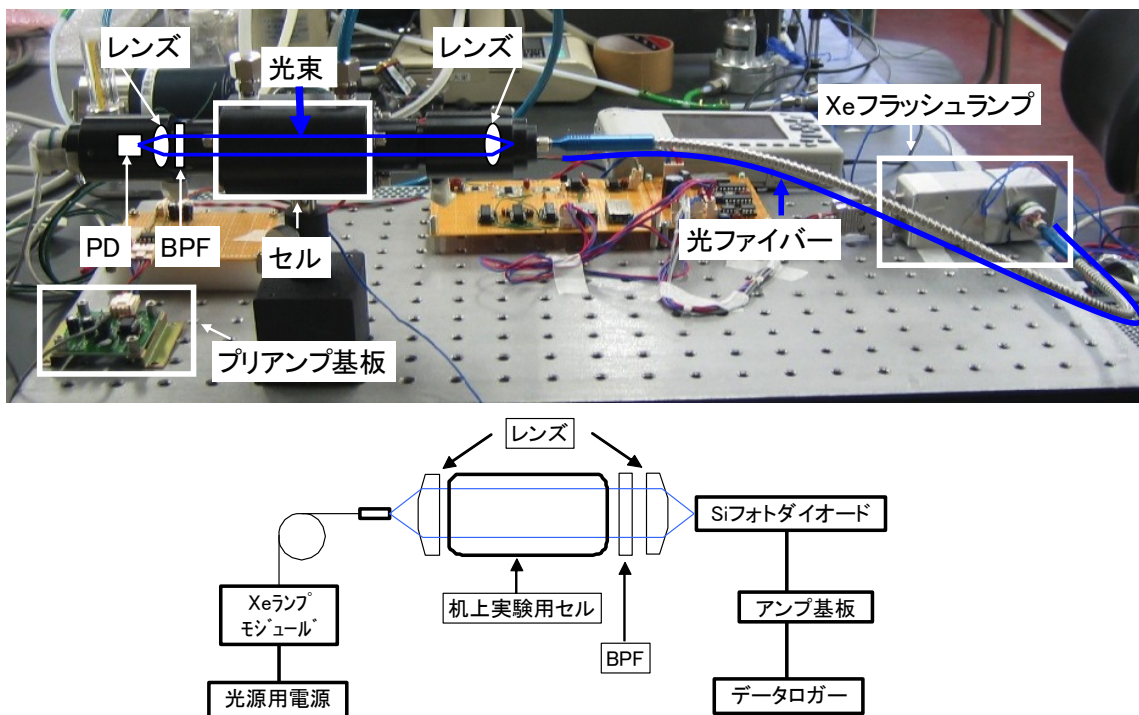


図 5-2 NO 測定装置写真及び測定概念図

③NO 被測定吸収帯の決定

前項で NO の吸収スペクトルと干渉ガスの吸収スペクトルの関係を述べたが NO ガスの吸光測定をするのにあたり、先ず、Xe フラッシュランプを光源に用いて NO ガスの 206nm ・ 214nm ・ 226.5nm の吸収スペクトルそれぞれの吸光評価を

分光光度計にて、ゼロガス時（N₂）と NO：999.5ppm で比較を行った。また、測定には長さ 10cm のセルを用いて実施した。その結果を図 5－3 に示す。

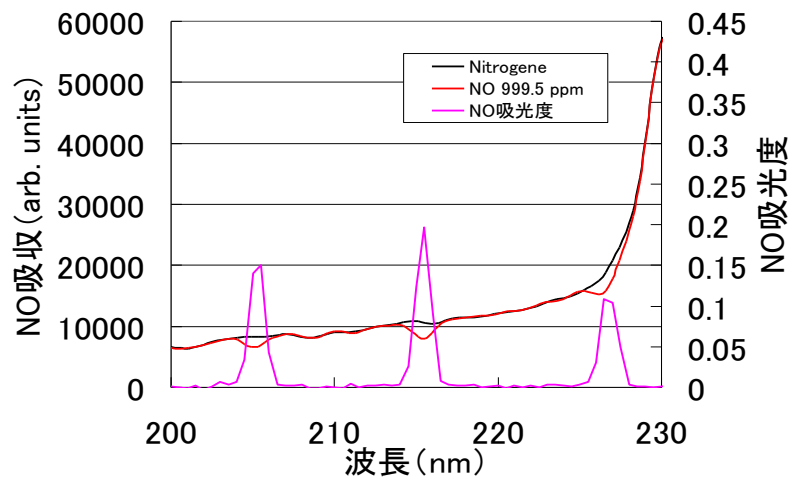


図 5－3 NO 吸収スペクトルと吸光量の関係

この結果からこれらの吸収スペクトルを用いてガス測定の可能性がある事がわかる。次に、214nm 及び 226.5nm を透過帯の中心にもつ BPF を用いてどちらの吸収スペクトルを用いた方が信号量を取れるかの比較評価を実施した。評価方法は、セルに N₂ ガスを充填している状態の信号（ZERO 信号）に占める、NO：4776ppm を充填した場合に減少する減少信号（SPAN 信号）比を算出して評価した。測定結果を表 5－2 に示す。この結果から以降のガス測定においては 214nm の BPF を用いて測定を実施することに決定した。

表 5－2 ZERO 信号に対するスパン信号比

使用 BPF	(ZERO-SPAN)/ZERO
214nm	14.1%
226.5nm	3.5%

（2）紫外域での NO ガス計測

検量線・干渉測定及び SN 比評価

上述した光学系を用いて NO ガス濃度 4993ppm における検量線測定及び SN 比評価を実施した。その結果、信号のノイズレベルは NO 濃度換算 99.9ppm 相当有る事が分かった。次に、NO₂ と SO₂ の干渉影響を測定した。その結果、NO₂ ガス濃度 233ppm に対し NO 濃度換算 178ppm 相当、また SO₂ ガス濃度 46.6ppm に対し NO 濃度換算 444.38ppm 相当の干渉信号を観測した。

（3）まとめと今後の課題

NDUV 法にて NO ガス計測の可能性を検討した。その結果、NO ガスの 214nm

の吸収帯を使用して、ガス計測が可能であることを確認する事ができた。今後の課題として、Xe フラッシュランプは放電ランプであるため、光量のドリフト等の問題が懸念される。対策として光源温調や光量モニター用リファレンスを設ける必要が有ると考えられる。信号の SN 比に関しては、電気系を最適化することにより更なる向上が図れると考えられる。

6・CO2 計測用 LED(光源)および PD(光検出器)を用いた測定システムの構築

(1) テールパイプへの実装に対する検討

①CO2 測定光学系及び信号処理基板

実ロード走行計測へ向け、テールパイプへ実装可能な測定装置の設計及び製作を行った。その写真及び断面図を図 6－1 に示す。全体構成は NDUV 法を用いた NO ガス測定系と同様に、光源部、検出部を PM 計測装置に取り付けて測定できるように設計にした。光学系は、LED の光をレンズにより平行光にし、ガスセルを通した後レンズにより PD 上に焦点を結ぶように設計した。

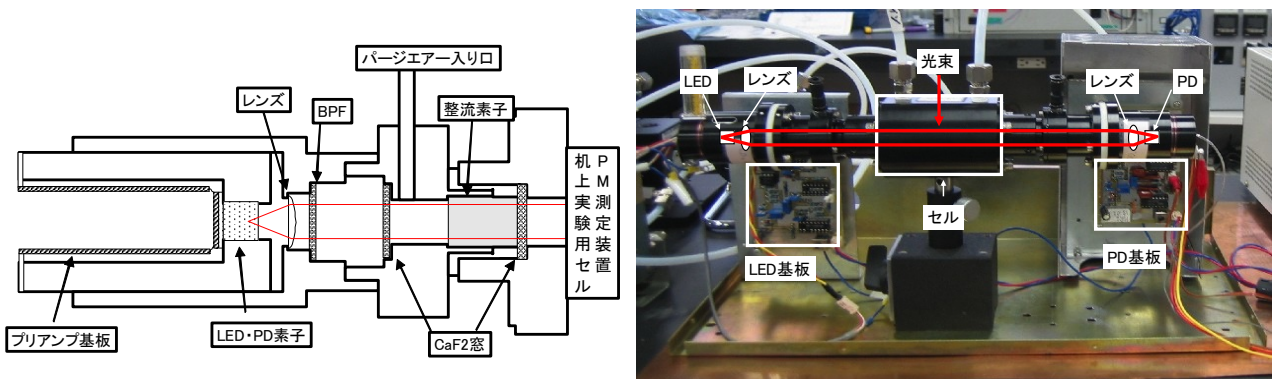


図 6－1 CO2 測定系写真及び断面図

②センサ実装改善

ペルチェ素子を用いて、素子温度を温調出来る形での実装に関しては昨年検討したが、本年度は実際に素子を実装し特性評価を行った。その実装写真を図 6－2 に示す。ペルチェ素子上にサーミスタを LED・PD 素子と同じ面に実装し素子温度を測定出来るように配慮した。

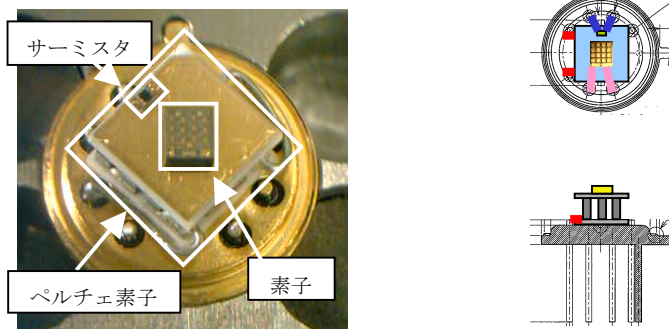


図 6－2 素子実装写真及び断面図

(2) CO₂ ガス測定

①測定実験系

使用した測定系は前述した、図 6－1 のオープンパス机上モデル実験系を使用した。LED と PD の素子間隔は 180mm (サンプルセル長 62mm)、使用したレンズは Si 製で $f=12.2\text{mm}$ 、 $\phi=12\text{mm}$ (有効計 $\phi 10$) のものを使用した。また、ガス吸収が得られる有効な体積は 0.49cm^3 、ガスセルは CaF₂ 窓を張ったサンプルセルを使用し、セル内壁面での反射光の影響がない状態で実験した。LED の発光周波数は 170Hz、Duty50%で動作させて測定した。

②検量線・干渉測定及び SN 比評価

CO₂ ガス濃度 5.004%を用いて検量線測定及び SN 比評価を実施した。測定の結果、検量線の曲がり率は 27%程度あり、信号のノイズレベルは CO₂ 濃度換算 650ppm 相当有る事が分かった。次に、CO・C₃H₈・H₂O の干渉影響を測定した。その結果、CO ガス濃度 4.992%に対し CO₂ 濃度換算 350ppm 相当、C₃H₈ ガス濃度 1.014%に対し CO₂ 濃度換算 1260ppm 相当の干渉信号を観測した。また、H₂O 濃度 2.61% (22℃飽和) に対しては干渉影響が見られなかった。LED の発光波長、PD の受光感度波長及び C₃H₈・CO の吸収波長の関係から本検討の CO₂ 濃度に合わせた BPF を入れることで改善できると考えられる。

③素子温調及び整流素子挿入による信号量影響確認

LED・PD 素子をペルチェ素子により温調し、その時の LED 出力及び PD 出力の温度影響率 (25℃での CO₂ ガス濃度 4.992%のスパン信号を基準として算出) を求めた。測定は LED もしくは PD、一方の素子を温調時に他方の素子を室温動作させる形で実施した。その結果を図 6－3 に示す。

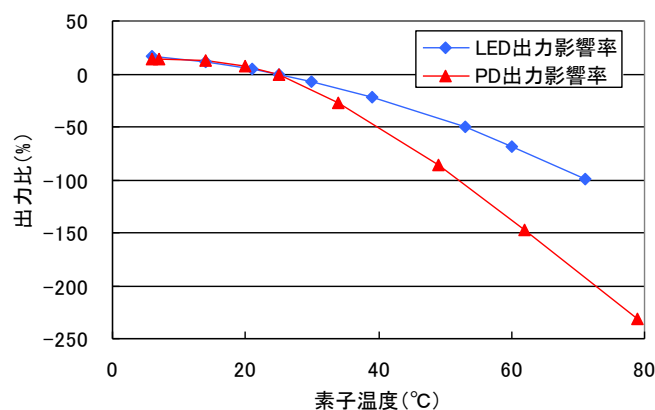


図 6－3 LED・PD 出力の温度に対する依存性

このグラフから、周囲温度が変化した場合、素子温度の上昇とともに両素子とも出力が低下していくのがわかる。また、5℃～25℃付近まで両素子の出力変化率はほぼ同じであるが、素子温度の上昇に伴い PD 出力の影響値が大きくなり、70℃で約倍程度差が有るのがわかる。素子温度 25℃以下で両デバイスともに素子温度

低下に伴い出力が上昇しているが飽和傾向にある。LED の出力に関しては温度と出力比の傾きから素子温度低下による出力上昇に飽和傾向見られるが、PD に関しては素子温度 25℃以上の出力低下傾きに対し、素子温度 25℃以下の出力上昇が急激に下がっていく傾向がみられる。次に PD の温度を変化させた場合の CO2 ガスの吸光信号を測定し、スパン信号に対するノイズ比の温度に対する依存性を測定した。また、LED は室温動作条件で実施した。その結果を表 6－1 に示す。この結果から、PD 温度の低下とともに SN 比は向上していき、素子温度 6℃において、室温に比べ半分以下に改善していることがわかる。この結果から PD 素子温度を下げるにより更なる SN 比向上が図れると考えられる。

表 6－1 SN 比 (CO2 換算) の PD 温度に対する依存性

PD温度(℃)	SN比(CO2換算濃度(ppm))
25	650
20	521
14	693
7	494
6	293

(3) まとめと今後の課題

今回ターゲットとしているディーゼル車から排出される CO2 ガス濃度 (15%) に対して、テールパイプへ実装が可能な光学系を用いて、ノイズレベルが CO2 換算 650ppm 程度である事が分かった。さらに、ペルチェ素子を用いて素子の温度を下げるにより更なる SN 比改善が図れることを確認した。今後の課題としては、実車走行診断時において、素子温度の上昇に対する出力低下をペルチェ素子による温度調整でどこまで低減させることが出来るかが上げられる。そのために、素子周辺部の熱設計の再検討が必要であると考ええる。

7・検出光学システム一体化設計検討

一体化に向けての検討内容

これまでの調査結果から、NO 計測に関しては赤外域の吸収を用いての計測は困難であることが分かってきたが、紫外域の吸収を用いての診断に関して可能性が有る事がわかった。PM 測定に関しては透過光及び散乱光の計測をすることにより排出量計測の可能性がわかった。CO2 計測に関しては、ガス計測に有用な吸収が赤外しか無いため、中赤外の吸収を用いて診断する必要があるが、この件に関しても中赤外の LED・PD を用いることにより診断の可能性が分かった。これらの測定結果から測定システムの一体化を考えた際、測定対象ガスの吸収波長及び PM 測定波長を考慮し、また、光源の発光波長・検出器の受光感度波長を考慮すると、紫外域から可視域と中赤外域の最低 2 波長の測定系をテールパイプへ取り付ける必要が有る。その概念図を図 7－1 に示す。

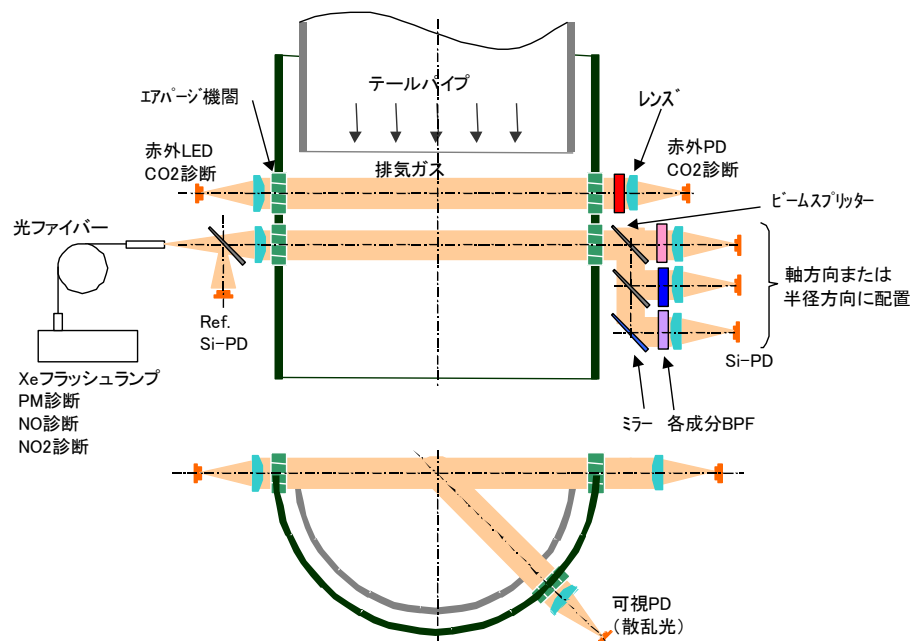


図 7-1 測定光学系一体化検討概念図

この測定光学系においては、NO ガス・NO₂ ガス及び PM 計測を Xe フラッシュランプの発光を用いて同時に測定する。また、CO₂ に関しては中赤外域の LED・PD を用いて単独で計測する光学系である。Xe フラッシュランプは真空紫外域から近赤外まで、広い波長範囲で発光が得られる光源で、この特性を利用し NO・NO₂・PM の計測に合わせたバンドパスフィルターを検出器の前にそれぞれ配置することにより波長選択し同時計測する。それぞれの計測に関して具体的には、220nm 付近の発光を用いて NO を計測し、370nm 付近の発光を用いて NO₂、650nm 付近の発光を用いて PM を計測する構成になっている。計測システムとしては、Xe フラッシュランプからの発光を光ファイバーにてテールパイプに導き、テールパイプを通った光をビームスプリッター及びバンドパスフィルターを用いて、被測定成分の検出に合った波長のみを選択して計測できるように分光する構成になっている。また、第 5 章（NDUV 法による NO 計測）にて課題としてわかっている Xe フラッシュランプの点灯時のドリフトに関しては、テールパイプに入射する前にリファレンス用の Si-PD を用いて補正する構成とした。以上の構成を採用する事により 1 光源で三成分測定できる測定装置を構築する事ができると考える。また、CO₂ 計に関しては図 7-1 に示した位置に、第 6 章で述べた光学系を搭載し計測を実施する。

8・テールパイプ実装上の課題の調査検討

(1) テールパイプ実装時の温度上昇問題検討

PM 計測において、シャーシダイナモ上及び実ロードでの計測において見えてきた課題として、排出ガスによる診断装置の温度上昇が上げられる。この問題を

解決するために、計測装置の二重管構造化検討（第 3 章）、光ファイバー光学系の検討（第 5 章）及び素子単体での温度調整（第 6 章）等の検討を実施してきた。これらの対策を効果良く実施することにより計測出力値に対する温度影響を最小限に抑えることが出来ると考える。

（２） テールパイプ実装上の課題調査

計測装置をテールパイプに設置する場合の問題点として計測装置の重量問題があげられる。PM 計測装置のみを考えた場合、これまでの LED・PD を直接計測装置に取り付ける光学系で問題無いと考える。しかし、NO_x 及び CO₂ 計測も含めた場合、PM 計測と同じ発想の延長線上では重量的にも大ききさ的にも問題がある。これらの問題点を解決するためには、多成分を同じ光学系で測定する光学系の検討が不可欠である。この問題の検討として、光ファイバーを用いた NO_x 及び PM 計測装置の一体化が上げられる。この検討に関しては第 7 章で述べたが、この光学系を考慮した計測装置のシステムを図 8－1 に示す。これまでの調査研究では、計測部（テールパイプ取り付け）及び信号処理部（車両搭載部）の 2 つのシステムから構成されていた。しかし、ファイバー光学系を採用することにより、診断部には CO₂ 診断装置及び PM・NO_x 計測装置の光導入路のみを配置し、光源を含む計測光学系は演算処理系とともに車載部分に配置する事が可能になる。このことにより、光源部及び検出部の排出ガスからの温度影響を無くすることが可能となる。したがって、計測成分それぞれの計測値の温度影響を小さくすることが可能になる。また、CO₂ 計測に関してはオンパイプでの計測が必要であるため、ペルチェ素子での素子冷却及びプリアンプを素子背面部に取り付ける構造を採用したことに関しては第 6 章で述べた。これらの発想を盛り込む事によりテールパイプへ取り付けられる形での、多成分計測装置実現の可能性が高くなると考えられる。

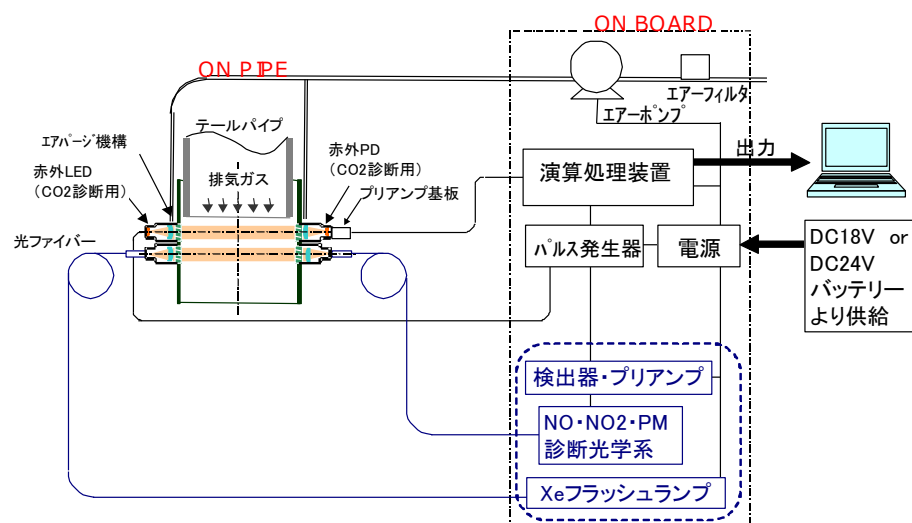


図 8－1 多成分測定装置概念図

9・まとめ

ディーゼル使用過程車から排出される窒素酸化物および粒子状物質のノンサンプリング車載排ガス診断装置として、PM 測定装置、NO_x 測定装置、CO₂ 測定装置、一体化構想及びテールパイプ実装上の課題に関して検討を実施した。PM 測定装置に関しては、過去の委託研究で製作した装置を用いて問題点の抽出を行った。その結果、高温の排出ガスによる発光、検出部の温度上昇及び PM 粒子による光学系の曇り等の問題点の解決が必要であることが明確になった。これらの課題を解決するため熱影響のシミュレーションを実施し、温度対策を実施した改良型検出装置を設計・試作し、実験をおこなった。その結果、改良型測定装置では測定素子部の温度を 20℃程度下げられることを確認した。PM 粒子による光学系の曇りに関しては、エアパージ部の整流素子を適切に配置することにより改善を図る事が期待出来ることがわかった。また、光学系曇りの状態を仔細に観察することにより PM 粒子の付着の低減の方策を検討した。

次に、NO_x 測定装置に関して NDIR 法及び NDUV 法を用いて測定の可能性検討を行った。NDIR 法による測定の可能性に関しては、NO ガスの赤外域吸収に対応する LED 素子を再度試作し NO ガス感度を得ることができたが、目標とする検出濃度レベルに対して 1 桁以上低感度であり、更なる試作検討が必要である。一方、NDUV 法を用いた測定手法に関しては、紫外域の NO ガス及び干渉ガスの吸収スペクトルを調査し、光源・検出器の発光波長、感度領域波長の検討を元に測定装置実現の可能性を調査した。その結果、深紫外域の NO の吸収スペクトルを用いることにより、NO ガス濃度 5000ppm レベルの検出に成功した。今後、光学系及び電気系の最適化による S/N の改善等の施策により、更なる低濃度での検出の可能性を示唆できる結果を得た。

CO₂ 測定装置に関してはテールパイプ装着を念頭においた装置を設計・試作を実施し、CO₂ ガス測定の机上実験を行った。その結果、ディーゼルエンジン排出ガス中 CO₂ 測定に必要なレベルに対応した感度を得ることができた。また、LED,PD デバイスチップの実装実験の結果、素子温度を下げることによりさらに SN 比を改善し、精度を向上させる可能性を見出した。この結果により、テールパイプに実装しての測定の際に問題となる排ガスによる温度影響を小さくすることが出来ると考えられる。

一体化の設計に関しては、PM 測定及び NO 測定光学系の複合化の可能性に関して検討した。また、テールパイプ実装上の課題検討に関しては光ファイバーを用いる光学系を採用する事により、重量及び温度影響の課題に対して解決の可能性を得ている。

調査研究期間を 3 年間とした 2 年目の目標である、机上モデル実験及びテールパイプへ実装しての計測を行い診断装置の実用化の可能性を示唆する結果を得ることが出来た。

次年度はこれらの調査研究結果を元に、実際にディーゼル車テールパイプに実装して路上走行による測定を実施し、測定データの表示系含め測定診断装置実用化試作機の実現をめざし、排出ガス診断装置の実用化に必要な課題を明確にする。