レーザ分光でエンジンオイル消費を計測

ステファン・セルマイヤ、エドゥアルド・アロンソ、ウルリッヒ・ベッスル、クリスチャン・メンハード、
ラインハルト・ケルンベルガー、ハインツ・バチェル

波長可変UVレーザをベースにした分光微量成分分析により、排出SO_2を利用して燃焼機関のエンジンオイル消費分析を行う試作システムが可能となった。

排ガス規制や環境保護規制がますます厳しくなっているので、開発エンジニアには新車設計の際に、規制と新エンジンとの両立が求められている。エンジニアは、自動車の排ガスと燃料消費を可能な限り減らしながら、高信頼、メンテナンスの容易性、エンジンの耐久性も保証しなければならない。様々な動作ポイントでエンジンオイル消費を正確に知ることは、こうした目的を達成するために不可欠の手段となる。

車のパフォーマンスに決定的な影響を与えるパラメータの中で、ピストンリングの数と位置、シリンダー壁のタイプと表面品質が最も重要である。これらのパラメータを最適化するために、エンジンオイル消費を把握しておくことが極めて重要になる。

エンジンオイル消費を計測する最も一般的な方法は重量測定である。この測定法では、エンジンを規定量のエンジンオイルで満たし、一定の回転速度で何時間も稼働する。すると、エンジンオイルは少なくなり、劣化する。このやり方は非常に時間もかかりコストもかかり、しかも動的測定は全くできない。

エンジンオイル消費の90%以上は、内筒壁からのオイル皮膜の蒸発とそれに続く排ガス排出によって起こる。したがって、エンジンオイル消費を分析する最近のアプローチはすべて排ガス内のエンジンオイル痕跡検出にフォーカスしている。これは非常に難しい分析作業になる。と言うのは、計測濃度が極めて低く、混合物質が非常に複雑だからである。

ミュンヘン工科大学はBMWグループ、イノラスレーザ社（InnoLas Laser）と共同で、エンジンオイルの消費を迅速、正確、高信頼に計測できる方法を開発した。この方法では、エンジンオイルの指標として硫黄を利用する。排ガスには微量の硫黄が検出されるからだ。この種のエンジンオイル消費分析は、サルファフリー（または、低硫黄）燃料が採用されたことで可能になっている。

問題は、硫黄が異なる多種の化合物に取り込まれていることである。検出を効果的に行うには、硫黄含有エンジンオイルの成分すべてが、容易に検出可能な二酸化硫黄（SO_2）に変換されなければならない。これまでにSO_2検出法[1]はいくつかあったが、いずれも硫黄に対して必要となるppb（10億分の1）レンジの感度は得られなかった。

研究チームが開発した新しい方法は、1）小さな気体放電セル内で硫黄含有分子をSO_2に変換、2）特殊レーザ誘起蛍光法でSO_2を検出（SO2のレーザ分光法を活用）[2]、3）コンパクトな新開発波長可変UVレーザの採用である。

この方法により、硫黄含有排ガスを完全に熱分解することでSO_2を生成し、分子中の硫黄を極めて高感度（<20ppb）、高速（<2s）、高信頼に検出することが可能になった（**図1**）。小型質量分析計もしくはキャビティリングダウン吸収セルを用いると、他のエンジン固有の物質や微量物質も計測できるので、この

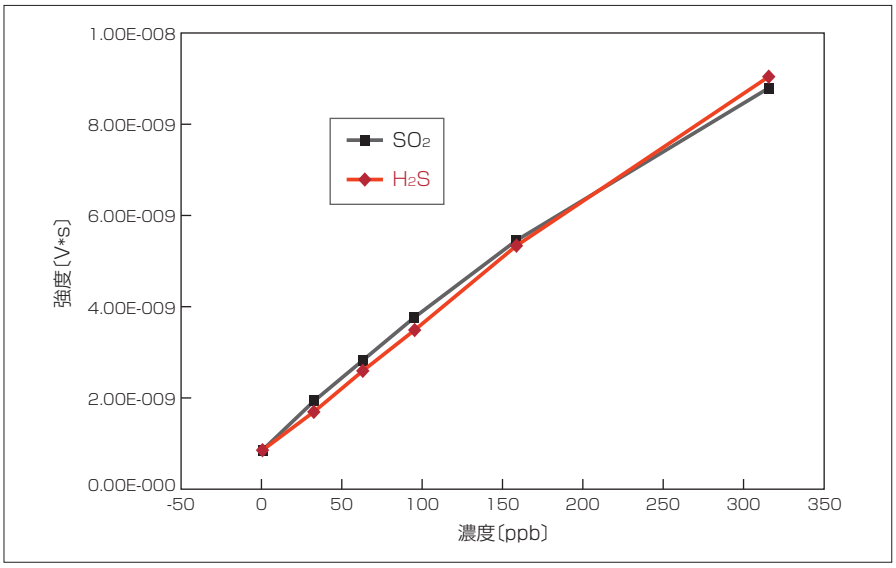

図1　パルス、可変UVレーザベースの試作機により、SO_2の高感度（＜20ppb）、高速（＜2s）検出が可能になる。H_2S実験により、放電セル内で硫黄含有物質のSO_2への完全変換達成が証明された（ミュンヘン工科大学提供）。

新しい方法の応用範囲は大きく広がる。

硫黄酸化と検出

排ガス中の硫黄を完全酸化してSO_2とすることがこの方法の重要なステップとなる。従来の方法では、高温炉を用いて硫黄を熱酸化する。新しい方法では、酸化は非熱プラズマにより行う。この方法の優位性は、多環芳香族炭化水素（PAH）においては特に明らかである。PAHは、熱的に完全酸化することは難しく、不可能だからだ。しかし、ここで行った放電では、低放電であっても完全分解される。

計測の妨げになる多くの化合物が排ガスの中に高濃度で存在するので、SO_2の高感度検出は難しい。レーザ誘起蛍光法を測定原理に用い、可変UVレーザで混合気体を励起する。異なる2波長間でレーザを高速スイッチングすることで高感度が得られ、排ガス（より正確には、蛍光挙動）内に存在するほぼ全ての他の物質に無反応となる計測が行える。窒素酸化物との残留交差感度—窒素酸化物は、SO_2と同じ波長で吸収し、蛍光を発する—は、両方の物質の蛍光寿命が大きく異なることを利用して抑圧することができる。

最後に、この放電セルの設計と、放電から蛍光セルまでのガスフロー管理によって悪影響を除去できる。悪影響とは、まずガスフローシステム内に微量物質を堆積し次に再放出することから来るメモリー効果であり、これによって測定結果が歪められる。試作機のセットアップは**図2**に示した。

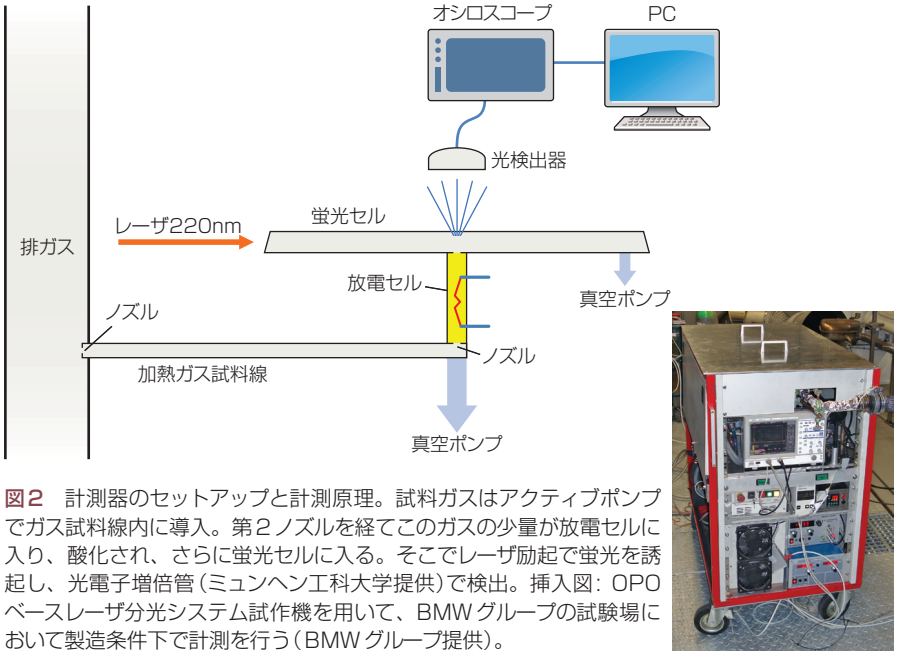

図2　計測器のセットアップと計測原理。試料ガスはアクティブポンプでガス試料線内に導入。第2ノズルを経てこのガスの少量が放電セルに入り、酸化され、さらに蛍光セルに入る。そこでレーザ励起で蛍光を誘起し、光電子増倍管（ミュンヘン工科大学提供）で検出。挿入図：OPOベースレーザ分光システム試作機を用いて、BMWグループの試験場において製造条件下で計測を行う（BMWグループ提供）。

エンジン試験施設での計測

実験室での好結果を受けて、エンジン試験施設での計測に向けて可動式試作システムが開発された。最初は、Nd:YAG励起ダイ（色素）レーザを採用したが、これはイノラスレーザ社が開発した光パラメータ式発振器（OPO）で置き換えられた。

外気供給用に個別のノズルを持つアクティブポンプガス吸入口を可動式試験装置に取り付けた。これを追加したことで、熱く粒子を含んだ、特に酸欠状態のエンジン排ガスの完全な酸化が確実になる。最初の試作機は、独ランツフート応用科学大学との共同で、6気筒ガソリンエンジンでオイル消費計測を行った際、検出感度が非常に高く、選択性がよかった。

エンジンオイル消費計測で、オイル交換、古いオイルから新しいオイルに交換した効果を分析することさえ可能だった。現在はBMWグループのテスト施設で製造条件下での計測が行われている（**図2**の挿入図）。

レーザシステム

このプロジェクトでは、レーザ光源が特に重要になる。可変DUV（215-225nm）が必要で、コリメート照射で数100μJの出力が不可欠である。出力光は次に計測チャンバに入り、分子励起と蛍光を誘起する。

この波長帯で入手可能なレーザ光源はほとんど存在しない。エキシマレーザは、この範囲の波長を出力できるが、固定波長に限られる（例えば、193nm、248nm）。したがって、この種の実験で使えるものは2つのタイプのシステムしかない。二倍波ダイレーザとOPOsだ。

ダイレーザ。開発の初期段階では、ダイレーザを採用した。このレーザは、極めて狭帯域のレーザ光が出力できる点が長所であるが、メンテナンスや調整の必要性も非常に高い。選択した波長ではダイレーザは、わずか10時間稼働すると再調整が必要になる。これは、時間がかかり、危険な溶媒の取り扱いだけでなく専門技術者など次々と必要なものが生じる。

その上、レーザの複雑な調整が必要になる、これは計測前（例えば激しい温度変動時など）、時には計測中にも必要になる。結局、そのようなレーザシステムは極めて扱いづらく、コンパクトな可動式計測機器には適さない。こ

図3 イノラスレーザ社が開発した可変深紫外（DUV）OPOでエンジンオイル排ガスのSO_2を計測。このレーザの可変範囲は215～225nm、スペクトル幅＜5cm-1、最大出力エネルギーは1.5mJ、ビーム広がり＜10mrad、パルス幅＜6ns、個々のシングルパルス（任意選択）のパルス周波数20Hz（Innolas Laser GmbH提供）。

れらすべての要素のために、ダイレーザは計測機器に不適切ということになる。計測機器は堅牢で保守の必要性が少なくなければならないし、サービスマンから最小限のトレーニングを受けただけでエンジン試験台で使えるものでなければならないからだ。

OPO。代替品としてイノラスレーザ社がOPO試作機を開発した。ダイレーザと違いOPOは、結晶光学部品をベースにしているので、信頼度が高く、操作も複雑ではない。OPOは、次の3つのモジュールで構成されている。1）コンパクトなフラッシュランプ励起、繰り返し20HzのNd:YAGレーザ、2）レーザ波長を1064nmから355nmに変換する2次高調波発生（SHG）および3次高調波発生（THG）用の結晶、3）出力波長215～225nmを生成するための周波数逓倍器を備えたOPOユニット（**図3**）。

これら3つのモジュールはモノリシックケースに収められており、これにより外部の影響を受けない放射光源となっている。最初の2つのモジュールはすでに多くのレーザで採用されており、このプロジェクトのためには特にOPOセクションを開発した。特に、タイプII BBO結晶のOPO共振器の採用により、ポンプ光（355nm）をシグナル（430-450nm）とアイドラ光（1680-2000nm）とに同時に変換できる。

BBO結晶を回転させることで、放射光は連続的に所望の波長に調整できる。シグナル光は、共振器（これも回転可能）内のもう1つの回転可能なBBO結晶を使ってUV域に変換される。結晶の回転は高速に行われるので、個々のシングルパルスの出力波長が自由に選択できる。

潜在的な問題はまず、OPO放射光のスペクトル幅がダイレーザのスペクトル幅の10倍以上であるという点にあった。しかし、このことが測定方法の感度や選択性を弱めるものでないことが実験によって示された。

可動式計測試作機はコンパクト（光源は560×280×91mm）で、ほぼメンテナンスフリー動作である（フラッシュランプだけは2000万光パルスで交換が必要）。もう1つの長所はOPOの波長可変が迅速かつ正確であることで、これにより示差測定のスピードが大幅に向上する（例えば、2つの異なる波長の蛍光信号を相互に差し引く）。

このプロジェクトの成果として、エンジンオイル消費を迅速、正確、再現性よく計測する新しい測定法が開発された。コンパクトなレーザシステムと組み合わせてさらに開発を進めると、量産化も可能になる。この計測システムはエンジンオイル消費の分析に特化されたものであるが、さらに進んだ用途にも適している。例えば、キャビティリングダウン吸収セルによってエアゾール状態でのエンジンオイル排出の検出、あるいは小型TOF質量分析計を組み込んで排ガス中の他の微量物質を素早く化学分析するなどがある。この試作機が商用システムになるとエンジニアは、エンジン開発のための新しいツールを利用できるようになる。

謝辞

このプロジェクトはババリアン研究基金（BFS）プロジェクトNo.AZ-795-07の支援を受けた。

参考文献

（1）MEXA-117OSX, Horiba online（2011）: http://bit.ly/57Fysk.
（2）Y. Matsumi, H. Shigemori, and K. Takahashi, “Laser-induced fluorescence instrument for measuring atmospheric SO2,” Atmospheric Environment, 39,3177（2005）

著者紹介

ステファン・セルマイヤ（Dr. Stefan Selleier）、ウルリッヒ・ベッスル（Dr. Ulrich Boesl）、エドゥアルド・アロンソ（Eduardo Alonso）はミュンヘン工科大学の教授。クリスチャン・メンハード（Christian Menhard）、ラインハルト・ケルンベルガー（Reinhard Kelnberger）はドイツ、クラーリングのイノラスレーザ社。ハインツ・バチェル（Heinz Bacher）はドイツ、ミュンヘンのBMWグループ。コンタクト先はラインハルト・ケルンベルガー reinhard.kelnberger@innolas.com

LFWJ