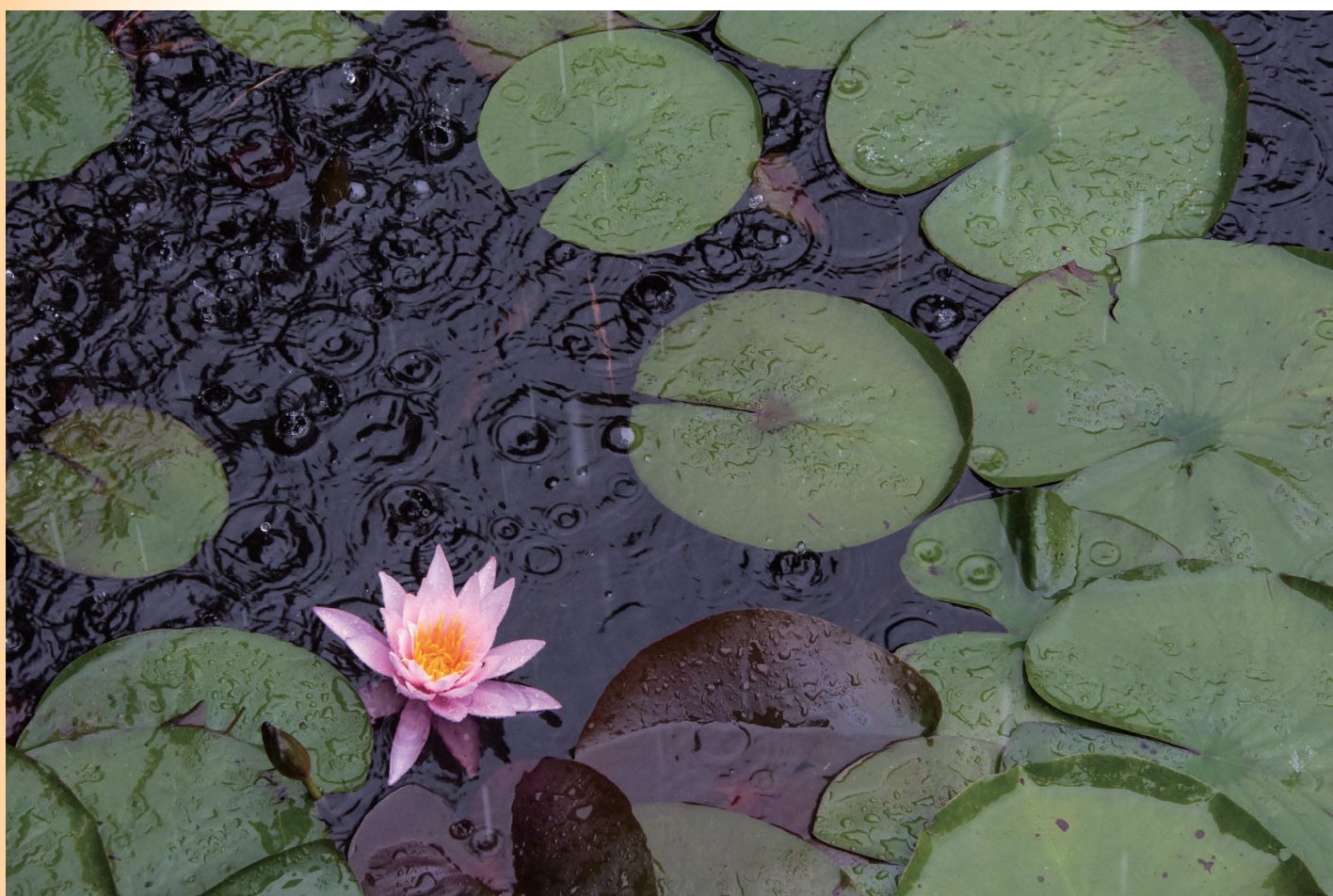


# Readout

HORIBA Technical Reports

May 2014 No. **42**

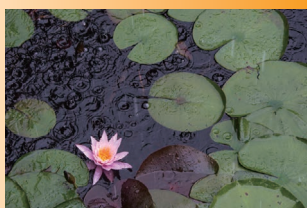
特集 自動車開発での試験の効率化, 燃費計測精度の向上



**HORIBA**

<http://www.horiba.com/jp/publications/readout/>

今号は、自動車開発での計測に視点をあてた特集を組みました。「自動車開発での試験の効率化」では、京都本社に新たに設備しました駆動系評価システムのご紹介を。「燃費計測精度の向上」では、燃費計測方式別の事例をご紹介します。



#### ■表紙写真

撮影：松井秀雄氏

(二科会写真部 会友)

夏の初めに六甲山を訪れました。雨足が強くなる中、初夏の風を受けてけなげに咲く睡蓮に出会い、これから始まる暑い夏に向けて元気を貰いました。

#### ■誌名について

誌名 Readout(リードアウト)には、「当社が創造・育成した製品・技術を広く世にお知らせし、多くの皆様に読み取っていただきたい」という願いが込められています。

## 特集 自動車開発での試験の効率化, 燃費計測精度の向上

### 巻頭言

- 4 MEXA-7000 へのご支援に感謝  
齊藤 壽一

### 総論

- 6 自動車計測システム部門の事業紹介  
中村 博司

### 寄稿

- 13 燃料噴霧のモデル解析  
千田 二郎, 小橋 好充
- 30 内燃機関のエネルギー効率限界  
Prof. David E. Foster, 西川 雅浩

### 特集論文 自動車開発での試験の効率化

- 37 ECU 自動適合ツール STARS Calibrate のご紹介  
塩見 和広
- 44 京都本社ラボに新規導入した駆動系評価システムの紹介  
池田 浩之, 駒田 峰之
- 50 動的走行抵抗模擬のためのスリップシミュレーション  
Bryce Johnson, 池田 浩之
- 56 バッテリー・エンジンのシミュレーションによる  
電動系車両ドライブレイン試験について  
Norm Newberger, Bryce Johnson, 鶴見 和也

### コラム

- 67 ITS を活用した究極のエコドライブ  
石倉 理有

### 特集論文 燃費計測精度の向上

- 71 CVS 法における燃費計測精度の向上  
熊谷 樹
- 77 4WD シャンダイナモメータでの燃費試験における不安定要因の解析  
小川 恭広
- 85 燃料流量計を用いた直接燃費計測  
松山 貴史, 糸賀 友城
- 91 排ガス流量計とジルコニア空燃比計を用いた燃料消費率の瞬時計測  
秋田 将伸
- 97 サービスに求められるニーズ  
伊藤 直人, 松岡 里絵

### コラム

- 104 HORIBA グループの安全活動  
井深 成仁

### 新製品紹介

- 110 LAQUA シリーズ第 3 弾!! ポータブル水質分析計 LAQUAact シリーズ  
山内 悠, 芝田 学
- 115 蛍光 X 線硫黄分析計 SLFA-60  
大澤 澄人
- 120 油分濃度計 OCMA-500 シリーズ  
西尾 友志, 高坂 亮太
- 125 自動全窒素・全りん測定装置 TPNA-500  
— 試薬組成および計量方式の改良による保守負荷の低減 —  
石井 章夫, 河野 忠司

### トピックス

- 131 光吸収を用いたガス計測機器  
井戸 琢也
- 136 平成 24 年度近畿地方発明表彰 [京都発明協会会長賞] 吸光式分析計
- 138 平成 25 年度近畿地方発明表彰 [京都発明協会会長賞] ガラス電極及びその応答ガラス
- 140 機能的デザインによる研究開発環境の革新をめざして  
米澤 俊介, 熊内 智哉, 島 充子

In this volume of HORIBA Readout features the testing technology of automotive development. Newly installed Driveline Test System in the laboratory of HORIBA Kyoto is introduced in the article of "More Efficient Testing on Automotive Development", and test case studies of Fuel Consumption Measurement by different methods is introduced in the article of "Improving the accuracy of Fuel Consumption Measurement"



I visited Rokko Mountain in early summer. While the rain getting heavier, I found lively water lilies blooming in the early summer breeze and they lifted my spirits high to overcome the hot season.

-Photographer Hideo MATSUI-  
(Member of NIKA Association of Photographers)

#### Name of the book

This book is named "Readout" in the hope that "the products and technology we have created and developed will be read out and so become widely known".

## More Efficient Testing on Automotive Development Improving the Accuracy of Fuel Consumption Measurement

### Review

- 6** Introduction of Automotive Testing Department  
Hiroshi NAKAMURA

### Guest Forum

- 13** Modeling Analysis of Fuel Sprays  
Jiro SENDA, Yoshimitsu KOBASHI
- 30** Pragmatic Efficiency Limits for Internal Combustion Engines  
Prof. David E. Foster, Masahiro NISHIKAWA

### Feature Article More Efficient Testing on Automotive Development

- 37** Introduction of ECU Calibration tool, STARS Calibrate  
Kazuhiro SHIOMI
- 44** Introduction of Driveline Test System newly Installed in the Laboratory at HORIBA Kyoto  
Hiroyuki IKEDA, Mineyuki KOMADA
- 50** Wheel Slip Simulation for Dynamic Road Load Simulation  
Bryce Johnson, Hiroyuki IKEDA
- 56** Testing Electrified Drivetrains for Vehicles without the Battery or Engine  
Norm Newberger, Bryce Johnson, Kazuya TSURUMI

### Feature Article Improving the Accuracy of Fuel Consumption Measurement

- 71** Improving the Accuracy of Fuel Consumption Measurement in CVS system  
Tatsuki KUMAGAI
- 77** Analysis of Instability Factor for Fuel Economy Test on 4WD Chassis Dynamometer  
Yasuhiro OGAWA
- 85** Direct Fuel Consumption Measurement Using Fuel Flowmeter  
Takashi MATSUYAMA, Yuki ITOGA
- 91** Real-time Fuel Consumption Measurement Using Raw Exhaust Flow Meter and Zirconia AFR Sensor  
Masanobu AKITA
- 97** Requirement for Service Activity  
Naoto ITO, Rie MATSUOKA

### Product Introduction

- 110** Debut!! Portable Meters LAQUAact  
Hisashi YAMANOUCHI, Manabu SHIBATA
- 115** Sulfur in Oil Analyzer SLFA-60  
Sumito OHZAWA
- 120** Oil Content Analyzer OCMA-500 series  
Yuji NISHIO, Ryota KOSAKA
- 125** Automatic Total Nitrogen/Phosphorus Monitor TPNA-500  
—Reduction of maintenance time result from improvements of reagent formulas and a gauging method—  
Akio ISHII, Tadashi KAWANO

- 145** HORIBA World-Wide Network



# MEXA-7000へのご支援に感謝



齊藤 壽一

Juichi SAITO

株式会社 堀場製作所  
取締役副社長

齊藤 壽一

2012年に発表した自動車排ガス分析装置MEXA-ONEも今年に入り出荷が急増し、MEXA-7000に取って代わり主力機器となりました。MEXA-7000は1995年に発表して以来、19年を経ましたが、排ガス規制、燃料、エンジン燃焼、触媒など、それぞれの測定対象が大きく変化する中、全世界のユーザの皆様のご要望を取り入れ、発表当初のオリジナルのMEXA-7000から最終的には2011年末に発表したVersion 4まで進化し、長寿記録を更新しています。MEXA-7000の出荷台数は通算5,500台を超え、その殆どが稼働中で、アフリカを含む世界各国で排ガスの低減と燃焼効率、そして試験効率のアップに貢献しています。MEXA-7000の前のモデル、MEXA-9000の通算出荷台数が15年間で1500台であった事を考えると、このMEXA-7000はいかに多くが出荷されているかをご理解して頂けると幸いです。

MEXA-7000の開発構想は1993年の夏にスタートしました。MEXA-7000では、分析計やサンプリングを含めたシステムの小型化、モジュール化をコンセプトとすると同時に、CPU、信号処理やインターフェースの最新技術へのアップデートなど、デジタル通信技術による現場作業の効率化の追求も大きな命題でした。当時はPCの普及と高性能化で、ホストコンピュータだけでなく、排ガス計測システムのデジタル処理化が急激に進んでいた時で、分析システムの開発においても、それまでの自社のマイコンを使った処理から、猛烈なスピードで進化するPCの処理能力の向上に身を任す時期にきていました。市販PCの計測システムでの使



用は当初、信頼性やアップデートの速さにおいて危惧する声も多くありましたが、結局、MEXA-7000では、処理速度の向上はPCワールドに任せ、Windowsより安定したリアルタイムOSであったUNIXベースのLynxOSを採用し、その後、各種周辺機器をより早く活用するためにLinuxOSへと進化させました。

同時に機器のデータを取り込むインターフェースも、RS-232C・422・485、IEEE488(GPIB)が主流の時代でした。この時、一緒に構想を考えていた若手技術者達が、Ethernetという、当時、一般的には耳慣れない言葉を持ち出し、これからの時代はEthernetの時代になると提案してきました。MEXA-9000で、そのインターフェースへの要求の変化は、常に我々の頭痛の種であり、MEXA-7000での使用インターフェースは、重要な仕様選択でありましたが、この若手技術者達の感覚に賭けるか、主流であった当時の「Recommended Standard」RSシリアルで無難に行くか、今思うと、そこに大きな分かれ道があったと言えます。結果として、市販のPCを使用し、その処理能力は年々強力になり、かつ、内部、外部のインターフェースにEthernetを採用したMEXA-7000は、この19年間に10BASE2から10BASE-Tへと進化を遂げた。他は、基本的に同じ仕様のハードウェア、通信インターフェースを維持してきました。MEXA-ONEでも同様に、PCと高速化された100BASE-TXを選択したのは、今となっては当然の流れと言えます。

MEXA-7000が急激にデジタル化が進む環境の中で、このように長い期間、そのポジションをキープ出来たのは、ユーザの皆様の愛情と若手の技術者の思いが相まって出来たことと思います。MEXA-7000はまだまだ現役で、今後も最新のMEXA-ONEとともに世界のエンジン開発を支えるツールであり続けると考えます。このような製品に育て上げて頂いた世界のユーザの皆様、そしてHORIBAグループの関係者に心から感謝いたします。

## 自動車計測システム部門の事業紹介

Introduction of Automotive Testing Department

中村 博司

Hiroshi NAKAMURA

HORIBAグループの自動車計測事業の歴史は、自動車産業界と非常に強く結びついており、自動車技術の革新とともに発展してきた。HORIBAグループでは、自動車排ガス規制の開始をきっかけに、1964年に初代の排ガス計測システムを開発して以降、排ガス規制の強化と排ガス低減技術の進化と共に、排ガス計測手法、計測技術の開発を継続してきた。2000年代に入り、ハイブリッド電気自動車に代表される車両の電子化技術の発展に伴い、事業範囲を排ガス試験設備からトランスミッション、E-motorを含むパワートレイン試験設備、ブレーキ試験設備、風洞試験設備にまで広げ、運行管理システムの実用分野を含めた幅広いアプリケーションにおいてソリューションを提供している。

### はじめに

1963年、米国において、産業排出源をターゲットにした大気浄化法(Clean Air Act)が施行された。さらに1970年、これを改正した通称マスキー法によって、自動車排ガスに含まれる炭化水素(HC)、一酸化炭素(CO)、窒素酸化物(NO<sub>x</sub>)の規制が本格的に開始された。以来、排ガスの規制は年々強化されてきている。このような規制強化に対応するため、自動車産業界では、内燃機関の燃焼改善、排ガス後処理、車両のコンピュータ制御などに関わる技術開発が継続的に行われている。HORIBAグループの自動車計測システム事業がスタートしたのは、規制導入をきっかけに排ガス測定装置の販売を開始した、1964年のことである。そして、その計測技術は、自動車産業の技術革新と共に進化してきた。特に、車両へのコンピュータ制御の導入に伴う試験設備と試験手順の複雑化に対応し、排ガス試験設備全体を制御するテストオートメーションの提供も始めたことは、その後の事業展開に大きな影響を与えている。2000年代に入り、ハイブリッド電気自動車(Hybrid Electric Vehicle : HEV)に代表される車両の電子化技術が大きく発展した。HORIBAグループでは、それを機に、排ガス試験設備中心だった従来の事業範囲を、それ以外の自動車試験設備も含むものへと拡大した。現在では、トランスミッションや電気モータ(E-motor)を含む駆動系試験、ブレーキ試験、風洞試験など、自動車開発分野の幅広いアプリケーションにおいてソリューションを提供している。さらに、最近では、高度道路交通システム(Intelligent Transportation Systems : ITS)にも事業分野を広げ、デジタルタコグラフ、ドライブレコーダといった走行車両の運行データ採取装置、あるいは、その運行データをクラウド上で運用する総合運行管理支援システムを提供している。本稿では、自

自動車産業とのつながりの強いHORIBAグループ自動車計測システム事業の歴史を振り返ると共に、主要なアプリケーションについて紹介する。

## 自動車排ガス計測事業

自動車排ガス計測のモチベーションとなっているのは、やはり、各国・各地域の規制である。新開発のエンジンや車両が排ガス規制に適合しているかどうかの認証試験はもちろんのこと、研究開発の段階でも、規制動向をにらんだ排ガス低減技術の評価が欠かせない。ここでは、規制用途、あるいは研究開発用途での排ガス・粒子状物質計測装置の代表例を紹介する。

### 排ガス計測装置

すでに紹介したとおり、HORIBAグループが1964年に排ガス測定装置 (Figure 1)を国内で初めて発売したのは米国において大気浄化法が施行されたことがきっかけである。その後も、排ガス規制を意識した分析計開発を継続した。1970年代、国内で中古車排ガス規制が施行された際、現在も排ガス濃度測定の基本原理である非分散赤外吸収(NDIR)方式CO計、水素炎イオン化法(FID)による全炭化水素(THC)計、化学発光法(CLD)によるNO<sub>x</sub>計を採用した装置を開発した。1975年には、これらの原理に基づく装置を米国環境保護庁(EPA)へ納入している。同じ頃、HORIBAグループは、排ガス計測に関わるもう一つの重要な技術、臨界流量ベンチュリ(CFV)の特許を米国ミルコ・フォードより取得した。これにより、排ガス全量を希釈サンプリングする定容量希釈採取装置(CVS)が、HORIBAグループのラインナップに加わった。上述の排ガス分析原理とCVS法の組み合わせは、排ガス認証試験における公定法として現在まで受け継がれている。

排ガス規制の導入後、半世紀の間に、規制値は年々厳しくなってきた。たとえば、2012年の規制値は、1970年比で、COで約100分の1、NO<sub>x</sub>は約200分の1、THCに至っては1000分の1まで下がっている上、今なお継続的に強化されている。このような排ガス規制の強化は、さまざまな排ガス低減技術の開発と実用化を後押しした。たとえば、後処理システムであれば、リーンバーンエンジンとNO<sub>x</sub>吸蔵還元触媒(LNT)・三元触媒(TWC)の組み合わせ、あるいはディーゼルエンジンと尿素注入式選択還元触媒(Urea-SCR)・ディーゼル用酸化触媒(DOC)・ディーゼルパティキュレートフィルタ(DPF)との組み合わせなどが代表例である。これらの後処理技術の開発評価においては、規制対象成分の計測だけでなく、触媒反応によって生成する中間生成物や触媒反応を阻害する成分の計測も必要となる。Figure 2に、触

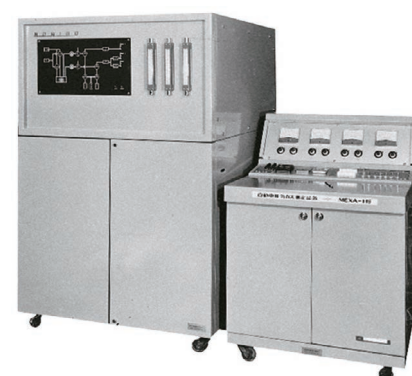


Figure 1 国内初の排ガス測定装置(MEXA-1型)



Figure 2 排ガス計測装置のラインナップ(例) 引用: World Car Fans.com



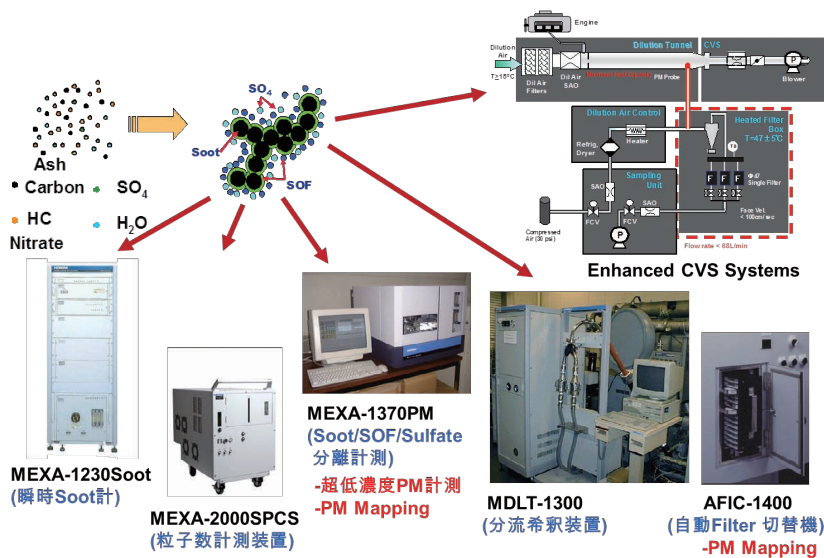


Figure 3 粒子状物質の計測装置の例 参考：J. H. Johnson et. al, SAE940233

媒評価に応用される計測装置の例を示す。従来法分析計を搭載した排ガス測定装置の最新モデルMEXA-ONEに加え、触媒の硫黄被毒を評価するための紫外蛍光法S化合物分析計、窒素化合物の同時測定ができるフーリエ変換赤外分光(FTR)分析計、量子カスケードレーザ(QCL)分析計など、さまざまな装置がラインナップされている。

### 粒子状物質計測装置

自動車排ガス規制では、ガス成分だけでなく、粒子状物質にも、「PM (Particulate Matter)」として基準値が設定されてきた。

Figure 3に、PM計測の公定法をはじめとする粒子状物質の計測装置の例を示す。

PMの測定には、フィルタに同様に希釈した排ガスを通過させ、捕集されたものを秤量する「フィルタ重量法」が用いられる。PMの規制も強化されてきており、現状の規制値レベルにおいては、約100 mgのフィルタ上に採取されるわずかに10~20 μgのPM質量を計測する必要がある。これは、フィルタ質量計測時の雰囲気湿度やフィルタ自身にかかる浮力までが、結果に影響を及ぼすレベルである。さらに、捕集されるPMの量自体も希釈の比率や希釈排ガスの温度によって左右されるため、フィルタ重量法では、より厳密な設備管理が要求されるようになっている。欧州においては、フィルタ重量法での規制に加えて、粒子状物質の数規制が開始された。粒子数規制では、凝縮粒子カウンタ(CPC)を検出部とする固体粒子数計測装置が使用される。さらに、エンジン適合や後処理システム開発の分野では、瞬時のすす(soot)排出量の測定装置や、燃焼法によるPMの組成解析装置など、開発試験の効率化を目的に、規制における公定法以外の装置も応用されている。

### 車載型排ガス計測装置

2007年、米国において、ディーゼル重量車の使用過程車の排ガス計測に車載型排ガス計測装置を用いた試験法が導入された。欧州においても、2013年に、車載計測に基づく同様の規制が開始された。さらに現在、小型乗用車の認証試験についても車載計測の採用が検討されている。Figure 4にHORIBAグループの車載型排ガス測定装置(OBS-2000)を示す。車両に搭載するためには、小型で、かつ、バッテリーで駆動できる省電力の装置が必要である。そのため、従来のラボ試験設備とは異なり、ピトー管式流量計を用いた排ガス流量計と排ガス濃度分析計によって排出量を計測するシステム構成をとっている。



Figure 4 車載型排ガス計測装置(OBS-2000)

## テストオートメーション事業

自動車やエンジンの排ガス計測は、車載計測などの例外を除き、専用の試験室で行われる。試験室には、排ガス測定装置やサンプリング装置だけでなく、エンジンや車両を走行させるための各種の設備が備え付けられる。ここでは、このような設備全体を一つのシステムとして制御し、排ガス試験を実行するための、テストオートメーションについて紹介する。

### 車両排ガス試験の自動化

HORIBAグループは、1977年に米国インターオートメーション社の一部を買収し、ソフト開発力を強化した。これにより、それまで排ガス測定装置とその周辺機器というハードウェアのみの提供であったものを、排ガス計測システム全体と試験プロセスを自動制御できるテストオートメーション開発へと範囲を拡大した。これは、設備要求の複雑化を背景に、排ガス計測のトータルソリューションを提供できる体制を目指したものである。Figure 5に、完成車両の排ガス試験設備の一例を示す。テストオートメーションにあたるのは、車両排ガス試験アプリケーションVETS(Vehicle Emission Test System)である。VETSからは、排ガス計測装置(MEXA/ CVS)、シャシダイナモメータ(VULCAN)、自動運転ロボット(ADS)等の設備の自動制御が可能である。さらに、車両・試験項目の設定、設備の校正、試験準備など法規で定められた排ガス試験のプロセスを自動化すると共に、試験結果の帳票出力機能、データ解析ツールなどを備えており、試験工数の大幅削減に貢献している。

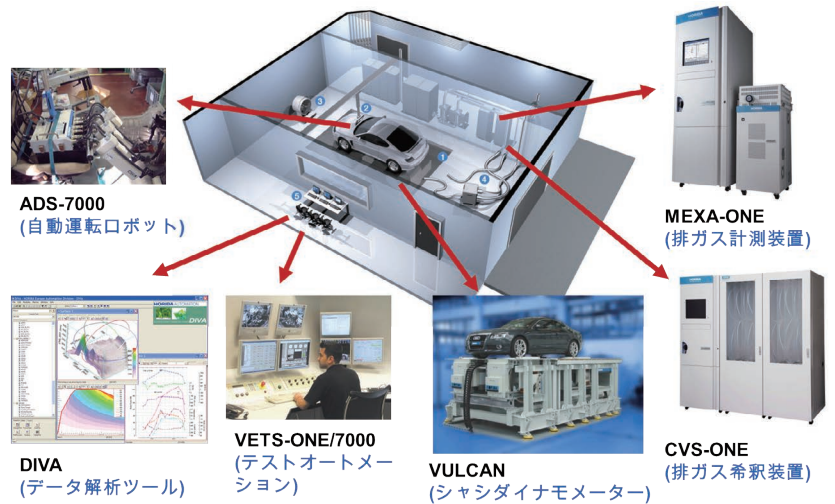


Figure 5 車両の排ガス試験設備の例

### エンジン排ガス試験の自動化

2001年、HORIBAグループは、英国リカド社、独国シエンク・ペガサス社とテストオートメーションに特化した合弁会社を設立しグローバルにおけるソフトウェア開発機能を強化した。これは、2000年以降、自動車業界の世界的な再編成に伴って、開発プロセスやデータのグローバルな共有化が求められるようになったのを受けたものである。HORIBAグループのテストオートメーションのグローバルプラットフォームであるSTARSの構成をFigure 6に示す。STARSプラットフォームは、広範囲な試験用途をサポートし、かつ試験エンジニアに

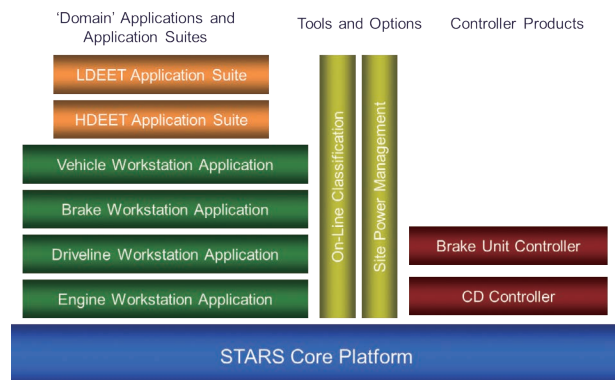


Figure 6 STARSプラットフォーム構成

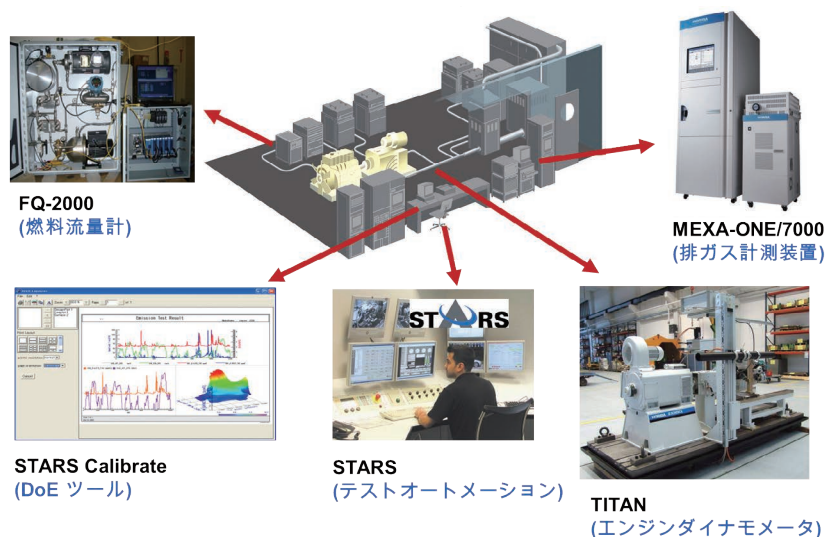


Figure 7 エンジン排ガス試験設備(例)

よるフレキシブルな試験構成の変更が可能である。さらに、アーキテクチャをサービス別に構成する“クラスタ(分散型テストセル)”構成をとることで、単独のテストベンチから複合設備のテストセルに至るまで、さまざまな規模の設備に対応することができる。STARSは、エンジン、駆動系、ブレーキ、車両試験などの各種試験に対応したワークステーションを持っており、個々の試験設備に応じて、ユーザインターフェースや機能を追加することができる。一方で、基本となるサービスやデータ構造は共通化されており、試験結果データや構成データを複数の試験設備で共有することが可能で

ある。また、複雑な手順が必要である試験に対しては、あらかじめパッケージ化されたアプリケーションスイートを提供している。たとえば、重量ディーゼルエンジン排ガス試験用のアプリケーションスイートHDEETでは、実行、解析、報告機能が統合されていて、使える試験セット一式が用意されている。さらに高度なカスタマイズも可能な構成となっている。Figure 7に、エンジン排ガス試験設備のパッケージの例を示す。エンジン適合試験のアプリケーションにおいては、試験パラメータの増加により膨大となりがちな実験工数を最適化する機能が求められる。STARSでは、実験計画法(Design of Experiment : DOE)ツールであるSTARS Calibrateを組み合わせることにより、適合プロセスの最適化に対応している。

## メカトロニクス事業

2000年代に入ると、車両の電動化技術が急速に発展・普及し始めた。このような流れも背景に、HORIBAグループは、2005年10月、カールシュンク社の自動車計測機器事業を買収した。これにより、事業範囲は、従来の排ガス試験設備から、駆動系試験設備、ブレーキ試験設備、風洞試験設備にまで拡大した(Figure 8)。自動車の研究開発試験全般に対して広くソリューショ

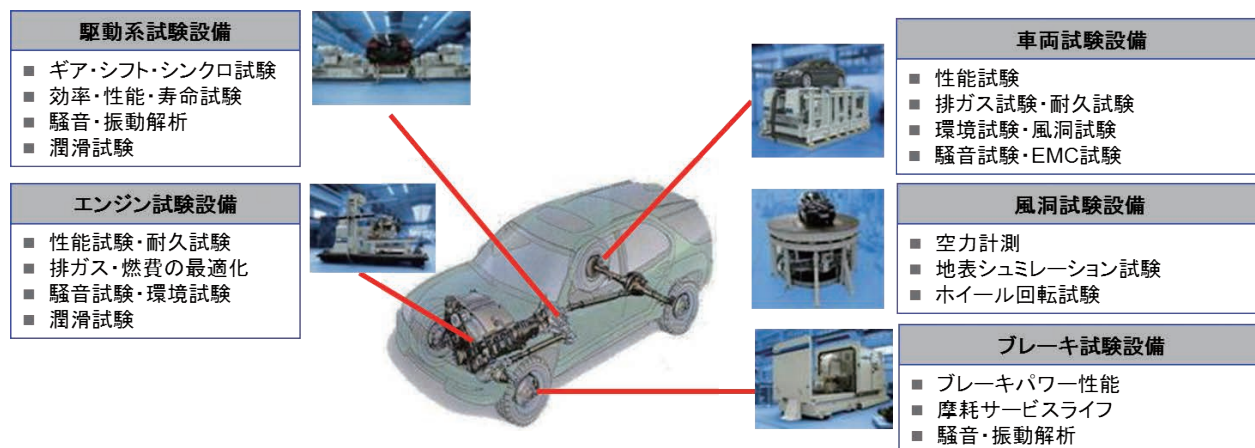


Figure 8 HORIBAグループの自動車試験設備



ンを提供できる環境が整ったといえる。以下、それら試験設備の概略を紹介する。

## 駆動系試験設備

駆動系試験設備は、トランスミッション、クラッチ、トルクコンバータ、車軸、あるいはHEVで必要になるE-Motorなど、種々の駆動系コンポーネントを対象とした試験設備である。完成車両が実際に走行する際にかかる負荷を試験設備上で模擬するため、入力シャフトではエンジンからの動力、出力シャフトでは車体の負荷を再現する。ここで、模擬するエンジンモデルの設定を変更すれば、ハードウェアの接続を変更することなく、複数のエンジンモデルに対する評価を行うことができる。さらに、入力に超低慣性ダイナモを用いることによって、燃焼エンジントルクの周期変動を再現させるEngine Torque Pulse Simulation (ETPS)と組み合わせることも可能である。これらの機能を利用することで、実エンジン、実車両が完成していない段階でもコンポーネントの試験を前倒しで実施することができ、車両開発期間の短縮にも貢献する設備となっている。

## ブレーキ試験設備

ブレーキ試験設備は、車両の重要な安全機構のひとつであるブレーキの品質保証や技術改良のための評価試験、たとえば、ブレーキ摩擦材の摩擦係数や摩耗耐久試験、またブレーキ単体の性能試験などに使用される。また、実際に使用するロータディスク、ブレーキパッド、キャリパなどからなるブレーキモジュールだけでなく、サスペンションやアクスルアセンブリを含めたパッケージでのNVH(ノイズ、振動、ハーシュネス)試験も実施される。

## 風洞試験設備

風洞試験設備(Figure 9)は、車両空力の最適化のために用いられる。風洞試験では、風洞天秤の測定プラットフォーム上に車両を設置し、空気の流れによって生じる3方向の力と3方向のモーメントを正確に測定する。さらに、車両下側と車輪周辺の空気の流れをより現実近づけるため、風速に同期して車輪を回転させるホイールスピナベルトを天秤上に設置する場合もある。

## ITS事業

HORIBAグループのITS事業は、1983年にトラックの運行管理を目的に、デジタルタコグラフの提供を開始したのが最初である。その後、2005年には、ドライブレコーダを開発し、販売を開始した。ドライブレコーダは、事故やニアミス時の映像や走行データを記録して安全運転を管理する車載装置で、既に10万台を超える販売実績がある。さらに、車載装置の運行データをネットワーク上のサーバに集積し、解析とサービスを提供する「総合運行管理支援シス



Figure 9 風洞天秤(例)



Figure 10 総合運行管理システム(HORIBA FLEET LINKAGE)

テムHORIBA FLEET LINKAGE (Figure 10)のサービスも提供を開始している。インターネットベースのクラウドコンピューティングによって膨大なデータを集積することで、情報閲覧やデータ解析結果の帳票作成などをインターネット上で簡単に行うことができる。もちろん、ユーザによるデータの管理は不要である。多くの車両を保有する

運送業界などで、安全運転やエコドライブによる燃費改善、また車両位置情報や業務情報を連携させた業務の最適化に役立つ技術となっている。

## おわりに

HORIBAグループは現在、世界26か国、43拠点にグローバル展開している。各主要拠点が排ガス計測技術、制御技術、シミュレーション技術などのコア技術の開発、生産を行っているのに加え、それぞれの拠点がエンジニアリング機能を持ち、各地域の要求に柔軟に対応できる体制をとっている。(Figure 11)また、設備のユーザごとに異なる開発プロセスに合わせて試験設備を最適化していくために、グローバルに試験設備を保有し、ユーザと共に試験を実施できる環境を整えてきている。HORIBAグループの歴史を振り返っても、常に自動車技術の進化に合わせて顧客と共に試験設備を発展させてきた。今後も、“お客様にソ

リューションを提供する”ため、新たな技術を取込み(OPEN)かつ様々な要求に対して柔軟に対応できる(CUSTOM), OPEN & CUSTOM Test Systemを構築し、自動車産業の発展の一翼を担えるように貢献していきたい。

### 自動車計測事業の主要開発・生産拠点



### テストラボラトリー



Figure 11 HORIBAグループ自動車計測事業の主要開発・生産拠点



### 中村 博司

Hiroshi NAKAMURA

株式会社 堀場製作所

経営戦略本部

自動車計測事業戦略室 室長

## 燃料噴霧のモデル解析

Modeling Analysis of Fuel Sprays



千田 二郎

Jiro SENDA

同志社大学 理工学部 教授  
工学博士



小橋 好充

Yoshimitsu KOBASHI

金沢工業大学 工学部 講師  
博士 (工学)

モデルベース開発など計算機を多用する昨今のエンジン開発においては、噴霧燃焼の各種の現象を的確かつ簡便に記述する数値モデルが求められている。著者らはこれまで、ノズル内キャビテーション気泡群の影響から、液滴の微粒化形態、液滴蒸発過程における燃料の多成分性の影響、噴霧一壁面干渉、スス生成過程など、噴霧燃焼に関わる広範囲かつ重要な現象に着目し、それらの数値モデル化に取り組んできた。そこで、本稿では著者らが着目した現象とそのモデル化に際しての考え方を解説する。また、最近取り組んでいるModel Based Calibrationのモデル開発についても紹介する。

Current engine development processes in which computations play an important role have sought for numerical models which can accurately represent phenomena in spray combustion. The authors have developed original sub-models taking into account the effects of extensive spray combustion phenomena including nozzle cavitation, droplet breakup behavior, multi-component evaporation process, spray-wall interaction, soot formation and so on. This paper describes authors' models while accompanied by phenomenological descriptions and focusing on how to model the phenomena. In addition, the authors' current work on model development for a model based calibration method is also introduced.

### はじめに

近年のエンジン開発における電子制御技術の発展には目覚ましいものがあり、各種電子デバイスが持つ多数の制御変数を最適に組み合わせながらクリーンで高効率な燃焼を実現している。しかし、一層厳格化する燃費規制と排出ガス規制への適合のため、制御変数は増加の一途にある。中でも、噴射圧力と噴射回数・時期など自由度の高

いコモンレール式燃料噴射装置に加え、EGR (Exhaust Gas Recirculation) や過給器を備えたディーゼル機関においては多大な開発工数が必要であり、エンジンメーカー各社の限られた時間とリソースの中で、制御変数の最適解すべてを実験的に求めることは困難になりつつある。

一方、最近ではモデルベース開発を利用したエンジン開発が盛んであり、ますます複雑化、大規模化するエンジン



Table 1 History of the authors' models

1981	Wall-impingement analysis based on SMAC method
1983	Analysis of cavitation bubbles behavior under oscillation pressure
1990	Diesel fuel injection system analysis with taking into account cavitation effects
1993-	Spray-wall interaction model
1993	Modeling of sprays accompanied by flash boiling (0-dimensional)
1993-	Vapor-liquid equilibrium model for multi-component fuels (0-dimensional)
1996	Modified TAB droplet breakup model
2000-	Multi-component fuel evaporation model (multi-dimensional)
2001	Spray-wall interaction model available for multi-component fuel
2002	Integrated version of spray-wall interaction model
2002-	Kinetic modeling of soot formation with detailed chemistry
2003-	KIVA simulation coupled with CHEMKIN and soot model
2004-	Modeling of sprays accompanied by flash boiling (multi-dimensional)
2005-	Large eddy simulation of diesel sprays
2006-	Cavitation-induced droplet breakup model
2006-	Phenomenological 1-D multi-component spray model

開発の効率化を目指して、各社様々な取り組みを展開している<sup>[1-3]</sup>。しかし、非定常噴霧燃焼を動力の根幹とするエンジン(例えば、自動車用ディーゼルエンジン)燃焼室内においては、500 m/sを超える液体あるいは気液混相流が孔径0.1 mm程度のノズルを通過し、やがて噴出された後、高々数msの間に微粒化、空気との混合、蒸発、壁境界との干渉を経ながら着火・燃焼する。このような小

スケールで高速かつ物理的にも化学的にも複雑な現象の数値モデル化はまだ発展途上であり、現象を的確にとらえたモデルの構築と計算精度の向上が望まれている。このような状況にあつて、著者らはこれまで噴霧燃焼における諸過程の比較的詳細な数値モデル化に取り組んできた。Table 1にモデルの一覧を示す。その内容はノズル内に生じるキャビテーション気泡群の影響から、液滴の微粒化形態、液滴蒸発過程における燃料の多成分性、噴霧-壁面の干渉、詳細化学反応に基づくスス生成など多岐にわたる。そこで、本稿では各モデルの現象論的背景を述べながら、その要点を解説する。また、最後には、著者らが最近取り組んでいるModel Based Calibration (MBC)のモデル開発について述べる。

### 燃料噴霧の微粒化に関するモデリング

エンジンスプレーにおける液滴の微粒化は、ノズル内部に生じる乱流やキャビテーションに影響を受けるほか、一般に計算格子より小さなスケールの現象であるため、そのモデル化にはノズル内流れとのリンクや微粒化機構の適切な記述が求められる。そこで、本章ではこれらを考慮して構築したいくつかの液滴分裂モデルについて述べる。

#### ノズル内キャビテーションを考慮した液滴分裂モデル

燃料噴射ノズルのオリフィス部に高速で流れ込む燃料液体はその縮流に際して低圧場を形成し、キャビテーション気泡を発生する。この気泡群が噴霧の微粒化に影響を及ぼすことは知られている<sup>[4]</sup>が、多数の気泡群を含むうえ、微細かつ超高速なこの現象の全容解明は容易でない。そこで、著者らは、生成されたキャビテーション気泡がノズル下流の高圧にさらされるときの現象として、時に音速を超えるほど速い収縮速度と圧壊する際に発する金属材料の壊食を引き起こすほどの衝撃波<sup>[5]</sup>に着目し、これらの過程で生じるエネルギーを噴霧液滴の分裂とリンクするモデル<sup>[6]</sup>を構築した。Figure 1にその概要を示す。キャビテーション気泡の成長・収縮履歴はRayleigh-Plesset式で解き、気泡が急速に収縮する際に誘起された周囲流体の運動エネルギー $E_{shrink}$ は次式から、

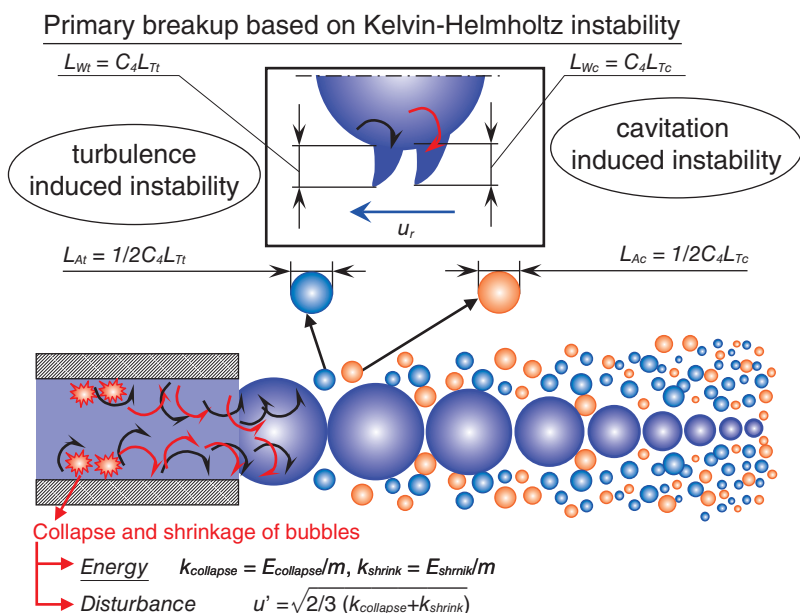


Figure 1 Conceptual diagram of cavitation-induced breakup model

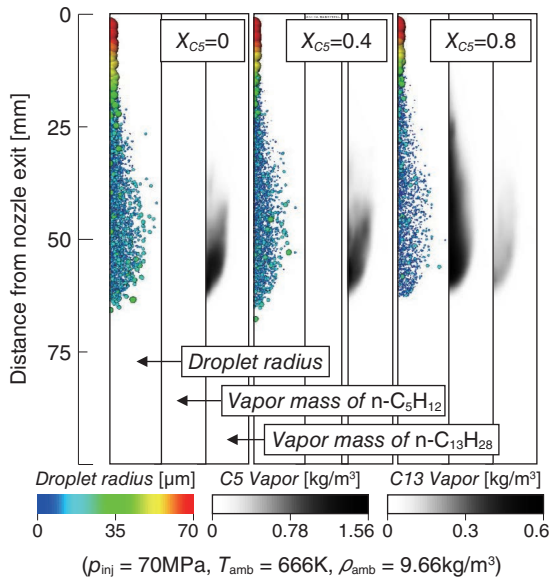


Figure 2 Spray images of binary fuel blends consisting of n-C5H12 and n-C13H28, predicted by cavitation-induced breakup model

$$E_{shrink} = 1/2 \rho_l \sum_{R_0} N(R_0) \int_{r=R_{i+1}}^{r=R_i} \dot{R}^2 \cdot 4\pi r^2 dr \dots (1)$$

( $\rho_l$ : 液体密度,  $R$ : 気泡半径,  $N$ : 初期半径 $R_0$ の気泡数)

また, 気泡圧壊時の最大衝撃波圧力<sup>[5]</sup>  $p_{max}$ は,

$$p_{max} = p_{gRmax} (R_{max} / R_{brk})^{3n} - 2\sigma / R_{brk} \dots (2)$$

( $p_{gRmax}$ ,  $R_{max}$ : 気泡が最大径に達したときの気泡内圧力と気泡半径,  $R_{brk}$ : 圧壊時の気泡半径,  $\sigma$ : 表面張力)

であり, そのエネルギー $E_{collapse}$ は次式で表される。

$$E_{collapse} = 4\pi/3 \sum_{R_0} N(R_0) \cdot p_{max}(R_0) \cdot R_{brk}^3 \dots (3)$$

これらをタイムステップあたりの噴射量 $m$ で除して, それ

ぞれ動的エネルギー $k_{shrink}$ と $k_{collapse}$ に変換すると, 等方性乱流の仮定からノズル出口の乱れ変動成分 $u'$ が定まる。

$$u' = \sqrt{2/3(k_{collapse} + k_{shrink})} \dots (4)$$

ノズル出口の乱流変動 $u'$ は, Huh and Gosmanのモデル<sup>[7]</sup>と同様, 噴流表面のKelvin-Helmholtzの不安定性を助長すると仮定する。この噴流の表面波の大きさから派生した微粒化の長さスケールを $L_A$ とし, 乱流変動 $u'$ に起因する乱流の時間スケールと表面波の時間スケールの和を微粒化の時間スケール $\tau$ とすると, 液滴半径 $r_d$ の変化速度は次式で表される。

$$dr_d/dt = -CL_A/\tau \quad C: \text{定数} \dots (5)$$

計算結果の一例として, n-トリデカン(n-C13H28)にn-ペンタン(n-C5H12)を混合し, その割合 $X_{C5}$ を変えたディーゼル噴霧をFigure 2に示す。飽和蒸気圧の高いn-C5H12の混合量を増すほど噴孔内部のキャビテーション気泡が大きくなり, Equation 1, Equation 3式のエネルギーが増大することで, 噴孔近傍から迅速に微粒化し, 拡大することがわかる。

### TABモデルの改良とハイブリッド液滴分裂モデル

上記のモデル以外にも, これまでに多くの液滴分裂モデルが提案されている。エンジン燃焼の数値計算に用いられるKIVAコードではそのバージョンII以降の液滴分裂モデルにO'RourkeらのTAB(Taylor Analogy Breakup)モデル<sup>[8]</sup>を用いる。TABモデルは液滴を楕円振動体とし, その変形にバネ-質点系のモデルを適用するものであり, 分裂後の液滴半径は次式に示すザウター平均粒径 $r_{32}$ の $\chi^2$ 分布で与える。

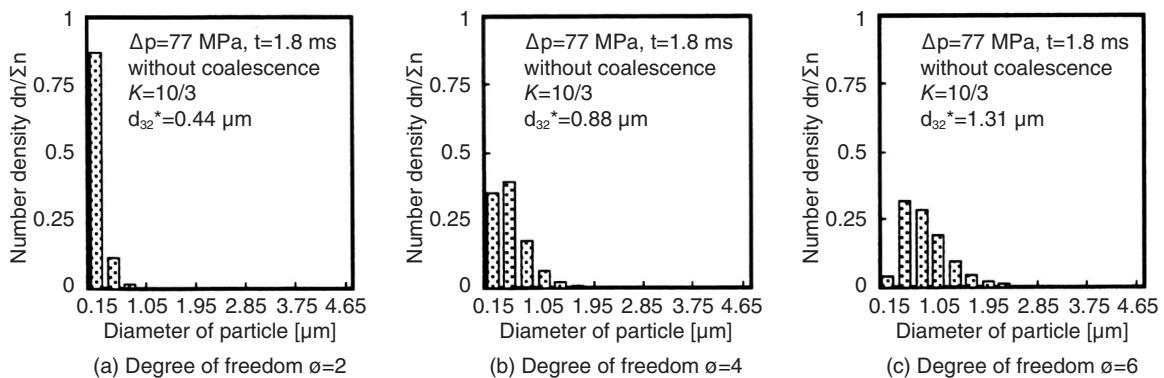


Figure 3 Comparison of particle size distribution between the degrees of freedom

$$r_{32} = r \left/ \left( 1 + \frac{8K}{20} + \frac{6K-5}{120} \frac{\rho_l r^3}{\sigma} \dot{\gamma}^2 \right) \right. \dots\dots\dots (6)$$

ただし、原著ではモデル定数 $K=10/3$ ,  $\chi^2$ 分布の自由度 $\phi=2$ である。ここで、**Figure 3**に自由度 $\phi$ に対する粒径費分布を示す。自由度 $\phi=2$ の $\chi^2$ 分布では粒径分布が小粒径側に偏りすぎる。これに対し著者らは自由度 $\phi=6$ , モデル定数 $K=0.89$ の修正TABモデルがディーゼル噴霧の粒径分布を良好に再現することを提案した<sup>[9]</sup>。

一方、TABモデルの分裂形態は低Weber数( $We = \rho_g r_d v_{rel}^2 / \sigma$ ,  $\rho_g$ : 気体密度,  $r_d$ : 液滴半径,  $v_{rel}$ : 相対速度,  $\sigma$ : 表面張力)における分裂の特徴<sup>[10]</sup>と類似する。一般にこのような分裂形態は圧力噴射弁の噴孔から離れた位置で観察されるが、噴孔近傍の高Weber数領域では表面波の不安定性などが支配的に微粒化に寄与すると考えられる。すなわち、様々な微粒化機構を包含する燃料噴霧においては、その数値解析に複数の液滴分裂モデルを組み合わせる必要がある。このような観点から著者らは、Kelvin-Helmholtz不安定性(一次分裂)とRayleigh-Taylor不安定性(二次分裂)を組み合わせたKH-RTモデル<sup>[11]</sup>, 上の修正TAB(MTAB)モデル, Kelvin-Helmholtz不安定性(WAVEモデル<sup>[12]</sup>, 一次分裂)とMTAB(二次分裂)を組み合わせたモデルを用い、ディーゼル噴霧のLarge Eddy Simulation(LES)において液滴分裂モデルの妥当性を検証したことがある<sup>[13]</sup>。ここで、

LESの概念を**Figure 4**に示す。LESは、平均化された支配方程式を解くRANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes)とは異なり、乱流の高周波成分のみをモデル化し、非等方的で流れ場への依存度が高い低周波数成分を直接的に解く方法である。すべての渦成分をモデル化して解くRANSと比較して乱流挙動を高精度に解くことが期待される解法である。

その数値計算と実験結果の噴霧画像を**Figure 5**において比較する。LESによる計算はRANSでは表現し得ない比

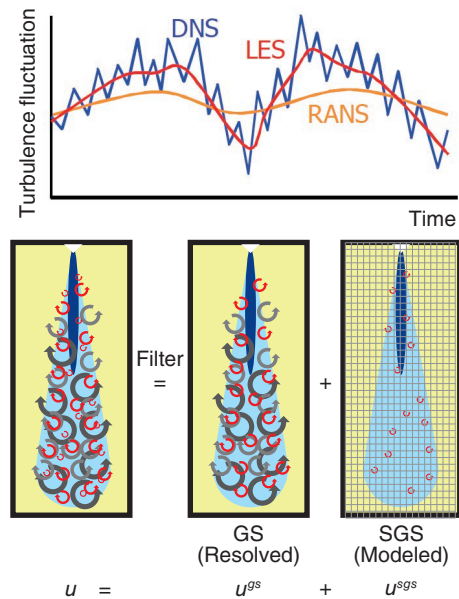
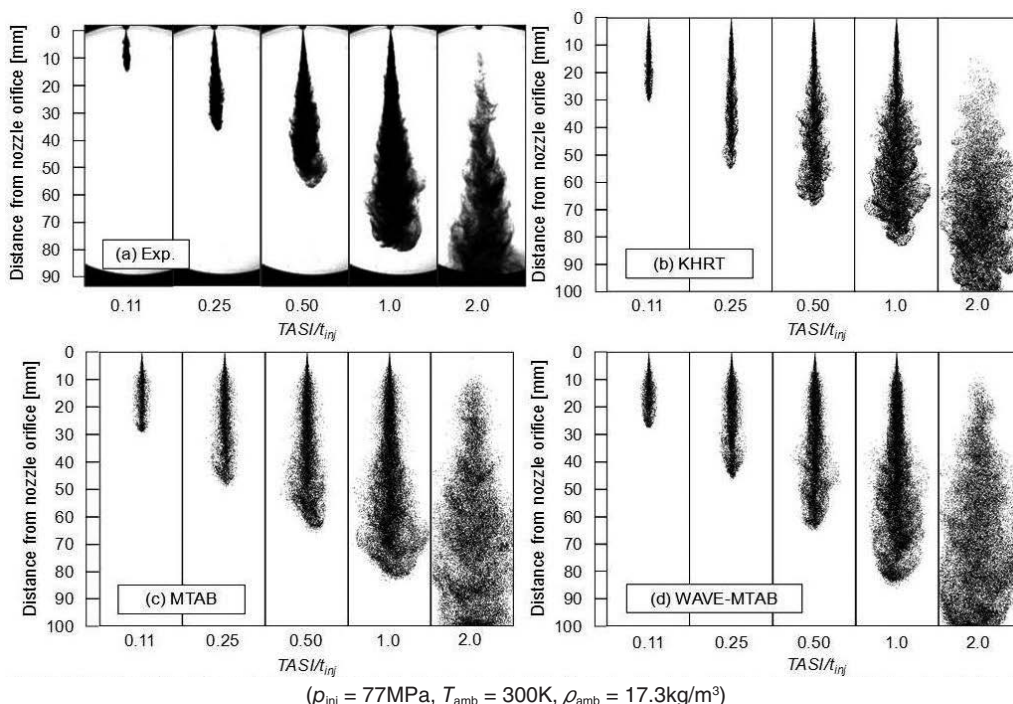


Figure 4 Schematic images of LES of diesel spray



( $\rho_{inj} = 77\text{MPa}$ ,  $T_{amb} = 300\text{K}$ ,  $\rho_{amb} = 17.3\text{kg/m}^3$ )

Figure 5 Change in spray structure calculated by large eddy simulation with breakup models



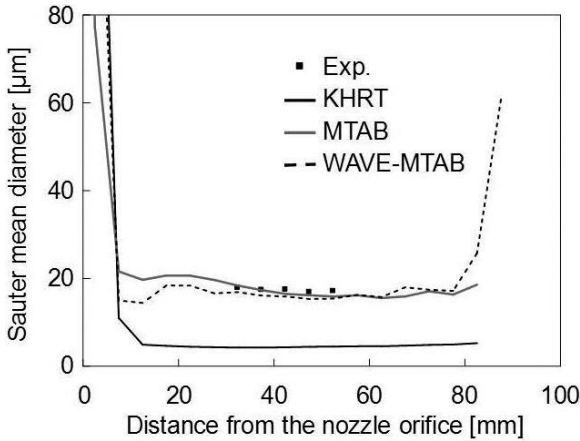


Figure 6 Effect of droplet breakup model on Sauter mean diameter distribution using LES

較的大きな渦構造を計算する<sup>[14]</sup>から、実験に見られるような枝状構造を持つ噴霧が計算される。ここで、Figure 6 にザウター平均粒径の分布を示す。KH-RTは分裂後の液滴径を過小評価するため、結果的に、分裂後の液滴が周囲気体の渦運動に過剰に追従する。一方、MTABモデルとWAVE-MTABモデルのザウター平均粒径は実験値と概ね一致している。特にWAVE-MTABモデルはMTABモデルよりも実験で得られた噴霧の拡がりを中実に再現することがわかった。

減圧沸騰噴霧のモデリング

先に述べたノズル内キャビテーションは生成された気泡が下流の圧力によって圧壊する現象であるのに対し、燃料液体の飽和蒸気圧が高く、エンジンの吸気管のように圧力が低い場に燃料が噴射される場合、急速な蒸気化を伴わないながら気泡が成長を続ける減圧沸騰を生じる。Figure 7は、n-C<sub>5</sub>H<sub>12</sub>を異なる雰囲気圧力 $p_b$ へ噴射したと

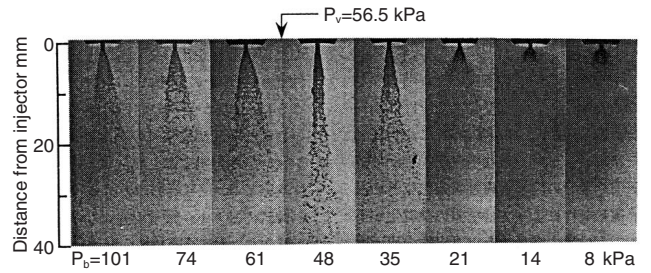


Figure 7 Change in shape of n-pentane spray as a function of ambient pressure

きの噴霧画像である。n-C<sub>5</sub>H<sub>12</sub>の飽和蒸気圧は56.5 kPaである。 $p_b$ をそれ以下にすると一旦噴霧は幅を狭くするものの、その後急激に拡がり、微細な液滴を形成する減圧沸騰を生じる。著者らはこのような減圧沸騰の特性を記述するモデル作成に取り組んできた。Figure 8は、ピントル型ノズルから噴出される液膜を対象に構築した減圧沸騰噴霧モデル<sup>[15]</sup>の概要である。ノズルのオリフィス部で生じる半径 $R$ の気泡核数 $N$ は次の核生成理論で与える。

$$N = C \cdot \exp\left(\frac{-\Delta A}{k\Delta\theta}\right), \Delta A = \frac{4}{3} \pi R^2 \cdot \sigma \dots (7)$$

( $C$ : 定数,  $k$ : ボルツマン定数,  $\Delta\theta$ : 液体の過熱度) 先のキャビテーションモデルと同様、発泡した気泡は図中に示すRayleigh-Plesset式(ただし、表面粘性の項を追加している)にしたがい成長すると仮定して、その半径の時系列的変化を求める。液膜の分裂は、気泡の相体積 $V_{bubble}$ と液体体積 $V_{liquid}$ の比で定義されるボイド率

$$\varepsilon = V_{bubble} / (V_{bubble} + V_{liquid}) \dots (8)$$

をクライテリアとして、これがある臨界ボイド率 $\varepsilon_{crit}$ を超

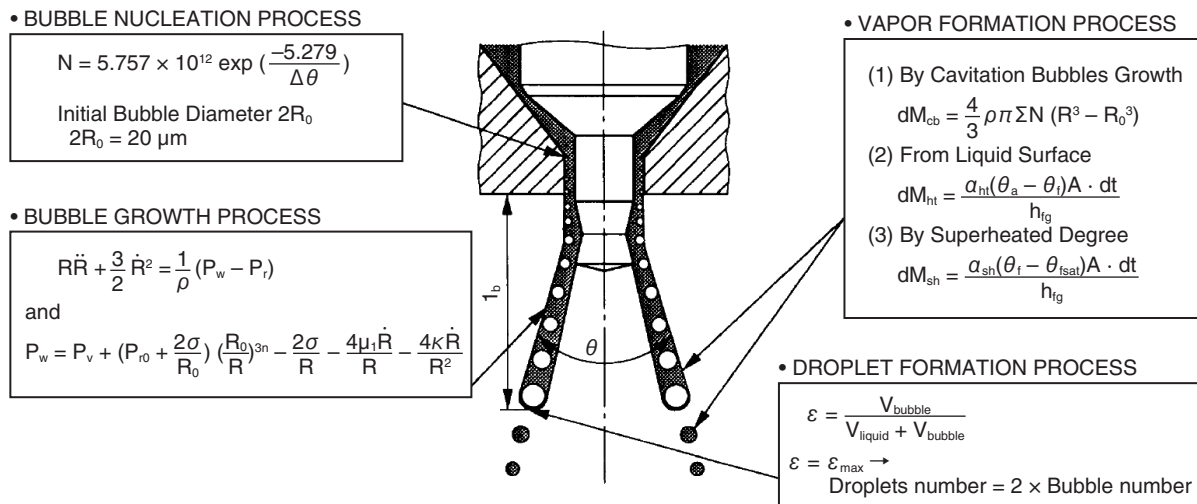


Figure 8 Conceptual diagram of flashing spray model, applied to pintle-type nozzle

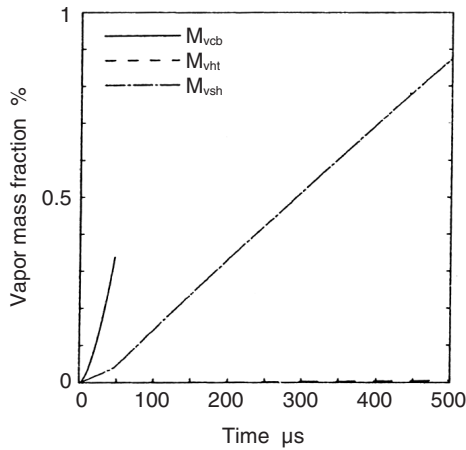


Figure 9 Comparison of n-pentane vapor mass fractions due to bubble growth,  $M_{vcb}$ , heat transfer,  $M_{vht}$ , and degree of superheat,  $M_{vsh}$ , at ambient pressure of 14 kPa

えた時点で、分裂後の液滴数 $n_d$ を気泡数 $n_{bub}$ とリンクした次式によりモデル化する。

$$n_d = 2 \times n_{bub} \dots\dots\dots (9)$$

ところで、減圧沸騰は飽和蒸気圧以下の減圧下にさらされた過熱液体の瞬間的な相変化現象であり、その形態は伝熱による加熱沸騰とは異なる。減圧沸騰時の相変化はキャビテーション気泡の成長に伴う蒸発 $M_{vcb}$ 、液滴表面からの熱伝達に起因する蒸発 $M_{vht}$ 、過熱度に起因する蒸発 $M_{vsh}$ に分類され、各々の速度式はFigure 8に示される。

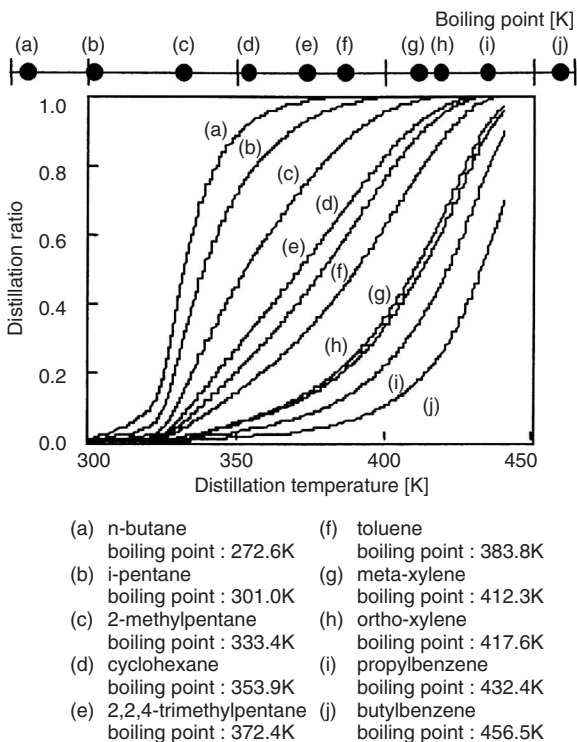


Figure 10 Distillation characteristic of multi-component blend

Figure 9は、背圧14 kPaにおけるn-C<sub>5</sub>H<sub>12</sub>の噴霧に対し、それぞれの蒸発過程に起因する蒸気質量割合を比較する。キャビテーション気泡群による蒸発 $M_{vcb}$ は他の蒸発に比べて大きいことがわかる。過熱度に起因する蒸発 $M_{vsh}$ は熱伝達に起因するそれ $M_{vht}$ に比べて十分に大きいものの、 $M_{vcb}$ ほど蒸発量が多くなく、減圧沸騰噴霧においては気泡成長による蒸気形成が支配的であることが示された。

### 多成分燃料噴霧の蒸発に関するモデリング

軽油やガソリンなど流通する市販燃料のほとんどは多成分の混合物であり、その噴霧燃焼数値解析では、対象とする燃料を性質の似た疑似単成分として扱うことが多い。しかし、最近のエンジン燃焼制御技術の緻密化・高度化やバイオマス燃料の混合利用など、燃料多様化の進展により燃料の多成分性は無視し得なくなりつつある。ここでは多成分性の考慮が重要な蒸発特性について述べることにし、その典型例を示す。Figure 10は、10成分からなる混合物の蒸留曲線であり、その上には個々の単成分の沸点を示す。混合物中の各成分は単成分と異なり、明確な沸点を持たず、蒸留温度に対しある勾配を持って蒸発する。また、低沸点成分の蒸留温度は相対的に上がり、高沸点成分のそれは低下して、蒸留温度範囲が個々の成分の沸点範囲に比べ狭くなる。Figure 11は、i-C<sub>8</sub>H<sub>18</sub>

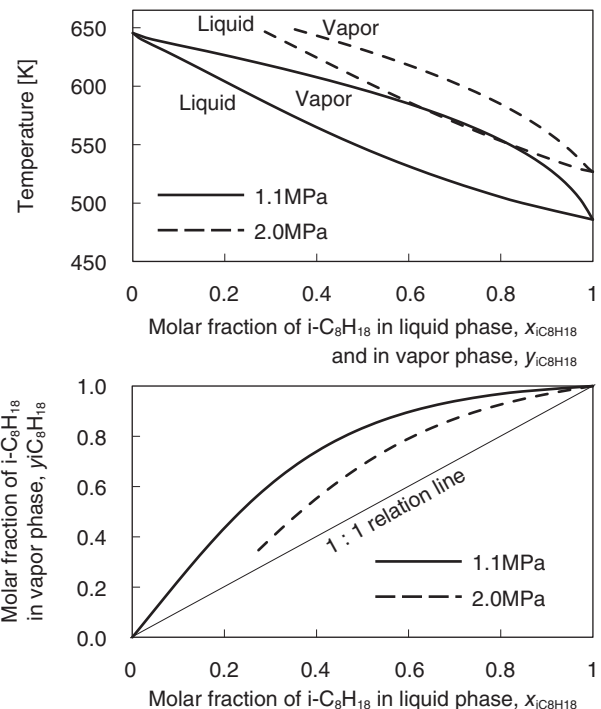


Figure 11 T-xy and x-y diagrams of i-C<sub>8</sub>H<sub>18</sub>/n-C<sub>13</sub>H<sub>28</sub> blends at constant pressure

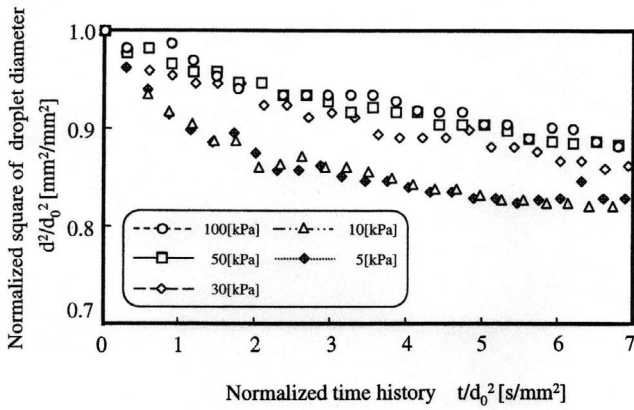


Figure 12 Temporal change in square of single droplet diameter of n-C<sub>6</sub>H<sub>14</sub>/n-C<sub>13</sub>H<sub>28</sub> blend

とn-C<sub>13</sub>H<sub>28</sub>の定圧気液平衡関係(T-x<sub>y</sub>, x-y線図)である。x-y線図に着目すると、液相組成に比べて気相組成に占めるi-C<sub>8</sub>H<sub>18</sub>の割合が高い。これは、液滴の蒸発過程においても低沸点成分であるi-C<sub>8</sub>H<sub>18</sub>がより多くの蒸気を形成する可能性を示唆する。Figure 12にn-C<sub>6</sub>H<sub>14</sub>とn-C<sub>13</sub>H<sub>28</sub>からなる混合燃料(モル分率5:5)の単一液滴の急減圧場における蒸発過程を示す。一般に単一液滴の蒸発は、時間に対して液滴直径の二乗値が比例的に小さくなる、いわゆるd<sup>2</sup>則にしたがう。しかし、低圧で顕著なように、混合燃料のd<sup>2</sup>値は初期に著しく低下した後、緩やかに減少を続ける。これは低沸点成分のn-C<sub>6</sub>H<sub>14</sub>が初期に多量に蒸発し、液滴内に残ったn-C<sub>13</sub>H<sub>28</sub>が比較的遅く蒸発するためである。

多成分燃料のこのような蒸発特性はその後の着火・燃焼特性に影響を及ぼすと考えられるから、著者らはそのモデル化に取り組んでいる。具体的には、KIVA3V<sup>[16]</sup>に米国NISTの商用オープンソースコードSUPERTRAPP<sup>[17]</sup>を組み込んで詳細な気液平衡計算を用いる方法を採用した<sup>[18]</sup>。分子の大きさが異なるような非理想性の高い溶液では、気液平衡条件は以下の式で表される。

$$\phi_i^V y_i p = \phi_i^L x_i p \quad \dots\dots\dots (10)$$

( $\phi_i$ : フガシテイ係数, V: 気相, L: 液相,  $x_i$ : 成分iの液相モル分率,  $y_i$ : 成分iの気相モル分率, p: 全圧)

そのため、気液両相に適用可能な混合物の状態方程式(著者らのモデルではPeng-Robinson状態方程式)を用いてフガシテイ係数を求めれば、気相と液相の平衡濃度を算出できる。液滴蒸発モデルにはSpaldingの修正モデ

ル<sup>[19]</sup>を用いる。液滴への熱伝達速度 $\dot{Q}$ と液滴からの質量輸送速度 $\dot{m}$ は次式で表される。

$$\dot{Q} = 2\pi r \lambda_s (T_\infty - T_d) Nu \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$\dot{m} = 2\pi r \rho D_{air} B_M Sh \quad \dots\dots\dots (12)$$

(r: 液滴半径,  $\lambda_s$ : 熱伝達率,  $T_\infty$ : 周囲温度,  $T_d$ : 液滴温度,  $\rho$ : 液体密度,  $D_{air}$ : 空気中の燃料の拡散係数)

また、Spaldingの質量輸送数 $B_M$ は

$$B_M = (\sum y_{i,s} - \sum y_{i,\infty}) / (1 - \sum y_{i,s}) \quad \dots\dots\dots (13)$$

( $y_i$ : 成分iの質量分率, s: 液滴表面,  $\infty$ : 無限遠)

上記の気液平衡推算是ここに用いる。燃料成分と窒素(雰囲気気体)の混合物に対して、気相の平衡組成を求め、 $y_{i,s}$ を算出する。また、Equation 11とEquation 12は次式によって求められる。

$$Nu = [2.0 + 0.6Re^{1/2}Pr^{1/3}] / (1 + B_T)^{0.7} \quad \dots\dots (14)$$

$$Sh = [2.0 + 0.6Re^{1/2}Sc^{1/3}] / (1 + B_M)^{0.7} \quad \dots\dots (15)$$

$$B_T = C_p (T_\infty - T_s) / Q \quad \dots\dots\dots (16)$$

(Re: レイノルズ数, Pr: プラントル数, Sc: シュミット数,  $B_T$ : Spaldingの熱輸送数,  $C_p$ : 熱容量, Qは単位質量あたりの蒸気を生成するまでに液滴に到達する熱量)

Figure 13は、i-C<sub>8</sub>H<sub>18</sub>(iC8, 沸点372 K, セタン価12)とi-C<sub>16</sub>H<sub>34</sub>(iC16, 沸点520 K, セタン価15)をn-C<sub>13</sub>H<sub>28</sub>(C13, 沸点510 K, セタン価88)にそれぞれ質量分率0.69で混合した燃料の噴霧内蒸気濃度分布と火炎温度<sup>[20]</sup>である。着火燃焼過程はShell model<sup>[21]</sup>と一段総括反応を組み合わせたモデルとした。i-C<sub>8</sub>H<sub>18</sub>やi-C<sub>16</sub>H<sub>34</sub>を混合すると着火が遅れること、そのときの噴霧先端到達距離や燃焼領域など計算は実験結果をよく表現している。また、i-C<sub>8</sub>H<sub>18</sub>は噴霧のより上流から蒸発を開始すること、i-C<sub>16</sub>H<sub>34</sub>を混合するとn-C<sub>13</sub>H<sub>28</sub>の蒸発量が低下することなど、混合燃料の蒸発特性を表現可能な解析が可能となった。



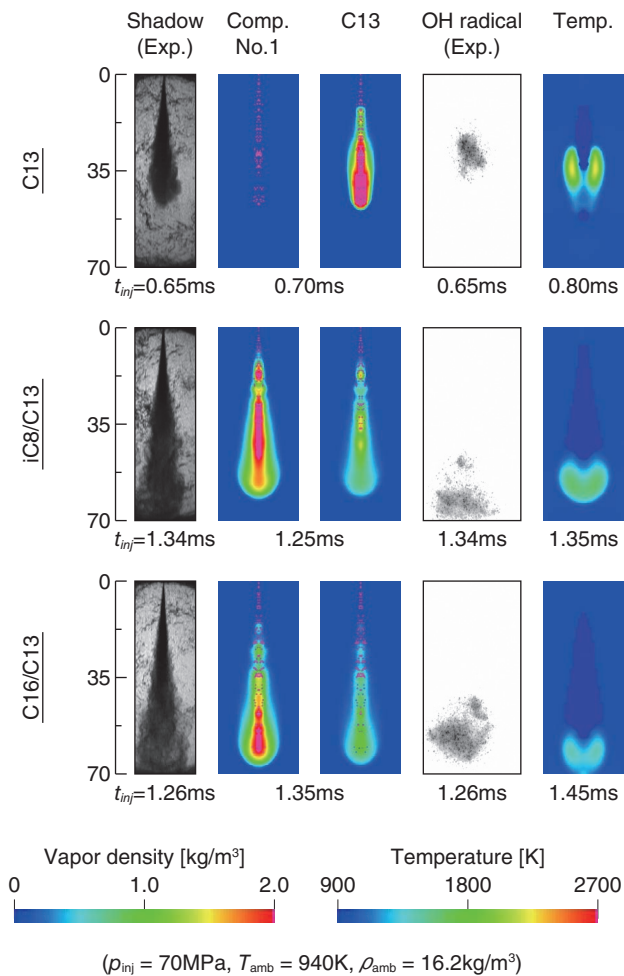


Figure 13 Distributions of fuel vapor and temperature, calculated by multi-component fuel model

## 噴霧-壁面衝突のモデリング

エンジン内の有限の空間において進行する噴霧燃焼にとって、燃料噴霧の壁面衝突時による液滴や液膜の挙動ならびにその後の燃料の分散過程は重要である。著者らはこれまで噴霧液滴の壁面衝突から液膜形成、スプラッシュ分裂、液膜流動、蒸発など広範な現象を網羅した体系的モデルを構築してきた。そのすべてを記すことは紙面の都合上できないので、詳細は文献に委ねながら、ここでは各モデルの概要を記述する。

### 低温壁面モデルと高温壁面モデル

冷間始動時に相当する非蒸発の衝突噴霧から、高負荷運転時に相当する蒸発場の高温壁面に衝突する噴霧の双方に適応するモデルを構築するために、まず、壁面の表面温度を $T_w$ 、燃料液滴の飽和温度を $T_{sat}$ として、両者の関係を $T_w < T_{sat}$ と $T_w \geq T_{sat}$ に区別してモデリングした。Figure 14にその概要を示す。低温壁面( $T_w < T_{sat}$ )では液滴が壁面に付着・滞留するため液膜形成過程をモデル化し、プール状の液膜形成以降の液滴衝突に伴う液膜スプラッシュ状分裂をモデル化した。高温壁面( $T_w \geq T_{sat}$ )では、液滴と壁面間の熱伝達および衝突液滴と高温壁面間の沸騰現象を考慮した分裂過程<sup>[22, 23]</sup>を記述した。以上のモデルの詳細は文献[24], [25]を参照されたい。

### 液膜形成モデル

著者らはさらに燃料噴霧の壁面衝突現象に重点を置き、

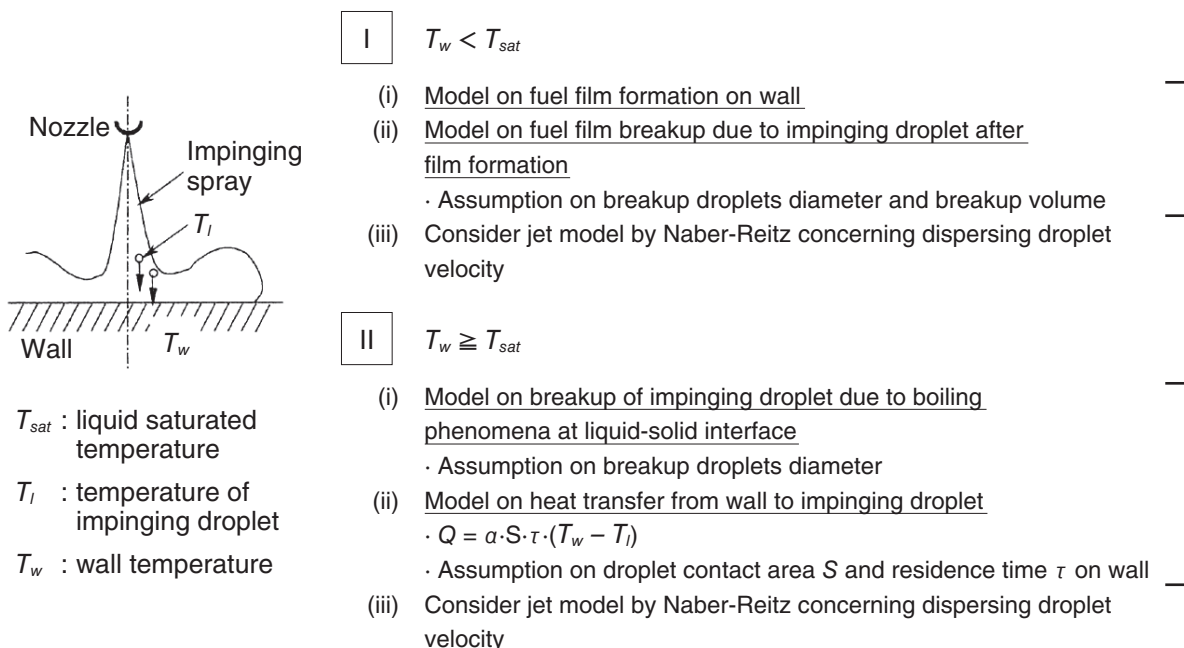


Figure 14 Overview of low/high temperature model

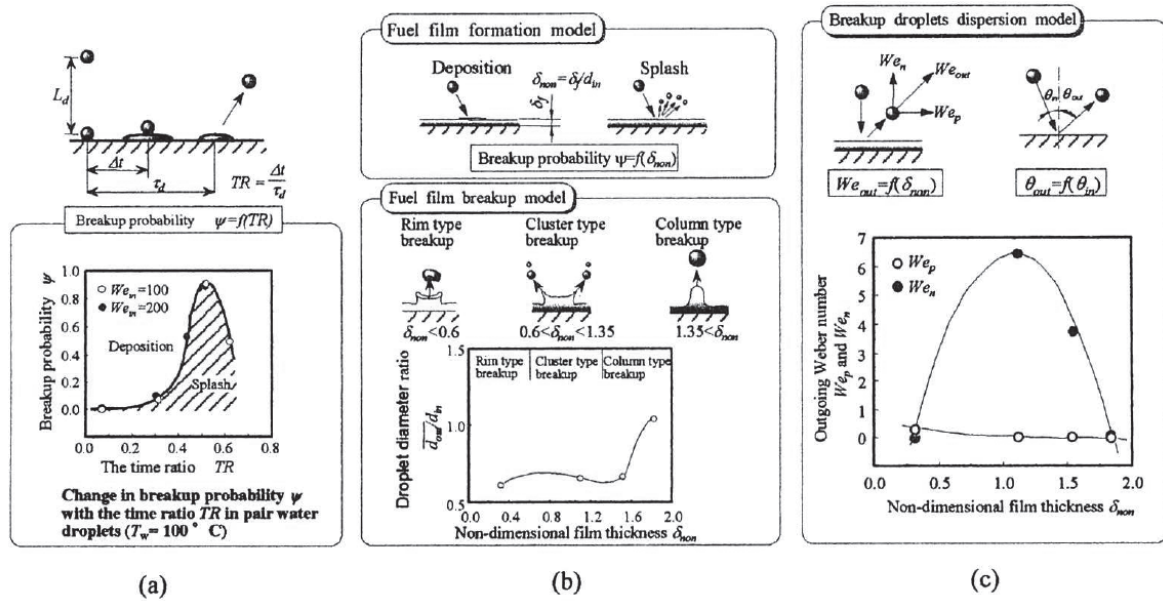


Figure 15 Impingement model for low Weber number ( $We \leq 300$ )

液滴壁面衝突による分裂・飛散現象，液滴同士の干渉効果，液膜の形成過程，液滴と液滴の干渉効果を考慮し，モデリングを行なった<sup>[26-28]</sup>。その際，衝突液滴の持つエネルギー，すなわち  $We = \rho_1 d v^2 / \sigma$  ( $\rho_1$ : 液体密度， $d$ : 入射液滴直径， $v$ : 入射液滴速度， $\sigma$ : 表面張力) で定義される Weber 数により評価し，それが低い場合 ( $We \leq 300$ , **Figure 15**) と高い場合 ( $We > 300$ , **Figure 16**) に分類した。衝突エネルギーが低い場合には，連続して液滴が衝突する場合の液滴と液滴および液滴と液膜の相互干渉効果を考慮してモデル化を行なった。また，衝突エネルギーが高い場合には液滴の壁面衝突による Splash 現象に着

目しモデル化した。さらに，各場合とも壁面衝突時における壁面上の液膜の有無により壁面衝突挙動が異なる。衝突液滴の分裂形態は，壁面上に液膜が形成されている場合，液膜の無次元膜厚と液滴の Weber 数によって表すことができる<sup>[29, 30]</sup>。また，乾き壁面に対しては，衝突エネルギーが低い場合に液滴と液滴の相互干渉を考慮し，逆に衝突エネルギーが高い場合に臨界 Weber 数を用いて液滴の Splash 現象を考慮した。

このように壁面上に付着した液膜の厚さは，分裂・飛散の形態を決定する上で重要である。そこで，著者らは液

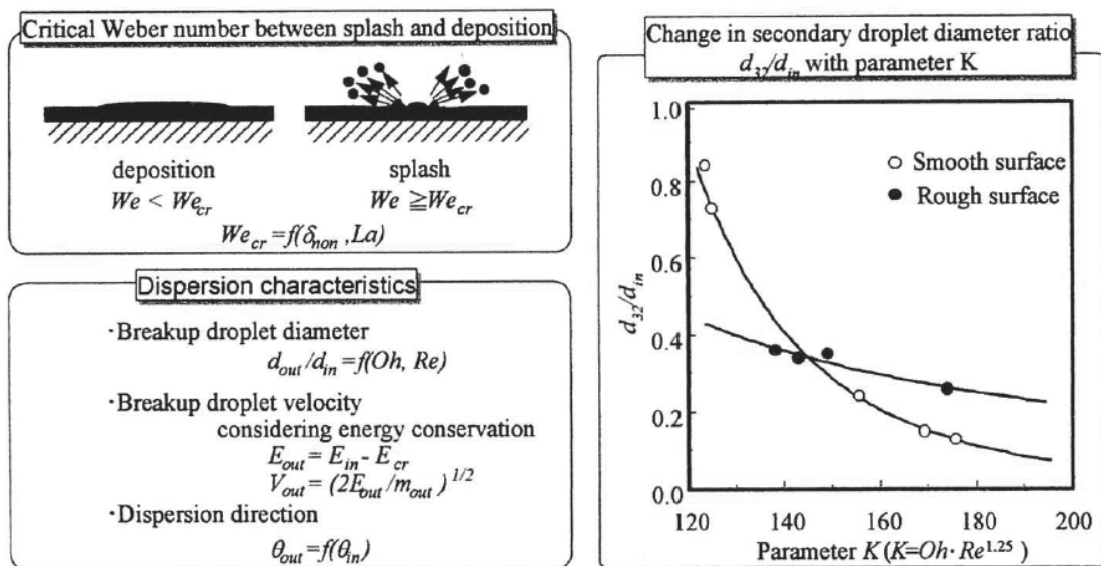


Figure 16 Impingement model for high Weber number ( $We > 300$ )

膜形成過程について、初期の液滴が持っている運動エネルギーと表面張力によるエネルギーの和が、液膜の最大直径での表面張力によるエネルギーと摩擦によるエネルギー損失の和に等しいとして、液膜の拡がりに関するモデリングを行なった。また、液滴の衝突により形成された液膜は、その初期において液滴温度と等しく、その後壁面や雰囲気気体より与えられた熱量を液膜の温度上昇と蒸発に費やす。そこで、液膜に供給される熱量と液膜が消費する熱量を等しいとして、エネルギー保存則より液膜の蒸発量を求めた。Figure 17に噴射圧力99 MPa、衝突距離30 mmの噴射開始後1.4 msにおける燃料蒸気、液滴パーセルの空間分布を、Exciplex蛍光法により撮影された同時刻の蒸気相、液相と比較する。図中の(a)はExciplex蛍光の画像、(b)はKIVA-IIオリジナルコード、(c)はNaber-Reitzのモデル<sup>[31]</sup>、(d)は著者らのモデルである。(b)は燃料蒸気濃度が低く、壁面上方への拡がりも小さいこと、(c)は大粒径の液滴が噴霧先端部の壁面上方に存在し、蒸発が遅いのに対し、(d)の著者らのモデルは比較的实验に近い特性を表現していることがわかる。

### 液膜流動モデル

上記のモデルは、壁面に付着した液膜がセルごとに保存され、その流動を考慮しておらず、膜厚に左右される衝突液滴の分裂後の挙動を正しく記述することができない。そこで、著者らは、Figure 18に示す液膜流動モデルを加え、入射液滴と反射液滴の持つ運動量、雰囲気気体のせん断力、液膜と壁との摩擦力の三つの因子を考慮した運動方程式を解くことによって液膜の移動速度を算出した。これにより、離散化された液膜はその内部に流動を持たない剛体であるものの、その移動により疑似的な液膜流動をモデル化した<sup>[28, 32]</sup>。

### 壁面の伝熱面過熱度を考慮したモデル

一般に流通する燃料の多くは多成分であり、低沸点から高沸点まで様々な成分を含んでいる。このため、ある壁

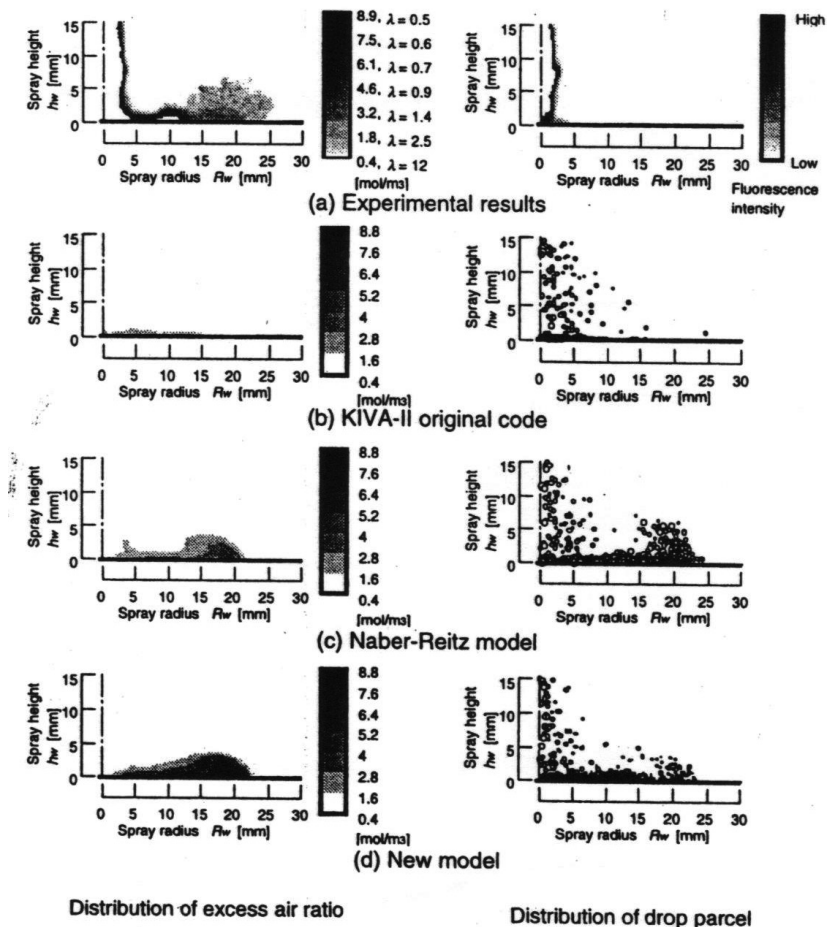


Figure 17 Comparison of spatial distribution of fuel vapor concentration and droplets between experiment and impingement models

面温度を想定しても燃料中の成分によって噴霧の壁面衝突時の固液界面の沸騰形態は変化する。ある小型直噴式ディーゼル機関の壁面温度範囲と軽油を対象とした場

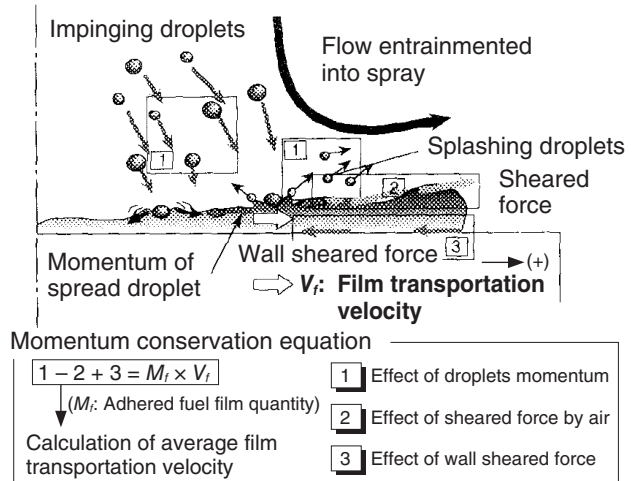


Figure 18 Physical phenomenological model for film transportation process on the wall



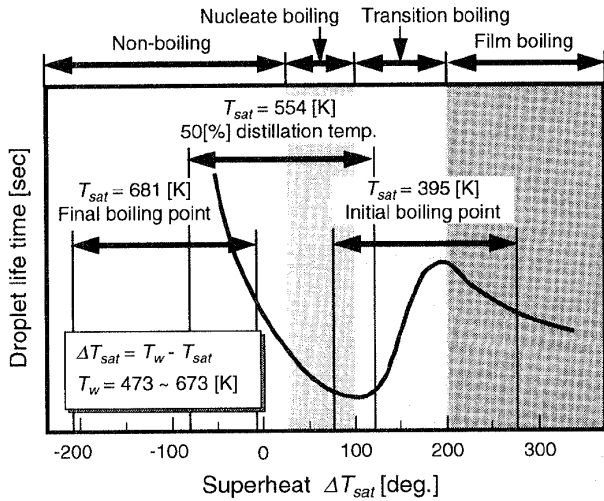


Figure 19 Boiling curve of each composition in an engine condition

合, Figure 19に示すように, 壁面過熱度 $\Delta T_{sat}$ は $-208 \sim 278$  Kと非常に広く, 非沸騰領域から膜沸騰領域まであらゆる沸騰形態をとる。ところで, 竹内らの単一液滴の高温壁面への衝突実験は, 核沸騰領域では液膜が形成され, 分裂した液滴は上方に吹き上げられるものの, 遷移沸騰, 膜沸騰においては液膜が形成されず, 分裂後の液滴が半径方向に飛散するとしている<sup>[22]</sup>。したがって, これ

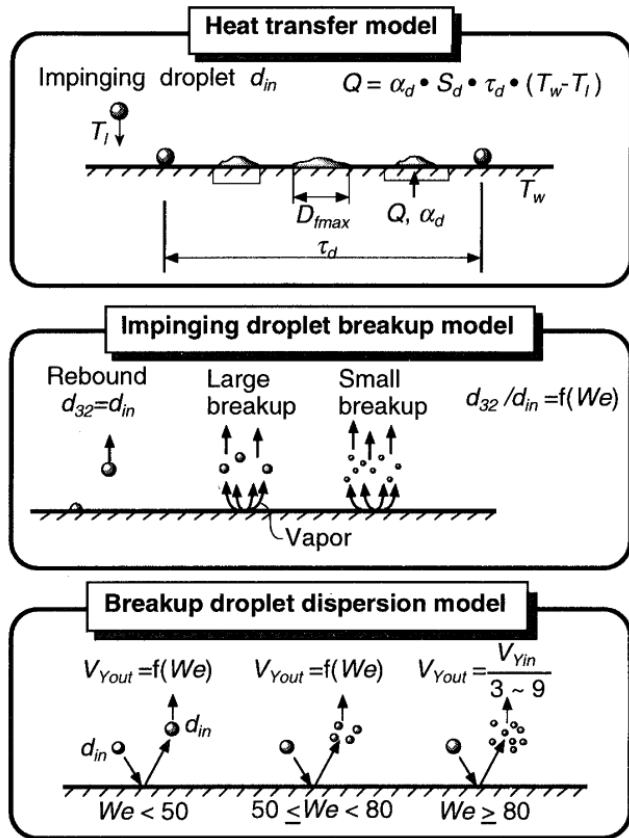
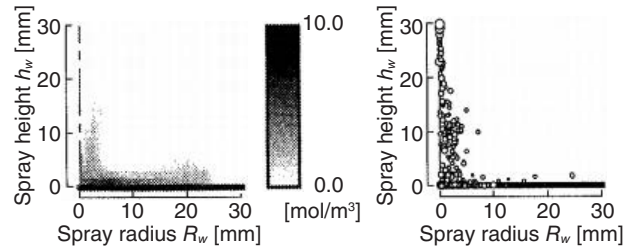
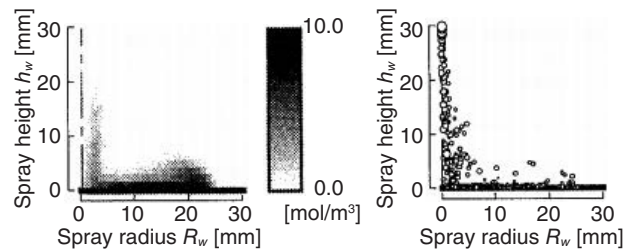


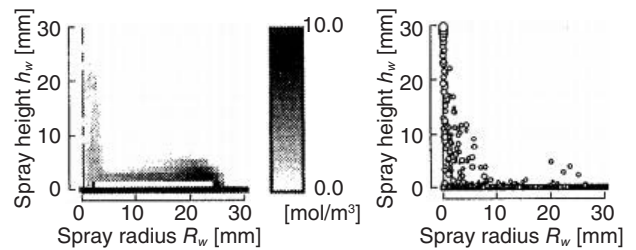
Figure 20 Spray impingement model available for transient boiling and film boiling conditions



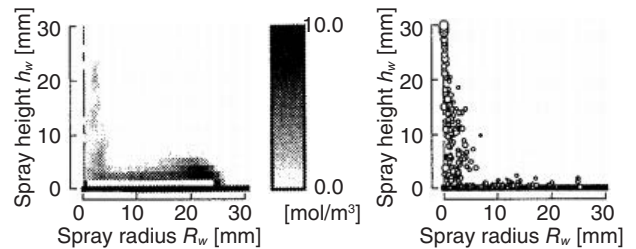
(a) Original model



(b) Nucleate boiling state ( $\Delta T_{sat} = 50$  [deg.]



(c) Transition boiling state ( $\Delta T_{sat} = 150$  [deg.]



(d) Film boiling state ( $\Delta T_{sat} = 250$  [deg.]

Distribution of vapor concentration      Distribution of droplet parcel

Figure 21 Comparison of spatial distribution of fuel vapor concentration and droplet parcels between KIVA-II original model and developed impingement model

までに構築したモデルは核沸騰領域に対して適用できるものの, 遷移沸騰, 膜沸騰に適用できない。そこで, 遷移沸騰, 膜沸騰領域に適用可能なFigure 20のモデルを構築した<sup>[33, 34]</sup>。これは, 液滴分裂モデル, 液滴反射モデル, 熱伝達モデルからなる。その計算結果はFigure 21に示すように, KIVA-IIのオリジナルコードでは計算できない沸騰形態による差異, すなわち, 遷移沸騰や膜沸騰では液膜を形成せず液滴が飛散するため壁面上の蒸気濃度が核沸騰条件に比べて低いことを表現している。

直噴ガソリン機関への拡張と

統合モデル

これまでのモデルは噴霧の衝突後の分裂・飛散過程のデータベースとして水滴の壁面衝突実験の結果を援用してきたが、水滴と軽油やガソリンではぬれ性が異なる。そこで、ガソリンに近いぬれ性とガソリンの50%留出温度の沸点を有する1-プロパノール(C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>O)を供試液体として微小液滴の実験を行ない、データベースを作成した。加えて、軽油と同様、ガソリンもまた多成分燃料であるから、低温から高温までの広い壁面温度範囲に対して液膜の形成と液滴の分散・飛散を記述する必要がある。そこで、著者らはこれまで作成したモデルを参考に、全ての沸騰領域に適用可能な統合モデルを構築した<sup>[35]</sup>。そのフローチャートをFigure 22に示す。本モデルは壁面の衝突する燃料液滴の飽和温度と壁面温度から液滴の衝突時の沸騰領域を算出する。大別すると低温領域と高温領域であり、高温領域では液膜が形成されないため分裂後の液滴の飛散速度、飛散角度、液滴径、液滴温度をエネルギー保存則と微小液滴の実験結果による実験式から求める。一方、液膜が形成される低温領域では、液滴間干渉および液膜と液滴の干渉を考慮したモデルを作成し、分裂後の液滴の状態を算出する。すなわち、入射時の液滴の入射角、Weber数、壁面過熱度、液膜厚さおよび液滴間間隔などの関数として求める。

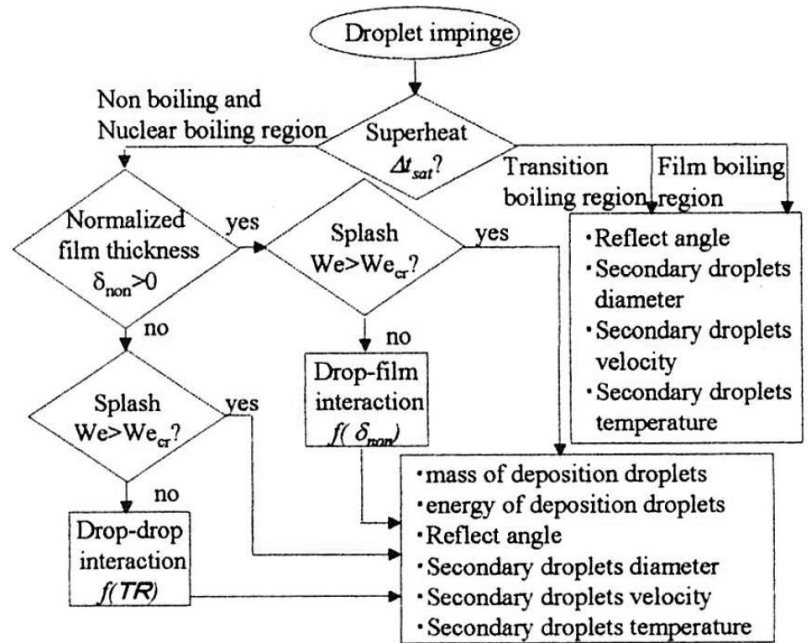


Figure 22 Flowchart of integrated model

このモデルは壁面の衝突する燃料液滴の飽和温度と壁面温度から液滴の衝突時の沸騰領域を算出する。大別すると低温領域と高温領域であり、高温領域では液膜が形成されないため分裂後の液滴の飛散速度、飛散角度、液滴径、液滴温度をエネルギー保存則と微小液滴の実験結果による実験式から求める。一方、液膜が形成される低温領域では、液滴間干渉および液膜と液滴の干渉を考慮したモデルを作成し、分裂後の液滴の状態を算出する。すなわち、入射時の液滴の入射角、Weber数、壁面過熱度、液膜厚さおよび液滴間間隔などの関数として求める。

(2)PAHからの凝縮核生成、粒子同士の凝集、PAHの粒子表面への凝縮、気相化学種による表面成長・酸化反応を記述するスス粒子生成モデルから構成される。気相反応モデルでは、気相における燃料分子の熱分解・酸化、重合、環化および多環化反応によるPAHの生成を詳細な素反応モデルによって計算し、後述の粒子核生成とそれに引き続く一次粒子成長の計算に必要な気相化学種(PAH, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, H, O<sub>2</sub>, OH)濃度が計算される。Wang and Frenklachのメカニズム<sup>[36]</sup>の改良バージョンであるApple and Bockhorn,

スス粒子生成のモデリング

ディーゼル機関や昨今の直接噴射式ガソリン機関において、ススの低減は未だ大きな課題である。そこで、著者らはススの生成・酸化機構を考察するため反応動力学解析モデルを構築した。このスス反応動力学モデルは、Figure 23に示すように、

- (1)燃料の酸化反応・熱分解から芳香族環の形成、そして七環までの多環化芳香族炭化水素(PAH)成長を記述する気相反応モデル

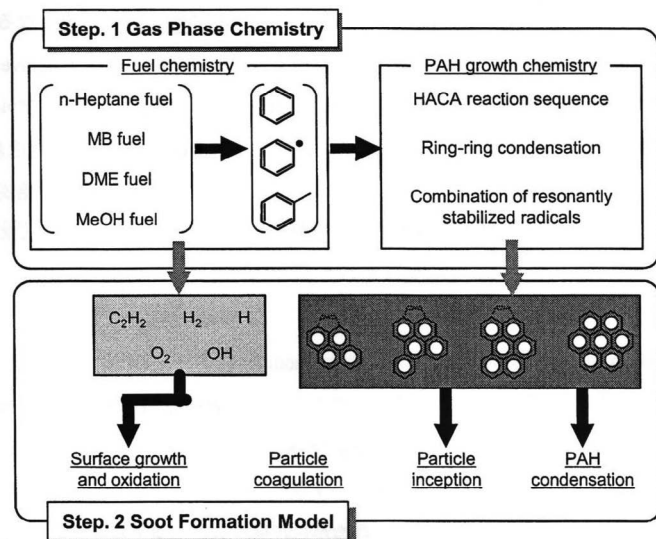


Figure 23 Reaction model for soot particle formation



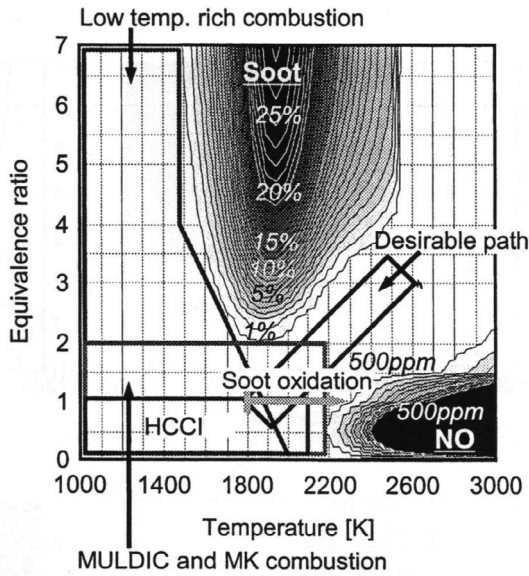


Figure 24 Comparison of representative diesel combustion methods on  $\phi$ -Tmap (fuel: n-heptane,  $p=6\text{MPa}$ , reaction time:  $t=2\text{ms}$ )

Frenklachのメカニズム<sup>[37]</sup>をコアモデルとし、これに燃料の酸化反応モデルを組み合わせる手法を採用した。ベンゼン( $\text{C}_6\text{H}_6$ )からコロネン(六員環PAH:  $\text{C}_{24}\text{H}_{12}$ )までの多環化反応は、芳香族環への水素引き抜き-アセチレン付加反応(HACAメカニズム)と芳香族環同士の結合反応によるPAH成長を主体とし、これに五員環ラジカル同士の結合による低級PAHの生成反応を融合した。

気相反応において計算されるPAHから凝縮核が形成し、さらに一次スス粒子へ成長する一連の粒子化プロセスには、

- 1) PAHから凝縮核ができる「核生成プロセス」
- 2) 粒子同士の衝突・合体による「凝集プロセス」

3) 粒子と気相化学種との表面反応および粒子表面へのPAHの凝縮による「表面成長プロセス」を考慮した。

以上のモデルの詳細は文献[38]を参照されたい。

構築したモデルを用いて定圧一定温燃料計算を行なった。Figure 24に計算したスス生成収率とNOの体積濃度をKamimotoらの提唱する $\phi$ -Tマップ<sup>[39]</sup>上に示す(燃料: n-ヘプタン:  $n\text{-C}_7\text{H}_{16}$ , 圧力: 6 MPa)。図には代表的なクリーンディーゼル燃焼法の燃焼条件を併記した。スス生成収率は当量比によらず概ね1900 K付近でピークを持つベル型の温度依存性を示し、当量比が高いほどスス生成収率の最大値が増加することがわかる。また、この図から、従来のスス低減燃焼法は、 $\phi$ -Tマップ上のスス生成半島に対して、低温側を利用する「温度制御型」と燃料希薄側を利用する「当量比制御型」に大別されることが示された。Figure 25は $\phi$ -Tマップ上におけるスス粒子径、数密度およびスス前駆体としてのナフタレンである。スス生成収率のベルピーク温度より低温側では小粒径・高数密度・高PAH濃度であり、高温側では大粒径・低数密度・低PAH濃度となることが示された。

物理法則を適用したModel Based Calibration

本稿の最後に、著者らが最近取り組んでいるModel Based Calibration(MBC)<sup>[40, 41]</sup>のモデル開発を紹介する。昨今のエンジン開発の制御パラメータの増大とそれによる適合実験工数の指数関数的増大に対して、最小限の実機計測データの多変量解析から実験モデルを作成し、これを用いて最適設計値を得るMBCが注目されている。しかし、この方法では計測範囲外に外挿した際の精度が必

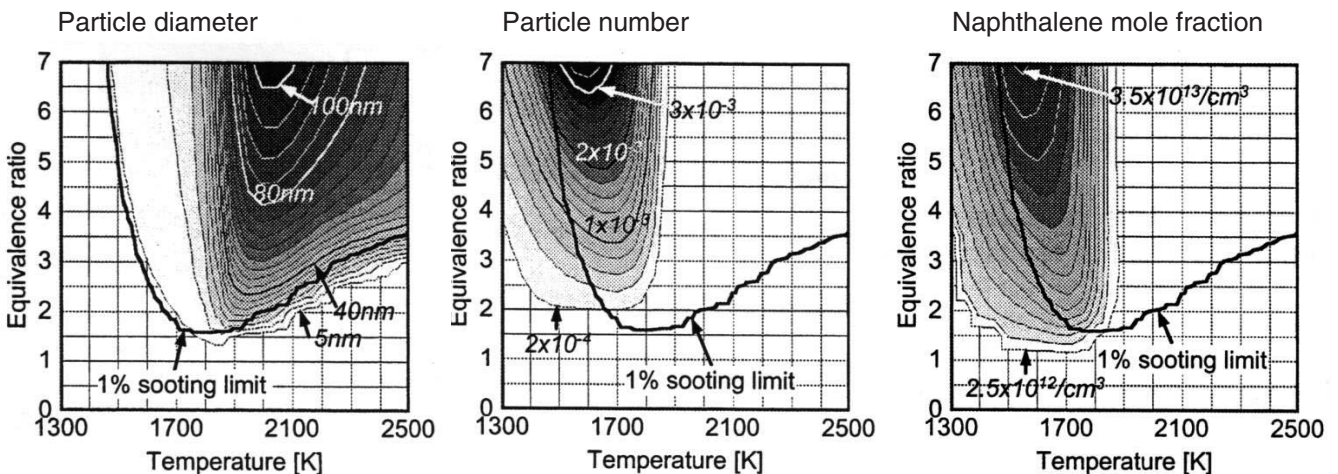


Figure 25 Distribution of particle diameter, particle number and naphthalene mole fraction on  $\phi$ -T map (fuel: n-heptane,  $p=6\text{MPa}$ , reaction time:  $t=2\text{ms}$ )



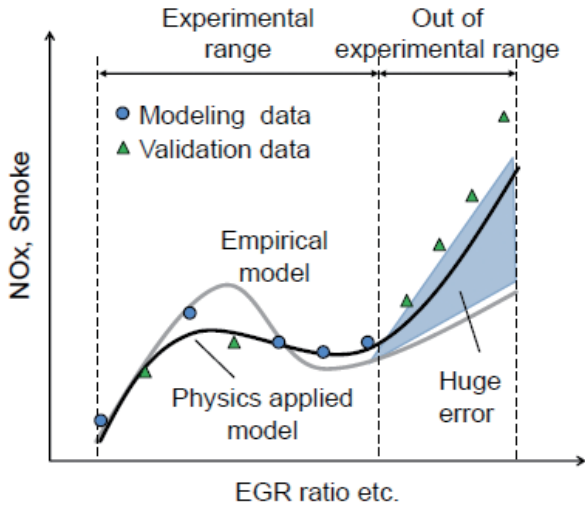


Figure 26 Advantage of applying physical theories into model based calibration

ずしも高くない。そこで、最近著者らは実験モデルに物理法則を適用して、Figure 26に示すように実験領域に対して高精度に内・外挿できるモデルの確立を目指している。モデルのフローチャートをFigure 27に示す。モデルは噴霧、燃焼およびエミッションモデルから構成される。

- (1) 噴霧モデルは、筒内を噴霧と雰囲気の二領域に分割し、その先端到達距離、噴霧角、分裂長さを広安の式<sup>[42]</sup>から算出する。なお、噴射終了後は空

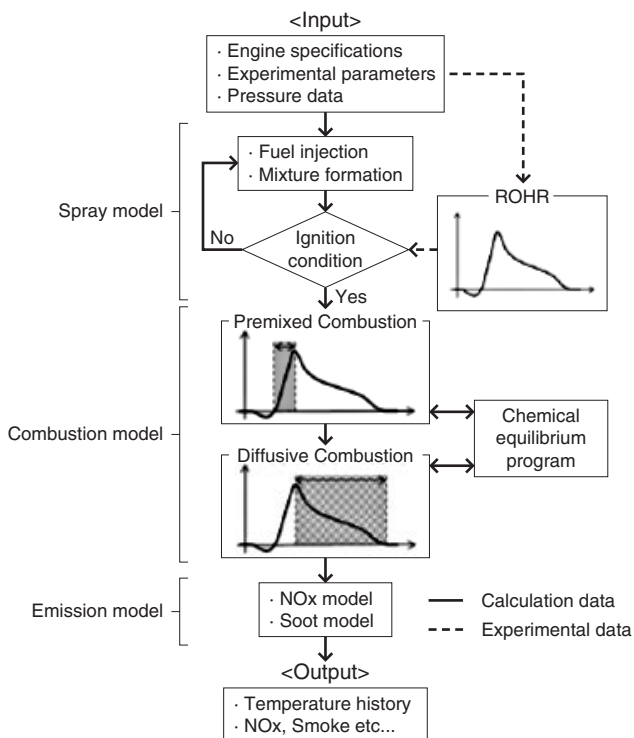


Figure 27 Flowchart of phenomenological model for model based calibration(MBC)method

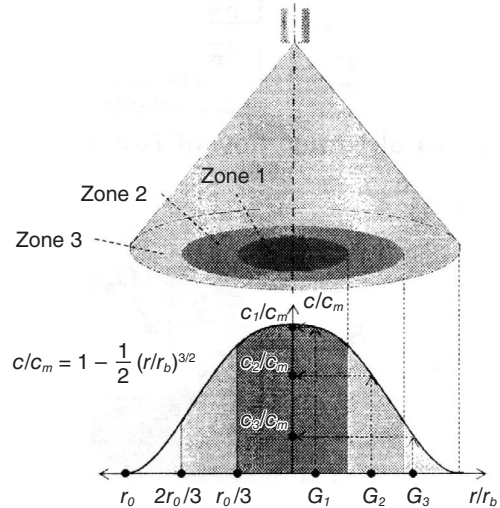


Figure 28 Distribution of fuel concentration divided into three zones in fuel spray

気抵抗により先端速度が減衰する効果を加味した。噴霧内への空気導入は分裂長さ以降に開始されると仮定して、その算定に和栗の運動量理論<sup>[43]</sup>を用いた。また、Figure 28のように、噴霧内の半径方向への燃料濃度分布はガス噴流理論である3/2乗則を仮定して、

$$c/c_m = 1 - 1/2(r/r_b)^{3/2} \dots\dots\dots (17)$$

( $c$  : 半径方向の燃料濃度,  $c_m$  : 噴霧中心軸上の燃料濃度,  $r$  : 半径方向距離,  $r_b$  : 半値幅= $2/3r_0$ , ただし,  $r_0$ は噴霧外周部)

さらに、噴霧領域内を三分割し、後の燃焼モデルにおいてこれを加味した。

- (2) 燃焼モデルは炭化水素の燃焼反応に加え、10種の化学種における化学平衡計算を考慮する。化学平衡計算時の断熱火炎温度はエンタルピバランス法による。

熱発生率のパターンは予混合的燃焼期間と拡散的燃焼期間に分割した。予混合的燃焼期間では噴霧内の当量比の異なる三領域の中で量論混合比に近い一領域が燃焼し、拡散的燃焼期間では当量比が0.5から3の範囲にあるすべての領域で燃焼反応が進行する。

- (3) エミッションモデルはNO<sub>x</sub>とススを対象とした。NO<sub>x</sub>の生成はサーマルNOのみを考慮して、拡大

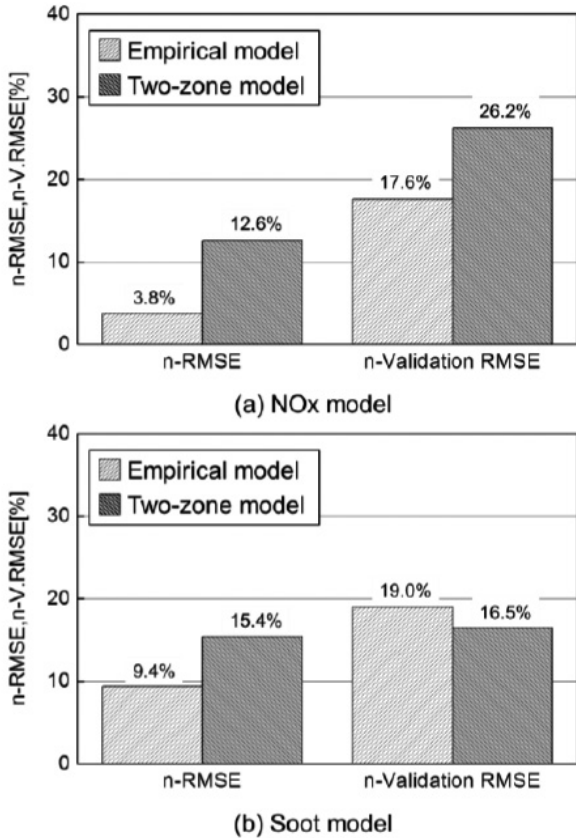


Figure 29 Example of evaluation results for NO<sub>x</sub> and soot models

Zeldovich機構を採用した。ただし、NOの生成速度式は各定数を実験定数  $a$ 、 $\beta$  で置き換えた次式とした。

$$d [NO]/dt = a [O_2]^{1/2} \exp(-\beta/T) \dots\dots\dots (18)$$

ここで、 $T$ は最大筒内平均温度、 $[O_2]$ は筒内酸素濃度であり、これらが主要因子である。

ススモデルはHiroyasuモデル<sup>[44]</sup>とし、ススの酸化反応速度はNagleらのスス酸化モデル<sup>[45]</sup>で記述した。主要因子を最大筒内平均圧力、最大筒内平均温度、酸素分子のモル分率とし、実験定数を含むようにモデル化した。

NO<sub>x</sub>とススに関する計算結果の一例をFigure 29に示す。なお、図中のn-RMSE (normalized Root Mean Square Error)はモデルとそのモデル作成に使用した計測データとの二乗平均平方根誤差を、評価データの最大値と最小値で正規化した指標である。また、n-V. RMSE (normalized Validation RMSE)はモデルと検証用データとの二乗平均平方根誤差を、評価データの最大値と最小値で正規化した指標である。いずれも10%以下で妥当

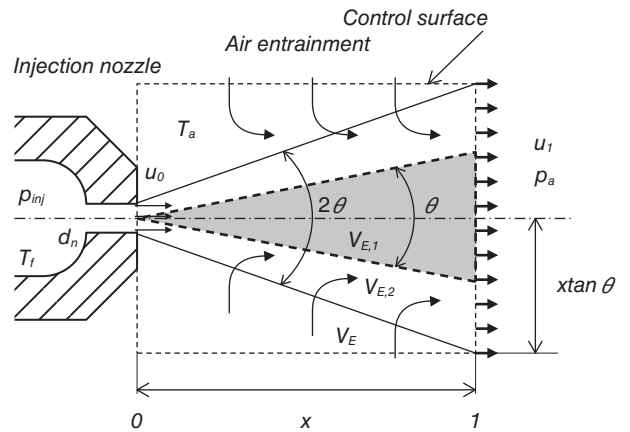


Figure 30 Schematic diagram of spray model used for 1-D multi-component spray model

な精度といわれる。構築したモデルはススのn-V. RMSEを除いて、未だ実験モデルより精度が低下しているものの、モデルの改良次第で今後の改善が期待される。また、MBCへ適用可能な多成分燃料モデルの構築にも取り組んでいる。Figure 30の概念図に基づきその内容を説明する。噴霧先端到達距離は和栗の運動量理論<sup>[43]</sup>に従い

$$x = \sqrt[4]{\frac{\rho_f}{\rho_a}} \cdot \sqrt{\frac{d_n u_0}{\tan \theta}} \cdot \sqrt{t} \dots\dots\dots (19)$$

( $\rho_f$ : 燃料密度,  $\rho_a$ : 雰囲気気密度,  $d_n$ : ノズル直径,  $\theta$ : 噴霧角の半値,  $t$ : 噴射開始からの時間,  $u_0$ は噴射速度)

噴霧全体への導入空気量は次式で表わされる。

$$M_E = \rho_a \cdot V_E = \frac{1}{3} \pi \cdot \rho_a \cdot \tan^2 \theta \cdot x^3 \dots (20)$$

( $M_E$ : 導入空気質量,  $V_E$ : 導入空气体積)

Figure 30のように噴霧領域を区別する場合、各領域への累積導入空気量は次式となる。

$$M_{E,1} = \rho_a \cdot V_{E,1} = \frac{1}{3} \pi \cdot \rho_a \cdot \tan^2(\theta/2) \cdot x^3 \dots (21)$$

$$M_{E,2} = M_E - M_{E,1} = \rho_a (V_E - V_{E,1}) \dots\dots\dots (22)$$

なお、添え字の1, 2はそれぞれ噴霧中心部および外周部を示す。したがって、燃料噴射開始後の時刻  $n \Delta t$  における燃料への供給熱量は次式で表わされる。

$$\Delta Q_a = C_{p,a} \cdot \Delta M_{E,m,n} \cdot (T_a - T_e) \dots\dots\dots (23)$$

$$\Delta M_{E,m,n} = \frac{1}{3} \pi \cdot \rho_a \cdot \tan^2 \theta \cdot (x_n^3 - x_{n-1}^3) \dots \quad (24)$$

( $C_{p,a}$ : 雰囲気気体の定圧比熱,  $T_a$ : 雰囲気温度,  $m$ : 噴霧の中心部あるいは外周部,  $T_e$ : 平衡温度)

平衡温度 $T_e$ は, 供給熱量が全て燃料のエンタルピの増分に消費されると仮定し, SUPERTRAPPコード<sup>[17]</sup>で求められる燃料温度と比較しながら陰的に求める。また, その際の気液平衡組成と燃料物性値も同時に求めて, 燃料組成を更新する。

着火遅れ期間の算定にはLivengood-Wu積分を採用する。

$$X = \int_{t=0}^{t=n\Delta t} (1/\tau_n) dt \dots \dots \dots \quad (25)$$

ここで, 例えばn-ドデカン( $n-C_{12}H_{26}$ )に対する $\tau_n$ は次の式<sup>[46]</sup>で表される。

$$\tau_n = 0.845 \times p_{amb}^{-1.31} \times \phi_{H.I.F}^{-1.60} \times \exp(4350/T_e) \dots \quad (26)$$

( $p_{amb}$ : 雰囲気圧力,  $\phi_{H.I.F}$ : 高自着火性燃料の当量比)

Equation 25において $X$ が1を超えた時点に着火と判定する。計算結果の一例をFigure 31に示す。これは $n-C_5H_{12}$ と $n-C_{13}H_{28}$ の混合燃料に対するもので, 横軸を $n-C_5H_{12}$ の

モル分率としている。雰囲気圧力などの条件が異なるため, 縦軸は正規化して定性的傾向のみを比較しているが, 混合割合に対する液相長さの変化, 着火遅れ期間が高着火性成分(ここでは $n-C_{13}H_{28}$ )に強く依存する傾向などを表現することができる。

### おわりに

冒頭でも述べたように, 昨今のエンジン開発においては, モデルベース開発など計算機を多用する開発スキームが発展しつつあり, 噴霧燃焼に関連してはより簡便かつ高精度な数値モデルの登場が望まれている。そこで, 本稿では, 著者らが噴霧燃焼諸過程のモデル化に際して着目した重要な現象とその数値モデル化手法について解説した。噴霧燃焼の数値モデルはまだまだ発展途上である。ここに記した内容が, その発展の一助となり, お役に立てば幸いである。

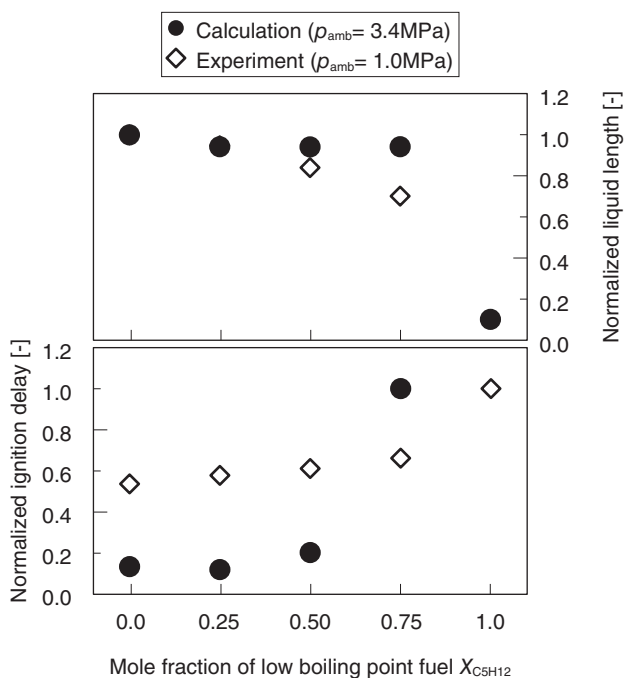


Figure 31 Normalized liquid length and ignition delay calculated by 1-D multi-component fuel model



## 参考文献

- [1] 原田靖裕: *SEC journal*, **8-2**, 79-84(2012)
- [2] 北田泰造, 口田征人, 林伸治: *日本マリンエンジニアリング学会誌*, **48-5**, 63-69(2013)
- [3] 於保茂, 青野俊宏, 鈴木邦彦, 勝康夫: *日立技報*, **91-10**, 54-57(2009)
- [4] W. Bergwerk: *Proc. Instn. Mech. Engrs.*, **173-25**, 655-660(1959)
- [5] 島章, 富田幸雄: *速研報告*, **34-334**, 125-161(1974)
- [6] 和田好充, 千田二郎: *日本機械学会論文集(B編)*, **72-724**, 3113-3120(2006)
- [7] K. Y. Huh and A. D. Gosman: *Proc. The International Conf. Multiphase Flows*, '91-Tsukuba, 515-518(1991)
- [8] P. J. O'Rourke and A. A. Amsden: *SAE Paper No.872089*(1987)
- [9] J. Senda, T. Dan, S. Takagishi, T. Kanda and H. Fujimoto: *Proc. ICLASS-97*, 149-156(1997)
- [10] G. Stiesch: *Modeling Engine Spray and Combustion Processes* (Springer, 2003)
- [11] J. C. Beale and R. D. Reitz: *Atomization and Sprays*, **9(6)**, 623-650(1999)
- [12] R. D. Reitz: *Atomization and Spray Technology*, **3**, 309-337(1987)
- [13] K. Kitaguchi, S. Hatori, T. Hori and J. Senda: *Atomization and Sprays*, **22(1)**, 57-77(2012)
- [14] 堀司, 久下喬弘, 千田二郎, 藤本元: *日本機械学会論文集(B編)*, **73-727**, 879-886(2007)
- [15] 千田二郎, 太田行紀, 山本武広, 藤本元: *日本機械学会論文集(B編)*, **62-600**, 3205-3212(1996)
- [16] A. A. Amsden: Los Alamos National Laboratory Report LA-13313-MS(1997)
- [17] National Institute for Standards and Technology, <http://www.nist.gov/srd/nist4.cfm>(参照日 January 21, 2014)
- [18] 川野大輔, 千田二郎, 和田好充, 藤本元, 石井泰, 鈴木央一, 後藤雄一: *日本機械学会論文集(B編)*, **70-696**, 2213-2219(2004)
- [19] E. W. Curtis, A. Uludogan and R. D. Reitz: *SAE Paper No.952431*(1995)
- [20] 小橋好充, 藤森健太, 前川浩輝, 加藤聰, 川野大輔, 千田二郎: *自動車技術会論文集*, **43-1**, 123-128(2012)
- [21] M. P. Halstead, L. J. Kirsch and C. P. Quinn: *Combustion and Flame*, **30**, 45-60(1977)
- [22] 竹内貴一郎, 千田二郎, 佐藤嘉明: *内燃機関*, **21-268**, 9-18(1982)
- [23] 千田二郎, 山田耕司, 竹内貴一郎, 三木英雄: *日本機械学会論文集(B編)*, 53-485, pp.176-182(1987)
- [24] 千田二郎, 小林正明, 岩下誠司, 藤本元: *日本機械学会論文集(B編)*, **60-578**, 3563-3570(1994)
- [25] J. Senda, M. Kobayashi, S. Iwashita and H. Fujimoto: *SAE Paper No.941894*(1994)
- [26] J. Senda, T. Kanda, M. Al-Roub, P. V. Farrell, T. Fukami and H. Fujimoto: *SAE Paper No.970047*(1997)
- [27] 千田二郎, 神田知幸, 草野茂之, 藤本元: *日本機械学会論文集(B編)*, **65-629**, 389-396(1999)
- [28] 宇都宮敦司, 大西昌紀, 千田二郎, 藤本元: *日本機械学会論文集(B編)*, **65-629**, 397-402(1999)
- [29] M. A. Al-Roub, P. V. Farrell and J. Senda: *SAE Paper No.960863*(1996)
- [30] M. A. Al-Roub: Ph.D. Thesis at Univ. of Wisconsin-Madison(1995)
- [31] J. D. Naber and R. D. Reitz: *SAE Paper 880107*(1988)
- [32] J. Senda, M. Onishi, T. Takahashi, H. Fujimoto, A. Utsunomiya and M. Wakatabe: *SAE Paper No. 1999-01-0798*(1999)
- [33] 千田二郎, 高橋知宏, 田中智之, 李奇衡, 藤本元: *日本機械学会論文集(B編)*, **66-642**, 604-611(2000)
- [34] J. Senda and H. Fujimoto: *SAE Paper No.2001-01-1071*(2001)
- [35] 松田健, 千田二郎, 藤本元: 第11回微粒化シンポジウム, 26-31(2002)
- [36] H. Wang and M. Frenklach: *Combustion and Flame*, **110**, 173-221(1997)
- [37] J. Appel, H. Bockhorn and M. Frenklach: *Combustion and Flame*, **121**, 122-136(2000)
- [38] T. Kitamura, T. Ito, J. Senda and H. Fujimoto: *International Journal of Engine Research*, **3-4**, 223-248(2002)
- [39] T. Kamimoto and M. H. Bae: *SAE Paper No. 880423*(1988)
- [40] 岡本真弥, 田中悠也, 清水勇貴, 松本雅至, 千田二郎, 北村泰隆, 湯浅弘之, 加藤彰: *自動車技術会論文集*, **44-2**, 245-250(2013)
- [41] 秋久和裕, 岡本真弥, 松本雅至, 松村恵理子, 千田二郎, 北村泰隆, 佐藤正浩, 湯浅弘之, 加藤彰: *自動車技術会秋季学術講演会 No.72-20135683*(2013)
- [42] 広安博之, 新井雅隆: *自動車技術会論文集*, **21**, 5-11(1980)
- [43] 和栗雄太郎, 藤井勝, 網谷竜夫, 恒屋礼二郎: *日本機械学会論文集(第2部)*, **25-156**, 820-826(1959)
- [44] K. Nishida and H. Hiroyasu: *SAE Paper No. 890269*(1989)
- [45] J. Nagle and R. F. Strickland-Constable: *Proc. 5th Carbon Conference*, 154-164(1962)
- [46] 居倉伸次, ほか: *日本機械学会論文集(第2部)*, **41-345**, 1559-1568(1975)

## 内燃機関の エネルギー効率限界

Pragmatic Efficiency Limits  
for Internal Combustion Engines



Prof. David E.  
Foster

University of Wisconsin-Madison  
Phil and Jean Myers Professor  
Ph. D.

本稿では、炭化水素を燃料とする内燃機関において、理論上実現可能な最大効率が100%であることを裏付ける熱力学の原理について概説する。それに基づき、燃料のもつ化学エネルギーを軸仕事に変換する過程において、必然的に発生する不可逆性について焦点をあてる。エネルギー損失は、現在の内燃機関の構造上避けられないものと、先進技術の適用により低減の可能性があるものとは分類できる。内燃機関の出力が制御しきれない化学反応、すなわち燃焼によって得られるという性質上、燃料エネルギーの20%から25%にあたる潜在的仕事量の損失はどうしても避けられない。それ以外の摩擦や熱損失、排気エネルギーなどの損失は、直接軸仕事には変換されない利用可能エネルギーに相当する。「最大のエネルギー効率を得るには低い燃焼温度を維持するのが最も容易」という仮説を立証するため、燃焼温度、燃焼室内のガスの比熱比、熱伝達、排気の有効エネルギーの相互作用を示す。低温燃焼においては、熱伝達や排気のエクセルギー損失が最小になるとき、燃料の化学エネルギーが軸仕事に直接変換される量は最大となる。

This article gives an overview of the thermodynamic principles demonstrating that the maximum efficiency theoretically possible with a hydrocarbon fueled internal combustion engine is one hundred percent. From this basis the focus turns to articulating irreversibilities that naturally occur within the processes of converting the chemical energy in the fuel into shaft work. These losses are classified as losses that cannot be eliminated when using the current embodiment of internal combustion engines, and losses that in principle could be reduced through application of advanced technologies. Because power is obtained from the engine via unrestrained chemical reaction, i.e. combustion, we must accept a loss of work potential of between 20 and 25 percent of the fuel's energy. Other losses, such as friction, heat loss and exhaust energy account for the balance of the useable energy that is not converted directly into shaft work. The interplay between combustion temperature, the ratio of specific heats of the combustion chamber gases, heat transfer and exhaust availability is presented as support for a postulate that the maximum pragmatic efficiency is most readily achieved through efforts to keep combustion temperatures low, which in turn maximizes the direct conversion of the fuel's chemical energy into shaft work while minimizing the available energy lost to heat transfer and exhaust flow.

### はじめに

液体炭化水素を燃料とする内燃機関は、モビリティ用途においてエネルギー変換器とエネルギー担体の非常に有効な組み合わせである。液体炭化水素はエネルギー密度と比エネルギーが高いため、燃料を車載する用途に適しており、エンジンは燃料に蓄えられたエネルギーを駆動力に変換するのに便利で効率的な発明品である。内燃機関と炭化水素燃料の組み合わせは、今後数十年にわたっ

て堅牢で経済的に成長が見込まれる動力推進システムである<sup>[1]</sup>。

しかし、燃料源となる石油は需要が大きく、現在も世界的な開発が進められてはいるが、限られた資源である。さらに、モビリティから排出される炭素は、地球規模の気候変動に影響を与えることも懸念されている。したがって、モビリティはユーザにとっての実用性を損なわず、環境影響を最小にして、考えられる最大効率を得ることが最も

重要となる。これが今日のモビリティ社会が直面している大きな課題のひとつであると言える。

駆動システムであるパワートレインを考えると、二つの合理的な質問が生じる。一つ目は、理論上実現可能な最大効率はどれくらいで、現在のパワートレインの効率はこの最大値と比較してどうか。二つ目は、システムに工学的制約が課せられた場合の効率の実用限界はどれくらいかであるか。後者の質問は、開発に取り組む上の現実的なストレッチ目標を生み出し、モビリティの燃料消費とエミッションを低減し、かつ、期待される実用性を確保するという点において、大変重要である。

本稿の目的は、今後数十年間に送り出されるであろう内燃機関の構造、すなわち燃焼により高温高压ガスを膨張させることで仕事を引き出すピストンシリンダー機構で成し遂げられるエンジン効率の実用限界を察知することである。はじめに、内燃機関の最大理論効率について総括し、次に典型的な内燃機関で生じるエネルギー損失を特定する。これらの観点から、避けられないエネルギー損失について議論し、それ以外の損失については実用技術の範囲内でどのように最小化できるかについて述べる。

### 考えられる最大仕事量

内燃機関から得られる考えうる最大仕事量とはどれくらいかを問う際に、認識すべき最も重要な概念の一つは、駆動システムとして用いているエンジンが熱力学サイクルではなく、化学過程であるということだ。熱力学サイクルの場合、作動流体は循環するが、内燃機関ではこのようなことは起こらない。空気と燃料の混合物がエンジンに導入され、反応して生成物になり、膨張しそして排気される。そして次のエンジンサイクルでは別の空気燃料混合物が導入される。すなわち、作動流体は廃棄され、その流体は元の状態に戻ることはない。したがって、古典的な熱力学的な熱機関サイクル解析を用いることは、ここで扱う問いへの解答として適さない。

内燃機関の燃焼過程のような化学過程から得られる最大有効仕事量を扱う熱力学解析では、得られる最大有効仕事量が化学反応によるギブス自由エネルギーの変化量の負数となることが分かっている<sup>[2]</sup>。

$$W_{\text{max, useful}} = -(\Delta G)_{T_0, P_0}$$

これは燃料電池から得られる最大理論有効仕事量の方程式でもあることは注目に値する。燃料電池を表す場合は、通常下式のようなになる。

$$(\Delta G)_{\text{rxn}} = -nFE$$

ここで、

- $n$  = number of moles of electrons transferred      移動する電子のモル数
- $F$  = Faraday's constant      ファラデー定数
- $E$  = Electrical potential difference      電位差

ギブス自由エネルギーの変化量を電気化学ポテンシャルの観点で示す場合、上記の方程式はネルンストの式と呼ばれる<sup>[3]</sup>。

このような理想的な結果が得られると仮定したとき、エンジンがどのように見えるかを概念化することは有益である。Figure 1にその概念図を示す。Figure 1に示す理想的なエンジンの構造は、今日実際に開発中のものと類似している。しかし、ここには明白な学術的差異がある。Figure 1の概念図では、エンジンにおけるすべての現象が可逆的と仮定されている。すなわち、空気と燃料は、大気温度・大気圧でエンジンに入り、エンジンの至るところで化学反応を含む可逆過程を経て、大気条件で平衡生成物としてエンジンから排気される。これらの可逆過程は特定状態の履歴に影響するため、生成物を大気温度にするように熱伝達を引き起こす必要がある。図示するように、このような熱伝達は、大気条件で熱遮断される可逆的熱機関の至るところで生じる。この可逆的熱機関から得られる仕事量をエンジンの軸仕事量に加えて、最大仕

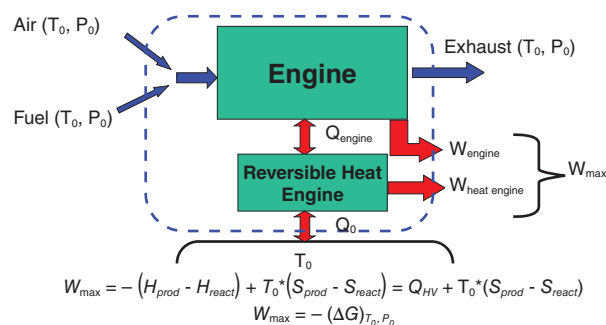


Figure 1 Conceptualization of an Engine to Achieve the Maximum Possible Work from a Charge of Air and Fuel Reacting to Products



事量を求める。

Figure 1下部に示したのは、この可逆機関で得られる仕事量を決定するためのエネルギー収支である。理論的に得られる最大仕事量が、燃料の発熱量 $Q_0$ を大気温度で廃棄される熱量で調整した値と等しくなることに注目すべきである。これら二項を足し合わせたものは、化学反応によるギブス自由エネルギーの変化量の負数と等しくなる。

### 燃料の発熱量とギブス自由エネルギーの関係

この結果における一つの巧妙さは、内燃機関または燃料電池から得られる最大理論仕事量が、燃料の発熱量とは対照的なギブス自由エネルギーの変化量で与えられていることである。種々の燃料において大気条件下で空気で酸化したときの発熱量とギブス自由エネルギーの負数を比較している表を以下に示す。

Table 1 Enthalpies and Free Energy Changes of Several Fuels when reacted with air at atmospheric conditions (adapted from Heywood<sup>(2)</sup>)

Fuel	Heating Value (MJ/kmol)	- Gibbs Free Energy (MJ/kmol)
Methane	802.3	800.6
Methanol	638.59	685.35
Propane	2044.0	2074.1
Octane	5074.6	5219.9

Table 1に示された値から二つの事象が明らかになる。一つ目は、典型的な炭化水素燃料の反応における発熱量とギブス自由エネルギーの変化量がほぼ同じ値になるということである。すなわち、内燃機関の最大理論効率は事実上100%になる。二つ目は、いくつかのギブス自由エネルギーの変化量は発熱量よりも大きくなるということである。これは、一般的にエネルギー入力と呼ばれ、燃料の発熱量よりも大きい仕事量をエンジンから引き出すことが理論的に可能であるということを示している。これは、仕事量を最大化するに当たり、燃焼生成物を大気圧まで膨張させた結果である。場合によっては、大気圧まで膨張することで、大気温度を下回ることもある。これは外部環境からエンジンに熱伝達していることを意味する。このようにして仕事量は、外部環境からエンジンへの熱伝達によってエンジンを大気温度まで戻すための補助熱機関から得られる。

### エンジン内の不可逆性の特定

内燃機関から得られる最大理論仕事量を理解する上で根本的な二つの指針がある。一つ目は、すべての過程が可逆的なもの、すなわち、エネルギー損失がないものとして概念化されているということである。これは有効仕事量に変換できる燃料中の全エネルギーは、実際に有効仕事量に変換されているということの意味する。これにより、現象の背景にある二つ目の指針が分かる。つまり、エネルギーにはエクセルギーと呼ばれる性質があり、不可逆的な過程では利用可能エネルギーが利用できないエネルギーになる、すなわちエクセルギーが損なわれる。実在のエンジンの運転過程で生じているエクセルギー損失を求めることは、前述した理想のエンジンに対するエネルギー損失を定量化するために有益となる。さらに、技術開発によってこれらの損失を低減させ、ひいてはエンジンの効率を高めることができるか調査することが可能になる。損失の解析はエクセルギーの収支によってもたらされる。このような収支をFigure 2に示す。

前述の議論を内燃機関にあてはめると、燃料内の利用可能エネルギーは、反応物と生成物の間のギブス自由エネルギーの変化量と等しくなる。Figure 2のグラフは、エクセルギーの観点で表されているが、実在のエンジンでは、ギブス自由エネルギーの一部は利用できない形態に劣化してしまっている。すなわち、エクセルギーが損なわれること、または「エネルギー損失」があるということを確認した上で、メタノール燃料の単位体積当たりの熱量として示

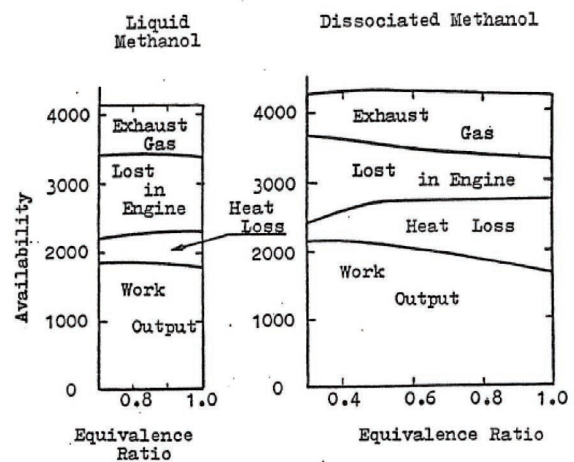


Figure 2 Availability Accounting per Mass of Fuel for Engine Operation for Different Equivalence Ratios for Methanol and Dissociated Methanol<sup>(4)</sup>. The units of the availability are kcal/liter of Methanol.

されている。エネルギーは保存されるが、利用可能性は損なわれてしまう。

Figure 2は、それぞれの運転条件で利用可能エネルギーに起きる各項目の積み重ねグラフである。「Work Output」は、軸仕事としてエンジンから得られるエネルギーを表している。「Heat Loss」は、軸仕事とは対照的に、熱伝達としてエンジンから去る利用可能エネルギーを表している。「Lost in Engine」は、燃焼過程における不可逆性の大きさであり、燃焼の非効率性ではない。これは燃焼が完了していても、燃焼室内で自発的な化学反応が起こることによる、利用可能エネルギーの低下である。最後に、「Exhaust Gas」は排気としてエンジンから去る利用可能エネルギーである。エンジンから逃れようとする熱伝達や排気ガスに含まれる利用可能エネルギーは、これら以外のエネルギー消費とは対極で、それらの一部は利用できる。

Figure 2ではいくつか興味深い点が見られる。一つ目に、燃焼過程に関連するかなりの不可逆性があり、このエネルギー損失は希薄条件下でエンジンを運転するとより大きくなる。この損失は、燃料の利用可能エネルギーの約20%に相当する。二つ目に、かなりの利用可能エネルギーが熱伝達や排気の高で内燃機関から失われている。そして最後に、希薄混合では、燃焼の不可逆性が増加しても、燃料の単位質量当たりのエンジンからの仕事量は増える。これは、エンジンの空燃比を徐々に希薄にして運転すると、排気や熱伝達で廃棄される利用可能エネルギーが減少するためである。この減少分は、希薄燃焼で生じる損失の増加分を上回る。

## 個々のエネルギー損失の詳細な解析

個々のエネルギー損失をより詳細に調査することは、実在のエンジンの効率を改善する可能性がある点で意義深い。この議論の前に、Figure 2に示す損失の解析にエンジンの摩擦は含まれていないということを指摘しておく。実際に、エンジンの摩擦低減は効率改善の重要な要素である。摩擦は、軸仕事としてエンジンから得られる仕事に含まれているが、それが転化されてしまっている。摩擦低減は直接、相関的な軸仕事の増加につながる。ここでこの議論では損失に関連した熱力学現象に絞る。

### 燃焼におけるエクセルギー損失

燃焼において燃料の利用可能なエネルギーの約20%が失われることは残念なことであり、改善の機会があるようにみえる。このことについては多くの議論と解析がなされてきた<sup>[5-8]</sup>。しかし、燃焼の不可逆性は、化学反応を緩和するために、反応物と生成物の化学ポテンシャル間の勾配、親和力を許容した結果である。熱力学上、自発的な化学反応を緩和するために大きい勾配を許すと、大きいエネルギー損失が生じることが知られている。すなわち、大きい温度勾配を挟んだ熱伝達や大きな圧力勾配に伴う流体流動の不可逆性である。たとえ化学反応が定温燃焼で起こるときと同じ割合でシリンダーから仕事を引き出せたとしても、燃焼の不可逆性は低減できない<sup>[9]</sup>。燃焼の不可逆性を低下させる唯一の方法は、化学反応が起こる温度を上昇させることである。これが、燃焼温度の低い希薄運転で燃焼のエネルギー損失が増加する理由である。内燃機関の実際の燃焼温度では、燃焼の不可逆性は20%から25%の範囲になる<sup>[9]</sup>。

したがって、燃料の化学エネルギーを仕事に変換する過程の一環として化学反応を用いると、燃料の潜在的仕事量の約20%から25%のエネルギーが失われる。これを工学的に回避する方法はない。同様のことが、燃料電池にもそのまま当てはまる。

希薄燃焼で、燃焼の不可逆性も増加するが、燃料の単位質量当たりの仕事量も増大するという矛盾は、エンジンから排気ガスや熱伝達として得られるエクセルギーに影響を及ぼす膨張過程時のエネルギーの移動を詳しく調査することで解決できる。

### シリンダーガス膨張により引き出される仕事と利用可能な排気エネルギー

シリンダー内で膨張するガスから得られる仕事は次式で求められる。

$$w = \int P dv$$

圧力と体積の関係は以下のように表される。

$$Pv^\gamma$$

ここで、

$$w = \text{work per unit mass} \quad \text{単位質量当たりの仕事}$$





図に示すように、熱伝達の起こる温度が上昇すると、熱伝達エネルギーの大部分を仕事に変換することができる。図中に示した二本の線は、2600 Kと1900 Kのそれぞれの温度で起こる熱伝達として仕事に変換できる、熱伝達エネルギーの割合を示している。これらの温度は、ストイキ燃焼および希薄燃焼における代表的なものとして考えることができる。2600 Kにおいて熱伝達として失われる単位エネルギー当たり、1900 Kにおける熱伝達によるものよりも約3%大きくなること分かる。すなわち、2600 Kで熱伝達として失われる単位エネルギー当たりの潜在的仕事の損失は、1900 Kで失われる熱伝達のものよりも3%大きくなることを表している。

この解析には微妙な考えが加えられている。熱伝達率は、温度差に比例し、希薄燃焼または低温燃焼によってシリンダー内の温度が下がると、熱伝達のポテンシャルも低下する。このため、シリンダー内の温度が低下すると、熱伝達の量と単位エネルギー損失当たりの潜在的仕事も低下する。

## まとめ

本稿の議論を通じて、炭化水素を燃料とする内燃機関の最大理論効率を調査する目的において、原則的に燃料内のエネルギーはすべて仕事にすることが可能であることが示された。すなわち、内燃機関の最大理論効率は100%となる。

しかし、エネルギー変換過程の一環として自発的な化学反応を用いるため、燃料の利用可能エネルギーの約20%から25%が損なわれる。現在の燃焼温度範囲で駆動システムにこの化学反応を採用している限り、このエネルギー損失はどうしても避けられない。

エンジンから出る熱伝達や排気ガスに関わる潜在的仕事の損失を低減することは何とかできる。これを達成するため、燃焼に由来する $\gamma$ の減少を最小にする試みは、単位膨張体積当たり引き出される仕事を最大化することに役立ち、排気として逃れる利用可能エネルギーを低減することにつながる。たとえ燃焼の不可逆性が多少大きくなっても、シリンダー内の燃焼温度をできる限り低く維持することで $\gamma$ の減少を最小限にすることができる。

さらに、シリンダー内の温度を下げることは、熱伝達の損

失においても有利となる。シリンダー内の温度を下げると、熱損失の度合いが小さくなるだけでなく、仕事に変換できるエネルギーも節約できる。

エンジン燃焼における研究開発の大半が、シリンダー内の温度を下げることを目指しているのは興味深い。一般に低温燃焼(LTC)と呼ばれる多くの取り組みが継続されている。LTCにおける活動の本来の動機は、窒素酸化物と粒子状物質の排出を最小限にすることであったが、副次的な効果が出現した。それは、低温燃焼過程の上手く制御することで、エンジンの効率改善という効果も同じく生み出せるということである。

最後に、内燃機関において達成できる最大エネルギー効率がどれくらいになるかについて見解を述べる。燃焼を用いているので、約20%から25%のエネルギー損失は受け入れなければならない。そのため、最大エネルギー効率の上限は75%から80%になる。それに基づき、内燃機関から廃棄される熱エネルギーと排気エネルギーをどの程度効率的に制御できるかという質問が生じる。これらのエネルギー損失を完全になくすことはできないが、これらのエネルギー損失の低減は着々と進行している。大型で低速のRPMディーゼルエンジンでは50%を超えるエンジン効率が達成されている。米エネルギー省のFuture Truck Programでは、55%の効率を達成するための技術の方針を打ち出し、Heavy Dutyトラックのエンジンで50%の正味熱効率を実証するためのプログラムを支援している。また、最近の米エネルギー省のワークショップでは60%のストレッチ目標が究極の実用限界であると示唆している<sup>[8]</sup>。

参考文献

- [1] *Real Prospects for Energy Efficiency in the United States*, report by the National Academy of Sciences, Washington, D.C., 2009.
- [2] Heywood, J.B., *Internal Combustion Engine Fundamentals*, McGraw Hill, Inc., 1988, ISBN 0-07-028637-X
- [3] O'Hayre, R.P., Cha, S-W, Colella, W.G, Prinz, F.B., *Fuel Cell Fundamentals*, John Wiley and Sons, Inc. 2009, ISBN978-0-470-25843-9
- [4] Edo, T., and Foster, D.E., *VI International Symposium on Alcohol Fuels Technology*, Ottawa Canada, 1984
- [5] C. D. Rakopoulos and E. G. Giakoumis, "Second-law analysis applied to internal combustion engine operation," *Progress in Energy and Combustion Science*, 32, 2-47(2006).
- [6] N. Lior and G. J. Rudy, "Second-Law Analysis of an Ideal Otto Cycle," *Energy Conversion and Management*, 28(4), 327-334 (1988).
- [7] R. J. Primus, K. L. Hoag, P. F. Flynn, and M. C. Brands, Appraisal of Advanced Engine Concepts Using Second Law Analysis Techniques, SAE 840032
- [8] C. S. Daw, R. L. Graves, R. M. Wagner, and J. A. Caton, *Report on the Transportation Combustion Engine Efficiency Colloquium Held at USCAR*, March 3-4, 2010, ORNL/TM-2010/265
- [9] Druecke, B.C., Foster, D.E., Klein S.A., Daw, C.S., Chakravarthy, V.K., and Graves, "Second Law Analysis of Constant Temperature Combustion", Central States Section Combustion Institute, Chicago, IL, March 2006, also MSME University of Wisconsin-Madison 2006



翻訳

西川 雅浩

Masahiro NISHIKAWA

株式会社 堀場製作所  
経営戦略本部  
自動車計測事業戦略室

# Feature Article

アプリケーション

## ECU自動適合ツール STARS Calibrateのご紹介

Introduction of ECU Calibration tool, STARS Calibrate

### 塩見 和広

Kazuhiro SHIOMI

今日の燃費向上の要求に加え、清浄な排気ガスと高い商品性をも両立させるために、エンジンの制御は年々複雑となり、ECU(エンジンコントロールユニット)というコンピュータで制御されている。複雑化の例としては、可変バルブ技術の導入や、ガソリンエンジンの直噴化・ディーゼルエンジンのコモンレール化などがあり、このような制御の対象の飛躍的に増大に伴い、これらを運転状態によっていかに最適制御するかがエンジン性能を大きく左右するようになってきている。そのため、この最適値の決定作業＝「ECU適合作業」が開発の大きな負荷になっており、効率化が強く求められている。本稿では、この作業を効率的に行うための「ECU適合ツール」である「STARS Calibrate」を紹介する。本製品は弊社と世界的なエンジニアリング会社であるRicardo社で共同開発したもので、特にそのDoE部分はRicardo社の「Efficient-Calibration ( $\eta$  CAL)」ツールを使用している。

The control of engine is becoming more complicated over the years for balancing clean exhaust gas with high merchantability in addition to the fuel mileage improvement demand today and is controlled by the computer, ECU (Engine Control Unit). As the example of complexes, there are the implementation of Variable Valve Technology, Direct Injection to Gasoline Engine/ Common-Rail Injection to Diesel Engine and so on went with the exponential growth of those control targets, and how optimize the control depending on driving conditions will give the large influence on engine performance. Therefore, the decision making work on the optimum value, [ECU Calibration task], is becoming the large burden of development and making efficient of the development is strongly requested. The [STARS Calibrate] which is [ECU Calibration Tool] for performing the work efficiently is introduced in this paper. This product is joint developed by HORIBA and Ricardo who is global engineering company, and especially its DoE part is coming from their “Efficient Calibration ( $\eta$  CAL)” tools.

### はじめに

現代の自動車用内燃機関は、良好な燃費と清浄な排ガスならびに商品性の両立が必須の要件となっており、火花点火と圧縮点火を問わず電子制御により制御パラメータを変更し、最良の性能を引き出している。また、燃料の噴

射やバルブタイミングをはじめとして、電子制御により最適化されるパラメータの数も年々増加しており、この最適化の作業(適合作業)に要する工数が増大するとともに、従来のエンジニアの経験や勘に頼ったやり方では十分効率的に適合を行うことが困難となってきている。

このような課題を解決する手段として、1990年代より



ECU適合ツールと呼ばれるソフトウェアが導入されはじめ、現在の車両開発においては広く使われるようになって来ており、産業用エンジンにおいても、このようなツールの有用性が確認され始めている。本稿では、このECU適合ツールについてHORIBAグループがRicardo社と共同開発した製品である「STARS Calibrate」の紹介と合わせてその基本原理と効果について説明する。

## 現在の適合ツールの基本動作

適合ツールが使われだした当初は、従来人間が行ってきた適合作業手順をそのまま自動化する形が採られた。すなわち、実際のエンジンベンチにおいて、計測と制御パラメータの変更を行いながら最適点の探索を行っており、手順の一例としては以下のような形となる。

- (1) 各々の変数について、できるだけ少数の組み合わせを選んで最初の計測を行う。(スクリーニング)
- (2) 次にその中の最適点を出発点とし、より良好な性能を得られる変数の変化方向(ベクトル)をこの点の周りに各々の変数を変化させて計測を行うことにより求める。
- (3) ベクトルに沿って変数の組み合わせを変化させ、この線上での最適点を求める。
- (4) (2)に戻って、性能が飽和状態になるまで繰り返す。

ところが、複雑な最適化対象にこれを適用しようとするときさまざまな課題が発生する。たとえば、ステップ(2)において、複数目的で最適化を行おうとした場合には、この複数の目的間にトレードオフ関係があることが多く、最適な変化の方向が定義しにくい。あるいは、計測結果そのものにノイズがあるため、ベクトル方向が定まらない等の課題が発生する。さらに、パラメータ相互の依存性がある場合さらにこの課題は複雑化することになる。

そこで、これらの課題を解決するものとして、モデルベース適合(Model Base Calibration: MBC)という手法が提案され、これが現在の適合ツールの主流となっている。この手法のエッセンスはエンジンの性能を実測結果に基づいて「数学的なモデル」で表現することで、いかなるパラメータに対しても、エンジン性能を机上で推定可能とし、これに基づいて机上で最適化を行うという点である。具体的には、Figure 1のようなステップを踏んで最適化を行うことになる。このことにより、モデル化のステップで

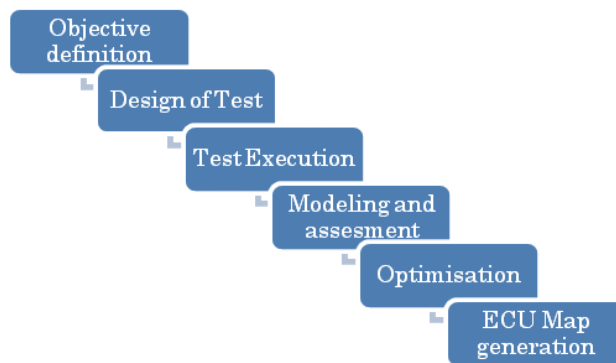


Figure 1 Steps of Optimization Based on MBC

計測のノイズを除くことができる、モデルを使用することで一つ一つの運転条件に対するエンジン性能が実ベンチの計測に比べてはやいためトレードオフ等の検討が容易となるなどの効果を得ることが可能である。以下の章では、この様なMBCに基づく最適化について、各ステップごとに説明を行うこととする。

### 適合内容の定義：Objective Definition

「ECUの適合」と言った場合、広義には、回転数と負荷が一定な「定常状態」におけるエンジン性能の最適化だけではなく、加減速等の「過渡状態」も含めた最適化、さらには現代の自動車に義務付けられている「自己故障診断機能(OBD)」に対する合わせ込みなど非常に広い範囲が含まれる。この中で、現在もっとも自動化が進んでいるのは、エンジンが定常状態で最適なエンジン性能を出すためのECUのパラメータの最適化(定常適合)であり、本稿ではこの部分について説明する。適合内容の定義とは、具体的には次の各項目を定義することを指す。

- (1) 目的関数の定義：最適化を行いたい性能とその方向(望小・望大)を定義することであり、たとえば燃料消費率の最適化、トルクの最大化などがあげられる。
- (2) 変数の定義：最適化を行うに当たって、どのようなエンジンの運転条件を変化させるかを定義することで、例としては点火タイミング、吸気・排気バルブタイミング、燃料の噴射タイミングなどがある。
- (3) 制約条件の定義：最適化を行うにあたって、エンジン性能または変数の範囲をどこまで許容するかを定義を行う。対象がHC排出量や燃焼の変動率などエンジン性能である場合、目的関数と混同されることがあるが、目的関数の場合には望小・望大特性となるのに対し、制約条件はある値以

下・以上もしくはある値を取ることが条件となる点が異なっている。

- (4)最適化する運転条件の定義：実際に最適化作業を行うためには、離散的な回転数と負荷の組を定義してやる必要がある。このような回転数と負荷の組の実例としては、乗用車がJC08などの規制モードを走行した際の走行頻度を解析して得られるモードの代表点の組などが通常用いられる。

この部分はツールではなく、主にエンジニアが判断することになる。

### 試験計画 Design of Test

エンジンの性能を「数学的なモデル」で表現するためには、パラメータの組合せによって定義される離散的な運転条件において、実際にエンジンを運転してその時のエンジン性能を測定する必要がある。この離散的な運転条件の組を生成する作業を試験計画と呼んでいる。直感的にわかるように、この運転条件の組が多ければ多いほどモデルを作成するための情報は多くなり、モデルの精度は向上する。しかし、実際のエンジンにおいて、十分安定した条件でエンジンの性能を測定するには、ある運転条件から次の運転条件まで移行する時間も含めて考えると1点当たり、数分から場合によっては10分以上かかることになり、むやみに多数の点を計測することはできない。たとえば、古典的な試験計画の一つであるFull Factorial (要因実験 総当たり法)を考えた場合、次の表にあるように、実験点数はパラメーターつ当たりの水準の数：Lとパラメータの数nを使って

$$\text{実験点数} = L^n$$

となり、5水準で6変数の場合15,625点となり、到底試験不可能な個数に達してしまう。

今日のエンジンは、吸排気バルブのタイミングやリフトの

Table 1 Experimental Score in the Case of Full Fractional 5 Levels

Number of parameters	Number of experiments
1	5
2	25
3	125
4	625
5	3125
6	15625

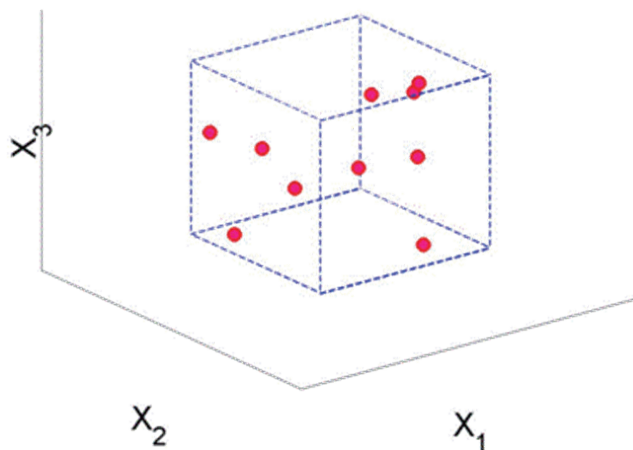


Figure 2 Image of Latin Hyper Cube

可変化、ガソリンエンジンの直噴化やディーゼルエンジンのコモンレールを採用等により、パラメータは容易に6個程度の数は超えてしまう傾向にあり、このような試験計画はもはや現実的ではない。このような課題を解決するために生み出されたのが実験計画法(DoE: Design Of Experiment)と呼ばれる手法であり、精度良い結果を効率的に得られるような実験を設計し、その実験で得られた結果を解析して結論を出すような手法である。MBCの場合、どのような試験計画を行うかはモデリングにおいてどのような手法を用いていくかということと密接な関係があり、「STARS Calibrate」では、モデリング手法であるSPM(後述)との相性を考え、Space Filling(空間充填法)の一種であるLatin hyper cubeという手法を用いている。この手法は与えられた空間をランダムに満たす手法で、3次元空間を例にとれば、Figure 2のようなイメージで実験点を生成することになる。

Full Factorialと異なり、実験点の数は数学的に一意に求まるわけではなく、モデリングの精度との関係で決定していくことになる。「STARS Calibrate」では、Ricardo社での経験に基づいて、パラメータの数に基づいて、推奨する試験点数を自動で演算する機能も備えている。実際には、モデル化しようとしているエンジン性能の複雑さによりこの点数は変更が必要な場合があるが、パラメータの数が多いほどFull Factorialとの実験点数の差は大きくなり、6パラメータの場合、1/100~1/200まで実験点数を減少させる可能性も持っている。また、実際のエンジンの運転領域はこのような「立方体」形状ではなく、たとえば、低負荷領域では安定した運転が可能なバルブタイミングの範囲が狭められるなど複雑な形状となることが多いが、そのような場合でも全く問題なく試験計画を定

義できるという特徴も持っている。

### 試験の実行 Test Execution

前ステップで試験計画が出来上がったので、実際の試験を行い、エンジン性能を測定することになるが、従来のエンジンの試験とはいくつか異なった部分がある。その一つは、実験の精度を従来以上に要求することである。DoEに基づいて実験点を最小化し、その限られた計測点に基づいて「数学的なモデル」を作っていくわけであるから、一つ一つの実験結果の精度の結果への影響は従来以上に大きくなる。また、従来のように、エンジンの最適化をエンジンベンチ上でパラメータを変えながら行っていた際には、直前のパラメータの組合せの計測結果と良し悪しを比較するので、極論すれば「相対評価」が出来る精度でよかったものが、「絶対評価」出来る精度を要求することになる。そのため、エンジンの組み立てやす合わせ運転の方法、温調装置や吸気の供給装置をはじめとする周辺装置、排気ガスや燃焼の測定装置の各々に精度を要求することになる。これらをECU適合ツール側で解決する手段として、実験の途中で装置のパーズや校正を行うことが有効であるが、「STARS Calibrate」では、試験エディタ上のドロップダウンボックスなどの容易な手段でこのような動作を設定することができる。また、試験計画に基づいて、パラメータを変更した後、実際の性能の計測を行う前には、一般には安定待ち時間を設けているが、計測精度を優先するあまりこの時間を長めに設定すると、一点当たりの計測時間が長くなり、実験効率が低下してしまう。この相反する要求を高い次元で両立させるため、「STARS Calibrate」では単純に時間によるのではなく、計測項目が安定したことを確認してから計測を開始できるような機能も標準で搭載している。

もう一つの課題は、試験計画で定義した運転条件が、実際には、エンジンの失火、ノッキング、排気温度の過昇などにより運転できない可能性があるということである。通常の自動運転では、このような条件が発生した場合、試験を中断し、エンジンを停止させることが一般的である。ところが、MBCによる実験では、DoEにより最適化されているとはいえ、多数の実験点を運転する必要があるため、そのたびに実験が停止し運転者が介在

するのは非常に効率が悪くなる。「STARS Calibrate」では、このような課題を解決するためにあらかじめ設定した手順に従って、

- (1) 運転が困難なポイントの計測を中断し、次のポイントを計測する
- (2) または、運転が困難なポイントについて、試験計画で定義したパラメータの組の代わりに実験可能なパラメータの組合せを探索し、その代替条件で計測する

等の機能を備えており、実験者が介在することなく効率的に自動で試験を継続することを可能としている。

### モデルの生成と検証 Modeling & Assessment

すでに述べたとおり、MBCにおいてモデルの生成は心臓部と言える。エンジンの開発において「モデル」といった場合、様々な意味があるが、MBCにおけるモデルとは純粋に「数学的なモデル」であり、物理現象や化学現象をシミュレーションするわけではない。モデルは、しばしば応答曲面(Response Surface)という名前でも呼ばれており、その本質は、昔エンジニアが離散的な実験結果を雲形定規で結んでいたものに近いともいえる(Figure 3)。このMBCにおけるモデルには、一般的に以下のような特徴がある。

- (1) モデルは、燃料消費率やHCなどの排気ガス濃度などの個々のエンジン性能に対して各々別個に生成する
- (2) モデルは実験結果を折れ線ではなく、何らかの

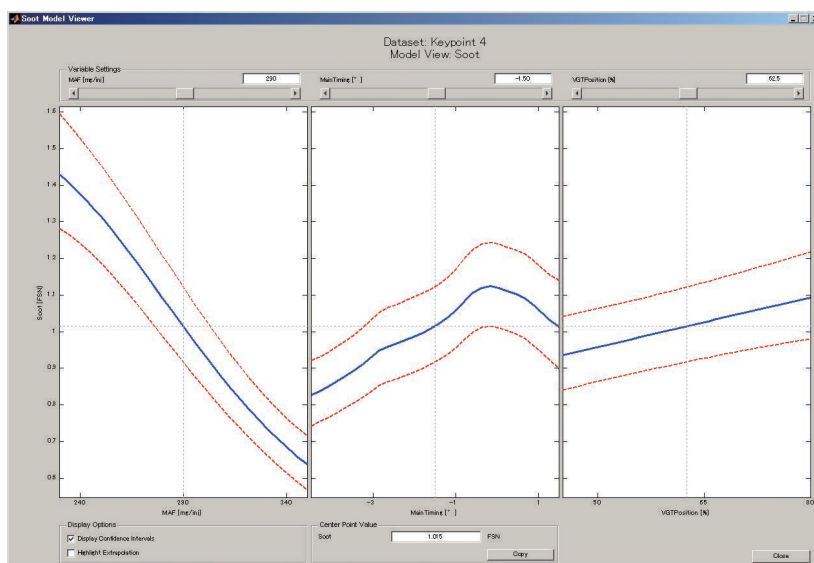


Figure 3 Display Example of Model Prepared with 3 Parameters  
(図中青実線がモデル、赤点線は信頼性区間)



滑らかな曲面で結んでいる。

- (3)そのために、生成されたモデルは実験結果のポイントそのものを通るとは限らない。このことにより、実験結果のノイズに左右されすぎない本来のエンジン特性を表現できる可能性がある。
- (4)雲形定規と異なり、パラメータに関して多次元の方角で面を作ることができる。そのため、最新のエンジンのような多数のパラメータを取り扱うことができる。

この滑らかな曲面の生成の方法として、当初は取り扱いの容易さと計算負荷から2次の多項式が採用されていた。ところが、エンジン性能の中には、ノッキングや燃焼変動率(CoV)など、途中から急激に性能が変化しだす物があり、最近のエンジンではパラメータの増大と合わせて、2次の多項式では十分に実用的な近似を得ることが難しくなっている。この課題の解決法として、ニューラルネットワークやRBF(Radial Basis Function)などの手法を用いるものもあるが、十分に実用的な精度を得るには、モデリング条件を注意深く合わせてやる必要があり、実験者の使い勝手という面では課題があった。それに対して、「STARS Calibrate」では、Ricardoで実績のあるSPM(Stochastic Process Models)というモデリング手法を用いている。これは「Kriging」や「DACE (Design and Analysis of Computer Experiments)」として知られる統計的な手法の発展形であり、以下の特徴がある。

- (1)ノイズの多い計測結果でも比較的良いモデリング結果が得られる
- (2)特に実験点数が多くない場合でもほかの手法に比べて精度が出しやすい
- (3)途中から急激な変化をおこすような非線形性の高いエンジン性能もモデリング可能
- (4)設定が簡単で誰でも精度のよいモデルが得やすい

このうち、途中から急激に変化するようなエンジン特性への適合性について2次の多項式と比較した結果をFigure 4に示す。

なお、このようにして生成したモデルを用いて次ステップである最適化を行うわけであるが、モデルの精度がそのまま最適化の精度を左右することになるので、モデルを作成したら、その精度を評価し、必要に応じ、異常計測値の削除などのモデルの調整を行ったり、場合によっては

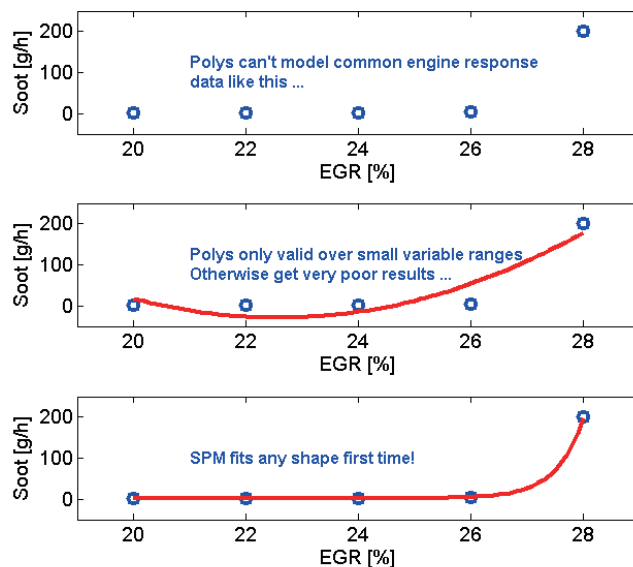


Figure 4 Model Comparison by Quadratic Equation and SPM

実験点数の増大や試験精度を向上した再試験をしたりといった対応が必要となる。「STARS Calibrate」では、このようなモデルの精度の評価手段として、決定係数( $R^2$ )・二乗平均誤差(RMSE)などをモデルと実測値の間だけではなく、交差検定結果に対しても計算するようにしている。加えて、モデルと実測値の差：残差をグラフィカルに表示する機能も備えることで、そこから直接に異常計測結果の除外等の操作を行い、モデルの作り直しを行うことができる。

### 最適化 Optimization

MBCにおいて最適化とは、前ステップで作成したエンジン性能の「数学的なモデル」を用いて、有限個数のエンジンの運転条件(エンジン回転数、負荷)において各々最適なパラメータの組合せを決定することである。その際に、モデルを作成したことにより、どのようなエンジンの制御条件(パラメータの組合せ)に対しても瞬時にエンジン性能が演算できるため、エンジンベンチ上で実エンジンを運転するよりも幅広い組み合わせについて短時間に検討を行うことができ、多数のパラメータ間やエンジン性能間の相互影響も適切に評価することができる。この相互影響の評価の例として、目的関数が複数の場合に、旧来の最適化ツールは、下記の例のような「評価関数」という概念を導入し、複数目的最適化問題を単一目的最適化に置き換えて解析していた。

$$\text{評価関数} : Q(\text{HC}, \text{NO}_x) = \text{HC} + k\text{NO}_x$$

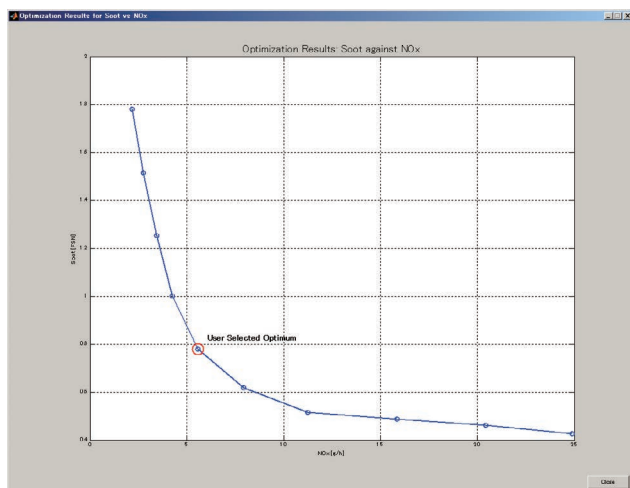


Figure 5 Pareto Solution Display of Double Objective Function (図中青実線がパレート解, 赤丸がピックアップした最適点)

しかし、この旧来の評価関数は、確かにトレードオフを示しているが、係数kの選び方によって最適解が異なってしまうことであり、kを「適切に」設定することが困難だという課題を抱えていた。そのため、最新のMBCツールの多くがFigure 5のようなパレート解を提示し、そこからエンジニアが最適点をピックアップするようになっている。これにより、どこまでの範囲であれば他方の性能を著しく悪化させずに一方の性能を改善できるか直感的に判断できるようになっている。

「STARS Calibrate」では、このパレート解の生成にはNBI法(Normal Boundary Intersection)を用いており、GA(遺伝的アルゴリズム)を用いる手法と比べて、極めて簡単な設定で十分に実用的なパレート解を求めることが可能である。この基本的な条件に加えて、実際のエンジンの最適化においては、目的関数以外にも考慮すべきことが多い。「STARS Calibrate」においては、下記の要件についても考慮した最適化を行うことが可能である。

- (1)パラメータ変更範囲の制約：たとえば、バルブタイミングの変更範囲がある範囲に絞って最適化を行うことが可能。
- (2)応答曲面の値の制約：前ステップでモデルを作ったエンジン性能、たとえばノック強度や燃焼変動率(CoV)の上限を考慮した最適化が可能
- (3)モード全体の最適化：複数の

定常条件の重み付け積算モード(例：重量車両や汎用エンジンの排気ガス規制モード等)に対して、モード全体の制約条件、たとえばモード積算のHC等の排出量の上限値を考慮した最適化が可能

### ECUマップの生成 ECU Map Generation

エンジンの定常適合の最終的な成果物は、最適化されたECUのマップである。ECUマップとは一般に二次元のルックアップテーブル(表)であり、縦軸：エンジン回転数、横軸：エンジンの負荷に対してパラメータの値を定義しており、ある運転条件(エンジン回転数、負荷)の条件でパラメータの値をどうするかを定義している。前ステップの最適化結果により、各々の運転条件において、個々のパラメータの値をいくつにすればよいか分かっていて、この結果からECUマップを生成する。その際に、このルックアップテーブルの縦軸の行数と横軸の列数は各々数十に及ぶことがあるので、格子点の数はこの二つの掛け合わせにより、数百に及ぶことがあるが、このそれぞれの格子点に対してパラメータの値を決定する必要がある。それに対して、一般的には最適化した点の数はそれよりもずっと少ないことが多く、この最適点の間は内挿(外挿)することによりすべての格子点の値を決定する。「STARS Calibrate」では、この補間関数には一般的なSpline関数とSPMのいずれかを選択して用いることができ、比較的少ない最適化結果から効率的に格子点のパラメータの値を滑らかに生成することが可能である(Figure 6)。

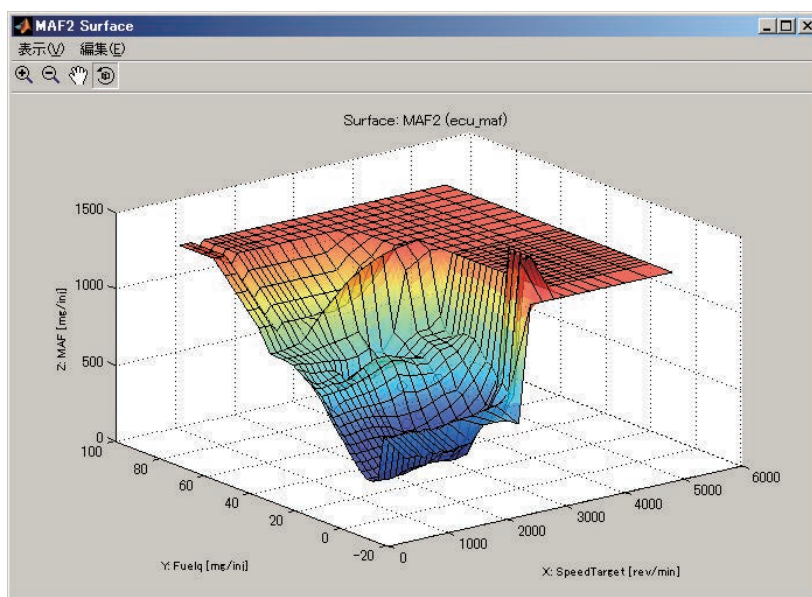


Figure 6 Example of Optimized ECU Map (縦軸：エンジン回転(Speed), 横軸：燃料流量(Fuelq), パラメータ：空気量(MAF2))

また、実際の最適化はエンジンのすべての運転領域を一回で行うことは少なく、たとえば中程度の回転数と中程度の負荷の範囲など、領域を限って順次行うことが多いため、最適化結果をもとのECUマップのこの部分にだけ反映し、それ以外の部分は元のマップのままとすることも可能である。最終的に生成されたマップは一般的なCSV形式やECU専用のフォーマットであるDCM等の形式で保存、エクスポートすることも可能である。

## まとめ

近年のエンジンの複雑化により、ECUの適合はMBC（モデルベース適合）と呼ばれる手法を行うことで効率化を図ることが多くなっており、当社がRicardo社と共同で開発した「STARS Calibrate」はこの手法に基づく開発ステップを一貫してサポートしている。この「STARS Calibrate」ツールにより、ECUの適合は以下の諸点で効率化を行うことができる

- (1) DoEに基づく試験計画により、実験点数を最小化することができる
- (2) 実験精度の確保と運転の継続性を考慮した自動試験によりエンジン実験の省人化と短縮化が図れる
- (3) 簡単な設定で十分な精度を出すことができるモデリングと最適化の手法により、導入当初から、あるいは人によらず、精度よく運用できる

特に特長的なのは、(3)項にあるように、SPMをはじめとする最新の手法を採用することにより、ユーザーに複雑な設定を要求せずとも十分な精度を提供できることであり、ぜひお使いになっていただきたいと思う。



塩見 和広

Kazuhiro SHIOMI

株式会社 堀場製作所  
経営戦略本部 自動車計測事業戦略室  
Powertrain ビジネスオーナー  
マネジャー



# Feature Article

アプリケーション

## 京都本社ラボに新規導入した 駆動系評価システムの紹介

Introduction of Driveline Test System newly Installed in the Laboratory  
at HORIBA Kyoto

池田 浩之

Hiroyuki IKEDA

駒田 峰之

Mineyuki KOMADA

近年の自動車は、環境意識の高まりを背景に変速機の多段化やCVT化など複雑化が進み、さらにはハイブリット車(HV)や電気自動車(EV)など電動化が進んできている。このような複雑さが増した車両開発への対応として、駆動系の評価の重要度が増大し、さらには駆動系単体ではなく、エンジンやモータと組み合わせたパワートレイン全体のシステム試験に重点が置かれるようになってきている。弊社ではこのような、顧客殿のニーズに直結した技術力の一層の向上と顧客殿に私達のソリューション価値を実感をして頂く為に、京都本社に駆動系の単体・システム評価とさらにはE-Motorの評価に共用できるフレキシブルなシステムを導入したので、その特徴について紹介する。

Recent automotive vehicles are increasing in sophistication due to the awareness of environment impact. As a result, automatic transmissions with increased gears and CVTs, as well as electrically driven vehicles, HVs and EVs, are expanding. The development of these complex vehicles is making driveline evaluation more important than before. These evaluations focus not only on driveline units, but the power-train system which includes the engine and/or e-motor. This exposition features a flexible driveline test system installed at HORIBA (Kyoto) that can evaluate driveline units, e-motors and power-train systems. The system recognizes HORIBA's capability for technological advancements, to find solutions and satisfy customer needs.

### はじめに

近年、環境意識の高まりを背景に、よりエネルギー効率のよい、あるいは排ガスの少ない次世代自動車の開発が盛んである。その開発現場では、エンジンの評価はもちろん、エンジンからの動力をタイヤに伝えるまでの機構、いわゆる「駆動系」の試験も欠かせない。最近では、変速機の多段化、さらには連続可変トランスミッション(CVT)の採用など、駆動系も複雑化しており、それらの開発に対応できる試験システムが求められている。また、ハイブリット車(HV)や電気自動車(EV)など、車両の電動化も大きな流れとなっている。このような電動車両には、動力源としてモータ(E-Motor)が欠かせない。E-Motorと一

口に言っても、駆動・発電兼用のものや発電専用のもの、エンジンやトランスミッションへのビルトインモータやインホイールモータなど、多様化が進んでいる。電動車両の駆動系実験においては、このようなE-Motorと、たとえばオートマチックトランスミッションとを組み合わせた試験なども必要である。

次世代自動車の開発現場では試験対象が複雑化するとともに、試験項目や適合作業も大幅に増加している。さらに、車両開発プロセス全体を見渡すと、エンジン、トランスミッションの並行開発が必須で、開発のフロントロディングが一層求められている。そのため、試験システムに対しても、テストアプリケーションへの適合性と拡張

性、試験装置のワイドレンジ化といったフレキシブルな機能が要求されている。HORIBAグループでは、多様なニーズにより具体的に應えるべく、2013年2月、京都本社での試験ラボの機能を一新した。本稿では、新しく設置した、駆動系評価・E-Motor評価の共用システムについて紹介する。

## 評価装置の一般的な構成

### 駆動系評価システム

「駆動系」とは、エンジンやモータからの出力を、車両を動かす力としてタイヤに伝えるための変速機やシャフト等の構造物を指す。さらに、自動変速機などの制御系を含めることもある。駆動系開発現場では、変速機単体の評価だけでなく、エンジンと組み合わせた状態でのさまざまな性能・信頼性評価が行われる。そのため、新規のパワートレインシステムを開発する場合など、個々のユニット完成後に組み合わせ試験を開始していたのでは、不具合発生時の仕様見直し等により開発期間が長大化しがちである。そこで必要とされるのが、エンジンが完成する前にトランスミッション評価を開始することのできる、駆動系評価システムである。

Figure 1に駆動系評価システムの代表例として、一般的な前輪駆動車用のトランスミッション評価システムのレイアウトを示す。中央に配置されているのはダイナモメータと呼ばれる装置で、エンジンの代用、いわば「バーチャルエンジン」として機能する。また、ドライブシャフトの左右にも、車両のタイヤの代わりとして「ホイール用ダイナモメータ」が設置されている。このように、エンジンやタイ

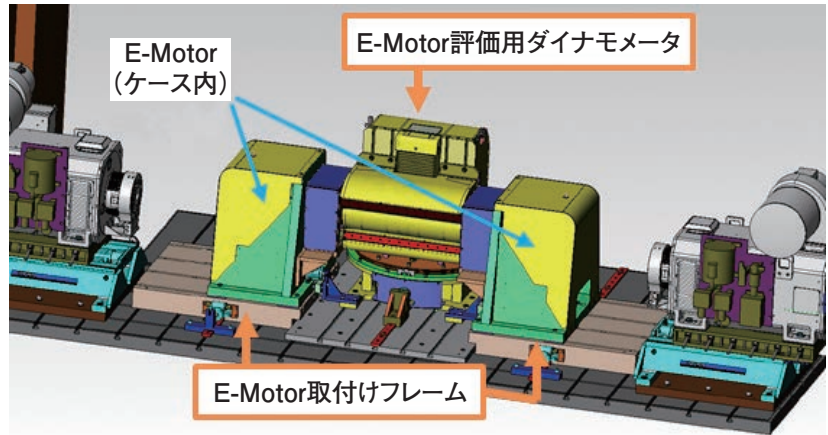


Figure 2 E-Motor Evaluation System Layout

ヤをダイナモメータで置き換えることで、開発プロセスにおける組み合わせ試験のフロントローディングが可能になる。

### E-Motor評価システム

Figure 2に、E-Motor性能評価試験装置のレイアウトの例を示す。E-Motorは、ハイブリッド車や電気自動車に、エンジンと同じような動力源、あるいは発電用として搭載される。E-Motorの試験の場合も、モータの負荷を再現するために、やはりダイナモメータが接続される。E-Motorでは、搭載される車両の仕様によって、最高回転数やトルク範囲の要求が大きく異なる。加えて、E-Motorの開発に際しては、効率・信頼性評価の他、インバータ・モータ適合、エネルギー管理管理等、多岐にわたる試験が必須である。そのため、E-Motor評価システムには、幅広い制御・計測レンジをもち、かつ高速応答が可能なダイナモメータが必要とされる。

## 新規導入したシステムの構成

### 主な構成ユニット

Figure 3に、今回導入した評価システムのブロック図を示す。このシステムは、メインとなるダイナモメータをバーチャルエンジン用、E-Motor評価用に共用できる仕様になっている。以下に、図中の主なユニット(①～⑦)の特徴を説明する。

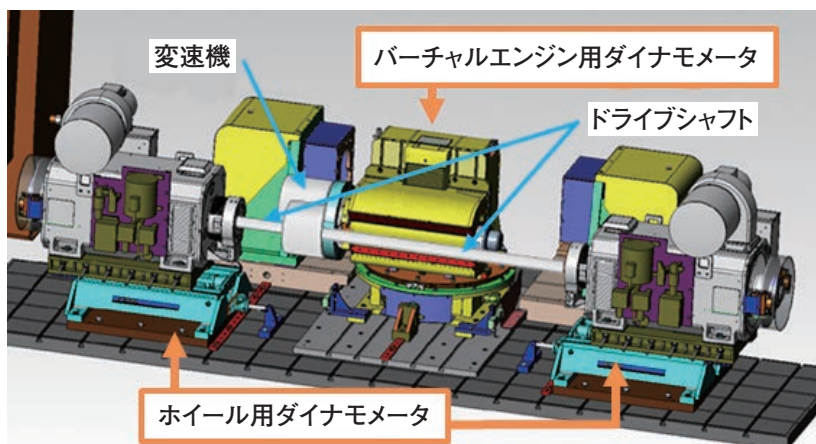


Figure 1 Front Wheel Drive Transmission Test System Layout

## 本社試験ラボ駆動系評価システムブロック図

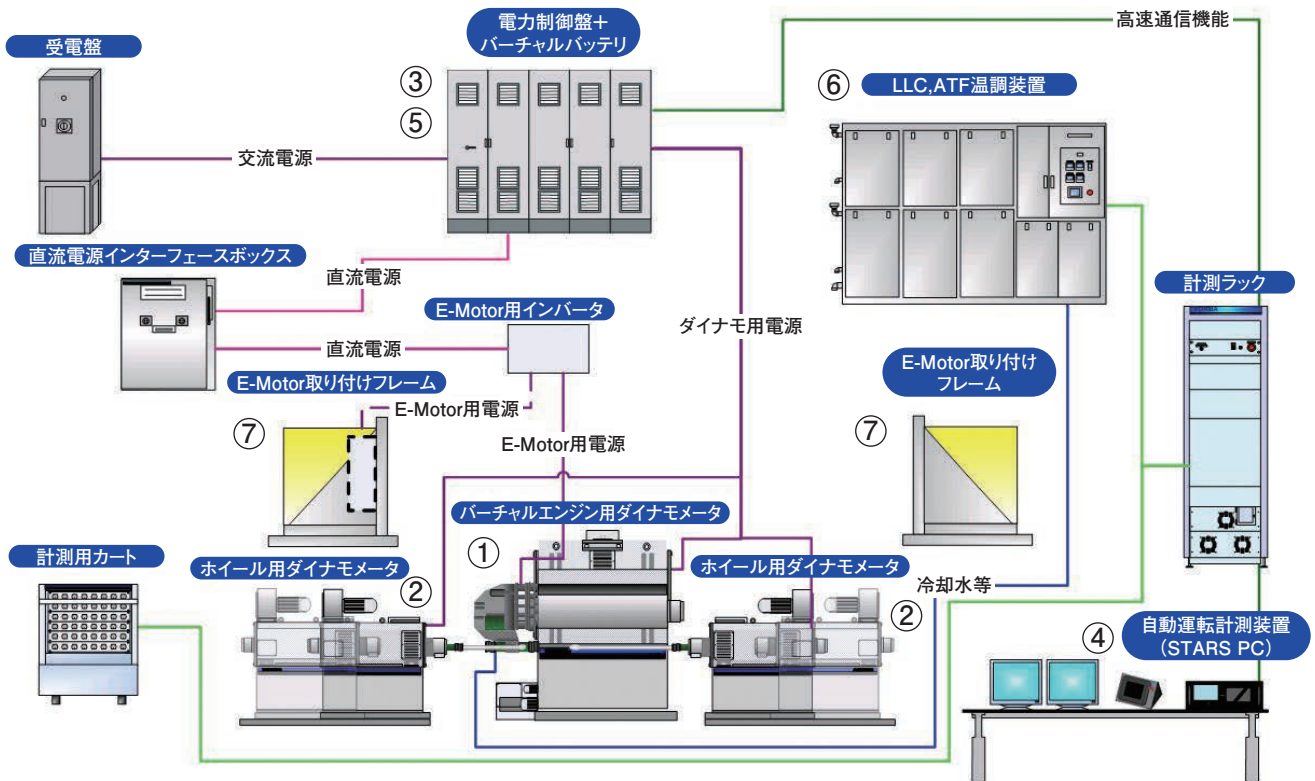


Figure 3 Driveline Test System block diagram in laboratory at HORIBA Headquarters



Figure 4 TP-260 Front View

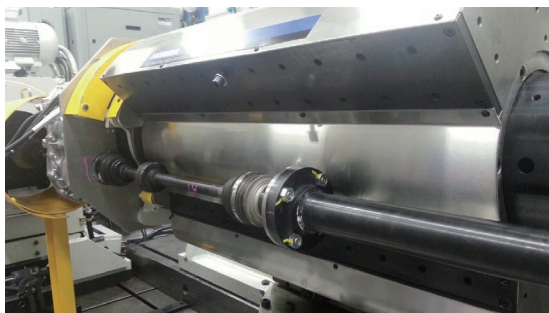


Figure 5 TP-260 Side view

### バーチャルエンジン/ E-Motor用ダイナモメータ①

バーチャルエンジン用、およびE-Motor試験用のダイナモメータには、HORIBA低慣性ダイナモTP260を使用している(Figure 4)。TP260は、定格出力260 kW、定格トルク450 Nmの性能をもつ。あわせて機械慣性量を低く抑え、電気慣性機能を組み合わせているため、広範囲の慣性量に対応できる。

TP260の定格出力・トルク性能は、バーチャルエンジンとして、乗用車(3000 cc程度)クラスのエンジンに相当する。また、小径であるため、トランスミッションの出力軸をまっすぐに配置することが可能である(Figure 5)。加えて、上下移動機構を備えており、車軸とエンジンとの高低差を再現することもできる。このように、TP260では、車両のトランスミッション搭載状態を再現した駆動系評価が実現できる。また、制御ソフトウェアには、後述するエンジンシミュレーション機能も含まれている。

また、TP260は、高回転・低慣性仕様であり、E-Motor試験で要求される、エンジンの2倍以上に達する高回転、およびエンジンよりはるかに速い応答性の要求に対応でき



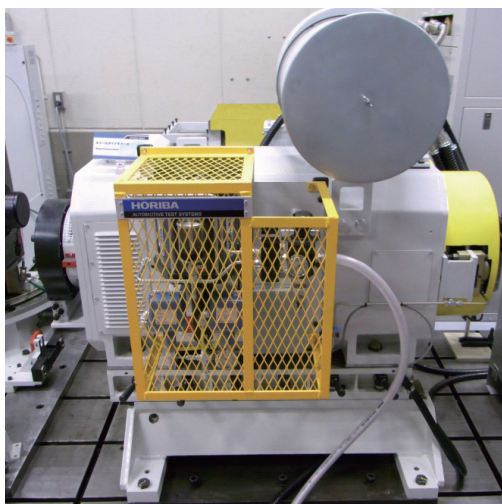


Figure 6 G224 Outline View

る。また、両サイドに計2式のE-Motorを接続し、同時に評価できることも、E-Motorの開発期間短縮に貢献する特徴といえる。

#### ホイール用ダイナモメータ(②)

車軸トルク吸収のためのホイール用ダイナモメータ(HORIBA製G224, Figure 6)2式は、それぞれ、定格出力224 kW、最大トルク約4000 Nmの性能をもつ。機械慣性と電気慣性とを組み合わせる方式により、車両の走行抵抗をシミュレーションできる。また、本装置では機械式の保持ブレーキ機能を追加装備し、完全なゼロ速度を実現している。これは、オートマチックトランスミッションの発進時のトルク(ストールトルク)を試験するためには、完全停止状態の再現が必要で、通常のダイナモメータだけでは熱や制御上の課題があることによる。

#### 電力制御盤・バーチャルバッテリー(③⑤)

HV/EV用パワートレインシステムの試験では、E-Motorの電源が必要である。電源としてバッテリーを用いる場合、試験の再現性を確保するには、充放電などバッテリー条件の統一が不可欠である。ところが、バッテリーの出力は、外気温や充電状態(SOC: State Of Charge)、劣化度合いなどにより変動する。また、試験中にバッテリーのSOCが上下限を超えない配慮が必要で、試験パターンに制約が生じる場合もある。このような背景から、本システムでは、E-Motor電源として、直流電源を「バッテリーモデル」に基づいて制御する方式(バーチャルバッテリー)を採用した。このバーチャルバッテリーでは、専用のソフトウェアにより、種々のバッテリーの性能を模擬できる。初期値として、代表的なバッテリーモデルを提供できるほか、バッテリーのパラ

メータを変更して、独自のバッテリー特性を定義することも可能である。実バッテリーを使用する場合に比べて試験の効率化、再現性・信頼性向上が見込め、バッテリーとエネルギーシステムの並行開発に大いに貢献すると考える。

バーチャルバッテリーに使用している直流電源の能力は、乗用車クラス相当の200 kWである。この直流電源はダイナモメータの運転に使うインバータと同じ電力盤内に収納されており、回生効率をアップさせることで電力消費量を抑制している。さらに、特殊なインターロック機構を備えた専用の直流電源インターフェースボックスを採用するなど、安全面にも配慮している。

#### 自動運転計測装置(④)

本システムによるトランスミッション評価およびE-Motor評価は、自動運転計測装置(HORIBA製STARS)にて制御される。STARSには、ユーザが独自にシーケンスを作成できるワークフロー機能、テストスケジュール機能、演算、およびスクリプト言語など、さまざまな試験自動化機能が実装されている。加えて、電力計測やECUの読み書きを含め、100種類以上の計測機器との通信I/Fをサポートしており、さまざまな試験に対応できる。また、オートマチックトランスミッションやCVTの試験では、STARSの演算機能を用いて、バーチャルエンジン側からトランスミッション制御用ECUに各種情報を送信することも可能である。

#### LLC・ATF温調装置(⑥)

LLC・ATF温調装置は、ロングライフクーラント(LLC)およびオートマチックトランスミッションフルード(ATF)の温度を制御する装置である。トランスミッション、E-Motorおよびインバータの温度条件を安定させることで、評価試験の効率化と、データの再現性・信頼性向上の効果がある。なお、E-Motorが供試体の場合は、仕様に合わせ、温調装置と供試体のいずれのポンプを使用するかを選択できる。加えて、液面制御機能を搭載しており、さまざまな供試体および試験モードに対応できる。

#### E-Motor取付けフレーム(⑦)

E-Motorの最高回転数は、エンジンと比べて2倍以上に達する場合が多い。このような高速回転に対応するためには、E-Motorを支えるフレームの共振を考慮する必要がある。本システムのE-Motor固定フレーム(Figure 7)の設計にあたっては、固有振動数が最大回転数以上にな

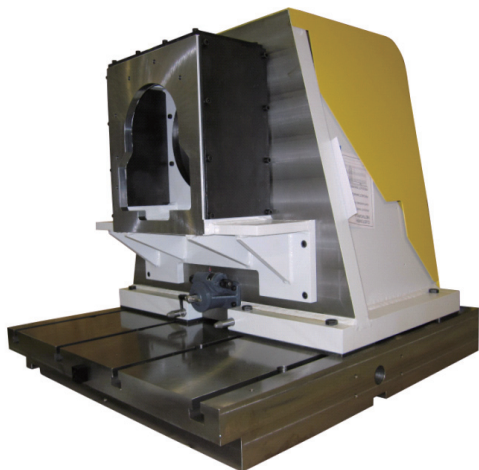


Figure 7 E-Motor Mounting Frame

るよう、CAEによる最適化を行い、共振のリスクを回避している。

### レイアウト上の工夫

前述の通り、本システムはE-Motorや駆動系の種々の試験に対応しているが、供試体によってはレイアウトの変更が必要である。そのような供試体設置の準備時間を短縮するため、本システムは以下のような可動機構を有している(Figure 8)。

- バーチャルエンジン/E-Motor用ダイナモメータ：  
前後移動機構①、回転機構②、上下移動機構③
- ホイール用ダイナモメータ：  
左右移動機構④、アライメント調整機構⑤
- E-Motor取り付け用フレーム：前後移動機構⑥

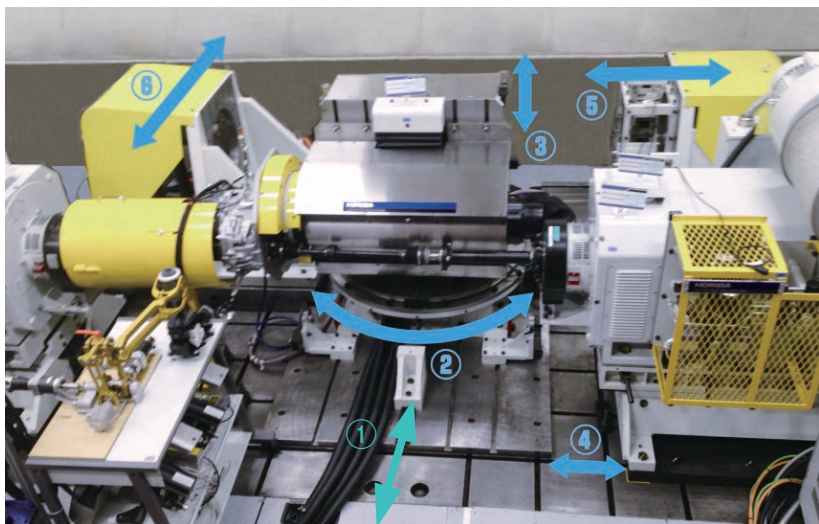


Figure 8 Positioning Mechanism of Dynamometer and Frame

## シミュレーション機能

### エンジンシミュレーション

以下に、本システムに搭載されているエンジンシミュレーション機能を紹介する。これらはいずれも、駆動系の試験をバーチャルエンジンで行うために必要とされるものである。

### エンジントルクマップシミュレーション(EMS)

実エンジンでは、出力されるトルクはスロットル開度と回転数で決定されており、また同一スロットルでも回転数により出力トルクは変化する。スロットル/回転数/トルクの間関係を正しくシミュレーションするのがEngine Torque Map Simulation機能であり、これにより、ギアごとの加減速の正確な評価などが可能になる。

### エンジン慣性シミュレーション(EIS)

変速時のように回転数が変化する条件では、慣性によるトルクが、変速ショックを引き起こすなどして評価結果に影響する。本システムでは、Engine Inertia Simulation機能により、実エンジンに相当する慣性力を電気慣性として模擬し、実エンジンの回転数変化時のトルク応答を再現している。

### エンジン制御信号シミュレーション(ECS)

実エンジンを用いたトランスミッションの評価試験では、エンジンコントローラとトランスミッションコントローラとの間でさまざまな信号を送受信している。本システムでは、Engine Control Signal Simulation機能を用いて、これをバーチャル環境で再現している。変速時のトルク減衰や、燃料カット、上死点といった模擬信号を各コントローラと通信し、変速ショックなどをシミュレーションすることができる。

### エンジントルクパルスシミュレーション(ETPS)

トランスミッション内のギアの信頼性評価や、ねじり振動影響を受ける部品の評価には、エンジンの爆発トルク変動による影響を考慮する必要がある。本システムでは、これを、Engine Torque Pulse Simulation機能として実現している。Figure 9に、4気筒ガソリンエンジンの模擬波形を示す。赤線が計算にて求められた理論燃焼トルク波形、黄線

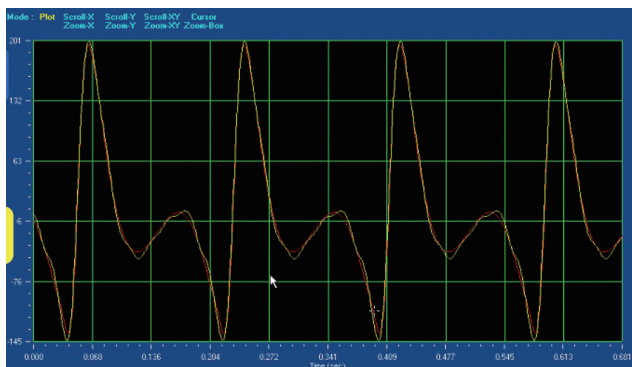


Figure 9 Simulated Wave Form by ETPS(4 cylinder gasoline engine)

が実際に台上で再現した燃焼波形である。この機能を用いることで、より実車条件に近い、信頼性評価や振動評価が可能である。

### ハードウェアインザループシステムと 評価システムの連携

車両のモデルベース開発が推奨される昨今、設計の妥当性検証はシミュレーションにて行われるのが一般的である。その場合、検証に使用する車両モデルと、駆動系試験ラボで使用されるモデルとの整合性が大きな課題となる。本システムでは、この課題を解決するために、シミュレーションモデルを任意のハードウェアインザループシステム(HILS)環境上で動作させ、リアルタイムに車両シミュレーションを行う。さらに、駆動系試験装置との間を高速同期通信させ、シミュレーションと実機を接続することで、連携を可能としている。この高速同期通信は、市場にある代表的なHILSハードウェアと時間遅れなく安定に通信でき、既存のHILSハードウェアやその上で動作するシミュレーションモデルの有効活用が可能である(Figure 10)。



Figure 10 High Speed Synchronized Communication Image with HILS

### おわりに

本稿では、京都本社の試験ラボに導入した駆動系評価・E-Motor評価システムの特徴および機能概要について紹介した。本システムの仕様は、ユーザの開発効率向上、試験期間短縮に貢献できるものと確信している。また、近年の中国の自動車関連産業の拡大を受けて、当社の上海に

も同様のラボを導入済みであり、京都ラボとの関連試験も予定している。今後、市場ニーズにより密着したアプリケーション拡張のため、これらの設備を活用して、ユーザからの要望に応えられる機能や試験方法の創出に継続的に取り組んでいく。そして、日本、中国をはじめグローバルのユーザに向けた、一層の提案力の強化に繋げていきたい。



池田 浩之

Hiroyuki IKEDA

株式会社 堀場製作所  
開発本部 エンジニアリングセンター  
自動車計測システム設計部



駒田 峰之

Mineyuki KOMADA

株式会社 堀場製作所  
開発本部 エンジニアリングセンター  
自動車計測システム設計部



## 動的走行抵抗模擬のためのスリップシミュレーション

### Wheel Slip Simulation for Dynamic Road Load Simulation

Bryce Johnson

翻訳

池田 浩之

Hiroyuki IKEDA

近年燃費規制が厳しくなり、自動車メーカーはエンジンから路面までに至る全ての駆動系ユニットに対して高効率化を余儀なくされている。その為、駆動系ユニットとしてハイブリッド用トランスミッションやバッテリーは、多くの車両に搭載されるようになってきている。運転者は車両に対しても高性能を求め続けている。横滑り防止装置やアンチロック・ブレーキ・システムのような安全装置は一層複雑になってきている。これらの背景から、自動車メーカーはより一層の要求を、車両試験装置に求めるようになってきている。要求される試験に関しては、車両慣性や空気抵抗のような単純な車両負荷を模擬するだけではなく、過渡の駆動系負荷を模擬する装置が要求されている。以前は、SLR (Service Load Replication) を用いて過渡負荷を模擬することが可能であったが、トランスミッションのシフトチェンジや車載コンピュータからのトルク制限など、非線形の場合はSLRでは試験することができない。非線形の駆動系への過渡負荷を正しく模擬する唯一の方法は、車両シミュレーション、ホイール・タイヤ・路面モデルシミュレーションを導入することである。パワートレインコントローラ[SPARC]に実装されたHORIBAホイールスリップシミュレーションにより、このホイール・タイヤ・路面モデルシミュレーションを実現することができた。

Increasingly stringent fuel economy standards are forcing automobile manufacturers to search for efficiency gains in every part of the drive train from engine to road surface. Safety mechanisms such as stability control and anti-lock braking are becoming more sophisticated. At the same time drivers are demanding higher performance from their vehicles. Hybrid transmissions and batteries are appearing in more vehicles. These issues are forcing the automobile manufacturers to require more from their test stands. The test stand must now simulate not just simple vehicle loads such as inertia and windage, but the test stand must also simulate driveline dynamic loads. In the past, dynamic loads could be simulated quite well using Service Load Replication (SLR<sup>\*1</sup>). However, non-deterministic events such as the transmission shifting or application of torque vectoring from an on board computer made SLR unusable for the test. The only way to properly simulate driveline dynamic loads for non-deterministic events is to provide a wheel-tire-road model simulation in addition to vehicle simulation. The HORIBA wheel slip simulation implemented in the SPARC power train controller provides this wheel-tire-road model simulation.

\*1: Service load replication is a frequency domain transfer function calculation with iterative convergence to a solution. SLR uses field collected, time history format data.

## はじめに

タイヤ-ホイールシミュレーションの必要性を理解するためには、まず、試験装置で再現すべき駆動系の動力学に関して理解する必要がある。テストコース上で、停止状態から急激に加速するマニュアルトランスミッション車両における、左側のホイールの速度とトルクを **Figure 1** に示す。クラッチが瞬時に接続され、乾いた路上でタイヤがスピンし、車両のアクスルシャフトでトルクと速度の大きな偏差が発生していることがわかる。トルク応答と速度応答の重要な指標は、トルク変動および速度変動の周波数・振幅・減衰である。

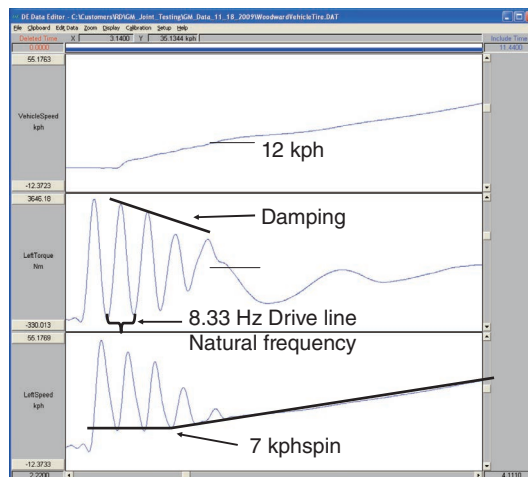


Figure 1

### 車両駆動系の応答

タイヤ-ホイールの速度とトルクの振動応答は、駆動系内の複数の“ばね”-“質量”-“ダンパ”系によって引き起こされ、クラッチが接続されたときの支配的な周波数は駆動系の固有振動数である。その周波数は乗用車や軽トラックの場合、一般的に5 Hzから10 Hzの範囲内と言われており、二つの慣性と駆動系のばね定数に大きく依存している。

### 試験装置における車両

車両を試験装置にセットさせる時、タイヤとホイールが外され、ダイナモメータが代わりに取り付けられる。(Figure 3の黄色で示されるユニット)駆動系の応答を再現するためには、タイヤの慣性、減衰、ばね定数、タイヤ-路面を模擬しなければならず、“タイヤ”-“ホイール”の慣性は同等の慣性をもつダイナモメータと置き換える必要がある。それは、駆動系の固有振動数応答を正しく再現するための唯一の方法であったが、問題は、そのような低慣性を持つダイナモメータに使用されているモータの生産コストが非常に高いことにある。

HORIBAグループは、比較的安価なダイナモメータと“タイヤ”-“ホイール”の慣性を模擬するための特別な制御方法を用いてこれを解決した。今までの“ホイール”-“タイヤ”-“路面”を模擬するHORIBAグループのソフトウェアとハードウェアは、“ホイールスリップシミュレーション”と呼ばれ、路面抵抗を付加した“車両シミュレーション”を追加した。この“車両シミュレーション”は、HORIBAパワートレインコントローラSPARC上で実行される重要なソフトウェアである。

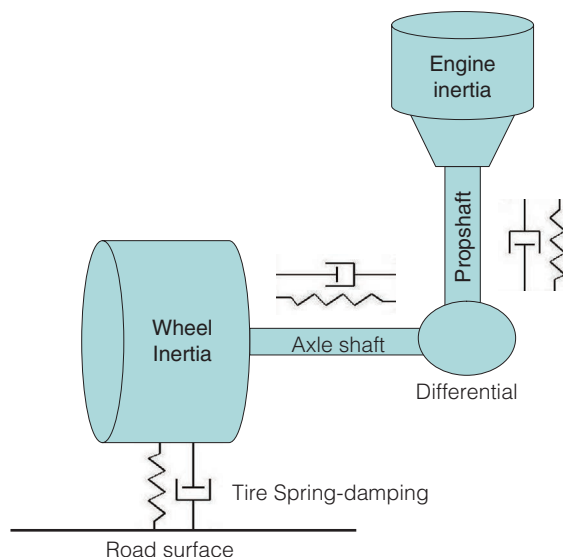


Figure 2

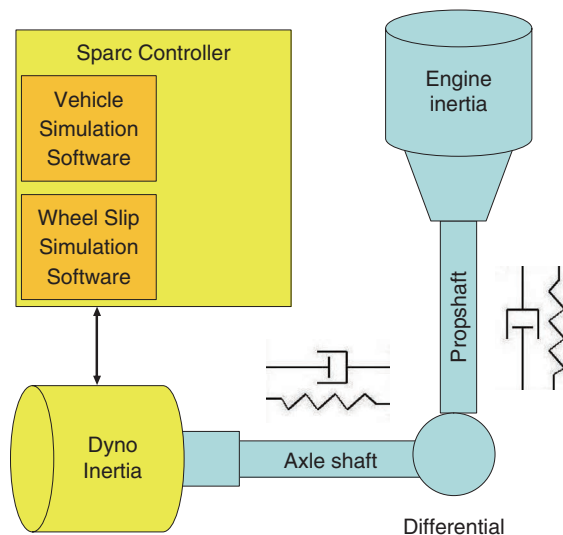


Figure 3

## 車両負荷シミュレーション

車両負荷シミュレーションソフトウェアは、RLS (Road Load Simulation)として知られている。基本的に、RLSには、車両重量シミュレーション、摩擦抵抗シミュレーション、空気抵抗、勾配シミュレーションが含まれている。車両重量シミュレーションでは、車両の重心に質量が集中していると仮定するのに対し、ホイールスリップシミュレーションは、車両の動きに応じて操舵、加減速、および制動時重量移動をリアルタイムに模擬するために、STARSの車両シミュレーションから、各タイヤモデルに車両重量が分配される。ホイールスリップは、車両シミュレーションと共に、過渡的なトルクイベントをサポートする目的で使用されている。ここで車両負荷は、車速の関数の式として表現される。

$$F_{Road} = K_A + K_B \cdot v + K_C \cdot (SpeedVehicle + v_{Headwind})^X + m \cdot g \cdot \sin(InclineHill)$$

$$F_{Veh} = T_{Measured} / RadiusWheel$$

$$SpeedVehicle = 1 / m_{Vehicle} \cdot \int (F_{veh} - F_{Road}) dt$$

上式から、駆動力と走行抵抗の差により、車両が加速されることがわかる。車両慣性とこの力で、車速を模擬する事ができ、実際に、50 mphから0 mphへコースト運転の模擬を行った場合の実車と模擬車両の比較をFigure 4に示す。この比較から、模擬(緑)が実車(青)に良く一致していることがわかる。

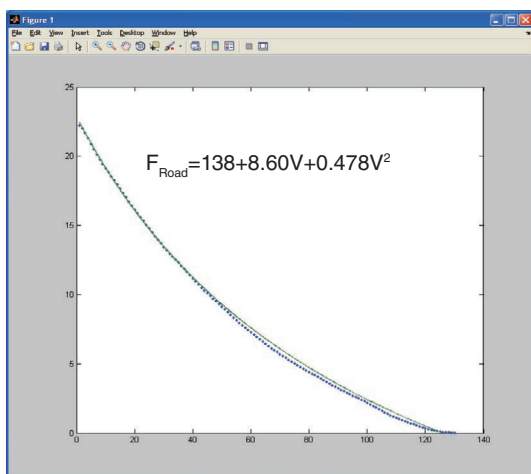


Figure 4

## ホイールスリップシミュレーション

シミュレーションで適切な駆動系の動きを再現するために、試験装置には3つの要件がある。一つ目は、タイヤモデルを用いて駆動力とタイヤのスリップを模擬すること、二つ目は駆動系の固有振動数を再現するために“ホイール”-“タイヤ”の慣性を模擬すること。三つ目は、振動の減衰を制御することである。

### タイヤモデル、スリップとは？

ほとんどの運転者は、濡れた路上や氷上でタイヤがスピンすることを良く知っている。しかし、乾いた路上を走行している場合にも、タイヤが常時少しだけスリップしていることはあまり知られていない、乾いたテストコース上の実車データをFigure 5に示す。車速は39.4 km/h、前輪は367 rpm、後輪は383 rpmである。実験車両は後輪駆動車であり、後輪は4600Nで駆動している。この図は、後輪は前輪より16 rpm早く回転していることを示している。以上から、この後輪は、4600Nの力で駆動している時に383 rpmで回転し、路面で16 rpmスリップしていることになる。路面を駆動する力に比例してタイヤがスリップするということがわかり、この滑りはホイールスリップと呼ばれ、車速を急激に加速させ駆動力を増加させると、力が最高点に達しタイヤが氷上のように激しくスリップする事をタイヤがスピンしている状態と言う。力とスリップの関係を再現するためには、タイヤモデルを試験装置に導入する必要がある。スリップの定義は、次式の通りである。

$$Slip = (V_{Tire} - V_{Vehicle}) / V_{Vehicle}$$

この式から、車速を前輪速度の367 rpm、タイヤ速度を後輪速度の383 rpmとすると、スリップは4.4%となる。

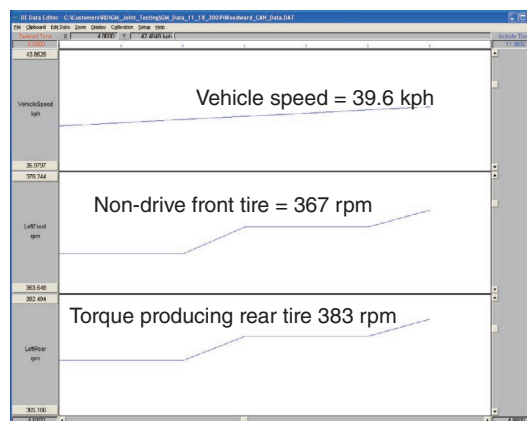


Figure 5



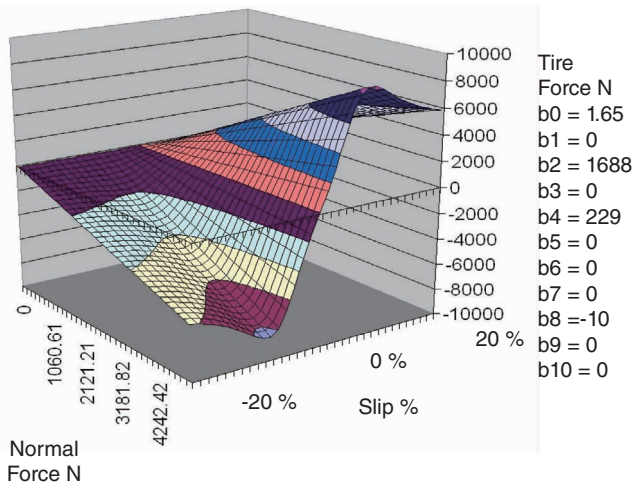


Figure 6

### Pacejkaを使用した

#### 駆動力とスリップのシミュレーション

これまで、駆動力とスリップを模擬する方法として、タイヤモデルを使用しタイヤのスリップとタイヤから伝達される力の関数として表現されてきたため、多くのタイヤモデルが存在する。その中で最も良く知られているモデルは、Pacejka-96タイヤモデルである。これはタイヤスリップの関数として駆動力を表現している。Pacejka関数は次式の通り。

$$F = D \sin(b_0 \tan^{-1}(SB + E(\tan^{-1}(SB) - SB)))$$

“F”は駆動力，“S”はタイヤスリップである。パラメータ，D, B, E, Sは、タイヤの垂直抗力とPacejkaパラメータ  $b_0$  から  $b_{10}$  により決まる値である。Fzはホイールにかかる垂直抗力である。STARSを用いて各タイヤの垂直抗力をリアルタイムに調整することで、重量分布が変化する車両の動きを再現することが可能である。

$$\mu_p = b_1 F_z + b_2$$

$$D = \mu_p F_z$$

$$B = (b_3 F_z + b_4)e - b_5 F_z / (b_0 \mu_p)$$

$$E = b_6 F_z^2 + b_7 F_z + b_8$$

$$S = 100 S_{frac} + b_9 F_z + b_{10}$$

### 単純なモデルを使用した

#### 駆動力とスリップのシミュレーション

多くの場合、試験者はPacejkaパラメータを入手する手段がない為、駆動力とスリップを表現する単純なモデルを用いることになる。スリップ”勾配の二つから成り立っ

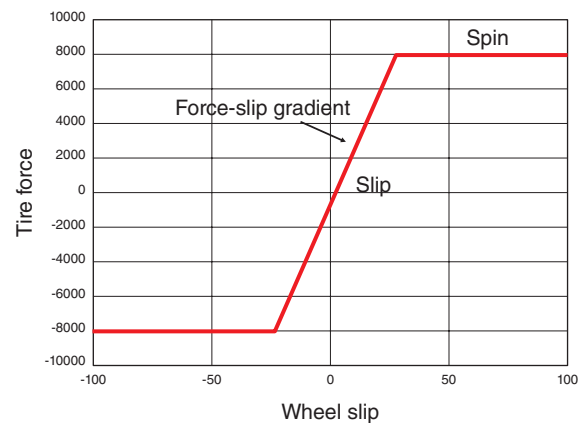


Figure 7

ているものを指し、この二つの値は実路データから比較的簡単に計算することができる。タイヤ勾配は、トルクの関数としてタイヤがスリップする運転領域を表しており、最大力は微小なスリップではなく、劇的にタイヤがスリップする運転領域を表している。また、特定の垂直抗力Fzを存在させる駆動力も表し、タイヤの垂直抗力が変化する状況において、垂直抗力に比例して最大値が変化する。

### イナーシャシミュレーションと減衰

適切なホイールスリップシミュレーションに必要なタイヤモデルシミュレーションは、3つの解決要素のうちの1つである。他の2つの重要な要求は、固有振動数と減衰を制御することである。固有振動数は、ホイールの慣性に大きく依存している為、“タイヤ”-“ホイール”の組合せ慣性を模擬することが極めて重要となる。一般的には、ダイナモメータの慣性がタイヤ-ホイール慣性より大きいことが問題になるため、ダイナモメータと“タイヤ”-“ホイール”の慣性の差を相殺する力が、ダイナモメータの慣性に付加されるよう、模擬する必要がある。これに対するHORIBAグループの解決方法は特許になっており、本文では、パラメータで調整ということとどめておく。同様に、減衰に関してもパラメータによる制御ということとどめる。

### 路面シミュレーション

実路面のシミュレーションには  $\mu_p$  として Pacejka パラメータが組み込まれており、その値は摩擦係数のピーク値を表している。実際の摩擦係数を合理的に近似するには、 $\mu_p$  値に、1/10から1までの値を持つ路面状態の摩擦係数  $\mu_n$  を乗ずることである。

下表に、路面 $\mu$ nの妥当な近似値を示す。

Table 1

路面状態	状態計数 $\mu$ n
完全路面	1.0
アスファルトおよび コンクリート(乾いた状態)	0.8-0.9
コンクリート(濡れた状態)	0.8
アスファルト(濡れた状態)	0.5-0.6
土砂道(乾いた状態)	0.7
土砂道(濡れた状態)	0.5-0.6
砂利	0.6
雪(固まった状態)	0.3
氷	0.1

摩擦係数 $\mu$ nは、路面の関数としてSTARSでリアルタイムに変化するパラメータで表され、実験者はこのパラメータを変更することで路面の変化を模擬することができる。実際の試験では、最初に両方のタイヤを乾いた路面状態に設定し、次に車両が加速されるにしたがい、一方のタイヤを例えば、雪の状態に変化させるといった試験を行う事がある。スプリット $\mu$ テストは、車両のトラクションコントロールの制御ロジックを試験するために行われる。

#### ダイナモメータサイズ

一般的には、コストと部品性能の妥協点を見つけながらダイナモメータの大きさを決定することがよくあり、過渡現象再現のためには低慣性で大きな駆動力が要求される。適切なダイナモメータの大きさを決定するためには、広範囲に渡って要求仕様を議論する必要がある。例としてはFigure 1に示す試験がある。これには、8000 rpm/sで加速性を持つダイナモメータが必要である。そのような試験装置には下記のような製品を提案している。

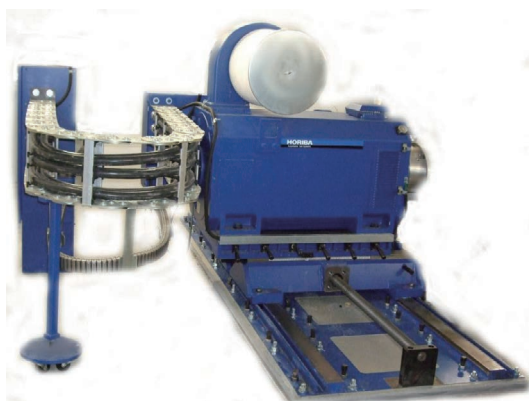


Figure 8

Dynas3 4000WH	223 kW
駆動力	600 kW
機械慣性	8.8 kgm <sup>2</sup>
最高トルク	8109 Nm
最高角加速度	8800 rpm/sec

あるいは、下記の仕様の高性能PM4000モータと制御盤が想定される。

Dynas PM4000WH	330 kW
制御盤	600 kW
機械慣性	1.0 kgm <sup>2</sup>
最高トルク	4200 Nm
最高角加速度	38,000 rpm/sec

この場合、安価なDynas3を使用することで、1/2以下のコストで顧客要求の最低限の角加速度を実現することが可能である。全てのダイナモメータは、ホイールスリップを再現することが可能であるが、角加速度を決定するトルク-機械慣性比によって、ダイナモメータのホイールスリップの動特性が大きく左右される。再現したい試験によっては、ホイールスリップの再現性と引き換えに振幅と周波数を減少させることで、ダイナモメータのコストを削減する場合もある。一般的に、ダイナモメータDynas3は、大型車両の低周波試験や、あまり急激でないホイールスリップ現象の再現に適している。また、ダイナモメータDynas PMは、小型車の、非常に急激なスリップ現象を再現する高周波試験に適している。

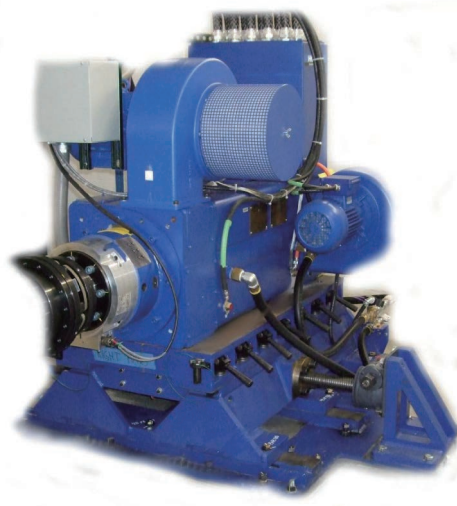


Figure 9

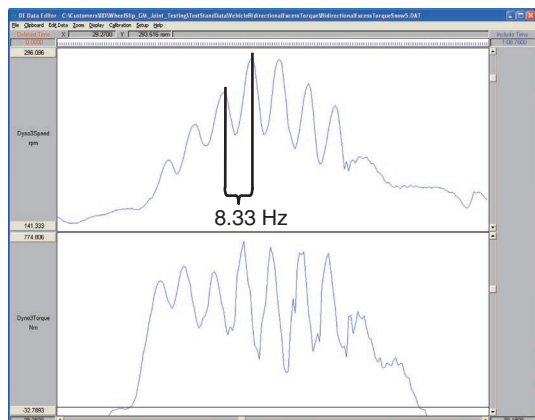


Figure 10

## まとめ

### 駆動系固有振動数

Figure 1の試験では要求される角加速度が8000 rpm/sに対し、試験装置のダイナモメータは6000 rpm/sしかないため、Figure 1に示されるテストコースにおける車両の急峻な加速現象を再現することができなかったが、そのダイナモメータで他の現象の振幅の小さい駆動系の固有振動数を、再現することは可能であった。駆動系の固有振動数は機械慣性とばね定数の関数であり、減衰の影響をわずかに受ける。その結果、ほとんどの現象において固有振動数を再現することが可能となった。Figure 10は、エンジンの急加速によって引き起こされた雪上のスピン現象を示している。テストコースの乾いた路上を、車両が急速に加速する際の固有振動数は8.33 HzであることがFigure 1で示されたが、Figure 10にもそれが明確に示されている。

### ホイールスリップモデル検証

ホイールスリップモデルを検証するために、駆動力とスリップからスリップ勾配を計算した。これは、101904 N/slipのモデルのスリップ勾配に一致する。Figure 11に、測定されたスリップ勾配が102,639であることが示されているが、これは、予測した値に対して差が0.7%以内である。最初に、トルク変換器からタイヤ駆動力を計算して求めてスリップは、車速と測定されたタイヤの回転数の差として算出し、勾配は駆動力をスリップで除して求めた。

## おわりに

HORIBAグループは、現在、ホイールスリップシミュレーションを開発しており、実車データとホイールスリップシ

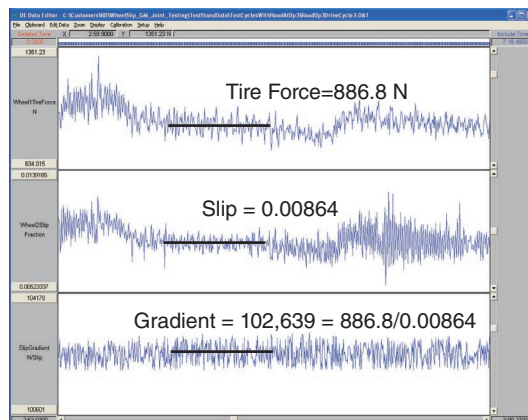


Figure 11

ミュレーションデータの相関を提示できるのも近い。要求される角加速度8000 rpm/sに対してダイナモメータが6000rpm/sしか無い場合でも、過渡現象の再現性が制限はあるが、ホイールスリップシミュレーションは可能となる。将来は、路面の凹凸などの精緻な路面シミュレーションや、ヨウセンサーによる車両制御が開発される。現在は、アルゴリズムにより、駆動系固有振動数がうまく再現されており、それにより、慣性シミュレーションが正しく動作していることがわかる。これは、ホイールスリップシミュレーションによるものであり、本稿で示したように2つのタイヤモデルの導入の成果である。試験では、適切な駆動力で“スリップ”-“スピン”現象が再現されており過渡スプリットμテストを実施することが可能である。さらに、車両のロールやコーナリング、加速によって引き起こされる重量配分変動をサポートする事で、個々のホイールへの動的重量調整も可能である。現行の導入したモデルは、市場要求の99%に対応できることを期待している。2タイヤモデルも本稿で論じたように導入した。市場要求が変化した場合であっても、コントローラSPARCは、その市場変化に対応すべくフレキシブルにモデルを拡張することが可能である。



**Bryce Johnson**  
Principle Engineer  
Automotive Test systems  
HORIBA Instruments Inc.



翻訳  
**池田 浩之**  
Hiroyuki IKEDA  
株式会社 堀場製作所  
開発本部 エンジニアリングセンター  
自動車計測システム設計部



# Feature Article

アプリケーション

## バッテリー・エンジンのシミュレーションによる 電動系車両ドライブトレイン試験について

Testing Electrified Drivetrains for Vehicles without the Battery or Engine

Norm Newberger

Bryce Johnson

翻訳

鶴見 和也

Kazuya TSURUMI

ハイブリッド電気自動車(HEV)は、合衆国政府による144億ドル<sup>[1]</sup>ものハイブリッド車両や電気自動車等(BEV=Battery Powered vehicle)、次世代車両ドライブトレイン推進政策により、持続可能な車両のアーキテクチャになりつつある。シリーズハイブリッドや電気自動車(BEV)はその推進力の100%を電気に依存している。シリーズハイブリッド車とは、内燃機関(ICE)を発電用動力源として用いることで電気を生み出している。一方でパラレルハイブリッド車は、電動モータと内燃機関が機械的なコンビネーションで動力を生み出している。いずれの場合でも、電動車両の駆動システムは電動モータ、駆動用バッテリーおよび、その電気を得るための補助的手法が必要となる。このような補助的電気供給源(APU=Auxiliary Power Units)としては、省サイズかつ高効率な内燃機関が一般的に用いられるほか、昨今のゼロエミッションの高まりから求められる燃料電池なども代替手法として挙げられる。HORIBAグループの仮想エンジン(VE=Virtual Engine)や仮想バッテリー(VB=Virtual Battery)は、新たなバッテリーパックや内燃機関の開発を待つことなく、電動系駆動システムを開発するためのHIL(Hardware-In-the-Loop)<sup>[2]</sup>システム製品である。本稿では、HEV開発に関連するこの製品の特徴について、形状・機能および検証データについて説明する。

The hybrid electric vehicle (HEV) is becoming a sustainable vehicle architecture with the US government pouring 14.4 billion<sup>[1]</sup> into stimulus projects that support drivetrains of new vehicles that are hybrid or battery powered (BEV). Both the series hybrid and BEV have 100% of propulsion energy coming from electricity. The series hybrid uses an internal combustion engine (ICE) to power a generator that produces electricity. The parallel hybrid powers the vehicle by a mechanical combination of electric motors and ICE. In all cases, the drivetrain needs an electric motor, a traction battery and an auxiliary method of obtaining electricity. These auxiliary power units (APU) are typically a downsized, highly efficient ICE or fuel cells for a zero emissions alternative. Horiba's Virtual Engine (VE) and Virtual Battery (VB) are HIL<sup>[2]</sup> products that allow electric motor based drivetrain development without waiting for the new battery pack and ICE to become available. Relevant product features for HEV development are discussed in terms of form, function, and verification with data.

## はじめに

過去、車両開発における検証、制御系の適合および妥当性確認といった過程では、試験車両をテストコースにおける検証から、舞台を実路走行のシミュレーションを行うシャシダイナモメータに移して試験されてきた。Figure 1にHORIBAグループ自動運転装置(STARS)と、ダイナモシステムコントローラ(SPARC)を用いたシャシダイナモ上での試験システムのイメージを示す。このようなシステムでは、車両を構成するほぼすべてのユニットが必要であるために、車両開発段階における困難さがあった。そこで、ダイナモコントローラ上で、車両を構成する一部のユニットをシミュレーションする機能を拡張することにより、ダイナモシステム上では供試体であるシステムやコンポーネントをダイナモシステムの台上で容易に接続することが可能となった。Figure 2には、実際のHEV用電動モータやISG<sup>[4]</sup>を抱合した開発システムのイメージを示す。このイメージ図では、車両の運動性能を特徴付けるタイヤ・ファイナルギア・トランスミッションおよびトルクコンバータを含めた一連の動力伝達後のトルク、または速度設定はエンジン出力軸に接続したダイナモ上でシミュレーションされることを示している。しかしながら、この構成で車両全体を表現するには、エンジンとバッテリーパックが不可欠である。それらは、どちらも高価でか

つ、全く異なる開発組織で、異なるサプライチェーンを持った開発過程を経る製品である。また、電動モータは、パワートレインの中での配置に熟慮を要する。電動モータは、トランスミッションに接続するだけでなく、ドライブシャフト軸やインホイール、あるいはエンジン出力軸に接続して、補助動力として接続するような場合もある。このように様々な使い方がある場合には、車両としての適合が非常に複雑となるため、非常に早い開発段階でのテストを必要とする。バッテリーパックの電力は、バッテリーの化学的特性から作成されたリアルタイムモデルをプログラム運転可能なDC/DCコンバータを用いて、出力電圧をシミュレーションして出力される。さらには、エンジンについては機械的特性と燃焼プロセスの特性を元に作成されたリアルタイムモデルを用いて、トルク出力をシミュレーションしている。Figure 3には、ハードウェア上で仮想バッテリーおよび仮想エンジンから電力および動力を供給しているイメージを示す。本稿では、仮想バッテリーおよび仮想エンジンに焦点をあて、特にHEV開発に関連する機能について、実際のエンジンやバッテリーとの比較調査した結果を紹介する。

## 仮想エンジンの機能

エンジンシミュレーションは、駆動系試験機の入力側ダ



Figure 1<sup>[3]</sup>

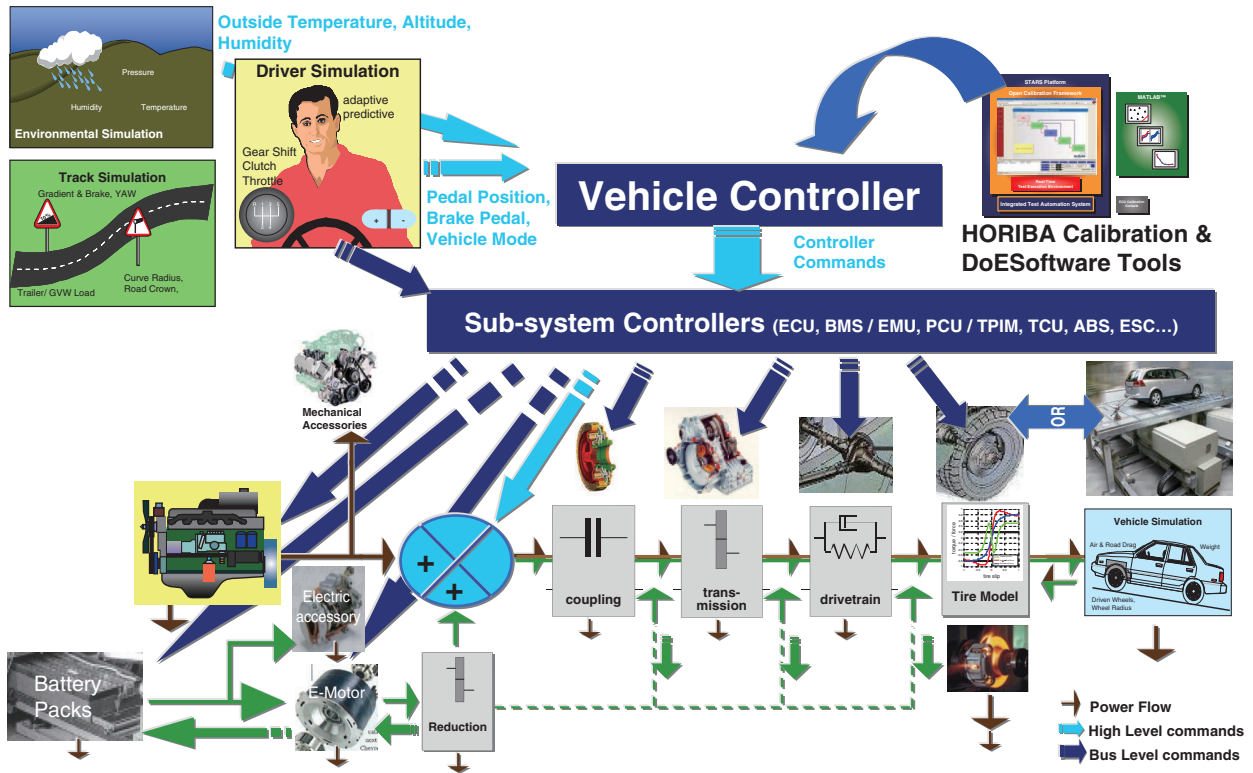


Figure 2

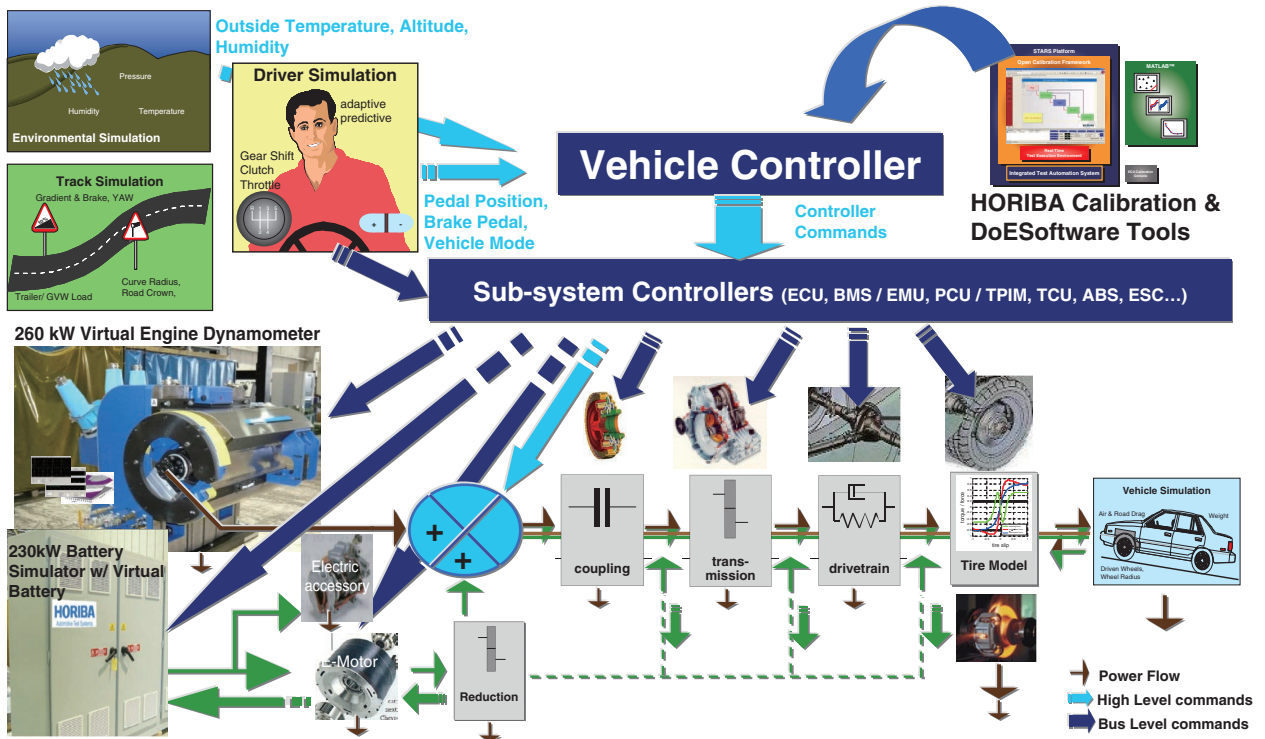


Figure 3 Simulation Diagram: VB & VE in drivetrain test stand (loading dynamometer not shown)

イナモータを制御する機能である。このエンジンシミュレーション機能を用いてトランスミッション制御CPU(以下TCU=Transmission Control Unit)に対して模倣的なセンサ信号や、TCUが必要とするデータや模擬センサ

信号を通信し、あたかも実際のエンジンのように振舞うことが可能である。さらに、このエンジンシミュレーションは大気圧等の条件によってエンジン出力が変化するように、試験室または仮想条件としての試験環境の変化に合



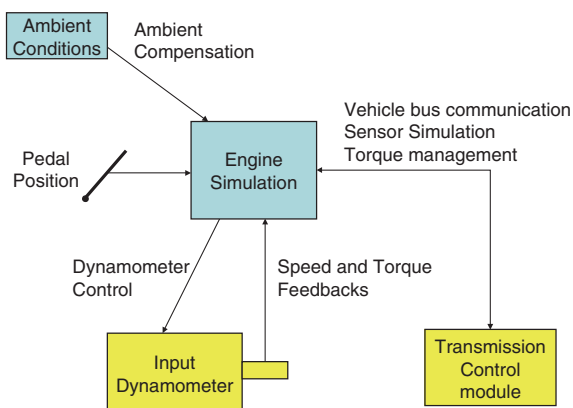


Figure 4

わせた出力変化をシミュレーションすることが可能である。Figure 4に仮想エンジンシステムの周辺装置とのつながりを示す模式図を示す。

#### 駆動系に対する仮想エンジンのシミュレーション機能

エンジンシミュレーションとは、エンジンマップ、エンジン制御システム、および実際のエンジンと同様のパラメトリックモデルおよびその適応制御から構成されている。エンジン制御システムは、クランクング(エンジン始動と停止)挙動、アイドル状態やシフトチェンジ中のエンジントルク低減などをシミュレーションしている。また様々なエンジンECUからの制御信号遅れ時間も再現することが可能である。パラメトリックエンジンモデルとは、エンジン機構部品の運動特性(ピストン・コンロッド・クランクシャフトやフライホイール等)と筒内圧からエンジンの出力トルクパルス进行計算している。さらに、その適応制御とは、エンジンからの出力トルクパルスに沿った応答でトルクを出力することを保証している。また、この機能では、周波数や次数の制限も可能である。エンジンシミュレーションは以下のような機能を持っている。

- (1)慣性シミュレーション
- (2)スロットルおよびペダルマップシミュレーション
- (3)変速中のトルク低減シミュレーション
- (4)ECUによるその他トルク制御機能
- (5)エンジンクランクング
- (6)エンジンアイドルコントロール
- (7)イグニッションシミュレーション
- (8)惰行運転シミュレーション
- (9)フューエルカットやスロットル全閉シミュレーション
- (10)燃焼中のエンジントルクパルスシミュレーション(ETPS)

- (11)気筒数制御
- (12)エンジン補機負荷シミュレーション
- (13)環境条件によるエンジン出力変動シミュレーション

ETPSでは、燃料の違い(ガソリン・ディーゼル)や給気圧の違い(ターボ・スーパーチャージャー・自然吸気)による波形の違いまでの表現も可能であるほか、単気筒から16気筒までの2サイクル・4サイクルの波形の再現が可能である。Figure 5, Figure 6に示す2つの波形は、HEVで用いられるエンジンの異なるエンジントルクパルスを示す。これらの異なる波形は、エンジンの異なる仕様によって特徴づけられている。

#### ペダルマップシミュレーション

現在のエンジンテクノロジーでは、フライバイワイヤ方式によるスロットルコントロールを用いている。そのため、エンジンシミュレーションでは、ペダルの踏み込みからスロットル開度指令のプロセスを含めたシミュレーションが必要とされる。このシミュレーションのためには一般的にペダルの動きに応じて、ECUが制御するスロットル開度信号へ変換するペダルマップが必要とされる。そしてこの過程を経て算出されたスロットル開度を元に、エンジン出力マップに応じたトルクが出力される。このペダルマップは高度に車両適合と結びついている。Figure 7では、ペダルからスロットル開度を決定するプロセスの概略を示している。

#### エンジントルクマップシミュレーション

エンジンは一般的にスロットルによってコントロールされている。よって、スロットルの設定とそのときのエンジン回転数によって、エンジンはその性能に応じたトルクを生み出す。一方、動力計では回転数またはトルクがコントロールされている。エンジンとは異なり、電気式動力計では無回転時が最大トルクを生み出している。エンジンをシミュレーションするには、あたかもエンジンのようにスロットル開度に応じてトルクを生み出し、かつその出力トルクに応じた動力計のトルクをいくつかのコントロールする手法が必要とされる。エンジントルクマップシミュレーションとは、そのエンジン出力トルクを模擬する機能である。Figure 8にエンジンシミュレーション上でのエンジンマップを示す。スロットルの入力値と、計測値である動力計回転数から、シミュレーションマップ上でエンジンが生み出すべきトルクを算出する。多くの車両がフライ

### Maximum Torque Curve of Engine over 2 Crankshaft Revolutions

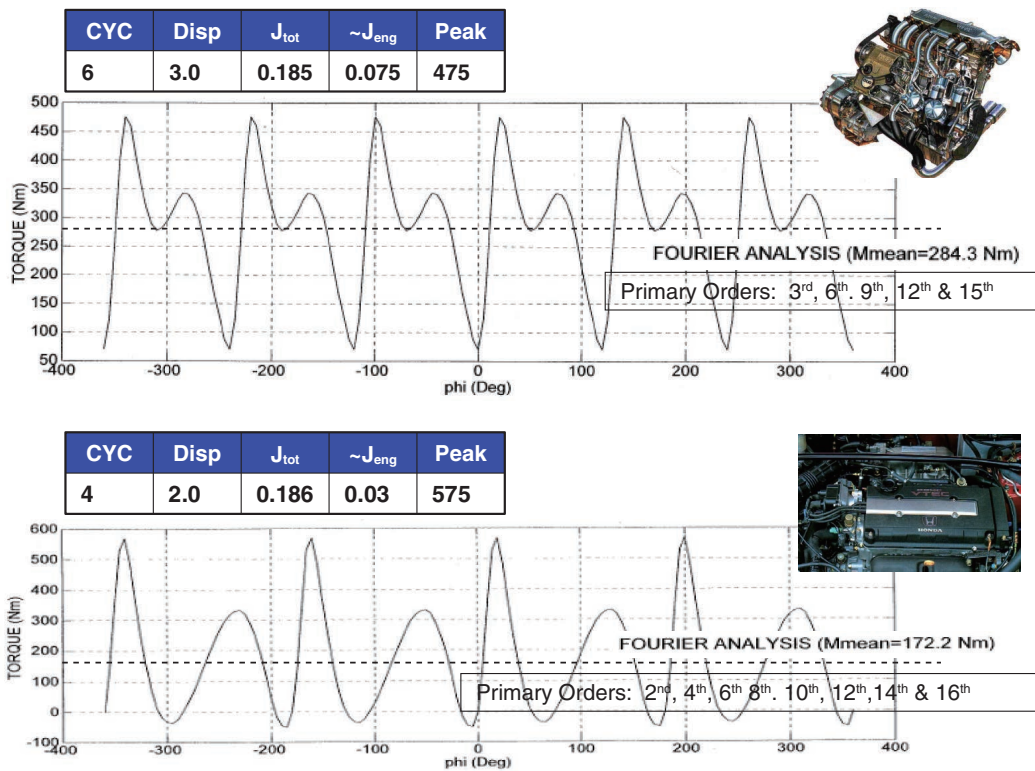


Figure 5

### Maximum Torque Curve of Engine over 2 Crankshaft Revolutions

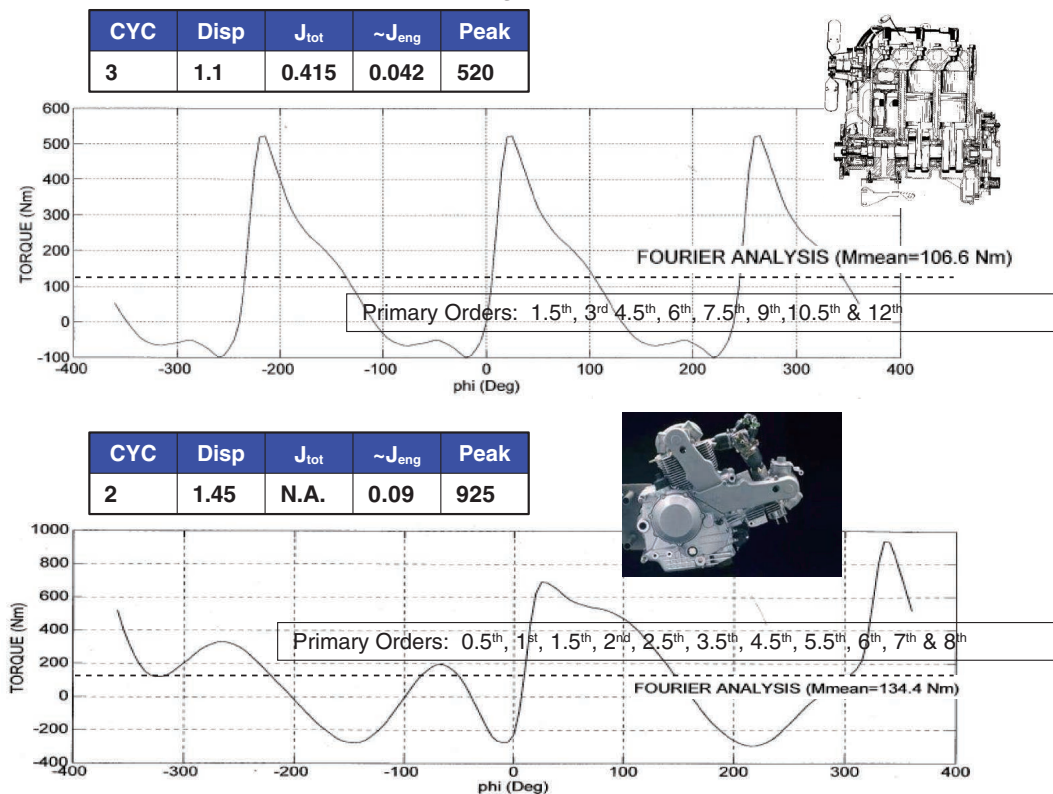


Figure 6

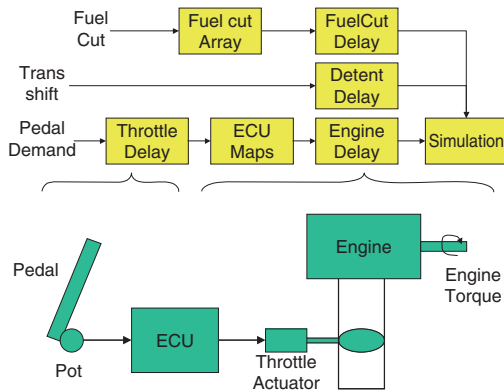


Figure 7

バイワイヤ方式を採用していることから、現在はこのエンジントルクマップのほかに、ペダルポジションからスロットル開度指令やトルク指令値を算出するマップと複合して運用している。このようなペダルマップは、車速やバッテリー充電状態、またはその他車両の制御系全体の最適化に必要な機能とされている。

エンジン慣性シミュレーション

駆動系試験では、仮想エンジンとなりうる動力計が、正しい慣性量でトランスミッションに対して実際のエンジン同等の負荷を掛けることを要求されている。多くの場合、動力計の機械慣性量はエンジンの慣性量よりも大きく、そのため慣性量の補正が求められる。これをエンジン慣性シミュレーションという。エンジン回転数のオブザーバーとフィードフォワード制御との組み合わせにより、エンジンとフライホイールの慣性をシミュレーションするために必要な動力計への印加トルク $T_{el}$ の再現を可能にしている。このようにして計算されたトルクは、エンジントルクマップシミュレーションにて算出されたトルクに印加される<sup>[5]</sup>。

$$T_{el} = \frac{J_{el} + J_{FW}}{J_{sim} + J_{FW}} T_{eng} + \left(1 - \frac{J_{el} + J_{FW}}{J_{sim} + J_{FW}}\right) T_{trans}$$

$$= K * T_{eng} + (1 - K) T_{trans}$$

Figure 9では、スロットル/速度制御している仮想エンジン上で、スロットル開度を上昇させながら変速中になるべくトルクを一定に保持しようとする試験である。変速中の減速度は一定とする。この場合、エンジン回転は、3900 rpmから900 rpmの変化により、慣性によるトルクが発生する。仮に、動力計の慣性量がエンジン慣性量と同じである場合(上図)、特に慣性量補正は必要としない。しかしながら、下図のように動力計慣性量がエンジンの倍で

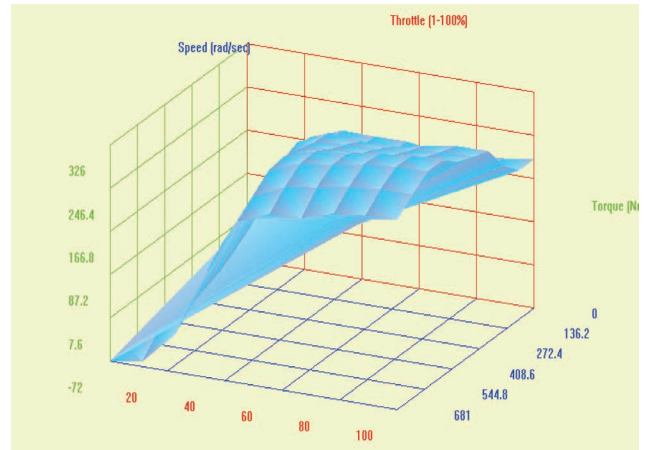


Figure 8

ある場合は、図示のようにトルクを印加して慣性の差を補正することが必要である。

エンジントルクパルスシミュレーション

Figure 10には、8シリンダーエンジンにて2000 rpm/118 Nm時に発生するトルクパルスを表示したチャートを示す。ただし、平均トルク118 Nmはチャート上には表示されず、トルクパルスだけを示している。このチャートではエンジン2回転(720°)中に8個のシリンダーがそれぞれ異なったタイミングで燃焼している状態を示す。このシミュレーションでは、118 Nmの平均トルクを生み出すには、145 Nmの爆発トルク振幅が必要であった。

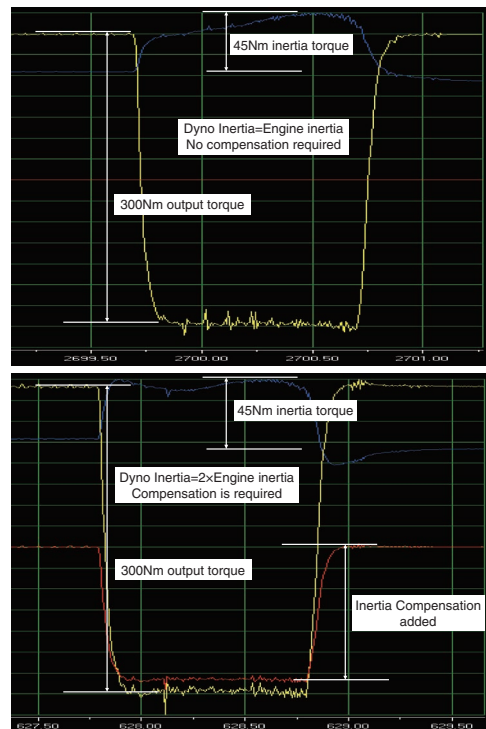


Figure 9



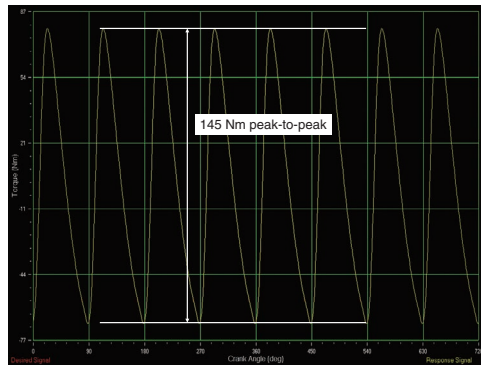


Figure 10

### 実エンジンデータとの比較検証

エンジンシミュレーションを検証することは、このシミュレーションアルゴリズムの受け入れする上で非常に重要なこととなる。Figure 11では、4気筒ガソリンエンジンのクランクシャフトで計測したトルク(下部チャート)と、エンジンシミュレーションによるトルクパルス波形(上部チャート)との比較を示す。この比較により、点火オーダー、パルス周波数、振幅などが非常に良く再現できることがわかる。Table 1に、エンジンのスペクトル成分の振幅と、エンジンシミュレーションによる振幅を示す。燃焼の再現性や、ねじり振動の影響により若干の際が生じることがあることがこの表からも見て取れる。

### HEVを含むスタート・ストップシミュレーション

典型的なエンジンスタートのプロファイルをFigure 12に示す。エンジンスタートシミュレーションでは、アイドル回転、クランキング回転およびそれらの到達時間をコントロールする。一定時間のクランキング後、エンジン回転がアイドル回転まで上昇し、アイドル回転制御シミュレーションに移行する。トルク値はクランキング、アイドルそ

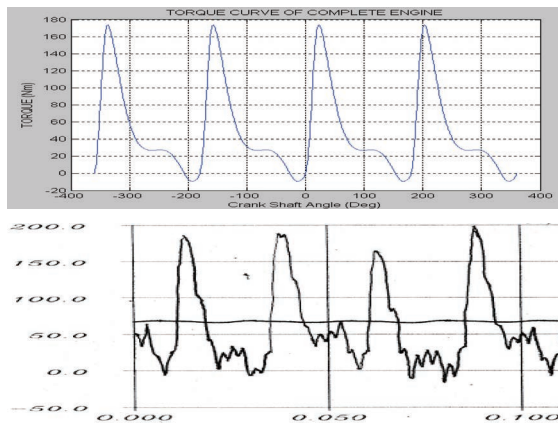


Figure 11

Table 1

	Real Engine	Simulation
40 hz	37 nm	37 nm
80 hz	23 nm	30 nm
120 hz	8 nm	15 nm
120 hz	8 nm	15 nm
160 hz	5 nm	7 nm
200 hz	3.7 nm	5 nm
240 hz	1.4 nm	2.5 nm
280 hz	1.1 nm	2 nm
320 hz	0.9 nm	1.5 nm

れぞれに設定されている。HEVの場合も、このようなエンジン始動シーケンスを非常に短時間になるように調整することで表現できる。エンジン停止・惰行シミュレーションでは、Figure 13の通り、イグニッションと、ゼロ回転近くのエンジンマップおよびStandStillSpeed値をコントロールする。エンジンマップ上で、どれくらいのトルク値がエンジン停止するかを決定付けている。StandStillSpeed値とは、動力計に対して回転停止を指令するタイミングを示す。

Figure 14では、エンジンスタートシミュレーションをEPTS(エンジントルクパルスシミュレーション)と組み合わせた波形を示す。このEPTS機能は使用する・しないが選択可能である。ETPS機能を使用しない場合は平均トルクのみ制御となる。エンジンは、まず短時間のクラ

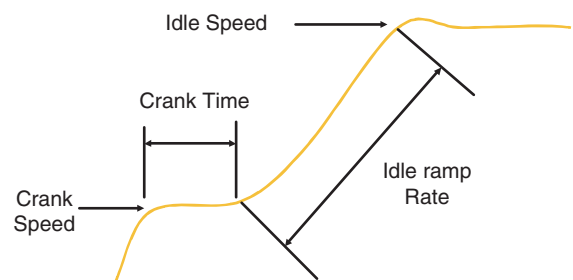


Figure 12

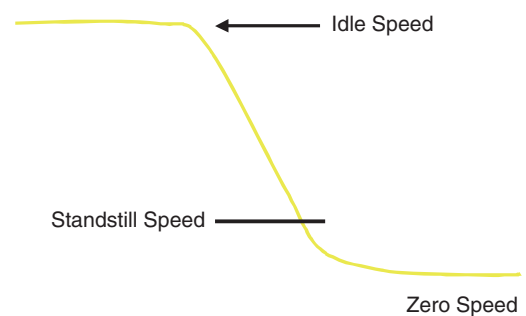


Figure 13

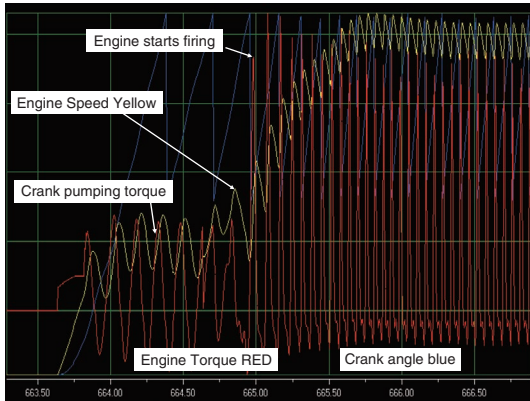


Figure 14

ンキングの後、着火し回転数はアイドル回転まで上昇する。クランキング中の着火の直前にはポンピングによる脈動波形が発生していることが確認できる。

### エンジンシミュレーションに必要な 動力計モータおよび電力盤の仕様

入力ダイナモとして、エンジントルクパルスシミュレーションをするには、50,000 rpm/secの回転加速度を実現するに十分なトルクと慣性量の比に加え、1 msec以下で応答する制御電流の応答速度が必要である。トランスミッションに接続された状態で、動力計ローターに求められる物理的な特性として、600 Hz以上の一次のねじり自然周波数を与えられる機械慣性や剛性が必要である。さらに、トランスミッションが車両に搭載されている状態を再現するために、出力軸に対して車載同等の高さや傾きをもった配置ができるようにする必要がある。Figure 15には、0.084 kgm<sup>2</sup>の機械慣性と、800 Nmの最大瞬時トルクの性能を持つ、型式名Dynas TP260という、仮想エン

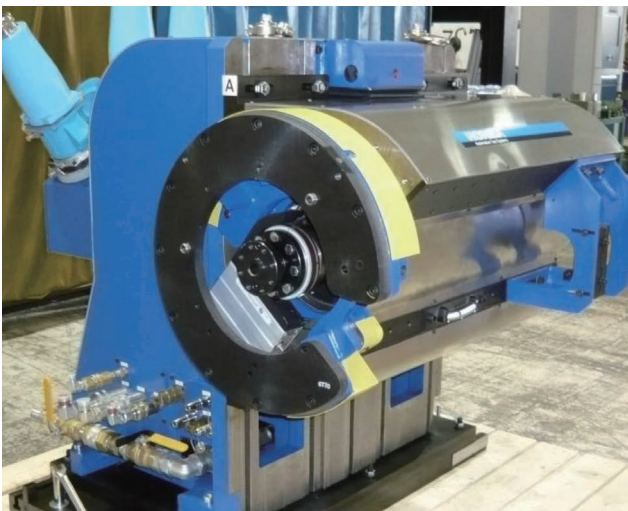


Figure 15

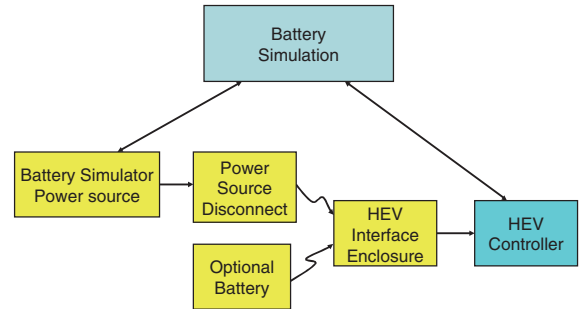


Figure 16

ジン用動力計の外観を示す。

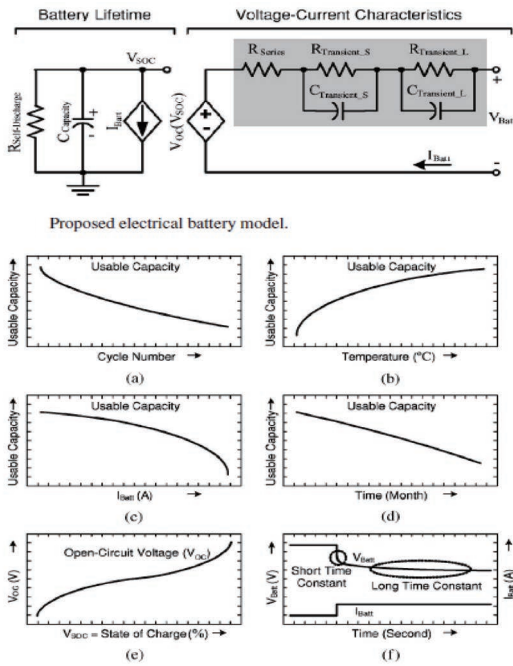
### ハイブリッド車両用駆動系システムへの バッテリーシミュレーション

ハイブリッド車両(以下HEV)の駆動系システムは、電動モータを試験するためのバッテリーまたはバッテリーシミュレータが必要である。HORIBAグループは、HEV用モータを操作するための電力源として、バッテリーシミュレータを供給している。バッテリーシミュレータとは、DC電源の供給装置と、バッテリー状態をシミュレーションし、供給電圧・電流を制御する機構から成り立っている。中継盤には、ユーザが使用するインバーターに接続されるケーブルの供給電源端子を用意している。バッテリー制御には、電力、電流、電圧、または電力+印加電流の指令値のいずれかを用いる。バッテリーシミュレータでは、実際のバッテリーの出力である、電流、電圧、電力、充放電容量(SOC<sup>[6]</sup>)および電池パックの温度や電池セルそれぞれの温度の違いのほか、電力上下限值、内部抵抗や容量を模擬することが可能である。また、SOH(新品・5年経過・10年経過されたバッテリー状態)もバッテリー容量とスルーレートを設定することで模擬することが可能である。

電池セルの化学的特性と電池セルの配列(直列数と並列数)を定義することで、電池パック(車載のバッテリーユニット)の定義が可能である。電池セル一個当たりの特性として、起電力、出力や容量を個別に設定することが可能である。Figure 16にこれらバッテリーシミュレータシステム(以下VB=Virtual Batteryと略)のブロック図を示す。

### 異なるバッテリーのシミュレーション

バッテリーシミュレータシステムに用いるHEVのバッテリーパックモデルでは、リチウムイオン、LiFePO<sub>4</sub>、ニッ



Typical battery characteristic curves of usable capacity versus (a) cycle number, (b) temperature, (c) current, and (d) storage time, as well as (e) open-circuit voltage versus SOC and (f) transient response to a step load-current event.

Figure 17

ケル水素やAGIM型鉛蓄電池<sup>[7]</sup>の化学的特性をサポートしている。さらに、RLC (抵抗-コイル-コンデンサ)モデルをユーザが定義することでのカスタムバッテリーモデルも定義可能としている。HORIBAグループで製作したバッテリーのリアルタイムモデルは、Figure 17に示す論文掲載要綱 (Min Chen, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.21, NO2 June 2006)を元にして製作した。

### 充放電容量(SOC)のシミュレーション

バッテリーシミュレータシステムでは、SOC (State of Charge = 充放電容量)やDOD (Depth of Discharge =

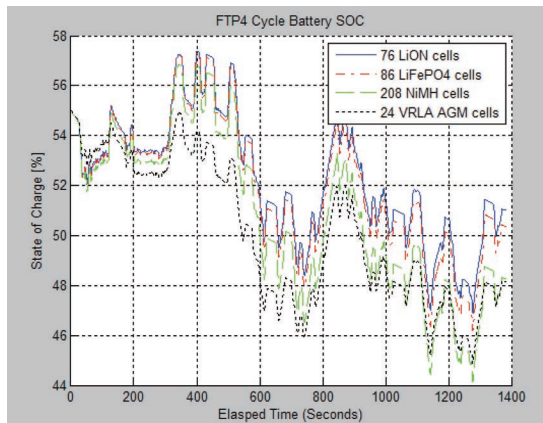


Figure 18

放電深度), および電力の上下限値をHEV/EV/PHEVのバッテリーパックシミュレーションに取り入れている。Figure 18に示すグラフは、様々なバッテリーモデル上にて、北米FTPモード走行した際のSOCのシミュレーション結果である。

### バッテリー温度影響のシミュレーション

バッテリーシミュレータシステムでは、バッテリーパックの温度をシミュレーションしている。Figure 19に示すグラフは、様々なバッテリーモデル上にて、北米FTPモード走行におけるバッテリー温度を模擬した結果である。バッテリーパック全体からの放熱量のほかに、バッテリーセルを構成する様々なパラメータへの温度影響を定義することが可能である。これらの電力が変化するように温度変化に応じて、バッテリーモデルのすべてのパラメータが変化するように作られている。

### 通信シミュレーション

バッテリーパックをより完全にシミュレーションするには、TCUやECUとの通信機能が必要である。たとえば、HEV上でモータ駆動かエンジン駆動かを判断するには、TCUがSOC情報を必要とする場合がある。HORIBAグループの駆動系システムコントローラーには、複数のCAN通信チャンネルを備えており、バッテリー制御CPUのシミュレーションとして、約200項目のCANによる入出力を可能としている。

### バッテリーシミュレーションをサポートする製品群

バッテリーシミュレーションシステムを扱う上で非常に重要なことは実験室における電源ラインを安全に扱える環境である。モータコントローラーや電源からのケーブルを安全に扱うためのプラグイン型コネクタを備えた中継

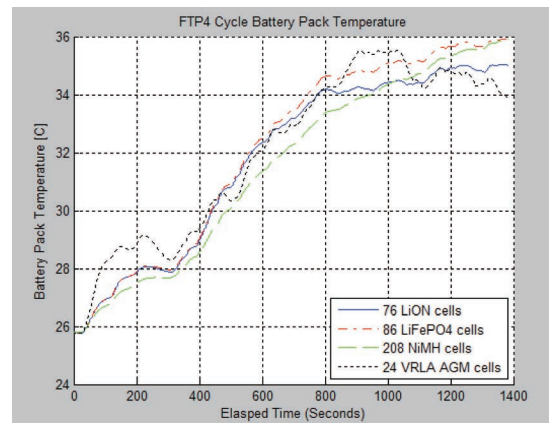


Figure 19



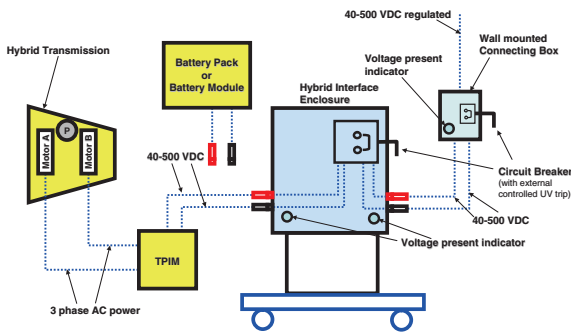


Figure 20

盤を用意している。電力源と供試体モータの間には二つの中継盤があり、モータに近い位置にひとつの中継盤を配置している(Hybrid Interface Enclosure)。この中継盤が供試体モータと電源ラインとの中継を行っており、DC電源ラインには、バッテリーシミュレータ電源(DC電源)および実際のバッテリーが接続可能である。もうひとつの中継盤は、一般的に壁面に設置される(DC Power Disconnect)。この盤では、DC電源装置とHybrid Interface Enclosureとの中継盤で、主にDC電源ラインの遮断器を設けている。これらの中継盤は安全配慮と使いやすさを両立した設計を考慮している。Figure 20にはHybrid Interface Enclosureのブロック図と、Figure 21に外観図を示す。Figure 21正面には、遮断器と通電を示す表示灯がある。この装置には地絡感知器と遮断器を備えており、また設備全般の非常停止ボタンと連動し、供試体インバーターの仕様にあわせた安全な遮断プログラムを設定することが可能である。この写真に示す中継盤は600 VDCまでの仕様であり、裏面写真に示

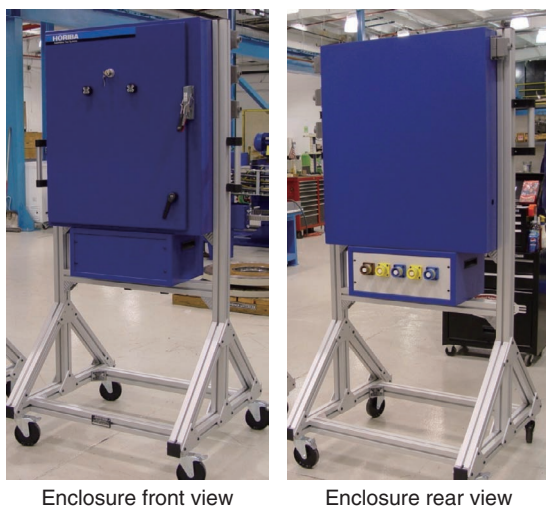


Figure 21

すようなコネクタを使った安全な配線作業が可能である。

### 実バッテリーとの電圧・SOCおよび温度変化比較試験

時系列でのバッテリー入出力電流の履歴がバッテリーの運転条件である。ニッケル水素電池やリン酸鉄リチウムイオンバッテリーのVBモデルについて、同じ入出力電流の履歴を与えて、主要な特性である電圧・SOC、および温度のシミュレーション精度を検証した。これらの試験パラメータは、バッテリーパックの仕様決めや、電動モータの性能を決定つける重要な要素である。Figure 22に実バッテリーとDC電源+VBによる時系列での電圧変化チャートを示す。これらの相関誤差は1% RMS以下であり、HEVパワートレインの開発には十分な性能であった。瞬時での誤差は、実バッテリーとVB電源それぞれの電流値の違いに起因するものであったことがわかった。エンジンは、しばしば低エミッションのために触媒温度を保持することを目的で作動するが、これらの動力は車載エアコンなどの負荷に用いられることがある。SOCはバッテリーパックの大きさやバッテリーマネジメントシステム(以下BMS)の適合には重要な要素である。Figure 23は

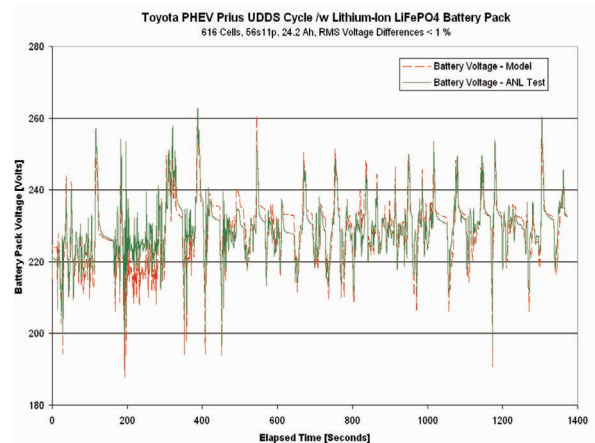


Figure 22

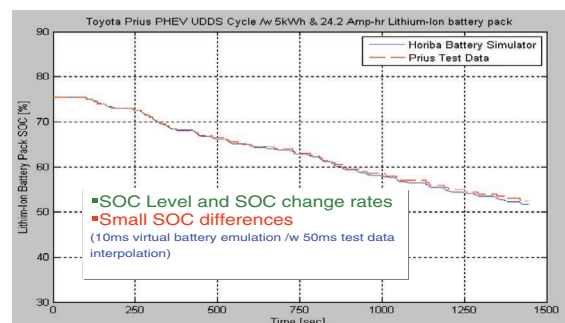


Figure 23

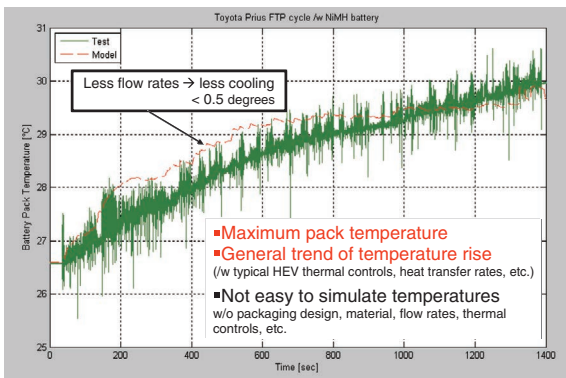


Figure 24

実バッテリーとVB上でのSOC変化の比較チャートを示す。いかなる環境や車両の出力条件であっても、車両に搭載されている大型バッテリーには常に安全な動作することを検証するのが非常に重要なファクターである。そこで、バッテリーパックの筐体設計や冷却システム、およびそれらの最適化には、電池の発熱を適切に予測することが重要である。Figure 24に、VBによる温度変化シミュレーションと実バッテリーの発熱量変化の比較チャートを示す。

## おわりに

バッテリーシミュレーションシステム(VB)と、バーチャルエンジン(VE)によるHILシミュレーションの再現性の高さと精度は、自動車メーカーが電動パワートレインをエンジンとバッテリーを平行作業で開発することを可能にした。この技術を用いることで、HEVを市場に投入するまでの時間を短縮することが可能となり、エンジンとバッテリーを開発する上で、より精度の高い仕様決めを可能にした。VBとVEは、HEVの市場浸透<sup>[6]</sup>を図るメーカーにとって典型的なツールとなりえるとともに、HORIBAグループにとっては車両のトータルテストソリューションを提供する礎になりつつある。今後、多様化するイオン化バッテリーを初めとし、乗用車から商用車にいたる様々な車両に適応したバッテリーのモデルをより充実していく。

## 参考文献

- [1] IDtechex.com “Hybrid and Pure Electric Cars 2010-2020” Research Report
- [2] HIL commonly referred to as hardware in the loop where something physical is used to create power, or run programs, or create a response but inputs and outputs are simulated from a mathematical model of their real end use condition.
- [3] 本文中の略号は以下の意味を示す。  
ECU：エンジン制御ユニット  
BMS：バッテリーマネジメントシステムおよびエネルギーマネジメントシステム  
PCU/TPIM：電力制御ユニットまたはインバーターモジュール駆動制御ユニット  
TCU：トランスミッション制御ユニット  
ABS：アンチロックブレーキシステム  
ESC：電子姿勢制御
- [4] Integrated Starter and Generator (ISG) is an electric motor attached to the crankshaft of the ICE that acts as motor to start the engine and as a generator of electricity when the ICE is running. Since it is directly on the crankshaft, this becomes a parallel hybrid vehicle. Electric motors used vehicle propulsion are called E-MOTORS to distinguish their unique construction and power output.
- [5] 本文中の計算式における略号は以下の意味を示す。  
CYC：シリンダー数  
DISP：エンジン排気量  
J<sub>TOT</sub>：エンジンおよびフライホイールの合計慣性量  
J<sub>ENG</sub>：クランクシャフト機構の慣性量  
M<sub>mean</sub>：エンジンの定格トルク  
Peak：エンジンの燃焼プロセスにおいて発生する最大の瞬時トルク
- [6] SOC - State of Charge is a calculation of the BMS showing charge availability of the battery pack
- [7] AGM - Absorbed glass mat and Gel Batteries are classifications for low maintenance valve regulated lead acid (VRLA) battery
- [8] Various predictions from research institutes, auto analysts for HEV, PHEV, EV market volume by 2015 as part of total vehicle production in the USA.



### Norm Newberger

Manager  
Drivetrain Technology  
Automotive Test Systems  
HORIBA Instruments Inc.



### Bryce Johnson

Principle Engineer  
Automotive Test Systems  
HORIBA Instruments Inc.



翻訳

### 鶴見 和也

Kazuya TSURUMI  
株式会社 堀場製作所  
営業本部 ATS プロジェクト  
マネジャー

### ITSを活用した究極のエコドライブング

#### はじめに

近年、われわれの生活において自動車は必要不可欠なものとなっている。人の移動手段、ものの輸送手段として生活の一部になっている。しかし、同時に化石燃料の消費量も膨大である。これに伴って大気汚染や地球温暖化(二酸化炭素影響)など大きな社会問題を引き起こしている。この消費量をいかに減らすことができるかはこれまで大きな課題となっている。その答えとして、ひとつはインフラの改良による対応として、高度道路交通システム(ITS<sup>\*1</sup>)、自動料金徴収システム(ETC)などがある。また、自動車メーカーは、燃費の改善に余念がなく、さらにハイブリッドカーや電気自動車を市場投入して化石燃料の消費量を減少させている。しかしながら、これらインフラや自動車そのものの性能向上に頼る以外に、もっと身近なところにも目を向ける必要がある。

化石燃料の消費量をいかに減らすか、言い換えると省エネを実現するためには、運転者の運転技術の向上と省エネ意識向上が必要である。そのためには、これまで感覚的であった省エネの概念を定量的に評価し、運転者に適切な情報を逐次提供する必要がある。本稿では省エネ運転促進に対象を絞って、過去の社会実験の結果なども踏まえて述べる。

\*1：ITS(Intelligent Transport Systems：高度道路交通システム)

#### 背景

地球温暖化防止に向けて、2002年の京都議定書では、二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)に代表される温室効果ガスの排出量削減目標が定められた。2012年度までの過去5年間の温室効果ガスの平均排出量は、1990年度の総排出量から1.4%の増加となっている。これから森林吸収源の目標3.8%と京都メカニズムクレジット<sup>\*2</sup>5.9%を差引くと8.3%の削減ということになり、京都議定書の目標を達成する予定である。

2012年度の日本の二酸化炭素排出量のうち、運輸部門からの排出量は約18%、このうち自動車全体の占める割合は90%弱なので約16%が自動車の排出するものとなる。

石倉 理有

Masatomo ISHIKURA



このことから、たとえば全体の自動車の燃費が20%改善されれば、日本全体の二酸化炭素排出量が3.2%削減されることになる。余談になるが、この3.2%の削減量を京都メカニズムクレジットで逆に金額換算すると年間600億円くらいになる。

\*2：京都メカニズムクレジット：他国での排出削減プロジェクトの実施による排出削減量などをクレジットとして取得し、自国の議定書上の約束達成に用いることができる制度

## 省エネを意識することによる効果



Figure 1

一般的に自動車の燃費は、運転のしかたによって良くも悪くもなる。したがって、運転者が省エネを意識した運転を行えば燃費が向上する。このことから、各運転者の特性を計測し、その結果を分析してインターネットを通じて省エネ運転を誘導できる管理システムを構築した。これまでは主に業務車両に向けてサービスを提供してきた。(Figure 1)その結果、これまでHORIBAの運行管理システムを導入いただいた多くのユーザで省エネや交通安全に関して効果をあげられている。(業務用途の場合には、会社の指示に従って省エネや安全運転を遂行することは当然と言えば当然のことであるが、マイカーの場合は少し話が異なる)

これまで省エネや安全運転に関しては、定量的には評価できなかった。たとえば「あなたは省エネ運転を心がけていますか?」と質問すると多くの人は「はい」と答える。さらに「安全運転しているか?」の質問では、全員が「はい」と答える。しかし、これらの質問に関しては何の基準も存在していなかった。近年このような定性的な情報を定量的に評価できるようになったのは、運行管理システムの採用やそこで利用される車載装置の効果といえる。リアルタイムに注意を行ったり、相対的に評価し競争させたりとITSを少し活用するだけで定量化でき、改善のためのPDCAのサイクルをまわすことで効果の把握を行い、維持・向上することが可能になる。

## 具体的手法

通常、自動車で省エネを意識する瞬間は、ガソリンスタンドで給油して燃費を計算したときだけである。このとき燃費が悪いと省エネ運転を心がけようと思うのだが、実際運転しているとそんなことは忘れてしまう。運転しているときに省エネ運転を常に心がけるためには、反・省エネ行動に対して絶えず注意を促す必要がある。過去の社会実験では、音声で注意すると同時に消費燃

料を金額換算して表示する(Figure 2)ことにより、アイドリングを減らすこともでき、急加速も抑制することができたという結果が出ている。誰もタクシーに乗車した際に料金メータの金額が気になるのと同じことである。やはり、運転しているのは人間なので、良いことは褒め、悪いことは注意することを繰り返すことで改善していくものと考えている。運転結果は、クラウド上で集計されて、結果がWeb上で配信される。



Figure 2

(Figure 3)結果として100名以上のモニター車両において1年後平均で20%程度の燃費の改善が見られた。ただし、上述したアドバイスを繰り返しているうちはいいが、それをやめるとたちまちもとに戻ってしまうことは残念と言わざるを得ない。

### 今後の課題

現在であれば、ITSの代表選手といえぶつからない車と言われる自動ブレーキなどがある。近い将来には自動運転の実用化も現実味を帯びてきた。ITSという言葉が出現して一般の人々に普及した最初のシステムは、VICSとETCではないかと思う。ETCの普及に伴い、スムーズな高速IN/OUTが実現し、VICSの普及で目的地までの中での渋滞情報からルート変更を行うことによって燃費が向上してきた。また、渋滞路の走行でも発車・停車を繰り返すのではなく、ITSで指定された速度で走行することにより止まることなく走行が行われることも可能となってくる。これらはいずれにしてもそれなりのインフラが必要であり、普及にはまだ時間がかかると思われる。したがって、これからも運転者の運転技術の向上と省エネ意識向上を図ることが必要である。HORIBAでは、ITを活用した車載装置とクラウドシステムを採用しデータ処理を行う総合運行管理支援システム「Horiba Fleet Linkage」(HFL)\*3 (Figure 4)がこれを実現している。このシステムによって運転者や車両の燃費が向上するだけでなく、走行ルートの最適化や車両の最適化などに活用されてさらに化石燃料の削減に貢献している。

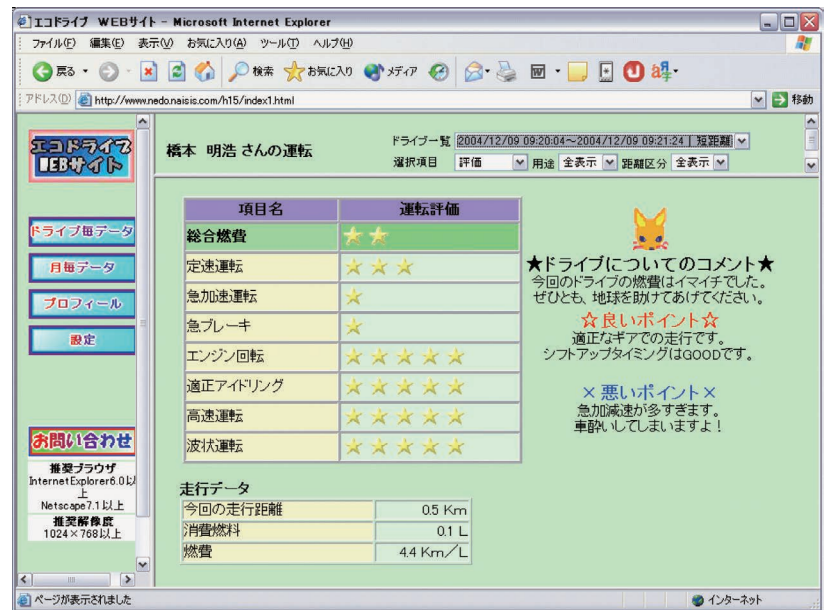


Figure 3

\*3: HFL(HORIBA FLEET LINKAGE: 堀場総合運行管理支援システム)



Figure 4

## おわりに

近い将来、自動車は自動運転されて止まることなく目的地まで時間、距離、燃料消費量などが最適化された状態で走行することになると思われる。今流行のカーボンフットプリント\*4的には、燃料の使用量を減らすことが重要であるが、自動車を製造、廃棄する際の二酸化炭素排出量や燃料、タイヤなどの消耗品なども考慮に入れたトータルの二酸化炭素排出量削減を考えた行動、選択が必要とされている。また、交通安全に関しても同様のシステムにて効果をあげている。また別の機会に紹介したい。

\*4：カーボンフットプリント：Carbon Footprint of Productsの略称で、商品やサービスの原材料調達から廃棄・リサイクルに至るまでのライフサイクル全体を通して排出される温室効果ガスの排出量をCO<sub>2</sub>に換算して、商品やサービスに分かりやすく表示する仕組み

## 参考文献

- [1] 長坂悦敬, 石倉理有, 橋本明浩“省エネ運転管理システムの開発 —実態調査からのアプローチ—”日本物流学会誌第12号(2004.6), pp.41-48



### 石倉 理有

Masatomo ISHIKURA

株式会社 堀場製作所

開発本部 アプリケーション開発センター

自動車テレマティクス設計部



# Feature Article

アプリケーション

## CVS法における燃費計測精度の向上

Improving the Accuracy of Fuel Consumption Measurement in CVS system

熊谷 樹

Tatsuki KUMAGAI

化石燃料の消費量削減が求められ、自動車における燃費性能は重要な商品価値を持つようになってきている。燃費向上に伴い、燃費計測法のデファクトスタンダードであるCVS法を継続的に改良してきたが、近年ではこれまで問題にならなかったような誤差要因も低減が必要となっている。従来製品で既に実施されている低減策の他に、MEXA-ONE、CVS-ONEに取り入れた燃費計測精度向上方法を紹介する。

Since reducing the consumption of fossil fuel is imperative, fuel efficiency in automobiles has become an important commercial value. Along with the improvement of fuel efficiency, the CVS method that is a de facto standard for fuel consumption measurement method has been continuously improved, nevertheless, small error factors which were needless to care until recent years, have higher demand for reduction. In addition to the reduction measures have already been implemented in the conventional product, the methods to improve the accuracy of fuel consumption measurement adopted to MEXA-ONE and CVS-ONE will be introduced.

### はじめに

1990年代後半、米国カリフォルニアの「低エミッション車」規制導入をきっかけに、一酸化炭素(CO)・総炭化水素(THC)・窒素酸化物(NO<sub>x</sub>)など規制対象成分の計測誤差の要因が議論され、計測精度も向上してきた。最近では、温室効果ガス削減の観点から、二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)排出量にも規制値が設けられつつある。このCO<sub>2</sub>排出量の規制は、実は、燃費の規制と同じ意味を持つ。さらに、燃料価格の高騰により、燃費性能が大きな商品価値を持つようになってきている。自動車メーカ各社は、より良い燃費性能を実現すべく、内燃機関(エンジン)の燃焼効率改善、車体軽量化、駆動エネルギーロスの削減、ハイブリッド化など、様々な燃費向上技術を開発し、世に送り出している。

自動車の燃費向上には莫大な投資が必要であることから、燃費計測にも更なる高精度・高再現性が求められる

ようになってきている。本稿では、燃費計測精度に関する誤差要因を解説し、この誤差要因の低減方法とその技術を搭載している新たな計測システム(MEXA/CVS-ONE)を紹介する。

### カーボンバランス法による燃費計測

自動車の公称燃費(カタログ燃費)の計測方法は、各国法規で定められている。小型車の燃費計測では、完成した車両を対象に、決められたパターン(**Figure 1**)を運転している間に排出されたCO<sub>2</sub>、CO、THCの排出質量より求める。この計測法では、エンジン排ガスの排出質量計測時と同じく、定容量希釈サンプリングシステム(CVS)を用いてガス濃度を計測する。**Figure 2**に、CVSを用いた計測システム構成を模式的に示す。車両からの排ガスは、全量がシステムに導入される。別に希釈用大気の導入口があり、臨界流量ベンチュリ(CFV)とその後段のフロアにより、希釈後の排ガス流量が一定となるように制御す

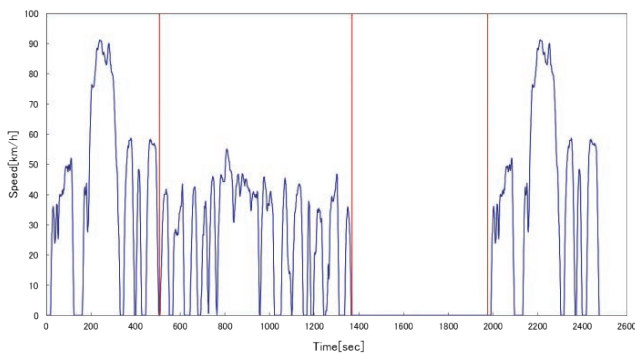


Figure 1 Driving cycle pattern(FTP75<sup>[1]</sup>)

る。試験中は、希釈排ガスの一部と希釈空気の一部を別々のバッグに採取する。試験終了後には、分析計(MEXA)によりそれぞれのバッグ内濃度(試験期間中の平均濃度)を計測する。

排ガス成分の排出質量は、CVSで計測した希釈排ガスの体積と、MEXAで分析したバッグ濃度とから算出できる。算出方法をEquation 1に示す。

$$M = \rho \times V_{mix} \times \left( C_{smp} - C_{amb} \times \left( 1 - \frac{1}{DF} \right) \right) \dots (1)$$

ここで、

- $M$  : 排出質量[g]
- $\rho$  : 対象成分の密度[g/L]
- $V_{mix}$  : 運転期間中の希釈排ガス体積[m<sup>3</sup>]
- $C_{smp}$  : 希釈排ガスバッグ内成分濃度[ppm]
- $C_{amb}$  : 希釈空気バッグ内成分濃度[ppm]
- $DF$  : 希釈比

である。 $DF$ の演算式は使用する燃料で異なるが、その一例をEquation 2に示す。

$$DF = \frac{13.4}{C_{smp\_CO_2} + C_{smp\_CO} + C_{smp\_THC}} \dots (2)$$

ここで、

- $C_{smp\_CO_2}$  : 希釈排ガスバッグ内CO<sub>2</sub>濃度[vol%]
- $C_{smp\_CO}$  : 希釈排ガスバッグ内CO濃度[ppm]
- $C_{smp\_THC}$  : 希釈排ガスバッグ内THC濃度[ppm]

式中の「13.4」はガソリンが常に完全燃焼していると仮定した場合の理論CO<sub>2</sub>濃度(%)である。この理論CO<sub>2</sub>濃度と希釈排ガスバッグ中のCO<sub>2</sub>・CO・THCとの単純な比率として、 $DF$ を求める。この際、希釈空気由来するCO<sub>2</sub>・CO・THCは考慮しない。この演算式は、エンジンでの燃焼の前後で炭素の量は変わらないことから導出されており、カーボンバランス法と呼ばれる。燃費は、CO<sub>2</sub>、CO、THCの各排出質量と試験期間中に走行した距離から求める<sup>[2]</sup>。

$$e_{CO_2} = \frac{M_{CO_2}}{d}, e_{CO} = \frac{M_{CO}}{d}, e_{THC} = \frac{M_{THC}}{d} \dots (3)$$

$$FC = \frac{866 \times \rho_f}{0.429 \times e_{CO} + 0.866 \times e_{THC} + 0.273 \times e_{CO_2}} \dots (4)$$

ここで、

- $e_{CO_2}$  : CO<sub>2</sub>のkm当たりの排出質量[g/km]
- $e_{CO}$  : COのkm当たりの排出質量[g/km]
- $e_{THC}$  : THCのkm当たりの排出質量[g/km]
- $d$  : 試験中の走行距離[km]
- $FC$  : 燃費[km/L]
- $\rho_f$  : 燃料(ガソリン)密度[g/cm<sup>3</sup>]

である。

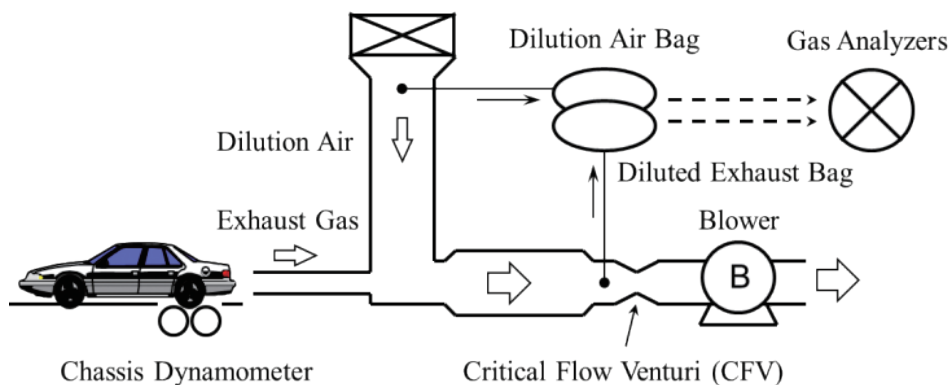


Figure 2 Configuration of CVS system

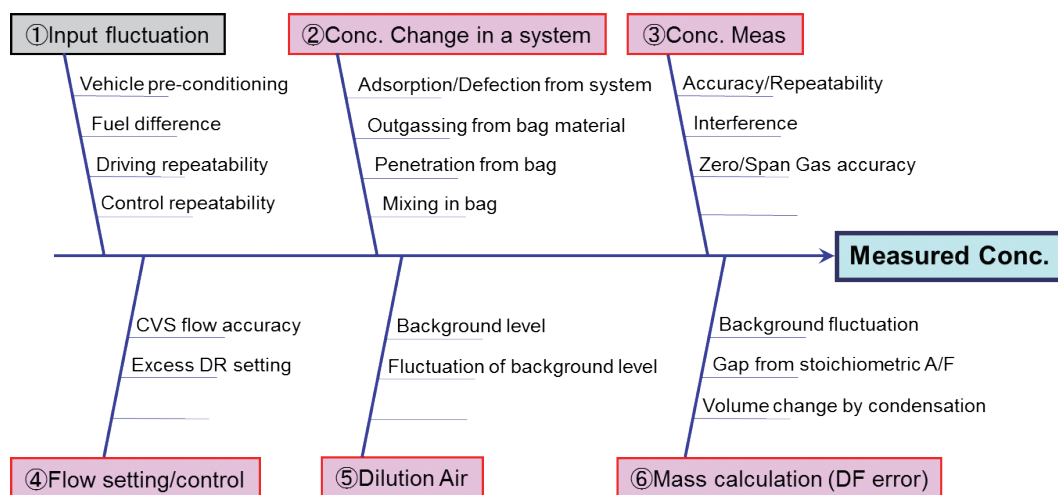


Figure 3 Cause and Effect diagram on CVS method

### カーボンバランス法の誤差要因

カーボンバランス法による燃費計測の精度には、演算式に含まれている各計測精度はもちろん、試験時の条件が前提に近いかどうかにも影響される。Figure 3に、カーボンバランス法における燃費計測の誤差要因の例を示す。誤差要因は、大きく6つに分類することが出来る<sup>[3]</sup>。

- ①発生源のふらつき(Input fluctuation)
- ②システム内での濃度変化  
(Conc. Change in a system)
- ③濃度計測(Conc. Meas.)
- ④流量設定・制御(Flow setting/control)
- ⑤希釈空気(Dilution Air)
- ⑥質量演算(Mass calculation)

図中、赤枠で示した要因は、排ガス計測システムの精度に大きく関係するものである。このような要因による誤差を低減するには、計測システムおよび計測機器側での対応が不可欠である。一方、赤枠になっていない「発生源のふらつき」は、試験前の車両のコンディショニングや燃料、試験中の運転条件などにより、実際に排出されるCO<sub>2</sub>などの濃度がふらつくことを意味する。これは、計測機器側の要因ではないので、本稿では触れない。また、「濃度計測」の要因のなかで、「校正ガス精度(Zero/ Span Gas Accuracy)」は、分析計の校正時に使用する標準ガス精度である。CO<sub>2</sub>スパンガスの場合、JCSSの1級標準ガスは±1.0%、2級標準ガスだと±2.0%というのが規格となっている。このようなガス濃度や純度は燃費計測精度にも影響するため、計測システム外で十分な配慮が必要な項目

のひとつである。

### ONEシステムにおける計測誤差対策

計測システムの精度を全体として向上させるには、寄与度が小さいものも含め、ひとつひとつの誤差要因への対策を積み重ねていく必要がある。以下、次世代の計測システムとして開発したONEシリーズのMEXAおよびCVSについて、計測誤差の低減策の一部を燃費計測精度の向上に着目して紹介する。

#### 流量計測精度の向上

Equation 1に含まれている $V_{mix}$ は、試験中の瞬時希釈排ガス流量の積算値である。この瞬時流量はEquation 5で算出する。

$$Q = C \times \frac{P}{\sqrt{T}} \dots\dots\dots (5)$$

ここで、

- Q：希釈排ガス瞬時流量[m<sup>3</sup>/min]
- C：ベンチュリ係数
- P：ベンチュリ前絶対圧力[kPa]
- T：ベンチュリ前温度[K]

ベンチュリ係数とはベンチュリごとに固有の定数であり、流量校正を行うことにより決定される。係数は、校正時の周囲環境条件を一定にし、正確に計測することでより精度よく求めることが出来る。そのため、近年ではより詳細



な校正条件が、排ガス規制のための試験方法に加わる傾向にある。式から、瞬時流量の計測精度は、圧力と温度の計測精度にも依存することが分かる。特に、圧力は流量と比例関係にあり、その計測精度が流量計測精度に直接影響するため、正確な計測が必要である。センサ単体での精度も重要だが、定期的に行う校正も重要である。校正作業の一部自動化を図り、校正に含まれる人為的な誤差要因を低減している。

また、複数のテストベンチや計測システムを保有される試験機関などでは、ベンチ間相関は重要であり、異なる計測システムで同一車両を計測しても、同じ計測結果が出るのが理想である。圧力センサが搭載されている流量計測ユニットは、空調されているベンチ内だけでなく、機械室や地下ピットなどの空調がない環境に設置されることもあり、安定した周囲環境ではないことも多い。圧力センサは原理的に温度影響を受けやすく、これを補償する回路が組み込まれているが、次世代計測システムに必要な精度を保つには不十分である。そこで、圧力センサを恒温槽に入れ、常温よりも高い温度域で温度調整することで、周囲環境の温度変化に起因する計測誤差を低減できる。この対策により設置環境に影響されない計測システムを実現している。

### システム内での濃度変化の低減

CO<sub>2</sub>は排ガスに高濃度で含まれる主要成分の一つであり、CVSカーボンバランス法による燃費計測において最も重要な成分である。正確な計測をするためには、排ガスをサンプリング経路において変化しないようにガス分析計へ供給する必要がある。サンプリング経路での濃度変化等を発生させないために、サンプリング流路の接ガ

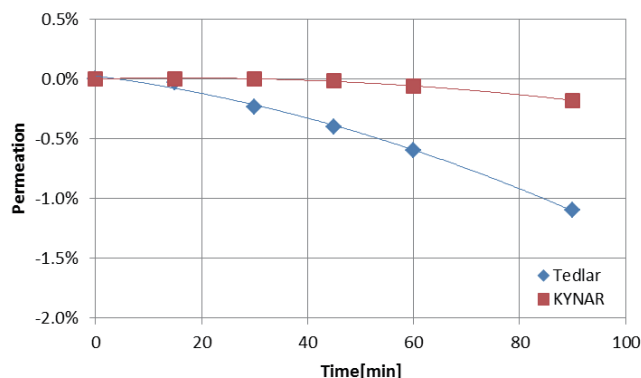


Figure 4 Comparison of CO<sub>2</sub> permeation performance

ス部への吸脱着、ガスの透過・変性を防止、低減する必要がある。

CO<sub>2</sub>の場合、吸脱着の影響は無視できるが、透過については注意が必要である。ガスがサンプリング経路にとどまる時間が長いほど透過量が増加するため、CVSのサンプリング経路において滞留時間が最も長くなるサンプルバッグではこの影響が大きい。サンプルバッグとして使用できる材料は様々あり、従来はTedlar<sup>®</sup>を使用していた。CO<sub>2</sub>透過による測定精度・再現性の低下を低減するために、ONEシリーズではCO<sub>2</sub>透過性が小さいという観点から、YNAR<sup>®</sup>を選定した。Figure 4に、新旧バッグでの透過性を検証した結果を示す。検証手法として、サンプルバッグにCO<sub>2</sub>ガス(濃度2.019 vol%)を充填し、時間経過に伴うCO<sub>2</sub>ガス濃度変化を調べる手法を用いた。Tedlar<sup>®</sup>に比べ、KYNAR<sup>®</sup>のCO<sub>2</sub>透過性が小さい。試験終了からバッグ濃度計測までの時間を20分とすると、材質変更による誤差影響の低減は約0.1%と期待できる。

### 分析計精度の向上

CO<sub>2</sub>排出量が多いと燃費は悪く、逆に排出量が少ないと燃費が良い。自動車・エンジンの燃費が向上するに伴い、排出されるCO<sub>2</sub>は小さくなる。CVS法は排ガスを希釈して計測するため、ガス分析計で測定するCO<sub>2</sub>濃度はさらに低くなる。そこで、ONEシリーズでは新たに高感度CO<sub>2</sub>分析計(Figure 5)を開発し、CVS法で要求される低濃度域での高精度計測を実現している。

Equation 1に示したとおり、CVS法では、希釈排ガスバッグ濃度から希釈空気バッグ濃度を差し引いて排出質量を求める。ここで、高濃度の水分を含む排ガスを希釈した

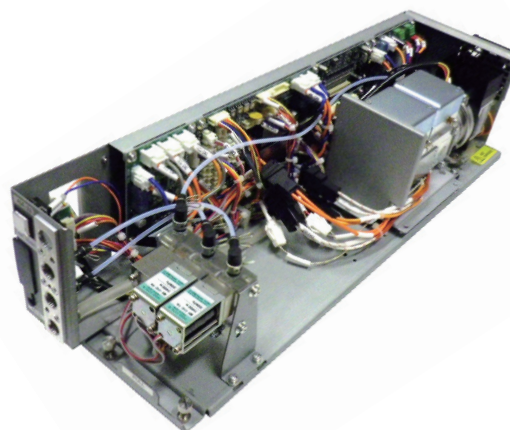


Figure 5 CO<sub>2</sub>Low Analyzer

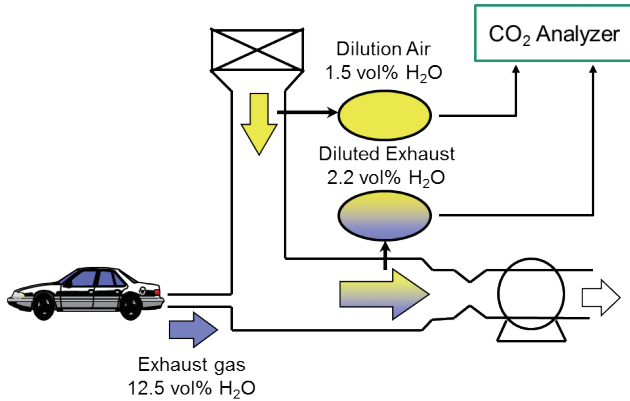


Figure 6 Image of Water Concentration in Bag

希釈排ガスバッグと、大気をサンプリングした希釈空気バッグとでは、バッグ中の水分濃度に差が発生する。一例をFigure 6に示す。一般に、非分散赤外吸収(NDIR)法を使用したCO<sub>2</sub>分析計は、原理的に水分に対する感度(水分干渉影響)があるため、バッグ間での水分濃度差により測定誤差が発生しうる。そこで、新たに開発したNDIR式CO<sub>2</sub>分析計ではCO<sub>2</sub>検出器と干渉補正用水分検出器を設け、連続的に水分干渉影響を補正することで測定誤差を低減した。水分干渉補正の有無による比較をFigure 7に示す。干渉補正を付与することで水分濃度の影響を受けず正確な計測を実現している。

さて、先に紹介した流量計測精度のように、燃費計測に対して直接的な要因は、精度向上率が燃費計測精度の向上率となる。しかし、この水分干渉補正による精度向上は、CO<sub>2</sub>の濃度計測には直接影響を与えるが、燃費演算においては排出質量演算式とDF演算式にCO<sub>2</sub>濃度が含まれているため、影響度の算出は少し複雑なものとなる。次に、水分干渉補正の有無が燃費計測に与える影響を検証した。

水分干渉の有無のみを比較するため、燃料(ガソリン)は完全燃焼するものとし、排ガスにはCO<sub>2</sub>と水分および窒素のみが含まれるとすると、Equation 2は以下のようになる。

$$DF = \frac{13.4}{C_{smp\_CO2}} \dots\dots\dots (6)$$

これをEquation 1に代入すると

$$M = \rho \times V_{mix} \times \left( C_{smp} - C_{amb} \times \left( 1 - \frac{C_{smp}}{13.4} \right) \right) \dots (7)$$

となり、CO<sub>2</sub>排出質量を一定としてCVS流量を変化させ

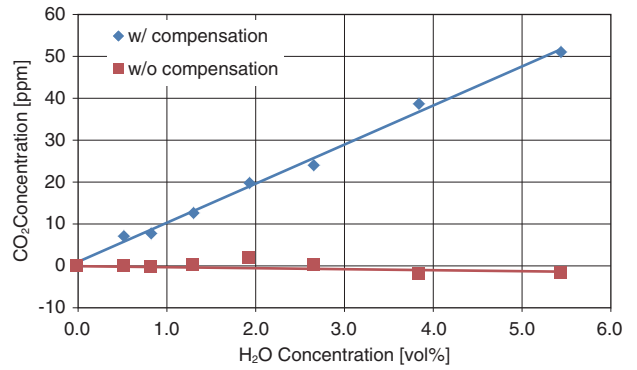


Figure 7 Effect of H<sub>2</sub>O interference compensation

た際の希釈排ガスCO<sub>2</sub>濃度は、

$$C_{smp} = \frac{\frac{M}{\rho \times V_{mix}} + C_{amb}}{1 + \frac{C_{amb}}{13.4}} \dots\dots\dots (8)$$

となる。このCO<sub>2</sub>濃度と水分濃度から水分干渉影響をFigure 6の結果より算出した。Figure 7に、干渉影響の有無が燃費に与える影響を示す。

水分干渉補正付きでは、希釈比を変化させても燃費値に変化はないが、水分干渉補正がない場合はDFが大きくなるにしたがい燃費値が変わってしまう。一般的に、DFが10~30の範囲で計測されていることが多く、この範囲内で水分干渉補正を付与すると0.2~0.4%改善される。また、燃費が向上に伴い、CO<sub>2</sub>排出質量が小さくなり同じCVS流量を使用してもDFが大きくなってしまいが、DFの違いによる水分影響がキャンセルされるため、再現性の高い計測が可能であることも示している。さらにハイブリッド車などの排出量が非常に少なく、DFがかなり大きくなるような計測対象においても有効と言える。ただ

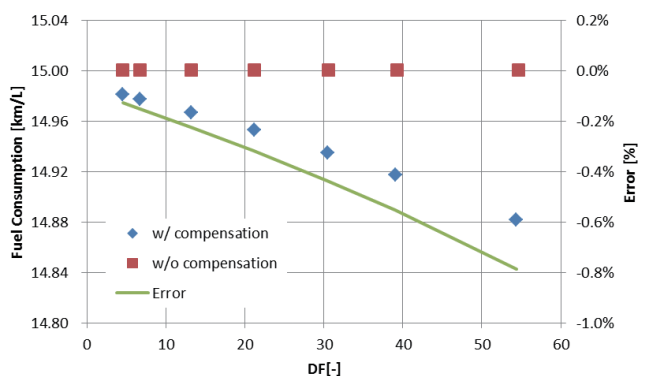


Figure 8 Comparison of Fuel Consumption

し、極端にDFが大きい場合には希釈空気に含まれているCO<sub>2</sub>がDF演算式に含まれないため、この影響が大きくなることに注意する必要がある<sup>[4]</sup>。

## おわりに

本稿では、CVSカーボンバランス法による燃費計測精度に影響する誤差要因と、その対策としてMEXA-ONE、CVS-ONEに盛り込まれた技術を紹介した。それぞれの技術を組み合わせられることで従来製品と比べて高精度な燃費計測の実現が期待できる。今後、エネルギー問題や環境問題への意識の高まりにより燃費向上技術の革新がさらに進んでいくことが予測される。これに対して、排ガス計測においては、従来法での計測精度向上を目指すだけでなく、従来法を一部変更する、あるいは新たな手法を採用することも検討していくべきと考えるこのような時代の変化を素早くとらえ、必要とされるであろう計測技術を先んじて検討・評価し、計測アプリケーションとして提供し続けていきたい。

## 参考文献

- [1] US Environmental Protection Agency : Fuel Economy and Carbon-Related Exhaust Emission Test Procedure, CFR Title 40 Part 86 Subpart B.
- [2] US Environmental Protection Agency : Fuel Economy and Carbon-Related Exhaust Emission Test Procedure, CFR Title 40 Part 600 Subpart B.
- [3] (株)堀場製作所 自動車計測セグメント編著 : エンジンエミッション計測ハンドブック(April, 2013)
- [4] 大槻喜則 : Emissions Measurement System for Hybrid and Plug-in Hybrid Electric Vehicles Using Intermittent Sampling Strategy, SAE Technical Paper 2013-01-1047(2013年)



熊谷 樹

Tatsuki KUMAGAI

株式会社 堀場製作所  
開発本部 アプリケーション開発センター  
エナジーシステム計測開発部



# Feature Article

アプリケーション

## 4WDシャシダイナモメータでの燃費試験における不安定要因の解析

Analysis of Instability Factor for Fuel Economy Test on 4WD Chassis Dynamometer

小川 恭広

Yasuhiro OGAWA

地球温暖化対策の観点から自動車の燃費性能向上が求められ、走行性能の向上を狙って4輪駆動車が市場で増加し続けており、さらに、ハイブリッド車、電気自動車など、駆動輪と動力回生輪が異なり4WDシャシダイナモメータでなければ試験ができない車両も一般的になってきた。そのため4WDシャシダイナモメータによる4WD車の燃費試験が重要となってきている。本稿では、4WDシャシダイナモメータによる安定した燃費試験を実施するために、シャシダイナモメータの安定性、車両ロス変化、走行抵抗調整等の影響解析を行い、最終的にローラ温度やタイヤ表面温度の差が車両ロスに影響し、燃費に影響することを突き止めた。

4WD Chassis dynamometer's testing is increasing for fuel economy and emission measurements with the complexity mechanism of HEV and EV. However, the test stability and repeatability used by 4WD Chassis dynamometer is still not confirmed. Against this background, studies aiming at improvements of the repeatability of 4WD fuel economy tests have been conducted. Key factor for improving stability and repeatability has been confirmed. The stabilization of vehicle loss is essential for the test stability and it is influenced by tire and roller temperatures.

### はじめに

地球温暖化対策の観点から自動車の燃費性能向上が求められており、また、走行性能の向上を狙って4輪駆動(4WD)車が市場で増加し続けている。そのため4WD車の燃費試験が重要となってきている。一方で、シャシダイナモ(シャシダイ)上における4WD車の燃費試験は、駆動系を2WD車に改造したうえで2WD車対応のシャシダイ上で計測する手法が未だに行われている。このような2WD改造での試験では、4WD車本来のかたちで燃費試験ができていない。またハイブリッド車、電気自動車など、駆動輪と動力回生輪が異なり4WDシャシダイでなければ試験ができない車両も一般的になってきた。一方でパワーエレクトロニクス技術の進化やシャシダイそのものの技術の進化によって、4WD車の特性に十分対応できる

4WDシャシダイが実用化されてきている<sup>[1, 2]</sup>。しかしながら、燃費試験において4WDシャシダイを活用して安定した試験を行うには、解明すべき課題が多い。本稿では4WDシャシダイにおける燃費試験において、安定した試験を行うことに対して影響する要因について、長年当社シャシダイを使って実験・検討を行って来た内容をまとめた。

### 試験方法と結果解析

#### 試験方法

路上で測定した走行抵抗をシャシダイの目標とし、負荷調整を実施して10・15モードでの燃費測定を行った。同時に車両のホイール仕事をホイール6分力計で求め、ホイール仕事と燃費の関係を求めた。

Table 1 Chassis dynamometer specification

ダイナモタイプ	センターモータ式4WD
ローラ表面処理	クロームメッキ
ローラ径	1219.2 mm
ローラ外側間隔	2750 mm
基本慣性	1700 kg+1700 kg
電気慣性制御範囲	-3000~2900 kg
試験慣性範囲	454~6350 kg

### 試験車両・設備

試験車両には、排気量1.8 Lの自然吸気式エンジンのアクティブ制御式4WD、4速AT車を用いた。シャシダイは、Table 1に示す電気制御式4WDシャシダイを用いた。

### 計測方法

試験では、車両が行う仕事、燃費、温度などを計測した。車両にはFigure 1に示すようなホイール6分力計を装着し、シャシダイから出力されるローラ表面力などを併せて計測した。ホイール6分力計は車軸に作用する直交3軸方向の3つの力と、各軸まわりの3つのモーメントの6分力を実際に走行しながら測定でき、干渉補正、角度補正もリアルタイムで行える。さらに車軸の回転から車両の走行速度も求めることができる。

ホイール6分力計で計測された車軸を回すモーメントトルクと回転数から求めた速度から10 msごとの仕事率を計算し、これをモード走行全体で積算してホイール仕事とした。燃費は、燃料噴射指令パルス時間を積算して規定の校正値より求めた。同時に放射温度計を用い、Figure 2に示すような方法でタイヤ表面温度も計測した。

### 燃費計測の結果

ホイール仕事と燃費との関係を求めるため、路上で測定した目標走行抵抗(RL1)と、転がり抵抗に相当する定数項

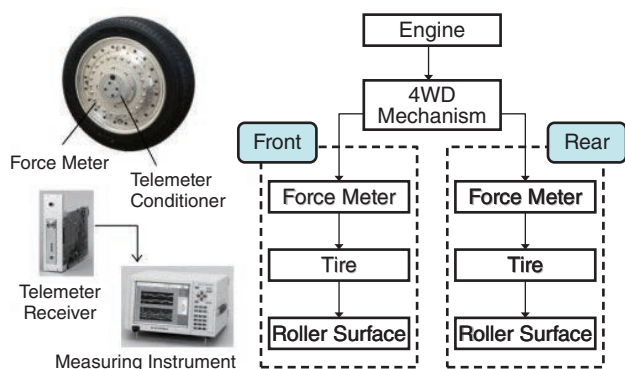


Figure 1 Six-component wheel force meter

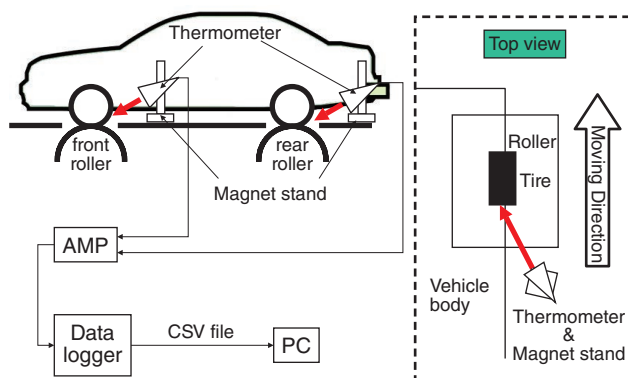


Figure 2 Temperature measurement method

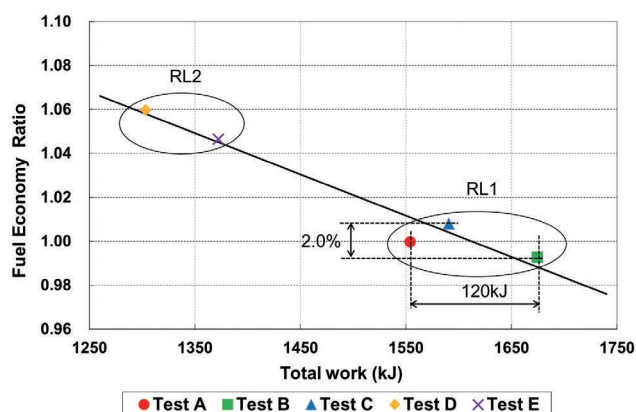


Figure 3 Relation of wheel work and fuel economy

だけを20%少なくした目標走行抵抗(RL2)の2条件で測定を行った。Figure 3にシャシダイ試験におけるホイール仕事と燃費の関係を示す<sup>[3, 4]</sup>。燃費はRL1の3回の平均値との比率とした。全体としてみると、ホイール仕事と燃費には一次の相関がある。しかしながら、同じ目標走行抵抗を使用しているはずのRL1のTest A・Test B・Test Cの間や、RL2のTest D・Test Eにおいてホイール仕事に差があり、同一グループのTest AとTest Cにおいても、燃費2%程度の差が見られた。つまり試験の手法または試験設備などに何らかの要因があると推測される。

### 変動要因の解析

同じ走行抵抗設定に対してホイール仕事に差が生じる要因として、

- ① シャシダイの走行抵抗制御の影響
- ② 試験方法・走行抵抗設定方法の影響
- ③ エンジンから出力された駆動力がローラ表面に伝達されるまでの機械損失の影響

などが考えられる。ここでは、計測したデータをもとに、それぞれの項目について検討を行った。

Table 2 Electric inertia evaluation result

項目	測定値	許容範囲	判定
駆動力偏差率%	4.2	5.0%以下	合格
相関係数	0.9881	0.98以上	合格
回帰直線の傾き	1.0033	1±0.02	合格
回帰直線の切片	-0.81	±20N	合格

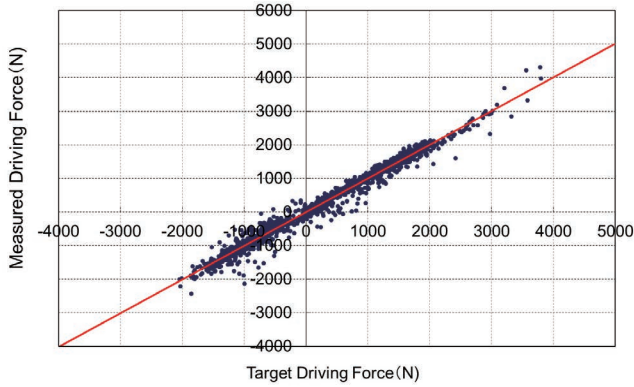


Figure 4 Electric inertia evaluation result

### シャシダイの安定性

シャシダイの制御が不安定であれば、同じ走行条件であってもホイール仕事が安定しない可能性がある。シャシダイはロードセルの安定性が制御に大きく影響するため、ロードセルの再校正で経年変化の幅を確認したが問題はなかった。さらに電気制御式シャシダイでは電気慣性制御の正確さが結果に影響するため、シャシダイの基本性能評価指標となる電気慣性評価を実施した<sup>[5, 6]</sup>。シャシダイは電気慣性制御性能の判定基準をすべて満たしており、車両駆動力の目標と実測値はほぼ1:1で高い相関があることを確認した<sup>[3, 4]</sup>。Table 2とFigure 4の結果から、シャシダイの不安定さは認められなかった。

### エンジンからシャシダイまでの力の定義

Figure 5に、車両が一定速度で走行する場合の、エンジ

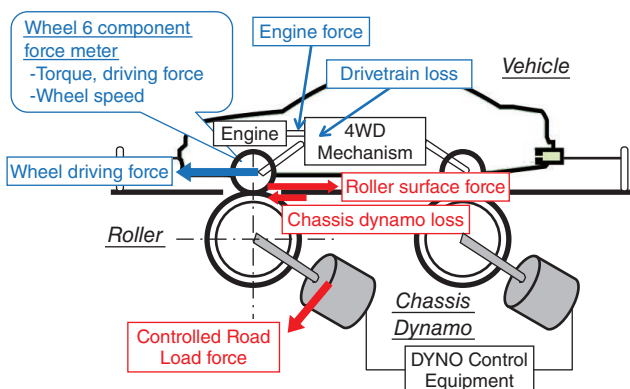


Figure 5 Relation of Vehicle and Chassis dynamo

ンで発生した駆動力がシャシダイに吸収されるまでの、車両とシャシダイの各部の力とその力が各部で消費される関係を示す。エンジンで発生したエンジン駆動力は、ホイール6分力計に伝わるまでに伝達系にある機構にて一部が消費される(伝達系ロスと呼ぶ)。ホイール6分力計で検出されたホイール駆動力は、タイヤを介してローラ表面に伝達される。タイヤがローラ表面を駆動する力は、シャシダイのローラを回すことで一部消費され(タイヤロスと呼ぶ)、さらにシャシダイの動力吸収部で吸収(ダイナモ制御走行抵抗と呼ぶ)される。また、シャシダイには装置自身も持つ機械損失(ダイナモ単体ロスと呼ぶ)を持つ。これらの力の関係は以下ようになる。

$$\text{伝達系ロス} = \text{エンジン駆動力} - \text{ホイール駆動力}$$

$$\text{タイヤロス} = \text{ホイール駆動力} - \text{ローラ表面力}$$

$$\text{ダイナモ単体ロス} =$$

$$\text{ローラ表面力} - \text{ダイナモ制御走行抵抗力}$$

シャシダイの走行抵抗設定は、車両がローラに載った状態で、目標走行抵抗に合やすようにダイナモ制御走行抵抗力を調整する。よってダイナモ制御走行抵抗力は車両の伝達系ロスとタイヤとローラ間で発生するタイヤロスを、目標走行抵抗から差し引いた値に調整される。ここでは伝達系ロスとタイヤロスの合計値を車両ロスと呼ぶ。

シャシダイの実走行抵抗力は、ダイナモ制御走行抵抗力と実際の車両ロスを足した関係となる。

$$\text{車両ロス} = \text{伝達系ロス} + \text{タイヤロス}$$

$$\text{シャシダイの実走行抵抗力} =$$

$$\text{ダイナモ制御走行抵抗力} + \text{車両ロス}$$

### 4WDシャシダイでの力関係

Figure 6に走行抵抗調整が完了後の目標走行抵抗力、ダイナモ制御走行抵抗力、車両ロスの力関係を示す。速度40 km/h以下の低速度域では風損影響が少なく、走行抵

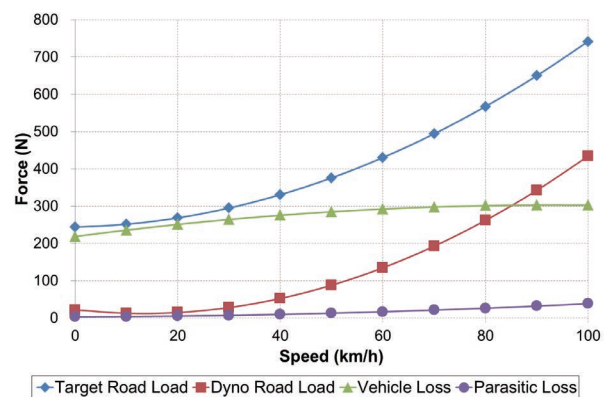


Figure 6 Relation of road load and vehicle loss



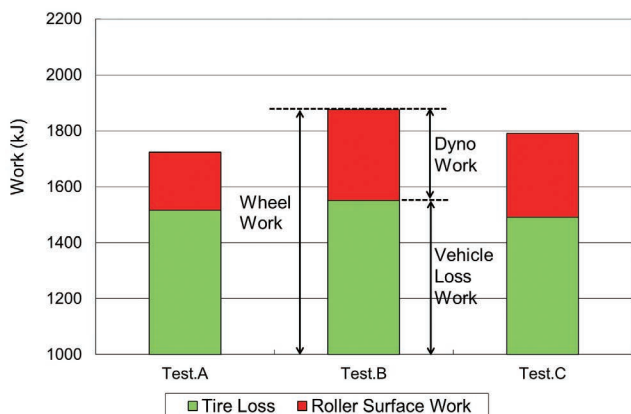


Figure 7 Wheel work breakdown

抗のほとんどは車両ロスであることがわかる<sup>[3, 4]</sup>。また、4WDシャシダイでの試験は、タイヤ本数が2倍になるため、2WDシャシダイでの試験よりも車両ロスが大きい。そのため、4WDシャシダイの試験では、車両ロスの影響が極めておおいことがわかる。なお、シャシダイの機械ロス(ダイナモ単体ロス)は全速度域にわたって小さいこともわかる。

### 仕事の変動

RL1における3回のモード走行(Test A・Test B・Test C)で、ホイール仕事に差があることがわかった。そこで、ローラ表面力と速度から求めたダイナモ仕事と車両ロス仕事とに区分して比較したものをFigure 7に示す<sup>[3, 4]</sup>。

車両ロス仕事はホイール仕事からダイナモ仕事を差し引いた値を用いた。ホイール仕事の差は主にダイナモ仕事の差であることがわかる。さらに、タイヤロス仕事にも少し差がある。これらの試験においては、各試験前に走行抵抗調整を実施していることから、RL1における走行抵抗調整直後の実走行抵抗とダイナモ制御走行抵抗の比較をFigure 8に示す。車両とシャシダイを含めた実走行抵抗は良く一致しているものの、ダイナモ制御走行抵抗に差があることがわかる。シャシダイ自身は安定していることを確認済みのため、走行抵抗調整時の車両ロスに差があったため、結果的にダイナモ制御走行抵抗が変化したものと推測できる。

また、ホイール仕事自身に差があることから、走行抵抗調整時の車両ロスおよび燃費試験中の車両ロスに何らかの差が生じていると推測した。

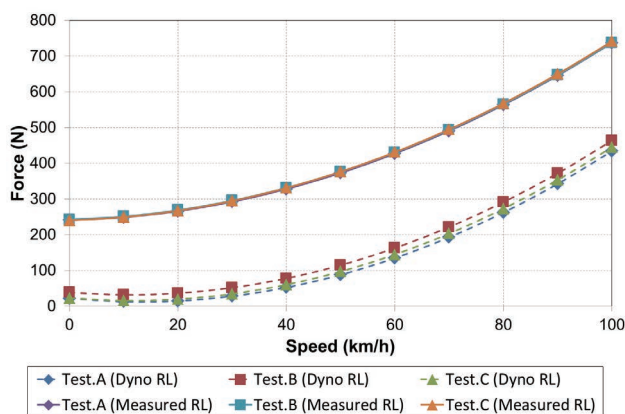


Figure 8 Comparison of road load

### 車両ロス変動の要因解析

前章で燃費試験の再現性確保には車両ロスが大きく関与していることがわかった。そこで、車両ロスの変動とその影響について調査した。

#### 車両ロスの変動実験

##### 車両ロスの内訳

車両ロスの詳細を確認するため、実際に車両が走行しているときの車両ロスの内訳を調査した。伝達系ロスの測定は、シャシダイを定速度制御でローラ側から車両を駆動し、デフ・トランスミッションなどの駆動系のロスを6分力計で測定した。Figure 9にシャシダイを20 km/h定速度制御を行った時の測定結果を示す。伝達系ロスは約25Nであった<sup>[3, 4]</sup>。

タイヤロスの測定は、シャシダイを定速度制御とし、車両は吸気負圧を一定(エンジン駆動力一定)にして車両からローラを駆動し、ホイール駆動力を6分力計で測定した。同時にシャシダイの吸収力も測定した。ホイール駆動力から吸収力を差し引いた値をタイヤロスとして求めた。

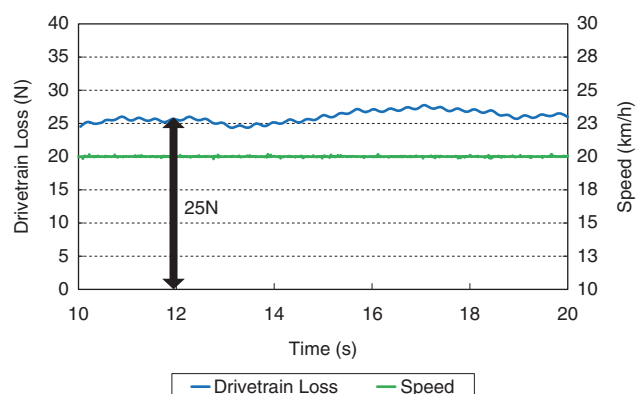


Figure 9 Drivetrain loss

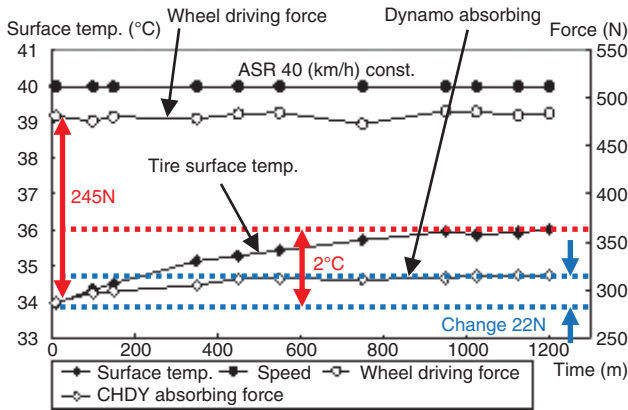


Figure 10 Tire loss behavior

Figure 10に、シャシダイを40 km/hの定速度制御とし、車両の吸気負圧を一定にして運転をおこなった結果を示す<sup>[3]</sup>。走行開始時のタイヤロス約245Nで、車両ロスのほとんどはタイヤロスであることがわかる。さらに、20分間の走行において、タイヤ表面温度は約2°C上昇し、タイヤロスは22Nも変化(減少)していることもわかった。このことからタイヤ表面温度とタイヤロスの挙動について調べることにした。

### 車両ロスとタイヤ表面温度の挙動

一般的な試験運転として、車両暖機走行、10・15モード走行、定常走行を行い、各走行間で惰行法による車両ロスとタイヤ表面温度の変化を求める実験を行なった。ここでは車両ロスは惰行時の計測吸収力からダイナモ設定吸収力を引いた値とした。タイヤ表面温度は各走行の終了直後の車両の駆動輪側である前輪タイヤを測定した。また、車両暖機走行中のタイヤ温度と車両ロスの変化も測定するため、40分60 km/hの暖機走行の代わりに、10分間60 km/hを4回繰り返した。Figure 11に、惰行試験時における速度中央値である50 km/hでの車両ロスとタイヤ表面温度の関係を示す。車両ロスは各試験工程にお

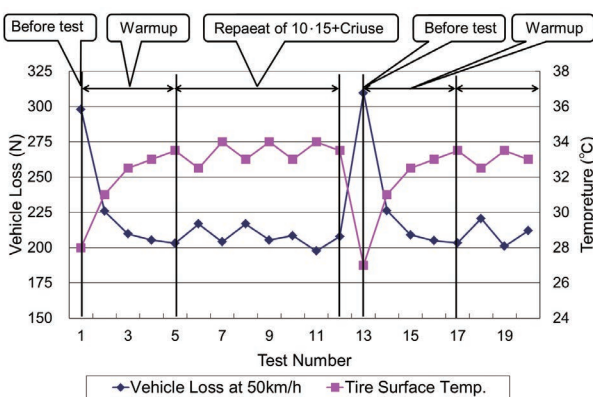


Figure 11 Vehicle loss and Tire surface temperature

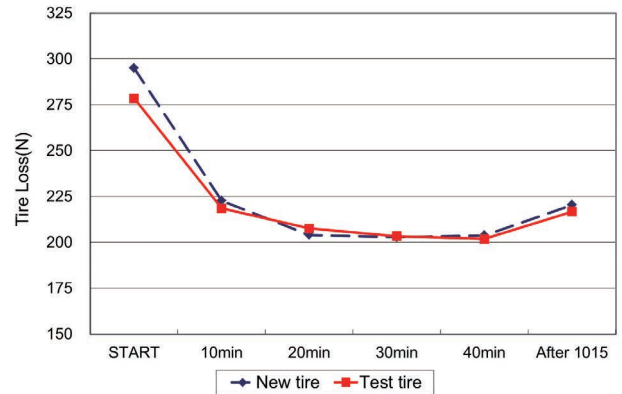


Figure 12 Comparison of Tire

いて大きく変化していて、その挙動はタイヤ表面温度変化と逆の傾向にあることがわかる。

### タイヤの経時変化影響の確認

試験はテストコースでの測定からシャシダイ上での測定まで、長期間実施していることもあり、車両ロス変化の要因にタイヤの経時変化(摩耗)の影響がないかを確認した。確認方法は、試験に使っていたタイヤと新品タイヤを使い、80 km/h定常暖機で、装着直後からの車両ロスの変化(Figure 12)を比較した<sup>[3, 4]</sup>。新品タイヤを使用した車両ロスは、装着直後は試験に使用した車両ロスと比べて大きかったが、30分程度で、ほとんど差がなくなった。燃費試験は40分の定常暖機運転後に実施していたため、今回の実験において使用したタイヤには、経時変化(摩耗)の影響はないと判断した。

### 走行抵抗調整時の変動要因

一般的な燃費試験では、車両ロスの変化によって走行抵抗調整をやり直すケースがある。この間の実走行抵抗の変化を把握するため、走行抵抗調整を実施した後に継続して確認惰行を繰り返した。Figure 13に目標走行抵抗、

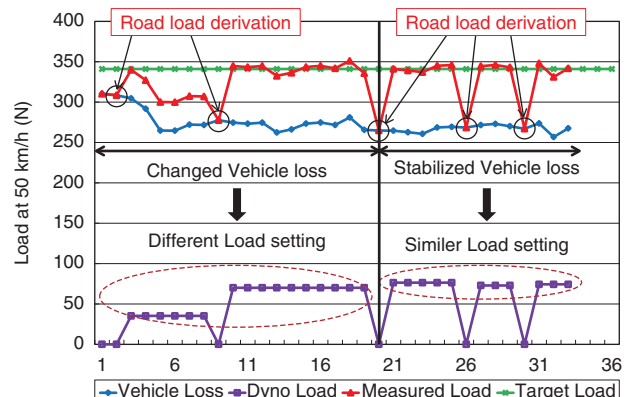


Figure 13 Dynamo Load change by Vehicle loss

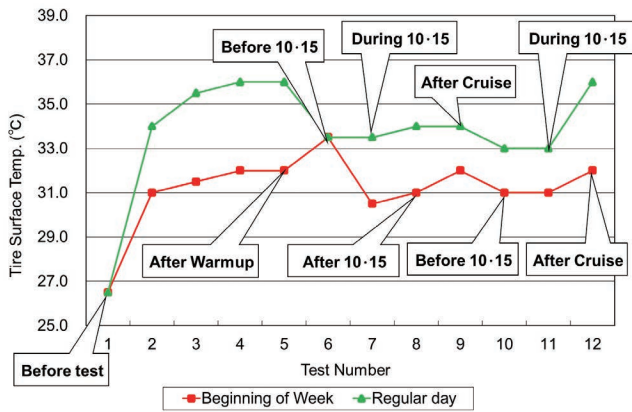


Figure 14 Tire temperature changing for different day

実測走行抵抗, ダイナモ制御走行抵抗, 車両ロスについて, 各々の50 km/h時の値を示す<sup>[3]</sup>。

車両ロスが不安定で大きいときに走行抵抗調整を行うと, ダイナモ制御走行抵抗値は小さくなる。さらに調整直後は実測走行抵抗と目標値とは一致しているが, 車両などの温度が変化して車両ロスが変化すると, 車両に作用する実測走行抵抗も明らかに変化する。逆に, 車両が安定し, 車両ロスが安定した状態で走行抵抗調整を実施すると安定したダイナモ制御走行抵抗が得られ, それにより実測走行抵抗値も安定していることがわかる。これらの検証から, 車両ロスの大半を占めるタイヤロスの変動を抑える必要があり, そのためにはタイヤ表面温度の安定化が, 燃費試験の再現性確保に非常に重要であることがわかった。

### タイヤ表面温度の日間変動

タイヤ表面温度変化は, 日毎に異なる挙動であることもわかった。Figure 14に示すように, 週の試験始めの日とその他の日とでは, 試験開始後からのタイヤ表面温度の

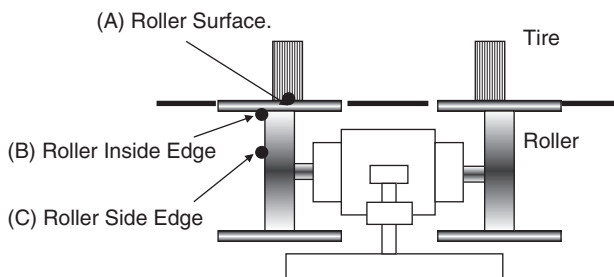


Figure 15 Roller temperature measurement point

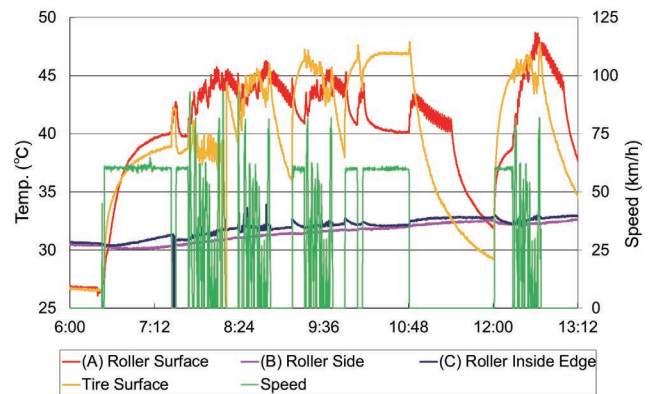


Figure 16 Roller temperature changing

上昇が大きく異なることがわかった<sup>[3]</sup>。この違いの要因として, 週末はシャシ室と地下ピットの空調をOFFにしていたため, タイヤと接触するローラ温度の影響と, 試験前のシャシダイの暖機方法にも要因があると推測した。

### ローラ温度影響

最初にローラのどの部分の温度を測定するのが良いか検証を行った。そこでFigure 15に示す, (A)ローラ表面, (B)ローラ内側上部と(C)ローラ内側横部分の温度を測定し, 試験開始からの温度変化を確認した<sup>[4]</sup>。Figure 16にそのとき各部の温度変化を示す。タイヤ表面温度変化や冷却風の影響を受けにくく, かつローラそのものの温度変化を測定できるポイントとして(B)のローラ内側上部の温度を見ることにした。

それらの結果をふまえ, 休日明けの試験開始状態と, 週中の試験開始状態を再現し, それぞれの状態でのローラ温度上昇の比較を行った。Figure 17結果を示す。明らかにローラ温度上昇が異なることがわかる。

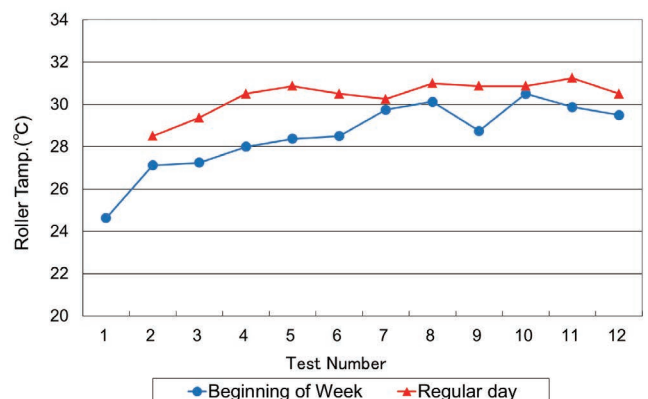


Figure 17 Roller temperature for different day



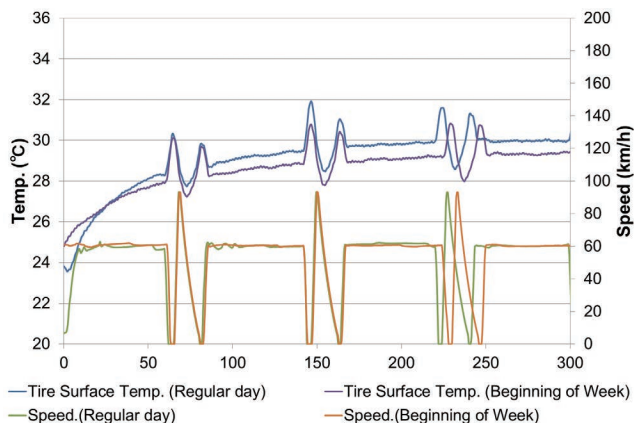


Figure 18 Comparison of tire surface temperature

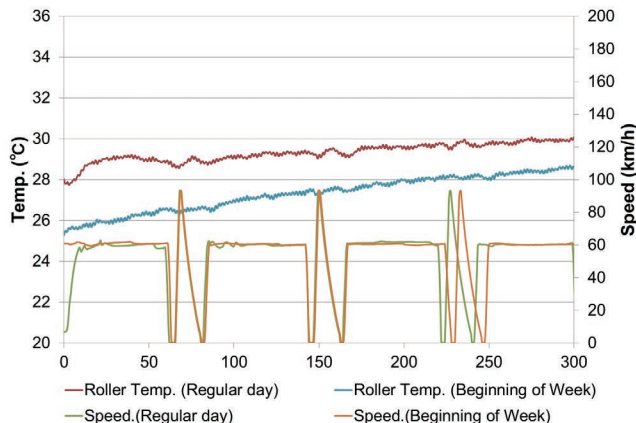


Figure 19 Comparison of roller temperature

そこで、両者のタイヤ表面温度とローラ温度の上昇度合いを比較した。Figure 18からタイヤ表面温度に差があり、その違いがFigure 19に示すローラ温度の差に起因していることがわかる。以上のことから、週初めの試験でタイヤ表面温度が低い理由は、ローラの温度自身が低く、通常のローラ暖機だけではローラ温度は上昇しにくい。その影響でタイヤ表面温度が上昇しにくいことが、タイヤロスに大きな影響を与えていると言える。このことは、長年言われていた休日明けの試験結果が悪くなる傾向の要因であると推測される。

### ローラ温度影響の改善方法

週末はシャシ室と地下ピットの空調をOFFにしていたことにより、休日明けの試験開始時のローラ温度の状態が異なっていたことがわかった。この改善策として、週末も地下ピットの温度を30℃で空調制御を行った場合との比較を行った。Figure 20の結果から、休日明けの試験開始時のローラ温度の挙動も、週中の試験開始時の挙動に近付くことがわかった。このことから、試験開始時のローラ

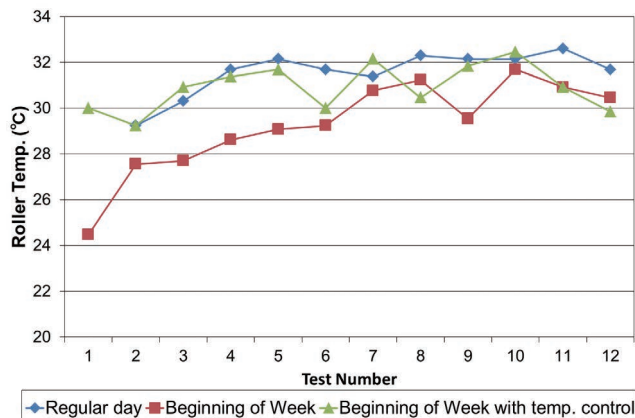


Figure 20 Roller temperature by pit temperature control

温度を管理することが重要である。

### ローラ暖機についての考察

通常シャシダイ自身の暖機は、シャシダイ単独で実施することが多い。そこでシャシダイ単体で暖機する場合と、車両を使って暖機した場合とのローラ温度の比較を行った。Figure 21に結果を示す。シャシダイ単独で暖機運転を行ってもローラの温度は上昇しないが、車両を用いてシャシダイの暖機運転を行うとローラの温度が上昇する。したがって、休日明けのシャシダイの暖機を別の車両により、車駆動でローラ温度を上昇させておくのも有効な方法と言える。

### おわりに

4WDシャシダイでの燃費試験において、ローラ温度やタイヤ表面温度違いが車両ロスに影響し、最終的にホイール仕事や燃費に影響すること確認し、以下の結論が得られた。

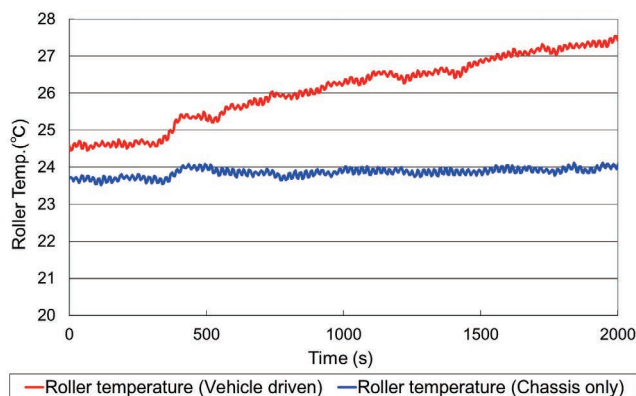


Figure 21 Roller temperature different by Warm-up

- ・車両ロスの大部分を占めるタイヤロスはタイヤ温度に大きく左右され、運転状態により変化する。
- ・車両ロス(含むタイヤロス)が安定しない状態で走行抵抗調整を実施すると、正しいシャシダイ設定が行えず、燃費に影響を与える。
- ・たとえ車両やタイヤ表面温度が安定していても、ローラ温度に大きな違いがあると、車両ロスに影響を与え、燃費に影響する。

以上のように、シャシダイにおける燃費試験では、車両の安定だけでなく、シャシダイのローラ温度も安定させることが重要であることが裏付けられた。今後の課題として、安定した試験を実施するための環境条件、暖機条件などを明確にする必要がある。

最後になるが、弊社の最新型4WDシャシダイ(VULCAN EMS-CD48L 4WD)の写真を掲載しておく。

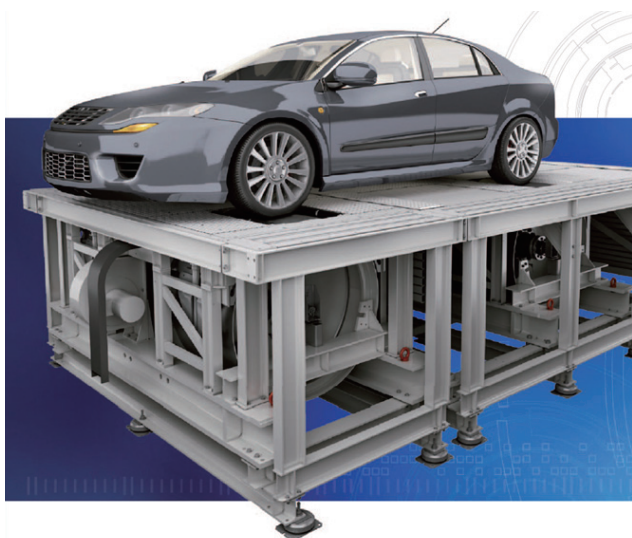


Figure 22

弊社は、1980年に電気慣性式2軸ローラタイプのシャシダイを開発し、販売を開始した。1991年には米国環境保護局(EPA)に、2WD車用の電気慣性式1軸48インチ(ローラ径1219.2 mm)シャシダイを納入し、北米向けの基準機となっている。さらに、2004年は4WD車用の電気慣性式1軸48インチシャシダイも納入している。国内では、本稿でシャシダイの基本性能評価として用いた、電気慣性評価法<sup>[5, 6]</sup>の検討から規格決めにも参加している。このような沿革を経て、現在のVULCAN EMS-CD48Lシリーズに至っている。

## 参考文献

- [1] 野田ほか：4輪駆動車の排出ガス・燃費試験に適用可能な4WDシャシダイナモメータの性能要件の検討, (社)自動車技術会 学術講演前刷集, No.29-06(2006)
- [2] 鈴木ほか：4WD車における実路走行と台上走行での車両駆動特性の実験解析, (社)自動車技術会 学術講演前刷集, No.29-06(2006)
- [3] Sato, Y. Kusakage, T. Satonaka, T. Nakamura, S. Ogawa, Y. and Noguchi, S : An analysis of behavior for 4WD vehicle on 4WD-chassis dynamometer. In: SAE paper 2010-01-0926(2010)
- [4] Kusakabe, T. Sato, Y. Ogawa, Y. and Noguchi, S. : Influence of Vehicle Loss on Fuel Economy Measurement of 4WD Vehicles. In: ATZ 07-0812011 Volume 113(2011)
- [5] 電気慣性式シャシダイナモ性能基準の検討JASO Technical Paper JASO TP-6001(2006)
- [6] 自動車-四輪駆動車用シャシダイナモメータの要件及び評価方法-燃料消費率試験への適用 JASO E011(2011)



## 小川 恭広

Yasuhiro OGAWA

株式会社 堀場製作所  
開発本部 エンジニアリングセンター  
自動車計測システム設計部

# Feature Article

アプリケーション

## 燃料流量計を用いた直接燃費計測

Direct Fuel Consumption Measurement Using Fuel Flowmeter

松山 貴史

Takashi MATSUYAMA

糸賀 友城

Yuki ITOGA

京都議定書に代表される温室効果ガス削減の動向により、運輸部門においては、排気ガス削減に結び付く規制として燃費基準が年々厳しく規定されてきている。それに伴い、各自動車メーカーの低燃費化への取り組みが急速に進んでおり、低燃費化を実現する技術開発のために、高精度の計測が可能な燃費計測システムが求められている。本稿では、高精度のダイレクト燃費計測の要望に応えうる弊社燃料流量計と、センサー・計測システムの視点における燃費計測に重要なポイントを紹介する。

Influenced by the trend toward reducing greenhouse gases represented by Kyoto Protocol, provisions on fuel consumption standard is stricter every year in transportation sector as regulations directly contributing to reduction of exhaust gases. As a result, efforts of automobile manufacturers to reduce fuel consumption are made more actively and quickly and therefore the technical development to realize low fuel consumption requires such a fuel consumption measurement system that enables highly accurate measurement. This article introduces our fuel flowmeter which satisfies the request for direct fuel consumption measurement with high accuracy and the important points to fuel consumption measurement at the viewpoints of sensor and measurement system.

### はじめに

自動車やエンジンは、温室効果ガスであるCO<sub>2</sub>の排出源の一つとなっている。たとえば、2012年の国内の統計では、運輸部門からのCO<sub>2</sub>排出量は全体の約18%を占める (Figure 1)。このため、近年、世界各国でエンジンや自動車からのCO<sub>2</sub>排出量が規制されるようになってきた。エンジンでのCO<sub>2</sub>発生量は、燃料消費量で決まるため、CO<sub>2</sub>の排出量を削減するには燃費の向上が欠かせない。これを受け、自動車業界全体で燃費改善技術の開発がますます盛んになっている。その開発プロセスでは、燃料消費量を精度よく計測することが求められる。

燃費の計測には、いくつかの方法が用いられている。その一つが、エンジンで消費される燃料流量を流量計で直

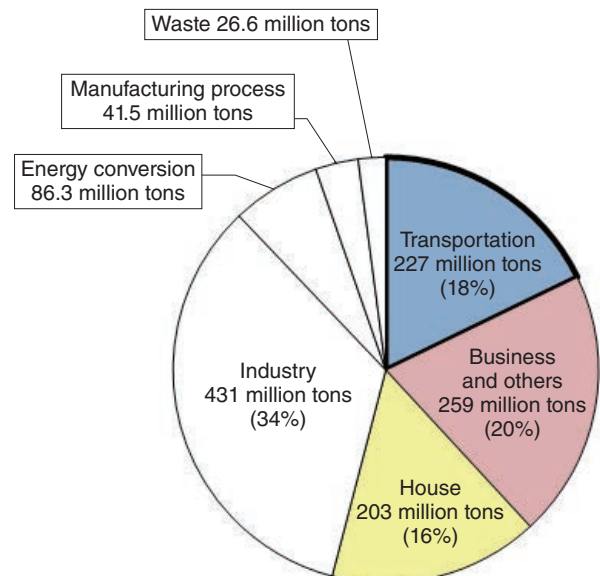


Figure 1 CO<sub>2</sub> emission of the transport sector (Japan 2012)  
Source: Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism.



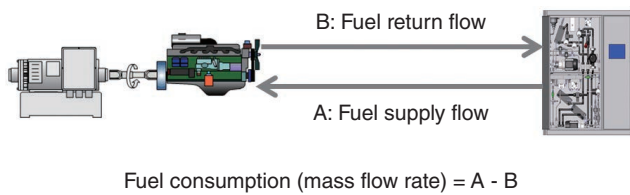


Figure 2 Image of fuel measurement by fuel flowmeter

接計測する方法である。ここで、この燃料流量計測に要求される計測精度を試算してみる。たとえば、排気量10 Lの重量車エンジンの場合、JE05と呼ばれる試験サイクル(1830秒)で運転した場合の燃料消費量は約3.6 kgと見積もられる。これを燃料の質量流量に換算すると約7.1 kg/hとなる。燃費については、この値からの1%の改善でも大きな意味を持つことを考えれば、少なくとも0.07 kg/h程度の変化を明確に検出できる必要があることがわかる。HORIBAグループでは、このような高精度での燃料流量計測への要求に対して、コリオリメータ式燃料流量計FQ-2200CRを提供している。本稿では、このFQ-2200CRにおける精度向上技術について紹介する。

### 燃料流量計FQ-2200CRの概要

#### 装置の全体構成

Figure 2に、燃料流量計を用いた燃費の直接計測のイメージを示す。実際に消費された量(流量)は、エンジンへの燃料供給ラインとエンジンからの燃料リターンラインとの流量の差分から求める。このような燃料流量計による燃費計測は、リアルタイムの燃料消費量を連続計測できるのが大きな特長である。その一方、燃料ライン中に流量計を組み込む必要があり、完成車両の試験時には適用しにくい面もある。そのため、エンジンの研究開発現場や重量車用エンジンの認証試験など、主にエンジン単体で

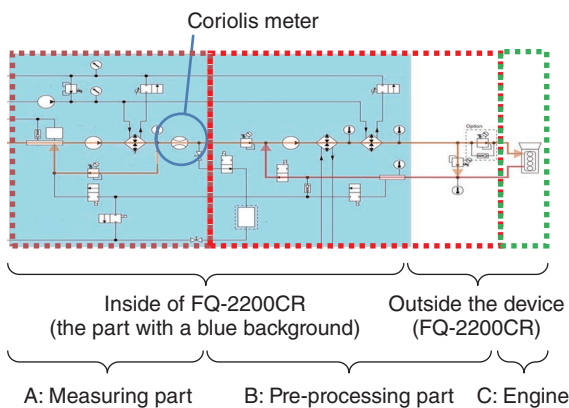


Figure 3 Fuel measurement flow of FQ-2200CR

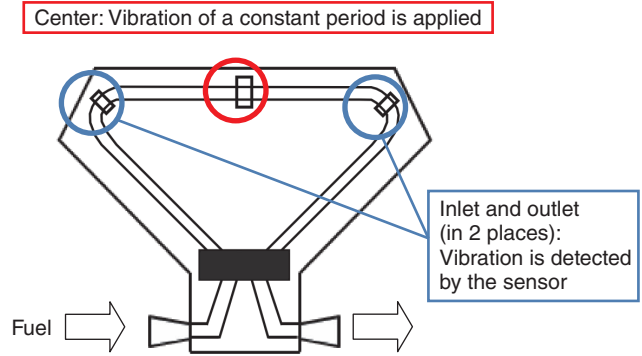


Figure 4 Outline of Coriolis meter

の燃費計測に使用される。

Figure 3に、燃料流量計FQ-2200CRのフロー図を示す。FQ-2200CRでは、コリオリメータと呼ばれる質量流量センサを用いて、燃料流量を検出している。コリオリメータの原理と特徴については後述する。青枠で示した範囲がFQ-2200CRの内部である。Figure 3中、A部は計測部にあたり、コリオリメータもここに搭載されている。また、B部で示す部分は、エンジンに送られる燃料の温度と圧力を調整する前処理部となっている。C部は、試験対象のエンジンである。

#### コリオリメータの原理と特徴

FQ-2200CRに使用しているコリオリメータは、1本のつながった配管で2つのループを作り、そのループ部を互いに平行に配置した構造となっている。Figure 4に、コリオリメータをループに対して垂直の方向から見た概略図を示す。ループの中央のポイントには、コイルにより一定周期の振動が加えられている。その両側、燃料の入口側と出口側のポイントには、実際の配管の振動を検知するセンサが設置されている。

Figure 5に、コリオリメータによる燃料流量検出の原理を

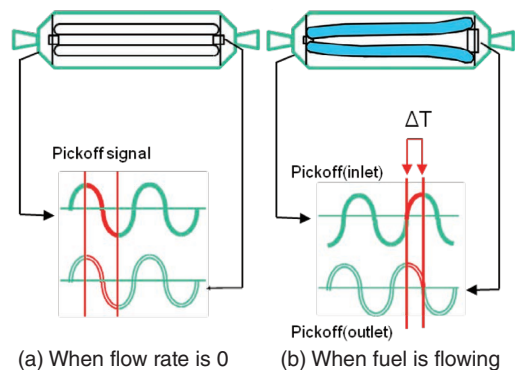


Figure 5 Principle of Coriolis meter

示す。Figure 5aは、ループ内部に燃料の流れがないときで、ループの2箇所でもニタしている振動の位相がそろっている。一方、Figure 5bはループ内部を燃料が流れているときである。このケースでは、2箇所でも検出する振動波形に位相差( $\Delta T$ )が生じている。これは、流体の流れている配管に対し、流れと垂直方向に振動を加えると、コリオリ力と呼ばれる力が発生するためである。コリオリ力の大きさは配管内の質量流量に依存するため、検出される位相差から質量流量を算出することができる。

コリオリメータでは、センサから直接、「質量」としてのリアルタイムの流量を知ることができる。「容積」流量を検出するタイプのものとは違い、燃料密度を用いた質量への換算が不要であるため、密度補正に起因する誤差の影響を排除できる。なお、一般には、コリオリメータは低流量域での繰り返し性が確保しづらなのが難点とされている。後述するように、FQ-2200CRでは、HORIBAグループ独自の技術によりこの問題点を解決している。

### 繰り返し性向上のための技術

コリオリメータ式燃料流量計の繰り返し性を確保するには、センサであるコリオリメータそのものの条件のほか、エンジンに燃料を供給する前処理部の条件もポイントとなる。以下、FQ-2200CRで応用されている技術を紹介する。

#### 流量計測部の条件制御

コリオリメータでは、内部を通っている燃料の温度・圧力の変化が、センサ出力に影響する可能性がある。Figure 6に、この影響を抑制するためのポイントを示す。

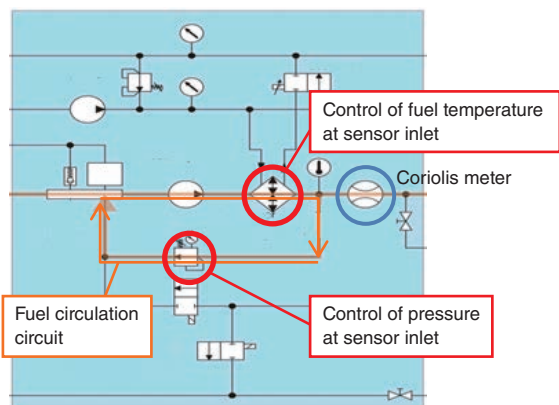


Figure 6 Inhibition of influence of temperature and pressure in coriolis meter.

このように、コリオリメータ入口に燃料循環回路を設け、レギュレータを用いて燃料圧力を、熱交換器にて燃料温度を制御している。この回路によりゼロ点校正時点と実計測時の条件をそろえ、センサ出力への温度・圧力の影響を抑制している。

また、コリオリメータの出力に影響する別の要因として、センサ部の振動があげられる。すでに説明したように、コリオリメータは内部の配管を振動させて質量流量を検出している。配管内の燃料の脈動、あるいは外部の振動がコリオリメータ内の配管振動と共振してしまうと、検出精度を悪化させる可能性がある。そこで、燃料ポンプや外部からの振動が伝わりにくいフレキシ管を燃料配管の一部に使用し、さらにコリオリメータには防振対策を行っている。

#### 前処理部の条件制御

コリオリメータで燃料流量を計測する際、エンジンとコリオリメータを接続する前処理部(配管・レギュレータなど)内にはある程度の容積が存在する。この容積が温度により変動する、あるいはこの部分を流れている燃料の密度が温度・圧力により変動すると、エンジンが消費した燃料をコリオリメータで検出する際の応答時間に影響を与える。この現象は、燃料流量の計測結果の繰り返し性悪化の一因となり得る。Figure 7に、前処理部における温度・圧力影響の低減策を示す。

FQ-2200CRでは、内燃機関直前まで燃料を循環させ、燃料供給温度を安定させている。この温度制御には熱交換器2式を使用する。まず、1次側の熱交換器で燃料温度をターゲット温度+ $\alpha$ °Cまでいったん昇温し、次に、2次側

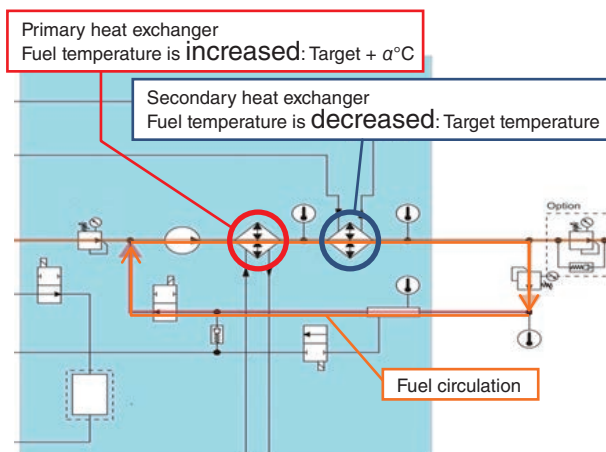


Figure 7 Inhibition of influence of temperature and pressure in the preprocessing part

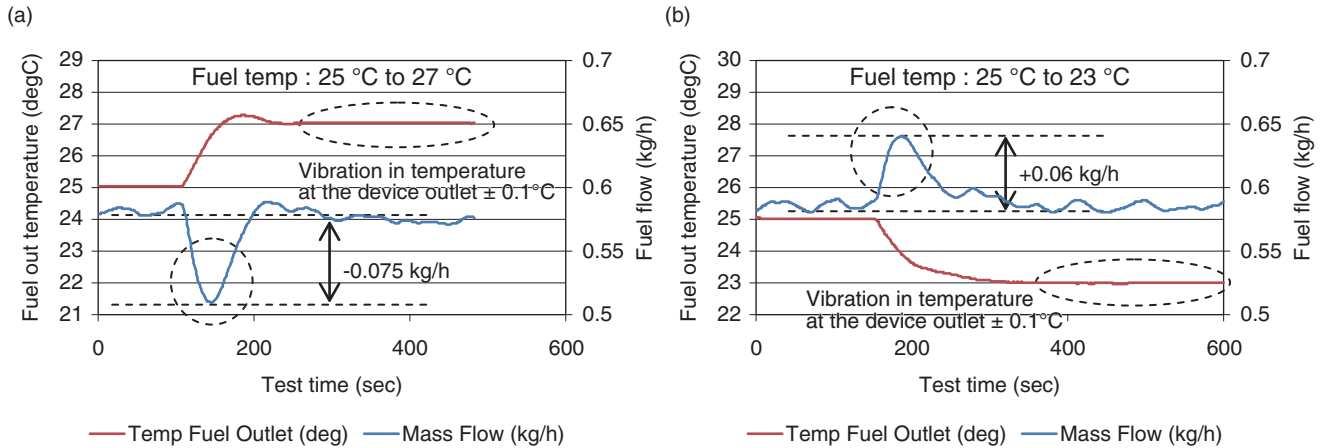


Figure 8 燃料温度を変化させた場合の質量流量出力

の熱交換器でターゲット温度へ冷却する。ここで、 $\alpha$ は一定値である。このように2段構えの制御を行うことで、燃料温度を高精度で制御することが可能である。

#### 前処理部における温度変化の影響の例

ここでは、参考として、燃料温度が変化するときの前処理部での影響を確認した例を紹介する。Figure 8に、FQ-2200CRにて、内部の燃料温度を急変させたときの出力の例を示す。燃料流量は一定の状態、燃料温度制御の目標温度を25°Cから27°C (Figure 8a), または25°Cから23°C (Figure 8b)に変更した。いずれのケースも、燃料温度が約100秒かけて変化する間に、燃料流量出力に-0.075 kg/hまたは+0.06 kg/hのふらつきが発生している。また、温度安定後には、出力は温度設定変更前と同レベルに戻っている。

上の現象の要因として、前処理部に使用しているレギュレータPR4 (Figure 9)の容積が温度により増減していることが考えられる。Figure 10に、このレギュレータの動作と内部で働く力を示す。燃料流量がゼロの場合、レギュレータ内部の流路はレンジスプリングの力により閉じた状態にある (Figure 10a)。一方、圧力を制御した状態で燃料が流れているときには、下部のスプリングにより上部

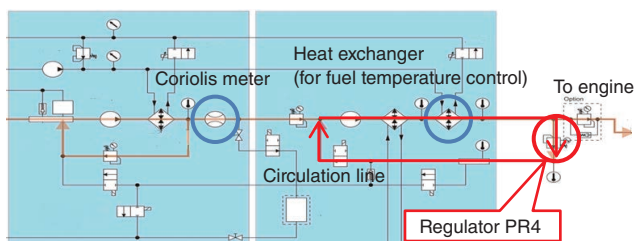
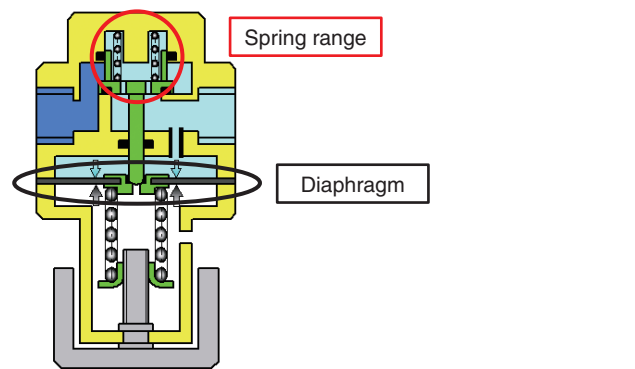
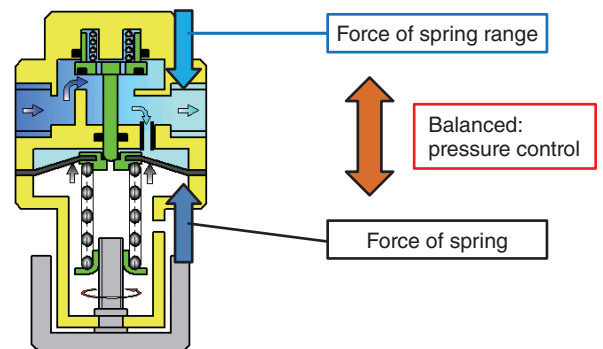


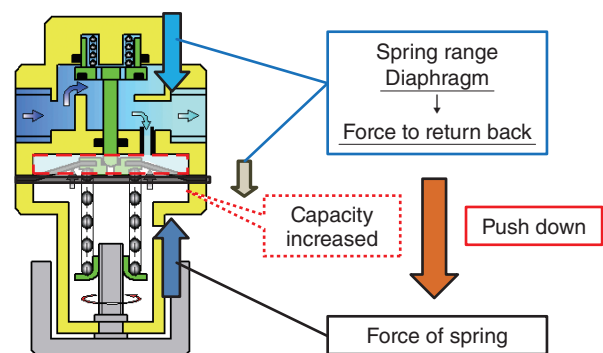
Figure 9 Influence of fuel temperature in regulator (preprocessing part)



(a) : Zero flow rate state



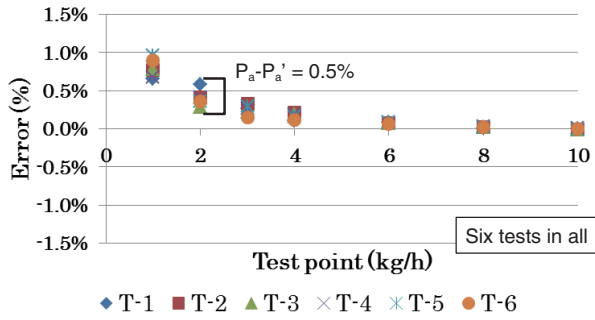
(b) : State where fuel is flowing



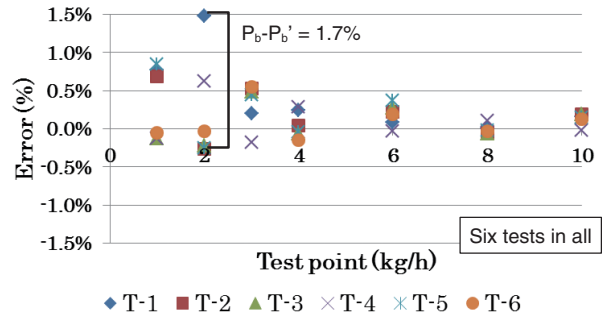
(c) : In case that temperature is decreased from (b) state

Figure 10 Movement of regulator and force within regulator





(a) With temperature control (ordinary operation)



(b) Without temperature control

Figure 11 Result of evaluation of flow rate measurement accuracy

のレンジスプリングが押し上げられて流路が開き、同時にダイヤフラムも燃料流路側にせり出した形となっている (Figure 10b)。ここで、燃料に接しているレンジスプリング(カーボンスチール製)やダイヤフラムは、温度によりスプリング力や硬度が変化する。この作用により、たとえば、燃料温度が25℃から23℃に急に下がった場合、ダイヤフラムおよびレンジスプリングには“元に戻ろうとする力”が発生する (Figure 10c)。その結果、ダイヤフラムの形状がFigure 10aの静止状態に近づき、レギュレータ内の容積が増加する。温度下降時 (Figure 6b) でみられた燃料流量出力のふらつきは、この増加した容積に流れ込んだ燃料分を検出している可能性がある。従って、誤差

要因を低減させるためには、燃費計測中における燃料温度変化を抑える必要があると考えている。FQ-2200CRでは、Figure 9に示すように、循環ラインにある熱交換器とレギュレータを用いて、設定値から±0.1℃の振れ幅で高精度に燃料温度を制御している。

### FQ-2200CRの繰り返し性の実力

Figure 11に、FQ-2200CRの流量精度を確認した例を示す。確認の方法の詳細についてはFigure 12, Figure 13を用いて後述する。横軸は基準器とした外部のコリオリメータによる質量流量、縦軸はその基準器とFQ-2200CRの指示差(%)である。Figure 11aには、前述した繰り返し性向上技術を取り入れた通常の状態における確認結果、Figure 11bには、一時的にこれらの対策を無効にした状態での結果を示した。対策をしていないFigure 11bの状態では、特に低流量域で、テスト結果の最大値Pと最小値P'の差が大きい。一方、精度向上技術を取り入れたFigure 11aの状態では、1 kg/h~10 kg/hの全領域についてテスト結果の最大値Pと最小値P'の差が小さく、繰り返し性が大きく向上していることが確認できる。

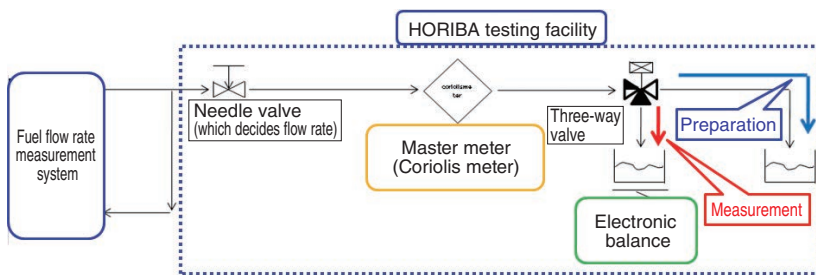


Figure 12 Flow in flow rate measurement accuracy inspection facility

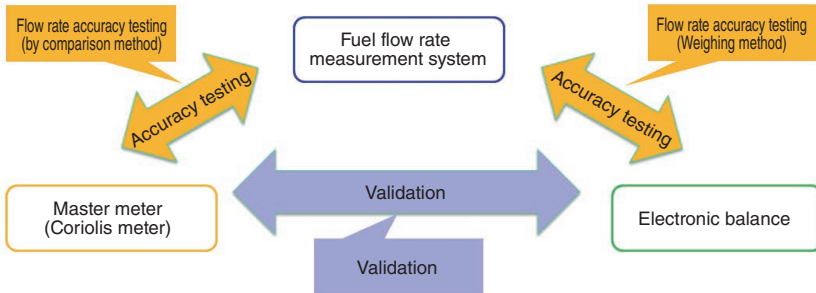


Figure 13 Flow rate accuracy testing method

Figure 12に、Figure 11における流量計測精度評価に用いている検査設備のフロー、Figure 13にそのコンセプトを示す。装置の精度を評価する基準器としては、コリオリメータと電子天秤の2種類を使用している。このうち、コリオリ

メータを基準とする評価は、評価対象の計測システムと基準コリオリメータの出力(ともに質量流量)を直接比較する「比較法」である。なお、2つのコリオリメータを接続して評価することから、検査設備は、振動が相互干渉しないような設計となっている。一方、電子天秤については、流量計測中のみ、流れている燃料が電子天秤(浮力補正付き)の受け皿に流れ込む構成をとっている。評価は、計測システムの流量積算値と電子天秤の読み値である質量とを比べる「秤量法」による。このように、2種類の基準を使用することで、FQ-2200CRの流量計測精度および検査自体の妥当性を同時に検証し、信頼性を確保している。

## おわりに

本稿では、燃料直接計測法に使用できるコリオリメータ式燃料流量計(FQ-2200CR)について、繰り返し精度向上のための技術を紹介した。本システムは、高精度なリアルタイム燃費計測ツールとして、エンジンの研究開発の高効率化や評価期間短縮に役立つものと確信している。今後も、より高性能でより信頼できる燃料流量計の提供を通じ、内燃機関・車両の性能計測に引き続き貢献できるように、取り組んでいく。



**松山 貴史**

Takashi MATSUYAMA

株式会社 堀場製作所  
開発本部 エンジニアリングセンター  
自動車計測システム設計部



**糸賀 友城**

Yuki ITOGA

株式会社 堀場製作所  
開発本部 エンジニアリングセンター  
自動車計測システム設計部

# Feature Article

アプリケーション

## 排ガス流量計とジルコニア空燃比計を用いた 燃料消費率の瞬時計測

Real-time Fuel Consumption Measurement  
Using Raw Exhaust Flow Meter and Zirconia AFR Sensor

秋田 将伸

Masanobu AKITA

燃費改善のためにはエンジンの挙動と関連した瞬時の燃料消費率の計測が重要である。今回超音波方式の排ガス流量計と直挿型O<sub>2</sub>センサによる空燃比計測を組み合わせることで、排ガスの瞬時燃料消費量を簡便かつ高速応答で計測する手法を提案する。高い応答速度で、配管内同位置の直接計測を行うことにより時間遅れや応答遅れの影響を受けずに計測を行うことができ、従来計測法との高い相関性を確認できた。また、過渡サイクル走行時の燃料カット前後での急激な燃料消費率の変化に対して希釈計測法と比較して応答速度の違いによる燃料消費率の差異が見られ、瞬時燃費を計測する手法として有用であることを示した。

The improvement of fuel efficiency is one of the most important issues in the R&D of powertrain system. The real-time fuel consumption can be determined by AFR (Air-to-Fuel Ratio) and raw exhaust gas flow rate and can be easily obtained without delay time by the in-situ measuring devices which can be installed at the same location. Integrated fuel consumption by this method showed a good correlation with that by the carbon balance method. On the other hand, when a fuel-cut is operated, the difference in transient behavior of the fuel consumption has been also observed due to the response time difference between these two methods. The result suggests that this method has a large potential for measuring the real-time fuel consumption.

### はじめに

排ガスの分析・評価において、排ガス流量を直接計測することは困難な課題の一つであった。中軽量車両で排ガス規制への適合性評価に用いられる公定法には、排ガス流量を必要としない定容量希釈サンプリング(CVS)法が採用されており、排ガスの直接計測はこれまで大きな必要性を迫られることはなかったが、近年車両ハイブリッド化やアイドルストップ車の普及に伴い、走行中のエンジンの間欠動作が、CVS法での計測の誤差要因となることへの懸念が注目されてきた。この間欠動作に同期してサンプリング自身も間欠動作させることにより、CVS法自体の改良が提案される一方<sup>[1]</sup>で、排ガス濃度と流量を直接計測し、瞬時マス計測を行うダイレクトマス計測も特に

研究開発用途で注目されるようになってきた。このような背景のもと、著者らは超音波方式の排ガス流量計を開発し、ダイレクト排ガス分析計と組み合わせたダイレクトマス計測をエンジン・車両開発効率向上手段としてユーザーに提案している。

今回、この排ガス流量計を用いた計測アプリケーションの一つとして、排ガス流量と空燃比を用いた瞬時燃料消費量計測を提案する。これはHORIBAグループが提案する新しい計測法である。この計測法の利点は、完成車両など燃料配管への加工が困難な計測対象に対して、その排ガスと空燃比を計測するだけで燃料消費量が計測できる点にある。エンジンベンチ上での評価試験の場合は、給油タンクからエンジンに至る燃料配管に燃料流量



計を接続して、燃料消費量を計測する方法が一般的である<sup>[2]</sup>。一方、完成車両の試験の場合は、燃料流量計やそのための配管を燃料系に追加するのは困難である。CVS法を用いたカーボンバランス法では車両への加工無しで燃料消費量計測が可能であるが、原理上、過渡状態における急激な燃料消費率の変化に対しては十分な応答速度が得られにくい。著者らは、自動車の研究・開発において、これらの従来法と比較して簡便に、過渡的な挙動確認に十分な応答速度で、計測できる方法として(排ガス流量・空燃比法)を検討した。本稿では、その考え方と装置構成、および従来法との比較評価の結果を報告する。

### 燃料消費量の間接的な算出方法

燃料流量以外の計測値から間接的に瞬時燃料消費量を求める方法として、従来法であるカーボンバランス法、および本研究で著者らが検討した方法(排ガス流量・空燃比法)を説明する。

#### カーボンバランス法による燃料消費量

カーボンバランス法は、エンジンで消費された燃料中の総炭素質量と排出ガス中の総炭素質量とは同じという理論に基づいて総炭素質量を求める。すなわち、排ガス中の炭素を含む成分(CO<sub>2</sub>, CO, HC)の濃度をCVS法で計測して排出質量に換算し、そこから総炭素質量を算出することにより、最終的に消費された燃料の質量を求める。CVS法では通常サンプリングバッグに希釈された排ガスを一定量蓄えた上で濃度計測を行うバッグ法が一般的であるが、バッグ法の代わりに希釈連続測定法(ダイリユートストリーム法)を用いれば、各成分の瞬時排出質量を得ることができ、燃料消費量を連続的に算出することが可能である<sup>[3]</sup>。Equation 1に、カーボンバランス法による瞬時燃料消費量の計算方法を示す。

$$F_{CB}(t) = \frac{1}{R_{CWF}} \times \left( \frac{M_C}{a_{exh} \times M_H + M_C} \times HC_{MASS}(t) \right) + \frac{M_C}{M_{CO}} \times CO_{MASS}(t) + \frac{M_C}{M_{CO_2}} \times CO_{2MASS}(t) \dots \dots \dots (1)$$

ここで $F_{CB}(t)$ は時間 $t$ における瞬時燃料消費量、 $R_{CWF}$ は燃料の炭素質量割合、 $HC_{MASS}(t)$ 、 $CO_{MASS}(t)$ 、 $CO_{2MASS}(t)$ は時間 $t$ におけるCO、CO<sub>2</sub>、HC各成分の瞬時排出量、 $M$ は各成分のモル質量、 $a_{exh}$ は排ガス中のHCの平均水素

炭素原子数比を表す。

#### 排ガス流量と空燃比に基づく燃料消費量

次に、排ガス流量と空燃比より燃料消費量を算出する方法について説明する。

空燃比は、エンジンに供給される空気と燃料の質量比であり、下式のように表現できる<sup>[4]</sup>。

$$AFR(t) = \frac{q_{maw}(t)}{q_{mf}(t)} = \frac{q_{maw}(t) - q_{mf}(t)}{q_{mf}(t)} \dots \dots \dots (2) = \frac{q_{vew}(t) \times \rho_{ew} - q_{mf}(t)}{q_{mf}(t)}$$

ここで、 $AFR(t)$ は時間 $t$ における空燃比、 $q_{maw}(t)$ は吸入空気の質量流量、 $q_{mf}(t)$ は燃料消費量、 $q_{mew}(t)$ は排ガスの質量流量、 $q_{vew}(t)$ は排ガスの体積流量、 $\rho_{ew}$ は排ガス密度を表す。

Equation 2を変形することにより、燃料消費量を排ガス体積流量と排ガス密度及び空燃比で表す式が得られる。

$$q_{mf}(t) = \frac{q_{vew}(t) \times \rho_{ew}}{AFR(t) + 1} \dots \dots \dots (3)$$

排ガス密度はリッチ領域では数%変化するが、リーン領域ではほとんど変化がないため、一定値を使うことによる影響は実用上無視できると考えられる。また、排ガスの燃焼反応式に適切な仮定を設定することで空燃比の値から各成分濃度を推定できることが知られており、成分濃度から排ガス密度を算出することで、より高精度な計測が可能である。この「排ガス流量・空燃比法」の測定パラメータである排ガス流量と空燃比は、後述するように、いずれもエンジン排気管にて高速応答で計測できる可能

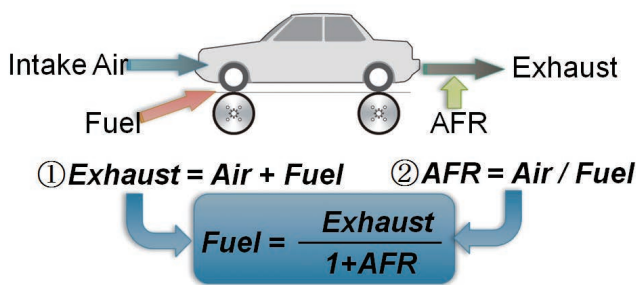


Figure 1 Principle of fuel flow measurement by exhaust gas flow and air-to-fuel ratio.

性がある<sup>[5]</sup>。そのため、サンプリングや計測機器に由来する応答遅れの影響を受けにくいというメリットが予想できる。ただし、吸入空気流量が排ガス流量を用いて計算されるため、エンジン始動直後(コールドスタート時)など、排ガス流量計までの間で結露による体積変化が発生しやすい条件では注意が必要である。

### 計測装置の構成

排ガス流量計には新規開発した超音波方式の流量計を用いた。この方式は高速応答が得やすく排気管での計測が可能であるため、本計測に最適である。また、空燃比の測定には同じく排気管に直接設置できる直挿型のジルコニア(ZrO<sub>2</sub>)式センサを用いた。これらの計測機器は、いずれも設置による圧力損失が非常に小さく、エンジンへの負荷は無視できる。以下に、詳細を説明する。

#### 超音波排ガス流量計

Figure 2に超音波流量計の構造を示す。測定対象ガスが流れている配管内の対面に、超音波送受信器が角度をつけて取り付けられている。この送受信器は圧電素子を中心に構成されており、電気的信号を機械的振動に変換できる。この素子の共振周波数は適切な超音波周波数帯に設計されている。これらの送受信器に共振周波数の電圧パルスを印加すると、圧電効果により超音波パルスが発振される。超音波パルスは配管内のガス中を伝搬して、

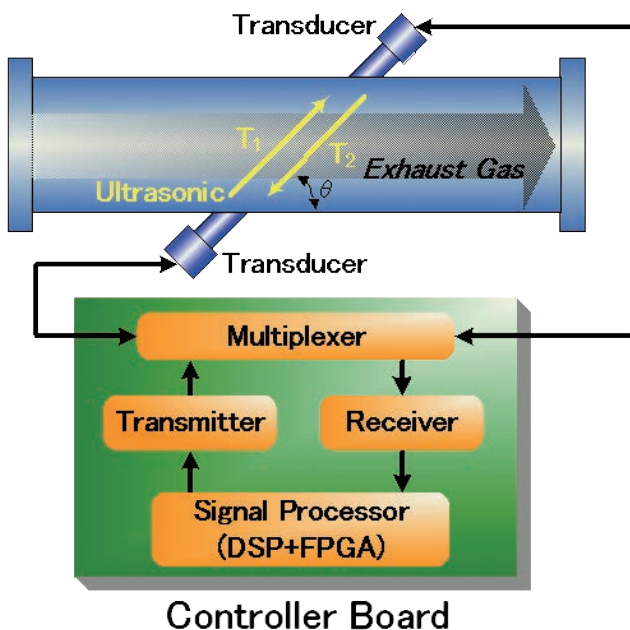


Figure 2 Principle of ultrasonic exhaust gas flow meter

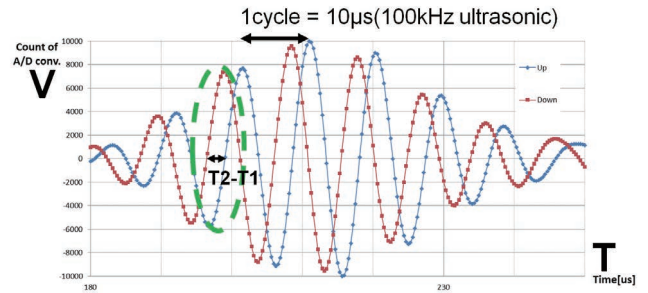


Figure 3 Ultrasonic signal wave form

互いに対面にある送受信器に到達し、再度電気信号へと変換されてFigure 3に示すような波形としてCPU基板内に格納される。

配管内のガスに流れがある場合、超音波パルスの伝播時間はその影響を受ける。上流向き、下流向きの伝搬時間は、それぞれ次のように表される。

$$T_1 = \frac{L}{c(t) + v(t) \cos \theta} \dots\dots\dots (4)$$

$$T_2 = \frac{L}{c(t) - v(t) \cos \theta} \dots\dots\dots (5)$$

ここでT<sub>1</sub>は下流方向への伝搬時間[s], T<sub>2</sub>は上流方向への伝搬時間[s], Lは超音波送受信器間の距離[m], cは音速, vはガス速度, θは超音波の伝播角度を表す。

Equation 4, 5は、それぞれEquation 6, 7のように変形できる。

$$c(t) = \frac{L}{T_1} - v(t) \cos \theta \dots\dots\dots (6)$$

$$c(t) = \frac{L}{T_2} + v(t) \cos \theta \dots\dots\dots (7)$$

Equation 6, 7から音速c(t)の項を消去すると、ガス流速を表すEquation 8が得られる。

$$v(t) = \frac{L}{2 \cos \theta} \times \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \dots\dots\dots (8)$$

Equation 8より分かるように、この方法で求められるガス流速は音速には依存しない。すなわち、組成の変化によりガス密度が変化しても、算出されるガス流速は影響を受けない。排ガス体積流量(標準状態)は、この排ガス

流速と配管径から計算できる。

$$q_{vev}(t) = k_{profile} \times A \times v(t) \times \frac{T_0}{T(t)} \times \frac{P(t)}{P_0} \quad \dots (9)$$

ここで、 $q_{vev}$ は排ガス体積流量(標準状態換算)、 $k_{profile}$ は補正係数、 $A$ は配管表面積、 $T_0$ 標準温度、 $T$ は排ガス温度、 $P$ は排ガスの絶対圧、 $P_0$ は標準絶対圧を示す。なお、係数 $k_{profile}$ は、配管内のガス流速や温度の分布による影響を補正するためのものである。スムーズアプローチオリフィス(SAO)流量計など、参照流量計との比較により決定される。

本研究では、排気管で排ガス流量を計測することを前提に、エンジン排ガス専用の超音波流量計を用いた。この装置では、特殊な超音波送受信器を用いているため、高温のガスでも計測が可能である。また、伝搬時間差を計測しているため、配管汚れによる超音波伝搬時間の影響を低減できる利点がある。標準状態換算の流量応答は排ガス温度の応答にも依存するため、ガス温度に対して急峻な応答を示す温度センサを採用した。

### ジルコニア式空燃比センサ

Figure 4に、ジルコニア式空燃比センサの構造を、Figure 5に同センサの実物を示す。測定対象のガスは、センサ表面の拡散孔より内部のスペース(拡散室)に拡散する。センシングセル部は、ジルコニア固体電解質の両面に電極が形成されており、基準大気側と拡散室側の $O_2$ 濃度差により発生する電位差をモニタしている。ポンピングセル部は、外部から電圧をかけることで、ジルコニア固体電解質を通して $O_2$ を移送する働きがある。ポンピングセル部の電圧は、センシングセル部でモニタしている電位差が理論空燃比相当で一定になるように制御される。すなわち、リーン条件では拡散室に入った余剰 $O_2$ をくみ出し、リッチ条件では拡散室内の $CO$ 、 $H_2$ 、 $HC$ を燃焼させる分の $O_2$ が汲み入れられる。ポンピングセルでは、移

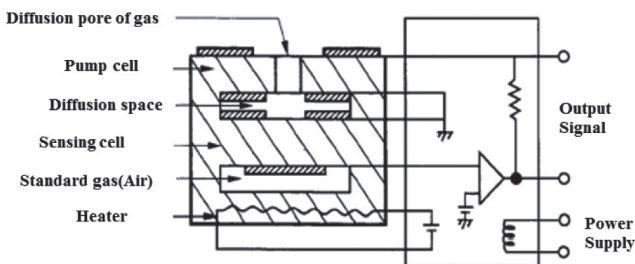


Figure 4 Configuration schematic of zirconia AFR sensor

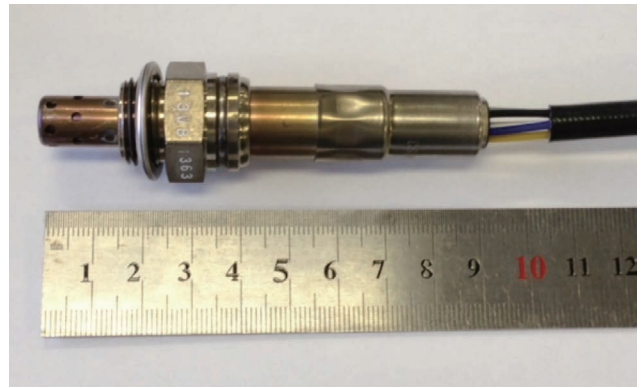


Figure 5 Zirconia AFR sensor

送する $O_2$ の量に比例した電流(ポンピング電流)が流れる。ポンピング電流は、Equation 10のように表される。

$$I_p = \frac{n \times F \times S \times P}{R \times T \times L} \times D_{O_2} \times C_{O_2} \quad \dots (10)$$

ここで、 $I_p$ はポンピング電流[A]、 $n$ は電極反応における電荷の数(=4)、 $F$ はファラデー定数、 $S$ はガス拡散孔の断面積、 $P$ は圧力、 $R$ はガス定数、 $T$ は温度、 $L$ はガス拡散孔の長さ、 $D_{O_2}$ 、酸素の拡散係数、 $C_{O_2}$ 、酸素濃度を表す。

ポンピング電流を測定することで理論空燃比と比較した $O_2$ の過不足が分かり、空燃比を求めることができる。

### 実験条件および方法

#### 燃料消費量計測のためのセットアップ

Figure 6に、燃料消費量計測のための装置のセットアップを示す。超音波流量計は、試験車両のテールパイプ後に接続した。ジルコニア式空燃比センサは、超音波流量計の配管内に設置することにより、近接した位置での同時計測を実現するとともに、排ガス流量計と燃料流量計の2役を同一筐体で提供することが可能である。また、カーボンバランス法との関連評価のため、排ガス流量計の排気側をCVSシステムに接続した。

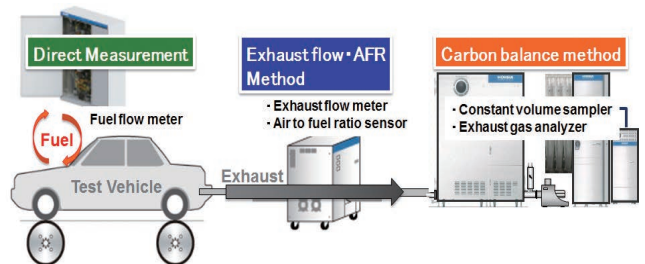


Figure 6 Experimental setup for fuel consumption measurement



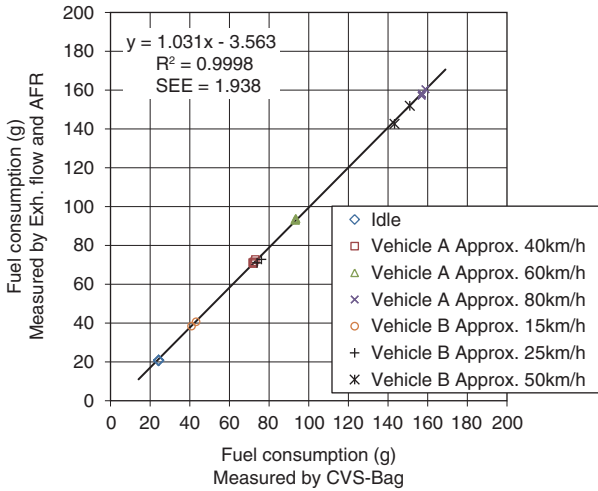


Figure 7 Correlation with CVS carbon balance method (integrated fuel consumption, steady-state condition)

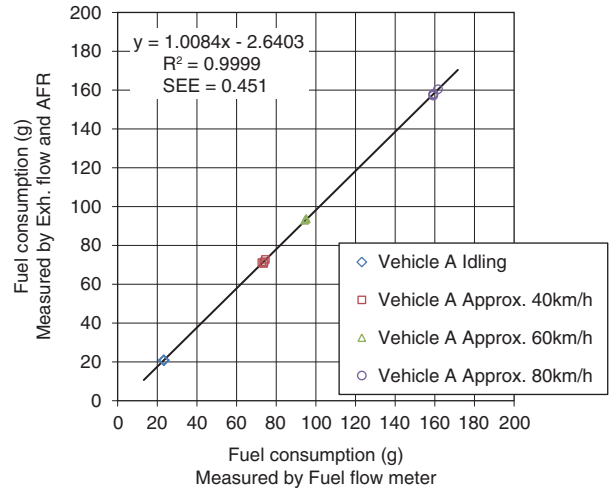


Figure 9 Correlation with fuel flow method (integrated fuel consumption, steady-state condition)

## 実験結果と考察

### カーボンバランス法との比較(積算燃料消費量)

Figure 7に、定常走行状態における、排ガス流量・空燃比法およびカーボンバランス法(CVSバッグ計測)による燃料消費量の比較を示す。各プロットにおける排ガス流量・空燃比法の値は、3分間連続計測の積算値であり、カーボンバランス法では同一区間の排ガスをバッグ採取した。この結果では、アイドル状態から80 km走行時まで、良好な相関が得られていることが分かる。

Figure 8に、FTP試験サイクルを計2回走行した際の、各フェーズにおける積算燃料消費量を示す。「n1」で示す

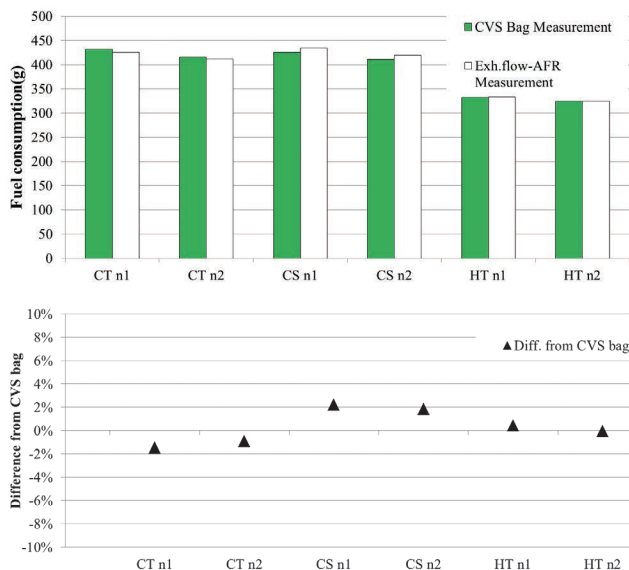


Figure 8 Comparison with CVS carbon balance method (integrated fuel consumption, transient test)

データが1回目、「n2」が2回目のものである。図中、「Difference」で示したカーボンバランス法との計測結果の差は、最大で2%程度であった。また、フェーズ間のデータの傾向も、n1とn2でよく再現していることが分かる。

### 燃料流量計との比較(積算燃料消費量)

Figure 9に、定常走行状態における燃料流量計との比較を示す。各プロットにおけるデータ処理方法はFigure 7と同様である。カーボンバランス法との比較の場合と同様、全範囲で良好な相関が得られている。

Figure 10に、日・欧・米でそれぞれ使用される過渡サイクルにおける積算燃料消費量の比較を示す。傾向はFigure 8の場合と同様である。

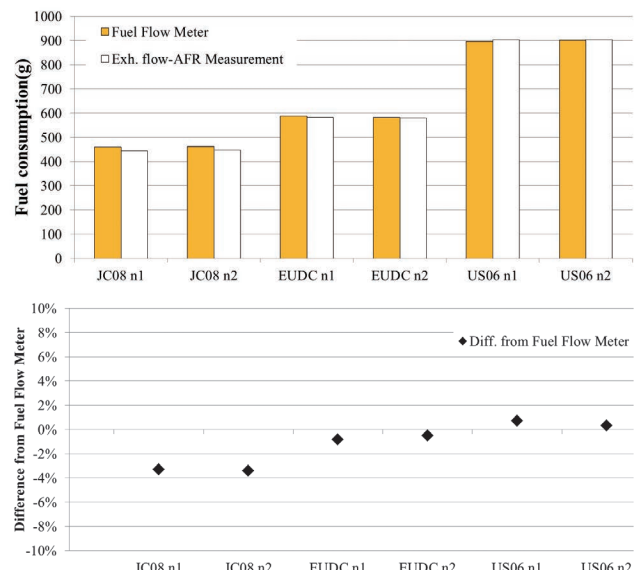


Figure 10 Comparison with fuel flow method (integrated fuel consumption, transient test)

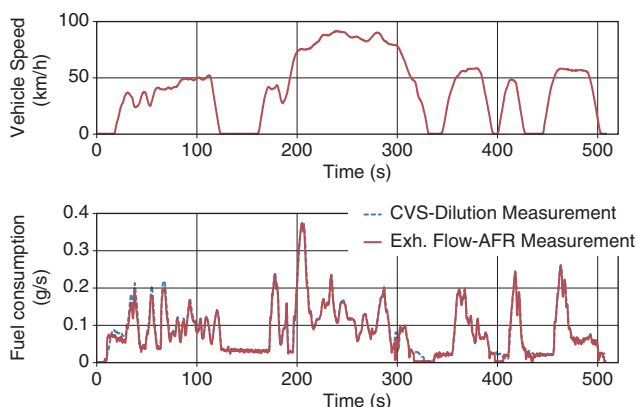


Figure 11 Example of real time fuel consumption measurement (FTP75 cycle phase 1)

### カーボンバランス法との比較(瞬時燃料消費量)

Figure 11に、排ガス流量・空燃比法およびカーボンバランス法(ダイリュートストリーム計測)にて、FTP75コールドスタートフェーズにおける瞬時燃料消費量を計測した結果を示す。全体の挙動としては、比較的良好に一致していることが分かる。Figure 12に、300秒から500秒の拡大図を、空燃比の計測結果とともに示す。車両の減速中、空燃比が理論空燃比付近から急激に増加している区間がある。これは、減速時の不要な燃料消費を低減するために燃料カット機構が動作していることを示している。排ガス流量・空燃比法での燃料消費量の計測値は、予想されたとおり、燃料カットの間はゼロに近い値となっている。

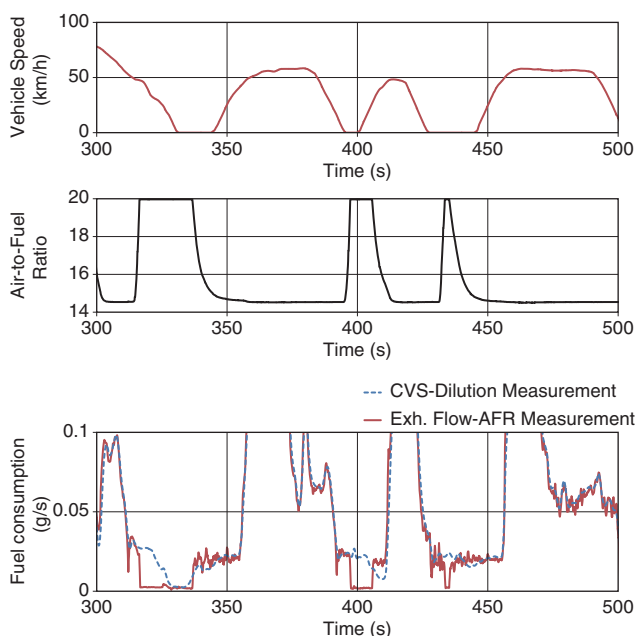


Figure 12 Real-time fuel consumption measurement of FTP75 phase 1

一方、カーボンバランス法では、燃料カットの間も燃料消費量がゼロにならない区間がある。これは、サンプルラインでのガス伝達の遅れや排ガス分析計の応答速度の影響によるものと考えられる。この結果より、エンジン動きに対応した瞬時計測が要求される場合に関しては、排ガス流量・空燃比法の方がより精度の高い結果を得られる可能性があると考えられる。

### おわりに

本稿で提案している排ガス・空燃比法は排気配管に流量計を接続することにより、安全かつ簡便に計測が行えることが大きな利点である。車両の詳細特性が不明なベンチマーク試験や完成車両での実燃費評価での活躍が期待される。また、この手法は排ガス流量計アプリケーションの一つでもある。他のHORIBAグループ製品との組合せによるアプリケーション提案を増やし、HORIBAグループと自動車産業の発展に寄与していきたい。

### 参考文献

- [1] Yoshinori, O. et al., "Emissions Measurement System for Hybrid and Plug-in Hybrid Electric Vehicles Using Intermittent Sampling Strategy", SAE Paper 2013-01-1047
- [2] Nevius, T. et al., "A Comparison of Direct Vehicle Fuel Consumption Measurements With Simultaneous CVS Carbon-Balance Fuel Economy", SAE Paper 2008-36-0274
- [3] Inoue, K. et al., "Numerical Analysis of Mass Emission Measurement Systems for Low Emission Vehicles", SAE Paper 1999-01-0150
- [4] Nakamura, H. et al., "Development of hydrocarbon analyzer using heated-NDIR method and its application to on-board mass emission measurement system", *JSAE Review*, **24**, 127-133 (2003)
- [5] Masanobu, A. et al., In-Situ Real-Time Fuel Consumption Measurement Using Raw Exhaust Flow Meter and Zirconia AFR Sensor, SAE Paper 2013-01-1058



秋田 将伸

Masanobu AKITA

株式会社 堀場製作所  
開発本部 アプリケーション開発センター  
エナジーシステム計測開発部

# Feature Article

アプリケーション

## サービスに求められるニーズ

Requirement for Service Activity

伊藤 直人

Naoto ITO

松岡 里絵

Rie MATSUOKA

株式会社 堀場テクノサービス(HTS)は、HORIBAグループのサービスを含めた総合的な製品品質の向上を目指し、2000年に株式会社 堀場製作所(HOR)から分社独立した。装置が多様化しユーザのニーズも年々変化している中、HTSはグローバルにニーズを把握しそのニーズに答えるサービスを提供してきた。一方では、地域に根付いたサービスの体制作りにも取り組んできた。ここでは、HTSが関わる全体事業から自動車計測事業のサービス対応について紹介する。特に、高品質なサービスを確立するためのISO/IEC17025認証を取得し信頼性の高いデータの採取や、近年の排ガス測定の幅広いニーズや法的な要求に対する対応について説明する。

HORIBA TECHNO SERVICE Co., Ltd. (hereinafter HTS) became independent company from HORIBA, Ltd. in 2000 in order to take HORIBA group to jump up for the future, and is aimed at improving the total quality management including service. I would like to introduce the situation of our service system responding to product diversification and customers' demands by accommodating local needs. In order to establish the high quality service, we have been certified by ISO/IEC17025 as a calibration authority. We are seeking for a high reliable data collection and supplying the advantages for our customers. After that, I would like to explain the current status of our servicing system for various needs of exhaust gas analyzer and its regulatory requirements.

### はじめに

近年、分析計の業界においては、顧客満足度向上に向けた取り組みの中でサービスの重要性に注目が集まっている。装置自体の品質力に加え、高いサービス品質が保たれてこそ、製品全体の品質が保たれる。ここではその注目されているサービスに特化して記述する。サービスの評価基準において、MTTR(平均復旧時間)、MTBF(平均故障間隔)などによる数値でスピード力、技術力、体制力、部品の即納力等を判断できる。一方で、顧客との対話力、信頼、ホスピタリティといった項目は、決して数値だけで測れるものではなく、一概にサービス品質を評価する事は難しい。我々はそのような数値化も難しいものも含めユーザのニーズをキャッチしながら、製品の総合的な

品質向上を目指している。

### サービス体制

まず初めに、株式会社 堀場製作所(HORIBA)から分社独立した株式会社 堀場テクノサービス(HTS)の沿革について説明する。HTSは、2000年3月21日にHORIBAの100%出資会社としてサービス部門が独立した。当時、HORIBA内のカスタマーサービスセンターに在籍していた130名と株式会社 コス(現、株式会社 堀場アドバンステクノ)のサービス部門から123名を合わせ、トータル243名で事業を開始した。HTS設立の目的は、下記6点が挙げられ、これを実現することでメーカーから一線を引いた存在となり、顧客第一主義の精神でHORIBAに対し品質



向上をフィードバックできるプロ集団となることを目指した。

- ①サービスのスピードアップ
- ②サービスエンジニアスキルの向上・標準化
- ③組織の効率化(重複業務の廃止)
- ④利益責任の明確化(メーカーとサービス)
- ⑤戦略の促進(価格設定・事前回収等)
- ⑥意識の高揚(やりがい・一体化)

### サービス拠点

設立当初のHTSは、国内拠点が21か所であったが、地域に根ざしたきめ細かいサービスを推進するために拠点の開設・移設を行い、2013年12月現在では、6拠点を増設し27拠点となった(Figure 1)。また、設立当初243名であった従業員数も2012年度で421名、2013年度時点で438名に増員した(Figure 2)。また、ここから、全世界の拠点7箇所にサービスエンジニアを派遣している(Figure 3)。

### 海外ネットワーク

HORIBA グループの従業員は5828名(2013年11月末現在)で、内1135名がサービスエンジニアである。その中で自動車計測事業に関わるサービスエンジニアの割合は38%を占めている。我々の目標の一つは、HORIBAグループの装置が世界中のどこに納入されても同様のサービス品質を提供することである。そのため、情報の一元化が必要で、毎年、各国のサービスマネージャーが集まり、グ



Figure 1 Service Station in Japan

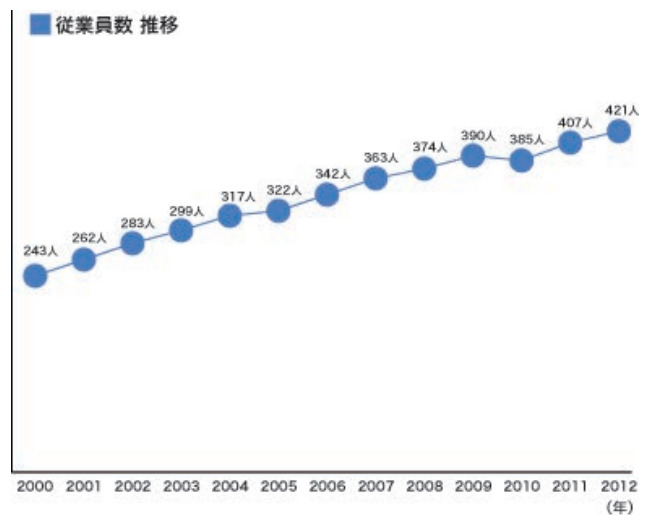


Figure 2 Employee Number Transition

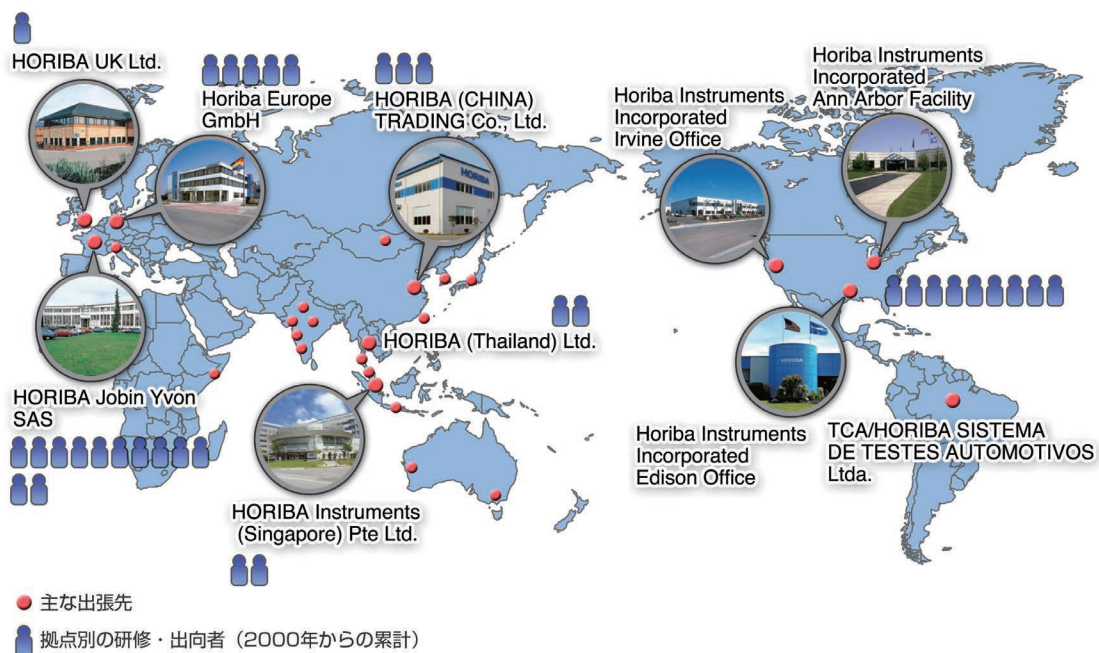


Figure 3 Displacement to oversea

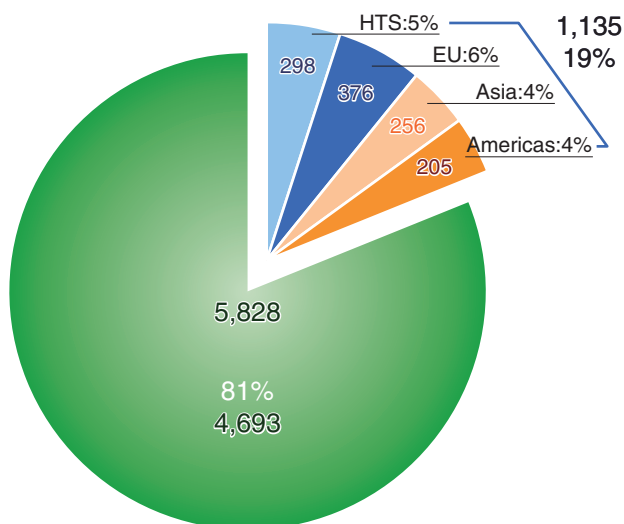


Figure 4 Employee Proportion/Region

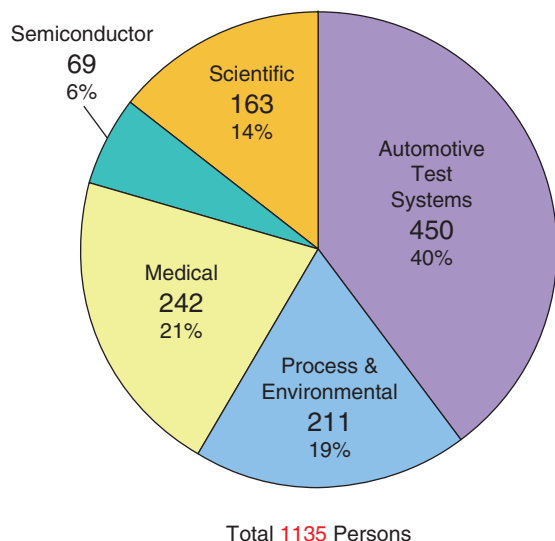


Figure 5 Employee Proportion/Segment

ローバルなサービスの戦略・方針を決定している。さらに、海外赴任や研修制度により、拠点間の技術力の差を押しさえると同時に組織の効率化を図っている。(Figure 3, 4, 5)

### 地域に根ざしたサービス

「世界中どの拠点でも同じ品質のサービスを提供する」ことが我々の目指すべき姿ではあるが、一方で地域に密着したサービスも重要と考えている。開業医のイメージは、高度な治療や機具は所有していないが、患者の身近に存在し一般的な病気の治療と合わせ、気軽に健康相談やリハビリができ、また専門性の高い治療に関しては、大病院との橋渡しの役割も担うというものである。製品のサービ

スにおいても、地域に密着した対応が必要であり、これがHTSの役割の1つと考える。地域に根ざしたサービスを提供することで、サービスが身近な存在だからHORIBAグループ製品をご使用頂けるという価値の創造を目指している。

### トータルサイクルサポート

納入した製品を長期間安定してご使用頂くこともサービスの役割の1つである。HTSでは、装置の試運転、メンテナンス、改造作業、修理、部品販売を一貫して行っている。その中でもメンテナンスは、部品の消耗による不具合を事前に発見し予防することで、製品自体の寿命が長くなり、また、突然の故障によるダウンタイムを軽減させる。さらに、採取したデータの信頼性・保証にもつながる。実際に自動車排ガス分析装置の国内の稼働状況を見ると、1978年から販売しているMEXA-8000シリーズや1986年から販売しているMEXA-9000シリーズは現在も稼働しており、MEXAシリーズの全稼働台数に対し、2-3割を占めている(2013年時点)。これらの大型分析計のメンテナンスを行うことで装置は10年以上稼働する。我々は、納入から装置リプレースまでのトータルサイクルでサポートを行い、使用環境、使用状況に合ったメンテナンス時期やメンテナンスレベルを提案している。時にはデータ集積部や操作部の更新も実施する。製品を“トータルサイクル”で考えることは、装置維持管理とリプレースにかかるコストの低減とダウンタイムの低減につながる。我々は、製品のトータルサイクルを考えた効果的なメンテナンスを提案している。

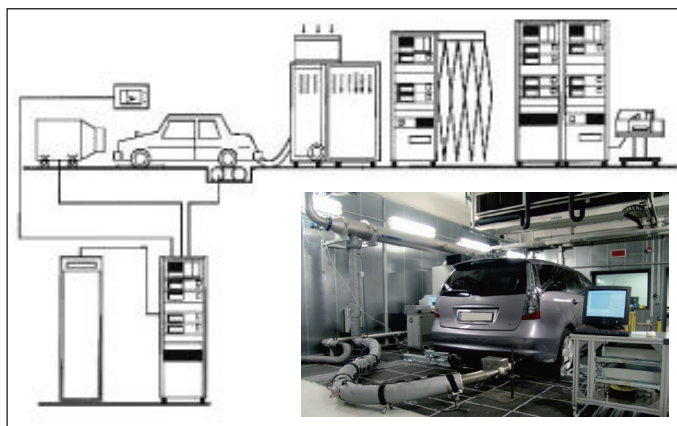
### ISO/IEC17025の取組み

#### 取得と背景

近年、製品やサービスの品質を担保するため、トレーサビリティが求められている。メンテナンス作業において校正に用いる標準試料やガスは、国際標準または国家標準と結びつけられた測定結果または標準の値を用いる必要がある。自動車を取り巻く環境の変化に伴い、自動車輸出監査においても、生産された自動車が出産国の規制に適合していることの証明が求められ、その証明にISO/IEC17025認定校正証明書を用いることが最適とされた。

同様に、排出ガス試験等で使用する測定機器や標準ガスについても国際・国家機関にトレーサブルである校正の証拠を示すことを要求された。つまり、HORIBAが提供

## ISO/IEC17025 認定範囲に基づく対象設備



排出ガス測定装置一般概念図（エバポ測定装置は含まず）

Figure 6 Certified Exhaust Gas Analyzer System

する排出ガス測定装置が国際・国家機関とトレーサブルでないと、装置の測定結果に対する信頼性が担保できないということである（Figure 6）。自動車メーカーからの強い要望もありHTSは排出ガス測定装置の示す値に対して信頼性を証明するため、ISO/IEC 17025に基づく校正機関の認定（認定番号：ASNITE 0033 C）を取得した（Figure 7）。

## ISO/IEC17025に基づく排出ガス測定装置の校正

### トレーサビリティのとれた校正の実現とMRAの効力

ISO/IEC17025とは、試験所および校正機関の能力に関する一般要求事項の国際標準規格である。この規格では、試験所または校正機関が試験または校正を行うにあたって、その能力がある機関として認定を受ける場合に、満たすべき要求事項が規定されている。この認定を受けた試験所・校正機関が発行する証明書類には、認定マークを記載することができ、国際的に通用する証明書としての信頼性を高めることができる<sup>[1]</sup>。

日本ではISO/IEC17025に基づくプログラムとして、計量法トレーサビリティ制度(JCSS)があるが、この制度は計量法第143条に基づくもので排出ガス測定装置には適用できなかった。そこで我々が採用したプログラムが製品評価技術基盤機構認定制度(ASNITE)である。ASNITEは、独立行政法人 製品評価技術基盤機構(NITE)が立ち上げたプログラム<sup>[2]</sup>で、JCSSでは対応できない(日本の国家標準にトレーサブルでない区分)校正の認定プログラムである。また、自動車輸出監査の要求に対応するためには、ISO/IEC17025の校正認定だけで

- |              |            |
|--------------|------------|
| ①排気ガス分析計     | ④エバポ測定装置   |
| ・校正曲線        | ・校正曲線      |
| ②CVS 装置      | ・容積チェック    |
| ・プロパンショット    | ⑤ドライバーズエイド |
| ③シャーシダイナモメータ | ・直線性       |
| ・エンジン回転計     | ⑥記録計       |
| ・吸気管負圧計      | ・直線性       |
| ・速度計         | ・記録紙送り時間   |
| ・車速追従ファン     |            |
| ・制 / 駆動力計    |            |



Figure 7 Certification

なく、発行する証明書自体が国際的に通用するものでなければならない。HTSが取得した認定は、NITEが国際試験所認定機構(ILAC)のメンバーであり、国際相互承認協約(MRA)に署名しているため、我々が発行する校正証明書は国際的に通用するものとなった<sup>[2]</sup>。このように、我々は国内ユーザーの要求から、新たな形のサービスを推し進めることができた。

### 信頼性の高いデータの提供

ISO/IEC17025に基づくASNITEプログラム認定を受けるには、規格に基づいた管理上の要求事項と技術的要求事項への適応が必要となる。



Table 1 Budget Sheet

記号	不確かさ要因	タイプ	値 士	確率分布	除数	標準不確かさ	感度係数	標準不確かさ 測定量の単位 (km/h)
u1								
u2								
u3								
u4								
u5								
u6								
u7								
u8								
uc	合成不確かさ			正規分布と仮定				
U	拡張不確かさ			正規分布と仮定 (k=2)				

**技術的要求事項の内容**

ISO 9000シリーズは品質管理・保証規格は事業の性格を問わず適用できるように書かれているが、主に品質システムが審査の対象として認証され、そのシステムによってできる製品(試験の場合は試験結果)の信頼性については適合性評価の対象になっていない。それに対しISO/IEC17025はISO9000シリーズと同様の品質面における運営システムの要求事項の他、試験・校正実施に必要な技術管理の面で以下のような要求事項が加わった形となっている。

- ①校正方法の手順が明文化され、その妥当性が確認されていること。
- ②必要な能力と訓練が明確にされ、任命された要員であること。
- ③使用する測定機器が定期的に校正され、トレーサビリティと不確かさが表明されていること。

**「不確かさ」の算出**

特に従来の作業と大きく異なる不確かさの算出が重要である。従来、用いられていた誤差は真値との差という概念だったが、厳密には真値を得ることはできないため不確かさという概念が取り入れられている。この規格では、測定「不確かさ」を推定する手順を持ち、この手順に適用していることが要求される。不確かさとは、「測定の結果に付随した、合理的に測定量に結び付けられ得る値のばらつきを特徴づけるパラメータ」と定義付けされており、この不確かさを算出するため下記のような手順をとる。

- ①結果に与えるばらつきの要素にはどのようなものがあるかを考え特性要因図を用いてリストアップする。この時のポイントは、複数人で出来る限り多くの要因を抽出することである。
- ②不確かさへの影響度を加味して抽出された要因毎にバジェット・シート(Budget Sheet)(Table 1)を用い、標準不確かさ、拡張不確かさを算出する。この不確かさの結果が、校正作業の品質となる。

**技能試験の実施**

技能試験とは、「校正機関間比較による、事前に決められた基準に照らしての校正事業者の校正又は測定のパフォーマンスの評価」と定義されている。これは4年に一度、他の校正機関と排気ガス測定装置の校正比較試験を行い、その相互の結果を「パフォーマンスの評価式」を用い、下記のEquation 1として評価するものである。これにより、校正機関の校正結果の品質が確認される。

$$En = \frac{X_{lab} - X_{ref}}{\sqrt{U_{lab}^2 + U_{ref}^2}} \dots\dots\dots (1)$$

- X<sub>lab</sub> : 参加機関の測定値
- X<sub>ref</sub> : 参照機関の測定値
- U<sub>lab</sub> : 参加機関の拡張不確かさ(k=2)
- U<sub>ref</sub> : 参照機関の拡張不確かさ(k=2)

En数の判定基準は以下のとおり

- |En| ≤ 1 : 満足
- |En| > 1 : 不満足

我々は、ISO/IEC17025の要求事項に基づき、マネジメントシステムと技術力の維持向上を行うと共に、これらの

取組みにより、信頼性の高いデータを提供している。

## トータルサポートの実現

### 技術者の配置

HTSのISO/IEC17025に基づく校正を実施する技術者は、教育・訓練を受け社内認定された少数精鋭の人材に限定されており、東日本、中部日本、西日本の拠点に駐在している。国内のどの地域であっても高品質のMRA校正ができる体制を整えている。

### 力量管理と品質管理

MRA校正に使用する専用検査設備は国家・国際標準とトレーサビリティが確立されている。継続的な校正管理だけでなく、運搬や保管においても万全の体制があり、厳密に管理された専用検査設備・標準物質と熟練した技術者により、信頼性の高い校正結果の提供を可能にしている。このように、HTSは、HORIBAグループの40年以上にわたる排出ガス測定技術の歴史の中で蓄積したノウハウを受け継いだサービス体制に加えISO/IEC17025に基づくMRA校正を含めた排出ガス測定装置のトータルサポートを実現した。

## MRA校正の拡大

排出ガス測定装置の分野においては、主に自動車業界における生産の適合性監査ニーズに対応できるようMRA校正可能な品目を拡大していく。まず、排出ガスの分析精度を左右する要因の一つとして濃度目盛校正用検量線の適正な維持管理がある。その検量線を作成するためのガス分割器のMRA校正を2014年度の新規事業として実現する計画である。自動車メーカーのASEAN諸国への輸出拠点拡大の動きに応じていく。ISO/IEC17025認定された校正品目を有効活用し可能な限り校正証明して行く。また、グローバル企業としてロシア・東欧・中国・ブラジルなど諸外国でも国家標準・国際標準とトレーサブルな校正要望に適応しうる体制の構築を目指す。

## 法的要求

全世界の四輪車の保有台数は2011年に10億7,108万台となり、人口1,000人当たり154台、6.5人に1台普及している。日本をみると、7500万台を超える。また、二輪車の全世界での保有台数は2億台程度(日本：1200万台超)と言われ、

自動車は我々の生活にとって必要不可欠なものとなっている<sup>[3]</sup>。しかしながら、大都市部を中心とした排出ガスによる大気汚染が深刻な社会問題となっており、これら問題を対処するため、環境の保全に関わる認証業務にも柔軟な対応が求められている。各国では、こうした状況を踏まえて、自動車の公害防止に対応するための排出ガス規制が設けられている<sup>[4]</sup>。本稿では、こうした動向にHTSとしての対応を記す。

### 追従の困難さ

規制要求に合った機器の管理が重要であるが、その追従の現実の困難さを主に2つ上げる。1つ目が、装置自身の適合である(**Table 2**)。規制が改定されていく中で、測定機器もその規制にあったハードとソフトが開発されていく。一旦納入した製品は、規制の変化に伴い、時には性能を上げるために改造作業が必要となってくる。2つ目が、規制対象成分の追加である。既に欧州の規制でスタートしているPMの総排出規制の代替であるPN(粒子数計測)測定や、GHG規制としての対象温室効果ガス成分の1つである亜酸化窒素(N<sub>2</sub>O)測定など過去にない規制対象成分の追加がある。使用者が何をどういう目的で測定し、将来どういった計測が必要なのかも現場に近いサービスの担当者がヒアリングし顧客に最適なシステムへ提案できる仕組みが重要である。サービスエンジニアは規制の動向を知識として把握している事が重要となってくる。HTSとして、顧客の声をメーカーであるHORIBAと共に対策する事で、ユーザへの的確な対応と、HORIBAには製品のFBも合わせて実施している。

## おわりに

従来からHORIBAグループは、お客様の要求に応えることで、お客様と共に成長してきた。それは、顧客の求める計測方法と一緒に悩み開発して対応した経緯がある。その過程で、サービスエンジニアもまた、顧客の製品開発や計測の現場に立ち会い、そのニーズを把握し、対応するために、技術、知識、スピードの能力を常に向上させてきた。今後も、測定機器のサービスという観点から顧客のニーズにお応えすることで、更にサポート力を向上させていく。

Table 2 of § 1065.303—Summary of Required Calibration and Verifications<sup>[5]</sup>

Type of calibration or verification	Minimum frequency
§ 1065.305: Accuracy, repeatability and noise	Accuracy: Not required, but recommended for initial installation.
	Repeatability: Not required, but recommended for initial installation.
	Noise: Not required, but recommended for initial installation.
§ 1065.307: Linearity verification	Speed: Upon initial installation, within 370 days before testing and after major maintenance.
	Torque: Upon initial installation, within 370 days before testing and after major maintenance.
	Fuel flow rate: Upon initial installation, within 370 days before testing, and after major maintenance.
	Gas dividers: Upon initial installation, within 370 days before testing, and after major maintenance.
	Gas analyzers (unless otherwise noted): Upon initial installation, within 35 days before testing and after major maintenance.
	GC-ECD: Upon initial installation and after major maintenance.
	PM balance: Upon initial installation, within 370 days before testing and after major maintenance.
§ 1065.340: Diluted exhaust flow (CVS)	Pressure, temperature, and dew point: Upon initial installation, within 370 days before testing and after major maintenance.
	Upon initial installation and after major maintenance.
	Upon initial installation, within 35 days before testing, and after major maintenance.
§ 1065.341: CVS and batch sampler verification	For thermal chillers: upon installation and after major maintenance.
	For osmotic membranes; upon installation, within 35 days of testing, and after major maintenance.
§ 1065.342 Sample dryer verification	Zero, span, and reference sample verifications: within 12 hours of weighing, and after major maintenance.

参考文献

- [1] 文書番号ASG101 第6版 2007年6月1日改定 JIS Q 17025(ISO/IEC 17025(IDT))試験所および校正機関の能力に関する一般要求事項の理解のために[http://www.iajapan.nite.go.jp/jnla/pdf/koukaib\\_f/asg101\\_06.pdf](http://www.iajapan.nite.go.jp/jnla/pdf/koukaib_f/asg101_06.pdf)(参照2013-12-17)
- [2] 新版 計量関係法令規集 事項別 解説編 一般社団法人 日本計量振興協会編集 発行者 田中英弥
- [3] 一般社団法人 日本自動車工業会 世界生産・販売・保有・輸出 <http://www.jama.or.jp/world/world/index.html> (参照2013-12-21)
- [4] 第7次改訂版 新型自動車審査関係基準集 発行者 小林英世 p. 1
- [5] Code of Federal Regulations Title 40: Protection of Environment PART 1065—ENGINE-TESTING PROCEDURES [http://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?SID=f6914f946a970eece75b1f3d860b2e4&tpl=/ecfrbrowse/Title40/40cfr1065\\_main\\_02.tpl](http://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?SID=f6914f946a970eece75b1f3d860b2e4&tpl=/ecfrbrowse/Title40/40cfr1065_main_02.tpl)(参照2013-12-21)



伊藤 直人

Naoto ITO

株式会社 堀場テクノサービス  
サービスサポート企画部



松岡 里絵

Rie MATSUOKA

株式会社 堀場テクノサービス  
メカトロニクス・サービス部



## HORIBAグループの安全活動

井深 成仁

Shigehito IBUKA

### HORIBAグループ安全宣言

#### <基本的考え方>

私たちは、事業活動のすべての面で人の安全の確保を最優先し、製品の安全性の確保にも努めている。HORIBAグループの役員・従業員・協力会社の従業員は、利益や納期等がいかにか重要であっても「安全」を常に最優先して行動する責務がある。

2013年4月1日

井深 成仁

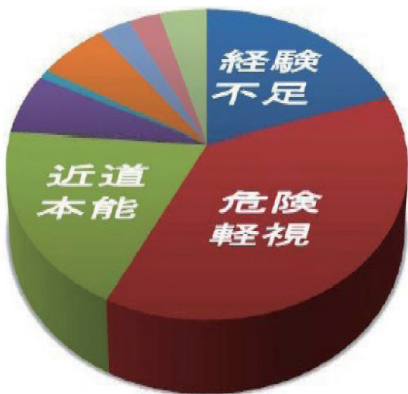


Figure 1 災害事例150件を対象としたヒューマンエラー要因別構成 (引用：2011年厚生労働省安全情報「ヒューマンエラーの抑制を目指して -「安全の見える化動画」-」<sup>(1)</sup>)

### はじめに

HORIBAグループは、昨年(2013年)4月1日付で「安全宣言」を発表した。ユーザに、安全で安心してHORIBAグループ製品をご使用いただくことは必須事項であり、社内活動やサービス活動を安全に行うことが、ユーザにHORIBAグループに対する安心感を与えると共に、製品の品質向上にも繋がることで、ユーザに喜んでいただき、HORIBAグループの信頼の益々の醸成にも繋がる。本稿では、安全上考察すべき事柄を述べ、その後にHORIBAグループの安全活動を紹介する。

### ヒトは間違える動物

多くの方が、一度か二度、もしくはもっと多く何らかの間違い(エラー)をされた経験を持っておられる。下記は間違いの例であるが、身に覚えのある方もおられると思う。

- ・自動販売機のボタンを押し間違えた。
- ・電話を掛け間違えた。
- ・道を間違えた。

Figure 1は、災害事例150件を対象としたヒューマンエラー要因別の構成である。ご存知の方も多いと思うが、事故災害の多くはヒューマンエラー、すなわちヒトの間違いによって起こっている。自動販売機のボタンの押し間違い程度であれば大きな問題にはならないが、ブレーキとアクセルを踏み間違えての事故は、ヒューマンエラーによる事故の典型的な例である。

### ヒューマンエラー

ヒューマンエラーは何故起こってしまうのか？ ヒトが下記のような状態・状況になっている時にヒューマンエラーを起こしやすくなる。

うっかり・ぼんやり、意欲・気力の減退、忘却、思い込み、睡眠不足、興奮状態、先入観、習慣、無理な推測、一点集中思考、早合点、短絡的発想、楽天的発想、錯覚、識別不能、無理・乱暴な行為、余計な行為、条件反射、本能的行為

ヒューマンエラーは色々な場面で起こり得るものであるが、製品販売ビジネス

スを行う上で安全上ヒューマンエラー対策として処すべきことを例示する。

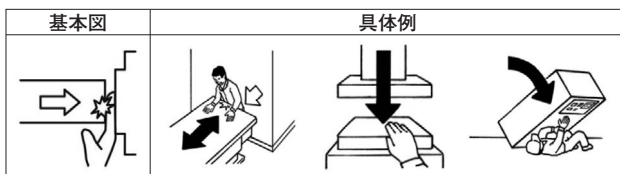
- ・製品設計エラー，製造エラー，検査エラーの防止
- ・製品使用者がヒューマンエラーを起こしにくい製品設計
- ・製品使用者への提供文書は，製品使用者がヒューマンエラーを起こしにくい記述
- ・製品使用者がヒューマンエラーを起こしても，事故になりにくい製品設計
- ・サービスエラーの防止

## 危険源

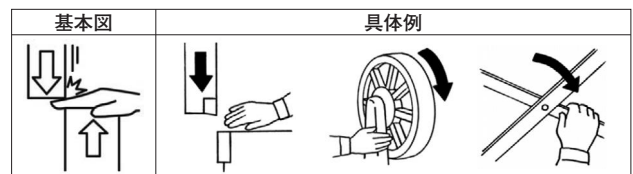
危険源(hazard)とは、「死亡・障害または疾病，財産の損害，職場環境の損害，またはそれらの組み合わせの面からの危害をもたらしうる潜在的な源や状況」と定義されている。「危険な場所」，「危険な事柄や事象」，「危険物」，「危険な設備」，「危険な機構や構造物」，「化学物質」などが危険源と言われるものの例である。事故は，人や物・浮遊物等が危険源に接触した時，または曝露された時に起こる。危険源への接触・曝露の度合いによって，大事故になったり，応急措置で済む事故になったり，ニアミス(ヒヤリハット)で済む場合がある。自然発火や老朽化による危険物質の漏洩・飛散のように，危険源の状態が閾値・臨界を超えた時も事故になる場合もある。事故の結果として大きな問題になるのが，人身影響，火災，大規模な設備・器物の損壊である。

機械的危険源の例をFigure 2に示すが，他に電氣的危険源，熱的危険源，放射的危険源，不安全行動による危険源，化学的危険源，作業環境の危険源，落下危険源，運搬上の危険源，交通上の危険源，自然災害という危険源，など諸々の危険源がある。

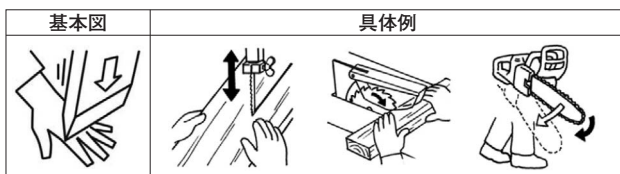
### 押しつぶしの危険源



### せん断の危険源



### 切傷または切断の危険源



### 巻き込みの危険源



### 引き込みまたは補足の危険源



### 衝撃の危険源

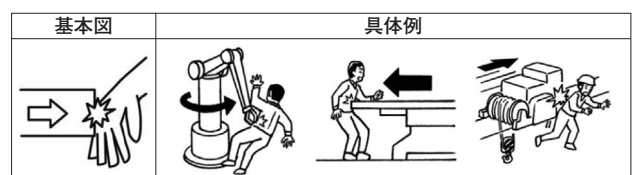


Figure 2 機械的危険源の例 (引用：厚生労働省安全情報「危険源の参考図：機械的危険源の具体例の図」<sup>[2]</sup>)

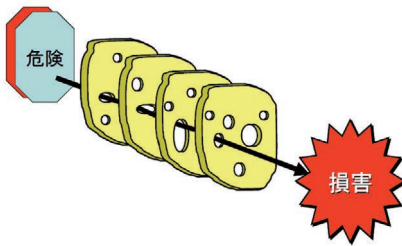


Figure 3 スイスチーズモデル図

危険源に対して対策すべきかどうかを判断するのがリスクアセスメントである。リスクアセスメントへの取組みの詳細はHORIBAグループの活動で示すが、許容可能か否かを判断し、許容可能なレベルまで対策するのがリスクアセスメントである。

### スイスチーズモデル

スイスチーズには多数の穴が空いている。穴の配列が異なるスイスチーズを重ねて並べると、貫通する可能性は低くなる(Figure 3)。同様に、リスク管理においても、視点の異なる防護策を何重にも組み合わせることで、事故が発生する危険性を低減させることができる。しかしながら、時として穴が直線状に揃ってしまい、事故に至る場合がある。スイスチーズモデルでは、完璧な防護壁は存在しないと認識した上で、1枚1枚のチーズの穴を塞ぐべく、製品設計やヒューマンエラー防止対策を行うことが重要である。

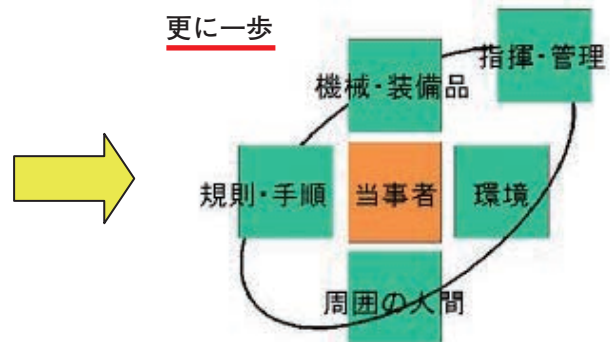
### 作業の観点からの事故解析手法

製品故障解析手法としてFMEA(Failure Mode of Effective Analysis)や、事象の発生源と発生経路の解析手法としてのFTA(Fault Tree Analysis)は、幅広く浸透し使われているが、ヒトに着目しての解析手法として昨今活用が進んできているM-SHELLとVTA(Variation Tree Analysis)は、事故を多角的に解析する手法として注目が高まっている。M-SHELLのそれぞれの文字は、Management, Software, Hardware, Environment, Live-ware, Live-wareの略である。

ヒューマンエラーは、中心の作業者本人(L)と他の要素(S, H, E, 下部のL)が噛合っていない時に発生する。S, H, E, Lの枠が波打っているのは、各要素が一定ではなく、常に変化することを意味する。このように一定ではない各要素を上手く調整することがヒューマンエラーの防止に繋がり、S, H, E, Lの全体をみながら調整を行うのがマネジメント(M)であるとするモデルである(Figure 4)。



Figure 4 M-SHELL (引用: 参考文献<sup>[3])</sup>)





- ・中央のL(Live-ware): 作業者本人
- ・S(Software): 作業標準, 作業指示, 教育訓練などソフトウェアに関する要素。
- ・H(Hardware): 機械, 道具, 設備などのハードウェアに関する要素。
- ・E(Environment): 温度, 湿度, 照明, 騒音など仕事や行動に影響を与える作業環境に関する要素。
- ・下部のL(Live-ware): 指示・命令をする上司や, 作業を一緒に行う同僚など本人を取り巻く人的な要素。

M(management): 組織・管理・体制, 組織の安全方針などの管理的要素。  
 VTAは, 主としてハードウェアを対象としていたFTA (Fault Tree Analysis)等の手法の欠点を補い, 事故・事件のヒューマンファクターを説明するために考案された手法で, 時間軸に沿って人間の行動や判断を中心に分析する。通常から逸脱した行動や判断の流れを描き出して, 人間行動の背後に潜む問題を追及する簡易性が重視された手法で, 責任所在の追及ではなく, 対策指向型の分析手法である。

## HORIBAグループの活動

冒頭に述べた安全宣言では, 以下の6つの事柄に対する行動方針を示している (Figure 5)。

- ・事業活動
- ・製品
- ・コンプライアンス
- ・教育
- ・対外的協力
- ・周知／公表

HORIBAグループの各部門は, 6つの行動方針に対する年次行動計画を策定し, 継続的改善を図ることが求められている。2014年度からは, 各部門の改善状況が内部監査される予定である。HORIBAグループでは幅広く安全衛生活動を行っているが, 大別すると次の三つになる。

- ・ユーザに提供する製品が安全であるための活動
- ・ユーザで行うサービス行為が安全であるための活動
- ・HORIBAグループで働く人々が安全であるための活動(労働安全衛生活動)

製品安全活動, サービス安全活動, 労働安全衛生活動は, Figure 6のように密接に結びついている。

- ・HORIBAグループ製品をグループ構内で安全に使用するための活動は, 労働安全衛生の領域でもある。
- ・HORIBAグループ従業員がユーザの構内でサービス作業を安全に行うための活動は, 労働安全衛生の領域でもある。
- ・HORIBAグループ製品に対するサービス作業を安全に行うための活動は製品安全の領域でもある。

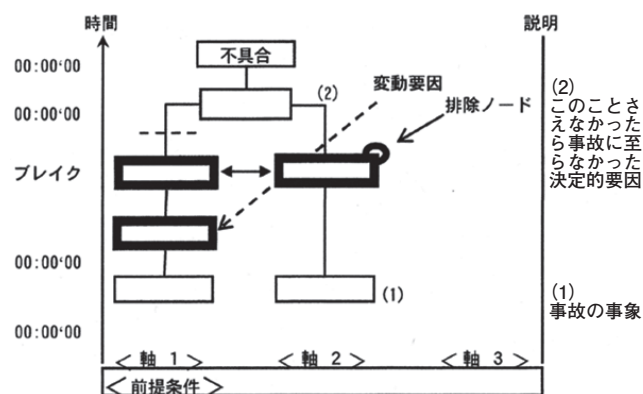


Figure 5 VTAの基本型 (引用: 参考文献[3])

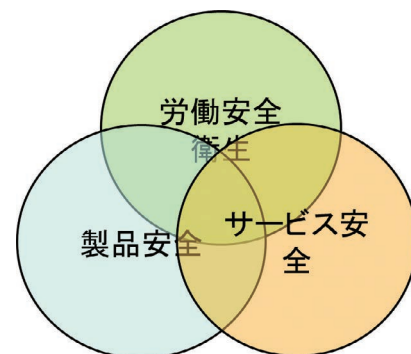


Figure 6 安全活動のカバー領域

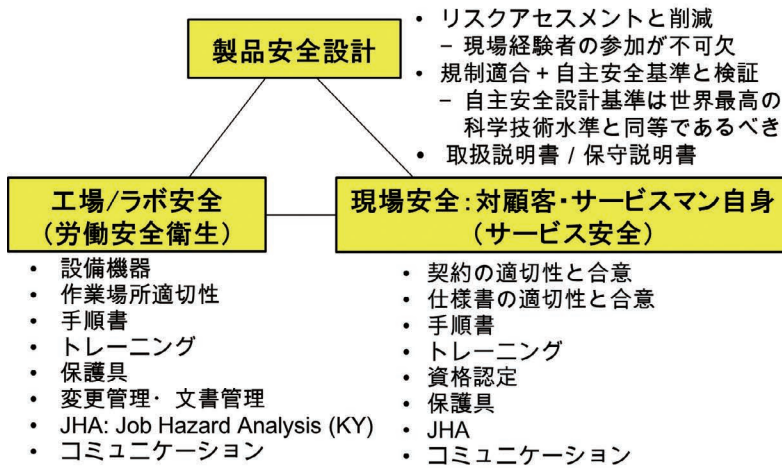


Figure 7 製品安全・サービス安全・労働安全衛生が一体となって取り組んでいる内容

安全活動の目的は事故をなくすことであるが、残念ながら現実には事故があるのも事実である。事故発生の場合には、迅速に原因究明と対策実施を行っているが、深掘すべき事案に対しては、HORIBAグループ内の第3者によって構成される事故調査委員会にて検討が行われる。また、万一ユーザ等で重大事故が発生した場合に備えて、会社規程にてユーザ等への対応方法と、是正措置基準・手順を定めている。ところで、事故の撲滅を目指すために教訓にしなければならないものが過去の事故である。特に留意すべき事故を事例集として纏め、内部の教育ツールとして利用していくことが重

要であり、事故事例集を纏めている。事故事例集を纏めるに当たっては、既に述べたM-SHELL手法も取り入れている。

Figure 7は、取組中、若しくはHORIBAグループにとって改善課題であると考えているものである。製品安全設計、労働安全衛生、サービス安全を有機的に結びつけて継続的改善を行っていくことで、ユーザに安心してHORIBAグループ製品をご使用いただき、信頼を得ることに繋げられる。以下に、製品安全、サービス安全、労働安全衛生での取組事例を示す。

### 製品安全活動の例

HORIBAグループでは、規制適合・規格適合に加えて、自主的な製品安全設計基準を定めている。昨年(2013年)HORIBA自主基準を大幅に見直し、新基準は、安全設計の根幹となるリスクアセスメントの実施に加えて、適合検証方法とプロセスを明確にし、具体的な技術基準として、安全インタロックシステム、緊急シャットダウン、電気設計、危険エネルギーの切離し、機械設計、排気換気、レーザ、音圧レベル、地震対策、安全要求部品を定めている。リスクアセスメントでは、対人身・対火災の観点で実施し、対火災では規格適合を上回る自主基準を定めて運用を開始した。ユーザに提供する製品取扱説明書についても、HORIBAの自主基準に基づいて作成している。取扱説明書作成についての自主基準も昨年(2013年)全面的に見直し、IEC82079-1「使用説明の作成-構成、内容及び表示方法 第1部：一般原則及び詳細要求事項」を考慮したものとして運用を開始した。

### サービス安全活動の例

HORIBAグループでも、他社同様に、各種トレーニングに実施、現場安全巡視、危険予知実施を行っているが、最近取組みを開始、若しくは検討を開始した例を二つ紹介する。

取組みを開始したのはJHA (Job Hazard Analysis : ジョブハザードアナリシス)という手法である。JHAは、行うべき作業に対して、作業ステップ毎に顕在化した、若しくは潜在的な危険源を特定し、定量的に評価する手法である。行おうとしている作業に対して処すべき措置(作業方法や用具、保護具の特定)のみならず、対象製品の設計にフィードバックして設計の見直しに繋がられる手法である。

二例目は体感訓練である。近年体感訓練を取り入れる企業が増えてきており、HORIBAグループにおいてもサービス作業で起こり得る事態を想定しての体感訓練についての検討を開始した。

## 労働安全衛生活動の例

HORIBAグループでも他社同様に、様々な観点から労働安全衛生に取り組んでいるが、ここでも二つの例を紹介する。2012年に発布された「ここところから健康づくり宣言」は、各方面で話題を呼んでいる。社員食堂で提供される健康に配慮したメニュー、「歩キング」キャンペーン、定期的なカウンセリング情報、その他諸々の取組みが行われている。産業医による職場巡視活動も多角的に安全衛生を改善する上で有用である。一般の安全巡視活動とともに、全従業員がPCを通じて各職場の改善状況を写真で見られことも互いに高め合うために役立っている。

## おわりに

安全宣言が発布され、安全をHORIBAグループ全体で更に高めていくことが求められているこの機会に、本コラムを借用して安全に関する記事の掲載許可をいただいたことに対して、関係各位に感謝の意を表す。地道に、継続的な活動を行ってこそ真の安全文化の創造に繋がっていくものを考える。今後も継続的な安全活動を通じて、HORIBAグループの更なる発展に貢献していきたい。

### 参考文献

- [1] 2011年厚生労働省安全情報「ヒューマンエラーの抑制を目指して—「安全の見える化動画」—」
- [2] 厚生労働省安全情報「危険源の参考図：機械的危険源の具体例の図」
- [3] エラーを誘発する背後要因の探求へ—再発防止の視点—日本人間工学会航空人間工学部会  
2005年7月22日 日本ヒューマンファクター研究所研究開発室長 石橋 明



### 井深 成仁

Shigehito IBUKA

株式会社 堀場製作所  
品質保証統括センター  
環境安全担当センター長



# Product Introduction

新製品紹介

## LAQUAシリーズ第3弾!! ポータブル水質分析計LAQUAactシリーズ

Debut!! Portable Meters LAQUAact

山内 悠

Hisashi YAMANOUCHI

芝田 学

Manabu SHIBATA

LAQUAシリーズ第3弾として、耐久性を追求したポータブル型水質分析計“LAQUAact(ラクアアクト)”を開発した。従来のpH計はアルコール耐性が低く、消毒が必要な食品工場などで使用できなかった。またガラスを溶解させるフッ酸やアルカリ試料の場合、電極寿命が短いことが問題だった。これらの課題を解決するために、筐体素材に高アルコール耐性のポリカーボネートを採用したpH計と、希土類元素を加えて骨格構造を強化したpHガラス応答膜を開発した。その結果、従来の物理的衝撃への高い耐久性に加えて、耐薬品性を向上させたポータブル型pH計と、長寿命のフッ酸用とアルカリ用pH電極が実現できた。本稿では、これらに加えて低電気伝導率水用pH電極の特長とアプリケーションを紹介する。

We developed a new portable meter and pH electrodes LAQUAact. It is difficult to use previous portable pH meters in food factory where the portable meter need to be disinfected with alcohol due to low chemical resistance. A pH electrode also has short lifetime in hydrofluoric acid and alkali solutions. In order to solve these problems, we developed new portable meter and pH electrodes which have a high chemical-resistant. There are two main improvement points. First is the development of an outer package of the portable meter which consists of high chemical-resistant polycarbonate plastic. Second is the development of new pH glass membranes included any rare-earth element to realize a high durability. In this paper, we show features and applications of the new pH meter and pH electrodes.

### はじめに

HORIBAグループは、国産初のpH計を開発して以来、60年間にわたりpH計のトップシェアを維持してきた。その間、最新のエレクトロニクスとHORIBAグループのセンシング技術を融合し、正確で信頼性の高いpH測定技術を開発してきた。水質測定のあるゆるシーンで最上のパートナーになるというコンセプトを掲げ、2011年に水質計測ブランドLAQUA(ラクア)を立ち上げた。シリーズ第1弾は、実験室で使用するタッチパネル搭載の卓上型水質分析計を開発した。シリーズ第2弾として、どこでも簡単にpHが測定できるコンパクト水質計LAQUAtwin(ラ

クアツイン)を開発した。今回、シリーズ第3弾として、実験室と現場の双方で使用できるポータブル型水質分析計LAQUAact(ラクアアクト)を開発した。

本機の特長は、物理的衝撃への高耐久性に加えて、化学的耐久性を向上させた点である。ポータブル型pH計は、持ち運びできる利便性とスペースを必要としない装置形状が利点であり、実験室や屋外など場所を問わずに使用できる。しかし、食品工場など、アルコール消毒が必要な場所では使用できなかった。なぜなら、pH計の筐体素材や表示窓に、アルコール耐性が低いABS(アクリロニトリル・ブタジエン・スチレン)樹脂やアクリル樹脂を使用し

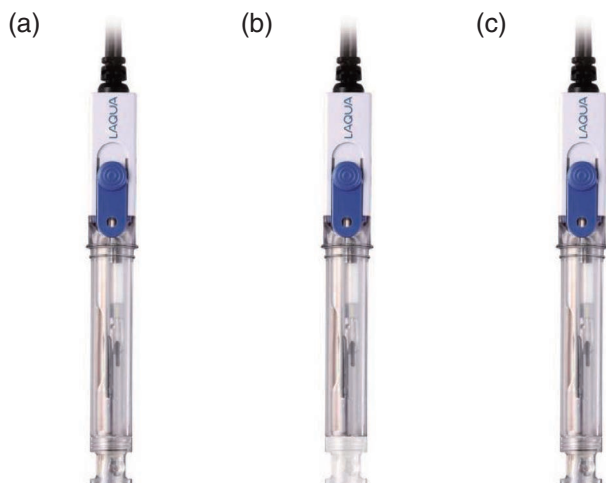


Figure 1 Outlook of new electrodes  
(a)9631-10D,(b)9632-10D,(c)9630-10D

ているからである。これを解決するために、LAQUAactの開発では、本機の筐体素材などに高アルコール耐性の新規材料を採用した<sup>[1]</sup>。pH測定器の心臓部であるpH電極においても耐久性を追求した。これまでHORIBAグループは、物理的衝撃への高耐久性のpH電極を開発してきた。2003年に販売開始したToupH(タフ)シリーズは、ガラス応答膜を厚膜化することで、耐久性を飛躍的に向上させたpH電極である。さらに、2011年にガラス応答膜をドーム状に形成し、全方向からの強度を向上させたpH電極を開発した。LAQUAactでは、ガラス応答膜自体の化学的耐久性を向上させたフッ酸用、アルカリ用と低電気伝導率水用pH電極をラインアップした(Figure 1)。

フッ酸やアルカリ試料は、ガラスを溶解するため電極寿命が短くなる。この課題を解決するために、希土類元素を含有しガラス骨格構造を強化したガラス応答膜を開発した。低電気伝導率水の場合は、測定値が安定するまでに時間がかかる点が課題だった。その主な原因は、ガラス応答膜表面への付着物による反応の阻害や、水和層\*1内でのイオンの拡散電位\*2が安定しないことである。従来よりもガラス組成の純度が高いガラス応答膜を開発することで、拡散するイオン種を制御し応答速度を向上させた。本稿では、はじめにpH測定の基礎について説明する。

\*1：水和層：試料水とガラスの間のガラス成分が水和した領域  
\*2：拡散電位：異なる2つの溶液が接触した時に、溶液間のイオンの拡散によって生じる電位

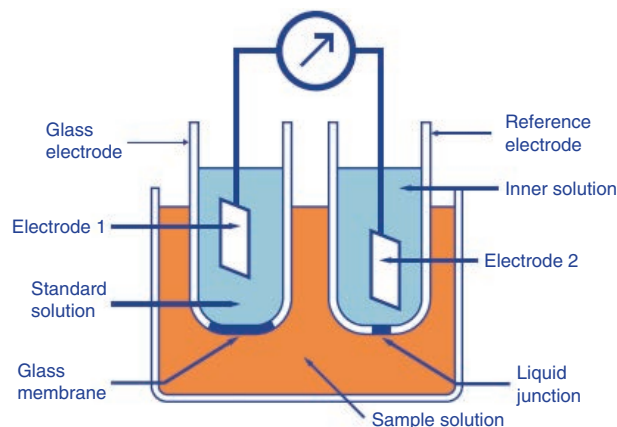


Figure 2 Diagram of pH measurement

## pH測定の基礎

溶液中のpHは、Figure 2に示すように、pHガラス電極と比較電極の二つの電極間に生じた電位差から求められる。pHガラス電極は、試料溶液のpHに応じてガラス薄膜(ガラス応答膜)表面の電位が変化する。比較電極は、試料のpHが変化しても常に一定の電位を示す。これら二つの電極と温度補償電極を組み合わせて、1本の電極形状にしたものを一般的にpH複合電極という。以下、簡略化してpH電極と記す。

pH計は先ほどの電位差を計測し、溶液の温度からEquation 1に従ってpH値を算出する<sup>[2]</sup>。

$$\text{pH}(X) - \text{pH}(S) = \frac{E_X - E_S}{2.3026RT/F} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、pH(X)は試料のpH値、pH(S)は標準液のpH値、 $E_X$ は試料中で計測した電位差、 $E_S$ は標準液中で計測した電位差、 $R$ はガス定数、 $T$ は絶対温度、 $F$ はファラデー定数である。pHガラス電極のガラス薄膜が約 $10^8 \Omega$ の高いインピーダンスをもつため、電位差を正しく計測できる専用のオペアンプが必要である。pH計はこのオペアンプ、制御回路と表示部から構成される。

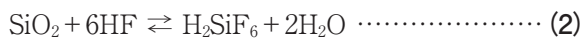
## LAQUAactシリーズのpH電極

今回、ラインアップしたフッ酸用、アルカリ用と低電気伝導率水用pH電極の特長とアプリケーションを紹介する。

### フッ酸用pH電極(型式9631-10D)

ガラスのエッチング液や金属の前処理液に使用されるフッ酸試料は、ガラスを溶解させるため、電極寿命が短く

なる。Equation 2の反応で生じるヘキサフルオロケイ酸(H<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub>)がガラス応答膜表面に付着し反応を阻害するため、測定値の再現性が低下する課題があった。



これらを解決するために、フッ酸への耐久性が高いガラス応答膜を開発した。イオン半径が小さくかつ電子親和力が強いイットリウムを、ガラス骨格の網目構造内に充填すると、ガラス骨格が強化され、化学的耐久性が向上する<sup>[3]</sup>。Figure 3に、25°Cの1% HFにおけるフッ酸用pH電極と汎用タイプのpH電極(9615-10D)の寿命の比較結果を示す。図の横軸は1% HFへの浸漬時間、縦軸は電極感度を示す。電極感度とは、試料の1 pH変化あたりの電位変動量の計算値( $\alpha$ )に対する実測値の比率を表す。計算値はEquation 3から算出する。

$$\alpha = 2.3026RT/F \quad (3)$$

実測値はフタル酸標準液とリン酸標準液中の電位差から求めた。汎用タイプのpH電極は、約350分でガラス膜が破損した。しかし、フッ酸用pH電極は、1000分後もガラス膜が破損せず、pH感度の変化がなかった。フッ酸用pH電極は、汎用タイプのpH電極に比べて約3倍の電極寿命がある。

次に、フッ酸試料の測定事例を紹介する。測定前に、Equation 2で生じたヘキサフルオロケイ酸を取り除くために、エタノールを含ませた柔らかい布でガラス応答膜を拭き取る。それから、あらかじめ試料にpH電極を数分間浸漬させ、ガラス応答膜とHFを反応させ表面状態を安定させる。これらの処理後に、pH標準液中でpH電極を校正し測定を開始する。実際に1% HFを繰り返し40回

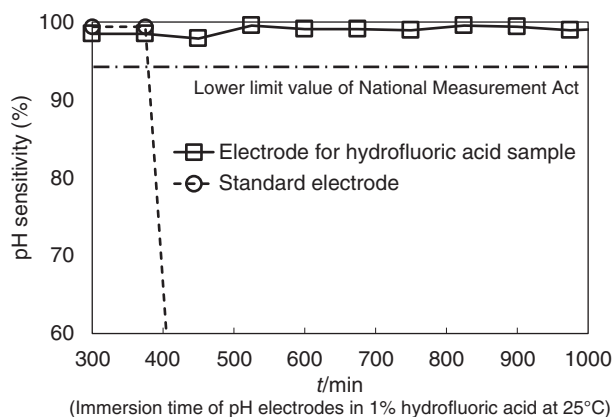


Figure 3 Comparison of lifetime of electrode with 9631-10D and 9615-10D

測定した結果、測定値の平均は2.58 pH、標準偏差0.042 pHとなり、良好な再現性が得られた。また、測定値と1% HFの計算値を比較するために、Equation 4を使って活量( $a_{\text{H}^+}$ )を求め1% HFのpH値を算出した。

$$\begin{aligned} \text{pH} &= -\log a_{\text{H}^+} \quad \dots\dots\dots (4) \\ a_{\text{H}^+} &= C_{\text{H}^+} \times \gamma_{\text{H}^+} \end{aligned}$$

ここで、 $C_{\text{H}^+}$ は水素イオン濃度(mol dm<sup>-3</sup>)、 $\gamma_{\text{H}^+}$ は活量係数である。水素イオン濃度はHFの解離定数(pKa=6.7×10<sup>-4</sup>)から求め、1% HFの活量係数( $\gamma_{\text{H}^+}=0.0249$ )は文献から引用した<sup>[4]</sup>。その結果、1% HFのpH値は2.56 pHとなり、測定値とよい一致を示した。これらの結果から、長期間、安定したフッ酸試料の測定がこの電極の使用で可能になる。

### アルカリ用pH電極(型式9632-10D)

メッキ液で使用されるアルカリ溶液も、ガラス成分を溶解するため電極寿命が短くなる。これを解決するために、スカンジウムを加えた新規応答膜を開発した。イットリウムと同様に、スカンジウムを加えることでガラス骨格が強化され化学的耐久性が向上する<sup>[3]</sup>。さらに、アルカリ溶液を測定した時に生じるアルカリ誤差が低減する。その理由は、スカンジウムのイオン半径が小さいためガラス骨格に隙間が生じ、その隙間にランタンなどのイオン半径が大きい原子が充填されるためと考えられる。その結果、ガラス骨格へのアルカリ金属イオンの浸入が抑制され、アルカリ誤差が低減する。

スカンジウム含有pHガラス応答膜を用いたpH電極は、汎用タイプのpH電極に比べて約5倍の電極寿命がある。Figure 4に、60°C、0.1 mol dm<sup>-3</sup>のNaOH溶液中における

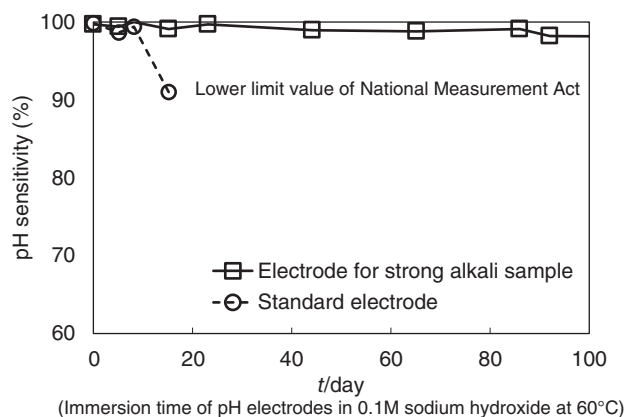


Figure 4 Comparison of lifetime of electrode with 9632-10D and 9615-10D



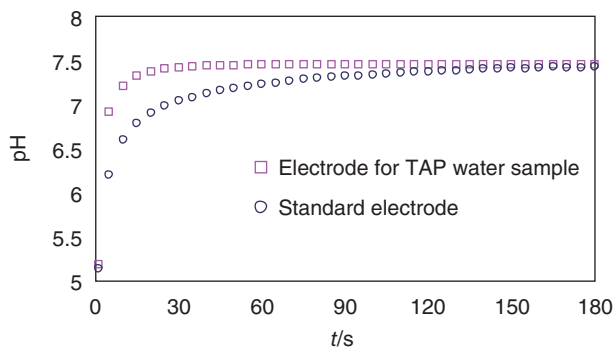


Figure 5 Comparison of response time of electrode with 9630-10D and 9615-10D

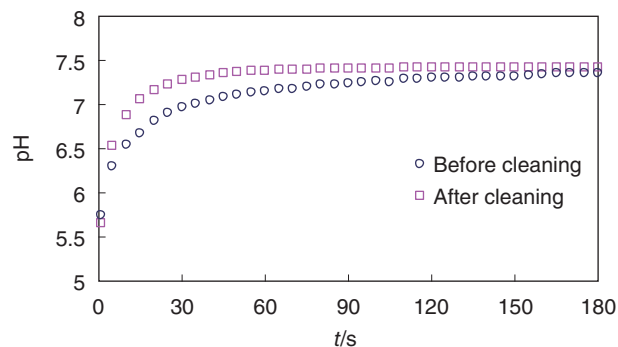


Figure 6 Comparison of response time of electrode with 9630-10D and 9615-10D

アルカリ用pH電極と汎用タイプのpH電極の寿命の比較結果を示す。汎用タイプのpH電極は、約15日間で電極感度が劣化して測定できなくなったのに対して、アルカリ用pH電極は、約3ヶ月間後も電極感度に変化がなかった。電極感度は、ホウ酸標準液とリン酸標準液の実測値から計算した。

#### 低電気伝導率水用pH電極(形式9630-10D)

水道水は、電気伝導率が低く、緩衝能が低い試料である。このような試料では、ガラス応答膜の水和層内でのイオン拡散が安定するまでに時間がかかる。さらに、製造工程で金属イオンがガラス応答膜に混入すると、このイオンの拡散が応答速度を律速し、応答速度が低下する。この課題を解決するために、ガラス応答膜のガラス組成の純度を向上させた。また、低電気伝導率用pH電極用洗浄液(形式230, 洗浄液A  $0.1 \text{ mol dm}^{-3} \text{ NH}_4\text{FHF}$ , 洗浄液B  $0.01 \text{ mol dm}^{-3} \text{ HCl}$ )を使用することで、ガラス応答膜が劣化したり、表面に汚れが付着したりしても、応答膜表面を再生でき、いつでも新品の状態を維持できる。

Figure 5に、低電気伝導率水用pH電極(9630-10D)と汎用タイプのpH電極の水道水応答の比較結果を示す。図中の応答曲線から、汎用タイプのpH電極に比べて、9630-10Dの指示値が安定する時間は短縮している。また、3ヶ月程度使用した後のpH電極の形式230洗浄液による洗浄前後での水道水応答の変化をFigure 6に示す。電極を洗浄することで、応答速度が劣化しても新品同様の性能に改善する。

#### ポータブル型水質分析計“LAQUAact計

LAQUAact計は、高アルコール耐性のポリカーボネートを筐体及び表示部窓、PET(ポリエチレンテレフタレート)を操作部に採用した(Figure 7a)。これにより、アルコール噴霧洗浄が実施でき、消毒が必要な食品工場の現場でも使用できる。アルコール以外の消毒液として、次亜塩素酸ナトリウム溶液を使用できるので、消毒方法の選択肢も増えた。また、これらの材料は化学的耐久性が高く、pH1の酸やpH13のアルカリ溶液に浸漬しても劣化しない。



Figure 7 Outlook of LAQUAact(pH meter)



Before cleaning After cleaning

Figure 8 Outlook of LAQUAact(pH meter)with dipping into oil

また、本機は高耐薬品性の材料選定に加えて、表面の凹凸が少ない加工を採用し、汚れにくい特徴がある。実際に油へ本機を浸漬させた後、アルコールで洗浄すると、汚れが残らず新品同様に再生できる(Figure 8)。

その他にも本機の機能に、卓上型水質分析計と同等の2成分同時表示機能やpH、イオンの5点校正、1,000件の内部データメモリなどを充実させた。これらの機能と、付属のスタンドとを組み合わせることで(Figure 7b)、これまでの卓上型と同じように、2成分同時測定やサンプルのpHにあわせた校正が可能である。

## おわりに

耐久性を追求した水質分析計LAQUAactを開発した。LAQUAactは、あらゆる場面で、簡便で高い信頼性のpH測定を可能にする。2011年のLAQUA誕生以来、よりユーザの身近な存在となれるように、ユーザの要望に応えられるユニークな製品を開発してきた。その結果、徐々にLAQUAブランドが浸透してきた。今後も、さらに信頼性が高いpH測定技術を追求し、アプリケーションと使いやすさで最上のパートナーになれるよう技術革新に挑戦していく。そして、技術の提供を通じて、安心・安全・健康で豊かな生活を創ることに貢献していく。

## 参考文献

- [1] 小椋克昭, 生産現場革新へ先鋭化する計装・情報化技術, 計装, 11, 56(2013)
- [2] JIS Z 8802 pH測定方法
- [3] 堀場製作所. ガラス電極及びその応答ガラス. 特開2011-173449. 2012-11-14
- [4] Handbook of chemistry and physics, 74th. ed. CRC Press, 1993.



### 山内 悠

Hisashi YAMANOUCHI

株式会社堀場製作所  
開発本部 アプリケーション開発センター  
液体計測開発部



### 芝田 学

Manabu SHIBATA

株式会社堀場製作所  
開発本部 アプリケーション開発センター  
液体計測開発部  
博士 (工学)

# Product Introduction

新製品紹介

## 蛍光X線硫黄分析計 SLFA-60

Sulfur in Oil Analyzer SLFA-60

### 大澤 澄人

Sumito OHZAWA

大気汚染の原因となる自動車排ガス中のSO<sub>x</sub>は、年々規制値が厳しくなってきた。特に、排ガス処理装置の性能を十分に発揮させるためには、燃料中の硫黄分の低減が不可欠である。一方、燃料の原料となる原油は、従来よりも硫黄分の多い高粘度の原油や、シェールオイルのように原油と組成の異なるオイルも採掘されており、原料段階での硫黄分の管理が重要になっている。蛍光X線硫黄分析装置SLFA-60は、原料段階での硫黄分の管理をターゲットにした装置である。基板、ソフトウェアを一新し、多様な燃料に対応させた。また、信号処理をデジタル化することで従来装置に比べて大幅な基板面積の小型化を実現し、生産性、メンテナンス性を向上させた。

The SO<sub>x</sub> in motor exhaust leading to air pollution is restricted, and a regulation value is becoming severe every year. In order to sufficient performance of the emission gas processing unit especially, reduction of sulfur content in fuel is indispensable. On the other hand, as for the crude oil used as the materials of fuel, there is much sulfur content with high viscosity oil and shale oil are also mined. Management of the sulfur content in a materials stage is important. Sulfur in oil analyzer SLFA-60 is the equipment which targeted management of the sulfur content in a materials stage. The printed circuit board and software were renewed in order to correspond to many kinds of oil.

### はじめに

燃料中の硫黄分により生成される自動車排ガス中のSO<sub>x</sub>は、大気汚染や酸性雨の原因となる。また、排ガス処理装置の性能を劣化させる。そのため、各国の燃料中硫黄分濃度の法規制は、環境問題への関心の高まりとともにより厳しくなっている。米国においては、自動車用ガソリン、軽油中の硫黄分はEPAによる自動車からの排ガス規制強化に沿って順次低減され、2006年からガソリンは30 ppm以下、軽油は15 ppm以下となっている。(カリフォルニア州ではガソリンの硫黄分は2004年より15 ppm以下) EUにおいては、自動車からの排出ガス規制であるEURO-1からEURO-5に沿って変更されてきており、2005年からガソリン、軽油とも50 ppm以下に規制され、2010年にはEU全域で共に10 ppm以下となっている<sup>[1]</sup>。

一方、燃料の原料となる原油は、採掘技術の高度化により、従来よりも硫黄分の多い高粘度の原油も採掘できるようになっている。また、採掘手法の多様化により、シェールオイルのような原油と組成の異なったオイルも採掘されている。燃料中の硫黄分濃度の低減のために、原料段階での硫黄分の管理がより重要になってきている。

### 装置概要

#### 測定原理

SLFA-60は、蛍光X線を用いた硫黄分析装置である。本装置は、JIS K2541-4(原油および石油製品硫黄分試験法第4部：放射線式励起法)で規定されている測定方法に該当する。この測定方法についての詳細は、JISや、以前



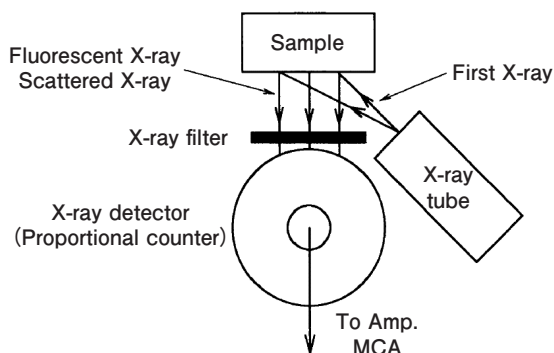


Figure 1 Schematic diagram of measurement

に本誌でも解説されている<sup>[2]</sup>のでそちらを参考にさせていただきたい。ここでは、本装置の特徴について述べる。

**Figure 1**に示すように、X線管で発生したX線を試料に照射すると(試料に照射するX線を一次X線と呼ぶ)、一次X線の一部は試料に含まれる硫黄の原子を励起して蛍光X線(エネルギー2.3 keV)を発生させ、残りの一次X線のほとんどは試料で散乱される。この散乱X線は、一次X線とほぼ同じエネルギーを持っており、SLFA-60の場合では大部分は4.5 keVのチタンの特性X線である。一次X線の強度が同じであれば、発生する硫黄の蛍光X線の強度は試料に含まれる硫黄の濃度にほぼ比例する。

試料から出た蛍光X線と散乱X線は、比例計数管に入りX線のエネルギーに比例した電荷が生成される。この電荷をプリアンプで電圧の信号に変換した後、スペクトル処理回路を通してマルチチャンネル波高分析器に入り、スペクトルが得られる。**Figure 2**は試料から出た硫黄の蛍光X線と散乱X線を、比例計数管で計測した場合のスペクトルの模式図である。このスペクトルの、硫黄の蛍光X線に相当する領域の面積(S)と散乱X線に相当する領域の面積(B)とから、硫黄濃度が求められる。すなわち、硫黄濃度が既知の標準試料であらかじめ検量線を作成しておき、その検量線を用いて硫黄濃度に換算すること

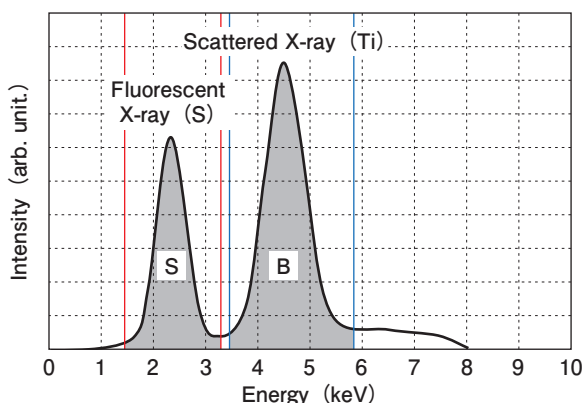


Figure 2 Energy spectrum

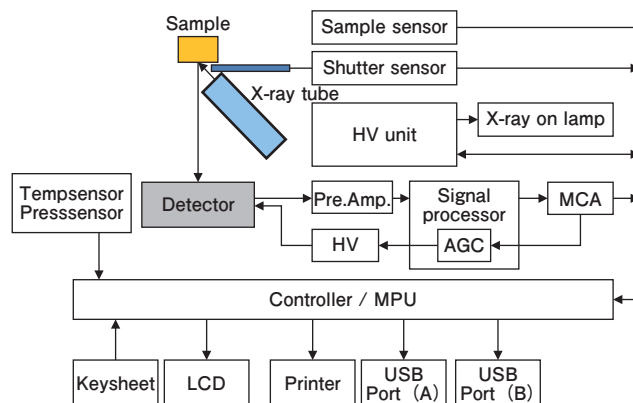


Figure 3 Block diagram of the SLFA-60

ができる。

### 装置構成

SLFA-60の構成を**Figure 3**に、装置の外観を**Figure 4**に示す。

### SLFA-60の特徴

- ・高速データサンプリング回路を搭載することにより、信号処理をデジタル化した。これにより、回路を簡素化し、基板サイズの小型化と構成部品削減が実現できた。
- ・検量線自動選択が可能な検量線群を、従来の1セットから3セットに増やすことで、シェールオイルやバイオ燃料などの新しい油種を測定時に、登録済の検量線の入れ替えることなく、検量線群の切り替えだけで測定を可能とした。
- ・測定濃度範囲を、従来の5%から10%に広げ、採掘技術の高度化に伴って得られる、高濃度の硫黄分を含んだ原油の測定にも対応。
- ・HORIBAの科学製品群のイメージに合わせ、曲面を多用したデザイン。



Figure 4 Outside appearance of the SLFA-60

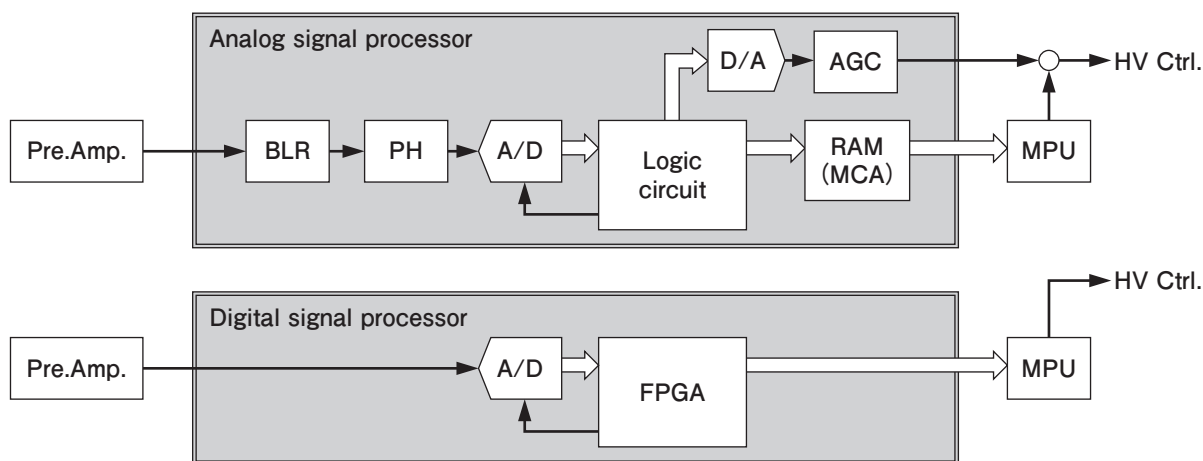


Figure 5 Comparison of an analog-signal-processing and a digital-signal-processing

- ・LCDの大型化／カラー化により視認性を向上させて、ユーザビリティを向上。
- ・外部機器へのデータ出力方法を、RS-232Cを使った通信から、USBメモリへのデータ書き込みや、USBケーブルを用いたPCとの通信に変更。
- ・新しいX線機器の安全規格EN61010-2-091に適用した。

### 信号処理のデジタル化

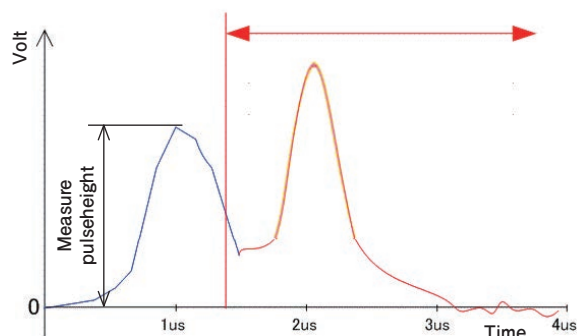
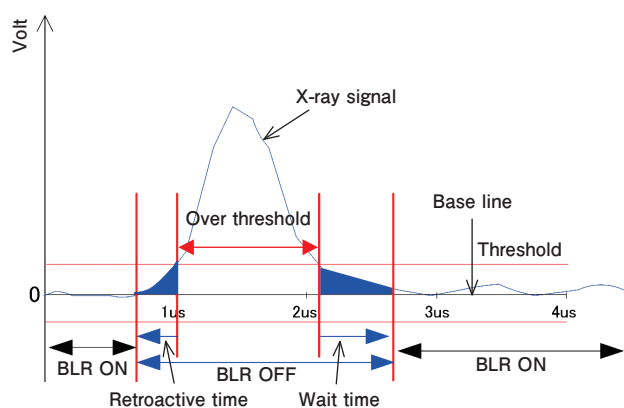
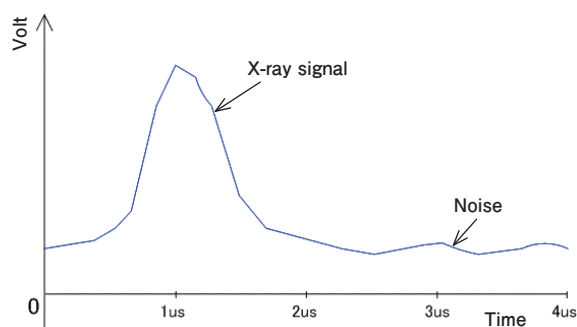


Figure 6 Schematic diagram of a signal processing

Figure 5に、従来機に搭載されたアナログ信号処理系と、SLFA-60に搭載されたデジタル信号処理系の比較図を示す。プリアンプから出力される信号は、入射X線のエネルギーに比例した電圧のピークを持つ信号とノイズ信号が重なり合った波形になっている。SLFA-60では、このプリアンプ信号波形をデジタル信号に変換した後、FPGA\*1内部で以下のようなスペクトル処理を行い、マルチチャンネル波高分析器に入力している。(Figure 6)

\*1 : FPGA : Field programmable gate array : ユーザーが自由にプログラミングできるLSI。何度も回路を変更することができる。

### ベースライン補正(BLR\*2)

ベースライン補正とは、プリアンプ信号の中に含まれるノイズ成分をオフセットとして差し引き、X線の信号以外のバックグラウンドを0にする処理である。「ベースライン補正前処理」と「ベースライン補正処理」の2段階で実施している。

「ベースライン補正前処理」は、ベースライン補正処理の

前段階としてオフセットの調整を行い、波形のバックグラウンドを0付近まで下げる処理である。閾値を設定し、一定時間以上閾値を超える場合はオフセット量を大きく、閾値内収まればオフセット量を小さくする処理を行っている。

「ベースライン補正処理」は、「ベースライン補正前処理」で大まかな調整を行った入力に対して、さらに精密にバックグラウンドを0にする処理である。X線の信号が閾値を下回った後の、立ち下り時間分をベースライン補正処理から除外するだけでなく、バッファを設けて、X線の信号が入る前の状態を常にモニタすることで、X線パルスが閾値を超えた時点から立ち上がり時間分も遡ってベースライン補正処理から除外できるため、より正確な補正処理が行える。

\*2: BLR: Base line restore: 信号のベースラインのオフセットを0に戻す回路。

### X線パルス検出

X線パルス検出とは、一定の閾値を超える信号を検出した時に、パルス検出タイミング信号を出力する処理である。

### パルス波高測定(PH<sup>\*3</sup>)

パルス波高測定とは、X線パルスを検出した後、一定期間入力値が最大値を更新しない状態になったら、その時の最大値をパルス波高値として取得し、マルチチャンネル波高分析器に入力するチャンネルに、変換する処理である。なお、パイルアップ(1個のフォトン信号処理が終わる前に、別のフォトンが入射すると、パルス波高値が高くなる現象)の防止のために、ピーク検出後の一定期間は計測を停止する処理(デッドタイム)を設けてピーク検出を行わないようにしている。

\*3: PH: Pulse height detect: パルスの波高の最大値を保持する回路。

### 自動ゲイン調整(AGC<sup>\*4</sup>)

自動ゲイン調整とは、X線スペクトルのエネルギー位置がずれた場合に、自動的にゲインを調整して、エネルギー校正を行う処理である。比例計数管を長期間使用していると、内部ガス組成の変化などにより出力パルスの波高値が低下する場合がある。また、アンプやADC<sup>\*5</sup>は周囲温度の変化や経年変化によってゲイン値が変化する場合がある。これらの要因でスペクトルのピークシフトが起き

ると、正確な測定ができなくなってしまう。そこで、試料を測定した時に得られる硫黄の蛍光X線ピークと、チタンの散乱X線ピークを常時監視し、硫黄のピーク位置もしくはチタンの散乱X線のピーク位置が所定のエネルギーになるように、自動的にエネルギー校正を行っている。(硫黄とチタンのピークの強度値の高い方を校正に使用)この処理により、長期間使用して比例計数管の出力が徐々に低下しても、測定中の環境変化でゲインが変動しても、常に正確な測定ができる。

\*4: AGC: Automatic gain control: X線スペクトルのピークを、硫黄の蛍光X線エネルギー、チタンの散乱X線エネルギーに自動的に調整する回路

\*5: ADC: Analog to digital converter: アナログ信号を取り込んで、それと等価なデジタル量に変換する回路。

## SLFA-60の性能

SLFA-60のような硫黄分析計の性能を表す時に、「繰返し精度」が良く使われている。これは、同じ試料を続けて複数回測定した場合の標準偏差( $\sigma_{n-1}$ )のことである。繰返し精度に影響を与える要因は下記通り。

### 統計誤差

SLFAでは、計測された蛍光X線の計数値を元に濃度値を求めているが、この計数値は、放射線計測で良く知られるようにポアソン分布を示し、計数値Nのばらつき(標準偏差) $\sigma(N)$ はその平方根となる。

SLFA-60の場合、単位時間当たりの硫黄の蛍光X線強度とチタンの散乱X線強度の比(K値と呼ぶ)をパラメータとして検量線を作成している。このK値のばらつきに検量線の傾きを掛けて濃度値に変換したものが統計誤差であり、繰返し精度を決める主因となっている。統計誤差の計算を示す。

単位時間当たりの硫黄の計数値 : NS

単位時間当たりのチタンの計数値 : NB

測定時間 : t

検量線の傾き : a とおくと、

硫黄の計数値のばらつき $\sigma_S$ は

$$\sigma_S = \sqrt{(NS \times t)} / t$$

チタンの計数値のばらつき $\sigma_B$ は

$$\sigma_B = \sqrt{(NB \times t)} / t$$

検量線のパラメータKは、 $K = NS / NB$ なので、K値のばらつき $\sigma_K$ は誤差伝搬式から、



$$\sigma_K = \sqrt{((\sigma_S/NB)^2 + (NS \times \sigma_B/NB^2)^2)}$$

となり、傾きを掛けて

統計誤差 =  $a \times \sigma_K$  となる。

### 温度/気圧変化

X線管-試料-検出器の間の空気層の温度/気圧が変化すると、空気のX線吸収率が変化する。検量線を作成時と試料測定時の温度/気圧が異なると、同じ硫黄濃度でも蛍光X線の計数値が変化して、濃度値のずれが発生する。なお、SLFA-60は温度センサ/気圧センサを装備し、温度/気圧変化による空気のX線吸収率の変化を補正している。

### 繰り返し再現性評価

硫黄濃度1%の試料を、測定時間600秒、繰り返し回数99回という条件で繰り返し再現性の評価を行った結果をFigure 7に、測定時の温度、気圧変化をFigure 8に示す。

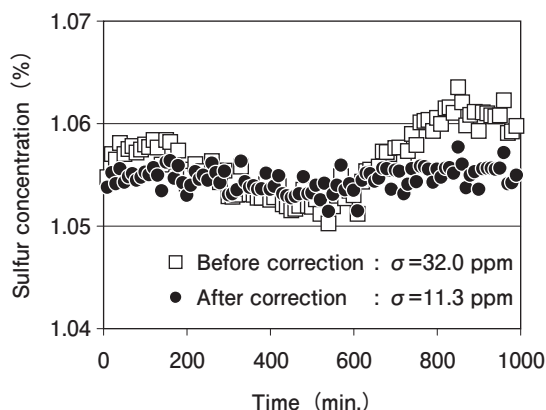


Figure 7 Result of repeated measurement

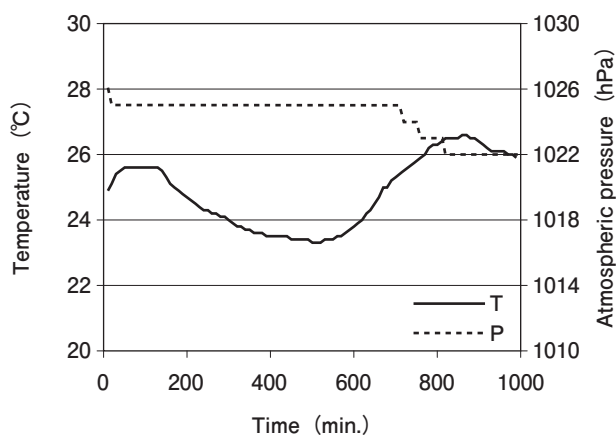


Figure 8 Change of temperature and atmospheric pressure

単位時間当たりの硫黄の計数値 : NS=4.9 kcps

単位時間当たりのチタンの計数値 : NB=8.8 kcps

測定時間 : t=600s

検量線の傾き : a=2.251

⇒ 統計誤差 : 9.1 ppm

周囲温度、気圧の変動の影響により、温度/気圧補正前の繰返し精度が32.0 ppmであったものが、温度/気圧補正後には11.3 ppmとなった。このことから、温度/気圧補正の有効性が確認できた。また、補正後の繰返し精度は統計誤差と同程度なので、長時間安定したデータを出せることが分かった。

### まとめ

本稿では蛍光X線硫黄分析装置SLFA-60の装置概要、信号処理のデジタル化、性能について簡単に紹介した。アナログ回路で行っていた信号処理をデジタル化して基板を小型化しても、従来機と同じく、統計誤差と同程度の精度が得られることが確認できた。検出器に用いている比例計数管は、型式に合わせたパラメータ設定が必要になるのだが、デジタル化したことにより、信号処理基板を変えることなく、FPGAにセットするパラメータを入れ替えるだけで対応できる。今後、より高性能な蛍光X線硫黄分析装置を開発して、ラインナップの拡充を行うにあたって、今回開発した基板がプラットフォームとして活用されることが期待される。

### 参考文献

- [1] JX日鉱日石エネルギー 石油便覧
- [2] 岡田 義明, *Readout(HORIBA technical report)*, 5, 43(1992)



大澤 澄人

Sumito OHZAWA

株式会社 堀場製作所  
開発本部 アプリケーション開発センター  
科学・半導体開発部

# Product Introduction

新製品紹介

## 油分濃度計OCMA-500シリーズ

Oil Content Analyzer OCMA-500 series

西尾 友志

Yuji NISHIO

高坂 亮太

Ryota KOSAKA

水環境保護の観点から環境中に放出される油分の濃度測定・管理は重要である。本稿では、従来よりもユーザビリティに優れ、溶媒使用量を2割削減した新しい油分濃度計OCMA-500シリーズの概要を紹介する。さらに、所定の油水をノルマルヘキサン抽出物質として測定した結果とOCMA-505で測定した結果の比較、およびOCMAの抽出用溶媒種を用いた実験結果の比較を報告する。これらの結果から、OCMA-500シリーズは揮発性の高い低分子の油分測定にも適用可能であることを示す。

Measuring and controlling the concentration of oils released into the environment is essential for aquatic conservation perspective. In this paper, our new oil content meter OCMA-500 series with 20% decrease in the usage of solvents and improved usability is introduced. A comparative measurement results between OCMA-505' NDIR method and n-hexane extract method are also reported, in addition to the measurement results of the comparison of OCMA's extract solvent. These results indicate that OCMA-500 series is applicable to the measurements of oils which are high volatile and low molecular weight.

### はじめに

世界の人口は70億人を超え、人類の活動による地球環境への負荷は増大しつつある。人口が増加し続ける一方で、地球上に人類が飲料水として利用できる水は地球上の水の割合は1%以下であり、水環境の保全は今後一層重

要となる<sup>[1]</sup>。その中で、河川や海洋に放出される油分は水環境汚染の原因となっており、水質汚濁防止法、下水道法においても排水中の油分濃度基準が定められている。**Table 1**に油分測定手法の一覧を示す<sup>[2]</sup>。主な油分測定法としては、日本工業規格(JIS)に重量法(ノルマルヘキサン抽出法)が記載されている。しかし、抽出、分離、溶媒

Table 1 Features of oil concentration measurement method<sup>[4]</sup>

		Gravimetric	Infrared ray			Fluorescence	Gas chromatograph	Turbidity	Quartz resonator	Orgastor
			Fourier transform Dispersive	Non-dispersive	Laser					
Solvent	dichloroethane	possible	possible	possible	unnecessary	unnecessary	possible	unnecessary	unnecessary	unnecessary
	trichloroethane	possible	possible	possible						
	S-316	impossible	possible	possible						
	H-997	possible	possible	possible						
	n-hexane	possible	impossible	impossible						
detection	volatile oil	impossible	possible	possible	possible	possible	possible	possible	possible	possible
	saturate oil	possible	possible	possible	possible	impossible	possible	possible	possible	possible
Standard measurement time		2 hour	3 min	3 min	real-time	continuous	30 min	15 min	real-time	real-time



Figure 1 Appearance of OCMA-500 series

乾固、重量測定といった煩雑な実験操作が必要となる。さらに、溶媒乾固の際に揮発性の高い油分が共沸してしまう。

一方、我々は油分抽出から測定までを自動で実行し、簡単に油分濃度を測定することができるOCMA-300シリーズを販売してきた。簡便な排水中の油分測定法としてはもちろんのこと、油を使用する部品生産工程(主に金属)の残留油分測定として使用されてきた。ここでは、OCMA-300シリーズの後継機種としてOCMA-500シリーズ(**Figure 1**)の特徴をまとめた。OCMA-500シリーズでは、用いる抽出溶媒種によりOCMA-505(H-997を使用)、OCMA-500(S-316を使用)をラインナップしている。

### 測定原理

OCMA-500シリーズでの油分濃度測定は、OCMA-300シリーズで用いられている非分散赤外吸収法(**Table 1**の non-dispersive)を踏襲している(**Figure 2**)。Table 1より他の手法と比較すると、非分散赤外吸収法は揮発性、飽和結合油脂の両者を検出でき、かつ測定時間が短いとい

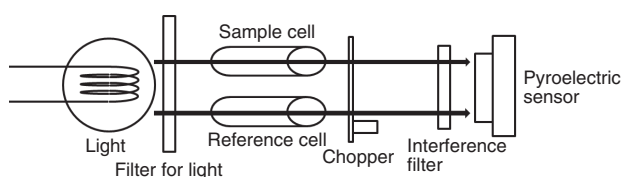


Figure 2 Diagram of light, cells and detector

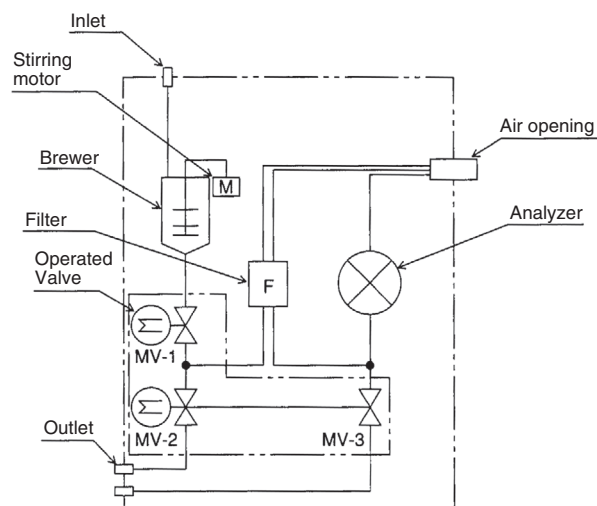


Figure 3 Flow diagram of OCMA-500 series

う特徴がある。光源からの光は油分を抽出した溶媒で満たされたセルに照射される。セルを透過した光は、チョッパーにより変調される。その後、干渉フィルタによって炭素-水素結合間(C-H)の伸縮振動に帰属する吸収波長域(3.4~3.5 μm)のみが検出器(パイロセンサ)に導入される。油分抽出溶媒中の油分濃度が高いほどセルを透過する光が減衰し、焦電効果で発生する電流値が低下する。この電流値を用いて油分濃度を算出することができる。なお、光源の光量変動は光をサンプルセル、リファレンスセルに通すダブルビーム方式によりリアルタイムで補正される。

### 基本構成

OCMA-500シリーズは油分抽出から排液までを全自動で行うことができる。測定フローを**Figure 3**に示す。抽出槽、試料液を送液する自動切替弁、水フィルタ、分析部から構成されている。装置に導入された試料水は抽出槽内で油分抽出溶媒と共に攪拌され、油分が抽出溶媒に抽出される。その後、自動切替弁が開き、抽出溶媒は水頭圧により送液され、水フィルタで水分が除去された抽出溶媒のみが分析部に送液される。

### 仕様と特長

OCMA-500シリーズは、サンプルから油分を抽出し、溶媒の送液、測定、排液までが全自動でできる装置である。OCMA-300シリーズからの改良点を以下に説明する。

油分抽出溶媒のH-997とS-316は、地球温暖化係数がそ



Table 2 Property of H-997

Chemical formula	CF <sub>3</sub> CF <sub>2</sub> CHCl <sub>2</sub> CClF <sub>2</sub> CF <sub>2</sub> CHClF
Molecular weight	208
Boiling point	54°C
Melting point	-131°C
Density	1.55 g/mL (25°C)
Vapor pressure	0.0377 MPa (25°C)
Saturated solubility in water	0.033 g/100 g (25°C)
Acute oral toxicity (LD50)	5 g/kg or more

れぞれ370と5000(S-316の原料)であり、使用は最小限に留めるのが望ましい。環境保全に対する意識が高まる中、計測機自身の環境負荷低減は製品開発の際の必須課題である。そこで、OCMA-500シリーズでは抽出槽の形状をスリム化する等の構造を最適化することによって、油分抽出溶媒使用量を2割削減することに成功した。また、光源に用いられていた鉛パッキンをアルミに変更し、さらに基板上の電子部品をRoHS(Restriction of Hazardous Substances)指令対応とした。また、OCMA-300シリーズを使用しているユーザーからの要望を吸い上げ、より操作性を向上させた。抽出槽界面をLEDライトで照らすことで、抽出槽内での試料水と抽出溶媒の分離の確認を容易にした<sup>[3]</sup>。また、画面に3.5インチカラーLCDを採用した。さらに、USB端子も搭載し、本体の操作やパソコンでのデータ管理が容易となった。以上の結果、環境負荷を低減させつつ、ユーザビリティの向上を達成した。

## 抽出溶媒

OCMA-500シリーズでは油分抽出溶媒としてH-997、もしくはS-316を用いる。日本国内向けにはH-997を提供している。Table 2にH-997の物性表を、Figure 4にOCB標

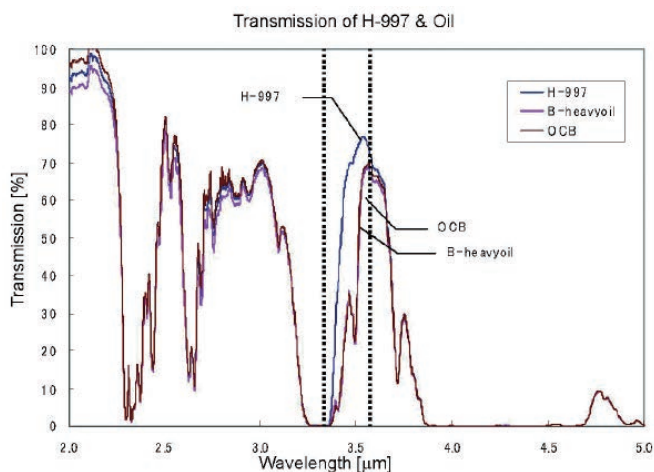


Figure 4 Infrared absorption spectrum of H-997, B-heavy oil and OCB standard solution.

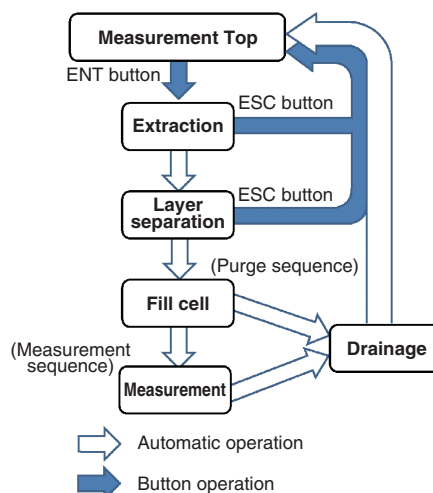


Figure 5 Operation flow of automatic measurement

準混合物質とH-997の赤外域吸収スペクトルを示す。H-997は分子構造内のC-H結合割合が小さいため、3.4~3.5 μmの赤外吸収が少ない。したがって、C-H結合を有する油分が抽出されてくると、C-H結合により赤外線が吸収される。OCMAにおいては、この吸収の差を用いて濃度を算出している。使用済み油分抽出溶媒の再生には、溶媒再生器SR-305を提供している。活性炭と活性アルミナの2重構造となっている。活性炭では油分を、活性アルミナで脱水と低分子極性物質の除去を行なう。この装置の利用により溶媒のリサイクルが可能となり、ランニングコストも低減できる。

## 測定手順

OCMA-500シリーズの測定フローをFigure 5に示す。OCMA-300シリーズに比べ、Figure 6の画面のように操作ガイド(次の手順の選択)表示があるため、取扱説明書を用いなくても操作を容易に行なうことができる。通常の測定をする際は、前回測定した試料水の影響を除くために、試料水を用いて共洗いを2回以上行う。

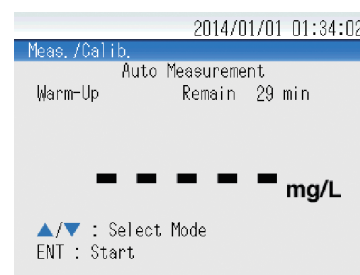


Figure 6 Start of automatic measurement mode

特に前回測定した液と濃度差が100 mg/L以上ある場合は、5回以上共洗いが必要である。代表的な操作手順は次の通りである。

MEASボタン、または上下ボタンにて測定モードを「自動」にする。次にメスシリンダー、または計量シリンジ(溶媒用)を用いて、注入口から溶媒8 mLを注入する。スポイトを用いて、注入口から塩酸1滴を添加する。メスシリンダー、または計量シリンジ(試料用)を用いて、注入口から試料水16 mLを注入する。この順に液を注入する理由は、塩酸が途中で壁面に残ることを防ぐためである。最後にシートキーのENTボタンを押すと、攪拌が開始される。共洗いの工程の場合は、Figure 5のフローのように自動的に抽出、層分離、液送、排液を行う。測定の工程の場合は、自動的に抽出、層分離、液送、測定、排液を行う。測定後に結果が表示され、USBメモリにて測定結果を取り出すことができる。

### 油分濃度計の特性

#### 各種油種の相対感度

排水中の油分濃度管理では、JIS法に規定されているノルマルヘキサン(n-ヘキサン)抽出物質を管理指標とすることが多い。n-ヘキサン抽出物質とは、ヘキサン抽出を行なった後、約80℃でヘキサンを蒸発させたときに残留する物質をいう<sup>[4]</sup>。そのため、揮発性の高い油分はn-ヘキサンと共沸してしまい検出できない。Table 3は、各油種を所定量分取したものに1 mLのn-ヘキサンを添加し、80℃にて30分加熱したときの重量変化の結果である。機械油や白灯油のような共沸しやすい油種では残留率がそれぞれ38%と23%と小さく、n-ヘキサン抽出では、これらの定量が困難であることを示唆している。一方、OCMAシリーズでは溶媒の蒸発が不要なため、揮発性の高い油分を溶媒が含んだまま測定することができる。Figure 7は、20 mg/lの油水をOCMA-505(H-997を使用)およびn-ヘキサン法で測定した結果である。n-ヘキサン法での測定においては、油分濃度に対して約20%程度の測定値しか得ら

Table 3 Weight change after adding 1ml of n-hexane to each oil and heating at 80 degree for 30 min.

	B-heavy oil	machine oil	ARB crude oil	heating oil
initial weight (mg)	55.4	60.6	54.6	60.1
weight after heating at 80 degree for 30min (mg)	35.3	23.2	41.6	14.1
residual ratio (%)	64	38	76	23

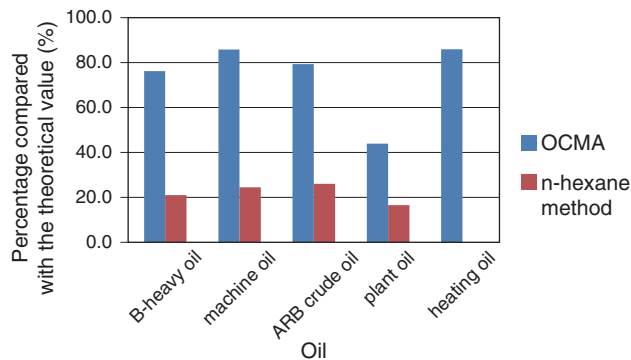


Figure 7 Measurement results of 20 mg/l oily water using OCMA-505 and n-hexane method

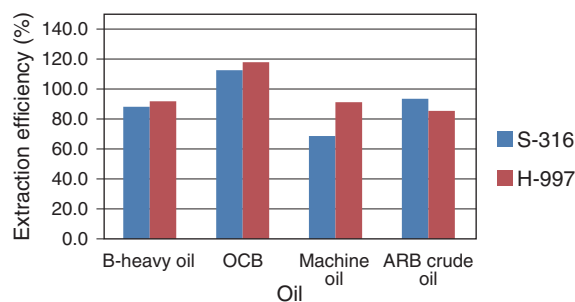


Figure 8 Extraction efficiency of each oil measured by using H-997 and S-316

れなかった。特に白灯油においては、1%以下の回収率であった。一方、OCMAにおいては、植物油を除く多くの油種において約80%の測定結果が得られた。なお、油分濃度に対して100%の測定結果が得られず、各油種での回収率が異なるのは、油分抽出率の違いのためである。

これらの結果は、OCMA-500シリーズが、揮発性の高い低分子の油分測定にも適用可能であることを示している。したがって、汚れによる機能低下や、加熱による匂いや煙発生を抑制する必要がある、金属加工部品の残留した油分(機械油等)の測定には特に有用であると予想される。

#### H-997とS-316各油種の抽出効率の比較

OCMA-500シリーズのH-997とS-316の溶媒を用いたときの各油種における濃度20 mg/L油水の抽出効率をFigure 8に示す。抽出効率 $\eta$ は、

$$\eta = \frac{B}{A} \times 100$$

ここで、A：分液漏斗を用いて溶媒とサンプルを3分間振盪させて抽出した液の測定値、B：OCMA-500シリーズに付属

の抽出槽にて抽出した液の測定値である。なお、OCMA-500シリーズはOCB標準液にて校正した。これらの溶媒における抽出効率の差は、どの油種においてもほぼ同様であった。ただし油種によって抽出効率が異なるため、測定対象油種が明らかな場合は、その油種自身を校正油に用いることが好ましい。

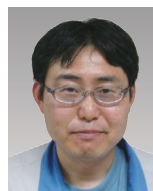
## おわりに

以上で述べたように、OCMA-500シリーズでは、従来よりも溶媒とサンプル量が、それぞれ2割少量で測定が可能であり、バックライト等のユーザビリティを向上した。また、ボタン1つで測定ができる「人と環境にやさしい油分濃度計」である。この非分散赤外吸収法を用いたOCMA-500シリーズは、低濃度の油水や揮発しやすい油分を含むサンプルでも短時間で測定ができる簡便で高性能な油分濃度計である。

近年では環境水のみならず部品の残留油分の指標、土壌中の油分分析など広く用いられるようになり、これらの測定のデファクトスタンダードとなりつつある。今後はさらに食品分野や、清浄度管理(油分)の指標としての活用も期待される。

## 参考文献

- [1] I.A. Shiklomanov, John C. Rodda, World Water Resources at the Beginning of the Twenty-First Century, Cambridge University Press, 13(, 2004)
- [2] 日本電気計測器工業会編, 環境計測器ガイドブック
- [3] バックライトに関する特許申請済
- [4] 日本工業規格, JIS K0102 工場排水試験方法



**西尾 友志**

Yuji NISHIO

株式会社 堀場製作所  
開発本部 アプリケーション開発センター  
液体計測開発部



**高坂 亮太**

Ryota KOSAKA

株式会社 堀場製作所  
開発本部 アプリケーション開発センター  
液体計測開発部



# Product Introduction

新製品紹介

## 自動全窒素・全りん測定装置TPNA-500

— 試薬組成および計量方式の改良による保守負荷の低減 —

Automatic Total Nitrogen/Phosphorus Monitor TPNA-500

— Reduction of maintenance time result

from improvements of reagent formulas and a gauging method —

### 石井 章夫

Akio ISHII

### 河野 忠司

Tadashi KAWANO

日本の水質総量規制では、閉鎖性水域への一定以上の排水を行う事業所に対して全窒素および全りんを測定を義務付けている。2002年に販売開始した従来機種TPNA-300は、その高い信頼性と環境負荷の小ささから広く市場に受け入れられ、水質汚濁監視の一端を担ってきた。TPNA-500ではこの強みを生かしながら、試薬交換周期の延長や誤検知の少ない計量方法の開発などを実現することで保守性を向上させた。ある食品工場排水の測定事例では、従来機種と比較して配管の洗浄など保守時間を1/6以下に削減できることが確認された。保守時間が削減されたことでライフサイクルコスト<sup>\*1</sup>低減に貢献できる。

Automatic Total Nitrogen/Phosphorus Monitor TPNA-300 is widely accepted by the market because of its high reliability and low environmental load. TPNA-500 inherits its advantage and is enhanced its maintainability. Main improvement points are two; one is an extension of reagents exchange term and another is a gauge method less detection error due to line stain. In a case of waste water measurement of foods plant, maintenance time could be reduced to less than 1/6 compared with TPNA-300. This reduction of maintenance time will contribute to lowering of Life Cycle Costs<sup>\*2</sup>.

\*1: ライフサイクルコスト: 製品を購入してから廃棄するまでに必要な費用

\*2: Life Cycle Cost: Total operating costs from purchase to disposal.

### はじめに

「水の惑星」という言葉でも表されるように、地球上にはおよそ13億5000万km<sup>3</sup>という豊富な水が存在しているといわれている。しかしながら、その99%以上は海水であり、淡水においても多くの割合が氷河や地下水という形で存在する。したがって、河川・湖沼水など人類が利用しやすい水の量は、約0.01%の10万km<sup>3</sup>に過ぎないといわれている<sup>[1]</sup>。これまでも先進国を中心に、限られた水資源を安全かつ効率的に、さらに持続的に利用するために、適切な水質管理を目的とした計測が行われてきた。また、発展途上国の人口の増加や環境汚染、全世界的な気候変動などを鑑みると、その重要性はますます高くなると推測される。

日本に目を向けると、戦後の産業復興期に水質汚濁問題の顕在化を受けて本格的な対策が開始された。1958年に旧水質二法、1967年に公害対策基本法、1970年に水質汚濁防止法、そして1978年には内海や湖沼などの閉鎖的水域の汚染を受けて水質総量規制が制定された<sup>[2]</sup>。水質総量規制は2013年現在までに6次にわたり実施されており、2004年に実施された第5次では、化学的酸素要求量(COD)に加えて、全窒素(TN)・全りん(TP)の水質汚濁負荷量の規制が新たに追加された。

HORIBAグループでは総量規制に先行して、2002年に自動全窒素・全りん測定装置TPNA-300の発売を開始した。TPNA-300はそれまでの製品に比べて、測定に使用する

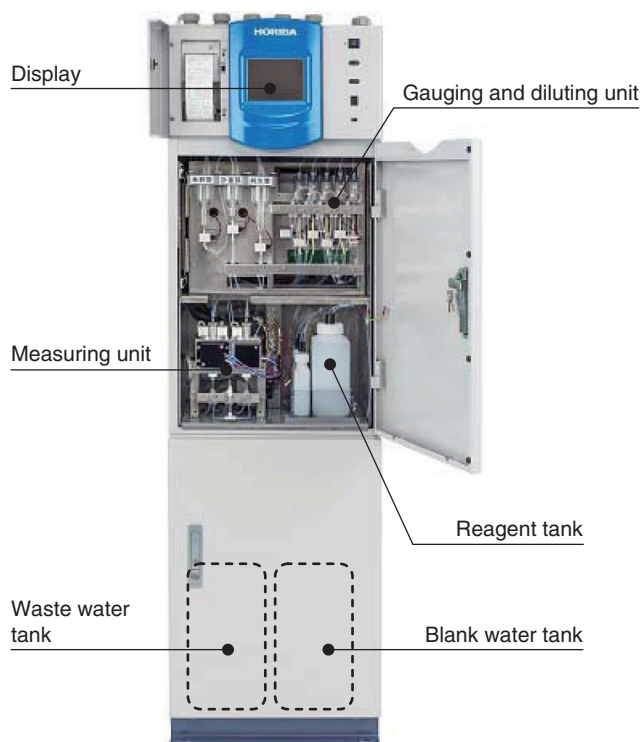


Figure 1 Outlook of TPNA-500

サンプルの微量化や、反応試薬の大幅な削減(従来の1/10)など環境負荷を低減し、工場排水や下水処理場に多数採用され、地域環境保全の一端を担ってきた<sup>[3]</sup>。2013年にはTPNA-300の後継機種として、これまでに培われた高い信頼性を有する技術を基礎にしながらも、より保守負荷を低減したTPNA-500の発売を開始した(Figure 1)。従来は短周期での試薬交換、廃液処理、配管および計量管洗浄など各種保守が必要であり、製品費に比べてランニングコストが大きいものであった。

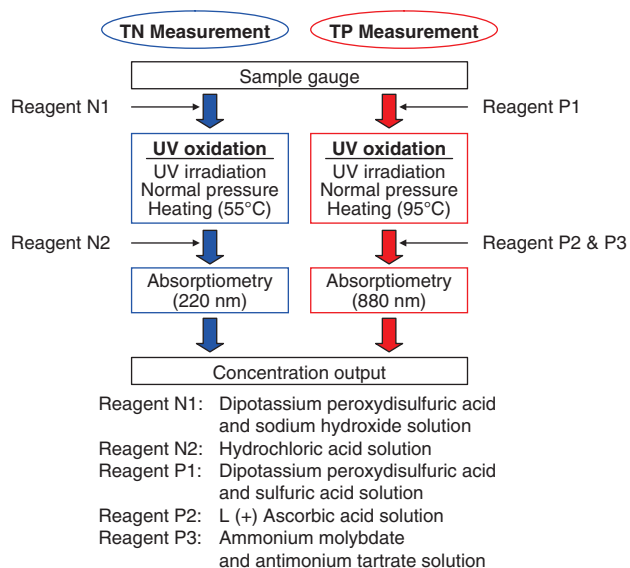


Figure 2 Measurement flow of TPNA-500

Table 1 Principles and methods of TN and TP commercial monitors

Items	Decomposition with 120°C	UV Oxidation	Flow Injection	Contact Thermal Decomposition
Measurement items	Total Phosphorus Total Nitrogen	Total Phosphorus Total Nitrogen	Total Phosphorus Total Nitrogen	Total Nitrogen
Degradation temperature	120°C	55°C ~95°C	approx. 160°C	700°C ~800°C
Degradation pressure	2 atoms.	Normal pressure	20 atoms.	
Measurement method	Total Phosphorus	Molybdenum blue	Molybdenum blue - coulometry	—
	Total Nitrogen	UV absorbance	UV absorbance	Chemiluminescence
Measurement time	60 min.	30 min. ~60 min.	10 min. ~20 min.	5 min. ~15 min.
Reagents	Need	Need	Need	Not need
Representative Consumables	pressure tight case heater	UV lamp Reaction cell	Pump tube, heater	Catalyst Reaction cell Combustion furnace

TPNA-500は保守にかかる手間を小さくし、製品を購入してから廃棄するまでに必要な費用(Life cycle costs: LCC)を低減させることに成功した。本稿ではTPNA-300との比較を行いながら、TPNA-500での技術改良点とLCC低減について紹介する。

## TPNA-500の特長

### 原理・測定方式

総量規制に適合する全窒素・全りん自動計測器は、測定原理・方式に指定がなく、環境省の定める性能基準・管理基準の試験を満足することで公定法として使用できる。市販されている全窒素・全りん自動測定装置の原理・測定方式をTable 1に示した。TPNA-500では従来製品と同様に紫外線酸化分解法を採用した。紫外線酸化分解法の測定フローをFigure 2に示す。紫外線酸化分解法は他の手法に比べて分解条件が低温(100°C以下)・常圧下での反応であるため、部品の小型化、長寿命化が図れるメリットがある。これまでに培った技術を活かし、引き続き本測定方法を採用した。

### 保守性

近年では、計測器に対して正確に測定するだけでなく、より保守にかかる負荷を小さくすることが求められている<sup>[4]</sup>。HORIBAグループが2011年に発売開始した自動

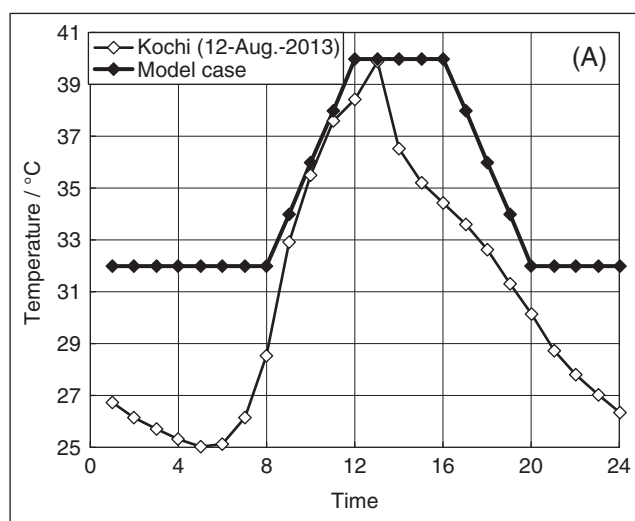
COD計測装置CODA-500は従来の測定装置に比べて、測定精度はそのままに試薬使用量を1/10に削減することに成功した。同時に水道水使用量や電力使用量、廃液量などの削減によって、ランニングコストを従来装置の1/2に削減、しいてはLCCの低減を提案してきた。

TPNA-500でも同様の方針を引き継ぎ、保守性を向上させることでLCCを低減した。保守性向上の主な技術開発のポイントを以下に列挙するが、本稿ではその中でも「試薬組成の改良による交換周期の延長」と「計量管および配管の汚れによる誤検知のない液計量方法」について詳細を紹介する。

- ・ 試薬組成の改良による交換周期の延長
- ・ 計量管および配管の汚れによる誤検知のない液計量方法
- ・ 薬液によるサンプル計量管および配管の自動洗浄機能(オプション)
- ・ 薬液による試薬計量配管の自動洗浄機能
- ・ 試薬交換シーケンスによる交換作業効率化
- ・ 洗浄用純水消費量の削減
- ・ 廃液量の削減と廃液タンク交換周期の延長
- ・ タッチパネルディスプレイによる操作性向上
- ・ USBメモリによるデータ活用の利便性向上
- ・ 前面からの保守
- ・ 密閉性向上による基板の腐食防止

試薬組成の改良による交換周期の延長

Figure 2の測定フローでも図示したように全窒素・全リ



ん測定では多くの試薬を使用するが、その中でもペルオキソ二硫酸カリウムは紫外線酸化分解法において重要な試薬である。ペルオキソ二硫酸イオンは標準酸化還元電位が+1.96 V<sup>[5]</sup>と水溶液系で使用される汎用試薬としては有数の酸化力を有している。しかし逆に言えば、反応性に富んだ酸化剤であると言える。つまり水溶液中では溶媒である水と反応し、ペルオキソ二硫酸イオンと過酸化水素へと分解される<sup>[6]</sup>。この分解反応は常温常圧下で進行する反応であるため、保管しているだけでペルオキソ二硫酸イオンの濃度低下が生じる。濃度低下は酸化力低下であり、酸化分解効率低下、測定精度低下を意味する。これを避けるため、従来機種では常温で1ヶ月以内に使い切ることを推奨していた。

TPNA-500では試薬に適切な添加剤を用いることで分解を遅延できることを見出した。また、最適な添加剤を検討する中で、分解反応速度と保管温度の間に明確な関係があることを見出した。ペルオキソ二硫酸カリウムの分解は溶媒である水との反応であるが、水は過剰量存在するため、ペルオキソ二硫酸カリウムの分解反応を一分子反応とみなしてEquation 1より反応速度定数を算出することが可能である。さらに保管温度を変えた試験にて、アレニウスのEquation 2と明確な関係があることを確認した(データ省略)。なお実験での濃度の確認はJIS K 8253<sup>[7]</sup>に従って酸化還元滴定にて測定した。

$$\frac{[P]}{[P]^0} = e^{-kt} \dots\dots\dots (1)$$

$$\ln k = \frac{-E}{RT} + \ln A \dots\dots\dots (2)$$

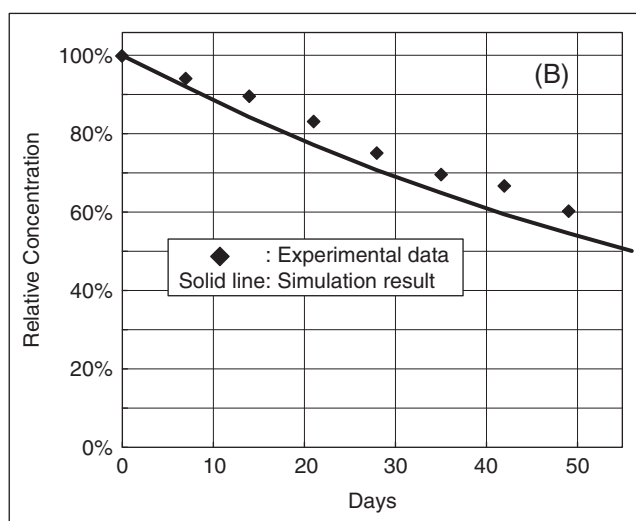


Figure 3 Simulation and experimental results of degradation of peroxydisulfuric acid ion ((A) is a model case of temperature. (B) is results of a simulation (solid line) and an experiment (◆))



ここでEquation 1での[P]はある時点での濃度を, [P]<sup>0</sup>は初期濃度を, kは反応速度定数をtは経過時間を表す。またEquation 2でのEは活性化エネルギーを, Rは気体定数を, Tは絶対温度を, Aは頻度因子を表す。実験により各種パラメータを決定し, Equation 1および2を用いることで, 保管温度ごとの交換目安を見積もることが可能となる。例えば35℃保管環境であれば, 従来の試薬組成の場合, 交換周期の目安は34日と算出され1ヶ月での交換が必要となる。一方で添加を行った場合は60日と算出され交換目安が2ヶ月まで延長される。温度変化が起こる場合についてもこれまでの議論から交換の目安を見積もることが可能である。

例として日中気温変化がFigure 3Aの◆をモデルケースとして, 実験的に温度変化を与え続けた場合の試薬濃度の変化と上記の関係式から導かれる計算値を比較した。なおFigure 3A中の◇は2013年度の最高気温を記録した8月12日の高知県江川崎の日間気温変化である。モデルケースは同日の気温よりも高い推移を示すよう設定しており, 現実的にはモデルケースのような温度変化が継続的に与えられることは稀であると考えられる。Figure 3Bに結果を示す。図より分かる通り, モデルケースにおいても実験値(◆)と計算値(実線)が類似の傾向を示し, 大まかには交換周期の予測が可能であることが確認された。以上の様に気温変化を想定することで試薬濃度低下

を予想することが可能であり, 試薬交換周期を最適化することが可能である。(特許申請済み)

### 計量管および配管の汚れによる誤検知のない 液計量方法

Figure 2の測定フローに示した通り, 測定ではサンプル計量や複数の試薬の計量が必要となる。従来は光学センサによる液面検知方式を採用していたが, サンプル由来の汚れによる光学センサの誤検知を防止するため, サンプル条件によっては短周期での洗浄を実施する必要があった。TPNA-500では汚れによる影響を出来る限り軽減させるためセンサによる液面検知ではなく, 時間制御による計量方式を採用した。

時間制御による計量方式の模式図をFigure 4に示した。本方式では計量値を決定しているのはガラス製のサンプル計量管と計量用配管の位置関係である。最初に計量管内部を陰圧にして, サンプルオーバーフロー槽(OF槽)から1 mL以上の量を吸引する。この段階での吸引量は正確である必要はない。そのため液面センサを使用せずに吸引時間のみで制御している。その後, 逆に計量管内部を陽圧にして必要量を除いてサンプルをOF槽へと吐き戻す。必要量はFigure 3に示されている通り, サンプル計量管と計量用配管によって決められた空間によって決定される。さらに汚れの影響を軽減するために電磁弁の使

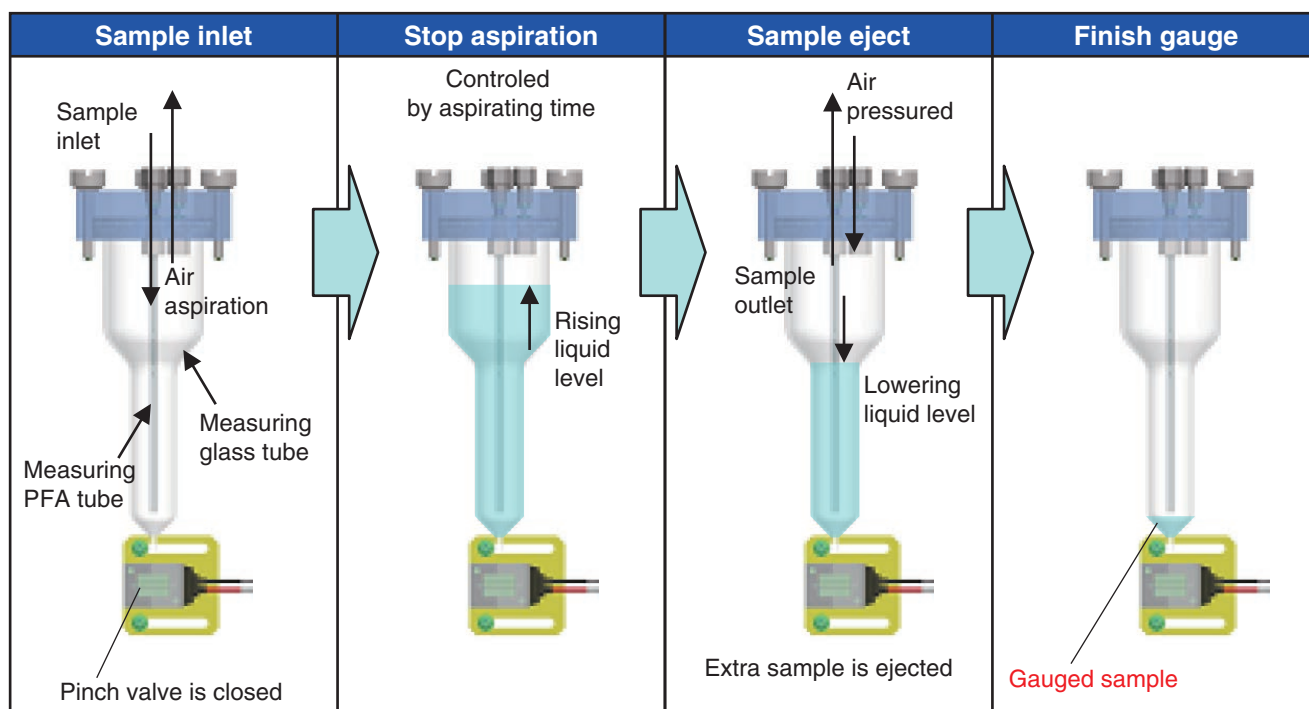


Figure 4 Sample gauge method of TPNA-500

用箇所を削減し詰まりが発生しにくい配管設計とした。またOF槽への逆洗浄を行うことでメッシュフィルタの詰まりを防止している。それでも汚れの付着が目立つ場合には薬液洗浄機能を用意しており(オプション)、総合的に配管の汚れによる影響を軽減させている。(特許申請済み)

に配管の汚れによる影響を軽減させている。(特許申請済み)

## 性能と測定事例

Table 2 Degradation efficiency of standard substances

Standard substance of TP	Degradation efficiency	
	TPNA-500	Manual measurement
Potassium dihydrogenphosphate	100.4%	100.0%
Sodium diphosphate decahydrate	98.7%	100.8%
Sodium phosphinate	101.8%	103.8%
Disodium hydrogenphosphonate	99.8%	99.2%
Disodium phenyl phosphate	101.9%	101.8%
Disodium β-Glycerophosphate	97.6%	98.8%
Benzyltriphenylphosphonium chloride	95.7%	99.8%
Sodium tripolyphosphate	99.5%	98.6%
5' -AMP	93.4%	94.2%
5' -ATPNa2	94.8%	96.2%

Sample concentration is 0.5 mg/L(n=3).  
Manual measurement is according to JIS K 0102-45.3.1.

### 手分析相関

水質総量規制で運用される全窒素・全りん自動計測器は環境省が定める性能基準・管理基準に適合する必要がある。指定計測法(JIS手分析法)との相関性が要求される。TPNA-500の紫外線酸化分解法はこれまでの実績から多種多様な排水サンプルにおいて、JIS手分析との相関性を有する事が実証されている<sup>[3]</sup>。TPNA-500においてもTable 2に示すとおり各種標準物質にて、手分析と遜色ない回収率が得られることが確認された。

### 測定事例

Figure 5に一例として食品工場の排水サンプルに対する連続測定データを示す。

Standard substance of TN	Degradation efficiency	
	TPNA-500	Manual measurement
Potassium nitrate	98.5%	100.0%
Ammonium sulfate	95.7%	94.8%
Sodium thiocyanate	94.9%	97.7%
Sodium nitrite	99.3%	94.1%
Hydroxylammonium chloride.	95.5%	95.5%
Urea	95.9%	97.5%
4-Nitrophenol	98.6%	94.8%
Sulfonamide	88.3%	84.4%

Sample concentration is 2 mg/L(n=3).  
Manual measurement is according to JIS K 0102-45.2.

同現場には従来機種(TPNA-300)が設置されており、保守性の比較が可能である。2ヶ月間に実施した保守項目および費やした時間について従来機種とTPNA-500の比較を行った(Table 3)。同現場は非常にサンプル由来の汚れの付着が起りやすく、従来機種では週に1回以上の配管洗浄が実施されている。一方でTPNA-500では自動洗浄機能による洗浄のみで人の手による配管洗浄は1回も実施しなかった。その結果、同現場の同期間に関しては従来と比較して保守にかかる時間を2ヶ月で400分程度削減できることが確認された。単純に計算すれば1年で2400分の保守時間削減が期待される。同装置は10年程度使用される場合が多く、LCCの観点から考えて有用であると言える。

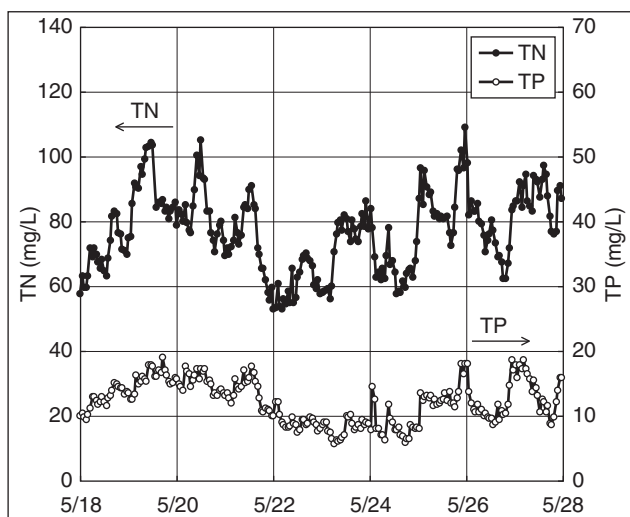


Figure 5 Continuous measurement of industrial waste water

Table 3 Comparison of spent maintenance time for two months with TPNA-300 and TPNA-500

Maintenance items	TPNA-300	TPNA-500
Waste liquid disposal	20 min.	10 min.
Pipes Cleaning	360 min.	0 min.
OF tank cleaning	30 min.	30 min.
Reagents exchange	60 min.	30 min.
Total	470 min.	70 min.

## おわりに

この度, HORIBAグループでは全窒素・全りん計TPNA-500の開発を完了した。同機は信頼性の高い紫外線酸化分解法など従来機の技術を継承しながらも保守性を向上させることでLCC低減に貢献するものである。水質資源の重要性は今後も高まるものと考えられる。HORIBAグループは水質総量規制用の排水監視計器のみならず, 各種の自動水質計測機器の開発および販売を通じて限りある水質資源の保全に貢献していきたい。

## 参考文献

- [1] I. A. Shiklomanov, J. C. Rodda, World Water Resources at the Beginning of the Twenty-First Century, Cambridge University Press, 13(2004)
- [2] 実用水の処理・活用大辞典第1版, 産業調査会辞典出版センター, 65 (2012)
- [3] 山内進, 環境に配慮した自動全窒素・全りん測定装置TPNA-300, *Readout(HORIBA Technical Reports)*, 31, 56 (2005)
- [4] 江原克信, 欠くことのできない水資源とHORIBAの水計測技術のあゆみ, *Readout 増刊号 2013*, 26 (2013)
- [5] 化学便覧基礎編第4版, 日本化学会, II-468(1993)
- [6] 新実験科学講座, 日本化学会, 8-338(1976)
- [7] ペルオキソ二硫酸カリウム(試薬), 日本工業標準調査会, JIS K 8253 (2006)



**石井 章夫**

Akio ISHII

株式会社 堀場製作所  
開発本部 アプリケーション開発センター  
液体計測開発部



**河野 忠司**

Tadashi KAWANO

株式会社 堀場アドバンスドテクノ  
開発部 開発2課



### 光吸収を用いたガス計測機器

#### Gas Measuring Instruments Based on Light Absorption

##### はじめに

HORIBAグループが有するガス計測に関わる技術の中に、ガスに光を照射してガスの吸収や蛍光を発する現象を用いて、そのガスの状態を直接計測する方法や、ガスの化学反応による発光を用いて測定する化学発光法などがある。その他の計測方法としては、水素炎を用いたイオン化法、質量分析法やジルコニア法など、光を使用しない方法を加えると10種類以上の計測技術を有している。また、近年では光源にレーザーを用いた計測方法など、新たな計測方法を製品に適用している。本号ならびに次号の2回に分けて、HORIBAグループが有するガス計測技術の原理・特徴などについて紹介する。本稿においては、光の吸収を用いた計測技術に絞って紹介する。

##### 光吸収によるガス計測の基本原則

ガス分子はそれぞれ分子固有の吸収スペクトルを持ち、そのスペクトルの吸光度を計測することにより、濃度および分子の状態を知ることが出来る。紫外においては分子の電子準位の状態変化から測定対象物質の濃度を測定し、赤外においては分子の振動・回転準位のエネルギー状態の差から濃度を測定する。これらの計測の基本となる原理がランバート・ベール(Lambert-Beer)の法則と呼ばれ、次式で表される。

$$A(\lambda) = \varepsilon(\lambda) \times C \times L$$

ここで、 $A(\lambda)$  : 波長 $\lambda$ における吸光度     $\varepsilon(\lambda)$  : 波長 $\lambda$ における吸光係数  
 $C$  : 試料濃度                                     $L$  : 試料厚さ(試料中の光路長)

ガス計測に中赤外光を用いる場合の計測方法として、非分散型赤外吸収(NDIR : Non Dispersive Infrared)法や分光的手法のフーリエ変換赤外分光(FTIR : Fourier Transfer Infrared)法などがある。また、紫外光を用いた場合、非分散型紫外吸収(NDUV : Non Dispersive Ultraviolet)法や分光器を用いた紫外分光(UVA : Ultraviolet Absorption)法などがその計測方法としてあげられる。これらの計測方法や計測波長帯域が異なる理由は、測定対象ガスの濃度範囲や種類だけでなく、計測時に共存するガスの種類や濃度によって最適な計測方法が異なるためである。したがって、正確にガス

井戸 琢也

Takuya IDO

Table 1 HORIBAグループの光吸収を用いたガス計測装置例

測定対象	測定成分	NDIR	FTIR	QCL-IR	NDUV	UVA
大気	CO/CO <sub>2</sub>	◎	○	○		
	O <sub>3</sub>				◎	○
プロセス／煙道排ガス	CO/CO <sub>2</sub>	◎	○	○		
	NO	◎	○	○	○	◎
	SO <sub>2</sub>	◎	○	○	◎	◎
	NH <sub>3</sub>		○	○		◎
エンジン排ガス	CO/CO <sub>2</sub>	◎	◎	○		
	NO/N <sub>2</sub> O	○	◎	◎		○
	NH <sub>3</sub>		◎	◎		○

◎：適切な計測方法 ○：計測可能  
 NDIR：Non Dispersive Infrared, FTIR：Fourier Transfer Infrared, QCL-IR：Quantum Cascade Laser Infrared, NDUV：Non Dispersive Ultraviolet, UVA：Ultraviolet Absorption

の状態を知るためには、最適な計測原理を選択する必要がある。

Table 1にHORIBAグループの光吸収を用いた計測装置の測定対象に対する、測定項目および計測原理をまとめた。この表から見てわかるように、同じガス種であっても、測定対象が異なれば使用する計測方法も異なり、条件に合った最適な計測法を用いることが重要である。

### 非分散型赤外吸収 (NDIR：Non Dispersive Infrared)法

非分散型赤外吸収(NDIR)法は、ガスの赤外線吸収を利用する方法で、多くのガス成分の計測が可能である。NDIR法を用いた分析計は、構造が簡単でメンテナンスが容易であり、さらに連続測定に適した特徴を持つため広く計測に用いられている。計測原理は、赤外光を分光(スペクトル分解)せず、光学フィルタ(多層膜干渉フィルタ)やガスフィルタ(干渉成分を封入したセル)で透過波長を限定して検出する<sup>[1]</sup>。具体的な装置構成は、熱光源(フィラメント等)、光チョッパ、ガス計測用セル、フィルタ(光学フィルタもしくはガスフィルタ)および検出器という構成が一般的である。検出器としては、熱型の検出器もしくは量子型の検出器を一般的に使用するが、NDIR法には熱型の検出器を用いることが多い。代表的な熱型検出器として焦電型、サーモパイル型およびニューマティック(Pneumatic)セル型がある。本稿においては、ニューマティックセル型検出器に関して詳述する。Figure 1にニューマティックセル型検出器の構成図を示す。

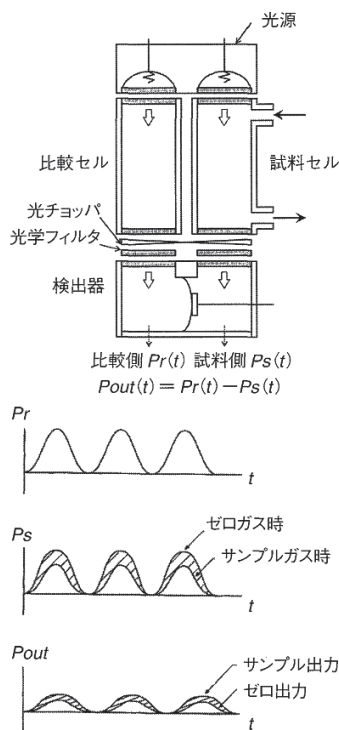


Figure 1 ニューマティックセル型NDIR検出器の構成図

光源から放射された赤外光は、試料セルおよび比較セルにそれぞれ入射する。試料セルにはサンプルガスが流れており、それを通過する赤外光は吸収されて強度が減少する。一方、比較セルには赤外光を吸収しないガス(窒素など)が封入され、赤外光はそのまま透過する。この赤外光の強度差をコンデンサマイクロホンにて検出する。また、赤外光をチョッピングすることにより連続的な交流信号としてデータを取り出す。

一般的には上述した機械的に光をチョッピングして検出器からの信号を交流化する手法が用いられるが、HORIBAグループの独自な手法である流体変調方式で信号の交流化を行うことによってより安定した高感度測定を実現している<sup>[2]</sup>。Figure 2に流体変調方式の構成図を示す。

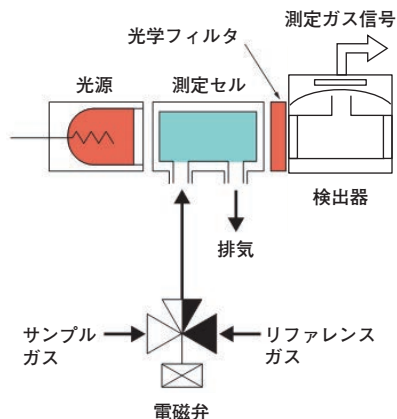


Figure 2 流体変調型NDIR検出器の構成図

流体変調方式とは、サンプルガスと測定成分を含まないリファレンスガスを一定周期で交互に測定セルに導入し、両者の信号の差を増幅して測定成分の濃度を測定する手法である。絶えずリファレンスガスでゼロ点をチェックしているため、測定成分がサンプルガスに無い場合は、変調信号が発生しな

い。したがって、ゼロ点のドリフト量が小さい安定した計測が可能となる。

### フーリエ変換赤外分光 (FTIR : Fourier Transfer Infrared) 法

フーリエ変換赤外分光 (FTIR) 法は、干渉計と高速フーリエ変換を組み合わせることにより、高分解能の赤外吸収スペクトルを得る方法である。多くの化合物が赤外域に吸収スペクトルを持つことから、化合物の定量・定性などさまざまな分野で使用されている<sup>[3, 4]</sup>。Figure 3に分析装置の構成例を示す。

光源から放射された赤外光は干渉計で干渉光となり、試料ガスの流れているセルを透過した後、検出器に導かれる。ここで得られた信号 (インターフェログラム) を高速フーリエ変換すれば、セルを透過した赤外光のスペクトル (パワースペクトル) が得られる。セル中にゼロガス (窒素ガスなど) が流れていた場合のパワースペクトルを別に測定しておき、両者の比から試料ガスの赤外吸収スペクトルを算出する。Figure 4にガスの吸収スペクトル例を示す。得られるスペクトルは中赤外域に吸収を示す多成分のスペクトルの重ね合わせであり、このスペクトルに多変量解析法を適用することで、含まれる多成分の濃度値を同時に算出する。サンプルスペクトル採取から濃度演算までを連続的に繰り返すことにより、多成分の同時連続分析ができる<sup>[5]</sup>。

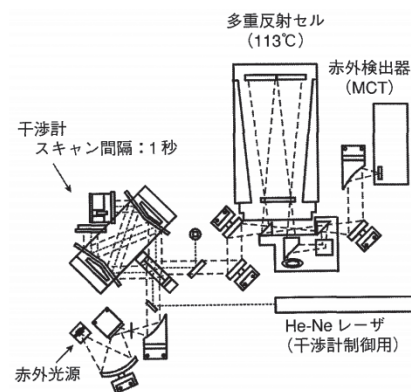


Figure 3 FTIR法ガス分析装置の分析部(概念図)

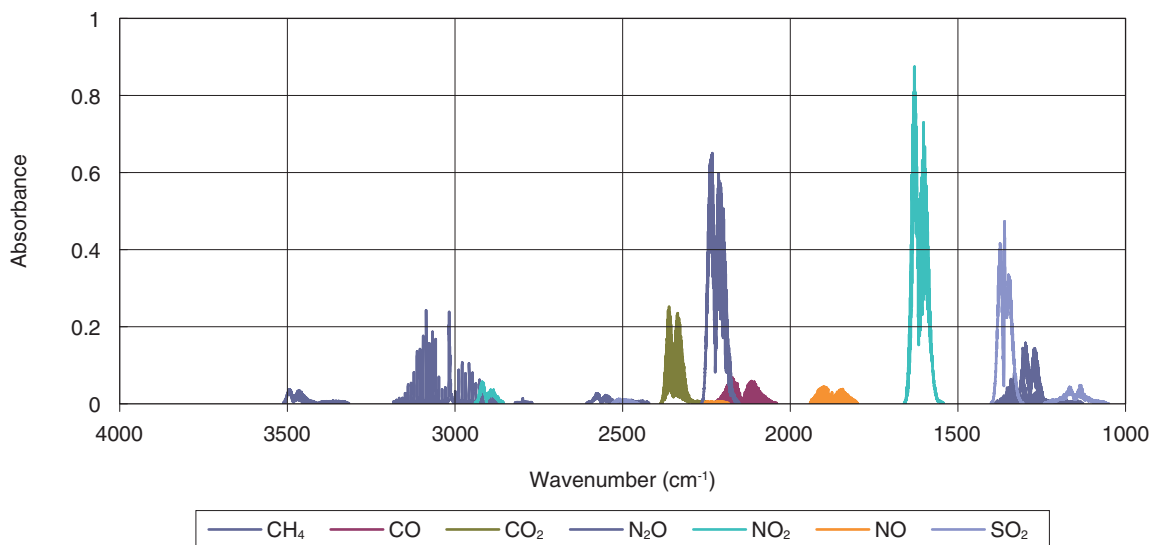


Figure 4 多成分ガスの吸収スペクトル例

### 量子カスケードレーザー赤外分光 (QCL-IR : Quantum Cascade Laser Infrared) 法

量子カスケードレーザー (QCL) は比較的最近実用化され始めた新しい方式のレーザーで、従来のバンド間遷移型の半導体レーザーでは実現できなかった常温での中赤外域のレーザー発振を可能とした。QCL-IR法は、この中赤外レーザーを光源とし、レーザー自体の性質を利用して微小領域で波長をスキャンする赤外分光法である<sup>[6]</sup>。Figure 5にQCL-IR法の原理に関するイメージ図を示す。

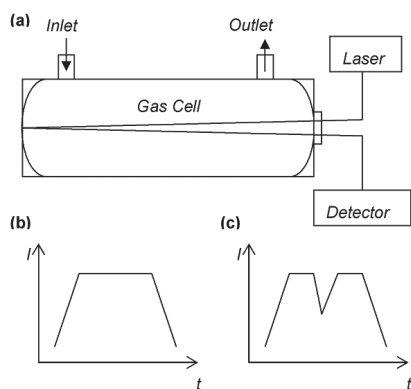


Figure 5 QCL-IR法の計測原理図

サンプルの流れている測定セルにQCL素子から発振されるレーザー光を照射し、検出器でセルを透過した後の強度をモニターする。QCL素子は一定間隔の電流パルスによりレーザー光を発振しており、一回のパルスごとに**Figure 5b, 5c**のような出力波形(時間 vs 赤外光透過強度)がモニターされる。ここで、パルス電圧が印加されている間、QCL素子に昇温が起き、この温度に影響されて発振波長が微小領域内で変化する。この現象はパルスごとに繰り返されるため、レーザーの発振波長は一回のパルス内で一定範囲をスキャンする形になる。すなわち、**Figure 5b, 5c**のようなパルスごとの検出波形は、「波長 vs. 赤外光透過強度」に変換することができる。QCL-IR法でガス成分濃度を定量するには、対象成分の吸収ピークの波長がこのスキャン範囲内に入るように中心波長を調整した素子を使用する。選択する対象成分の吸収ピークは、干渉成分の吸収ピークと極力重ならないことが望ましい。このような波長範囲の素子にて、セル中にサンプルガスが流れている場合(**Figure 5c**)の波形を採取し、あらかじめ採取しておいたゼロガス波形(**Figure 5b**)との強度比を対数に変換して、該当範囲の吸光度スペクトルを得る。吸光度は濃度に比例するというLambert-Beerの法則に基づき、このスペクトルから対象成分の濃度を計算する。また、実際のスペクトル強度は温度・圧力に影響されるため、その影響の補正も行う。

QCL-IR法は、中赤外領域に吸収を持つ多くの化合物の定量に応用できる可能性があり、複数個のレーザーを同一光軸上に配置することにより、多成分を同時に測定することが可能である。さらに、極めて高分解能のスペクトルが得られることから、成分間の干渉を最小限に抑えられることも可能である。

### 非分散型紫外吸収(NDUV : Non Dispersive Ultraviolet)法

非分散型紫外吸収(NDUV)法は紫外吸収を利用する計測方法である。特徴として、紫外域の電子遷移による吸収が、赤外域の分子振動・回転遷移の吸収より大きいことやガス計測に使用する波長範囲に水分の吸収が無いことなどがあげられる。計測装置の具体的な構成は、紫外線光源、測定セル、光学フィルタ、検出器が直線上に配置され、基本構成はNDIR法と同じである<sup>[2]</sup>。**Figure 6**にNDUV法を用いたオゾン計測用分析計の構成図を示す。

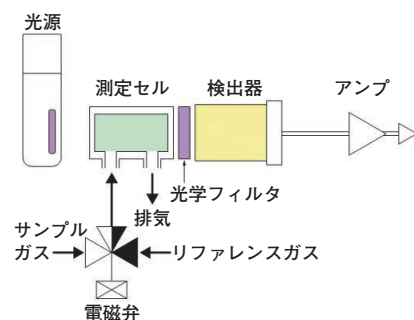


Figure 6 NDUV法を用いた分析計構成図

光学系は、紫外線光源にペン型低圧水銀ランプ、光学フィルタはオゾンの吸収領域の254 nmだけを透過させるバンドパスフィルタ、検出器はシリコンフォトダイオードで構成している。3方電磁弁により0.5秒ごとに、測定セルにリファレンスガスとサンプルガスが交互に導入され、その信号を増幅することでオゾン濃度を測定する。HORIBAグループの方式では、光源輝度とオゾン濃度信号を同一の検出器で測定するため、別々の検出器で測定する手法と異なり、検出器感度の変化による影響も補正される。NDUV法を用いる場合に留意すべき点は、光源の寿命である。水銀ランプの場合、通常6ヶ月~12ヶ月で初期輝度の1/2程度に低下する。近年では紫外域で発光が得られるLEDの技術開発が進んでいるため、これらの新しい光源の適用も検討されている。



## 紫外分光(UVA : Ultraviolet Absorption)法

紫外分光(UVA)法は紫外域で広帯域にわたり発光が得られる重水素ランプやキセノンフラッシュランプを光源に使用し、セルを通過させた後のガスの吸収信号を分光器にてスペクトル化し、計測する方法である<sup>[7]</sup>。通常、検出部にはグレーティングとダイオードアレイを組み合わせた分光器を使用する。このことにより、吸収スペクトルを高速に連続取得出来る。ガス濃度の算出方法はFTIR法と同様に取得したスペクトルに多変量解析法を適用することで、含まれる多成分の濃度値を同時に算出する。Figure 7にUVA法を用いた装置構成図を示す。

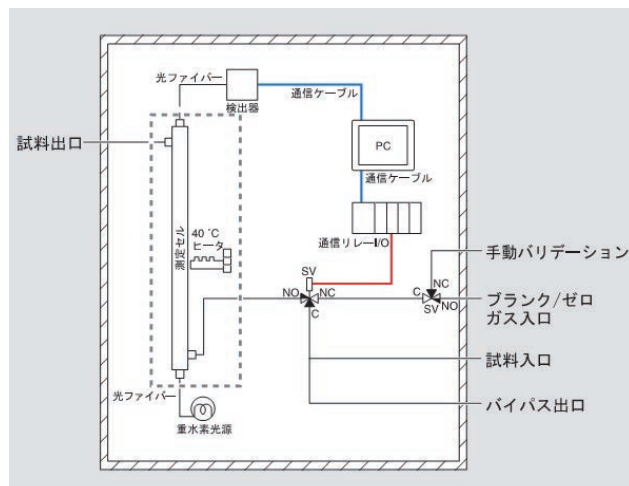


Figure 7 UVA法を用いた分析計構成例

装置構成としては、光源から光ファイバを通してセルへ導光し、測定セルを通過させた光を再度ファイバへ集光・導光して検出器に受光させる。測定できるガスの特徴は、NDIR法などではppmオーダーの測定が困難な燃料ガス中の硫黄化合物を測定できることである。また、190~250 nm付近のNO、NO<sub>2</sub>、NH<sub>3</sub>、SO<sub>2</sub>など吸収からこれらのガスを同時に計測することが可能であるが、光源の重水素ランプの寿命が6ヶ月程度と短いため使用する際には注意が必要である。

以上、HORIBAグループが有する光吸収を原理とする計測技術の一例を紹介した。ガスを計測する際に重要なことは、同じガスであっても存在するガス条件に合わせた計測方法を選択することである。また、測定対象のガス状態を変化させずに分析計に導くためのサンプリング技術も欠かすことが出来ない重要な技術である。したがって、これらの技術を測定対象に対して最適に組み合わせることによって初めて正確で安定した計測が可能となる。今後もユーザの新たなご要望にお応えするべく、製品を提供していきたい。

### 参考文献

- [1] 堀場製作所編：エンジンエミッション計測ハンドブック，山海堂
- [2] 加藤純治，Readout(HORIBA Technical report)，31，30(2005)
- [3] 平石次郎編：フーリエ変換赤外分光法，学術出版センター(1985)
- [4] P. R. Griffiths et al, "Fourier Transform Infrared Spectrometry" *Chemical Analysis*, **83**, (1986)
- [5] 山岸豊他，Readout(HORIBA Technical report)，6，38(1993)
- [6] 原健児，レーザー吸光法自動車排ガス測定装置の開発，レーザー研究，**41-9**，748(2013)
- [7] Po Chien，Readout(HORIBA Technical report)，31，20(2005)



### 井戸 琢也

Takuya IDO

株式会社 堀場製作所  
開発本部 先行開発センター

## 平成24年度近畿地方発明表彰 [京都発明協会会長賞] 吸光式分析計

### 技術分野

本発明は、各種流体中の特定成分の濃度を測定する吸光式分析計に関するもので、特に試料中に共存する複数成分を測定する、高精度でコンパクトな流体濃度測定装置に有用である。

### 従来技術とその課題

従来の吸光式分析計には、Figure 1(A)のような構成において、光学フィルタ7aを設けた光学素子部7が用いられる。詳細には、Figure 2に例示するように、光学フィルタ7aからの反射光がさらに光学フィルタ7cを介して検出器3bに導入され、測定成分の種類に合せた光学フィルタ7cの交換を容易とすべく検出器本体3bに光学フィルタ7cが設けられている。また、光の導入路Pは光学素子部7の一部分であり、その一端が光学フィルタ7cと接続されている。上記構成のため、光学フィルタ7aと光学フィルタ7cとの間に光の導入路P分の距離ができてしまう。これにより、光源から照射される赤外光が光学フィルタ7aを介さずに光学フィルタ7cに入射する場合、光学フィルタ7cで反射した赤外光が検出器3aに入射しないことがある。そのため、検出器3aが利用できる光量が減少し、検出感度が低下する。

本発明の目的は、上記のような問題点を解決し、複数の測定対象に対し、汎用性が高く、高い測定精度を有する吸光式分析計を提供することにある。

### 実施形態

本発明は、光学フィルタ7aを光路に対し所定の傾斜角を有して配置し、透過光が検出器3aに入射し光学フィルタ7aによる反射光が検出器3bに入射するとともに、他の光学フィルタ7cを光路および光学フィルタ7aに近接して配置している点に特徴がある(Figure 3)。こうした配置によって、従来光学的なロスが生じる要因となっていた光学フィルタ7aと光学フィルタ7cとの間に光の導入路P分の距離ができてしまうことを排除するとともに、光学フィルタ7cの反射光の波長特性を有効に活かすことができるというメリットが挙げられる。従来検出器3aに対してロスになっていたFigure 3において符号Aaで示すような光は、光学フィルタ7cで測定対象成分に対応した波長域の赤外光を選択

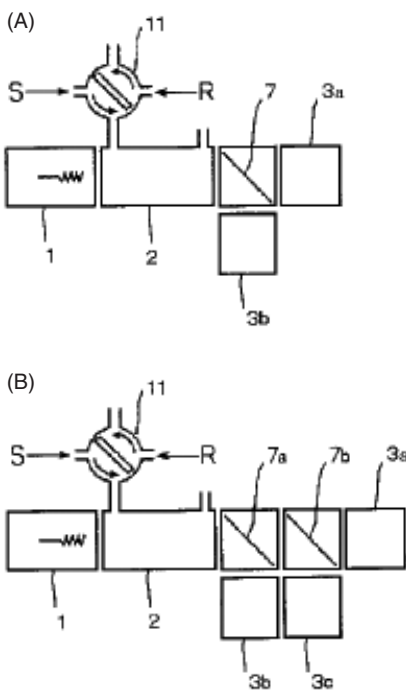


Figure 1 従来技術に係る吸光式分析計の構成例

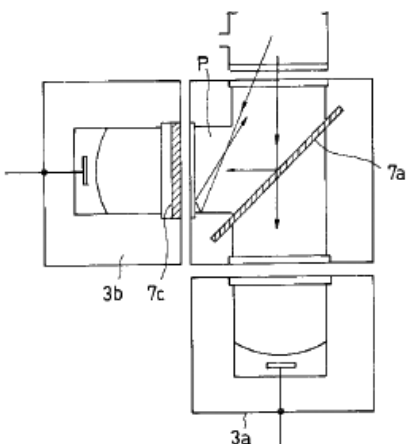


Figure 2 従来技術に係る光学素子部の構成例の詳細

的に透過された光(透過光Da)と上記以外の波長域の赤外光を光学フィルタ7cで反射した光(反射光Ea)とに分けられる。符号Aaで示すような光が光路に近接して配置された光学フィルタ7cによって反射した後(反射光Ea), 光学フィルタ7aに入射され, 透過光Faとして検出器3aに入射される。このように検出器3aに対する光量の増大効果が得られる。

本発明の別の構成例をFigure 4に示す。Figure 1の構成例に, 検出器3cおよび傾斜を有する光学フィルタ7bを配する光学素子部が追加された構造となっている。つまり, 測定成分の追加に際しても, 光学素子部と検出器の追加を行うことで容易に光学系を形成することができ, 従来のような測定成分の追加に伴う光学的なロスを大幅に軽減することができる。特に追加する光学素子部の数が多くなっても, 本発明の技術的效果を有効に活かすことができ, 複数の測定対象に対し, さらに汎用性が高く, 高い測定精度を有する吸光式分析計を提供することが可能となる。

## 効果

以上のように, 2以上の光学フィルタを近接させ, かつ光路に対して所定の位置関係を保持することによって, 複数の測定対象に対し, 汎用性が高く, 高い測定精度を有する多成分の吸光式分析計を提供することができる。特に, 2以上の光学フィルタの波長特性を一部重複させることで, こうした技術的效果を一層高め, 優れた選択性の確保を可能とすることができる。また, 複数の光学フィルタの装着あるいは脱着可能な光学素子部を設けることによって, 上記の優れた特性を保持しつつ, さらに汎用性の向上を図ることができる。

### 【登録番号】

特許第4524087号

### 【発明者】

生田 卓司, 遠藤 正彦, 岩田 憲和, 秋山 重之, 井ノ上哲志

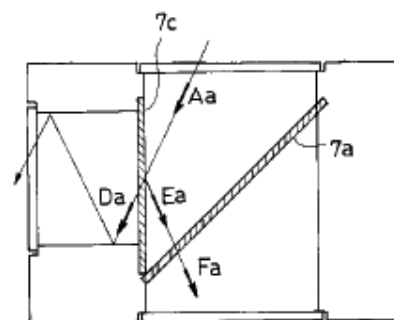


Figure 3 本発明に係る光学素子部の構成例の詳細

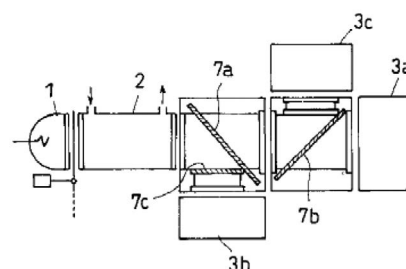


Figure 4 本発明に係る吸光式分析計の他の構成例

## 平成25年度近畿地方発明表彰 [京都発明協会会長賞] ガラス電極及びその応答ガラス

### 技術分野

本発明は、pHやpNa電極などのイオン濃度測定用電極に関し、特にその応答ガラスの組成に関するものである。

### 従来技術とその課題

従来のpH電極等に用いられるSiO<sub>2</sub>系、Li<sub>2</sub>O系の応答ガラスでは、の化学的耐久性(耐水性等)を向上させる目的で、3価金属であるLaを少量、ガラス組成に含有させていたが、La添加による耐水性向上は、あくまでLaを含まないガラスと比較してのことであって、実用的にいえば、化学的耐久性(特に耐酸性や耐水性)や応答性のさらに優れたものが要求されている。Laはイオン半径が大きいことから、比較的電子親和力が弱く、酸素との結合力が弱い。このことはアルカリ誤差を惹起しないという利点にはつながるが、そのために水和ゲル層の引き締め力が比較的弱く、化学的耐久性(特に耐酸性や耐水性)の改善の効果は低く、水和ゲル層が厚くなるため応答性向上に限界が生じる。

本発明はかかる要求に鑑みてなされたものであって、その主たる所期課題は、応答ガラスの耐久性や応答性を、他の諸性質を劣化させることなく、向上させることにある。

### 実施形態

この実施形態に係るpH応答性ガラス電極1は、例えばFigure 1に示すように、内部電極2、比較電極3を一体に有する複合型のものである。このFigure 1において符号4は支持ガラス管、符号5は応答ガラス、符号6は液絡部を示している。また、ガラス管内部には一定濃度の塩化カリウム溶液が充填してあり、内部電極2及び比較電極3がその塩化カリウム溶液に浸されるように構成している。しかしてこの応答ガラス5は、底面51から側面52にいたるまで、SiO<sub>2</sub>を主成分(60~70 mol%)、Liを副成分(25~32 mol%)とし、その他に種々の修飾金属(あわせて約10 mol%)を含むものである。そして、この実施形態では、修飾金属として少なくともLa<sub>2</sub>O<sub>3</sub>とTa<sub>2</sub>O<sub>5</sub>を含み、その他に前記La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>よりも少量のY<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を含むように構成している。また、別の発明では修飾金属として少なくともSiO<sub>2</sub>とLi<sub>2</sub>OとMe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(Meはランタノイド)とを含み、その他に前記

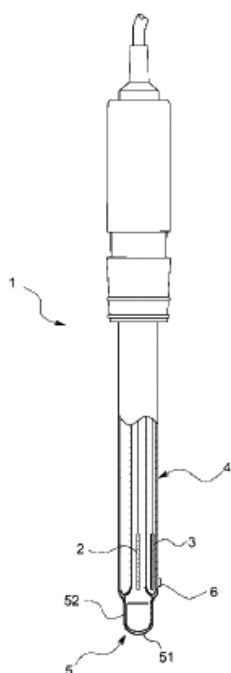


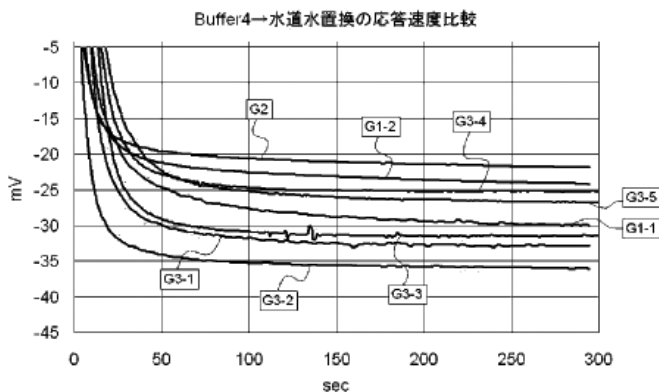
Figure 1 pH応答性ガラス電極の全体構造図



Me<sub>2</sub>O<sub>3</sub>よりも少量のSc<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を含むように構成することが記載されている(特許第4857281号)。

## 実施例

各応答ガラスにおける応答速度の比較データをFigure 2に示す。ここではBuffer4(pH4の標準液)から水道水に浸したときの各応答ガラスにおける出力電圧の時間変化を比較している。G2(本発明のY<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を含有させた応答ガラス)及びG3-1~G3-5(別発明のSc<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を含有させた応答ガラス)(G2及びG3-1~G3-5の組成はTable 1の通りである)では60~100secで出力電圧がほぼ静定しているのに対し、従来の応答ガラスG1-1, G1-2(従来品)(G1-1, G1-2の組成は以下のTable 2の通りである)では、静定までに200sec以上かかる。この応答性向上により、例えば測定対象液浸漬後、従来どおり一定時間後(例えば60秒後)に自動校正した場合に、そのときの出力電圧は、従来品に比べはるかに安定した状態にあるので、自動校正を再現性よくかつ正確に行うことができ、結果として測定時の再現性や感度が大きく向上することになる。



G1-1, 1-2: 従来品 G2: 本発明のY<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を含有させた応答ガラス  
G3-1~G3-5: Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を含有させた応答ガラス

Figure 2 Buffer4(pH4の標準液)から水道水に浸したときの各応答ガラスにおける出力電圧の時間変化を示すグラフ

Table 1

応答ガラス	組成 (mol%)								合計
	SiO <sub>2</sub>	Li <sub>2</sub> O	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Sc <sub>2</sub> O	BaO	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	
G2	64	26	1	—	3	2	2	2	100
G3-1	63.5	26	—	1.5	3	2	2	2	100
G3-2	64	26	—	1	3	2	2	2	100
G3-3	64.5	26	—	0.5	3	2	2	2	100
G3-4	64.8	26	—	0.2	3	2	2	2	100
G3-5	64.9	26	—	0.1	3	2	2	2	100

Table 2

応答ガラス	組成 (mol%)								合計
	SiO <sub>2</sub>	Li <sub>2</sub> O	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cs <sub>2</sub> O	BaO	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>		
G1-1	64	26	4	2	2	2	—	100	
G1-2	55	27.5	6	—	5.5	—	6	100	

## 効果

このような構成の本発明によれば、応答ガラスにおいて、その耐久性や応答性が向上し、感度や再現性を高めることができるうえ、他の諸性質を劣化させることがない。

## 関連特許文献

特許第4857281号(Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を含有させた応答ガラス)

### 【登録番号】

特許第5073089号

### 【発明者】

岩本 恵和, 西尾 友志

### 機能的デザインによる 研究開発環境の革新をめざして

HORIBAグループの商品「分析計測機器」は、ユーザの求める最先端の研究・開発を実現するための道具である。分析計測機器のデザインには、色や形の格好良さではなく、ユーザの抱える問題を一つ一つ解決していく機能性の追求が必要とされる。仕上がったデザインは、最終的に美しい形態を持つが、それは機能性の追及の結果である。機能性を追及したデザインこそが真にユーザの心に響くと確信する。以下、2013年のデザイン関連受賞例の紹介を通じ、デザインによる機能と性能の創出、およびその体現事例を報告する。

#### 「2013年度 グッドデザイン賞」

#### 有害元素蛍光X線分析装置 MESA-50

#### 「試料室内部にまで至る機能的デザイン」が評価

欧州有害元素規制(RoHS指令, ELV指令)に始まり、近年中国などでも同様の規制が公布。さらに簡単で迅速な有害元素分析の需要が増加。市場には要求部品の小型・省電力化に伴い簡易なハンドヘルド製品は存在するものの、長時間の測定や定量精度を要求される測定には不向きであることから、可搬卓上型の有害元素分析装置が求められている。「MESA-50」は、業界初のA4用紙サイズの省スペース性とスピーディで手軽な測定を実現した、世界最小最軽量(当社調べ)の有害元素蛍光X線分析装置である。またこの製品は、試料室内部に凹凸のないトレイ形状にすることで、清掃メンテナンスを簡単にし、試料室内をいつもきれいに保ちやすい構造を実現。大型据置機種以上の性能と使いやすさで、いつでもどこでも手軽に正確な元素分析が行える環境を提案している。

#### ユーザーにとって本当に価値のある機能的デザインの追及

MESA-50のデザインプロセスにおいて最も大切にすることは、デザイナーとエンジニアが密に連携し、ユーザにとって本当に価値のある機能的デザインを追求し続けることである。初段のペーパーモックアップから最終の試作機にいたるまでの開発のあらゆる段階で、「もし自分がユーザならどんなものがほしいか」と自らに問いかけ、検証を繰り返した。



Figure 1 有害元素蛍光X線分析装置 MESA-50

## 「外観からは見えなくても、ユーザーが測定のたびに触れる試料室内部にこそ機能的なデザインが必要」\*1

例えば、測定前にいつもきれいな状態を保つことを容易にする凹凸のないトレイ形状の試料室(Figure 2)は、デザイナーとエンジニアの強い信念(上記\*1)によって、耐久性や生産性といった高いハードルを越えて生み出されたユーザ目線のソリューションである。例えば耐久性の例としては、試料室に耐衝撃性と表面耐摩耗性の両方に優れた多層樹脂シート材料を採用(Figure 3)。この多層樹脂シートを一体成形することで、凹凸のない滑らかな試料室を実現している。このソリューションは、測定後に毎回清掃メンテナンスを必要としていたユーザにとっては、機能的な測定環境そのものの革新提案である。またこの装置は、適材適所へ素材、形状、加工を新規採用するなど、細部に至るまですべての構造を一から見直すことによって、設置面積A4用紙サイズ以下という世界最小最軽量(当社調べ)(Figure 4)とX線遮蔽に十分な安全性の両立を実現している。上記2例の機能的デザインは、「世界中のあらゆる地域で手軽な元素分析を可能にする」というソリューション実現の重要な要素となっている。

最後に製品ブランド構築の側面について述べる。機能デザインを追求する信念は、結果として製品特性を体言した特徴的外観を創出。MESA-50のデザインは、今後のHORIBA X線元素分析計製品群の重要なベンチマークとなるばかりでなく、見た目と考え方の両面からHORIBA X線分析計のブランド力向上に大きく貢献するものと確信する。

グッドデザイン賞の審査委員からは、「据置型中心だった従来製品と比べ、大幅な小型化・軽量化により可搬卓上型を実現した技術的努力をまず評価したい。一体感を感じる外観のフォルムはシンプルで無駄がなく、測定器に求められる精度感を備えている。また、多層樹脂シート材料により一体成型されたという試料室内部は、清潔感のあるメンテナンス性に優れたデザインとなっており、操作者の使い勝手に配慮できている。技術的なブレイクスルーと問題解決型の丁寧なデザインが高く評価された。」との評価コメントを得た。  
(グッドデザイン賞ウェブサイトより引用)

## ドライブレコーダー機能付き デジタルタコグラフ DRT-7000シリーズ

### 「プロの仕事のサポートにはプロのデザインが必要」と評価

HORIBAグループは1983年にトラックの運行管理装置のデジタル化を推進し、運行管理システムの提供を開始して以来、1999年にはデジタル式運行記録計(デジタルタコグラフ\*2)の認証を取得した。2005年には、映像記録型のドライブレコーダー\*3を開発し、交通安全と省エネ運転の推進に寄与してきた。DRT-7000シリーズの中でも、DRT-7100はデジタルタコグラフとドライブレコーダーの双方の機能をコンパクトなケーシングに一体化したハイブ



Figure 2 凹凸のないトレイ形状の試料室

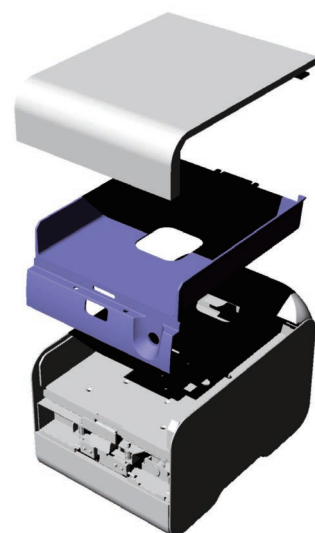


Figure 3 多層樹脂シート材料による一体成形の採用(\*青色部)



Figure 4 A4用紙サイズ以下の世界最小最軽量



Figure 5 ドライブレコーダー機能付き  
デジタルタコグラフ  
DRT-7000シリーズ

リッドタイプの車載機器であり、車両の運行管理と、映像や音声などの記録を、1台の車載装置で実現した。通信装置を内蔵しているため、走行中の車両の現在位置を定期的送信し、緊急時の車両位置把握も可能とした。また、運行が終了すると取得したデータを自動的にデータセンターに送信し、解析処理を行うシステムとなっている。これにより、記録したデータは運転者が操作などすることなく自動的に処理されることを可能とした。また、国土交通省の型式認定も取得している。

現代社会では宅配便ネットワークが代表する物流システムなくしては日常生活が成立しないと言っても過言ではない。多くの業務用車両が全国各地ありとあらゆる地域に到るまで一日中走り回っており、運輸事業者とドライバーが物流システムを支えている。DRT-7100は、運輸事業者において運行管理のためのデジタルタコグラフ機能と安全運転指導の要となるドライブレコーダー機能を一体搭載した機器であることから、ドライバーや歩行者も含めた人々の安全や環境配慮と、業務用車両の安全運行が永続的に両立するために、担う役割は極めて高い車載機器であり、非常に有用なツールとなると考えている。

ハードウェアとしてのデザインに当たっては、車載機器としてのわかりやすさはもちろん、誤操作の排除に留意した。SDカードスロットカバーの開錠施錠は運行開始/終了の切替スイッチの突起を利用することでイグニッションキーのポジションに依存せず、シンプルな物理的構造で実現した。(Figure 6) 操作ボタンはLED照光を組合せシンプルで操作しやすい形状とサイズにデザインした。また、クラウド型総合運行管理システム“HORIBA FLEET LINKAGE”と連携し、インターネット上のサーバーでデータを一括管理することにより新しい安全運転管理の提供を可能としている。

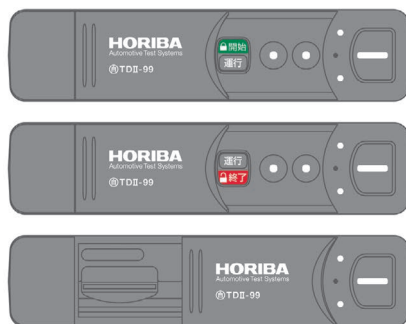


Figure 6 SDカードスロットカバー  
開閉イメージ

グッドデザイン賞の審査委員からは「通信機能を内蔵、自動的に運行データはデータセンターへ送信される。容易にどこでもデータを確認し安全運転への反映を可能とした。高度なデータ処理による安全機能を内蔵しているが故に、本体の意匠は質実剛健、無駄のない形が十分な信頼感を与えている。操作時の誤操作への配慮など、プロの仕事をサポートするにはプロのデザインが必要であることを実証している」との評価コメントを得た。

(グッドデザイン賞ウェブサイトより抜粋引用)

- \*2: デジタルタコグラフ車両の運行に関わる速度・時間等を記録する装置
- \*3: ドライブレコーダー急ブレーキ等の衝撃を受けると、その前後の映像とともに加速度・ブレーキ・ウインカー等の走行データを記録する装置



## 「第43回機械工業デザイン賞 審査委員会特別賞」

### エンジン排ガス測定装置「MEXA-ONE」 統合計測プラットフォーム 「HORIBA ONE PLATFORM」

#### 「ハードとソフトの融合によるソリューション」が評価

HORIBAグループのエンジン排ガス測定機器は自動車メーカーの開発現場などで使用される世界シェア80%（当社調べ）を占めるデファクトスタンダードである。近年の排ガス計測は、ハイブリッド自動車などの複雑で精密な車両開発に対応した高精度な低濃度測定実現のため、計測システムの高性能化と多様化の要求が増加。ユーザは多様化した計測に対する装置の適切な操作や的確なメンテナンスが必要となった。エンジン排ガス測定装置「MEXA-ONE」シリーズ、および統合計測プラットフォーム「HORIBA ONE PLATFORM」は、「高性能な装置（ハード）を常によい状態に保つ。」「必要な装置が必要な場所で必要なときに柔軟に組み合わせて使用する。」など、ハードとソフトを融合させ、システム全体の機能と装置を統合したトータルソリューションを実現した。今後、人口増加や新興国の産業発展などにより、環境問題に対するニーズは常に変化し続けていくと予想される。その解決ため計測器自身の性能向上が求められることは言うまでもない。さらに「柔軟性」や「使いやすさ」といった使う「人」を中心に考え製品づくりが豊かな未来を創造するカギになると私たちは確信する。

機械工業デザイン賞の審査委員からは、「ハードとしての分析機器が有する機能・性能を遺憾なく発揮するためには、各デバイスを統合してあたかも1台の測定装置のようにコントロールするソフトウェアが不可欠となる。本統合システムにおいては、GUI(Graphical User Interface)の好事例ともいえる統合計測プラットフォームが新規開発されている。～中略～

測定オペレーションを徹底的に分析して開発されたソフトウェアは直感的な操作を実現しており、デバイスとシステム全体を扱う画面を明確に区別した画面構成は、開発コンセプトを満足する完成度の高い仕上がりをみせている。～中略～

種々の計測・規制に対応可能な汎用性と拡張性の高い計測システム実現を目指した成果は、ハードとソフトの融合として結実している。

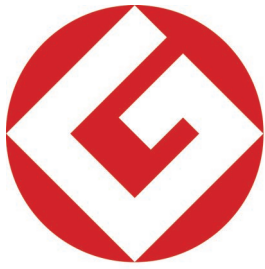
(第43回機械工業デザイン賞審査講評より引用)



Figure 7 エンジン排ガス測定装置 MEXA-ONE



Figure 8 統合計測プラットフォーム  
HORIBA ONE PLATFORM



**GOOD  
DESIGN**

Figure 9 グッドデザイン賞シンボルマーク



Figure 10 機械工業会デザイン賞シンボルマーク

### 【グッドデザイン賞について】

1957年に創設されたグッドデザイン商品選定制度を発端とする、日本で唯一の総合的なデザイン評価・推奨の運動。これまで55年以上にわたって、デザインを通じて日本の産業や生活文化を向上させる運動として展開されており、のべ受賞件数は38,000件以上にのぼり、今日では国内外の多くの企業や団体が参加。グッドデザイン賞受賞のシンボルである「Gマーク」は、すぐれたデザインを示すシンボルマークとして広く親しまれている(Figure 9)。

### 【機械工業デザイン賞について】

日刊工業新聞社が経済産業省の後援、日本商工会議所、各工業団体の協賛を得て、わが国工業製品のデザインの振興・発展を目的に1970年に創設され、2013年で43回目を迎えた。これまで受賞した多くの製品は、それぞれの時代のデザインの方向性を示唆する先端的製品として高く評価されている(Figure 10)。



#### 米澤 倭介

Hyosuke YONEZAWA

株式会社 堀場製作所  
管理本部 コーポレートコミュニケーション室  
プロダクトデザインチーム  
マネジャー



#### 熊内 智哉

Tomoya KUMAUCHI

株式会社 堀場製作所  
管理本部 コーポレートコミュニケーション室  
プロダクトデザインチーム



#### 島 充子

Mitsuko SHIMA

株式会社 堀場製作所  
管理本部 コーポレートコミュニケーション室  
プロダクトデザインチーム

# HORIBA World-Wide Network

## JAPAN

### HORIBA, Ltd.

2, Miyano Higashi-cho, Kisshoin, Minami-ku,  
Kyoto 601-8510  
Phone : (81)75-313-8121 Fax : (81)75-321-8312

#### Biwako Factory

1-15-1, Noka, Otsu, Shiga 520-0102  
Phone : (81) 77-526-7661 Fax : (81) 77-578-7410

### HORIBA Advanced Techno Co., Ltd.

31, Miyanoishi-cho Kisshoin, Minami-ku,  
Kyoto 601-8306

Phone : (81)75-321-7184 Fax : (81)75-321-7291

### HORIBA STEC, Co., Ltd.

11-5, Kamitoba Hokodate-cho, Minami-ku,  
Kyoto 601-8116  
Phone : (81)75-693-2300 Fax : (81)75-693-2350

#### Aso Factory

Torikokogyodanchi, 358-11, Koumaibata, Toriko,  
Nishihara-mura, Aso-gun, Kumamoto, 861-2401  
Phone : (81)96-279-2921 Fax : (81)96-279-3364

#### Kyoto Fukuchiyama Technology Center

11-1 Ecotopia Koaza Miwa, Miwa-cho, Fukuchiyama  
620-1445  
Phone : (81) 773-59-2070 Fax : (81) 773-59-2074

### HORIBA TECHNO SERVICE Co., Ltd.

2, Miyano Higashi-cho, Kisshoin, Minami-ku,  
Kyoto 601-8305  
Phone : (81)75-325-5291 Fax : (81)75-315-9972

## BRAZIL

### HORIBA Instruments Brasil, Ltda.

Rua: Presbitero Plinio Alves de Souza, 645,  
Loteamento Polo Multivias Barro Medeiros,  
Jundiaí, Sao Paulo 13212-181

Phone : (55)11-55-45-1500 Fax : (55)11-55-45-1570

### TCA/HORIBA Sistema de Testes Automotivos Ltda.

Rua Goiás 191 Vila Oriental, Diadema, Sao Paulo,  
09941-690

Phone : (55)11-2923-5400 Fax : (55)11-2923-5490

## CANADA

### HORIBA Canada, Inc.

Unit102, 5555 North Service Road Burlington,  
Ontario, L7L 5H7

Phone : (1)905-335-0234 Fax : (1)905-331-2362

## U.S.A.

### HORIBA International Corporated

9755 Research Drive, Irvine, CA 92618  
Phone : (1)949-250-4811 Fax : (1)949-250-0924

### HORIBA Instruments Incorporation

9755 Research Drive, Irvine, CA 92618  
Phone : (1)949-250-4811 Fax : (1)949-250-0924

#### Albany Office

Suite (04), 58 Clifton Country Road, Clifton Park, NY  
12065

Phone : (1)-518-331-1371

#### Alvin TX Office

5318 West Farm to Market 517 Road, Alvin, TX 77511  
Phone : (1)-281-482-4334 Fax : (1)-281-641-0303

#### Austin Office

9701 Dessau Road, Suite 605, Austin, TX 78754  
Phone : (1)512-836-9560 Fax : (1)512-836-8054

#### Chicago Office

1725 Roosevelt Road #115, West Chicago, IL  
90185

Phone : (1)630-562-2298 Fax : (1)630-562-2324

#### Edison Office

3880 Park Avenue, Edison, NJ 08820  
Phone : (1)732-494-8660 Fax : (1)732-549-5125

#### Houston Office

240 Springhill Drive, Suite 410, Spring, TX 77386  
Phone : (1)281-367-7422 Fax : (1)281-367-7423

#### New Hampshire Office

315 Derry Road, Suite 13 Hudson, NH 03051  
Phone : (1)603-886-4167 Fax : (1)603-886-4267

#### Portland Office

10110 South West Nimbus Avenue, Suite B-11,  
Portland, OR 97223

Phone : (1)503-624-9767 Fax : (1)503-968-3236

#### Reno Office

605 Spice Island Drive, #5, Sparks, NV 89431  
Phone : (1)775-358-2332 Fax : (1)775-358-0434

#### Santa Clara Office

3265 Scott Boulevard, Santa Clara, CA 95054  
Phone : (1)408-730-4772 Fax : (1)408-730-8975

#### Ann Arbor Facility

5900 Hines Drive, Ann Arbor, MI 48108  
Phone : (1)734-213-6555 Fax : (1)734-213-6525

#### Troy Facility

2890 John R Road, Troy, MI 48083  
Phone : (1)248-689-9000 Fax : (1)248-689-8578

## AUSTRIA

### HORIBA (Austria) GmbH

Kaplan Strasse 5, A-3430 Tulln  
Phone : (43)2272-65225 Fax : (43)2272-65230

## BELGIUM

### HORIBA ABX SAS

#### Belgium Office

Luchthavenlei 7A, 2100 Deurne  
Phone : (32)3-281-49-08 Fax : (32)3-281-65-04

## CZECH REPUBLIC

### HORIBA Czech

#### Prague Office

Prumyslova 7, 10200 Praha 10  
Phone : (420)246-039-265

#### Olomouc Factory

Zeleznici 512/7, 772 00 Olomouc  
Phone : (420)588-118-365 Fax : (420)585-310-725

## FRANCE

### HORIBA ABX SAS

Parc Euromédecine, rue du Caduce, BP7290, 34184  
Montpellier Cedex 4

Phone : 33(0)4-67-14-15-16 Fax : 33(0)4-67-14-15-17

### HORIBA France Sarl

12, Avenue des Tropiques Hightec Sud, 91955

Les Ulis

Phone : (33)1-69-29-96-23 Fax : (33)1-69-29-95-77

#### Grenoble Office

BUROCLUB 2 Av de Vignate, Gieres 38610  
Phone : (33)4-76-63-49-15 Fax : (33)4-76-54-03-99

### HORIBA Jobin Yvon SAS

16-18 rue du Canal, 91165 Longjumeau Cedex  
Phone : (33)1-64-54-13-00 Fax : (33)1-69-09-07-21

#### Villeneuve d'Ascq Office

231 rue de Lille, 59650 Villeneuve d'Ascq  
Phone : (33)3-20-59-18-00 Fax : (33)3-20-59-18-08

#### HORIBA Europe Research Center

Avenue de la Vauve - Passage Jobin Yvon CS  
45002 - 91120 Palaiseau

Phone : (33)1-69-74-72-00 Fax : (33)1-69-31-32-20

## GERMANY

### HORIBA Europe Automation Division GmbH

Zabergaeu Strasse 3, 73765 Neuhausen  
Phone : (49)7158-933-300 Fax : (49)7158-933-399

### HORIBA Europe GmbH

Hans Mess Strasse 6, 61440 Oberursel  
Phone : (49)6172-1396-0 Fax : (49)6172-1373-85

#### Berlin Office

Fichte Strasse 32, 10967 Berlin  
Phone : (49)30-61625581 Fax : (49)30-61625584

#### Darmstadt Office

Landwehr Strasse 55, 64293, Darmstadt  
Phone : (49)6151-5000-0 Fax : (49)6151-5000-3865

#### Dresden Office

Zur Wetterwarte 10, Haus 109, 01109 Dresden  
Phone : (49)351-8896807 Fax : (49)351-8896808

#### Hanover Office

Bayern Strasse 29, 30855 Langenhagen  
Phone : (49)511-7410-95 Fax : (49)511-7410-53

#### Korschenbroich Office

Friedrich Ebert Strasse 9-11, 41352 Korschenbroich  
Phone : (49)2161-47537-0

#### Leichlingen Office

Julius Kronenberg Strasse 9, 42799 Leichlingen  
Phone : (49)2175-8978-0 Fax : (49)2175-897850

#### Munich Office

Schleißheimer strasse 253, 80809 Munich  
Phone : (49)89-2444-779-0 Fax : (49)89-2444-779-10

#### Potsdam Office

Dennis Gabor Strasse 2, 14469 Potsdam  
Phone : (49)3316-4900-70 Fax : (49)3316-4900-74

#### Stuttgart Office (Boeblingen)

Haus Klemm Strasse 56, 71034 Boeblingen  
Phone : (49)7031-677-9440 Fax : (49)7031-677-9450

#### Stuttgart Office (Neuhausen)

Zabergaeu Strasse 2, 73765 Neuhausen  
Phone : (49)7158-933-800 Fax : (49)7158-933-899

#### Wolfsburg Office

John - F - Kennedy - Allee 64 38444 Wolfsburg  
Phone : (49)5361-27648-11 Fax : (49)5361-27648-24

### HORIBA Jobin Yvon GmbH

Haupt Strasse 1\* 82008 Unterhaching  
Phone : (49)89-46-23-17-0 Fax : (49)89-46-23-17-99

#### Bensheim Office

Neuhof strasse 9, 64625, Bensheim  
Phone : (49)89-62-51-84-750 Fax : (49)89-62-51-84-7520

## ITALY

### HORIBA Jobin Yvon Srl

Via Luca Gaurico 209, 00143 Roma  
Phone : (39)6-51-59-22-1 Fax : (39)6-51-59-43-34

#### Milano Office

Via Cesare Pavese, 19 20090 Opera Milano  
Phone : (39)2-57-60-30-50 Fax : (39)2-57-60-08-76

#### Torino Office

Strada, Torino 43/45, 10043 Orbassano, Torino  
Phone : (39)11-904-0601 Fax : (39)11-900-0448

### HORIBA ABX SAS

#### Italy Office

Via Le Luca Gaurico 209/211, 00143 Roma  
Phone : (39)6-51-59-22-1 Fax : (39)6-51-96-43-34

## NETHERLANDS

### HORIBA Europe GmbH

#### Netherlands Office

Science Park Eindhoven, 5080 (Industrial park  
"Ekkersrij") 5692 EA Son  
Phone : (31)40-2900240 Fax : (31)40-2900624

## POLAND

### HORIBA ABX Sp. z o. o.

Wal Miedzyszynski 598 - 03 994 Warszawa  
Phone : (48)22-673-2022 Fax : (48)22-673-2026

## PORTUGAL

### HORIBA ABX SAS

#### Portugal Office

Alfrapark Estrada de Alfragide 67, Edificio  
F - Piso 0 Sul, 2610-008 Amadora  
Phone : (35)12-14-72-17-70 Fax : (35)12-14-72-17-89

## ROMANIA

### HORIBA (Austria) GmbH

#### Romania Office

Pitesti, B-dul Republicii Nr. 38, Bloc 2 IRTA, Scara A,  
Etaj 3, Ap.11 Judetul Arges 110011 Pitesti  
Phone : (40)348-807117 Fax : (40)348-807118

## RUSSIA

### HORIBA OOO

Altufievskoe shosse, 13, building 5, 127106, Moscow  
Phone : (7)495-221-87-71 Fax : (7)495-221-87-68

## SPAIN

### HORIBA ABX SAS

#### Spain Office

Avenida Caidos de la Division Azul 16, 28016 Madrid  
Phone : (34)91-353-30-10 Fax : (34)91-353-30-11

## SWEDEN

### HORIBA Europe GmbH

#### Sweden Office (Gotebnburg)

Kaerlyckegetan 21, 418 78 Gothenburg  
Phone : (46)31-644268 Fax : (46)31-644269

#### Sweden Office (Sodertalje)

Sydhamnsvagen 55-57, 151 38 Sodertalje  
Phone : (46)8-550-80701 Fax : (46)8-550-80567

## TURKEY

### HORIBA Europe GmbH

#### Istanbul Office

Kayisdagi cd No. 3 Flora Residence Daire 2504  
Kucukbakkalkoy-Atasehir  
Phone : (90)216-572-1166 Fax : (90)216-572-1167

## U.K.

### HORIBA UK Ltd.

2 Dalston Gardens, Stanmore, Middx HA7 1BQ  
Phone : (44)208-204-8142 Fax : (44)208-204-6142

#### Northampton Office

Kyoto Close, Moulton Park, Northampton, NN3 6FL  
Phone : (44)1604-542-500 Fax : (44)1604-542-699

### HORIBA Jobin Yvon IBH Ltd.

Skypark 5, level 1, The Clydeaway Centre, 45  
Finnieston Street, Glasgow G3 8JU

Phone : (44)141-229-67-89 Fax : (44)141-229-67-90

### HORIBA Test Automation Ltd.

Evesham House, Whittington Hall, Whittington Road  
Worcester, WR5 2ZX

Phone : (44)1905-359359 Fax : (44)1905-359332

# HORIBA World-Wide Network

## CHINA

**Beijing HORIBA METRON Instruments Co., Ltd.**  
Chaoyang, Bei Yuan Road 40, Beijing  
Phone : (86)10-8492-9402 Fax : (86)10-8492-7216

**HORIBA INSTRUMENTS (SHANGHAI) CO., Ltd.**  
No.200, Taitao Road, Anting Town, Jiading, Shanghai  
201814

Phone : (86)21-6952-2835 Fax : (86)21-6952-2823

### **HORIBA (China) Trading Co., Ltd.**

Unit D, 1 Floor, Building A, Synnex International Park,  
1068 West Tianshan Road, Shanghai, 200335  
Phone : (86)21-6289-6060 Fax : (86)21-6289-5553

#### **Beijing Office**

Room 1801, SK Tower, Tower 1, No. 6 Jia, Jianguomenwai  
Avenue, Chaoyang, Beijing 100022

Phone : (86)10-8567-9966 Fax : (86)10-8567-9066

#### **Guangzhou Office**

Room 1611/1612, Goldlion Digital Network Center,  
138 Tiyu Road East, Guangzhou 510620

Phone : (86)20-3878-1883 Fax : (86)20-3878-1810

#### **Shanghai Service Center**

Room 303, No.84, Lane887, Zu-Chong-Zhi Road,  
Zhangjiang Hi-tech Park, Shanghai, 201203

Phone : (86)21-5131-7150 Fax : (86)21-5131-7660

#### **Shanghai Technical Center**

No.200, Taitao Road, Anting Town, Jiading, Shanghai,  
201814

Phone : (86)-21-6289-6060 Fax : (86)-21-6289-5553

## INDIA

### **HORIBA India Pte. Ltd.**

246, Okhla Industrial Estate, Phase 3, New Delhi,  
110020

Phone : (91)11-4669-5001/(91)11-4646-5000

Fax : (91)11-4669-5010/(91)11-4646-5020

#### **Bangalore Office**

Kamadhenu, No.17/1 - 32, Bannerghatta Road,  
Audugodi, Bangalore - 560030

Phone : (91)80- 22210071

#### **Chennai office**

Municipal Door No. 1 Morrison Fifth street, Alandur,  
Chennai, 600016

#### **Pune Office**

502, 5 Floor, Purushottam Plaza, Baner Road,  
Baner, Pune - 411045

Phone : (91)20-40766000 Fax : (91)20-40766010

#### **Haridwar Factory**

Plot No. 26, sector-7, IIE, Sidcul, Uttarakhand  
249403

Phone : (91)-1334-239139

## INDONESIA

### **PT HORIBA Indonesia**

JL. Jalur Sutura Blok 20A, No. 16-17, Kel. Kunciran,  
Kecamatan Pinang Tangerang 15144

Phone : (62)21-3044-8525 Fax : (62)21-3044-8521

## KOREA

### **HORIBA Automotive Test Systems Ltd.**

Room #906, World Meridian Venture Centre 1, 60-24  
Gasam-Dong, Geumcheon-Gu, Seoul, 153-781

Phone : (82)2-562-7706 Fax : (82)2-562-7630

### **HORIBA KOREA Ltd.**

202-501, Bucheon Techno Park, 192,Yakdae-Dong,  
Wonmi-Gu, Bucheon Gyunggi-Do, 420-831

Phone : (82)32-621-0100 Fax : (82)32-621-0105

#### **Seoul Office**

10, Dogok-Ro 6-Gil, Gangnam-Gu, Seoul, 135-860  
Phone : (82)2-753-7911 Fax : (82)2-756-4972

#### **Suwon Office**

D2f Hae Sung Building 307-9 Yuljun-Dong  
Changan-Gu, Suwon Gyeonggi-Do, 440-825

Phone : (82)31-296-7911 Fax : (82)31-296-7913

#### **Ulsan Office**

601, Kaya Building, 193-5, Sinjeong 3 Dong, Nam-Gu,  
Ulsan

Phone : (82)52-275-0122 Fax : (82)52-276-0136

### **HORIBA STEC KOREA, Ltd.**

110, Suntech-City, 474, Dunchon-daero,  
Jungwon-Gu, Seongnam, Gyeonggi-Do

Phone : (82)31-777-2277 Fax : (82)31-777-2288

## SINGAPORE

### **HORIBA Instruments (Singapore) Pte. Ltd.**

10, Ubi Crescent, No.05-12 Lobby B Ubi Techpark,  
408564

Phone : (65)6-745-8300 Fax : (65)6-745-8155

## TAIWAN

### **HORIBA Taiwan, Inc.**

3 Floor, No.18, Ln. 676, Zhonghua Road, Zhubei,  
Hsinchu 302

Phone : (886)3-656-1160 Fax : (886)3-656-8231

#### **Tainan Office**

1 Floor, No.117, Chenggong Road, Shanhua,  
Township Tainan 741

Phone : (886)6-583-4592 Fax : (886)6-583-2409

## THAILAND

### **HORIBA (Thailand) Ltd.**

393, 395, 397, 399, 401, 403 Latyah Road,  
Somdetchaopraya, Klongsan, Bangkok 10600

Phone : (66)2-861-59-95 Fax : (66)2-861-52-00

## VIETNAM

### **HORIBA Instruments (Singapore) Pte Ltd.**

#### **Hanoi Office**

Unit 10, 4 Floor, CMC tower, Duy Tan Street, Dich  
Vong Hau Ward, Cau Giay, Hanoi

Phone : (84)4-3795-8552 Fax : (84)4-3795-8553



---

## Readout HORIBA Technical Reports MAY 2014 No.42

発行日 2014年4月25日  
発行人 足立 正之  
発行元 株式会社 堀場製作所  
〒601-8510 京都市南区吉祥院宮の東町2番地  
<http://www.horiba.com/jp/publications/readout/>

<Readout編集委員会>  
Readout編集委員長 足立 正之  
Readout副編集委員長 松田 耕一郎  
編集委員 中村 博司 西川 雅治 井上 香  
編集局 関 秀世

お問い合わせ先

株式会社 堀場製作所 開発本部 開発企画センター

Tel:075-313-8121 Fax:075-321-5648

e-mail:readout@horiba.co.jp

DTP・製版・印刷・製本 株式会社 写真化学

# HORIBA

Explore the future



この印刷物は、EPAのシルバー基準に適合し、地球環境負荷に配慮した印刷方法にて作成されています  
EPA：環境印刷技術協議会  
<http://www.e3pa.com>