

# Feature Article

アプリケーション

## 間欠サンプリング式CVSを用いた PHEVの高精度エミッション・燃費計測法

Emissions and Fuel Economy Measurement System Using Intermittent Sampling  
CVS for PHEV

### 大槻 喜則

Yoshinori OTSUKI

近年、化石燃料の消費量の削減が求められる中で、プラグインハイブリッド電気自動車(PHEV)が注目されている。一方で、エミッションと燃費計測の面では、PHEVのエンジンが走行中に間欠動作するため、定容量試料採取装置(CVS)の希釈率(DF)が上昇してサンプルガスの濃度が低下する。そのような希釈条件は、DFの計算法が希釈空気中の濃度を無視していることによる誤差と、ガスの濃度分析の誤差を引き起こす。この課題を解決するために、エンジンの動作と同期する間欠サンプリング式CVSをPHEVのエミッションと燃費計測に適用した。その結果、サンプルガスの濃度を高くして、エミッションと燃費測定精度を向上できることを示した。

Recently, plug-in hybrid electric vehicles (PHEVs) attract attention while the reduction of the consumption of the fossil fuel is demanded. On the other hand, high dilution factors (DFs) and low concentrations of gaseous components in the constant volume sampling (CVS) are imposed by the intermittent operation of the engine in the PHEV. Such a dilution condition causes a numerical error of DF by the assumption of negligible ambient components and an analysis error of gaseous components. New emission measurement method which provides intermittent sampling synchronized with engine operation mode has been investigated in this study. The results showed the ability of proposed system to improve emissions and fuel economy measurement accuracy by increasing gaseous concentrations in the CVS system.

### はじめに

近年、エネルギー問題への関心の高まりや地球温暖化の懸念を背景として、自動車に対しても化石燃料の消費量の削減が求められている。プラグインハイブリッド電気自動車(PHEV)は、このような視点から注目されている次世代自動車のひとつである。PHEVでは、内燃機関(いわゆるエンジン)とともに、外部充電の可能なバッテリーと電気モータが搭載され、エンジン・モータの両方を動力源として使用できる。両者の使い分けや減速時のエネルギー回収による高効率化に加え、外部から供給した電気エネルギーを直接利用できることで、従来車よりも大幅に燃費を改善できるのがPHEVの大きな特徴である。

このようなPHEVのエネルギー効率を評価するには、従来車と同じ手法での燃費計測が欠かせない。自動車の公称燃費(カタログ燃費)は、大まかに言うと定められた運転パターン(試験サイクル)にて排出された二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)、一酸化炭素(CO)および全炭化水素(THC)の量を計測して求める。この際に用いられるのが定容量試料採取装置(CVS)と呼ばれる装置である。PHEVの燃費計測にもCVSが用いられる<sup>[1]</sup>。ただし、エンジン停止時間が長いというPHEV独特の事情から、条件によっては、従来車のような計測精度が確保できないことも懸念されている。本稿では、CVSによるPHEVの計測精度の確保を目的として考案した、間欠サンプリング手法について紹介する。

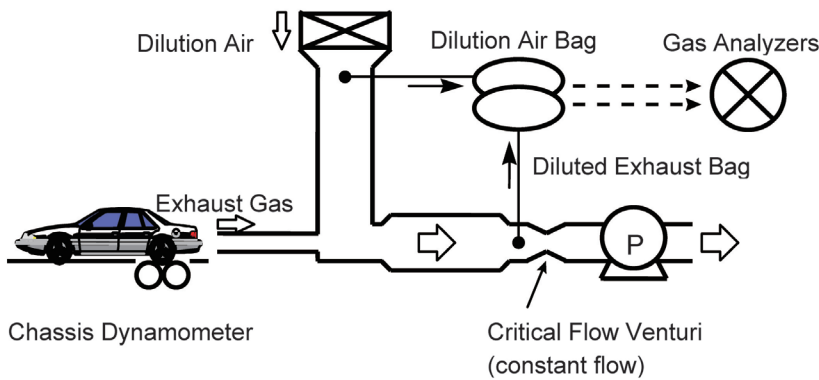


Figure 1 Configuration of the conventional CVS system

## CVS法の概要

### CVS法による燃費計測法

CVSは、車両・エンジンからの排ガス成分の排出質量の計測、あるいは燃費計測に広く使用されている。Figure 1に、従来のCVSシステムの構成を示す。CVSには、車両のテールパイプと直結する排ガス導入口と、希釈用の大気導入口がある。それらの後段には、大流量のプロワと流量制御用の臨界流量ベンチュリ(CFV)があり、一定流量でガスを吸引している。これにより、排ガス全量を採用した上で大気で希釈し、最終的な希釈排ガスの流量を一定にしている。車両の排ガス試験中、希釈用空気の一部と希釈排ガスの一部はそれぞれバッグにためられる。各ガス成分の排出質量は、試験後に分析するバッグ内のガス濃度と希釈排ガスの積算流量から求める。Equation (1)に、CO<sub>2</sub>の場合の計算式を示す。 $m_{CO_2}$ はCO<sub>2</sub>排出質量、 $V_{mix}$ は排ガス試験における希釈排ガスの総体積、 $\rho_{CO_2}$ はCO<sub>2</sub>の密度、 $c_{s,CO_2}$ は希釈排ガスのバッグ内のCO<sub>2</sub>濃度、 $c_{a,CO_2}$ は希釈空気のバッグ内のCO<sub>2</sub>濃度、 $DF$ は排ガスの平均希釈率である。

$$m_{CO_2} = V_{mix} \times \rho_{CO_2} \times \left[ c_{s,CO_2} - c_{a,CO_2} \times \left( 1 - \frac{1}{DF} \right) \right] \quad (1)$$

ここで、 $DF$ は、希釈排ガスの体積と希釈前の生排ガスの体積の比率にあたる。ただし、実際には、ガス流量からではなく、希釈排ガスバッグ内のCO<sub>2</sub>、CO、THCの濃度(vol%)から、排ガスがどれだけ希釈されたかを推定する。各成分濃度をそれぞれ $c_{s,CO_2}$ 、 $c_{s,CO}$ 、 $c_{s,THC}$ で表すと、ガソリン車の場合の $DF$ はEquation (2)で表される。

$$DF = \frac{13.4}{c_{s,CO_2} + c_{s,CO} + c_{s,THC}} \quad (2)$$

ここで、「13.4」は、ガソリンエンジンがストイキ条件(空気と燃料が互いに過不足なく完全燃焼する条件)で運転されると仮定した場合の理論CO<sub>2</sub>排出濃度である。また、Equation (2)では希釈排ガスバッグに含まれているはずの大気由来のCO<sub>2</sub>濃度は考慮されていない。ただし、従来車の燃費計測の場合、希釈排ガスと希釈空気のCO<sub>2</sub>濃度の差が充分大きく、 $DF$ 計算値に含まれる不確かさがCO<sub>2</sub>排出質量の計算結果に与える影響は事実上無視できる。

燃費の単位は各国で異なるが、燃焼生成物として排出されたCO<sub>2</sub>、CO、THCに含まれる炭素の総質量から推定する点は共通である。このような方法はカーボンバランス法と呼ばれる。たとえば、燃費をg/kmで表す日本の場合、ガソリン車の燃費はEquation (3) (4)で算出される<sup>[2]</sup>。ここで、 $FC$ は燃費、 $e_{CO_2}$ 、 $e_{CO}$ 、 $e_{THC}$ は各成分のkmあたりの排出質量、 $d$ は試験中の走行距離、 $\rho_f$ はガソリンの密度である。

$$e_{CO_2} = \frac{m_{CO_2}}{d}, e_{CO} = \frac{m_{CO}}{d}, e_{THC} = \frac{m_{THC}}{d} \quad (3)$$

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

### PHEV計測時の課題

Figure 2に、PHEVを満充電の状態から連続走行した場合の、バッテリー充電量(SOC)と排ガス流量のイメージを示す。試験サイクル(走行モード)は米国で用いられるUDDSである。Figure 2に示すように、PHEVのSOCは、走行開始直後は一方的に減少し、ある時点からはほぼ一定レベルで安定すると考えられる。SOCが減少している区間は、PHEVが主に電気エネルギーで走行している状態で、エンジンは長時間停止したままとなっている。この間、排ガス量は非常に少なく、CVSは希釈空気のみを採取し続ける形になる。そのため、バッグ内の排ガスが必要以上に希釈されてしまい、ガス濃度分析上不利になるほか、 $DF$ に含まれる不確かさの影響を受けやすくなる懸念がある<sup>[4,5]</sup>。また、別の問題として、吸気バルブ・排気バルブが同時に開いた状態のままエンジンが停止していた場合、CVSが生み出すわずかな負圧によってエンジン

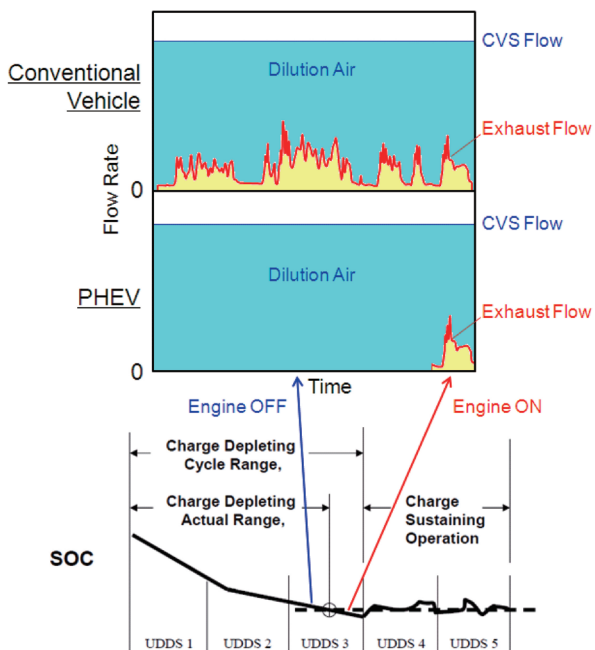


Figure 2 Comparison of exhaust flow between conventional and plug-in hybrid electric vehicles<sup>[3]</sup>

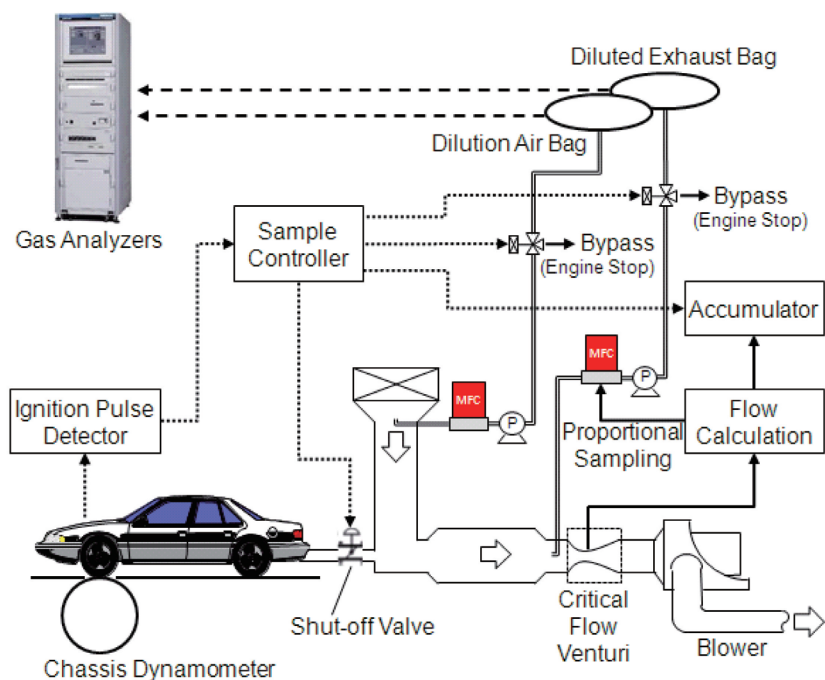


Figure 3 Configuration of the intermittent sampling system

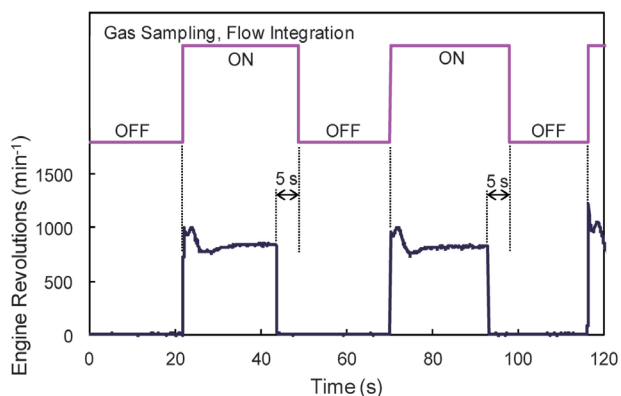


Figure 4 Timing chart for bag sampling

から触媒に向けて空気が流れ、触媒が冷えてエミッションの排出特性に影響を与えてしまう可能性もある。

## 間欠サンプリングCVS

今回、CVSによるPHEV計測の精度向上策として検討したのが、エンジンの動作と同期させた間欠サンプリング手法の適用である。この手法では、エンジンの動作を点火パルスによって検出し、エンジン動作中のみ、排ガスのCVSへの取り込みとバッグ採取を行う。以下、その構成を説明する。

### システム全体の構成

Figure 3に、間欠サンプリングCVSのシステム構成を示す。従来のCVSシステムでは、バッグへの採取流量の制御にベンチュリを用いることが多いが、本システムではマスフローコントローラ(MFC)を採用した。試験走行中に

エンジンが動作している時間は走行負荷およびSOCによって異なるため、間欠サンプリング手法では、バッグにたまるガスの体積が試験条件に大きく左右される。MFCでは総サンプル時間に合わせて柔軟にサンプル流量を設定できるため、ガス濃度分析に十分な体積のガスをバッグに採取できる。なお、エンジン停止中もMFCのガス流は止めず、バッグ採取時と同じ条件のままでバイパス側に排気する。車両のテールパイプとCVSサンプル採取口の間には、高速のシャットオフバルブを設け、エンジンが停止している間はCVSとの接続を遮断する。これにより、エンジン停止時に後処理装置にガスが流れることがなくなり、冷却によるエミッションへの影響を抑制できる。

試験車両には、エンジンの動作の検出用として点火パルスセンサを取り付けた。センサの信号は、バッグへのガスの採取や、希釈排ガス流量の積算、シャットオフバルブの開閉など、CVSの動作のトリガとして使用される。なお、バッグへのガス採取切り替えの際には、CVSに取り込まれた排ガスがバッグに到達するまでの遅れ時間を考慮する必要がある。Figure 4に、バッグサンプリングの切り替えタイミングの設定を示す。デッドボリュームを考慮して

サンプリング停止時に5秒の遅延時間を設定し、排ガスを残らず採取できるようにした。

### シャットオフバルブの検証

Table 1に、使用したシャットオフバルブの仕様を示す。シャットオフバルブは、エンジン始動時の負荷とならないよう、エンジンの始動と同時に速やかに開かれなければならない。エンジンに過大な背圧がかかっていないことを検証するために、エンジンの点火パルスで検出したエンジンの始動タイミングでシャットオフバルブを開けたときの、テールパイプ部の圧力を計測した。Figure 5に、実際に車両を走行させたときの、点火パルスで検出したエンジンの回転数と、テールパイプ部圧力を計測した結果を示す。(a)はシャットオフバルブを取り付けていない状態で、エンジン停止中にテールパイプ部圧力がわずかに負圧になっている。一方、(b)のシャットオフバルブを取り付けた状態では、エンジン停止中にバルブを閉じることで、テールパイプ部圧力を大気圧程度に維持できている。排ガス試験中の静圧も、米国の法規(CFR)で要求される $\pm 1.2\text{kPa}$ 以内<sup>[6]</sup>を満足している。さらに、エンジンの始動のテールパイプ部圧力の変動幅にもバルブ有無による影響はほとんどみられず、バルブの応答も充分速いことが確認できる。

### 実車(PHEV)試験による評価

間欠サンプリング手法の効果を確認するため、シャシダイナモメータ上でPHEVのエミッションおよび燃費を計測して、従来の連続サンプリング手法と比較した。Figure 6に、試験に用いた装置の構成を示す。間欠サンプリングCVSに、MFCで制御する間欠バッグ採取ラインと、ベンチュリで制御する連続バッグ採取ラインを設けた。

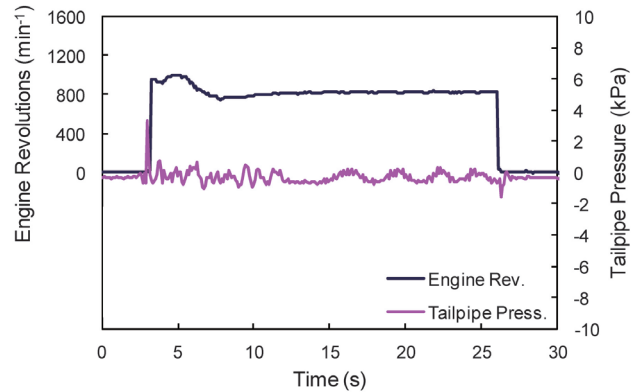
### 試験条件とエンジンの駆動状態

#### 試験サイクル

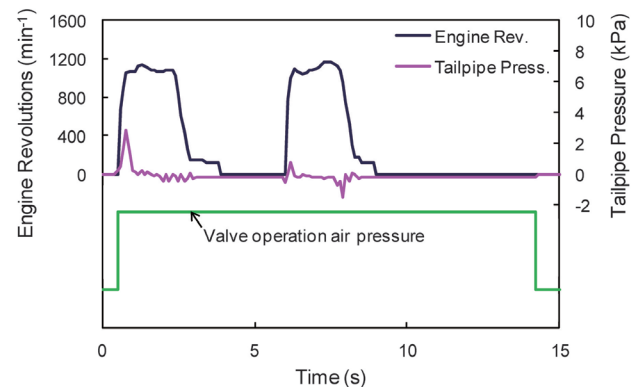
Figure 2にも示したように、PHEVはSOCによって主たる動力源を切り替える。満充電直後のプラグイン走行(CDモード)では、SOC安定後のハイブリッド走行(CSモード)に比べ、エンジンが動作する時間が極端に短い。そのため、たとえば、カリフォルニア州大気資源局(CARB)の排ガス試験法<sup>[3]</sup>では、UDDSを繰り返して運転し、CD・CS両モード

Table 1 Specifications of shut-off valve

バルブ構造	ボールバルブ
駆動方式	空気圧
駆動空気圧力	0.3-1.0 MPa(ゲージ圧)
内径	101.6 mm
耐熱温度	315.6°C
耐圧構造	ANSI class 150準拠
材質	SUS 316



(a) Tailpipe pressure without the shut-off valve



(b) Tailpipe pressure with the shut-off valve

Figure 5 Effect and response of the shut-off valve

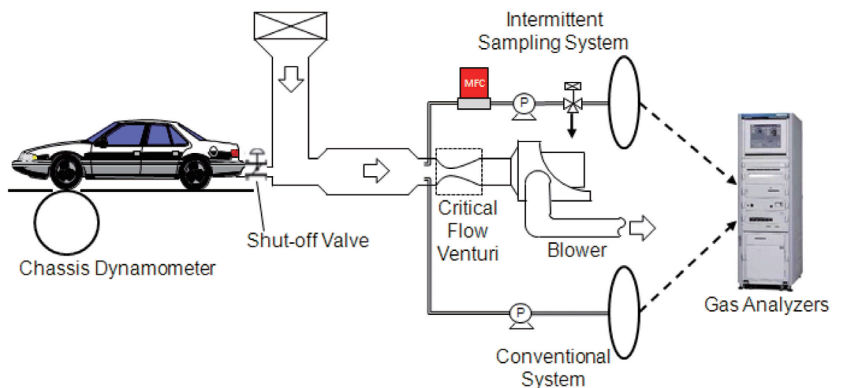


Figure 6 Setup of continuous and intermittent sampling systems

にてUDDS単位で排ガスを計測するように定めている。本研究でもこのCARBの方法に準じた試験を行った。試験車両は試験前にUDDSを1回走行した後18時間放置し、その間に商用電源より電力を供給してバッテリーを満充電の状態とした。その後はUDDSを4回走行して排ガス計測を実施した。Figure 7に、UDDSにおける車速のパターンを示す。バッグへのサンプリングは、図中の第1フェーズ、第2フェーズで各1バッグ(計2バッグ)を使用した。

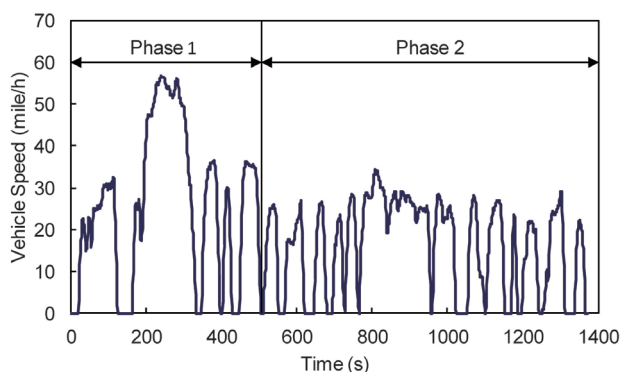


Figure 7 Vehicle speed setting of UDDS

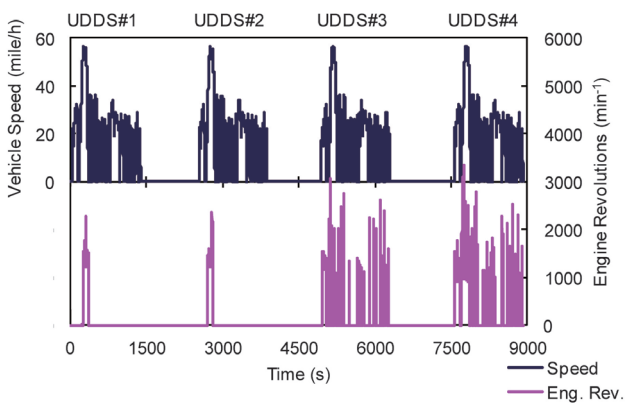


Figure 8 Engine speed during test cycles

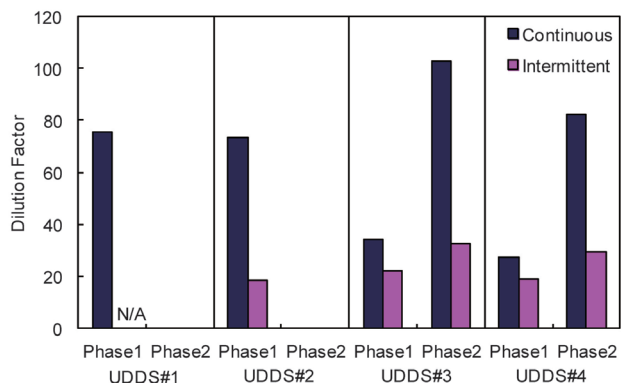


Figure 9 Dilution factors for PHEV per test cycle

### 運転中のエンジン駆動状況

Figure 8に、PHEVでUDDSを4回繰り返したときの車速とエンジン回転数を示す。回転数はエンジンの点火パルスによって検出した。Figure 8の左から順に、1回目(UDDS#1)、2回目(UDDS#2)、3回目(UDDS#3)、4回目(UDDS#4)のデータを示している。UDDS#1とUDDS#2ではエンジンはほとんど停止しており、高速走行中に短時間動作したのみである。これに対し、UDDS#3とUDDS#4ではエンジンの動作期間が増えている。これより、試験車両はUDDS#1とUDDS#2ではCDモード、UDDS#3以降はCSモードで走行していたことが確認できる。

### 従来CVSとの比較

#### 希釈率

Figure 9に、4回のUDDS走行におけるDFを、従来手法と間欠サンプリング手法とで比較した結果を示す。なお、UDDS#1の1フェーズで間欠サンプリング手法のデータが無効(N/A)となっているのは、バッグへのサンプル流量設定が小さすぎ、ガス濃度分析のために充分な量のガスをバッグにためることができなかったためである。一方UDDS#2では、UDDS#1の結果に基づいてMFCのサンプル流量設定を変更したため、有効な計測データを得ることができた。また、UDDS#1とUDDS#2の第2フェーズのデータが示されていないのは、エンジンがまったく動作しなかったためである。CARBは、車両の構造要件でエンジンの停止を立証できれば、排ガスの検証を省略できることを規定している。間欠サンプリング手法はエンジンの動作を直接検出しているためこの要件を満たしており、この間の排ガス計測は省略とした。

Figure 9において、UDDS#1とUDDS#2における従来手法のDF(希釈率)は、80近くを示している。従来車の計測では、DFは20程度に制御するのが通常であり、エンジンが停止している時間が長いために過希釈となっていることが分かる。また、UDDS#3とUDDS#4でも、第2フェーズにおいては、やはり希釈率が高い。一方、間欠サンプリング手法では、各フェーズともDFは20~30程度に抑えられている。また、エンジンの運転時間の変化によるDFの変動幅も小さい。なお、実際には、第1フェーズ・第2フェーズを通じて1つのバッグで連続して採取することが一般的である。従来法でこの手法をとった場合、UDDS#1とUDDS#2では第2フェーズの間も大気のみがバッグに採取される状態が続き、過希釈の状態はさらに顕著になる

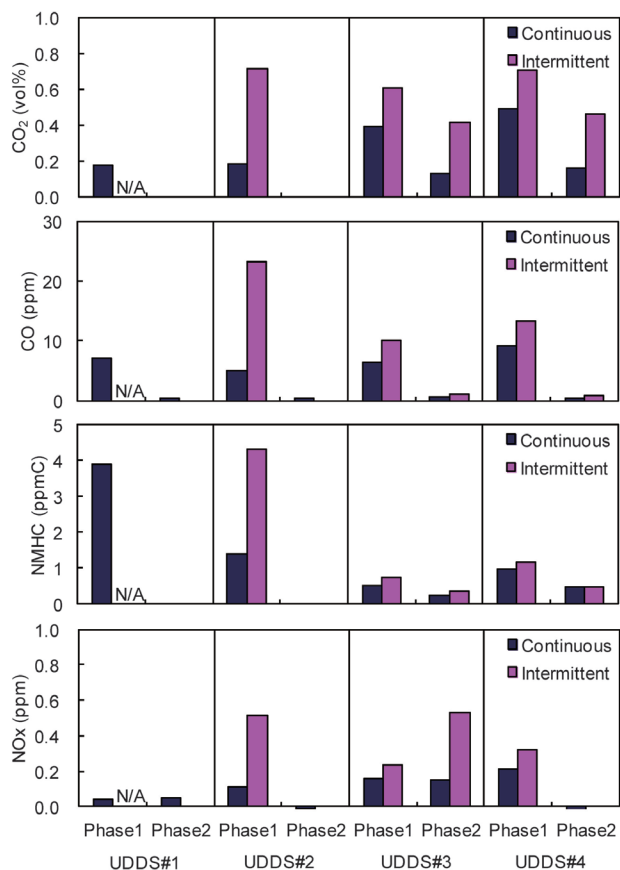


Figure 10 Gas concentrations for PHEV per test cycle

と考えられる。これに対し、間欠サンプリング手法では、Figure 9の例と同程度の適正な希釈率が維持できると期待される。

### バッグ内ガス濃度

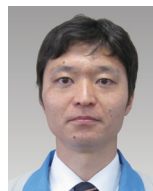
Figure 10に、従来手法と間欠サンプリング手法を、バッグ内のガス成分濃度で比較した結果を示す。Figure 9に示した希釈率のデータから予想されるとおり、いずれの成分についても、バッグ内のガス濃度は間欠サンプリング手法の方が高いことがわかる。特に、UDDS#2の第1フェーズにおいて、従来手法と間欠サンプリング手法のバッグ内濃度差が大きい。この条件ではエンジンの運転時間が非常に短いのがその原因であり、このようなCDモードの計測では間欠サンプリング手法が特に有利であることが示唆される。また、燃費計測上で重要なCO<sub>2</sub>についてみると、UDDS#3とUDDS#4の第2フェーズでも従来手法と間欠サンプリング手法とでバッグ内濃度の差が大きく、最大で3.5倍程度となっている。燃費については、規制値などとの比較ではなく、絶対値として正確に知りたいという要求が強い。そのようなCO<sub>2</sub>計測の精度確保に有利に働くことは、非常に意義が大きいといえる。

## おわりに

本稿では、CVSによるPHEVの排ガス計測を前提に検討した間欠サンプリング手法の概要と、この手法でエンジンが頻繁に停止する車両であっても、計測精度の改善が見込めることを紹介した。近年、社会のさまざまな要求に対応するため、次世代自動車、次世代エンジンの開発・実用化が急速にすすんでいる。それに付随して、排ガス計測にも新しい技術の開発や従来とは異なる手法の応用が求められている。PHEVの燃費・エミッション計測も、もちろん、その一例といえる。今回紹介した間欠サンプリング手法を含め、今後も必要とされる計測技術とそのアプリケーションを積極的に提案していきたい。

## 参考文献

- [1] SAE: Recommended Practice for Measuring the Exhaust Emissions and Fuel Economy of Hybrid-Electric Vehicles, Including Plug-in Hybrid Vehicles, SAE Standard J1711, 2010, 69p.
- [2] US Environmental Protection Agency: Fuel Economy and Carbon-Related Exhaust Emission Test Procedure, CFR Title 40 Part 600 Subpart B.
- [3] California Air Resources Board: CALIFORNIA EXHAUST EMISSION STANDARDS AND TEST PROCEDURES FOR 2009 AND SUBSEQUENT MODEL ZERO-EMISSION VEHICLES AND HYBRID ELECTRIC VEHICLES, IN THE PASSENGER CAR, LIGHT-DUTY TRUCK AND MEDIUM-DUTY VEHICLE CLASSES. (December 2008)
- [4] M. Duoba, J. Anderson, H. Ng: Issues in Emissions Testing of Hybrid Electric Vehicles, Vol.1, 2000 (Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois)
- [5] L. Zhang, T. Brown, G. S. Samuelsen: Evaluation and Modification of Constant Volume Sampler Based Procedure for Plug-in Hybrid Electric Vehicle Testing, SAE Technical Paper 2011-01-1750
- [6] US Environmental Protection Agency: Emission Regulations for 1977 and Later Model Year New Light-Duty Vehicles and New Light-Duty Trucks and New Otto-Cycle Complete Heavy-Duty Vehicles; Test Procedures, CFR Title 40 Part 86 Subpart B.



### 大槻 喜則

Yoshinori OTSUKI

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