

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_x)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(CO₂)排出量にも規制値が設けられつつある。このCO₂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CO₂、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)とその後段のプロアにより、希釈後の排ガス流量が一定となるように制御す

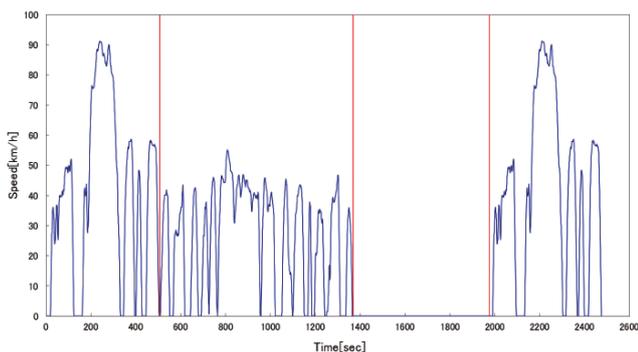


Figure 1 Driving cycle pattern(FTP75^[1])

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]
- ρ : 対象成分の密度[g/L]
- V_{mix} : 運転期間中の希釈排ガス体積[m³]
- 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CO₂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CO₂濃度(%)である。この理論CO₂濃度と希釈排ガスバッグ中のCO₂・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CO₂・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、CO₂、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^[2]。

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

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

ここで、

- e_{CO_2} : CO₂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]
- ρ_f : 燃料(ガソリン)密度[g/cm³]

である。

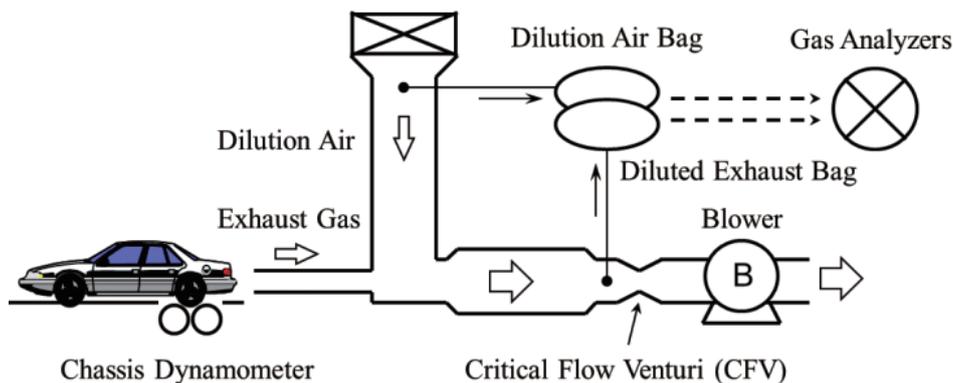


Figure 2 Configuration of CVS system

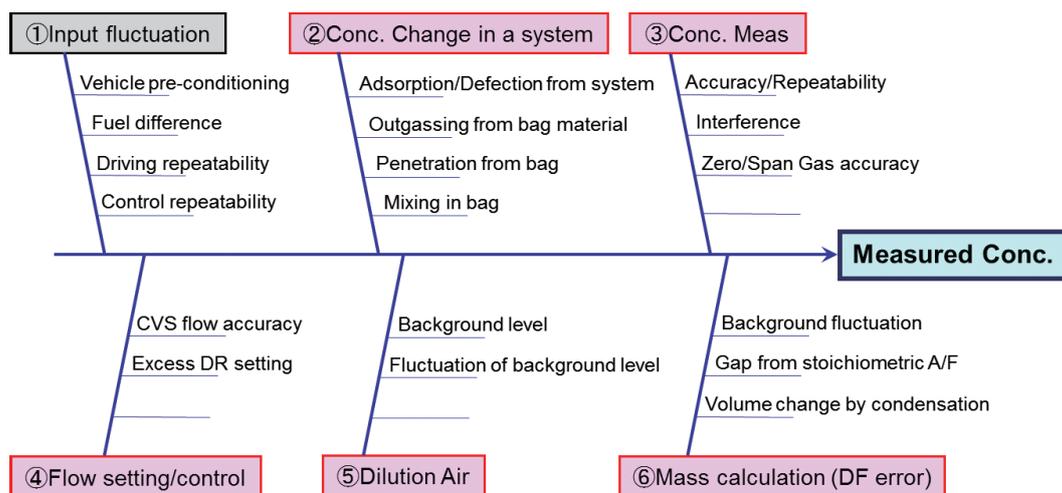


Figure 3 Cause and Effect diagram on CVS method

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^[3]。

- 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CO₂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。CO₂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[m³/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

CO₂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

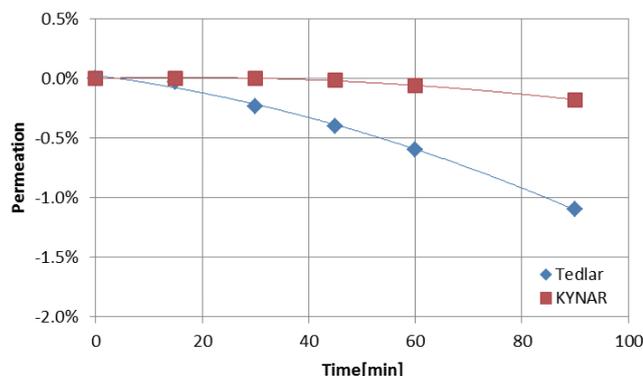


Figure 4 Comparison of CO₂ permeation performance

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。

CO₂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[®]を使用していた。CO₂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CO₂透過性が小さいという観点から、YNAR[®]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CO₂ガス(濃度2.019 vol%)を充填し、時間経過に伴うCO₂ガス濃度変化を調べる手法を用いた。Tedlar[®]に比べ、KYNAR[®]のCO₂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

CO₂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CO₂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CO₂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CO₂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

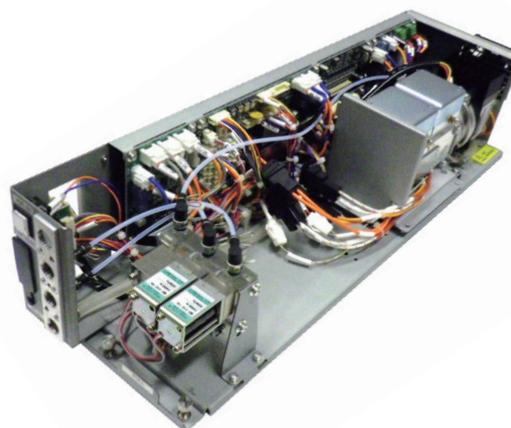


Figure 5 CO₂Low Analyzer

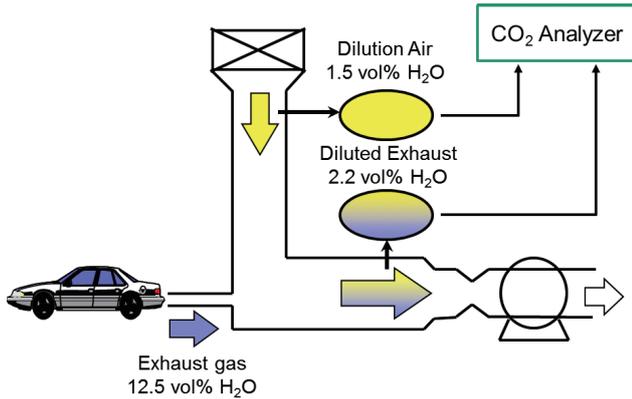


Figure 6 Image of Water Concentration in Bag

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CO₂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CO₂分析計ではCO₂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、CO₂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CO₂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CO₂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、CO₂排出質量を一定としてCVS流量を変化させ

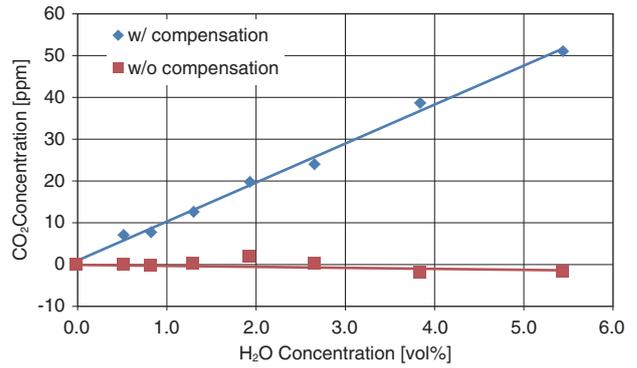


Figure 7 Effect of H₂O interference compensation

た際の希釈排ガスCO₂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CO₂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、CO₂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

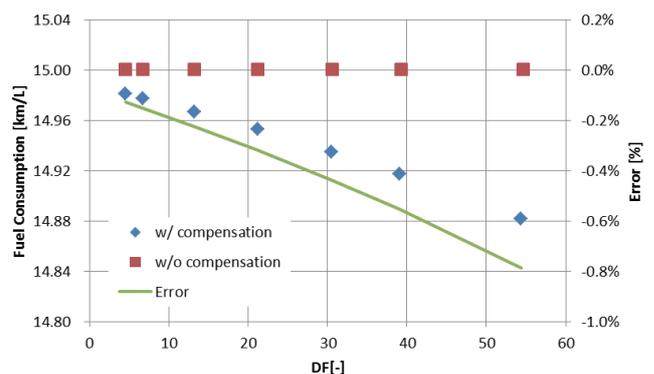


Figure 8 Comparison of Fuel Consumption

し、極端にDFが大きい場合には希釈空気に含まれているCO₂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^[4]。

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