

# パワートレイン用高精度センサーの展開

Developments in Precision Power Train Sensors

半沢 恵二

Hanzawa Keiji

星加 浩昭

Hoshika Hiroaki

田代 忍

Tashiro Shinobu

松本 昌大

Matsumoto Masahiro

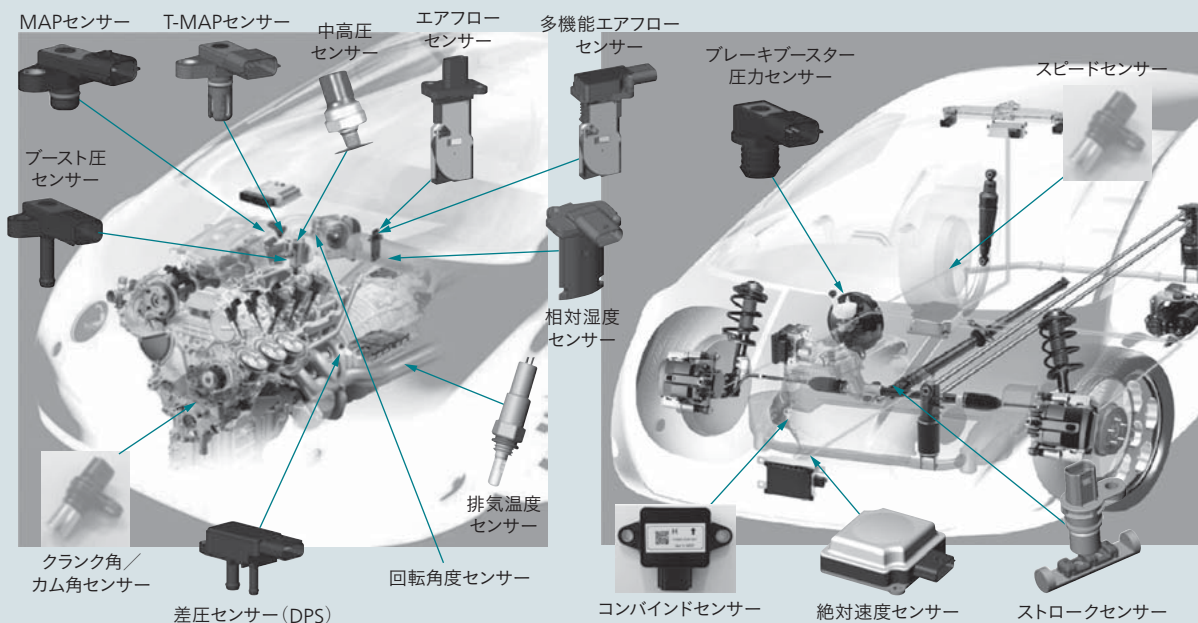
地球環境改善と高騰する石油価格への適応のため、自動車用パワートレインに求められる燃費性能やクリーン性能が厳しさを増している。また、排ガスや燃費性能の評価も、より実走行環境に近い温度・湿度を加味した環境条件を配慮する方向へと考え方が変化している。

さらに、ハイブリッド車などのパワートレイン電動化と、内燃機関自体の高効率運転化によってアトキンソンサイクル運転などセンサーにとって厳しいエンジン運転モードが多用されるようになってきている。日立オートモティブシステムズ株式会社は、従来よりもセンサーの精度を高めることによって、進化を続けるパワートレイン制御を支えている。

## 1. はじめに

日立オートモティブシステムズ株式会社は、自動車の「走る」、「曲がる」、「止まる」という動作に関するさまざまなシステムを世界の顧客へ供給している。これらのシステムには多種多様なセンサーが使用されており、パワートレインの状況、車体の動き、さらには車両外部の状況も把握しながら、常に安全・快適で地球環境に配慮したカーライフを実現している（図1参照）。

ここでは、近年急速に低燃費化、電動化した自動車パワートレインで使用されるセンサーの高精度化の動向として、吸気脈動の誤差を低減したMEMS (Micro Electro



注：略語説明 MAP (Manifold Absolute Pressure), T-MAP (Temperature-MAP), DPS (Differential Pressure Sensor)

図1 | 日立グループのパワートレイン用センサー

近代の車両のパワートレインではさまざまなセンサーが使用されており、環境性能を極限まで高めた制御システムで利用されている。センサーの高精度化は制御システムの性能向上に直結する。

Mechanical System) 式エアフローセンサー、吸気相対湿度センサーや圧力センサーの複合化、およびネットワーク端末化したセンサー出力信号のデジタル化について述べる。

## 2. MEMS式エアフローセンサー

日立オートモティブシステムズは、1981年に初めてホットワイヤ式エアフローセンサーを実用化して以降、世代に応じたさまざまなエアフローセンサーを供給し、これまでの供給実績は2億台に達する。この中でも2005年に投入したMEMS式エアフローセンサー<sup>1)</sup>は、シリコンダイアフラム式検出エレメントを使用して双方向の流れを計測可能としたものであり、現在では5V駆動で低消費電流化、検出部の温度を上昇させて耐汚損性を改善した第2世代を量産中である。さらに、高吸気脈動環境での高精度化、低価格化をめざした第3世代も量産準備中である。

### 2.1 高吸気脈動エンジンへの対応

MEMS式エアフローセンサーの目標とする機能・性能は、使用されるエンジンの進化を強く意識したものである。

オートサイクルでエンジンが運転されていたころは、ほとんどの領域で吸入空気は順流(エンジンに向かう流れ)であった。しかし現在では、ミラー式アトキンソンサイクルによる高膨張比運転、高EGR (Exhaust Gas Recirculation) 率によるポンプ損失低減などにより、逆流(エンジンから外に吐き出される流れ)の成分が非常に多い。

例えば、VTC (Valve Timing Control) などによって吸気バルブ閉弁タイミング角 (IVC : Intake Valve Closing) を大幅に遅角化してミラー式のアトキンソンサイクルで運転するエンジンでは、一度吸入された空気の大半がピストンによって押し戻され、これが逆流となって脈動を増大させる。また、エンジンのEGR率を上昇させると、シリンダに充填(じゅうてん)される空気・排気混合ガスの総体積が同じでも、排ガスが増える分、空気は減少する。このため空気の流量を計測するエアフローセンサーでは、脈動の大きさが同一でも、空気の平均流量が低下し、相対的に脈動が増大する(図2参照)。

日立オートモティブシステムズでは平均順方向流量で脈動の振幅を除し、これを脈動振幅率として定量的に評価している。脈動振幅率が200%を超えると、完全に逆方向に流れている期間があることを示す。エンジンの高性能化に伴い、脈動振幅率は世代を重ねるごとに大きくなっている(図3参照)。

このように、エンジンとその制御の進化で、エアフローセンサー付近を流れる空気は極めて強大な脈動流となり、双方向の流れに対応するMEMS式エアフローセンサーで

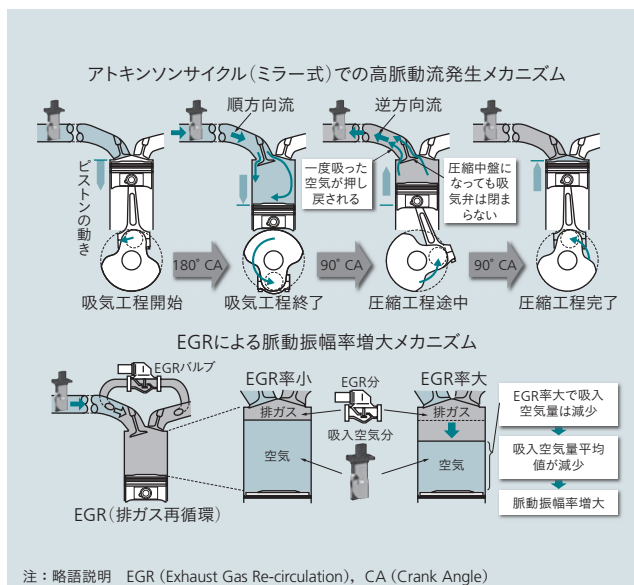


図2 脈動流発生メカニズム

ミラー式アトキンソンサイクルエンジンでは、吸気弁の閉弁が圧縮工程中盤まで遅角されるため、一度吸引した空気が大量に押し戻され、脈動が増大する。また大量EGRを行うと再循環排気ガスの増大で吸入する空気量が減少し、見かけの脈動が増大する。

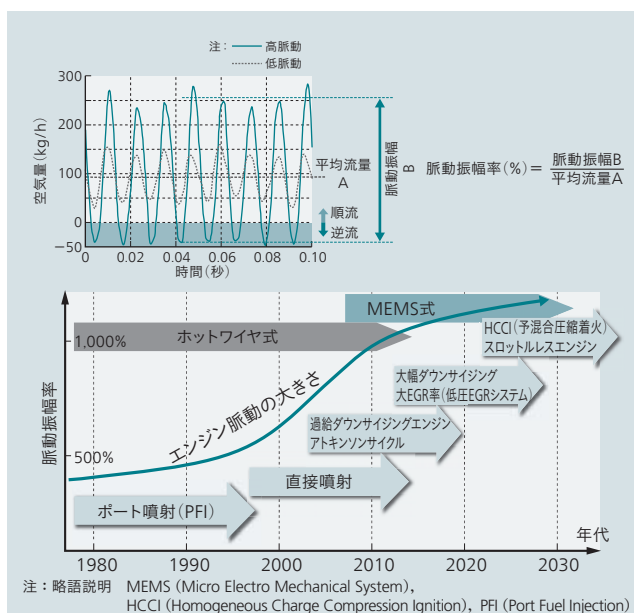


図3 脈動流発生メカニズム

日立グループでは脈動の大きさを脈動振幅率として定義し、定量評価を行っている。この脈動振幅率はエンジンの進化とともに上昇を続けており、脈動流における空気流量の精度はエンジン制御の進化と深い関係がある。

あっても誤差の低減技術が重要になる。

### 2.2 脈動による空気量計測誤差低減技術

吸気の脈動増大で発生する誤差はさまざまな要因によって発生する。エアフローセンサーの出力信号は、常に順方向の平均的な空気流量を出力しなければならない。このため、いくら順方向における計測精度が高くても、逆流成分の計測誤差やその補正処理が適切でないセンサーとしての誤差が増大してしまう。主な脈動誤差原因は、流れ検出部の応答性の不足や、特性が非線形であることによる非線

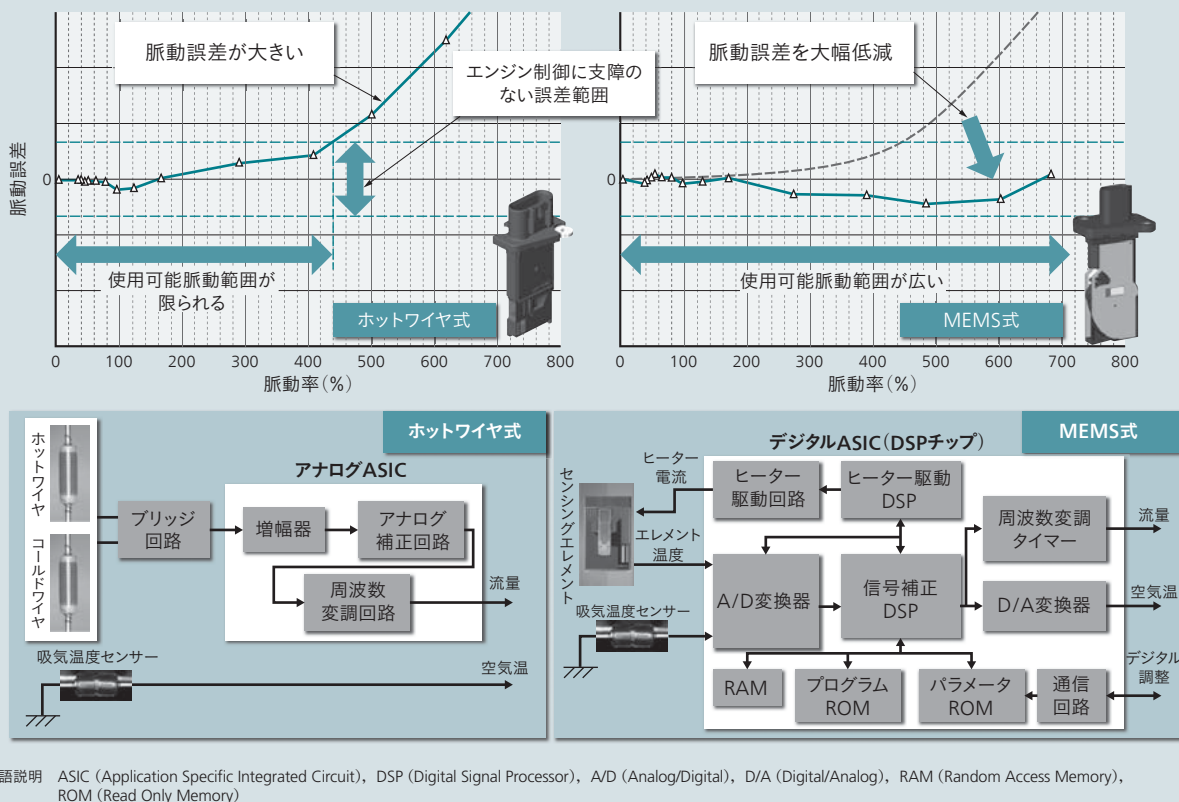


図4 脈動による空気流量計測誤差の改善

アナログ式の回路では脈動流の高精度計測には限界があるが、MEMS式エアフローセンサーでは、内部信号の処理を専用DSPでデジタル処理するため、極めて大きな脈動流においてもエンジンの制御性能を損なわない計測精度を確保できる。

形誤差、エアフローセンサー自身の乱気流を逆流時に再度吸い込んでしまう乱流誤差などさまざまであり、これらは常に複合的に発生する。

従来は一般的な信号フィルタ処理による補正や、エアフローセンサーに内蔵されるバイパス通路の形状などで対処してきたが、極めて強大な脈動流ではその補正能力が不足する。

この問題を解決するため、日立オートモティブシステムズと日立研究所は、共同でエアフローセンサー用に特化したDSP (Digital Signal Processor) チップ (ASIC: Application Specific Integrated Circuit) を開発した。高速演算が可能なDSPで信号を処理することにより、順・逆個別の信号補正処理、流量を物理量変換してから補正するリニアリティ処理、脈動特性の緻密な温度補正などがエアフローセンサー内部で行えるようになり、脈動誤差を大幅に低減できた。

さらに、副通路 (センサー内のバイパス通路) の通路長、逆流取り込み (出口) 開口を最適化して検出部の空気流を安定化させることによって、従来ではセンサー信号が利用できなかった脈動振幅率1,000%に迫るような高脈動の環境においても、問題なくエンジンを運転できるだけの精度を実現している (図4参照)。

### 3. 多機能エアフローセンサー

長い間、単一機能のセンサーをECU (Engine Control Unit) に複数接続する形態が主流であったが、複数のセンサーを一体化して互いに補正し、総合的な精度を高められる多機能センサーのニーズが高まってきている。日立オートモティブシステムズでは、2011年に世界で初めて相対湿度センサーと圧力センサーを内蔵した多機能エアフローセンサーを量産している (図5参照)。

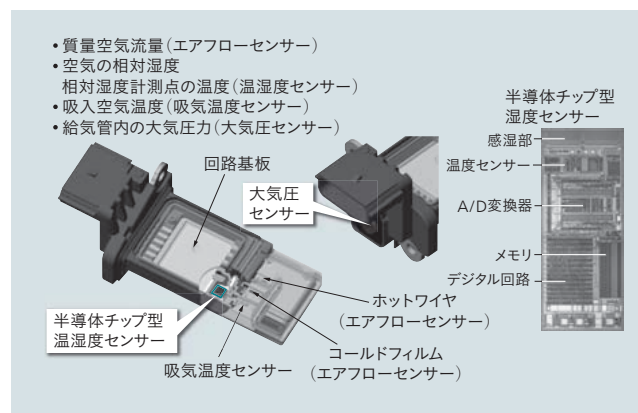


図5 多機能エアフローセンサー

エアフローセンサー機能に加え、相対湿度と吸気ダクト内の圧力を計測できる。気象条件や走行環境の変化にエンジン制御が追従できるようになり、今まで湿度変化分として確保していたエンジン制御の余力を燃費向上などに振り分けることが可能となる。

また、センサー信号をECUに伝達する段階における精度を高めるために、センサー信号のデジタル化や、ネットワーク端末化によるワイヤハーネスの削減、OBD (On-board Diagnostics) の柔軟性を高めた次期型も開発中である。

### 3.1 複数センサーによる制御の高精度化

エンジンが吸入する空気には、従来から測定している質量空気量だけではなく、水蒸気として含まれる水分や、その場所の圧力も物理量として存在する。これらの変化によってエアフローセンサーが計測する質量空気量に誤差が発生し、特に低流量領域では誤差が数%に達する。これは、ホットワイヤ式もMEMS式も空気による熱の移動を感知する原理に起因しており、水分による空気物性変化の影響を受けるためである。

また、エンジンにおいても吸入空気的水分量によって着火性能、限界EGR率、燃焼温度などが変動し、燃費や汚染物質の発生量などが大きく変化する。そのため、エンジンや排気ガス後処理システムの制御も吸入空気水分量の変化に追従させることが環境性能向上の鍵となる。

従来からこのような誤差は知られていたが、各種規制レベルがそれほど厳しくなかったために問題とはならなかった。しかし、市場の低燃費志向や、年々、規制が強化されていることから、多機能エアフローセンサーでは吸入空気中の水分による誤差も補正できるように半導体チップ式の相対湿度センサーを搭載している。

相対湿度センサーは、感湿ポリマーを誘電体としてコン

デンサを構成し、ポリマーに空気中の水分子が進入することで誘電率が変化、これをコンデンサ容量変化として検出する静電容量式である。この相対湿度センサーには高精度の温度センサーも内蔵されており、この温度と相対湿度から、空気中の絶対水分量を求めることができる。

さらに、相対湿度は圧力の変化に応じて変化するため、搭載されている圧力センサーの情報でこれを補正することによって極めて正確にエンジンが吸入する水分量を把握することが可能である。

また、内蔵されたマイクロプロセッサにより、各種センサーの信号を補正せずにそのまま出力することも、補正して出力することも可能であり、各種のエンジン制御システムに柔軟に対応できる(図6参照)。

### 3.2 センサー信号伝達での高精度化

センサーの精度を向上しても、その信号伝達段階で信号精度が劣化しては意味がない。従来はセンサー信号を電圧出力するアナログ信号タイプや、パルスの周波数を変化させる周波数変調タイプが主流であった。しかし、接地電位の変動や、変調基準周波数の温度特性などの信号伝達段階で発生する誤差、ECUでアナログ信号をデジタル値に変換するADC (Analog to Digital Converter) での変換誤差などで最終的なセンサー信号の精度は劣化する。

これらの誤差を改善するため、高精度センサーでは信号のデジタル化が進んでいる。例えば、SENT (Single Edge Nibble Transmission) 通信はセンサー信号をデジタル化する手法の1つであり、単一の信号線で2チャンネル分のセ

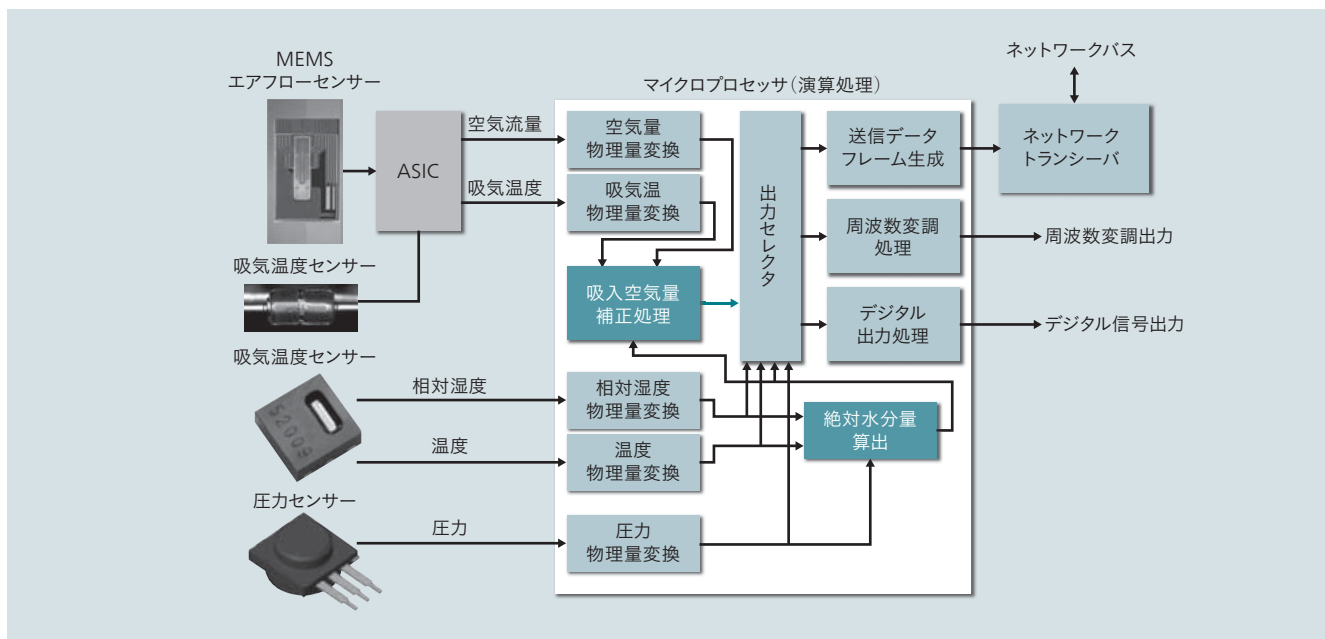
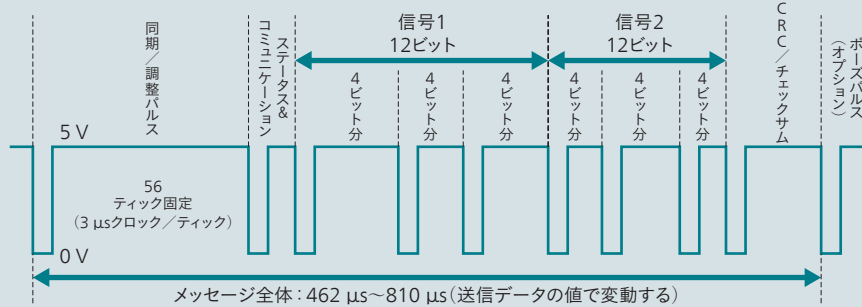


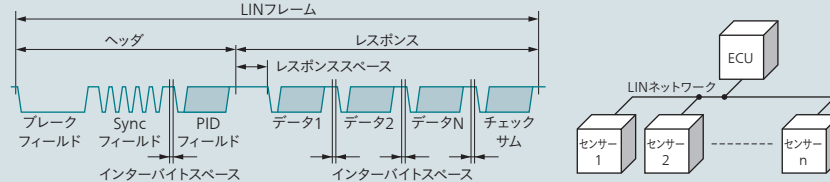
図6 | 複数のセンサーを使用して高精度化 (多機能エアフローセンサー)

センサーを多機能化するとセンサー信号を他のセンサーの情報で補正できるようになるため、総合的な信号精度を高めることができる。この例では相対湿度を圧力で補正して絶対水分量を算出する。この情報でさらに吸入空気量を補正している。

## SENT信号規格 (SAE-J2716)



## LINネットワーク信号



注：略語説明 SENT (Single Edge Nibble Transmission), CRC (Cyclic Redundancy Check), LIN (Local Interconnect Network), Sync (Synchronization), PID (Protected Identifier), ECU (Engine Control Unit)

図7 | センサー出力信号のデジタル化

SENTは1メッセージ当たり2つの信号を1 ms未満の周期で送信でき、センサー用のデジタル信号規格として適している。すでに角度センサーなどで実用化されており、シンプルなことから今後広く採用されると思われる。LINは車内電子機器ですでに普及している低速ネットワークであるが、単線で双方向通信が可能、かつ柔軟性も高いためパワートレインでも採用され始めている。

センサー信号が伝達でき、CRC (Cyclic Redundancy Check) による誤り検出も可能である<sup>2)</sup>。

さらに多チャンネルの信号重畳が可能であるため、多機能エアフローセンサーのように多くのセンサーの信号を出力しなければならない用途にも使用できる。

SENT通信はセンサーからECUへの単方向通信であり、従来のアナログ信号をデジタル方式に置き換えた格好であるが、開発中のものではSENTだけでなくLIN (Local Interconnect Network)<sup>3)</sup>にも対応する(図7参照)。双方向通信ができることを利用してECUの要求に応じてそのときに必要なセンサーだけを起動して計測精度を高めるなど、より高精度で柔軟性の高いセンサーの実用化を進めている。このようにセンサー信号のデジタル化・ネットワーク化は信号伝達段階での精度劣化が少なく柔軟性も高いため、高精度センサーのインタフェースとして最も適した方法である。

## 4. おわりに

車載用センサーの高精度化の動向として、MEMS式エアフローセンサーでの高脈動流における計測精度改善と、多機能エアフローセンサーでの複合化および、センサー出力信号のデジタル化について述べた。

パワートレインの状況、車体の動き、車両外部の状況などを把握する高精度、高性能なセンサーを導入することで、自動車やそのパワートレインの安全性向上、省資源化、地球環境改善などに寄与できる。

## 参考文献など

- 1) 木股, 外: 自動車用センサの最新動向, シーエムシー出版 (2009.2)
- 2) SAE: SENT-Single Edge Nibble Transmission for Automotive Applications, SAE-J2716 (2006)
- 3) LIN Consortium: LIN Specification Package Revision 2.1 (2006)

## 執筆者紹介



### 半沢 恵二

1988年日立オートモティブエンジニアリング株式会社 (現株式会社日立カーエンジニアリング) 入社, 日立オートモティブシステムズ株式会社 パワートレイン&電子事業部 電子設計本部 センサ設計部 所属  
現在, 車載用センサーの開発・設計に従事  
自動車技術会会員



### 田代 忍

1993年日立製作所入社, 日立オートモティブシステムズ株式会社 パワートレイン&電子事業部 電子設計本部 センサ設計部 所属  
現在, 車載用センサーの開発に従事



### 星加 浩昭

1988年日立オートモティブエンジニアリング株式会社 (現株式会社日立カーエンジニアリング) 入社, 日立オートモティブシステムズ株式会社 パワートレイン&電子事業部 電子設計本部 センサ設計部 所属  
現在, 車載用センサーの開発に従事  
自動車技術会会員



### 松本 昌大

1983年日立製作所入社, 日立研究所 情報制御研究センター グリーンモビリティ研究部 所属  
現在, 車載用センサーの開発に従事  
計測自動制御学会会員