空気の質量流量を検出する 自動車用エアフローセンサの開発

Development of Mass Air Flow Sensor for Automobile

執筆者プロフィール

内山 薫
Kaoru UCHIYAMA

■1968年日立製作所佐和工場入社, 1974年日立京浜工業専門学校電子工学科卒業, 2011年から現職

■主として行っている業務・研究

・自動車用電子機器の開発・設計。とくに, センサ, 制御装置のハードウェアの設計と生産プロセスの開発

■所属学会および主な活動

自動車技術会

■勤務先

日立オートモティブシステムズ(株)

電子設計本部 主管技師

(〒312-8503 ひたちなか市大字高場 2520 番地 / E-mail: kaoru.uchiyaama.mz@hitachi.com)

図1 燃料噴射システム

図2 ホットワイヤエレメント

1. はじめに

自動車の排気ガスが社会問題として取り上げられたのは1960年の頃である。有名なマスキー法案と呼ばれる大気浄化法の改正が1970年にアメリカで成立し、排出許容値が、それまでの10分の1となった。ちょうどこの頃、マイクロコンピュータが出現し、排気対策と呼応して自動車エンジンの電子制御化に拍車がかかった⁽¹⁾。同時にエンジンの負荷状態を検出する重要なデバイスとして空気流量センサ(エアフローセンサ)が必須の要件となった。

2. 自動車エンジンの電子制御とエアフローセンサの役割

電子式燃料噴射システムを図1に示す。回転数センサでエンジンの回転数を検出, その信号 n とエンジンに吸入される空気量を検出したエアフローセンサの信号 Q とをエンジン制御ユニットに入力しマイクロコンピュータで燃料の最適値 q を算出して燃料噴射弁(インジェクタ)から燃料を噴射するシステムである。 n と Q , q は次の関係となる。 $q = M \times Q / n$ 。ここで M は冷却水, 空気の温度, 加減速の状態など運転状況に合わせた係数である。

3. エアフローセンサの方式

空気流量には幾多の計測方法がある。エンジンでは燃料の燃焼制御であるので質量流量が理想である。当時, 多くのメーカーが体積, 質量, 両方式を開発していたが, 日立オートモティブシステムズ(株)(以下, 当社)は, 質量流量を検出する熱線(ホットワイヤ)式を採用することにした。ホットワイヤは加熱した抵抗体である。電流を流し, 加熱した状態で空气中に晒すと, ホットワイヤは空気の熱伝達により温度(抵抗値)が変化する。ここで加熱温度を一定になるように電流を制御するとその加熱電流は空気流量の関数となる。加熱したホットワイヤの抵抗値を R_h , 加熱電流を I_h とすると, ホットワイヤの加熱電力と空気への熱

図3 ホットワイヤ制御回路 (ダブルブリッジ回路)

$$R_h = \frac{R_1}{R_4} (1 + \frac{R_2}{R_3}) (R_c + R_5)$$

ここで R_5 は R_c の感度調性なので $\alpha = 0$
 $R_h = R_0 (1 + \alpha T_h)$, $R_c = R_0 (1 + \alpha T_a)$
 $K = \frac{R_1}{R_4} (1 + \frac{R_2}{R_3})$ とすると,
 $\Delta T = \frac{K-1}{\alpha} (K-1) T_a$ となる.
 ここで,
 R_0 ; R_h , R_c の基準温度における抵抗値
 α ; R_h , R_c の温度係数

図4 バイパス通路構造

伝達とはキングの実験式, $I_h^2 \times R_h = (A + B\sqrt{Q}) \Delta T$ であらわれ、加熱電流 I_h と空気流量 Q は 4 乗の関係となる。ここで、 A , B は熱特性に関する定数、 ΔT はホットワイヤの温度 T_h と空気の温度 T_a の差である。

4. 検出素子；ホットワイヤエレメントの開発

1970 年当時の市場にホットワイヤに適した抵抗器は実在しなかったため、自ら開発することになった。開発品を図 2 に示す。外形 0.5mm、長さ 2mm のセラミックボビンの両端に白金系合金のリード線をガラスで固定し、20 μ m の白金線を巻きつけ、さらにその表面をガラスで保護した構造である。白金線はリード線と溶接で接続される。この構造、寸法に至るまでには数多くの実験を繰り返した。命題は空気流量の変化に追従する応答性を満たす熱容量、後述のバイパス通路に収納できるサイズ、さらに 7 章で説明する、空気に含まれる塵埃の付着に対する信頼性の確保である。また、量産化においては白金線の巻付けの自動化にも苦心があった。検討を重ねて纏めた自動機でうまく巻けなかった。上手に巻ける作業員の手元を高速度カメラで撮影した。そこには、原理では説明できないノウハウがあった。まさ

に、“ものづくりは加工点を科学することにある”とうなずいた。

5. 検出素子の共用化；制御回路の開発

エアフローセンサには加熱するホットワイヤと空気の温度を検出する抵抗器（コールドワイヤ）が必要である。ホットワイヤには加熱するため低インピーダンス抵抗器を、コールドワイヤにはホットワイヤと同じ電圧を印加しても加熱されず、空気温度に応じて抵抗が変化する高インピーダンスの抵抗器を用い、ブリッジ回路を形成するのが一般的である。

しかし、これら両抵抗器を個別に開発することは時間的にも経済的（コスト）にも不合理であり、「同じ抵抗器を使えるように電子回路で工夫できないか」の検討に入った。創出したのが図 3 のホットワイヤ制御回路（ダブルブリッジ回路）である。アンプを一段用いたインピーダンス変換回路により、見かけ上、コールドワイヤ R_c を高インピーダンス化してコールドワイヤ R_c とホットワイヤ R_h との共用を実現した^{(2)~(4)}。

6. 自動車用空気通路；バイパス通路の開発

自動車では不完全燃焼によるバック

ファイヤが生じる。次項で述べる耐塵埃性にも配慮が必要である。さらに自動車の電源は 12V バッテリーのみであり低消費電力化にも配慮が必要である。これらの要求に鑑みて生み出されたバイパス通路構造を図 4 に示す。全吸入空気が流れるメイン空気流の一部をホットワイヤを配設したバイパス通路に分歧し、点線で示したように通路外周を 3/4 周して再びメイン空気流と合流する通路構造である。この通路構造はバックファイヤによる衝撃波からホットワイヤを保護するとともに、耐塵埃性を確保し、消費電力を低減するばかりでなく、自動車エンジン特有の空気脈動による検出誤差の低減に大きな効果を発揮した。

現在、バイパス通路式は自動車用エアフローセンサの標準となっている。

7. 塵埃対策；信頼性設計

ホットワイヤ式エアフローセンサの最大の懸念は空気中に含まれる塵埃（ダスト）、エンジン自体から発生するオイルミスト、油、カーボン等がホットワイヤに付着することによって検出精度が低下したり検出機能が失われることにあった。図 5 に示す評価設備を整え、さまざまな実験を繰り返した。図 5 は中央の棒の左側を高温、右側を低温にした状態で (a) はダストと水分を、(b) はダストと油分を流し、ダストが棒に付着する様子を実験した結果である。加熱温度が 200℃ 以上であれば塵埃は堆積しないことがわかる。これらの結果からホットワイヤの加熱温度を空気温度 T_a より 200℃ 高い温度に設定した。エレメント、バイパス通路の仕様もこれらの実験を繰り返し実行して細かく定めた。これらの結果、排気ガス排出規制における要求寿命 11 年、12 万マイルの走行に耐えられるエアフローセンサを実現した。

以上、ないないづくしで開発したエアフローセンサは 1981 年世界で初めて自動車に搭載され、今日まで累計 2 億台生産した。常にデッドヒート状態の開発の中で当社がリードできた理由は 3 点ある。第 1 点目は、耐塵埃性にとくに優れていたことである。塵埃が付着しにくいホットワイヤ構造と加熱温度の設定、バイパス通路によりホットワイヤと塵埃の衝突を低減した

図5 耐塵埃(ダスト) 性検討結果

構造によるものである。2点目は、当社でエンジン制御システムを手がけていたことである。エンジンでの評価がタイムリーに実行でき、問題点をシステムの的に確認することができた。3点目は、当社に半導体専門事業部が存在したことである。自動車用特殊パッケージ化により製品を素早く仕上げることもできた。ほかにも、点火プラグで培ったセラミックス技術や点火コイルの巻線技術などの基礎技術を有していた。さらに付け加えれば、研究所・事業所・関連部門の技術者が議論しながら“世界初”を合言葉に活き活きと汗を流し合ったことにある。

8. 今後の動向

さらなる燃費向上、排気ガス低減を目指し研究・開発が進められている。たとえば、エンジンのダウンサイジング、アイドルストップ、燃焼の超リーン化、また、これらの欠点を補う過給機の搭載などである。これらの周囲環境からエアフローセンサにはますます厳しい仕様が求められている。具体的には、空気量の変化に対する応答性の改善、ダイナミックレンジの拡大、検出精度の向上である。とくに検出精度向上で重要な空気脈動下における逆流の影響低減について以下に説明する。

熱式エアフローセンサは空気の流れ方向を検出できない。これにはエンジンからの吹き返しにより戻ってきた空気(逆流)もエンジンへ入った空気量として出力してしまう欠点がある。ダウンサイジングにより気筒数が少なくなり、また、アトキンソンサイクル化されるとこの逆流がさらに大きくなり、検出精度の低下を招いてしまう。そこで、逆流も検出可能なエアフローセンサが求められ、最近実用化されたのがMEMS(Micro Electro Mechanical Systems)技術を用いた検出素子で

(a) 逆流検出の原理

(b) 逆流検出型エアフローセンサの特性

(c) CAEによる解析例

図6 逆流検出型エアフローセンサ

ある⁽⁵⁾⁽⁶⁾。その例を図6に示す。図6(a)は検出部の構成と逆流検出の原理を示したものである。シリコン基板の上の中心にヒータを、空気流れの上・下流に温度センサをそれぞれ配置する。ヒータ、温度センサには抵抗温度係数の高い材料を使用する。ヒータ、温度センサを保護膜で覆った後、シリコン裏面をエッチングにより加工し、ヒータ、温度センサの台座となる薄板部を形成する。この薄板の厚さを1μm程度にすることで、検出部の熱容量をホットワイヤに比べ100分の1以下に大幅に低減することができ、高速のエレメントが実現できる。

動作は、空気の流れがないとき($v=0$)の薄板上の温度分布は、図6(a)の破線で示すようにヒータを中心に対象である。流れがあるとき($v>0$)は、実線のように下流側に熱が運ばれて下流側温度が dT だけ高くなる。その結果ヒータの両隣に形成した二つの温度センサの抵抗値に差が生じるので、これから温度差 dT を計算して流量を求める。このようにして図6(b)に示すように順・逆、双方向の出力を得ることができる。

図6(c)はこれらを裏づけるためのCAE(Computer Aided Engineering)解析例を示したものである。ホットワイヤの開発では実験の繰り返いを重ねたが、それらの実験結果はCAE解析技術を高度化した。その成果によりこのような高性能なセンサを開発できるようになってきており、今後の進歩・拡大が期待されている。

9. おわりに

エアフローセンサの開発を「ものづくりの“起”」の切り口でまとめた。

ものづくりの基本は、「社会の要求に応え、社会の役に立つ」という勇気であり、そこに“起”が存在するのではなかろうか。“ないものを創ろう”という“起”は暗闇に立ち向かう勇気であり、“必ずやり抜く”決意・決心にほかならない。国際化、Global化と周囲環境は大きく変わっているが、こういう時勢であるからこそ“勇気ある真の「技術者」”が必要となる。「技術者」は「ものづくり」が仕事である。「技」; 体の身につけた“わざ”, 「術」; 知の身につけた“わざ”, 「者」; 心の身につけた“わざ”. この“三つのわざ”を身につけた人が技術者であり, “仕事力のある人”と称えられるのである。

文 献

- (1) 笹山隆生・上野定寧・ほか, 高効率パワートレイン系のためのセンサ及びセンシング技術, 自動車技術会学術講演会前刷集, (1995-4), No.951.
- (2) 白土剛・内山薫・ほか, 自動車用空気流量センサの調整技術, 自動車技術会学術講演会前刷集 (1996-5), No.961.
- (3) 西村 豊・内山 薫, 自動車エンジンの吸入空気計測技術, 電気学会論文誌センサマイクロマシン部門誌, 118-E (1998), 300-303.
- (4) 西村 豊・内山 薫, 熱線流速計のプローブ先端からの熱伝導に伴う誤差とその低減法, 日本機械学会論文集, 66-652, C(2000), 120-126.
- (5) Komzelman, U., ほか, Breakthrough in Reverse Flow Detection A New Mass Flow Meter Using Micro Silicon Technology, SAE Technical Paper Series, (1995), 950433.
- (6) 松本昌大・五十嵐信弥・ほか, 高信頼, 高精度自動車用マイクロエアフローセンサ電気学会誌, 130-E (2010), 80-85.