

# 特別寄稿 計測技術の発展と将来\*

## Development and Future of Measurement

池上 詢

Makoto IKEGAMI

### 1. まえがき

計測とは目的とする量を計器によって求めることである。それは推定や予見でなく計測結果に基づいて推論を確認するとか、予想との違いの原因を見極めて考え方や理論を更新することができる。こうして科学や技術の新しい知見がもたらされ理解が深められて理論がしだいに精緻になったのである。更には技術開発においても、それを支える根幹になっているのが計測であり、高度・高性能の工業製品をつくりあげる基礎でもある。ここでは、計測技術と科学技術の関係について私見を述べる。

### 2. 計測技術の意義

昨年の冬に二人の日本人がノーベル賞を受けられたが、受賞対象はいずれも計測に深いかわりがある。化学賞の田中耕一さんは生体高分子の同定と構造解析の手法の開発が受賞理由で、紫外レーザー光を使ったマトリックス支援レーザー脱離イオン化法により気化した試料を飛行時間型質量分析法で測定するものである。物理学賞を受けられた小柴昌俊さんはカミオカンデという大型水チェレンコフ光検出装置を地下に設けて、超新星からのニュートリノの計測に成功し、ニュートリノ天文学を拓いた。チェレンコフ光とは素粒子などが高速で水中を通るときに発する光で、それを多数の高感度光電子増倍管を使って検出する。その装置が神岡鉱山跡の地下深くに置かれているのは陽子の崩壊などに伴う信号の妨害を避けるためである。このように科学の最先端は計測と深くかかわっており、計測技術が新しい学問分野をつくり出されるといっても過言でない。物質の諸性質や諸現象の実態を知るにはこうした測定によるしか術がなく、それに基づいて新しい理論が構築され深化が図られる。このため科学者はより高度な計測方法を自ら開発して新しい知見を求めるのである。いってみれば計測は知の源泉なのである。

計測技術はこのような基礎科学においてばかりでなく、一般の産業活動やプロセス工業において反応や操作の制御、製造工程の管理、鉄道、自動車航空機など

の交通機械の制御などにも計測は制御要素としてなくてはならない手段となっており、品質向上、安全性の向上、最適化などに役立っている。家庭生活で使われる機器にも数多くのセンサが組み込まれていて知らない間にさまざまな計測が行われている。計測対象と手段は多岐にわたっており、リミットスイッチなどのような二値情報の検知から、長さ、力・圧力、時間、温度、濃度、光などの物理量や、更に材料の硬度、表面粗さ、衝撃値などの工業量の計測などにわたっている。更に、医療におけるX線写真のように患部の病態を診断することも広い意味においては計測であり、画像計測と呼ばれる分野に属している。そして測定手段も千差万別で、必要な精度と感度を得ること、十分な応答速度と雑音や妨害を受けず高い信号雑音比で測定できなければならない。1970年代からのエレクトロニクスの進展により、高性能センサの開発とならんでマイクロプロセッサを軸とする信号処理とデータ収集に飛躍的な進歩があり、計測システムのイノベーションは多くの分野に浸透した。

### 3. 集積回路と連動した計測法の進歩

先端科学とはとてもいえないが筆者は長い間エンジン内の燃焼にかかわる研究に携わっており、計測イノベーションの進行中に種々の計測法を扱ってきた。その間に経験した電子技術の発展に伴う計測法の高度化について感じていることを述べてみたい。

1960年代にはディーゼルエンジンの燃焼騒音の原因を調べる目的で高速で変化するシリンダ内の圧力の時間経過を測定し記録した。歪みゲージを使った圧力センサの出力は微弱な電圧変化しか得られず、しかも信号記録に当時は信号を電流強度に変え電磁オシログラフという装置で信号を記録する必要があった。これは磁石内の導線に電流を流すと導線が抜れることを使って光点を動かし、その動きを流しカメラによって撮影するものであった。時間の追従性を高めるために強い信号電流が必要だったので、当時ようやく利用できるようになったトランジスタを多段に接続して電流増幅

\* 2003年9月16日 原稿受理

した。それによって必要な応答性を何とか確保できた。1970年代になるとトランジスタを集積してつくられたOPアンプ (Operational Amplifier) がわれわれも使えるようになり、極めて安定でかつ十分な応答性をもってシリンダ圧力を測定できるようになった。しかも煩わしい流しカメラのフィルム現像からも解放された。この例でみるように圧力センサ自体にはそれまでと大きな変化はなかったが、それを支援する電子デバイスの目覚ましい発達によって計測精度や安定性が飛躍的に改善されたことに感激したものである。更にはOPアンプの機能を使ってシリンダ内圧力上昇率、最高圧力、着火遅れなどをアナログ電圧にしてメータに表示する装置も製作して使用した。

その当時、TTL (トランジスタ・トランジスタ論理素子) を始めとする各種の半導体集積回路やマイクロプロセッサが普及しはじめており、1970年代後半には筆者もミニコンピュータが計測・実験に使えるようになった。これらは筆者の研究に大きく役立つことになった。シリンダ内圧力の信号はOPアンプで増幅したのちAD変換してリアルタイムで計算機のメモリーに取りこみ、種々の演算を行ったり、信号の変動や統計分布を得ることができた。また、これとは別に集積回路を使って光電子増倍管の信号をパルス列として扱いその自己相関を求めるデジタル相関計を試作し、当時盛んになってきたレーザを利用して火炎内に発生するすす粒子の寸法・数密度を計測することが可能となった。この方法はレーザで照射されるすす粒子のすべての組み合わせで生じるビートを検出するもので、それによってブラウン運動によるすす粒子の動きを測定でき、粒子の寸法が推定できる。これは元来ハイドロゾルの寸法を測定するのに使われた方法で、レーザホモダイン法と呼ばれている。

また、開発したデジタル自己相関計を利用してエンジンシリンダ内の乱れ強さと積分スケールを測定することもでき、エンジンシリンダ内の乱れの解明に役立った。その後、この乱れ測定法はPIV (Particle Image Velocimetry) という画像計測に重点を移したため相関法による研究はそれ以上行わなかったが、ここで試作したデジタル相関計はデジタル論理素子をフルに活用した点に特徴があり、新しい計測方法を築くことができたのである。振り返ってみると1970年代から1980年代にかけて進行した半導体技術の発展、とくに集積回路の進歩のお蔭で多くの新しい計測が可能となった。筆者の場合はいささかこれらの動きに振り

回されたきらいもあるが、これらの計測法を取り入れることによって研究を大きく発展させることができたことも確実である。

#### 4. 自動車の技術開発における計測

実際の自動車やその部品の開発研究には、更に高度化された測定技術がふんだんに使われている。排出ガスのモード測定はその最たるもので、個別の計測器が同時に働いて測定データが処理装置によって集積される。排ガス分析はそれなりに高感度と高い応答性もち、かつ共存気体の妨害を回避しなければならないという難問を抱えているが、時代のニーズに応じて実用に耐える分析計が確立されている。そのようにして得られる測定結果に基づいて初めて開発中のエンジンの特性が判明し、規制値に適合しているかどうかチェックする。適合させるために何らかの改良が施されるとそのエンジンは再びモード測定に付せられ結果がチェックされる。いってみれば計測結果がすべてであり、逆に測定結果の根拠なしの開発は今日ではありえないことである。

この種の計測は今日では全自動化されていることが多い。パラメータ最適化の試験や耐久性試験を無人で行うことも可能になっている。例えば金属材料の疲労強度試験や部品・製品の耐久性試験はかなり以前から自動運転で実施されている。自動車の耐久性試験ではシャシダイナモで実走行のシミュレーション運転を行い、起こりうる故障をできるだけ短時間に発見する。故障が発見されない場合は耐久性が確認されたことになり、起こった場合はその状況を精査し適切な対策を講じる。これを繰返して欠陥のない車に仕上げていく。この不具合には部材などの強度などとともに排ガス、性能の劣化なども含まれる。

パラメータ最適化試験では、例えば排ガス、燃費、騒音など互いに相反する要求を両立させるため設定可能な因子を自動運転によって最適化していく計測手法である。最近のディーゼルエンジン用のコモンレール式噴射装置は、圧縮行程の始めから膨張行程の終わりまでの間に3～4回の噴射が可能である。最初の2回は主燃焼での圧力上昇率が過大とならないようにするための、いわゆる先立ち噴射を行うために使われ、主噴射後は燃焼後期かく乱による燃焼促進に、更に遅く噴射を行って触媒の再生を図るというふうに使われる。1回の噴射についてはその噴射量と噴射時期を指

定する必要があるから、4回噴射ではそれだけで8個の要因があることになる。そのほかにもエンジンには種々の設定すべき因子があり、更にこれが負荷と回転数に対して最適化されなければならないから、極めて多くの自由度があり、到底人間技では最適化することはできない。このような最適化の手法は実験計画法の範疇に入るであろうが、今後この種の計測がいろいろな分野でも使われると予想される。この手法では、単にやみくもに最適結果に達するのではなく、それまでの実験結果や対象システムの既知の特性をうまく生かして短いステップで最適化できる工夫が必要となる。

最後に、自動車の運転や作動の制御についてはマイクロプロセッサを使って既に大々的に行われているが、今後はOBD、すなわちオンボード診断技術が当面大切な課題となるであろう。診断とは医者が患者の病状を判断することであり、この場合は内蔵されているマイクロプロセッサによって燃料システム、酸素濃度センサ、点火、EGR系、触媒などの正常作動を確認するとともに機能不良や劣化があれば表示して警告する。それによって排ガス性状の悪化を抑制する。これ

には単純なコネクタの接触不良や断線などから高度な触媒劣化を検知することまで含まれる。触媒の劣化が走行中に検知できるようになれば、環境保全の観点から極めて意義が大きい。欧米では既にOBDの研究開発が進められているのに対し、わが国ではまだ本格的な取組みは少ないように見受けられ、高度なOBDシステムの開発が早急に行われる必要がある。

## 5. むすび

計測によって得られる情報は科学の進展に寄与するだけでなく、産業や日常生活でも大きく役立っている。技術開発においては計測結果に基づいて製品の性能を知り、それによってより良い製品に改良していくのである。特に1970年代に目覚ましい進展を遂げた半導体集積回路やマイクロプロセッサとタイアップして測定技術の質的変革がもたらされた。自動車ではエンジン、トランスミッション、運転、サスペンションなどの機構の一部に組込まれ一体になって最適制御、安全性確保、快適性向上に役立つところとなった。今後はまだ計測と制御が適用されていない新しい方面への開拓がなされ更なる進展があると確信できる。

---

## < 著 者 >



池上 詢  
(いけがみ まこと)  
京都大学名誉教授  
福井工業大学教授  
機械工学科

1963年京都大学大学院博士課程学修退学，同大学工学部助教授，1978年同大学工学部教授，1999年同大学名誉教授，福井工業大学教授として現在に至る。現在，中央環審議会大気環境部会長。専門は内燃機関，燃焼工学，大気汚染物質の発生と制御。