

# 計測の魅力：新たな原理と活躍の場を求めて

安藤 繁\*

\* 東京大学大学院情報理工学系研究科 東京都文京区本郷 7-3-1  
 \* Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, Japan  
 \* E-mail: Shigeru\_Ando@ipc.i.u-tokyo.ac.jp

キーワード：物理情報変換 (transduction), 変換現象と構造 (transducing effect and structure), モデル同定 (model identification), 間接計測 (indirect sensing), 逆問題 (inverse problem), 特徴抽出 (feature extraction), 初期知覚 (early perception), 統合と融合 (integration and fusion).

JL 0008/24/6308-0449 ©2024 SICE

## 1. 計測の魅力とその活動

計測における発明と技術開発は実に魅力的な世界である。鋭い観察と着眼、創意工夫と完成度を高める不断の努力が計測技術の本質をなす。個人の観察眼、関心や問題意識に根ざした活動が研究開発の原動力となる。開発に充実した体制が必要なのは当然としても、その中心にいるのはすべてを把握し、洞察力と行動力に優れた人物が1人か2人、計測原理に名前を残した人もいる。このような発明や開発は、計測器の長い歴史の中に、また現代の研究開発においても、数多く見いだすことができる。

この魅力的な計測を一層発展させるため、これまで努力が注がれてきたこと、これからますます必要となることを考えるのが本特集の目的であろう。計測の新たな原理と活躍の場を求めるとは、大きくは、広げること、深めること、応えることの三面から捉えられる。

**計測を広げる** — 新分野が生まれるところ、計測がある。計測が可能になることで、その分野が生まれ発展が持続する。先端物性・化学、医学、バイオ、デバイス等々、生物を含め「物」に関係する分野に先端が付く領域はすべてそうであろう。それぞれは非常に高い専門性を要する領域であり、横断的な計測技術者だけでこれらの領域に取り組むのは無謀であり有効ではない。自身の関心の幅を広げ、積極的に交流しつつ協力体制を構築し、貢献しつつ維持してゆくことが、計測技術者の活動の一部として求められる。

**計測を深める** — 実証と測定の手段の高度化、新たな現象の発見、理論によるモデル構築、新たな視野に基づく体系的把握や推論。荷重積分法<sup>1), 2)</sup>は、種々の信号解析や微分方程式モデルをもつ計測法の高度化を可能にする。波動場、電磁場、粘弾性場、流体場の情報伝達構造としての着眼も注目される。計測に共通する方法論の深化は、すべての領域に横断的に、その視座を広げ、現象に対する洞察力を高め深める。この流れは、理論が先導する時代の再来を予感させる。

**計測で応える** — 技術の変化、製造方法の進化、需要の高度化に対応し、新たな計測技術の創出によって応える。マテリアル、半導体、医薬、バイオ等々の製造プロ

セスの進化、品質要求と検査の自動化、オンライン化、高速化、感性に応える検査、人の動作、表情、感情の実時間把握、資源循環、情報化、持続可能等々、現代の産業や社会の根幹にある問題の解決に、それらのキーとなる変量の定量化と客観化により貢献する。量的には十分とは言い難い計測の基礎と応用開発体制の中では、人材と研究体制の適切な流動性が重要な役割を果たすであろう。組織の態様は変化する。たとえば新興のフェーズ、安定成長のフェーズ、継承のフェーズ等。人材と研究体制の流動性にも、社会や組織とのバランスの中で適切な時定数が望まれる。才能に根ざした個性的活動を得意とする計測技術者にとって、適切な時定数をもった流動性は、当人にも組織にも社会にも大きなプラスを生む。

## 2. 計測の原理とその実現

**物理情報変換** — 外界から情報を取り出す仕組みの発見と拡充、計測の学問としての発展の根幹をなす。つぎに示す変換現象と変換構造の論点に加え、物理量の単位の構築や維持、実現容易で安定で精度の高い変換方法、雑音や環境に特有な妨害、人為的な誤差の徹底的排除<sup>3)</sup>が追求され続ける。

**変換現象** — 量子物性、フォトンクス、スピン、界面、マイクロ、ナノ、バイオ等々、広範な学術研究領域で物理情報変換の新現象が次々と発見されている。これらの領域の発展のために、またその成果を有効に役立てるために、計測の果たす役割は大きい。分野横断的な計測技術者として、関心の広さや柔軟かつ横断的な協力関係の構築と維持が求められる。

**変換構造** — 計測技術の本質で、現象の違いには依らない共通性をもつ。対称性、差動、自動平衡、直交、共鳴、自励振動、変調、相関等々、古典的計測法に優れた変換構造の例が無数に見られる。現象に対する独自の視点から新たな変換構造のヒントとなる。生物の感覚系も、深く見れば見るほどそうである。

**センサ** — 装置やシステムの中に部品として組み込まれて、情報の入力を担当する。大量消費、安価、小型、安定、長寿命など、伝統的計測器とは重視される視点に異なるものがある。そこに埋め込まれる物理情報変換の機構は、計測技術の凝縮ではあるが、実現手段や製造技術

は、半導体、微細加工、化学、バイオ等々、規模においても専門性においても大きな広がりが必要ならぬ。計測技術者として立ち位置と活動領域の幅が問われる。イメージセンサや聴覚センサなど、筆者はいくつかの試みを行った1人である<sup>4)</sup>。わくわくし協力しあう楽しさの反面、産業化や普及に向けて長い研究開発を継続する困難さは並大抵ではない。

**現象の数理モデルとその同定** — モデルパラメータの中に計測すべき量が含まれる場合がある。モデルの多くは微分方程式。たとえば質量は運動方程式の2次微分の係数、オプティカルフローの速度は移動を記述する偏微分方程式の係数である。システム同定と共通する方法論であり、制御の問題との関係も深い。計測では、モデルパラメータは時間的、空間的に変化するのがほとんどで、計測の目的はこれだからとも言える。モデルが支配する場を有限な領域で観測し、時間や場所を変えて推定を繰り返すことで、モデルパラメータや入力の変化に対応する。筆者らの荷重積分法<sup>1), 2)</sup>はこのための方法論である。

**間接計測と逆問題** — 直接には測れない対象を、関連する量のモデルと観測結果から数値的逆解析によって測定する。医用診断のCTや合成開口レーダ<sup>5)</sup>などの画像再構成問題として始まった。応用分野として非破壊検査、医療診断、構造物の劣化、災害の監視と予知、情報担体として波動場、音響場、超音波、電磁場、粘弾性場など多岐にわたる。出力から入力を推定する場合、逆問題と呼ばれ、伝達系が情報損失を伴う場合の扱いが焦点となり、超解像問題として初めて導入された<sup>6)</sup>。近年の話題は知識導入の枠組や圧縮センシングにある。

**情報ネットワークにおけるセンサ** — 現代は、人による観察・思考の結果に加え、膨大な情報量の膨大な数のセンサが情報の源となり、それらが2次、3次と加工されつつネットワーク上に溢れている。この状況にセンサ側としてどのように対応し生かすべきか。問題の本質に近づく重要な着眼はネットワーク化計測<sup>7), 8)</sup>である。測ったデータと測られる対象との情報的リンク (ID) により、情報の価値が格段に増大し、情報の整合性の維持が可能になり、情報の活用が量的にも質的にも進展する。現代の産業や社会に必須の情報化の枠組と見るべきである。

**感性情報の定量化** — 手触り、光沢、木目(きめ)、食感<sup>9)</sup>など、定量化が困難な対象にその枠組を構築する。人間の感性や嗜好への計測技術の発展である。外観検査、塗装、印刷、異物、汚れ、キズ(疵、傷)等々、視覚等による検査の自動化と品質改善が進展する。満足感や高級感という付加価値を増強する。

**認識のための特徴抽出と選択** — 情報が溢れる中で必要な情報を選び出すことが問題の本質という状況がある。生物が生存のために視覚や聴覚を利用するのがその典型である。常に膨大な情報が降り注いでいるが、そこから

察知する危険や捕食対象の情報は格段に凝縮されたものである。本質的な情報の抽出と選択に、何か統一的な原理はないのであろうか。計測の究極の問題とも言える。筆者の研究の多くは、この問題の考察の結果として生じたものである。

**生物模倣** — 生物の感覚系はセンサの最も素晴らしい手本である。現時点の理解を精一杯表現する数学モデルを構築し、その工学的実現を図る中で、見落としていたり理解の及ばなかった新たな仕組みが見えてくる。これがつぎの考察と理解と新たな実現につながってゆく。

**統合と融合** — 複数のセンサ情報を組み合わせて有用な情報を取り出す、経験や知識のもとでセンサ情報を補い推論し活用する。センサフュージョンとも呼ばれ、このための統一的な方法論を目指す。生き物は感覚を通して環境に接し、活動領域を広げ、自身の世界を形成してゆく。工学システムにおいても、その自律性の源はセンサ情報の高度な活用にある。

(2024年5月27日受付)

#### 参考文献

- 1) 安藤 繁: 荷重積分法: オプティカルフロー検出から周波数推定へ、計測と制御, **51-9**, 10/17 (2012)
- 2) 安藤 繁: 有理指数信号: 計測パルス波形の統一モデルとその短時間厳密パラメータ推定、計測と制御, **62-12**, 731/736 (2023)
- 3) 安藤 繁: 自己矛盾を含まない数値偏微分演算子とその応用、計測と制御, **40-11**, 783/789 (2001)
- 4) 来海, 安藤: 時間相関イメージセンサ—高度な実時間パターン計測を実現する画像センサ—、計測と制御, **47-1**, 10/17 (2008)
- 5) 安藤 繁: 合成開口レーダと間接計測技術、計測と制御, **22-2**, 209/218 (1983)
- 6) 安藤, 土井: 超解像 —その原理と算法—、計測と制御, **22-9**, 828/836 (1983)
- 7) 安藤 繁: 資源循環社会実現のためのネットワークセンシング技術、計測と制御, **40-1**, 43/49 (2001)
- 8) 安藤 繁: センサのネットワーク化の目的・技術要素・発展方向・研究課題、計測と制御, **43-7**, 580/586 (2004)
- 9) 小野, 安藤: 食品のテクスチャー評価におけるシステムインテグレーション、計測と制御, **44-11**, 787/792 (2005)

#### [著者紹介]

あん どう しげる  
安 藤 繁 君 (正会員, フェロー)



1974年東京大学工学部計数工学科卒業。79年同大学院工学系研究科計数工学専攻博士課程修了。工学博士。79年同工学部計数工学科助手。80年同講師。84年電気通信大学電気通信学部電子情報学助教授。87年東京大学工学部計数工学科助教授。96年同大学院工学系研究科計数工学専攻教授。2001年より同情報理工学系研究科システム情報学専攻教授。16年同名誉教授。視覚・聴覚・触覚センサ、画像・信号処理、光・音響計測等の研究と教育に従事。現在も理論面を中心に研究は継続中。計測自動制御学会論文賞(1979, 87, 94, 97, 2013年度)、同著述賞(2001年度)等受賞。