



科学計測のための データ処理入門

科学技術分野における計測の基礎技術

南 茂夫 監修 河田 聡 編著

見本

CQ出版社

第1章

センサフュージョン、シングルチャネル検出法、
ハーフネーテッド計測など

科学的な計測と データ処理の考え方

「科学計測」とは、最先端の科学技術分野での基礎・応用研究、あるいは先端的技术現場における研究開発などにおいて駆使される各種計測技術のことをいう。これは、産業や医学分野で定着している工業計測や臨床医用計測などの実用計測技術の源ともなるもので、研究的側面だけでなく、実用的側面も強くもつ重要な技術である。

この科学計測も、コンピュータや計測器の処理能力の向上により、考え方が大きく変わってきた。本章では、現代の科学計測のポイントといえる計測の多角化(センサフュージョン)、選択化(シングルチャネル検出法)、非線形効果の利用による選択的検出法と間接的検出法について、解説する。

1.1 データ処理の役割は科学計測の第六感

人間には五つの感覚器官、つまり、目(視覚)、耳(聴覚)、鼻(嗅覚)、舌(味覚)、皮膚(触覚)がある。そして、マイクロフォン、フォトディテクタ、ガスセンサ、各種化学センサ、圧力センサなどの計測機器は、それらを人工的に作ったものであるといえよう。

ところがさらに、これら五つに加えて人間には、六つめの感覚である「第六感」がある。これは、ほかの五つの器官(ハードウェア)は異なり、それらから得られるデータを総合的に整理して、かつ過去に得られたデータを解析して結論を導出するソフトウェアであるといえよう。

人はこれを「勘」と呼ぶが、決していいかげんなものではなく、けっこうよく当たる。それは、豊富な過去のデータの蓄積を用いた解析が役立っているからである。科学計測(Scientific instrumentation)における「データ処理・解析」は、まさにコンピュータによる第六感をめざすのである。

計測によって得られる情報はつねに不十分で、そのデータを処理・解析するには、大胆な推論が必要である。不足した情報から、あるいは雑音に埋もれて汚れた信号から、いかに正しい答を得るか、あるいはいかにもっともらしい答を導くか？それが、データ処理・解析の役割であり、妙味でもある。

第六感を感じるためには、最初に、正しいデータの整理と分析が必要だが、それに加えて、計測の方法も重要である。図1.1は、一人の少年が見たことのない物体(恐竜)を計測して分析しようとしているところである。

まず、遠くからぼんやり眺めるが、そのうち、近づいて虫眼鏡をもってきて見たり、違う向きからも眺めてみる。本物かどうか騙されないように、見るだけではなく触ってみる。生きているかどうかわからなければ、声をかけて答えがあるかどうか耳をすませて聞き、応答がなければ、叩いたりつねったりして反応をみる。

ただし、あまり強く叩いてはいけない。「死にかけている」ようならば、強く叩くことによって本当に死んでしまうかもしれないからだ。

ここに、科学計測における新しいデータ処理のヒントがたくさん隠されている。複数のセンサを用いて得られる複数のデータソースから多角的・統合的に計測データを解釈すること(センサフュージョン)や、センサ側から能動的に刺激を与えて応答を見るというアクティブフィードバックなどといった基本的な概念を、これから述べる。

図1.2は、コンピュータによる計測データの処理・解析の構成図を示している。図1.2(a)は従来の計測・データ処理解析法であり、図1.2(b)はこれからの方法のコンセプトを表して

図1.1 正しく計測するためには……

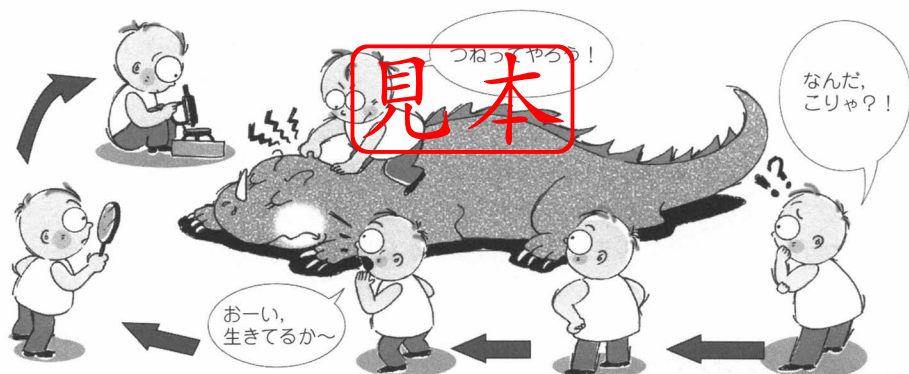
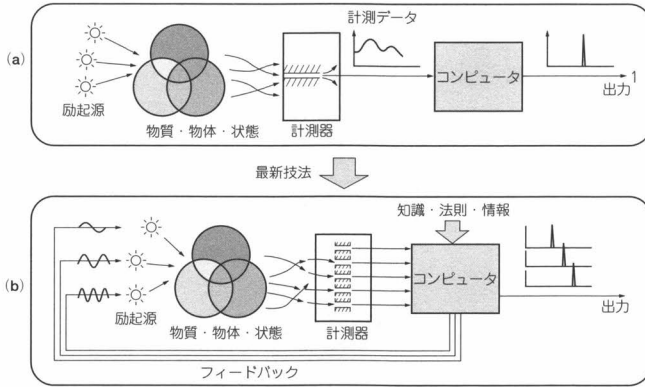


図1.2 科学計測システムにおける昔と最近の技法の違い



いる。そして、図1.2(b)は計測対象の物質・物体・状態を未知の物体である恐竜に置き換え、コンピュータを少年に置き換えると、まさに図1.1の例と一致する。

従来の計測〔図1.2(a)〕では、コンピュータ処理がリアルタイムでは追いつかず、このようなフィードバックシステムは構成されなかった。

本章では、このような新しい計測学における要素的思考方を一つずつ解きほぐしていこう。

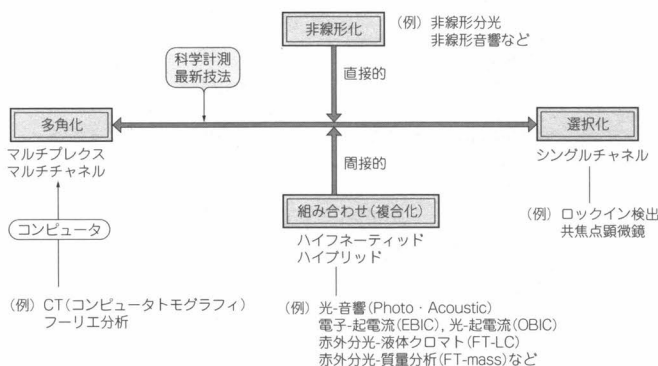
1.2 計測の多角化「センサフュージョン」

では具体的に、科学計測にはどのような特徴と形態があるのか。新しい科学計測には、図1.3に示すように、四つの異なる方向がある。計測の多角化、選択化、非線形効果の利用による選択的検出法、間接的検出法の四つである¹⁾。ここでは、計測の多角化から順に、それの一つずつ述べていくことにしよう。

恐竜の計測の例では、少年は恐竜を計測する手段として、目(みる)と手(触る)と耳(聞く)などのセンサを使った。このように、**見本** ~~たくさん~~のセンサを使って多角的に計測することが科学計測の基本である。単一の検出器のみで測定する必要はない。

1970年代後半に、集団検診されたX線写真からコンピュータ画像処理によって自動的に癌を発見するという研究が活発に行われていた。集団検診された何百枚もの写真を手際よく1枚ずつ眺め、その中の怪しい影を次々と調べていくことは、医師にとってたいへんな労働であり、医学とはかけ離れた仕事である。もし、コンピュータがその役割を担ってくれるなら、画像処理のまさに良い応用といえる。しかし実際には、このようなプロジェクトが成功して

図1.3 科学計測の技法と形態



実用化になったという話は聞かない。

これは、先に述べたようなセンシングの多角化が不十分だったからである。X線写真における癌情報は、カルシフィケーション(石灰化)による白く小さな丸い影である。しかし、癌以外にもこのような影はあり得るし、癌が決まった形とサイズだとはかぎらない。つまり、生きた恐竜であるのかどうかを知るには情報が不足しているわけである。

そうすると、X線写真以外のセンシング技術を加える必要があろう。癌の診断をするのに、X線写真だけをいくら眺めてもダメである。血液検査や尿検査、問診、超音波診断、胃カメラ、MRIなど、あらゆる計測結果を総合的に判断するのが、もっとも信頼性が高い。

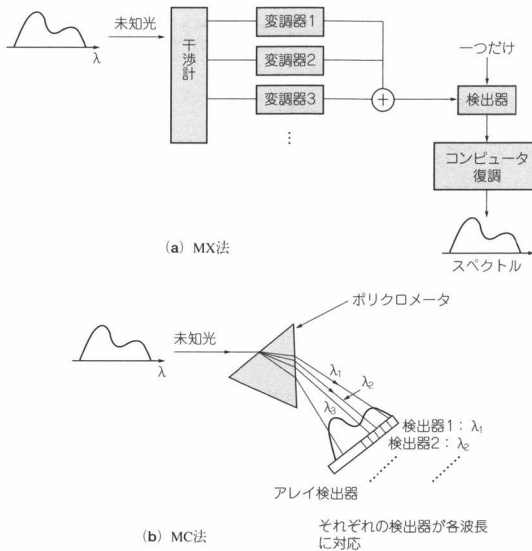
このように、複数の計測データを混沌とした状態でたくさんのセンサを使って計測し分析することを、**センサフュージョン**と呼ぶことがある²⁾。

科学計測の代表的な例として、物質を色(可視光とはかぎらず、多くの場合、赤外や紫外スペクトル)によって同定する**分光分析法**がある。分光分析においては、単一の波長(振動数)の光の強度のみを測定するのではなく、**多波長の信号を同時に計測して分析する**ほうが、効率も信頼性も高い。

このとき、時間的に各波長を異なる**変調周波数で変調**し、一つの検出器を用いて検出・復調する**マルチプレックス検出法(MX法)**：フーリエ変換分光法がこれに対応する)と、複数の光検出器を並べ(アレイディテクタと呼ばれる。CCDがその代表)、各波長を異なる検出器で独立に同時に検出する**マルチチャンネル検出法(MC法)**：ポリクロメータがこれに対応)の二つがある(図1.4)。

ここで、MX法とMC法のどちらが望ましい計測法であるかは、計測者にとってつねに重要なテーマである。興味深いことには、その優位性は計測する光の波長域によって異なり、

図1.4 MX法とMC法



赤外光の分光に対してはMX法が、可視・紫外域の分光に対してはMC法が有利であるとされている。

なぜ、このような違いが生ずるのかは、雑音の性質による。赤外領域においては、検出器において発生する熱雑音が測定データの雑音を支配し、可視・紫外領域では、究極にはフォトン自身をもつ粒子性(光子雑音)が測定データのばらつきを支配するからである。これは、MX法は加法的雑音に対しては強いが、乗法的雑音に対しては弱いことによる。これらについては、第2章で詳しく述べる。

さて、恐竜を観察した少年は、最初は遠くから、そして近づいてぐるっと回って、最後には顕微鏡を使って観察した。これは、3次元物体を計測する際の常套手段である。3次元物体の内部計測として知られるX線CTは、先のフーリエ分光法と同様のマルチプレックス検出法であり、一方、ステレオスコープ(立体視)はマルチチャネル検出法であるといえる。

一般に、マルチプレックス検出法は、検出後のコンピュータによる計算(線形変換: フーリエ分光ならフーリエ逆変換, CTならラドン逆変換)が必要であり、このような線形変換を受け入れるためには、雑音が加法的でなければならない。

第2章

カオス/フラクタル理論が重要になってくる

信号と雑音の 発生メカニズム

これまでの計測学やデータ処理の教科書では、「測定すべき信号には雑音に加わって計測されるのでそれを除去することが必要である」と説明されている。たしかに、どんなに高級な計測器も完璧ではなく、必ず雑音を含んでしまう。

本章では、この信号と雑音の理論を述べるわけだが、これまでの教科書にあるような、決定論的な信号と確率論（あるいは確率過程論）的な雑音について論じるのではなく、それらがともに同じ発生のメカニズムをもっていながら、まるで別の取り扱いをしてもよいこと、あるいは、新しい科学計測学においてはそれらを共通に取り扱うことが必要となりつつあることなどについて説明する。

そこに含まれるカオス、フラクタル、不確定性など、現代科学の存在を感じ取っていただきたい。従来の現象論的取り扱いによる雑音の理論ではなく、発生メカニズムをその理論として考える。

2.1 信号と雑音は同じ生まれ —— 身長データの精度とカオス

身近な例として、身長の測定を**見よう**。たとえば、デジタル表示機能をもつ身長測定機によれば、ある人の身長は174.8215cmと表示される。しかし彼は、ふつう自分を175cmであるという。それは、身長測定機による測定結果がそんなに正確でないことを、みんなが知っているからである。

たかが身長計に、 $0.0001\text{cm} (= 1\mu\text{m})$ の精度などはあるはずがない。検出系のエレクトロニクスの雑音は、それ以上の値の変動を与える。しかし、この身長計のA-D変換器は、雑音であろうと信号であろうと、とにかく7桁の精度を示してしまう。

では、最高級の低雑音回路からなる身長計を使えばよいのか？それもあまり意味はない。

測定場所の高度や測定時の大気圧による重力、大気温度や湿度によって、あるいは建物の振動などによっても身長計は誤差をとまなう。

では、さらに完璧な測定環境(超高真空・極低温・無重力)中に試料(人間)を入れれば、高精度にその人の身長測定が行えるのだろうか？ もちろんナンセンスである。

計測器における雑音や、測定時における環境や外乱の影響に加えて、被測定対象自身が揺らいでいる。朝に測る身長と夜に測る身長が違ふことはよく知られているが、わずかな測定時間内にも身長は伸び縮みしている。あるいは、細胞レベルでは、もっともっと複雑に生命活動を繰り返しているのだから、絶対的な身長や体重といった概念には意味がない。

揺らぎは雑音ではなく、信号そのものである。そして、信号の値は、測定器の測定時刻(タイミング)と測定時間(長さ)によって変わる。

では、揺らぎをとまなう信号は、どこから生まれるのか？ ある瞬間の信号は、一瞬前の過去と無関係には存在しない。身長も含めて信号は、確率論的には期待値をとらなければ値を確定することのできない確率過程であるが、それは時間的にまったくランダムというわけではなく、必ず過去を引きずっている。これを**因果律**という。

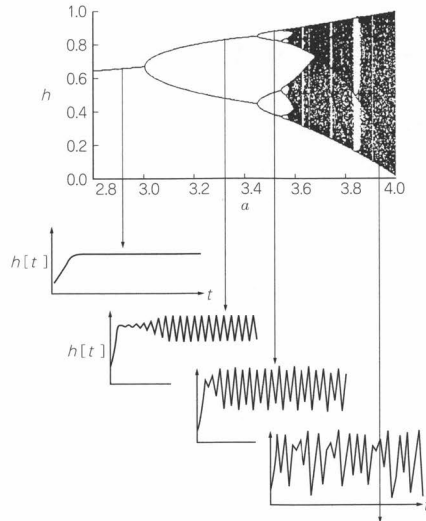
時間 t の信号(たとえば身長) $h(t)$ は、その少し前の過去の身長 $h(t - \Delta t)$ に依存しており、身長値が飛び飛びに不連続な値をとることはない。このような因果律は、1次式で表されると減衰・増加や周期性が現れるが、2次式以上の非線形式で与えられると、さらに複雑にさまざまな信号が発生する。たとえば、

$$h(t) = ah(t - \Delta t) - bh^2(t - \Delta t) \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

はもっとも簡単な非線形信号発生源である。ここで、 $a = b$ とすると、システムはさらに簡単になるが、このような簡単な式から複雑な信号が作られるのである。

式(2.1)の $a = b$ として a の値を変えると、**図2.1**に示すように、およそまったく異なる系から生まれてきたかのような、互いに異なる信号系列が生まれる。 a が0~3では信号は消えてしまい、 $a = 3 \sim 3.4$ では単一周波数の周期性をもつ。ところが、 $a = 3.4 \sim 3.5$ では四つのレベルをもつ二つの周期信号の組み合わせとなる。このあたりまでの領域では、フーリエ変換を用いた周波数解析が説得力をもつ。ところが、4あたりでは**図2.1**において完全な雑音状態となっている。いわゆる**カオス状態**である。

このように、信号と雑音はどちらも、同じ式(2.1)から発生する。このほんのちょっとしたパラメータ値の違いで、信号に見えたり雑音になったりする。第2、第3の周期的信号が発生する領域では、信号の予測が簡単であり、70年周期で地震が起これとか、まことしやかにいわれるが、横軸のパラメータ a が少し変わるだけでカオス状態になるのであって、フーリ

図2.1 式(2.1)の a に対する出力信号の違い(周期状態, カオス状態)

エ解析がいかに心許ないものか、よく気をつけてかからなければならない。

状態の急な変化とさらにその臨界点あたりの不安定な変化は、気体から液体、固体の間の転移(相転移)、アモルファスから結晶化、最近の超流動や超伝導、生命現象などにおいて非線形な複雑系としてよく知られるが、それらはパラメータ a を温度や圧力などとして、式(2.1)のような非線形式で表現される因果律に従うのである。

ここに、信号と雑音は別の物理・数学ではなく、同じ式をもとにして与えられるものであると結論づけることができる。信号と雑音は、本当に紙一重なのであり、周期信号も白色雑音も同じ式(2.1)で与えられる。コンピュータで色々なデータのシミュレーションをするとき、重要なプログラムである乱数発生プログラムも簡単な非線形離散式で与えられる。

$$I_{j+1} = aI_j \pmod{C} \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

ただし、 $a \pmod{\beta}$ は a を β で割ったときの剰余を表す。

式(2.1)はカオス理論の最初に出てくる式と同じで、閉じられた島におけるある年 t の鼠の総数を $h(t)$ 、年間増加率を a としたときに、 Δt を1年とすれば、

$$h(t + \Delta t) = ah(t) (1 - h(t)) \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

で与えられる¹⁾。

第3章

フーリエ変換からウェーブレット変換,
MARS(移動自己回帰系)の基礎

変化する信号の 周波数解析

変化する信号を追いかけて、その性質を解析するもっとも一般的な手法は、周波数解析であり、そこではフーリエ変換が活躍している。本章では、フーリエ変換に関する基礎知識を読者がもっているものと仮定し、フーリエ変換の適用限界とそれをエレガントに克服して現実の計測データに刻々対応することのできる周波数解析手法について述べる。ウェーブレット変換やMARSなどの新しい解析法についてもわかりやすく解説する。

3.1 スペクトルとフーリエ変換の復習

フーリエ変換は、図3.1の系から説明がはじまる。これは、ばね定数が k のばねに質量 m のおもりがぶら下がっているとき、これをひっぱって離すと、図中に示すようにおもりの位置が周期的に上下することを示す物理実験の図である。ばねの振動方程式は、上下方向を y 軸にとり、時間軸を t とすると、

$$m \frac{d^2 y(t)}{dt^2} = -ky(t) \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

なる2次微分方程式で表され、その一般解は、

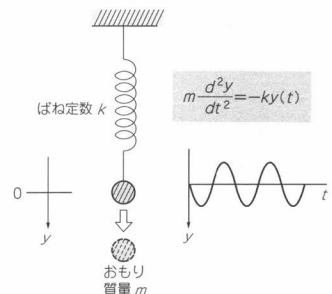
$$y(t) = ae^{j(\omega t + \phi)} \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

である。式(3.2)は周期関数であり、実部のみなら、

$$y(t) = a \cos(\omega t + \phi) \quad \dots\dots\dots (3.3)$$

となる。ここで a と ϕ は任意であり、最初にばねをひっぱった位置と最初にばねを離したときの速度を初期値として、それらの値は決まる。 ω は振動の周波数であり、

図3.1 質量 m の物体の運動方程式



見本

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \dots\dots\dots (3.4)$$

で与えられる。

フーリエ変換とは、この式 (3.3) あるいは式 (3.2) で与えられるような波形から、その周波数 ω 、振幅 a そして位相 ϕ を求める変換法である。柱時計の振り子が、地球の自転・公転、あるいは地震の発生周期、株価の変動など、いろいろな時間的に変化する信号を周波数解析するとき、この方法が用いられる。

もちろん、このような簡単な系だけでなく、たくさんのばねが組み合わされて絡みあったような系からの出力を解析することのほうが、より一般的なフーリエ変換の仕事である。たとえば、音声認識 (speech analysis) においてフーリエ変換が用いられるが、音声は声帯というばねの組み合わせからの出力である。

ここで大切なことは、フーリエ変換が適用できるのは式 (3.1) の解である式 (3.2) [または式 (3.3)] であり、それは無限に繰り返す周期関数であり、繰り返さない信号にフーリエ変換を適用することは、まちがいか近似のいずれかであるということである。

3.2 フーリエ変換の定義

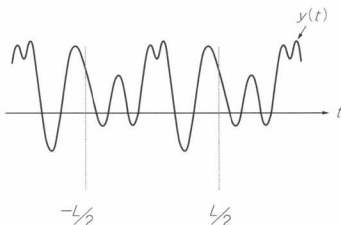
信号 $y(t)$ をフーリエ変換する定義式は、

$$Y(\omega) = \frac{1}{L} \int_{-L/2}^{L/2} y(t) e^{-j\omega t} dt \dots\dots\dots (3.5)$$

で与えられる。ここで $-L/2$ 、 $L/2$ は、信号の繰り返す1ユニットを表し (図3.2)、式 (3.5) の意味は、その範囲の中で関数、

$$e^{-j\omega t} = \cos \omega t - j \sin \omega t \dots\dots\dots (3.6)$$

図3.2 繰り返す信号の1ユニット



見本

を $y(t)$ に掛け算して、そして積分することを意味す

もし、信号が、

$$y(t) = \cos \omega_0 t \dots\dots\dots (3.7)$$

だと、

$$Y(\omega) = \frac{1}{L} \int_{-L/2}^{L/2} \cos \omega_0 t (\cos \omega t - j \sin \omega t) dt \dots\dots\dots (3.8)$$