

Guest Forum

特集寄稿

第2回 堀場雅夫賞 審査委員講演

エンジニアリング スペクトロスコピーへの道 —機器開発の軌跡を辿り未来に繋ぐ—



南 茂夫
Shigeo Minami

大阪大学
大阪電気通信大学
名誉教授

1950年以来、産学協同の形で始めた分光機器の開発研究にこだわり続け、紫外から遠赤外にわたる分光計測系を対象に、光源部、分光光学部、検出処理部など各種要素技術並びにそれらをシステム化・情報化手法で融合する研究を続けてきた。進歩する周辺技術の成果を取り込みつつ、応用面と機器間の相互関係を実用技術として体系化するエンジニアリングスペクトロスコピー（分光工学）の流れを、体験談を交えながら紹介する。

はじめに

光に魅せられ、分光計測に軸足を置いた装置開発の研究にこだわり続けてきた。装置開発では、図面を書いて発注して町工場で作ってもらうというようなことになり、一気に3～5年経ってしまう。時によっては、装置完成まで全く論文が書けないという宿命がある。大学の人間が一番嫌がる仕事をやってきたわけだが、好きでやってきたことなので後悔はない。大阪電気通信大学を4年前に退職し、現在はコンサルタントとして、産業界の技術者の方とお話をして時を過ごすのを楽しみにしている。

恩師の吉永先生から「分光光学はこれから応用分光光学の方に進まなければならない。」と言われた若い時に、「私は更にもっと底辺の実用分光光学の線でやります。」と言ったことがある。その考えを現在でも持っていて、産業界・医学界の現場はもちろんのこと、鑑識分野など広くホームランドセキュリティの方面まで分光技術は活躍できるのではないかと、未だに模索している。

ここでは50年間やってきた過去の話をするが、その時々でどれだけの科学計測エンジニアが技術力を発揮したか、また周辺技術をいかに消化しながら分光機器の開発に携わってきたかを含めて、“未来を見つめつつ過去

を振り返る”という気持ちで話を進める。

分光機器開発研究50年の道程

精密機械、即“カメラ”“時計” “ミシン”の時代

戦争中のため旧制中学の4年と5年生が同時に卒業した年に、大阪工専(旧制)の機械工学科(精密機械専攻)に入学した。少年時代からの飛行機好きが高じて、航空計器を専門にして海軍に入って技術士官になろうと思いい、技術依託学生の願書を出したが、その試験を受けるまでに敗戦になった。幸い戦後産業復興の一環として、日本人の手先の器用さを付加価値とするため、スイスを見習った精密機械産業振興策に白羽の矢が立てられた。当時の精密機械とは、カメラ、時計、ミシンの3つである。アルバイトで腕時計の修理をしたこともあり、細かいメカが好きで点目移りしたが、最終的にはカメラのレンズに秘められた神秘さとメカの多様さに惹かれ、また風景写真や人物写真などアートとも直結する人間味溢れた技術という魅力もあり、光学器械を専門とされていた中村常郎教授(のち北海道大学教授)の研究室に入って卒業研究を行った。時計やカメラはすべて一般の人たち

が身近で使う精密機械という特殊性を持っている。カメラの場合は、人間のセンサが集中している顔に近い所で使う精密機械ということで、メーカーではカメラボディの革張りの匂いまで設計していた。魅力一杯の光学研究室であったが、卒研のテーマは“レンズの反射防止膜処理”という地味なものであった。レンズは一面で4%の反射損失が起こる。双眼鏡などでは何重にもレンズを使うので、極端な場合、目に到達する光量は半分以下にもなってしまう。海軍では、双眼鏡は水平線上に現れる敵艦を早く見つけるために重要な兵器で、ドイツの双眼鏡には反射防止処理が施されていた。レンズの反射防止膜を蒸着で作る技術は、当時の最新のハイテク技術であった。卒業の時に、「生涯光学の道を歩みたいなら、大阪大学精密工学科の吉永弘教授の研究室に行けば。」との恩師中村教授の一言で阪大を受験することになる。この時、将来が決まってしまったといえる。

戦後復興期に輸入された分光機器

大阪大学吉永研究室では上記した研究前歴が知れていたのか、光学薄膜の研究を期待された節もある。しかし、テレビを自作するなどアマチュアエレクトロニクスに凝っていたこともあり、光だけでなくエレクトロニクスも加えたシステム化がおもしろいと考えて、光電分光測光法の研究を選ぶことになる。1950年頃から、エレクトロニクスで武装された紫外から赤外に至る各種の自動化分光機器が米国から輸入され始め、そのデザインの美しさや機構設計の巧みに驚嘆したからでもある。米国では戦時中それら自動化機器が既に現場分析に使われていた。当時の日本の分光器は、スリットとプリズムに写真乾板を組み合わせたというワンパターンで作られていた。当時、物理実験技術で重要なのはガラス細工と写真技術であったので、特に写真技術を嫌というほど先輩から仕込まれた。暗室での写真乾板の表裏の見分け方では、「舌でねぶれ。」などと教えられたが、今から考えると長

閑な時代であった。図1は大学卒研時(1950年)の写真で、戦時中陸軍の軍事研究に使われていた鳥津製作所製の分光写真器をもらってきて実験中の1コマである。

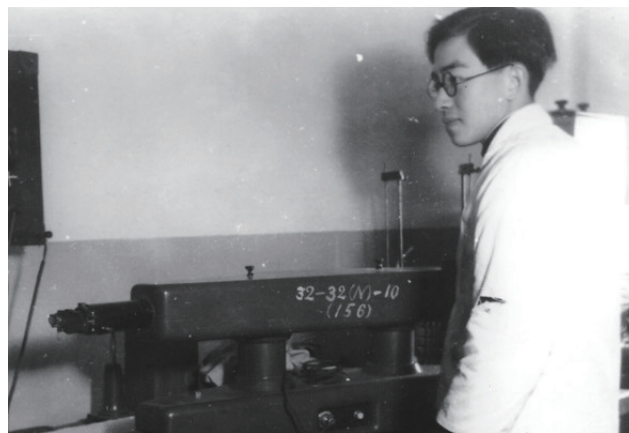


図1 大学卒研時(1950年)の筆者

紫外可視分光光度計Beckman DU(図2), ARLのカントメータ(光電発光分光分析装置), GEのHardy型自記可視分光光度計などの多様な分光機器が、戦後復興期に輸入された。これらの装置は光電管や自動制御系を使い、それぞれ極めてユニークな分光機器であった。Beckman DUは、枯渇が進んでいる水晶原石を節約するため30°のハーフプリズムを使い、裏面ミラーで折り返して60°と同じ効果を持たせたリトロタイプで、世界中に1万台ほど販売された。Hardyさん(MIT)が作ったGEの可視分光光度計は、ガラス細工と写真技術でやってきた身には、まさに驚きの装置であった。

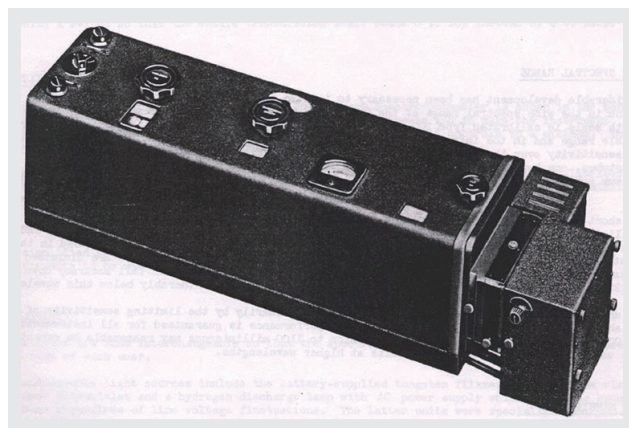


図2 Beckman DU
Beckmanは、1998年、Beckman Coulterに社名変更された。DUは、Beckman Coulter, Inc. の登録商標。

図3に光学系を示すが、ミラーを置いた片開きのスリットを中間スリットに持つスマートなダブルモノクロである。1番目のロションプリズム^{*1}で常光線偏光分を取り出し、続くウォラストンプリズム^{*2}で2方向偏光成分に分けたのち、連続回転する2番目ロションプリズムに導いて交互に積分球内の試料を交照する方式をとっている。

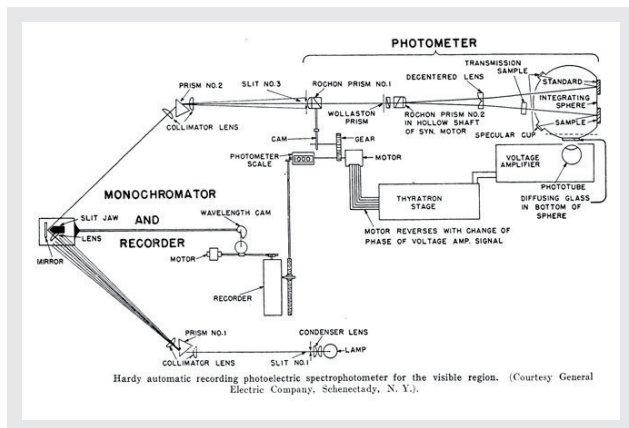


図3 GEのHardy型自記可視分光光度計

このアイデアは1929年に出て、製品になったのは1938年である。交照出力の強度に差が出るとフィードバックさせてサイラトロンを使ってモータを回し、1番目のロションプリズムの回転角を制御してゼロバランスをとる。自動制御技術がまだ体系化されていなかった時代に、ゼロメソッドのサーボ制御技術をフルに使った装置を実現している。その頃、アメリカの技術にはとても追いつかないのではと思わせた名機であった。

次に赤外の分光機器が入ってくるが、とりわけ赤外では日本は手も足も出ない。Baird, Perkin-Elmer, Beckmanなどの装置が輸入されたが、これらは光学系も光の強度比率を自記させる方法も全て異なる。我国各社とも外国品のデッドコピーを必死になって続ける時代、他社のまねをしないで自分のやり方に固執する欧米の技術者がまぶしく見えた。精度は多少落ちるが使い勝手が非常に良いなどの特徴を巧くPRする割り切り方にも、文化の差を垣間見た気がする。

これらのさまざまな装置が国の研究機関に導入されるたびに見学会が開催され、国内メーカーも参加した。分析化学会ができる前の1950年から、応用物理学会主催の“分光分析講習会”が毎年行われたことは、その時代は光学・分光学が応用物理分野の目玉テーマであったことを物語っている。

*1: Rochonが考案した偏光プリズムで、常光線が直進する。

*2: Wollastonが考案した偏光プリズムで、常光線と異常光線の両偏光が互いに逆方向に屈折して、2方向に分かれる。

島津製作所との 光電式発光分光分析装置の協同開発

戦後の協同研究は大学教官の個人レベルで行われる場合がほとんどであった。今でもそうであるが、産学協同研究の成否にキーパーソン間の信頼関係が大きく関わっている。

米国ARLが1944年に開発したカントメータ(発光分析装置)の国産化が、1951年度通産省鉱工業試験研究補助金を得て島津製作所との間で始められ、旧制大学院特別研究生としてそのグループで主として機構設計を受け持ち、板金図面までも引き受けた。この研究は、吉永教授の京都大学理学部木村研究室時代の一年先輩であった島津製作所の橘芳実氏(のち専務)から持ち込まれたのである。発展途上国では何処でもまずは輸入品のデッドコピーから始まるが、このプロジェクトでは日本の国情に沿った元素数の少ない小型のものを指向して開始された。戦中から量産されていた島津製作所の水晶分光写真器の光電化であり、1元素用と4元素用を完成、後者は1953年末日本軽金属に納められ、据付作業にも出張した。島津製作所の設計室に1年間以上通い、分光機器の開発から完成までの業務すべてを見習うことができた。生産現場を含む多くの技術者の方々のご教示を受けながら、“図面は技術者の言葉”、“研究開発は5%、あとの95%が製品化への努力”、“顧客の喜びこそ技術者の最高の冥利”など、身をもって体験できたことに感謝している。企業で生産にタッチするのはおもしろいし、またお客様に喜んでいただけることがうれしく、モノづくりが元々に合っているのだなと感じた。こういう仕事をしているうちに、その装置がどこで発明されたかより、どこで初めて製品化されたかを重視する気持ちが確固たるものとなった。

日立製作所との 遠赤外分光装置の協同研究

1954年、吉永教授と米国オハイオ州立大学エッチェン教授との遠赤外分光の国際協同研究が始まり、光学設計

と機構設計を受け持つこととなる。精密機構の図面を仕上げ、日立製作所理器部(多賀工場)に製作を依頼する形であり、日立製作所に派遣されて設計部の製図板の前に、再び座る生活となる。この協同研究は、吉永教授が大阪大学理学部助手時代の教え子である当時理器部次長の牧野勇夫氏(のち計測事業部長)に依頼されたものである。

この滞在中、島津製作所と比べ分析機器開発の環境には大きな差があることを痛感した。老舗の後継ぎ息子と好き勝手な末っ子やんちゃ坊主の差であり、その奔放さは製品にも自由に反映されていたように思う。大日立の採算にあまり寄与しない末端小部門であったことや、牧野部長のお人柄にもよるのであろう。2社の比較によって、卒業生を送り込むにも、企業カラーへの適性を考えるべきことを学んだのは大きなプラスであった。

日立製作所では自分の描いた図面を持って工作現場に入り浸ることも多かったが、自分には性に合っていた。多くの現場職人からモノづくり根性を教わったし、意気を感じて無理難題を引き受けてくれる職人氣質に感動した。

遠赤外の研究を体験した後、1958年オハイオ州立大学に助手として採用され、新方式の赤外分光光度計の開発に当たる。1960年帰国後、遠赤外分光光度計製品化のプロジェクトで、再度水戸に移転していた日立那珂工場光装部との協同研究を長期にわたって続けることになる。この間には、パーキンエルマー(PE)社との特許争いで貴重な体験をする。特許戦略に関する実戦手法についても具体的に学んだのは初めてであった。この一件で、PE社にサヴィッキー氏、フォード氏など多くの友人ができたのは幸運であった。

オハイオ州立大学で 新型赤外分光光度計の試作

既述の遠赤外プロジェクトで、設計試作を担当した大型単光束遠赤外分光装置は1957年に稼動を始める。国内唯一の遠赤外分光装置ということで、東京大学理学部化学科島之内研究室や医学部薬学科坪井研究室のメンバーを始め、多くの分子化学専攻の方々が試料持参で訪れた。その間化学分野の方々に知己を得たのは幸いであった。対応に多忙の中、光電分光分析装置とその応用をテーマに学位論文を完成、その直後に渡米すること

になる。プロジェクトメンバーとしての研究の傍ら、夜遅くまで内密に行っていた電子回路のアングラ研究が発光分光分析装置のデジタル化に結びつき、学位論文の核となった(企業でもアングラ研究が実った例は多いと聞く)。渡米した1958年といえば、国産赤外分光光度計もほぼついでに乗り始め、世界的には赤外装置研究はほぼ飽和状態に近かった。その時期に、新規性のある大型プリズム赤外分光光度計を試作してほしいというオハイオ州立大学赤外線研究室の注文である。悪戦苦闘の末、1951~53年オーストラリア国立産業科学研究所のA. Walsh氏が発表していたダブルパスモノクロメータ(通称ウォルシュ型)をダブルビーム光学的零位型測光に併用するダブルチョッピング方式を考案して、何とか面目を保った。この時わかったのは、既に20近い光束断続法の特許が、PE社始め欧米企業によって押さえられていることだった。Walsh氏は、1955年原子吸光法を発表するが、それまでモノクロメータの開発でも良い仕事をしていたのである。

その後何年かにわたって、夏休みに3ヶ月契約でオハイオ州立大学での高分解大型回折格子赤外分光器の開発に参加するが、その間幾つかの米国分析機器メーカーから良いオファーがあり、長男で日本を離れられない我が身の宿命を嘆いた。

1963年、助教授として独立研究の道へ

卒業後12年、研究室プロジェクトに属しつつ分光機器開発という装置開発の仕事の研究テーマとしてきた。本来、未知に挑戦するための計測装置は研究者自らが開発すべきであり、市販の計測器で勝負することはライバルと同じスタートラインに並ぶことを意味する。一般に、自ら開発した装置は本人が独占して研究の優位を保つのが本来である。従って、研究用の道具作りを研究テーマとし、それを製品化して一般の研究者に提供しようとする研究をする大学人は少ない。泥臭い仕事であり論文の生産効率も良くない。

助教授として独立し、本来モノづくりが三度のメシよりも好きという性格から、科学計測学の確立を標榜しながら道具作りの研究にますますのめり込むことになる。その背景には、まずは、分析機器の輸入が始まった頃最新自動化機器の美しさが忘れられなかったこと、国内の大学では光源、分光系、検出器、光学部品など個別に研究さ

れているが、それらをいかに効率的に融合するかのシステム化研究が行われていないこと、助教授で担当する講義が、学科の誰もが受け持てない電子回路、計測学、自動制御などであったこと、これまでの産学協同研究や米国滞在で分析機器メーカーに多くの知人ができたことなどがある。

システム化となれば、それまで波長域や光と物質との相互作用別に分けられていた光分析機器の共通点を洗い出し、内部の情報の流れを共通的に眺める手法が必要となる。まだアナログ時代ではあったが、光分析機器のシミュレータの試作や、自動化分析機器のシステム解析などを研究の端緒とした。その後、デジタル時代を経てコンピュータ時代へと、システム研究は情報処理技術を巻き込みながら進捗し、ラボラトリーオートメーション(LA)の研究へと向かう。

他方、光電発光分光分析装置の研究時代から進めていた既述のアングラ研究の中に、高速時間分解分光測光がある。光電化による測光精度の驚異的向上で、光源の変動が分析値に及ぼす影響が明るみに出てきた。スパーク発光の過渡的変動の解析にはマイクロ秒以下の時間分解分光が必要であったが、当時1マイクロ秒が限界であった。苦心の末、光電子増倍管ダイノード並列ゲート法を考案し、10ナノ秒の時間分解能を初めて達成した。この成果は、遊離基の研究や蛍光寿命測定を続けていた基礎化学や生物・医学系の研究者の注目を浴び、医学系研究者とのいくつかの協同研究へと繋がった。その後の研究で、1ナノ秒に近い分解能を実現、これが契機となり、ウイスコンシン大学分析化学グループとの協同研究が進む。時間分解分光測光の研究は、その後極微弱光の過渡観測を狙った光子列同時検出法の発明や、コンピュータを利用した時間分解光子計数法の発明などに結実する。

得意とする極微弱分光測光の技術は顕微分光測光にも活路を開き、医学系グループとの協同研究が進むが、その背景には1950年卒研時代の焼け跡企業でのME機器開発の体験が生き続けていたようである。

1980年から応用物理学科 計測学講座を担当しLAで先導的役割

情報処理を手立てとして計測データの確度向上を図る試みは、既に1954年遠赤外研究を開始した時から温めて

いた。弱い光源、感度の悪い検出器に悩みつつ雑音と悪戦苦闘を続けていたからである。前述のシステム化研究の一環として、まずは各種アナログ波形処理装置、アナログ・デジタル・ハイブリッド波形処理装置を経て、科研費によるミニコン導入を1970年から始めた。

講座担当となってから、ミニコン、マイコン、パソコンと各種光分析機器との結合や内蔵化を始め、コンピュータを中心としたLAの研究が、システム化研究の中心となって加速化される。筆者らのコンピュータ利用LAは、その重心を自動化よりも“数値演算処理による機器性能の間接的向上”に置いている点の特徴である。端的に言えば、性能の低い安価な分析機器とコンピュータを結合し、ソフトの力で高級機同様の性能を持たせるというものである。パソコンの機能向上と共に、次の段階は“コンピュータ利用を前提とした新しい機器分析手法の開発”を目指すことになる。フーリエ分光法が代表例であるが、新規開発のCT分析光顕微鏡を始め多次元画像情報を利用する各種計測分析法などもこれに属する。

コンピュータ利用LAのローエンドへの展開には、ヴァーチャル計測器や、パソコン計測器があり、パソコンスロットに装着できる分光器も開発されていることから、モバイル型分析機器への展開も試みている。

コンピュータからLAシステムを眺めると、すべての分析機器に多くの共通点が見い出され、分光機器を中心とした光分析機器で得られたハード設計やソフト開発のノウハウが、他の分析機器にそのまま利用できるという事例が数多く発見できる。機器分析系全体の中を流れる光、荷電粒子、音波などを共通的な情報の流れと考えるコンセプトは、機器分析新手法の発見に糸口を与える可能性を持っている。

応用スペクトロメトリー東京討論会

戦後、輸入品のデッドコピーから始まった外国製分析機器への“追いつけ追い越せ”の努力が結実し、我国各メーカーとも海外市場への展開に注力し始めた。1965年、国産機器の海外での信頼性確立を目指したメーカーとユーザーからなる討論会が、当時の東京大学工業化学科の鎌田教授や初台にあった東京工業試験所の益子所長、佐伯部長を含む機器分析推進グループによって結成された。著名な米国ピッツバーグ会議の日本版を目標に、日本分析機器工業会の展示会と共に11月7日からその第1回が

日経ホールで開催されたが、各企業から直接担当の開発者や設計者がすべて出席し、熱気のこもった討論が行われた。自信のある開発技術者ばかりで、互いに相手方の機器の欠点をあげつらう場面が続き、大いに刺激された。いかにも日本的で、最高性能だけを評価するのである。米国のように、性能はそこそこだが使い勝手が良い、保守が簡単などという議論はなかったようである。それから数年は、同様の活発な議論が続いたが、やがて環境計測、医用計測へのニーズの高まりと共に、“お客様は神様”のニーズ指向が強まり、メーカ技術者はおとなしくなっていく。結局、各社の製品に特徴が無くなり生産財というより耐久消費財の民生品に近い機器が幅を利かすようになったからである。

東京討論会の懇親会の席上で、最近の分光機器メーカはグリコのおまけのような分光器を生産していると発言し、顰蹙を買ったことを覚えている。しかし、この傾向は特殊な計測器と見られていた分光機器が一般計測器として認知されだした証であり、内心ではエンジニアリングスペクトロスコープ確立に向けてのローエンドの拡大に

満足していた。その反面、採算性の良くないハイエンド機器への展開に各メーカとも二の足を踏むようになり、芸術家気取りで個性ある分析機器を一品生産していた頃の夢が技術者から消えていくのは残念だった。

応用スペクトロメトリー東京討論会が続いた四半世紀の間、分散型分光器設計の畏友だったスペックス社のミッテルドルフ社長夫妻の所へは渡米の度に立ち寄り議論をした。芸術作品と言ってよい最高のモノクロメータを採算度外視で市場に提供してきた夫妻が懐かしい。今、医用やバイオで特に活躍するハイエンド分析機器のほとんどが外国製で占拠されてきたことが問題となっているが、小さくとも常に最高級機器を狙う分析機器専門メーカが、元気に生き残れる環境が我国にも欲しいと思う。2004年度から始まったJSTの先端計測分析技術・機器開発事業に期待する所、大である。

以上、半世紀にわたり一貫して続けてきた分光機器を主軸としたモノづくりの研究成果を、応用面も含めた形で具体的に統合したものが、図4並びに図5である。

エンジニアリングスペクトロスコープを標榜しつつ、分光

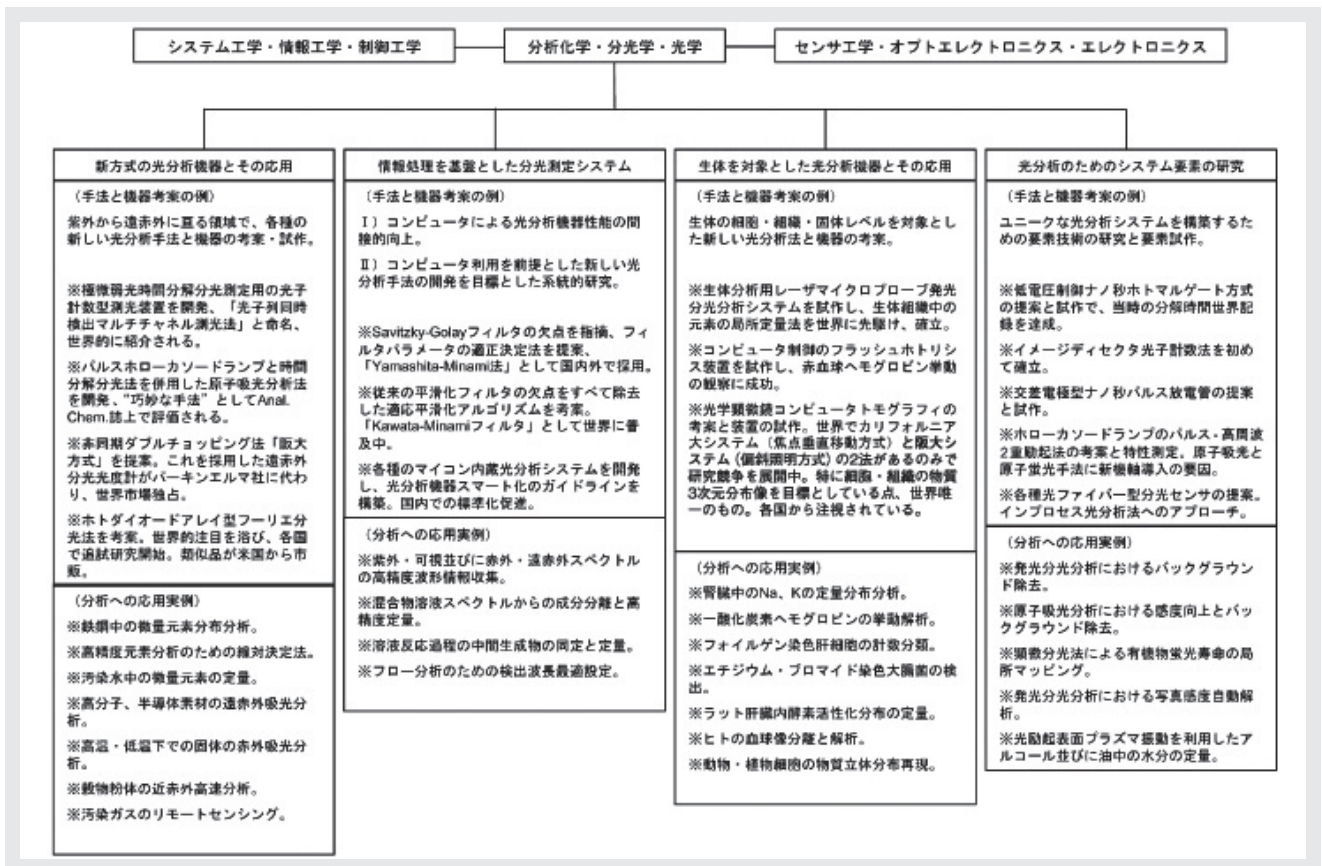


図4 新原理に基づく分光分析機器開発とその応用—半世紀の研究の軌跡—

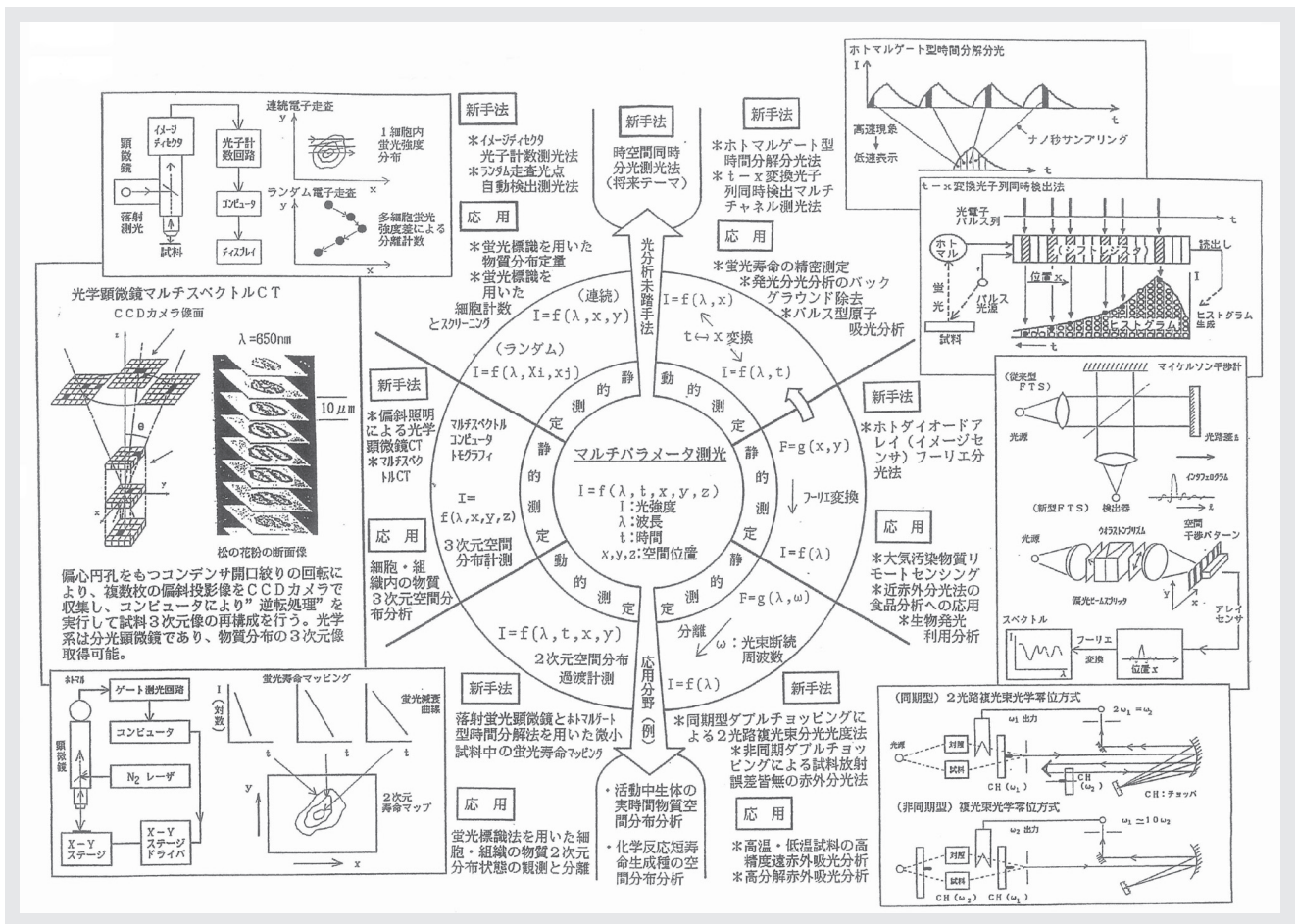


図5 マルチパラメータ測光から眺めた光分析機器開発の系統的説明図

機器中心にモノづくり一筋に歩んできた軌跡の一端を、少々砕けた語り口で紹介させて頂いた。メーカーにおけるエンジニアリングスペクトロスコピーの基本目標は、言うまでもなく他者より一歩ぬき進んだ機器を、より早くかつ安く市場に供給することにある。この原則は科学計測機器を研究者が自作する時にも当てはまる。そのための具体策の一つとして、構成要素技術や要素部品をいかに巧く選択しかつ有機的に結合するかという、システム化的アプローチが重要である。続く後半部は少し改まった形で、筆者の経験をも参考にしながらシステム化手法の概略を述べることにする。

分光機器設計のシステム的アプローチ

ハイエンドからローエンドまでバラエティに富む分光機器が生産されるようになり、通常の産業・医用計測器として広く実用されるようになってきた。分光機器が科学

計測機器として研究開発の環境で使われるだけでなく、計測分析機器として広く生産現場やフィールドで多用されるようになった今、基礎研究室で分光計測システムを組み上げたり、機器メーカーで分光機器を開発生産するにあたって、システム的アプローチが必須となる。近年オプトエレクトロニクスの進歩により、表1に示すような多種多様の光部品が市場に現れるようになった。加えてコンピュータや通信システムの普及はますます加速されており、これら要素部品を如何に有機的に結合して付加価値の高いシステムを作り上げるかがエンジニアリングスペクトロスコピーと称される分野の基盤となる。言うまでもなく、光学、分光学を中心に、機械工学、制御工学、エレクトロニクス、コンピュータなどを含む工学全般の広い知識と理解が必要である。

ブレイクダウンとブロック図化

まず、目的と対象が決まると原理となる分光法を選択す

表1 市販光部品の機能別分類

モード	効果区別	光部品名称
受動型光部品	形状効果	普通レンズ(均質), ミラー, 回折格子, 絞り減光器, ビームスプリッター, フィルタ位相板, エタロン, 光路変換プリズム, レンチキュラー板
		光ファイバー, 光ファイバーバンドル, 光導波路, 微小光学素子
		通信用光改組部品(コネクタ, 光分岐・方向性結合器, 分波器)
	物質効果	ホログラフィックレンズ, ホログラムメモリ
能動型光部品	形状効果	GRINレンズ, ミラー(狭帯域), ビームスプリッター, フィルタ, 光ファイバー(セルフオック), 分散用プリズム, 通信用光回路部品(光分岐・方向性結合器, 分波器)
		写真感光媒体, 光ディスク, 光カード, サーモプラスチック素子
		光センサ
		機械シャッター, 機械変調・偏向素子
		走査型エタロン
	物質効果	音響光学部品(結晶, 非晶質, 液体)[変調, 偏向, シャッター, 演算]
		光走査素子(ガルバノミラー, ポリコン, ホログラム, デジタルマイクロミラー)
		通信用光回路部品[光スイッチング, 変調]
		電気光学部品(結晶, 非晶質, 液晶, エレクトロクロミック材)[変調, 偏向, シャッター, 減光, 演算, 表示, 記憶]
		磁気光学部品(結晶, 非晶質)[変調, 偏向, シャッター, ローテーター, 減光, 記憶]
		非線形光学部品(無機固体結晶, 有機物・高分子, 気体)[SHG, THG, パラメトリック発振, 光双安定, シャッター, 位相共役]
		応力光学部品(結晶, 高分子)[変調, 偏向, シャッター, センサ]
		空間変調器[アナログ, デジタル]
ホトクロミック素子, 電子写真感光媒体, 光磁気ディスク		
レーザ, LED, CRT, LCD, PDP, SED, ELD, 一般インコヒーレント光源		
光センサ[変調センサ, シャッターセンサ], 光増幅器		
光コンピュータ素子, OEICを含む能動型通信光回路部品		

る。次いで、ラボ用か現場あるいはフィールド用かによって性能諸元並びにコストやサイズなどの制約条件を勘案しながら、全システム、サブシステム、要素部品という風に、ブレイクダウン(機能別細分化)の方向で構成骨格を決めていく。

一方、システム内の信号の流れについての情報論的考察が必要である。信号流の種類は、主として光信号と電気信号となり、そのインターフェイス部に光センサが位置する。当然、測光情報の収集効率がこの点と絡み合い、シングルチャンネル、マルチチャンネル、マルチプレクスのいずれの測光方式を選ぶかで、全システムの形態が大きく変わる。

物質計測を前提とした分光計測システム中の、信号の流れを示すブロック図を図6に示す。コンピュータによるデータ処理の結果は、最終目的物質情報に直結するか、あるいは信号系にフィードバックされ、信号の変形や調節に使われる。FT分光法は、光波の自己相関関数からそのフーリエ変換によって光パワースペクトルを求めるといふ、いわゆるウィナー・ヒンチンの関係を用いており、図中の分光系は光波の自己相関を求めるための2光束干渉

渉計に置き換わる。一方、回折格子を用いた分光系では、単色光平行光束で照明された空間格子のフーリエ変換像がスペクトル焦点面にできるというレンズのフーリエ変換作用を利用しており、回折格子分光光学系は光波のアナログフーリエ変換コンピュータと考えることができる。現在、コンピュータが分光計測システムに内包された要素部品の一つとなっており、図中の信号の流れを光信号と電気信号に分けるより、単に信号の流れとして一括して扱う方が広い発想に繋がる。

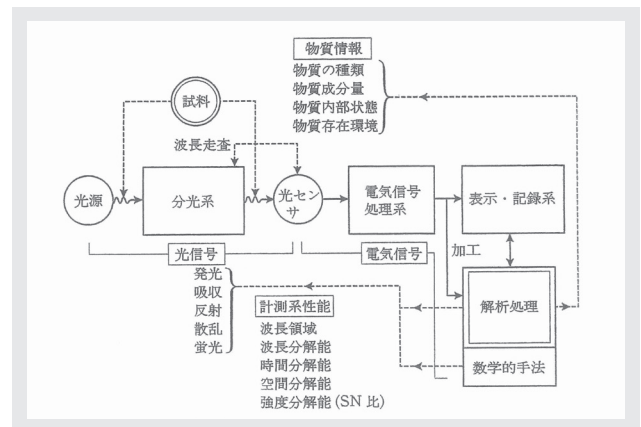


図6 分光システムの一般的構成と信号の流れ

分光光学系構成要素の選択

先の基本ブロック図の各ブロックを更にブレイクダウンし、要素部品の結合として示したのが図7である。図は種々の分光計測形態を重複する形で示しており、ほとんどの具体的なシステムに対応させることができる。試料の位置は、光と物質の相互作用の利用の仕方によって、ま

た分光光学系がモノクロメータかポリクロメータかによっても異なる。以上の他、分光光学系を中心としたスループット整合、迷光の要因となる光溢れや反射光や散乱光の影響など、光学系配置にも細かい注意が必要である。図7の要素構成ブロックを基本に、具体的な光学要素部品の選定を進める。

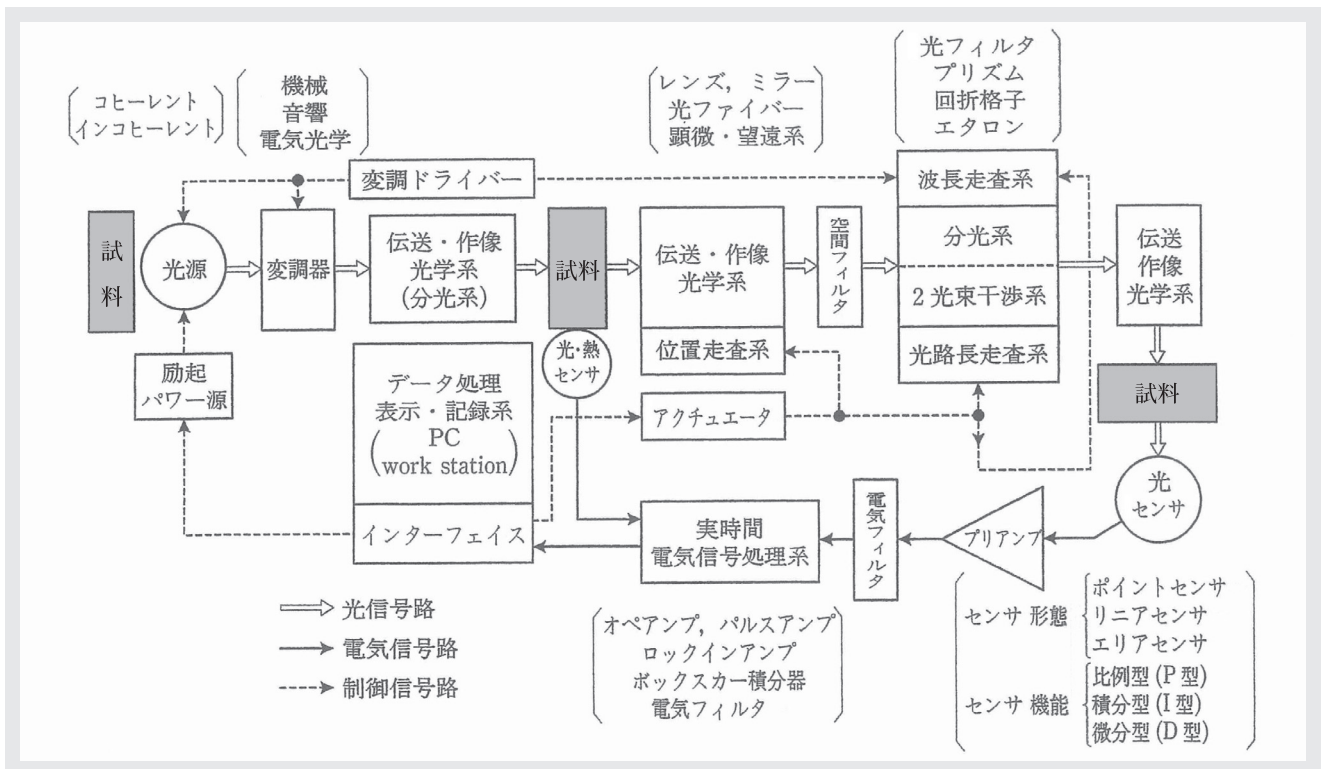


図7 分光システムの構成ブロック詳細

電気信号域での信号の取り扱い

光信号から電気信号に変換するインターフェイスであるセンサも、シングルチャンネル、マルチチャンネルの測光形態に応じて選択される。この時、センサをもサブシステムと考えた更に細かなブレイクダウンが必要となる。システム的に見ると、比例型である量子型や熱型の単一センサ、積分型であるCCDやMOSイメージセンサ、微分型である焦電型センサなどに分類できる。センサと前置増幅器との結合方法は、S/Nの点で最も重要な部分であり、雑音指数を考慮した設計が必要である。

マイコンやパソコンは、今や分光システムの重要なサブシステムとなっており、演算処理、機器制御、通信、解析処

理、データベース運用などにフル活用されている。とはいえ、分光データの感度や確度向上などの処理をすべてコンピュータに背負わせるのは誤っている。特に、波形や画像処理はあらかじめ仮定されたモデルの下で行われるため、モデルにそぐわないデータを送り込んでも所期の結果を得ることはできない。分光系本体中で、雑音や偽信号源は極力取り除くべきであり、ロックインアンプやボックスカー積分器などアナログ系を併用する。以上、各サブシステムや構成要素部品は、表2に示す各項目を総合的に検討して選択することになる。

表2 各サブシステムの検討項目

光源 (放射線)	伝播系	集光光学系	分光光学系	検出器	実時間信号処理系 (増幅系)	後処理系・表示系 (コンピュータ)
1. 形状, 寸法, 距離, 動き 2. 温度 3. 分光放射率 4. 分光放射特性 5. 時間特性	1. 伝播系の分光放射 2. 伝播長 3. 分光透過率	1. 視野角 2. 空間走査モード 3. 空間走査範囲 4. 視野外放射除去能	1. 波長域 2. 波長分解能 3. 偽放射(迷光, 高次光など)除去能	1. 分光感度域 2. 絶対感度 3. NEP, D* 4. 動作温度 5. 背景放射 6. 周波数特性 7. エレメント数	1. 検出器-プリアンプマッチング 2. 電圧・電流利得 3. 周波数特性 4. フィルタリング 5. 位相弁別検出	1. 出力電圧範囲 2. 信号源インピーダンス 3. 制御系 4. メモリ系 5. 通信系 6. 表示系 7. 数値処理アルゴリズム

NEP : 雑音等価パワー(Noise Equivalent Power)。単位帯域幅において、雑音と等しい出力を与えるために必要な入力パワー。

D* : 比検出能力。面積の異なる検出器を比較するために用いる。

$D^* = A^{1/2} / NEP$ (A: 検出器面積)

おわりに

光電子増倍管の登場, アナログからデジタルエレクトロニクスへの移行, コンピュータの急速な発展と普及, レーザの登場と普及, 光ファイバー技術の進展, 高性能回折格子の普及とフーリエ分光方式の登場, イメージセンサを含む各種半導体光センサの普及など, 光源から光伝播系, 分光光学系, 検出系, 信号処理系に至る広範な周辺技術の進歩に感謝したい。技術の抜本的な転換期間を十二分に活用しつつ独自の研究を行えたことに満足している。

喜寿を迎えているが, 今後の研究方向は, 各種分光技術の更にローエンドに向けての定着, フィールド計測用(臨床医用を含む) モバイル分光機器の開発, ホームランドセキュリティのための分光計測機器の開発などである。若い技術者の方々の刺激を受けながら, モノづくりスピリットだけは何時までも持ち続けたいと思っている

<堀場雅夫賞審査委員講演会(2005年6月1日)より抜粋>