

丹羽宗弘先生のライフワーク

讓 原 晶 子

丹羽先生は昭和41年に東京慈恵会医科大学の助手に着任して以来、46年間大学で教育・研究の道を歩み続け、この度平成12年に着任した千葉商科大学を定年御退職となりました。丹羽先生がライフワークとして取り組んできた研究のひとつに、「光を利用した医療機器」の開発があります。丹羽先生に、この分野の半世紀を振り返っていただきましたので、ここに紹介いたします。

生体への光応用 むかしといま

丹 羽 宗 弘

恩師押田勇雄は理論物理学者であり、新たな学問領域として生物物理学を立ち上げた一人でもあった。医科大学助手として採用された小生の研究分野は、このような経緯から生物学、物理学、医学の三つの分野にまたがる複合領域となり、研究テーマを決めるため当時ME（Medical Engineering：医用工学）基礎研究では第一人者であった金井寛の研究室に出入りすることになった。

その頃の医療現場は、医師の経験的医療から科学的裏付けに基づいた医療へと変革が始まったばかりで、全国のME系研究室では、無侵襲、すなわち生体を傷つけることなく、電気、超音波、熱などによって身体内部の情報を得るための研究がさかんに行われていた。この時期を契機に、先端科学技術が医療分野に広く浸透することになる。

研究成果が直接社会に反映される、エポックメイキングなこの分野に惹かれ、当時は未開発だった“光応用”に関する基礎研究を手がけてみることにした。光応用は無侵襲という条件を満足するが、光に透かして身体内部を見ることができない、つまり内部の情報が得られないという単純な理由で計測手段としてこれまで評価されることはなかった。その一方で、同じ電磁波であるX線では身体内部の肺や骨の様子を知ることができるのに、光では同じことができない理由すら、多くの研究者達は理解しようとはしなかった。

生体、すなわち生きた状態の身体は多くの組織によって構成され、それらの組織は大きさが千分の5～25ミリメートルの、60兆個の細胞から成っている。生体を光学的な視点によってモデル化すると、光を散乱する皮膚や脂肪などの無色で半透明な組織の中に、光を吸収する色素を持った血液や筋組織が分布する、光学的に不均一な構造をしている。

生体内を光が伝播するメカニズムを明らかにするために、無色で薄い皮膚組織の表面に

小さなスポット状の白色光を入射してその経路をシミュレートしてみよう。光は組織内に入ると、細胞間液と細胞膜の境界のような光学屈折率が変化するところで反射され、反射光はさらに隣接した多数の境界で反射を繰り返しながら内部に浸透し、全方向（前後左右）に広く拡散、次第にその強度を弱めてゆく。この拡散光の一部は、皮膚組織を透過して前方へ、また一部は入射点に戻るようには後方へ拡散されて組織の外へ出て行く。

光拡散体の直下に光吸収体が置かれたとき、例えば手首内側の皮膚下浅部をはしる静脈血管の場合を想定してみる。光を皮膚表面から血管めがけて入射すると、皮膚組織内で拡散した光によって血管はあらゆる方向から照射される。さらに、血管内部に浸透した光は血液で一部吸収、拡散された後、血管の外に出てくる。その拡散光のうち、血管と皮膚表面とを最短で結ぶ拡散光（仮に直進光と呼ぶ）と、それに平行な拡散光だけが皮膚表面に血管の像（影）を結ぶために寄与する。それはあたかも、ローソクからあらゆる方向に放射された光のうち、炎とそれを眺めている者の眼球を結ぶ線分に平行な光だけが炎の像を網膜に結ぶのに寄与するのと同じである。

血管からの直進光は皮膚組織で拡散されるので、皮膚表面に達するまでに直進光がどの程度拡散の影響を受けるかによって、血管像の鮮明さが決まる。言いかえれば、血管と皮膚表面との距離が離れるにしたがって鮮明な像は期待できなくなる。

血管の像（影）を皮膚表面に写し出している直進光は血液に関する情報を含んでいる。体内をくまなく循環している血液は、タンパク質を含む透明な血漿と、赤血球、白血球、血小板などから成る。動脈血は、赤血球中の血色素であるヘモグロビンと酸素が結合していて鮮紅色を呈し、心臓の拍動に伴い血流量が周期的に変化する。静脈血は、ヘモグロビンと結合した酸素の一部が二酸化炭素と置き換わり、暗赤色を呈し、その流れは定常流に近い。

このような組織の特性を考慮した生体の光伝播モデルと解析法が過去にいくつか提案されてきた。輸送方程式に拡散近似を適用して得られる光拡散方程式の記述はその中でも最も一般的といえる。血液を例にとると、血色素溶液を分散媒とし、その中に分散質である光散乱粒子が分散した血液モデルおよび実験によって、光散乱係数、光吸収係数、散乱の角度分布などを決定し、境界条件を設定して光拡散方程式の解析解を求める。この方法は均質な構造をもつ組織に対しては良い近似が期待できるが、複数の組織から成り立つ複雑な形状をした組織に対しての適用は難しい。

近年、コンピューターの計算処理能力の向上に伴い、解析解に代わって、光輸送方程式を統計的手法であるモンテカルロ法によって数値的に解いたり、光拡散方程式の数値解を得ることが広く行われるようになった。この結果、生体組織における光伝播をコンピューター上でシミュレートすることが可能となった。こういった手法が普及した背景には、従来のX線CTやMRIでは取得できない、脳活動などの生理学的情報に対する医療分野からのニーズや、半導体光デバイスやレーザー技術の進歩などがある。

今から45年ほど前、指尖脈波計の理論解析を目的として始まった小生の“生体への光応用”研究であったが、研究を進める中、血液に関して信頼できるデータが少ないことから、血液中の光伝播を明らかにするために、実験によって血液の光学特性を明らかにすること、および光拡散方程式の導出と、その解析解を求めることが新たな仕事となった。数年かけて血液の光学特性のデータを取り終えた丁度その頃、コンピューター時代の幕開けを

迎えた。

ミニコンピューターを前にして、紙と鉛筆で得た光拡散方程式の解析解が大変古めかしく感じられ、すぐさま研究の軸足をモンテカルロ法を用いた光伝播シミュレーションに移した。しかし、当時としては最速のCPUであっても、結果は自ずと知れたものだった。また、見通しが良い解析解と比べ、コンピューターによる数値解は長時間の計算を必要とし、見通しは極めて悪く、結局この試みは解析手法としてのモンテカルロ法に先鞭をつけるにとどまった。

現在、“生体への光応用”に後押しされたかたちでパルスオキシメーター、光トポグラフィなど医療機器として実用に供され、光CTをはじめいくつかの機器が開発段階にある。いずれも最新の光デバイスとコンピューターで構成されたハイテク機器である。ところが研究開発段階で掲げた性能の到達目標をこれらの多くはクリアできていない。実際、ハードウェアをいじっても、アルゴリズムに修正を加えても、問題の解決には至らないのである。その理由は、組織別の基礎データが不十分であること、光学的に不均一な構造をもつ生体のモデル化が難しいことにある。医学、医療の領域では、ともすれば技術先行、理論後追いになりがちで、多くの場合トライアンドエラーが問題解決の手段となってきた。見通しの良い開発のために、基礎的研究分野のさらなる拡充が求められている。

理論から実用までを見据えることが要求されるこの分野で、理論から開発を立ち上げ、開発の試行錯誤から理論を見出していこうという、(初代政策情報学部長の井関利明先生のお言葉を借りるならばまさに)スパイラルを突き進まれた一研究者の姿が目には浮かびます。

私自身はどちらかという理論畑の者なのですが、政策情報学部では機会あるごとに作品制作(舞台作品)を手がけてきました。その際丹羽先生には、舞台装置をどのように創るかということについていつも相談にのっていただきました。ものづくりのための精神と思考が沁みついておられる先生は、私がぶつけるイメージの次元のアイデアを、直ちに現実の次元へと引き下ろしてくださいました。アイデアを「かたち」にするための思考とは、理論畑の思考とは何と性格が違うものかとひしひしと感じつつ、ひとつひとつ問題を解決していくステップに心躍らせたものです。そして何より、先生の理論と実践の間を自由に遊泳するような思考の型に、大いに刺激されました。

理論と実践の両方をものにするのは研究者にとっては大変なことです。というより、一人の研究者が両者の知識と技芸をこなすようになるには、一生という修行期間は短すぎます。しかしだからといって、両者をつなぐ知的経路が欠落しているが故に、コミュニケーションがうまくとれないという、さまざまな学術領域で見受けられる現状は、何とか打開したいものです。少なくとも、両者を見通す研究者が増えること、両者の精神を理解する研究者が増えることは、学術発展の推進力となるのではないのでしょうか。丹羽先生には今後も引き続き、先生特有のしなやかな思考法を後進の研究者に伝えることで、理論の大切さとアイデアをかたちにする喜びを伝えてほしいと思います。

それでは最後に、丹羽先生の主要論文等を紹介することで、結びに代えたいと思います。

丹羽宗弘 (NIWA MUNEHIRO)

【専攻 (専門分野)】 医用工学, 医用物理学, ヘモレオロジー

【研究テーマ】 血液の粘度特性, 車椅子の安全性に関する研究, バイオマス利用に関する研究

【所属学会等】 日本バイオレオロジー学会 バイオマス産業社会ネットワーク

【主な論文等】 “Physical Properties of Flowing Blood” (joint work, Biorheology 25, 1988年), 「血液中における光の散乱と伝播に関する研究」(慈恵医科大学雑誌, 1997年) “Rheologic Changes in Venous Blood During Prolonged Sitting” (joint work, Thrombosis Research 100, 2000年), “Changes in Blood Viscosity by Heparin and Argatroban” (joint work, Thrombosis Research 104, 2001年), “Change in Blood Viscosity with Synthetic Protease Inhibitors” (joint work, J. Pharmacological Sciences, 91, 2003), 「高齢者の車いす使用時における転倒, 転落事故防止策」(千葉商科大学紀要 48, 2011), 『環境計量士への近道演習編V』(共著, 日本環境測定分析協会, 2008年), 『環境計量士への近道 第9版』(共著, 日本環境測定分析協会, 2009年)