

私の研究室

徳永研究室

理学部第一部 物理学科

予想外の驚きに満ちた光の研究

理科大に着任してから、2021年でちょうど20年目になります。私の研究室では光物性＝光と物質の相互作用の研究を行っています。例えば、なぜ植物は緑で、どのように光を利用しているのかを問うのも光物性です。さらに絞れば、非線形光学に関心があります。

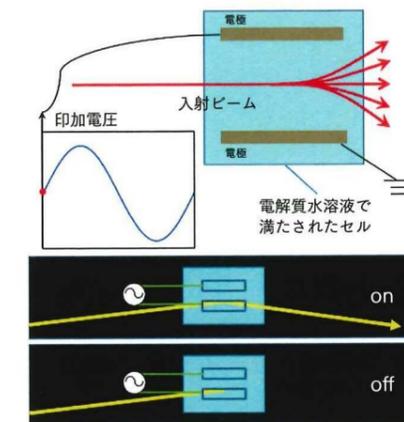
懐中電灯2本からの発光を交差させてみましょう。すると互いに素通りします。つまり「光同士は相互作用しない」のが光の性質です。しかし、物質が介在すると、光同士を相互作用させる（片方の光でもう片方の光を制御する：光をon/off、曲げる、波長を変換するなど）ことが可能になります。この、光と光の相互作用が起こる物質やその条件、物理的機構を探り、応用に展開するのが非線形光学という研究分野です。光はご存じの通り電磁波なので、電場や磁場の印加による光の制御も含まれ、特に電場によるものを電気光学効果と言います。式で説明すると、光と物質の相互作用は、光電場 E が物質中の正電荷に対する負電荷（＝電子）の位置の偏り（分極 P ）を誘起することにより起こります。光電場が弱ければ P と E は比例します（線形、光の吸収や屈折）が、 E が大きくなれば $P = aE + bE^2 + cE^3 + \dots$ と P が E に非線形に依存する効果が顕在化し、それを非線形光学効果と呼びます。身近で実用化されているものは液晶モニター、光通信における電気光学変調器、グリーンレーザーポインタ（ $E^2 \propto \cos^2 \omega t = \frac{1 + \cos 2\omega t}{2}$ の項より光の周波数 ω が2倍）などがありますが、研究現場では非線形分光が物質の性質を探る強力な研究手法の一つになっ

ています。また、現在世界中で光集積回路の開発が進められていて、さらにその先には光による量子コンピュータが視野にあり、これらの実現には非線形光学が必須です。条件さえ整えばどんな物質でも非線形光学効果を示すのですが、非線形光学効果は通常とても小さく、身の回りの光では検出困難なため、（強度が大きい）レーザー光を使用するか、高感度検出技術を用いるか、しばしばその両方が必要です。

大学院修士課程で研究を始めてから35年目になりますが、振り返ると研究は常に予想外の驚きの連続でした。博士課程での成果は超短パルスレーザー（パルス幅60フェムト秒この時間で光は18 μm しか進まない）を用いた新しい非線形超高速分光法の開発でした。研究テーマは教授から与えられた別のものでしたが、実験中に観測した現象（実験データを歪ませる邪魔者）を利用すると過去に実現できなかった分光計測ができることに気づき、博士3年の春からその実験を行い、超高速分光の当時の未解決問題（分野の人が集まった研究会で誰も答えられなかった）を解決し、最終的に10本近くの論文の成果になりました。この原体験が現在の研究スタイルを決めています。つまり、新しい分光計測法の開発は新現象の発見に結びつく、ということです。博士課程が終わって大学助教、公的研究機関研究員の間は、伝統的な固体光物性に研究テーマを変え、波長可変レーザーの特長を活かした非線形分光を行い、新現象を発見できました。これも予想外の成果でした。

2002年に理科大に着任すると、いきなり11人の卒研究生の卒業研究を指導しなければならなくなりました。ここで役立ったのが、前任で完成していた128チャンネルロックインアンプ（LIA）という独自の非線形分光装置でした。LIAというのは背景ノイズに埋もれた微弱な信号を高感度に検出できる標準的装置ですが、非線形分光スペクトルを測定するには、分光器を用いて光の波長を掃引し波長ごとに検出するので、時間がかかります。そこでLIAを多チャンネル化して各波長の信号の同時測定を実現することは博士学生時代からの夢の一つで、理科大の支援により理科大でも構築しました。これにより、色素分子水溶液への電場印加による透過光スペクトル変化を測定していたところ、水だけで特徴的な形の信号が出ることに気づきました（2002年卒研）。まったく予想外でしたが、これが水の巨大な電気光学効果の発見で、128ch-LIAがなければ気づけなかったものです。その後の実験と解析により、電場印加に使用していた酸化物質透明電極（液晶モニターでも使用）の界面の水に電場に比例する巨大な屈折率変化が起こっていることがわかりました。最近（2019）、これによる大きな信号を取り出すことに成功したほか他のグループからも別手法による報告があり、応用展開も興味深いものになっています。

光と物質の相互作用の中で、光を地球上で最も巧妙に利用しているのが光合成で、その初期過程で太陽光によって水を高効率に分解（ $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- + \text{O}_2$ ）して、これを利用できればクリーンな水素発生が可能です。昔から関心があったので、理科大に来てから単細胞緑藻を使った研究も行っています。光学を含む物理学は顕微鏡やX線等の観測手段の発明・発見により生物学の発展に貢献していますが、生命現象の物理学的理解は未開なレベルです（単細胞生物すら純工学的に作れない、物理法則から病気の治療法を見つけれな



水の巨大な電気光学効果の予想外の振る舞いの観測

い）。これは、顕微鏡の空間分解能が光の波長で制限され、十分な観測ができていないことによると考えています。非線形光学を利用した新たな超解像顕微鏡を開発して、生命現象を物理学で解明したいというのが夢です。

理科大に来てからの成果は、熱心に実験をやる学生たちのおかげです。研究室 meeting では研究報告、論文紹介のほか、新展開というものがあり、学生自身の発想による研究アイデアの提案をさせています。推奨しているのは頭で考えるのではなく、実験からヒントを得ることです。実際、実験を熱心にやる学生ほどよい成果を出しています。もし、本稿を読んでいる高校生がいたら以下を伝えたいです。物理学科では4年生で卒業研究が必修なので、全員が主体的研究を行う経験を積み、学会発表のみならず国際学術誌の論文の（共）著者になるチャンスがあります。大学院に進学すればさらに研究を深められます。研究力は、まだAIでは代替できない人間ならではの能力で、研究ができる人材はどこに行っても通用します。中でも、光と関わる研究はあらゆる研究分野と絡める（光計測は宇宙物理から生物物理まであらゆる分野で必須）ので、お奨めと言っておきます。

徳永 英司：東京理科大学
理学部第一部 物理学科 教授