

「研究室訪問」

NO.27

電子の動きを制御して 身近なプラスチックを 高機能材料に

大学院 理工学研究科
物質科学専攻
安藤 慎治 教授

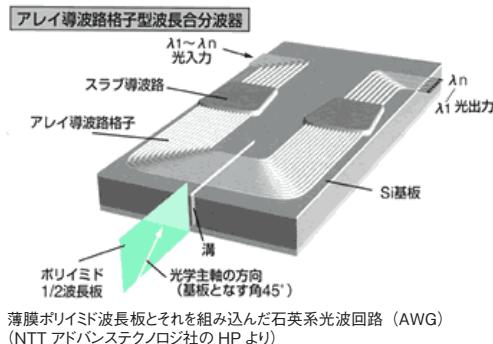


●ヴァイローチャナの残した言葉

中沢新一氏が最近上梓した『鳥の仏教』という本に以下のような言葉を見つけました。「世界の実相は二元論を超えており、個体は心がつくる概念構成から自由である。世界に確定したものなどはないが、すべての現象はそれ自体善である」。この“個体”という言葉を“物質”に置き換えれば、私が高分子物質＝ポリマーに対して持っているイメージが表現されているように感じます。20世紀以降、物質科学や材料工学の急速な進歩によって人間は無数の人工物質を合成し、そのお陰で我々の生活は格段に豊かになりました。物質・材料を扱う科学者・技術者は、その道筋で物質やそれを取り巻く現象を比較的単純な二元論や要素還元主義に基づいて理解しようとしてきましたし、それらが善悪を超えた、人間とは独立の客観として存在するものと見なしてきたと思います。そのような考え方の有用性自体は論を俟たないのですが、上の言葉を残したヴァイローチャナという8世紀

に生きたお坊さんは、我々とは別の意味で個体に対して透徹した眼を持っていたと思います。21世紀になってもこの世は不幸と不安に満ちていますが、それでも「すべての現象はそれ自体善である」と言い切ることができるのはきっと彼が「達人」の域に達していたからでしょう。

上の言葉はさらに「存在は自ずと完成しているから、努力して何かを得ようとする病を絶つて、無努力のままにとどまるのがわたしの教えである」と続いています。“作り込み”や“摺り合わせ”的技でやってきた日本のものづくりに対して、「存在は自ずと完成している」という教えは矛盾するようですが、しかし「もの」ができた瞬間に、それらが実は最初から完成していた、と感じることがあるように思います。「努力して何かを得ようとする」ことが一種の“病い”であることは、最近わかるようになりましたが、私のような凡人が「無努力」のままでヴァイローチャナの境地に届くことはあり得ず、志を立てることとそれを支える努力はやはり必要でしょう。



薄膜ポリイミド波長板とそれを組み込んだ石英系光波回路（AWG）
(NTT アドバンス技術社の HP より)

●プラスチックは自ずと完成してゐるか？

私は1989年に東工大の博士課程（高分子工学専攻）を修了したあと、NTTの武藏野研究センター（境界領域研）に入所し、耐熱性プラスチックを用いた微小光学部品の開発・実用化に携わりました。1990年代はITバブルが本格化した時期ですが、駆け出し研究员だった私と電子工学出身の新人が数ヶ月間で開発した「光波長板」という部材が平面光波回路（Planar Lightwave Circuits）に装填され、大量生産されて欧米に輸出されるという幸運な体験をしました。開発が急がれていたので、手元にあった自社開発のポリイミド（PI）樹脂と急ごしらえの延伸装置・光学測定系を使って試作品を作り、それを光エレクトロニクス研に送って実用化試験を繰り返しました。開発が一段落したあと、論文を書くために多種多様な化学構造のPIを使って特性比較をしましたが、最初に選んだ樹脂を超えるものは一つもありませんでした。不思議な感覚にとらわれるとともに、この分野でなら自分もやっていけそうだと思った瞬間でした。その時、私がたまたま選んだ樹脂は、きっと「存在として自ずと完成していた」のでしょうか。

●物質科学専攻：「理工融合」の新拠点

現在、私が所属する理工学研究科物質科学専攻は、本学に古くからある「理工融合」の理念に沿って、理学部化学科と工学部の金属、無機材料、有機材料、化学工学（応化）、高分子の6学科を再編し、約10年前に作られた大学院のみの専攻です。物質構造、物質変換、物質設計、物質機能の4講座から構成され、母体6学科の大学院専攻とも緊密な関係を保っています。私

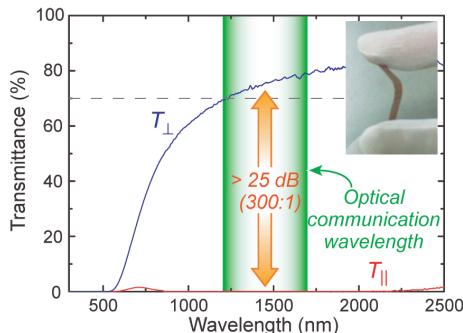


光の三原色&白色に光る高蛍光性ポリイミドのフィルム（紫外線励起）

は物質設計講座（学部は高分子工学科）に所属し、耐熱性の機能性ポリマーの研究を行っていますが、高分子固体の構造・物性制御には高度な構造解析技術が必要であり、また特性の飛躍的向上のためにはポリマーと金属・無機化合物との複合化（ハイブリッド）技術が必須となっていることから、同じ専攻内に広範な分野の研究者が同居していることはとても刺激的であり、学生達の教育面も含め、高い相乗効果が得られています。

●ポリイミドの電子状態制御と高蛍光性

テフロンに代表される含フッ素高分子には特異な電気・熱・光学的性質を示すものが多く、また多数のベンゼン環を主鎖に含むPI樹脂は、300°C以上の耐熱性（軟化温度と分解開始温度）と機械特性（高弾性・高韌性）から高性能高分子の代表格となっています。これらを組み合わせた含フッ素ポリイミドはフッ素の機能性とPIの耐熱性を合わせ持った新しい高分子であり、私の研究室はこの含フッ素PIの高機能化（光・電子・伝熱機能）を研究の主軸に据えています。ここでプラスチック本来の利点は柔軟性・軽量性・安全性（無毒）・易加工性（大量生産）・経済性（低価格）ですので、これらを犠牲にして金属やセラミックに勝っても実用化はされません。そのためにはまず、含フッ素芳香族族ポリマー本来の特性が、どのような立体構造や電子状態から発現するのかを各種の分光法や計算化学を使って解析し、その知見を基に耐熱性と機能性をあわせ持った新しい材料の設計指針を提案・実証することが必要です。その一例として、高蛍光性PIと薄膜PI偏光子の開発についてご紹介します。



薄膜ポリイミド偏光子の偏光特性と外観、薄くて軽くて（結構）強い。

デジタル機器のフレキシブルプリント配線板（FPC）に広く用いられるPIは通常、濃い橙色を呈しますが、原料物質の電子状態を理解して分子設計すれば、無色透明化が可能です。実際、脂環構造を含むPIや含フッ素PIは無色・透明で、これらは液晶配向膜や光導波路用途に使われています。しかし、PIは他の芳香族ポリマーに見られる蛍光性が非常に弱く、その理由は不明でした。われわれは、PIのモデル化合物を種々合成してその蛍光特性を調べるとともに、東工大が誇るTSUBAMEを駆使した量子化学計算（密度汎関数法）により、従来のPIが光りにくい理由として、最低励起状態が $n-\pi^*$ であり、励起状態での電荷移動性が強くかつエネルギー移動を起こしやすいこと等を明らかにしました。原因が明らかになれば、蛍光性発現を目指した分子設計は難しくありません。具体的には、合成原料に脂環式ジアミンと電子親和力の高い酸無水物を用い、かつ分子構造に立体障害を持たせて濃度消光を防ぐことなどで、既存のPIで蛍光性の高いものに比べ100倍以上の蛍光強度を有する高蛍光性薄膜が得られました。この高蛍光性PIは主鎖骨格に直接、蛍光性を付与しているため耐熱性は400°C以上、遷移金属や重元素を含まないので安全性が高く、すでに赤、緑、青とそれらの中間色の波長制御が可能で、高効率の白色発光材料も得られています。将来、紫外発光LEDなど組み合わせた、可視光への波長変換用途などを期待しています。

●銀ナノ粒子分散・フィルム偏光子

現在、液晶ディスプレイ用途として、ポリビニルアルコール／ヨウ素系の偏光フィルムが大



安藤研恒例のGWハイキング。このあとバーベキューをします。

量に生産されていますが、ヨウ素は光通信波長域（1.3～1.55μm）で吸収特性を示しません。例えば光アイソレータ用途には、無機ガラス中に金属化合物を分散させて一軸延伸後、還元処理したものが用いられていますが、大量生産が難しく高価です。そこで、PIフィルムの延伸配向技術を応用し、薄膜偏光子の一段階作製を目指しました。PI前駆体であるポリアミド酸（PAA）溶液に硝酸銀を溶解し、それを製膜後、加熱処理（>300°C）しながら一軸延伸すると、形状に異方性を持った銀ナノ粒子が析出します。この偏光子は短距離光通信の0.85μm帯には有効ですが、光通信波長域で高い偏光特性を得るために、銀ナノ粒子のアスペクト比を飛躍的に増大させる必要があります。そこで、銀イオンが含フッ素PIとは親和性が低く、含硫黄ポリイミドと親和性が高いことに着目し、両者の混合物（ブレンド）を使用しました。すると相分離と同時に銀イオンが含硫黄成分に選択的に濃縮され、幅約50 nm、長さ約300 nmのナノ粒子が得られ、かつナノ粒子の配向長軸が延伸方向に一致する理想的な薄膜を得ることができました。その後、作製条件の最適化を経て、偏光透過率>70%，二色比>25 dB以上の偏光子が得られています。自由に曲げられるため操作性が高く、大量生産も可能です。膜厚は15μmなので、光波長板と同様、光路回路上に形成した幅20μmの溝に差し込んで使用できます。これら機能性PIの開発は、すべて博士課程学生を中心とした学生数人の連携で完成されました。現在、この相分離制御技術を応用して、電気絶縁性を保ったまま、膜厚方向に高い熱伝導性を有するPIナノハイブリッド材料の開発に注力しています。



リオハの赤ワインが無限に出る蛇口 (Irache 村)。みんな大喜び。



メセタの中央部にある Hontanas 村。大地の窪みに村が埋まっている。



巡礼を終えた者のためのミサ。出発地と出身地がアナウンスされる。

●巡礼の道で会ったおじいさん

再び私事に戻りますが、堀田善衛氏の『路上の人』に出てくる「ヨナ」のことが気にかかっていて、5年前に思い立ち家内とスペイン中世の巡礼路（カミーノ・デ・サンチャゴ）を歩くようになりました。ピレネー山脈の麓の Jaca という町から歩き始め、毎夏スペインに通つて約 200 km ずつ歩き、昨年ようやく Santiago de Compostela に辿り着きました。最高地点でも標高 1,500 m ですから高低差は少なく、歩き始めのうちはリオハの美しいブドウ畠が続きます。若者達はおしゃべりをしながらピクニック気分で進みますが（自転車や馬で行く人も）、年配の巡礼者達の多くは考え方をしながらゆっくりと歩きます。夜はボランティアが運営する無料宿泊所（アルベルゲ）か 25 ~ 35 € の安宿に泊まります。Burgos から Leon にかけて、メセタと呼ばれる約 150 km の乾ききった台地があり、そこではみなが寡黙になります。歩き始めて 3 年目に会ったおじいさんは、これで 26 往復目！と言って一人で歩いていました。

それほど信心深そうには見えず、ゆっくり歩く以外に何もしないのですが、この人が「達人」の域にあることは一見して明らかです。一種の「妙好人」かもしれません。また、木の長い棒と水だけを持って、穏やかな



巡礼者が置いていった置き石。San Juan de Ortega 近郊。道中にいろいろある。

笑みを絶やさず、しかし道中ほとんど口をきかない若者にも会いました。私を含めた不信心者は、彼のことをキリスト様と呼んで不思議がっていました。“巡礼の道を歩いても奇跡は起こらないが、毎日多くの人が 900 km 以上の道のりを歩いていること自体が奇跡だ”とある人が言っていましたが、確かにそうかもしれません。

大学の忙しい日常に戻ると、スイッチが切り替わって巡礼路のことはすぐに忘れてしまいますが、それでも「すべての現象はそれ自体善である」という感覚は残ります。私の学生時代と異なり、今は海外に出るのも簡単ですし、大学も多様な国際化プログラムを用意して学生達を支援していますが、若者達の全体的な“内向き傾向”や“草食化”は少し気がかりです。しかし今の世でも、若者が志を立て、機会をとらえて外の世界を見、自らを鍛える体験をすることを手助けするのが教師の仕事です。私は「機能性プラスチック」の研究を通じてそれができれば、望外の幸せと思っています。