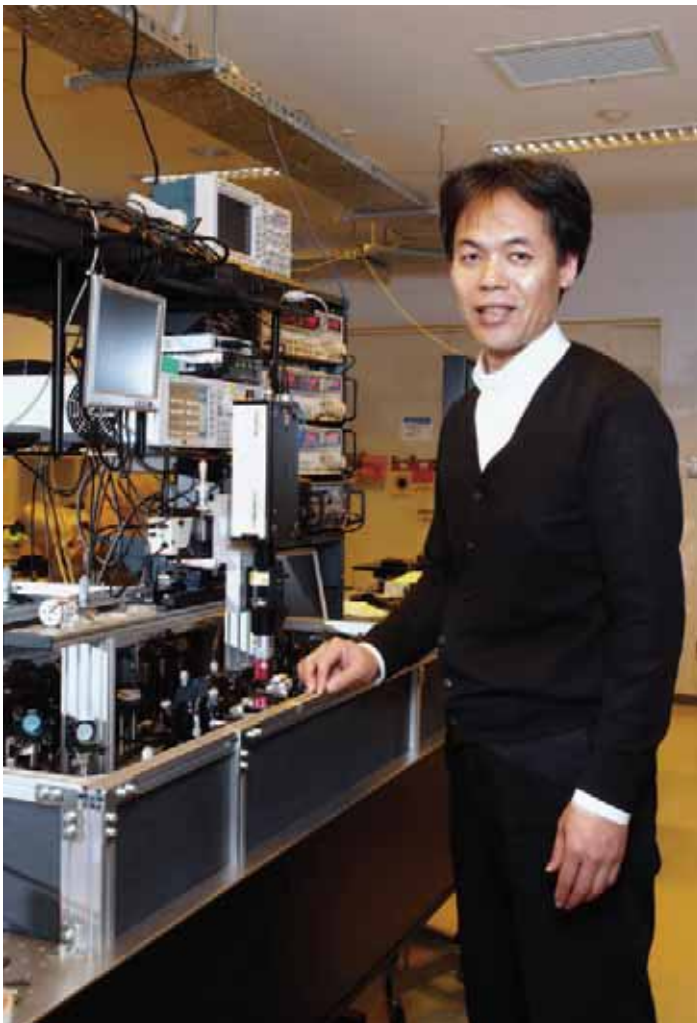


有機色素分子を用いた電気光学光変調器の開発

## 情報通信を抜本的に 高速・大容量化する

近年の情報通信網の発達に伴い、ネットワーク技術のさらなる高速化や省電力化が求められています。しかし、既存技術の延長では、いずれ行き詰まることが予想されており、根本からネットワーク技術を見直す必要があります。ナノICT研究室では、有機材料を用いた革新的光制御デバイスの開発を目指し、研究が進められています。大友明室長にその開発状況と今後の展開について伺いました。



**Q：光デバイスの鍵となる光変調器の仕組みを教えてください。**

大友：ネットワークの高速化のため、光通信が広く使われています。光変調器は光通信の要ともいえるデバイスで、導波路に光を通すことで、電気信号を光信号へ変換することができます。導波路を端から順に見ていくと、まず、光は2つの方向に分岐され、その後、分岐した2つの光は再びひとつに合流します。この時、2つに分岐させた片側の道の屈折率を上げると、光が進むスピードが落ち、光の位相がずれます。位相がずれると光が合流した時に干渉が起こり、山と山、谷と谷は強め合い、山と谷は打ち消し合うという現象が起きます(図1)。

ここで、導波路の屈折率をコントロールし、光の進む速度を変えているのがEO素子です。EO素子は電気

ナノICT研究室  
室長

### 大友 明

Otomo Akira

Ph.D.

略歴

大学院修了後、1996年、郵政省通信総合研究所(現NICT)に入所。分子フォトニクスやナノフォトニクスを光制御技術に応用する研究などに従事。東京工業大学大学院理工学研究科連携教授。

研究分野

非線形光学、光導波路デバイス、有機分子フォトニクス

近況

数年前に柴犬を飼い始めてから、すっかり愛犬家になりました。週末は、気の向くままに犬とあぜ道を散歩することでリフレッシュしています。

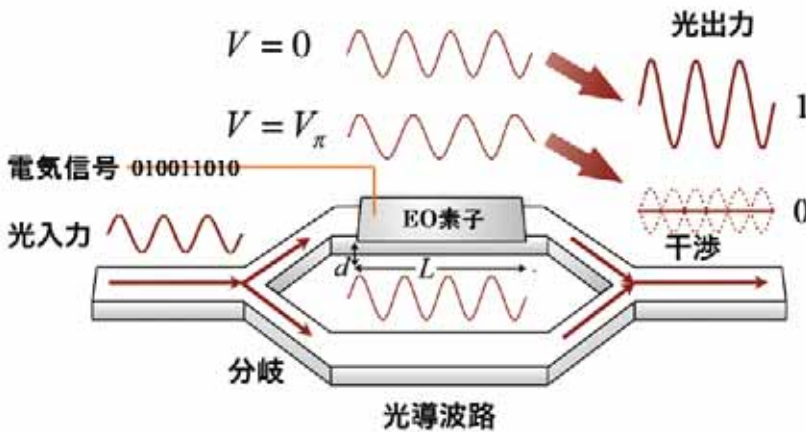
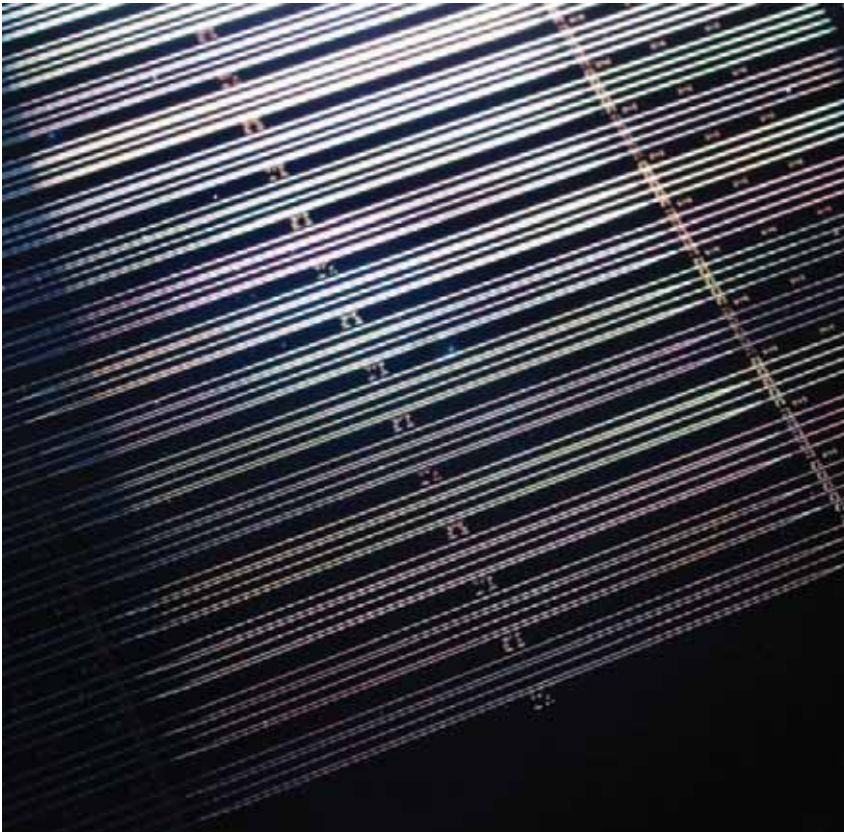


図1：マッハツェンダ型光変調器。EO素子に電場をかけることで、Lの区間の屈折率が上がる。屈折率を上げ、光の進むスピードを半波長分だけ遅くすると、光の波の山と谷が相殺し、光出力は0となる。上の写真は実物。1本の回路が二股に分かれた後、再び合流していることがわかる。

光学 (Electro-Optic : EO) 効果を利用したもので、電場をかけると導波路の屈折率を変えることができます。つまり、光変調器は、電気信号によって光の強度や位相を変調させることで、光を信号として使えるようにしているのです。

このEO素子がどれだけ速く光の強度や位相を変えられるかが、光通信の速度を左右します。つまり周波

数を高く変調できれば、それだけ多くの信号を載せることができるようになります。

現在、EO素子に使われているのはニオブ酸リチウム(LN)という無機材料です。LNは高速変調が可能な材料ですが、それでも、物質特性から10GHzを超えると変調ができなくなってしまいます。さまざまな工夫で40GHzまで変調できるよう

になりましたが、このままではいずれ頭打ちとなり、次世代の高速通信には対応できません。

さらに、ニオブ酸リチウムのEO素子はレアメタルを使っているため、資源の面で限りがあります。EO素子は光通信では基幹となる部品ですので、地表のどこにでもあり、まとめて手に入れることができる材料を使うのが理想です。

そこで、私たちは、有機材料である有機色素をEO素子として用いた光変調器の研究開発を進めています。

**Q：光変調器に有機材料を使うことでどのような利点がありますか。**

大友：まず、レアメタルを使用せずに、炭素や水素、酸素、窒素、フッ素、硫黄など、ごくありふれた材料で製造することができます。その結果、重量を軽くすることができたり、柔軟性をもたせたりすることも可能です。

性能面でも、有機材料は無機材料に比べ、スピードが速く効率が良いデバイスを作ることができます(図2)。これは、電磁波の一種である光が、物質の中にある電荷と電気的な相互作用を起こすとき、有機材料の方が効率が良いためです。物質中の電荷とは、例えば、無機材料では金属中の自由電子や、結晶中のイオンに相当します。対して、有機材料の場合では、二重結合や三重結合に関与する電子が電荷であり、有機分子の中を非常に動きまわりやすいという特徴があります。そのため、無機材料よりも特定の周波数や波長



に強く応答します。この性質を利用して必要な波長に反応するようにデザインすれば、とても効率よく反応させることができるのです。

**Q：デバイス開発にはどのような課題がありましたか。**

大友：EO効果を発現するのは、電子供与基(ドナー)と電子受容基(アクセプター)を共役で結んだ有機色素の分子です(図3)。デバイスを作るには、分子を基板に載せなければなりません。有機色素そのものを溶液にして塗り固めても、透明にならないので、光を通すことはできません。また、分子の方向を揃えることも重要です。

そこで、私たちは、分子自体を別のポリマーの側鎖につける方法を採用しました。このポリマーは室温では硬いのですが、温度を上げるとゴム状になり、そこに強い電圧をかけることによって分子の向きを揃えて、その状態で冷やすと向きを固定できるのです。

導波路には屈折率の高い部分と低い部分を作らなければなりません。有機EOコアの部分は屈折率が高く、光が通る場所で、これを屈折率の低いクラッドという部分で覆うことで、光を全反射させ、光の通路とします。

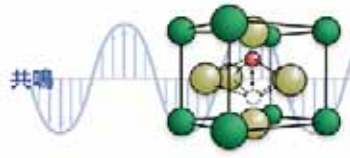
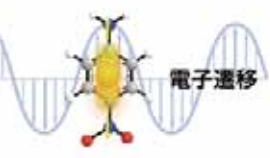
図2：代表的な電気光学材料の比較。ニオブ酸リチウムは電気光学効果が小さいため、十分に屈折率を変えるためには、比較的長い導波路が必要になる。一方、有機色素は電気光学効果が大きいため、短い導波路で済み、デバイスの小型化も期待できる。また、ネットワーク速度を左右する応答速度も有機色素のほうがはるかに速く、100Gbpsを超える通信が可能になる。

導波路を作るには、まず屈折率を低く調整したポリマーでクラッド層を塗り固めた後、その上に屈折率を高めた有機EOポリマーを塗布して有機EOコア層とし、 unnecessary部分を削った後に、再びクラッド層を載せることによって、有機EOコア層をクラッド層で覆うことができます。

しかし、この導波路の作製には、異なるポリマーの層を重ねる際に、溶媒が下の層を溶かしてしまうという問題がありました。この問題に対し、従来法ではクラッドのポリマーに紫外線で固まる接着剤を使うことで対処していました。しかし、この方法では、有機EOポリマーのほうが接着剤より導電率が高いため、EO分子の入っていないクラッドばかりに電場がかかることとなります。これでは分子の向きは揃えられません。

解決にはごく一般的な方法を用いました。クラッドにも有機EOの含有量の低いポリマーを用い、これを塗布した後に、熱でポリマー同士を連結させ、異なるポリマーを塗り重ねても下の層が溶媒に溶けないようにしました。これならばどの層にもEO分子が含まれているので導電率の差は少なくなり、分子の向きを揃えることができるようになります。

この際、私たちのオリジナルの方法として、2種類の有機色素を使うことで、有機EOコア層により電場を集中させ、分子の配向性を高められることがわかりました。1つはこれまでと同様のEO分子で屈折率と導電率が高くなる分子ですが、もう1つは、屈折率が高まっても、導電率が高くない分子を使います。これらを混ぜて使うことにより、屈折率のコントラストと導電率のコン

	ニオブ酸リチウム	有機色素
	 <p>イオン分極 Ionic polarization</p>	 <p>電子分極 Electronic polarization</p>
電気光学効果 $r$ (pm/V)	小さい 32	大きい > 100
$\Delta n$	$10^{-4}$ - $10^{-5}$	$10^{-3}$ - $10^{-4}$
応答速度 (sec)	速い $10^{-10}$	非常に速い $10^{-14}$
応用	高速光変調器 (~40Gbps)	超高速光変調器 スイッチ (> 100Gbps)

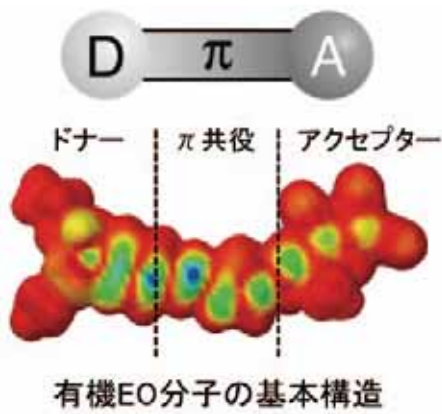


図3：有機EO分子の基本構造。強い双極子モーメントをもった構造であるため、有機色素を分子のまま使うと、ペアで結合してしまう。そのため、ポリマーの側鎖に結合させることが必要。

トラストを理想的な形にできるようになりました。

**Q：有機EO分子はどのように開発したのですか。**

大友：6年前から有機EO材料の開発に挑戦してきましたが、はじめは共役構造の改変に取り組みました。私は20年ほど前にも有機非線形光学デバイスの研究を行っていたのですが、そのときから強固な共役構造の重要性に着目していたからです。しかし、なかなか大きな成果は得られませんでした。転機が訪れたのは数年前で、ドナーの部分に20年前からほとんど変わっていないことに気づき、ドナー部分の改変に方針を変更したのです。私たちのチームに

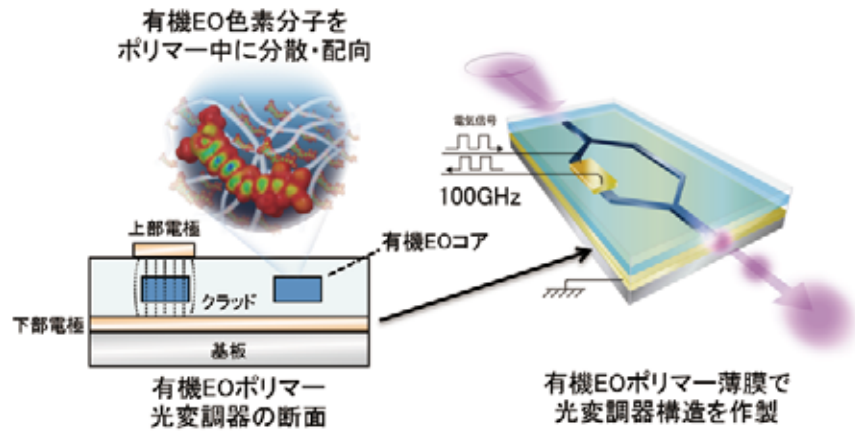


図4：有機EOポリマーを用いた光変調器の断面と構造。有機EOポリマーはデバイス全体に分布しているが、導波路の片側のみ電極が付けられ、EO素子としての役割が付け加されている。

は有機合成のスペシャリストがいますので、分子構造のアイデアをすぐに具現化できることから、方針転換にも即座に対応できる体制が整っていました。

ワシントン大学のラリー・ダルトン博士が発見した有機EO分子「FTC」は、これまで発見されただの分子よりもEO効果が高く、EOデバイスを飛躍的に進歩させました。私たちはこの研究をもとにFTCを作り、ドナーの部分に置換基を付加して、さらにEO効果を高めることを目指しました(図5)。これにより、元のFTCと比べ、1.3倍のEO効果をもつ分子を作することに成功しました。その後、様々な共役構造の分子に同様の改変を行い約100種類の分子

について、EO効果との関連性を調べました。そして、開発した分子は、分子内に水素結合ができるために共役構造が安定化しており、ドナー性の強化に加えて、このことも大きなEO効果をもたらす要因であることがわかりました。ドナー性の強化に方針転換して行った方法が、結局当初の目的であった共役構造の安定化をも同時にもたらす一挙両得の結果となりました。

**Q：有機材料によって光通信はどのように変わっていくのでしょうか。**

大友：有機材料で作られるデバイスの特徴として注目すべき点は、デバイスを多層化して集積ができる点です。現在、小金井にある光ネットワーク研究所と連携したプロジェクトで、マルチコアファイバーを使って電線を束ねるように伝送しようという考えが出てきました。

従来は、波長を多重にして1つのファイバーの中に詰め込んで、一度に伝送していました。しかし、多くの波長を詰め込むと、光エネルギー

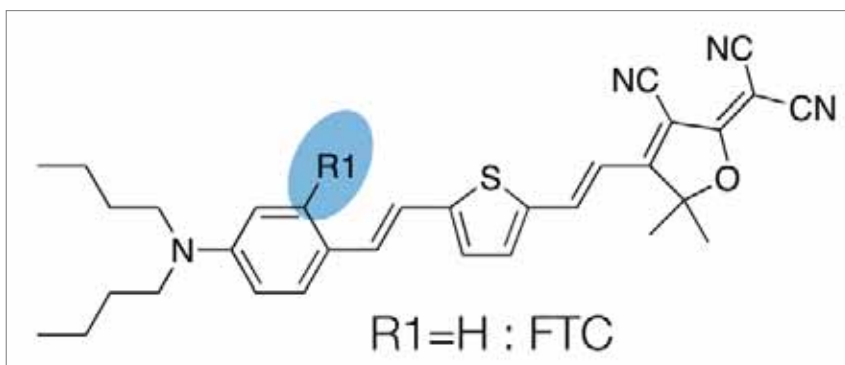


図5：FTCにドナー性の置換基を付加した。左側が電子供与基（ドナー）で、右側が電子受容基（アクセプター）。ドナー端がポリマーと結合する。R1部位に置換基を付けることで、電子供与性の強さを高められる。

によってファイバーが溶けてしまうという問題が顕在化するようになり、1つのファイバーに詰め込むという考え方から転換を迫られています。

マルチコアファイバーは、光の通るファイバーのコアを複数作り、マルチコアという形で伝送することで、光ネットワークの容量をさらに大きくすることができると考えています。マルチコアファイバーを通る光信号の経路をスイッチする必要がありますが、これまでのスイッチではシングルコアファイバーにしか対応していないため、現在はマルチコアからシングルコアに変換してからスイッチするしかありません。

有機EO材料で多層化したスイッチングデバイスが出来れば、マルチコアファイバーのままスイッチすることが可能になり、マルチコアファイバー通信という新しいシステムによる大容量化が現実的なものになります。

また現在、光の経路を割り振るときに、光信号のままスイッチする「オール光化」というプロジェクトが進められています。現在の光通信のルータは、光信号をフォトダイオードで受けて電気信号に変換し、行き先を電気ルータでスイッチした後、光変調器によって再び電気信号を光信号へ変換しています。この電気 光の変換時にはかなりのエネルギーロスがあり、スピードも遅くなってしまいます。そこで、光信号を電気信号に変換せず、光信号のまま行き先をスイッチすることができる「光ルータ」の開発が行われてい

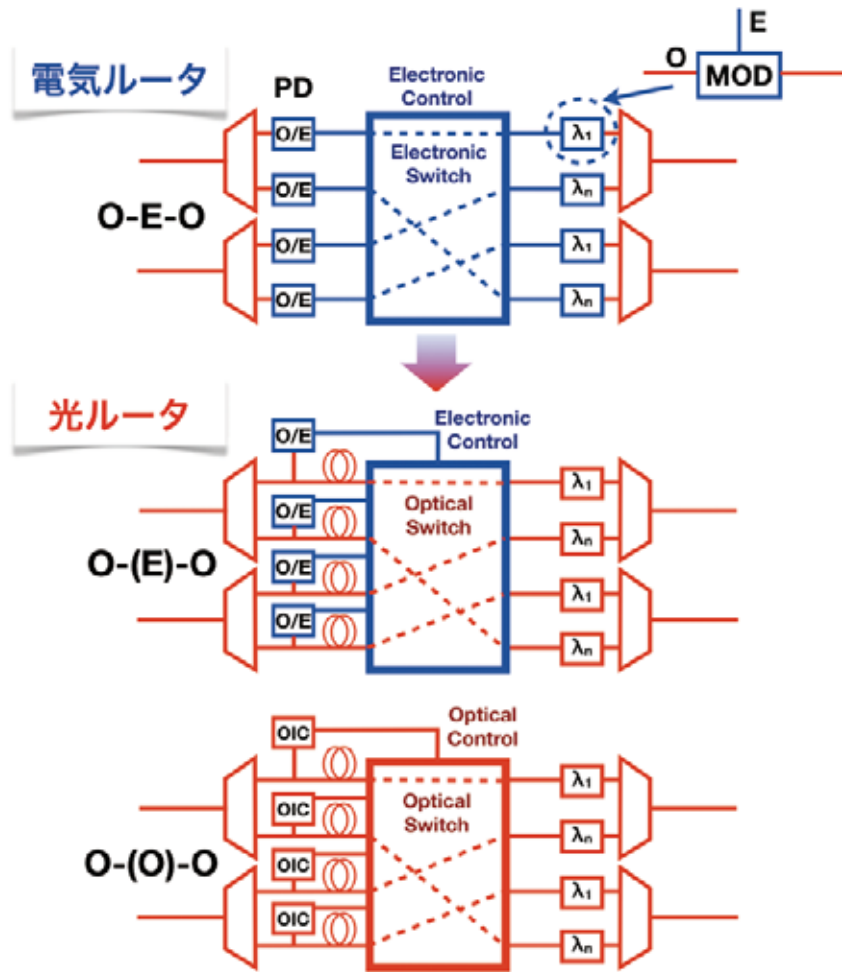


図6：電気ルータと光ルータの模式図。光ルータは、光信号を光信号のままスイッチングできる。完全に光だけでスイッチングできるルータは、光回路の実現を待たなければならない。

ます。すべてを光信号のみで制御することが理想ですが、光コンピュータがまだできていませんので、まずは光の行き先の制御には電気信号を使う技術が開発されています(図6)。このスイッチに、有機EOデバイスを用いることで、さらに高速で低消費電力なシステムにすることが可能になります。

他のネットワークに関連する問題として、データセンターでの消費電力の爆発的な増大の問題があります。データセンターでは大量のデータを扱うことからデータ通信の高速大容量化も求められており、この需要を満たしつつ消費電力を下げのためにデータ配線の光化が進められてい

ます。現在はボード間からボード内チップ間の配線の光化が進んでおり、将来のチップ内コア間の光配線に向けての研究が盛んになっています。

チップ内の光配線では、シリコンを使った光回路が使われますが、シリコンだけではスイッチングの性能が不足していることから、スイッチング性能が高い有機EO材料との組み合わせが解決策の1つとして注目されています。

私たちも、有機EOデバイスによる基幹ネットワークの超高速光変調の研究に加えて、有機EO材料とシリコンナノ構造とを組み合わせた超小型の超高速光変調デバイスの研究開発を行っています。