

KARCFRONT

未来 ICT 研究所ジャーナル

Vol. **26**

2013
SPRING

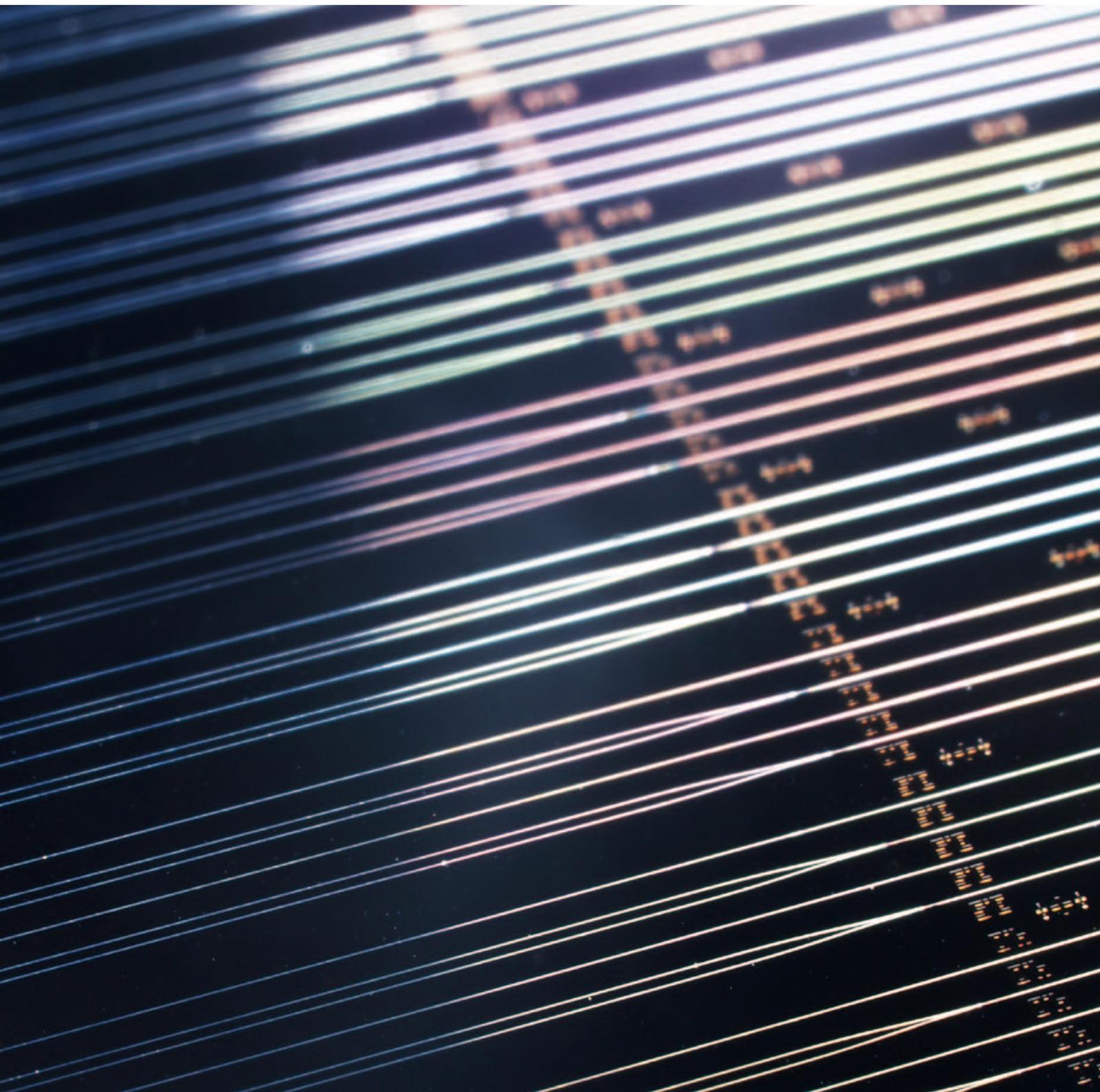


特集：次世代 EO 素子開発の最前線

情報通信を抜本的に高速・大容量化する

最先端ナノ光デバイスが
性能限界を打破する

有機 EO 色素の設計と評価





特集：次世代 EO 素子開発の最前線 1 3



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

ナノ ICT 研究室室長 大友明 Ph.D.

特集：次世代 EO 素子開発の最前線 2 8



有機・シリコン融合フォトニクスによる
オンチップ超高速光通信デバイス

最先端ナノ光デバイスが 性能限界を打破する

主任研究員 井上 振一郎 博士 (工学)

特集：次世代 EO 素子開発の最前線 3 11



有機色素の EO 効果を向上させる分子設計法

有機 EO 色素の 設計と評価

主任研究員 山田 俊樹 博士 (工学)

TOPICS 14

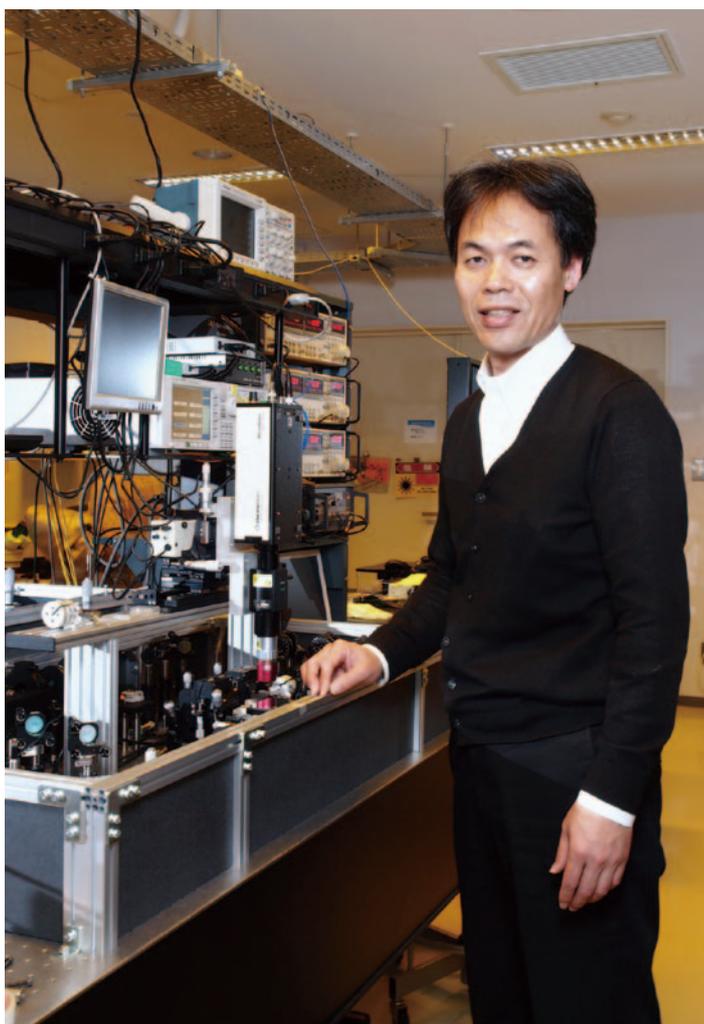
「テラヘルツ波の産業応用の可能性」～テラヘルツ研究センター
設置記念講演会～を開催／10th International Conference on
Nano-Molecular Electronics (ICNME 2012) 開催／nano tech
2013 に出展／上海微系統情報技術研究所 (SIMIT) と「研究協
力に関する覚書」を締結／「SIMIT - NICT Workshop」開催／
受賞報告——岩本政明主任研究員が Young Presenters Award
for Poster Presentation、春野雅彦主任研究員が日本神経回路
学会論文賞、Ganesh Gowrishankar 主任研究員が Best IROS
Jubilee Video Award を受賞

未来 ICT 研究所 STAFF 総覧 16

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。分子フォトンクスやナノフォトン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、有機分子フォトンクス

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。

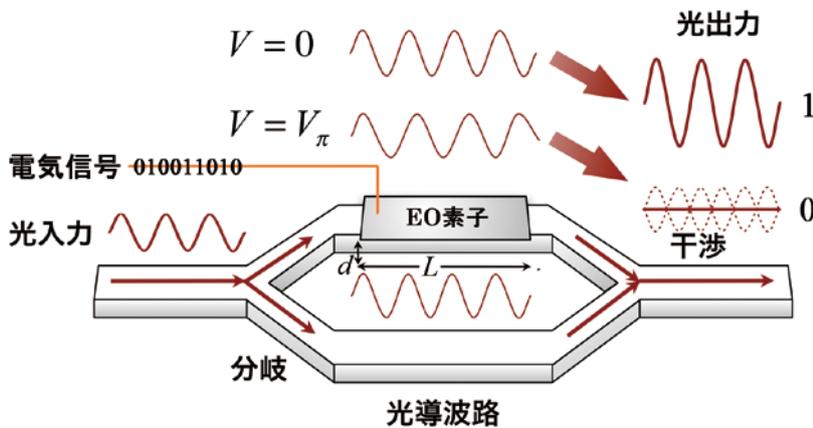
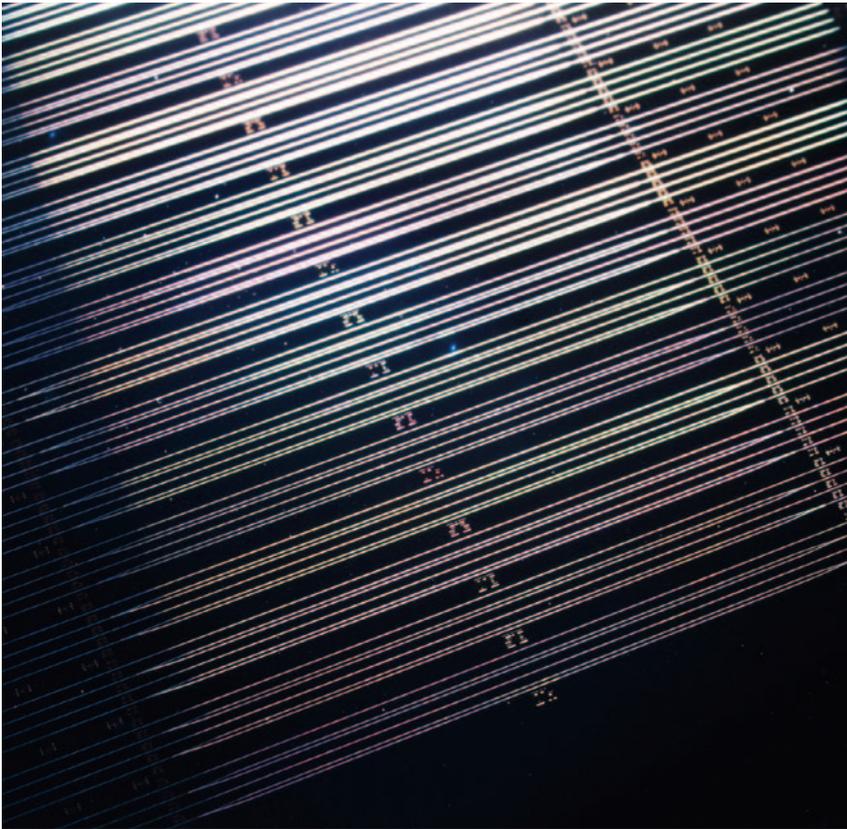


図1：マッハツェンダ型光変調器。EO素子に電場をかけることで、Lの区間の屈折率が上がる。屈折率を上げ、光の進むスピードを半波長分だけ遅くすると、光の波の山と谷が相殺し、光出力は0となる。上の写真は実物。1本の回路が二股に分かれた後、再び合流していることがわかる。

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π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応答するようにデザインすれば、とても効率よく応答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π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。

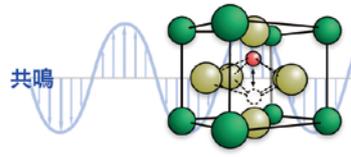
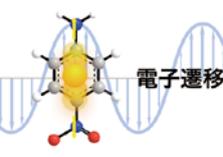
図2：代表的な電気光学材料の比較。ニオブ酸リチウムは電気光学効果が小さいため、十分に屈折率を変えるためには、比較的長い導波路が必要になる。一方、有機色素は電気光学効果が大きいため、短い導波路で済み、デバイスの小型化も期待できる。また、ネットワーク速度を左右する応答速度も有機色素のほうがはるかに速く、100Gbpsを超える通信が可能になる。

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くした有機EOポリマーを塗布して有機EOコア層とし、不必要な部分を削った後に、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になります。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
Δn	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)

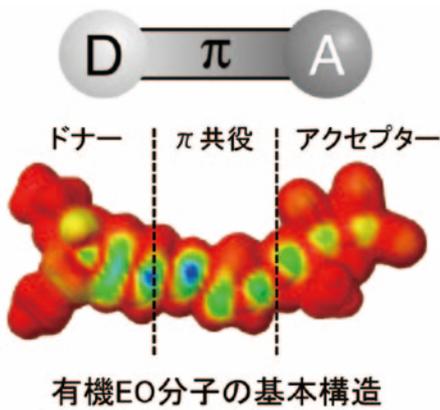


図3：有機EO分子の基本構造。強い双極子モーメントをもった構造であるため、有機色素を分子のまま使うと、ペアで結合してしまう。そのため、ポリマーの側鎖に結合させることが必要。

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π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π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、ドナーの部分が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

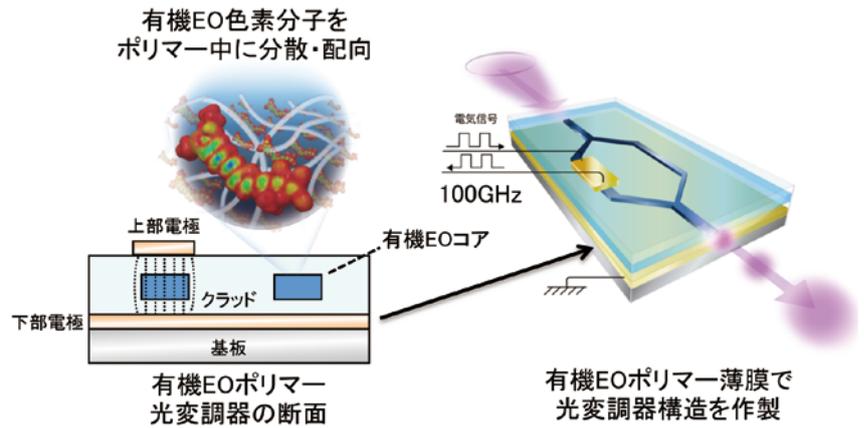


図4：有機EOポリマーを用いた光変調器の断面と構造。有機EOポリマーはデバイス全体に分布しているが、導波路の片側にのみ電極が付けられ、EO素子としての役割が付け加されている。

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ることになりました。その後、様々なπ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π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π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

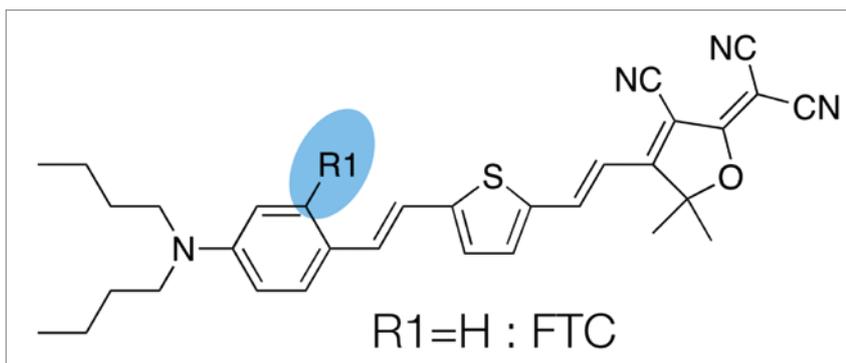


図5：FTCにドナー性の置換基を付加した。左側が電子供与基（ドナー）で、右側が電子受容基（アクセプター）。ドナー端がポリマーと結合する。R1部位に置換基を付けることで、電子供与性の強さを高められる。

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

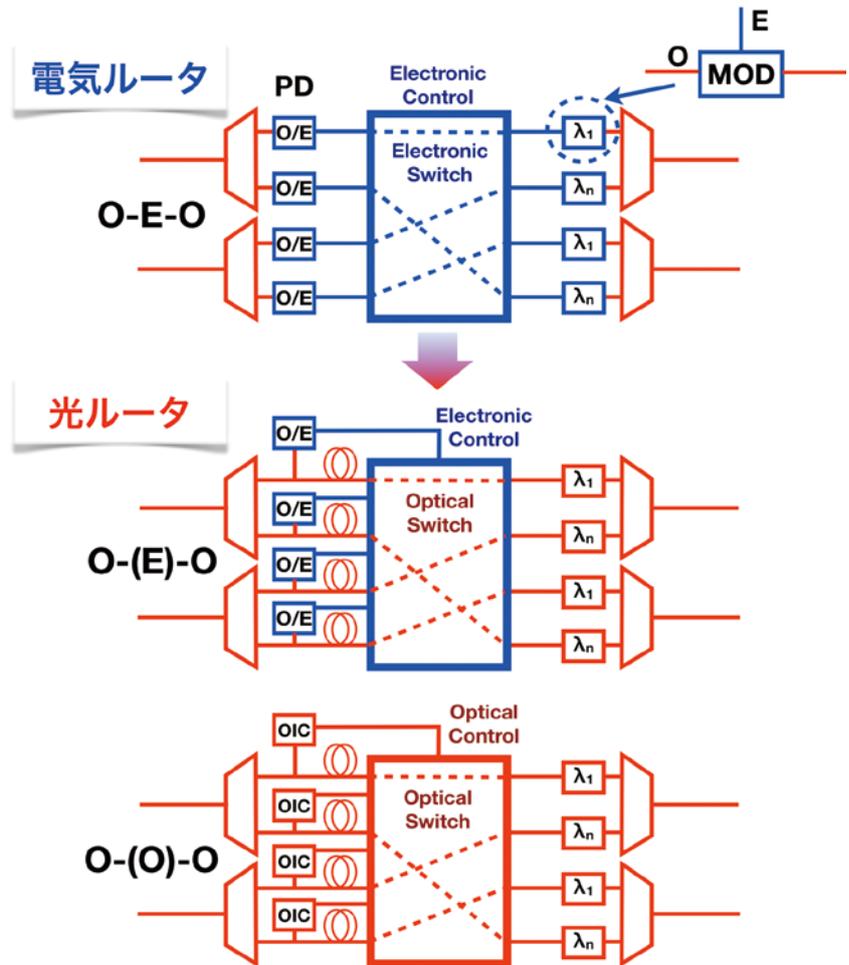


図6：電気ルータと光ルータの模式図。光ルータは、光信号を光信号のままスイッチングできる。完全に光だけでスイッチングできるルータは、光回路の実現を待たなければならない。

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る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。

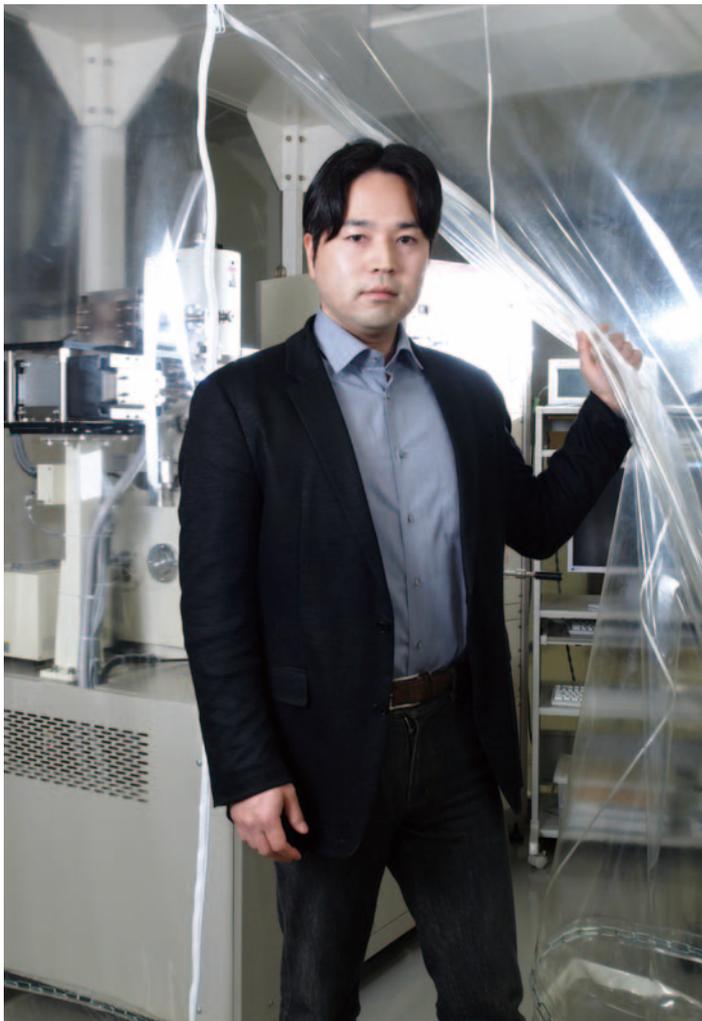
チップ内の光配線では、シリコンを使った光回路が使われますが、シリコンだけではスイッチングの性能が不足していることから、スイッチング性能が高い有機EO材料との組み合わせが解決策の1つとして注目されています。

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きます。

有機・シリコン融合フォトニクスによる
オンチップ超高速光通信デバイス

最先端ナノ光デバイスが 性能限界を打破する

情報通信システムの巨大化が進むなかで、どのように消費電力の増大を抑えながら、ICT 機器の小型化や通信速度の向上を実現していくかが、極めて重要な課題となっています。この問題に対し、私たちは「有機材料とシリコンフォトニクスとの融合」が光信号処理の超高速化や低消費電力化、集積化に画期的なブレイクスルーをもたらすと考え、独自の視点から有機・シリコン光集積回路の研究開発を進めています。



光デバイスの課題

情報通信処理の光化が進めば、処理速度や発熱の問題が解決されるだけでなく、消費電力についても大幅に削減できます。しかしこれまで、光ファイバー通信などの長距離伝送用途以外ではほとんど光化は進んでおらず、システムの信号処理部分では、いまだに電子回路に頼っています。これには様々な要因がありますが、特に大きな問題は、光デバイスが電子デバイスと比べて桁違いにサイズが大きいこと、そして高価なことです。つまり、光デバイスの性能が高いことは間違いないのですが、それだけで普及するわけではなく、サイズやコスト面も含めたトータルな価値が電子デバイスを上回らなければ、特殊用途以外、広く使わ

ナノICT研究室
主任研究員

井上 振一郎

Shin-ichiro Inoue

博士(工学)

学歴

2004年 東京工業大学博士課程修了

略歴

2004年、理化学研究所基礎科学特別研究員、2007年、九州大学先端物質化学研究所助教を経て、2010年より現職。神戸大学工学研究科准教授(連携講座)、および理化学研究所客員研究員を兼任。船井情報科学奨励賞、安藤博記念学術奨励賞、光科学技術研究振興財団研究表彰など受賞。

研究分野

光エレクトロニクス、ナノ微細加工、有機非線形光学、ナノフォトニックデバイス

近況

ハードな毎日なのでオフの切り替えは大事にしています。5歳と1歳になり日々成長していく息子たちと過ごす時間が、何より活力を与えてくれます。

れる技術には決してなり得ません。

情報処理の光化を進めるには、複雑な論理処理に優れた電子集積回路と、高速化・省エネルギー化に有利な光集積回路とを融合する技術の開発が不可欠です。そこで特に重要になるデバイスの1つが、電気信号を光信号に変換する光変調器です。現在は、電気光学効果が大きいニオブ酸リチウム (LN) が主に用いられ40Gbpsの光変調器が実用化されています。

また、有機電気光学 (EO) ポリマーを用いた光変調器も近年盛んに研究されています。2000年代初頭にはLNをはるかに超える材料性能をもつ有機EOポリマーがワシントン大学のグループによって開発され、2007年にはアリゾナ大学のグループからLNの5倍以上の材料性能 (EO係数170pm/V) をもつEOポリマー変調器が報告されています。そして、米国Gigoptix社からは100Gbpsという超高速な有機EOポリマー変調器がすでに商用化されています。

しかし、これらの光変調デバイスはすべて、サイズが数cm以上であり、電子デバイスと比較すると桁違いの大きさです。電子デバイスでは微細化が極限まで進んでおり、フィンガーサイズのチップに数十億個のトランジスタ素子が集積化されています。そのため、1素子あたりのコストも非常に小さくなります。よって、光デバイスが電子デバイスに置き換わるためには、帯域などの性能向上だけでなく、電子デバイスとのサイズ、コスト面のギャップをどの

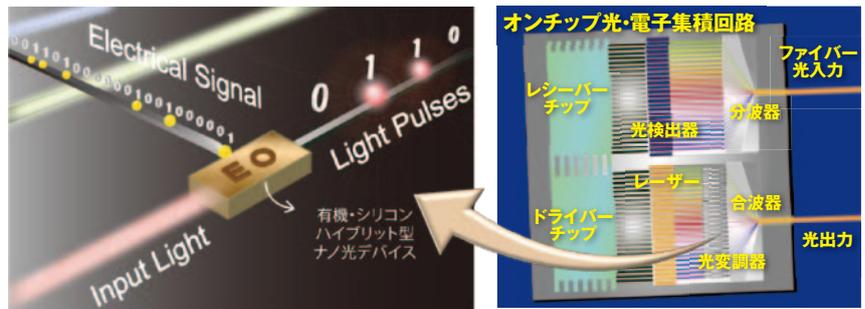


図1 超高速・光/電子融合集積チップの概念図。

ように埋めるかがきわめて重要な課題となります。

シリコンフォトニクス

このような光デバイスと電子デバイスのサイズ、コストのギャップは「シリコンフォトニクス」という新たな技術分野の登場により、その差が急速に埋まりつつあります。シリコン (Si) はご存じの通り電子デバイスの根幹をなす材料ですが、光デバイスにおいても2000年代以降、国家プロジェクトや産業界が牽引する形で開発が本格化し、瞬く間にシリコンフォトニクスが最注目技術分野として認識されました。

従来、シリコンは電気光学効果をもたず、材料の特性上、受光・発光素子としても適さないため、光デバイスには不向きな材料として長年ほとんど無視されてきました。しかし、近年のデバイス構造の最適化や微細加工・プロセス技術の発展によって、高速なシリコン光変調器や光検出器などの要素技術が次々と開発され、光と電子素子を融合する、現実的な技術として期待されています。

シリコンフォトニクスの大きな利点のひとつは、屈折率の差を大きくとれるため、従来の石英系やポリマー系の光回路と比べて、その回路サイズや断面積を約1/1000に小型化できることです。その結果、電子

回路と同じチップ上に光回路を集積化するような技術が可能になります。また、シリコンフォトニクスのもうひとつの大きな特徴は、シリコンLSIチップを製造するための施設であるCMOSファウンドリーを転用して、大規模な光集積回路を圧倒的に低いコストで製作できることです。これは応用上とても重要な要素で、将来的には単純なLN、EOポリマー光変調器などの従来の非集積型光デバイスのほとんどはシリコンフォトニクスに置き換えられる可能性があります。

電子デバイスの性能が限界に近づきつつある現在、CPUのメモリア化や電気配線の複雑化による信号遅延、発熱量の問題が顕在化しています。このため、電気メタル配線の代わりに、光インターコネクションという、シリコン光配線・光回路を用いる短距離・オンチップ高速光通信技術の開発が急速に進められています。

有機材料とシリコンフォトニクスとの融合

シリコンフォトニクスは集積化に優れ、大規模光回路の大量生産、低コスト化が期待できますが、シリコンはEO効果をもたないため、光変調の動作原理としてキャリアプラズマ効果 (キャリア濃度の密度変化)

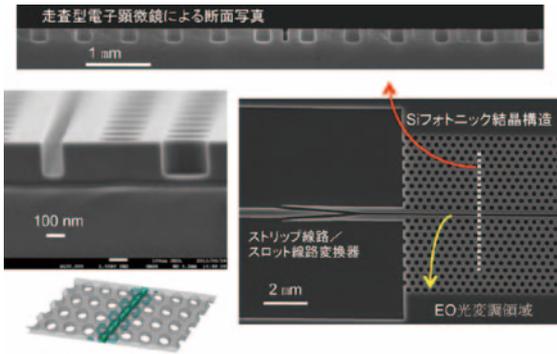


図2 有機・シリコン融合型ナノフォトニック EO 変調デバイスの電子顕微鏡 (SEM) 写真。

を利用しており、動作速度としては40GHz前後が限界となります。よって、将来100GHz以上の超高速な光変調素子の集積化を実現しようとした場合、まったく新しい光デバイスのデザインが必要となります。

現在、産業界では、10Gbpsもしくは40Gbpsの光信号を、波長・偏光・空間的に多重・並列化することによって高速データ通信を実現しようと開発を進めています。しかし、情報通信量(トラフィック)の急拡大を背景に、近い将来、必ず根本的な速度の向上、つまり100GHz以上の超高速な光集積回路が必要になる時期が来ると想定されます。

そこで私たちは、これらのバリアーを打破するため、有機材料(EOポリマー)とシリコンフォトニクスとをハイブリッドしたナノフォトニックデバイスの研究開発を進めています。EOポリマーはLNよりはるかに大きな非線形光学特性をもっているため素子の低電圧化が可能であり、さらに光波と高周波帯の屈折率差がきわめて小さいため、100GHz～THzにいたる超高速な光変調が可能です。一方で、有機材料は屈折率が小さいため、従来、集積化には向かないと考えられてきました。しかし、有機材料は、様々な異種材料と組み合わせることができるため、シリコンとのハイブリッド構造を

実現することで、ナノ領域で光を閉じ込めることも可能になります。したがって、シリコンフォトニクスと有機材料、両技術のメリットを融合することで、超高速な光制御デバイスの集積化を実現することができると考えています。

スローライトやシリコンナノテクノロジーを駆使したデバイス開発

このようなナノフォトニック構造では、「スローライト」という光の速度を1/100程度まで人為的に減速させた極限的な光状態をつくり出すことが可能です。これにはフォトニック結晶という光波長程度の周期構造を利用するのですが、スローライト効果を用いることで、物質の非線形光学効果が大幅に増強されます。したがって、光デバイスのサイズをさらにコンパクト化するとともに、大幅な低消費電力化が可能です。これらの技術を複合すれば、電子デバイス並みに光デバイスを極小化し、ワンチップ上で電子集積回路のポトルネックとなっている部分を光に置き換えた究極の超高速・光/電子融合集積デバイスの開発も可能になります(図1)。

私たちは、有機材料の開発、製膜・分子配向プロセスから世界最高精度のシリコンナノ微細加工技術、ナノ光デバイスの性能評価や理論解析にいたるまで、全行程の研究開発を一貫して行っています。このような有機・シリコンフォトニクス融合研究

を総合的に進めているグループは、世界的にみても未来ICT研究所が唯一です。

研究開発の現状と展望

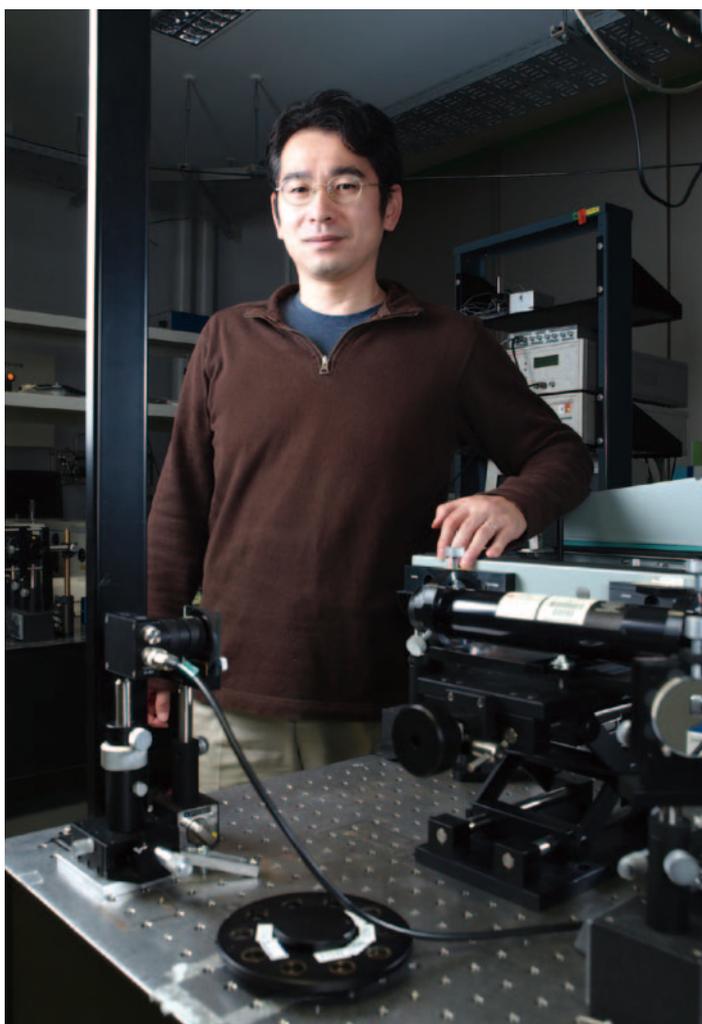
現在、私たちは、有機EOポリマーとシリコンナノフォトニック構造を融合させるプロセス技術を独自に開発し、ナノオーダーで高精度な有機・シリコン融合型ナノフォトニックEO変調デバイスの作製に成功しています(図2)。また、シリコンフォトニック結晶構造によるスローライト効果と有機材料の優れたEO特性を融合することで、現在実用化されているLN光変調器の10倍以上の性能指数(電気光学係数)をもち、素子サイズが従来の1/1000以下のシリコン・有機EOポリマー融合型フォトニック結晶EO変調器の動作実証にはじめて成功しています。

シリコンフォトニクスによるエレクトロニクスとフォトニクスの本格的な融合は、情報通信技術に根本的な変革を引き起こす可能性があります。その中で私たちは、シリコンフォトニクスと有機材料の融合をキーワードとし、双方の長所をリンクすることで、従来の光素子では不可能だった、様々な新しいオンチップ光技術への展開をはかっていきます。100Gbpsを超える超高速光変調デバイス、光・電子融合集積回路の開発以外にも、全光スイッチングや光バッファ、超高感度センサー、さらにはバイオフィotonics応用など、広範な分野・領域への波及効果、展開が見込まれます。

有機色素の EO 効果を向上させる分子設計法

有機 EO 色素の設計と評価

光変調器の性能は EO 効果の大きさと変調帯域で決まります。有機色素分子の EO 効果を大きくするには、有機色素の分子レベルでの非線形感受率（超分極率）を上げることが必要です。どのような分子設計をすれば超分極率は上がるのか、有機色素の特性評価が大切になります。



光通信に欠かせないEO効果

電気光学 (EO、Electric-Optic) 効果とは、物質に電圧をかけたときに屈折率が変化する現象です。EO 効果は、光通信のキーデバイスである電気信号を光信号に変換する光変調器や光スイッチの中で使われています。現在、EO効果をもつ物質として、主に無機物が使われていますが、私たちのグループでは、EO効果をもつポリマー (EOポリマー) の特性を向上させ、光変調器や光スイッチに応用するための研究をしています。

私たちが研究しているEOポリマーは、ポリマーの長い主鎖に、側鎖としてEO効果をもつ色素を結合させたものです (図1)。このようなEOポリマーは、そのままでは十分なEO効果を発揮することができま

ナノICT研究室
主任研究員

山田 俊樹

Yamada Toshiki

博士 (工学)

学歴

1996年 東京工業大学大学院理工学研究科博士課程修了

略歴

1994年、日本学術振興会DC1研究員、1996年、科学技術振興事業団研究員(九州大学大学院)、1999年、郵政省通信総合研究所(現NICT)研究官、2002年より主任研究員、2008年より東京工業大学大学院連携大学院准教授兼務。

研究分野

有機材料物性、光計測、ナノテクノロジー

近況

研究、家庭、休息などバランスをとりながら過ごしています。一昨年前にアキレス腱を切ったからは本格的な運動ができていないのがさみしいところです。

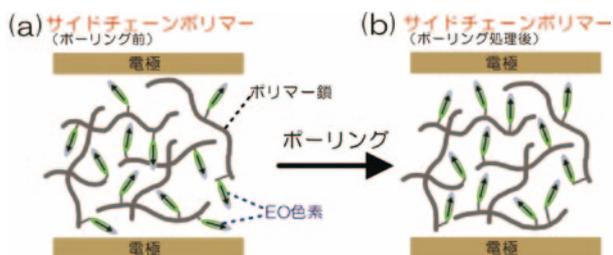


図1 有機EOポリマーの概要

せん。それは、EO色素の向きがばらばらだからです(図1(a))。EO色素の分子内には、電荷の偏りがあり、一方の端はプラスの電荷を、もう一方の端はマイナスの電荷を帯びています。これを「双極子」といい、図のように、マイナスからプラスに向かう矢印で表します。大きなEO効果を得るには、双極子の向きを図1(b)のように揃える必要があるのです。

そのために、ポーリングという処理をします。具体的にはポリマーの温度を上げてポリマー鎖が動きやすい状態にしておき、そこで比較的高い電圧をかけ、EO色素の双極子の方向を揃え、そのまま温度を下げてその配向(並び方)を凍結します。

大きなEO効果を得るためには、このほかに、単位体積中のEO色素の数を多くすることと、EO色素分子の超分極率(β EO、分子1個のEO効果に対応するもの)を大きくすることが必要です。EOデバイス作製の際には、この3つの要素はそれぞれ独立ではなく複雑に絡み合っていますが、ここではそのうちの1つであるEO色素分子の超分極率の測定とその分子設計について述べます。

EO色素の分子設計

図2の試料(a)は代表的なEO色素分子であるDR1という分子です。このようにEO色素分子は、電子ド

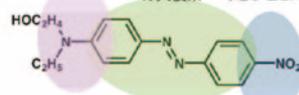
ナーと呼ばれる電子を押し出す性質をもつ基、電子アクセプターと呼ばれる電子を引き付ける性質をもつ基、それをつなぐ π 共役系から構成され、非対称構造をとっています。

分子内の原子と原子が二重結合をつくるとき、1本目の結合をつくる電子(σ 電子)はがっちり結びつくのに対して、2本目の結合をつくる電子(π 電子)は動きやすい性質もっています。分子の光学的、電気的な機能の発現には、この π 電子の集団である π 共役系が重要な役割を担っており、EO色素の分子設計においても、 π 共役系の長さや向きなどを考えることが重要となります。

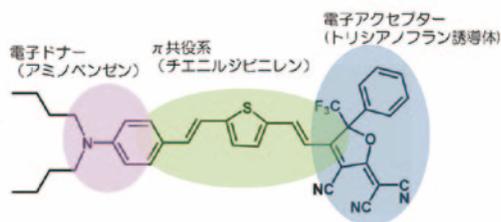
試料(b)はワシントン大学のグループによって開発されたEO色素分子で、非常に大きな超分極率をもつことが特徴です。この分子の電子アクセプター部位の発見はEO色素開発の大きなブレークスルーとなりました。試料(c)はNICTで新規に設計・合成されたEO色素分子です。電子アクセプター部位と π 共役系部位の構造は(b)と同じですが、

電子ドナー (電子を押し出す力を持つ基) 電子アクセプター (電子を引っ張る力を持つ基)

試料(a): 代表的なEO色素



試料(b): ワシントン大学で開発されたEO色素



試料(c): NICTで開発されたEO色素

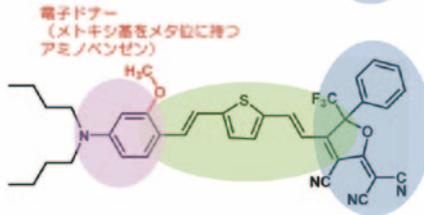


図2 本研究で用いたEO色素

電子ドナー部位の特定の場所(アミノベンゼンのメタ位)にメトキシ基(OCH₃)が入った構造もっています。

EO分子の特性評価

これらのEO色素の超分極率の評価を行いました。

超分極率の評価はハイパーレイリー散乱(HRS)法を用います(図3)。この手法ではEO色素の溶液を準備し、パルスレーザーを当てたときに生じる光第2次高調波の散乱光(HRS光)を検出します。HRS光は溶液中のEO色素分子の時間的、空間的な配向ゆらぎから生じ、様々な方向に散乱されます。

HRS光強度は入射光強度の2乗や超分極率の2乗、濃度のそれぞれに比例します。したがって、超分極率が既知の分子(本実験では試料(a)のDR1)と測定したい試料分子のHRS光強度の比較から、試料分子の超分極率の値が求められます。この超分極率(β HRS)は、波長1952nmの光を入射して、その

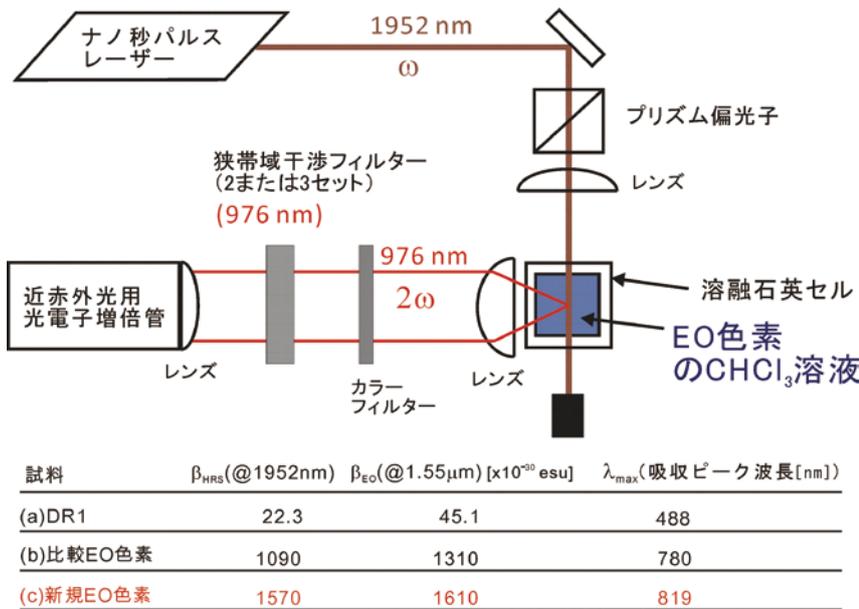


図3 ハイパーレーザ散乱 (HRS) 法の実験系と EO 色素に関する実験結果

半分の波長 (976nm) のHRS光を観測した場合のもので、この値に適切なモデルを仮定して、光通信に使われる1.55 μm の光についての値に換算したものを β_{EO} として評価しています。

図3下部に、試料 (b) と試料 (c) の β_{HRS} とその値から算出した β_{EO} の値を示しています。メトキシ基をもつEO色素 (c) はもたないEO色素 (b) と比べて、 β_{EO} の値が1.2 ~ 1.3 倍程度大きくなりました。このように大きくなった原因として、図4のような分子内の弱い水素結合 (CH \cdots O 型) が、分子のねじれを抑制し、 π 共役系の構造的安定化に寄与し、実効的に π 共役系を長くしているのではないかと考えています。図2の化学構造式のみからは理解しづらいかもかもしれませんが、大きな有機分子はその自由度も大きく、その構造は置かれている環境の中で刻々変化していると考えられるのです。

図4のような分子内の弱い水素結合の存在は、核磁気共鳴分光法 ($^1\text{H-NMR}$) の実験結果からも示唆

されています (ここではデータを示しません)。また、試料 (b) と試料 (c) の吸収スペクトル (図5) では、メトキシ基をもつ (c) はもたない (b) と比べて、吸収ピークが低エネルギー側 (長波長側) にシフトしています。さらに、吸収のバンドの幅も狭くなっており、特に低エネルギー側が急激に減衰しています。このことも分子内の弱い水素結合に起因しているものと考えています。

このような吸収スペクトルの特徴は、 β_{EO} の値が大きいことと並んで、この色素をEOデバイスに利用する際の大きな利点となります。ここでは (c) を例として述べましたが、私たちはほかにも、長い π 共役系をもつさまざまなEO色素に、メトキシ基を含むアルキルオキシ基^{※1}を導入しており、それらのEO色素でも分子内の弱い水素結合の効果を確認しています。

このように、アルキルオキシ基をアミノベンゼンのメタ位に導入するという比較的単純な分子設計により、様々な側面で有用なEO色素を開発

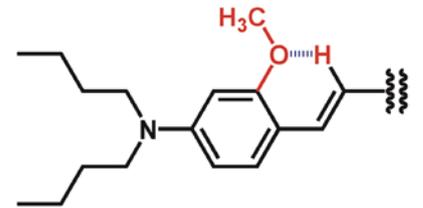


図4 分子内の弱い水素結合 (CH \cdots O 型)

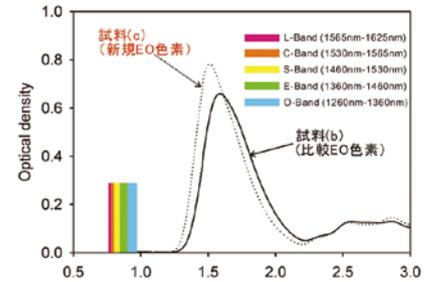


図5 吸収スペクトルの比較

することができました^{※2}。

将来への期待

一般に有機材料を用いた光・電子デバイスでは、基本性能が無機系のデバイスを上回るものは多くありません。そのような場合、フレキシビリティ、軽量、低コスト、低環境負荷などの他の利点を考えながら研究・開発を進めていく必要があります。

しかし、有機EOポリマーの場合は、性能指数が代表的な無機系EO材料であるニオブ酸リチウム (LiNbO₃) を超えるものがすでに多数報告されています。新規EO色素の開発や配向制御を行うことによりさらなる性能指数の向上が期待されます。また、有機EOポリマーは変調帯域に関しても、LiNbO₃と比べて優れています。作製プロセス、耐熱性、寿命など改善・改良していかなければならない部分は多々あるものの有望であると考えられます。

※1 化学式では (-OR) と表され、「R」の部分は「アルキル基」をもった物質
 ※2 Mater. Chem. Phys., accepted.

TOPICS

「テラヘルツ波の産業応用の可能性」～テラヘルツ研究センター設置記念講演会～を開催

テラヘルツ技術は、非破壊検査、分光分析、超高速無線など、広範な産業での応用可能性が見え始めており、様々な研究開発プロジェクトが国内外で盛んに企画・実施されています。このような状況を踏まえ、テラヘルツ技術の研究開発をより一層推進するために研究センターが2012年6月に発足しました。

これを記念し、2013年1月16日にイノホール&カンファレンスセンターにおいて講演会を開催しました。

本講演会では「イメージング」、「分野間融合」、「分光基盤」、「超高速無線通信」の4セッションを設け、NICTの自主研究や委託研究、総務省の電波利用料（電波資源拡大のための研究開発）や戦略的情報通信研究開発推進制度で実施しているテラヘルツ技術分野の研究開発を概観するとともに、今後の産業応用可能性を議論しました。

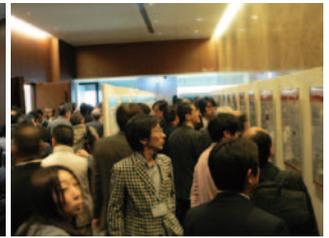


司会を務める賈迫所長

講演会は、総務省の後援を受け、熊谷センター長（理事）の主催者挨拶に始まり、「イメージング」、「分光基盤」、「超高速無線通信」の3セッションで8講演を行いました。



講演会場の様子



ポスター展示の様子

情報通信系企業を始めとする民間企業や大学、官公庁などから約300名の参加があり、会場が満席となりました。参加者からのアンケートも多数寄せられ、参加者にとって満足の内容だったことがうかがえました。

さらに、会場ロビーで実施したポスターセッション「分野間融合」（NICTフォトニックデバイスラボ成果報告会と併催）における詳しい研究内容を紹介した展示にも、多くの来場者が足を止め、熱心に研究者による説明に聞き入っていました。

講演の後、プロジェクトをリードする当研究センターへの多くの励ましと期待が寄せられ、今後の産業応用可能性の足がかりとして良い機会になりました。

10th International Conference on Nano-Molecular Electronics (ICNME 2012) 開催

2012年12月12日～14日の3日間、淡路夢舞台国際会議場において、「10th International Conference on Nano-Molecular Electronics (ICNME 2012)」を主催しました。

本国際会議は、未来ICT研究所 ナノICT研究室の前身である関西先端研究センター ナノ機構グループが牽引役となって1994年に



会場の様子

世界に先駆けて企画したもので、今回で10回目になります。有機ナノ分子材料の開発と応用に関連した有機分子エレクトロニクス研究の現状について、物理、化学、電気、電子、生物など様々な分野で

活躍している研究者が一堂に会し、当該研究開発分野の現状と課題について最近の研究成果をもとに様々な観点、視点から自由に討議し、ナノスケール有機分子素子工学の将来的な発展に寄与することを目的としています。

会議には世界7カ国から146名が参加し、世界トップレベルの優れた発表と活発な討議が行われました。また、多数の若手研究者の参加があり、この分野をリードする一流の研究者との質の高い議論を通して、次世代を担う若手研究者を育成する重要な場ともなりました。

未来ICT研究所では、この有機ナノ素材の情報通信技術への応用と人材育成とを重視して、今後も継続して本国際会議の開催を行う予定です。



講演の様子

nano tech 2013に出展

未来ICT研究所は、2013年1月30日～2月1日の3日間、東京ビッグサイトで開催された世界最大級の先端技術展である nano tech 2013（来場者数は約47,000人）に出展しました。

展示ブースでは、ナノICT研究室有機ナノデバイス研究グループを中心に未来の光通信に資する「有機非線形光学デバイス（光電（EO）変換素子）」などのナノデバイス技術について、作製から実証へ至る最新の研究を紹介しました。また、バイオテクノロジー分野から情報通信への利用に関する研究、ミリ波・テラヘルツ波の通信素子、

機器展示し、社会還元部門からは関連する技術移転についても紹介しました。

当研究所では、今後も研究成果の発信と研究交流の場、そして技術の社会還元促進の場として、この技術展に積極的に参加する方針です。



展示ブースの様子

上海微系統情報技術研究所 (SIMIT) と「研究協力に関する覚書」を締結

未来 ICT 研究所は、中国科学院 上海微系統・情報技術研究所 (SIMIT) と 2013 年 1 月 17 日 SIMIT において、「情報通信技術分野における研究協力に関する覚書 (MOU)」を締結しました。

同覚書は、超伝導科学・技術、バイオ科学・技術、テラヘルツ科学・技術に重点を置いた情報通信技術分野の研究開発を両機関の協力の下に実施することを合意したものです。

SIMIT は中国科学院に属し、情報科学技術に関する国の重要な科学技術研究所の 1 つです。SIMIT と未来 ICT 研究所は所掌の研究テーマに高い類似性が見られることから、以前から協力関係の構築を図ってきました。その一つが、超伝導材料などの機能材料を用いた情報科学研究を活躍に行っている国家重点研究室・情報科学機能材料研究室と未来 ICT 研究所ナノ ICT 研究室との研究連携です。

本覚書を締結することで、連携のより一層の進展を見込んでいます。本締結を機に、今後、協力範囲を必要に応じて広げ、研究協力を一層効果的かつ効率的に実施することを目指します。

この研究協力の活動として、国家重点研究室室長の謝教授 (SIMIT) と王主管研究員 (未来 ICT 研究所) を代表とした、超伝導分野での共同研究を推進します。

また、ジョイントラボを設置するなどの取り組みを通じ、今後、人



左から尤研究員、謝室長、陳主管、余副所長、大岩主管研究員、熊谷理事、王主管研究員、江本専門推進員

左：余副所長
右：大岩主管研究員



的交流やワークショップ開催などにより、研究協力の一層の強化を図っていきます。



SIMIT - NICT Workshop 参加者集合写真 (後列左から 5 人目余副所長)

「SIMIT - NICT Workshop」開催

未来 ICT 研究所は、2013 年 1 月 31 日、2 月 1 日の 2 日間、中国科学院上海微系統情報技術研究所 (SIMIT) で「SIMIT-NICT Workshop」を開催しました。

今回のワークショップは、超伝導デバイス分野に関する合同ワークショップで、1 月 17 日に締結した MOU のキックオフとなります。

参加者は、王主管研究員を中心に未来 ICT 研究所 ナノ ICT 研究室超伝導デバイスグループ 7 名、MOU の署名者である余跃辉 (Yuehui Yu) SIMIT 副所長、SIMIT の国家重点研究室室長謝教授を始めとして SIMIT 国家重点研究室超伝導グループ約 15 名でした。今回のワークショップは、研究者同士の研究交流と情報交換を深めるよい機会となりました。

受賞報告

受賞者： 岩本 政明 主任研究員 バイオ ICT 研究室
 受賞日： 2012/5/31
 受賞名： Young Presenters Award for Poster Presentation
 授与団体： The Japanese Society of Developmental Biology and the Japan Society for Cell Biology

受賞者： 春野 雅彦 主任研究員 脳情報通信研究室
 受賞日： 2012/9/13
 受賞名： 日本神経回路学会論文賞
 授与団体： 日本神経回路学会

受賞者： Ganesh Gowrishankar 主任研究員 脳情報通信研究室
 受賞日： 2012/10/11
 受賞名： Best IROS Jubilee Video Award
 授与団体： IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robotics and Systems

未来 ICT 研究所 STAFF 総覧

研究所付	箕迫 巖	研究所長	博士 (理学)	
	王 鏡	主管研究員	工学博士	
	大岩 和弘	主管研究員	理学博士	
	柳田 敏雄	主管研究員	博士 (工学)	
	柏岡 秀紀	統括	博士 (工学)	
	原口 徳子	上席研究員	医学博士	
	東藤 正高	総括主任研究員	博士 (工学)	
	村田 勉	主任研究員	博士 (薬学)	
	小川 博世	客員研究員	工学博士	
	企画室 (神戸)	久保田 徹	室長	博士 (工学)
		澤井 秀文	総括主任研究員	工学博士
		宮内 哲	総括主任研究員	医学博士
		片桐 祥雅	主任研究員	工学博士
		兵頭 政春	専門推進員	博士 (工学)
金釘 敏		グループリーダー	—	
五十川 知子		主任	—	
黒田 康徳		一般職員	—	
猪木 誠二		有期技術員	博士 (工学)	
井上 孝弘		有期技術員	—	
大山 良多		有期技術員	—	
北坂 一三		有期技術員	—	
高橋 恵子		有期技術員	—	
鳥居 信夫		有期技術員	博士 (医学)	
企画室 (小金井)	田原 照平	専門調査員	—	
	相田 有実	有期補助員	—	
	葵 重之	特別研究員	博士 (学術)	
	小倉 基志	主幹	—	
	秋葉 誠	専門推進員	理学博士	
	広瀬 信光	専門推進員	博士 (工学)	
	井口 政昭	有期技術員	—	
	鈴木 与志雄	有期技術員	—	
	ナノICT 研究室	大友 明	室長	Ph.D.
		田中 秀吉	研究マネージャー/専門推進員	博士 (物理学)
		寺井 弘高	研究マネージャー	博士 (工学)
		井上 振一郎	主任研究員	博士 (工学)
		笠井 克幸	主任研究員	博士 (工学)
		川上 彰	主任研究員	博士 (工学)
三木 茂人		主任研究員	博士 (工学)	
山田 俊樹		主任研究員	博士 (工学)	
山下 太郎		主任研究員	博士 (理学)	
石井 智		研究員	Ph.D.	
梶 真博		研究員	博士 (工学)	
梶野 顕明		研究員	博士 (工学)	
丘 保		研究員	Ph.D.	
バイオICT 研究室		牧瀬 正正	研究員	博士 (理学)
	水沼 達郎	研究員	博士 (理学)	
	青木 勲	有期技術員	—	
	今村 三郎	有期技術員	工学博士	
	上田 里永子	有期技術員	—	
	富成 征弘	有期技術員	—	
	三木 秀樹	有期技術員	薬学博士	
	潘 直樹	特別研究員	—	
	松田 真生	特別研究員	博士 (理学)	
	小嶋 寛明	室長	博士 (工学)	
	山田 章	主任研究員/専門推進員	理学博士	
	小林 昇平	主任研究員	博士 (工学)	
	榎原 齊	主任研究員	理学博士	
	田中 裕人	主任研究員	理学博士	
近重 裕次	主任研究員	博士 (理学)		
丁 大橋	主任研究員	博士 (理学)		
岩本 政明	主任研究員	博士 (理学)		
小川 英知	主任研究員	博士 (バイオサイエンス)		
平林 美樹	主任研究員	博士 (工学)		
清水 洋輔	研究員	博士 (農学)		
西浦 昌哉	研究員	博士 (学術)		
古田 茜	研究員	博士 (理学)		
古田 健也	研究員	博士 (学術)		
松田 厚志	研究員	博士 (理学)		
山本 孝治	研究員	博士 (理学)		
荒神 尚子	有期技術員	—		
岡正 華澄	有期技術員	—		
梶谷 知子	有期技術員	—		
小坂田 裕子	有期技術員	—		
堤 千尋	有期技術員	—		
森 知栄	有期技術員	—		
吉雄 麻喜	有期技術員	—		
長瀬 有紀	有期補助員	—		
樋口 美香	有期補助員	—		
福田 紀子	有期補助員	—		
高村 佳美	有期補助員	—		
平岡 泰	招聘専門員	理学博士		
堀田 崇	特別研究員	博士 (理学)		

脳情報通信 研究室	梅原 広明	室長	博士 (理学)
	井原 綾	主任研究員	博士 (保健学)
	成瀬 康	主任研究員	博士 (科学)
	Peper Ferdinand	主任研究員	Ph.D.
	Leibnitz Kenji	主任研究員	理学博士
	劉 国相	主任研究員	博士 (工学)
	安藤 博士	主任研究員	博士 (工学)
	黄田 育宏	主任研究員	博士 (理学)
	下川 哲也	主任研究員	博士 (工学)
	鈴木 隆文	主任研究員	博士 (工学)
	鈴木 秀明	主任研究員	理学博士・博士 (情報学)
	春野 雅彦	主任研究員	博士 (工学)
	山本 知幸	主任研究員	博士 (学術)
	劉 健勳	主任研究員	工学博士・博士 (情報学)
脳情報通信 研究室 (在けいはんな)	東 高志	研究員	博士 (工学)
	篠崎 隆志	研究員	博士 (科学)
	丹羽 真隆	研究員	博士 (情報科学)
	Hanay Yusuf Sinan	研究員	Ph.D. (Electrical and Computer Engineering)
	松本 敦	研究員	博士 (心理学)
	森戸 勇介	研究員	博士 (理学)
	渡邊 言也	研究員	博士 (神経科学)
	藤巻 則夫	有期技術員	工学博士
	永井 誠司	有期技術員	—
	野尻 武史	有期技術員	博士 (工学)
	植田 智洋子	有期補助員	—
	脇田 美由紀	有期補助員	—
	早川 友恵	招聘専門員	博士 (心理学)
	眞深 歩	招聘専門員	博士 (工学)
瀧山 健	特別研究員	—	
超高周波 ICT 研究室 (小金井)	今水 寛	副室長	博士 (心理学)
	内藤 栄一	研究マネージャー	博士 (人間・環境学)
	Benjamin John Seymour	特別招聘研究員	Ph.D. (Neurological Sciences)
	杉本 徳和	研究員	博士 (工学)
	水口 暢華	研究員	—
	Ganesh Gowrishankar	専門研究員	Ph.D.
	吉岡 利福	専門研究員	—
	山岸 典子	短時間専門研究員	Ph.D.
	池上 剛	専門調査員	博士 (教育学)
	中野 直	専門調査員	—
	古川 友香	専門調査員	—
	眞野 博彰	有期技術員	博士 (鍼灸学)
	蔡 暢	有期補助員	博士 (工学)
	Zhang Suyi	有期補助員	—
量子 ICT 研究室 (小金井)	Matthew Joseph de Brecht	有期補助員	博士 (情報学)
	玄 相英	招聘専門員	博士 (工学)
	笠松 章史	室長	博士 (工学)
	関根 徳彦	研究マネージャー	博士 (工学)
	安田 浩朗	主任研究員	博士 (工学)
	渡邊 一世	主任研究員	博士 (工学)
	Daivasigamani Krishnamurthy	主任研究員	Ph.D. (Materials Science)
	小川 洋	主任研究員	博士 (工学)
	Mikhail A Patrashin	主任研究員	博士 (工学)
	諸橋 功	主任研究員	博士 (工学)
	酒瀬川 洋平	研究員	博士 (工学)
	浜崎 淳一	研究員	博士 (理学)
	歌川 仁史	専門研究員	—
	山下 良美	専門研究員	—
鈴木 信克	専門調査員	—	
土生 健介	専門調査員	—	
堤 和夫	短時間技術員	—	
杉浦 洋平	短時間補助員	—	
遠藤 聡	特別研究員	理学博士	
大島 孝仁	特別研究員	博士 (工学)	
尾沼 猛儀	特別研究員	博士 (工学)	
岸川 諒子	特別研究員	—	
岸本 直	特別研究員	博士 (理学)	
佐々木 公平	特別研究員	—	
原 紳介	特別研究員	博士 (理学)	
藤代 博記	特別研究員	博士 (工学)	
堀部 雅弘	特別研究員	博士 (工学)	
松井 敬明	特別研究員	—	
三村 高志	特別研究員	工学博士	
佐々木 雅英	室長	博士 (理学)	
早坂 和弘	研究マネージャー	博士 (理学)	
韓 太興	R&Dアドバイザー	博士 (工学)	
武岡 正裕	主任研究員	博士 (工学)	
藤原 幹生	主任研究員	博士 (理学)	
和久井 健太郎	主任研究員	博士 (工学)	
金 鋭博	研究員	博士 (工学)	
Hugo Benichi	研究員	博士 (工学)	
伊藤 寿之	有期技術員	博士 (地球環境科学)	
佐々木 悦郎	有期技術員	—	
Alex Dixon	特別研究員	Dr. of Physics	
衛藤 雄二郎	特別研究員	博士 (理学)	
玉木 潔	特別研究員	博士 (理学)	

(2013年2月1日現在)



独立行政法人 情報通信研究機構

未来 ICT 研究所

〒651-2492 兵庫県神戸市西区岩岡町岩岡 588-2
TEL:078-969-2100 FAX:078-969-2200

〒184-8795 東京都小金井市貫井北町 4-2-1
TEL:042-327-7429 FAX:042-327-6961

E-mail:karc@ml.nict.go.jp
http://www.nict.go.jp/advanced_ict

未来 ICT 研究所ジャーナル KARC FRONT
No.26 2013年3月22日発行 発行/箕迫 巖 編集/久保田 徹



兵庫県神戸市
未来 ICT 研究所への
アクセス