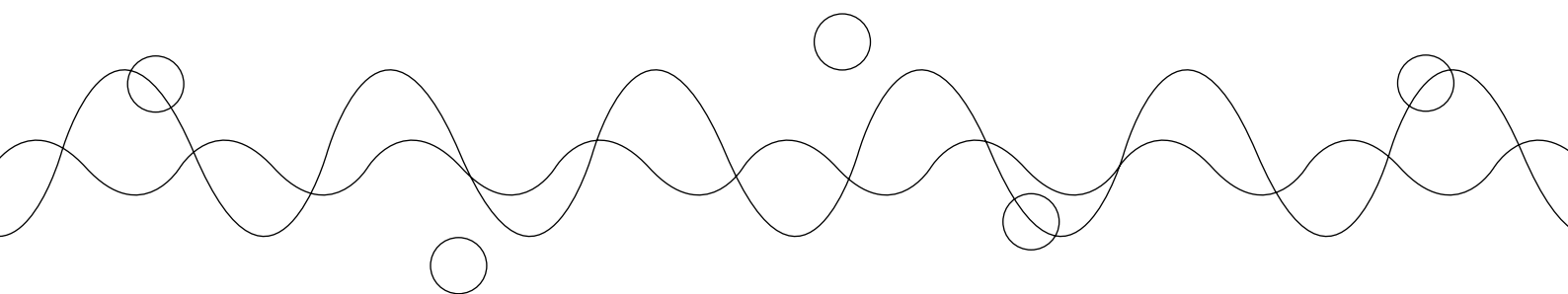


ナノテクノロジー・材料分野
俯瞰ワークショップ報告書
光（フォトンクス・オプティクス）領域分科会

2013年11月20日（水）開催



エグゼクティブサマリー

本報告書は、(独) 科学技術振興機構 (JST) 研究開発戦略センター (CRDS) が平成 25 年 11 月 20 日に開催したナノテクノロジー・材料分野俯瞰ワークショップ「光（フォトンクス・オプティクス）領域分科会」に関するものである。

CRDS ではナノテクノロジー・材料分野における世界各国の国家計画、投資戦略、研究ポテンシャル、技術進化そして企業化動向、重要な研究開発領域を含むナノテクノロジー分野全体の俯瞰の結果を記載した俯瞰報告書 (CRDS-FY2012-FR-06) を平成 25 年 3 月に発行した。この俯瞰報告書では、29 の重要領域について研究開発状況や国際比較を取り纏めているが、調査が不十分な領域や、基盤的な技術のために複数の領域に分かれた記述となり、その技術領域全体を十分に把握できていないものもあった。このため、さらに調査が必要な領域として、光（フォトンクス・オプティクス）、ナノ計測技術、バイオナノテクノロジー、新物質・新材料、製造・生産技術の 5 つの領域に注目し、今年度から来年度にかけてそれぞれのワークショップを開催し、ナノテクノロジー・材料分野の俯瞰を充実させていく予定である。

このワークショップは光（フォトンクス・オプティクス）の領域における技術・産業の状況把握、今後求められる技術、注目される科学技術の潮流、研究開発の方向性などについて、議論を深める目的で開催した。ワークショップの開催趣旨説明に続き、産業側からの今後の「光」科学技術への期待、光技術の最新動向を含む研究の現場からの今後重要となる科学技術の話題提供、これらを踏まえての光領域全体の俯瞰図や研究開発の方向性などに関する総合討論を行った。

ワークショップの開催趣旨説明では、前年度に作成したナノテクノロジー・材料分野の俯瞰報告書では光関係の技術がいくつかの領域に分散して光としてまとまった形で取り上げられていないことの反省、光産業の厳しい状況、成熟している光技術の縦割り構造の問題などを紹介し、これらの問題に対する今後必要な取り組みの仮説を説明した。また、光領域全体の俯瞰図のたたき台を示し、研究開発の方向性として光領域として光技術内だけでなく異分野技術との融合・統合化が必要であることを、通信・コンピュータ・LSI への応用事例を基に説明した。

利用する側（ニーズ側）の視点で産業界から光通信・情報処理、サーバの光インターコネクタ、次世代放送用の入出力デバイス、医療・ライフサイエンス領域から今後の光科学技術への期待が語られた。光通信・情報処理・サーバの将来的な流れとしては、光電変換部をマザーボード上からパッケージ上、さらにはチップ上に乗せるものに展開し、シリコンフォトンクスにつながっていくと予想される。ローカルな演算や記憶はエレクトロニクスが担い、ネットワーク処理を短距離から長距離までフォトンクスが担うと、大まかな見積もりとして 100 万個程度の光デバイスをチップに収納し、消費エネルギーを 1fJ/bit 程度にする必要がある。将来の家庭用ディスプレイでは 100 インチ程度が望まれるが、エレベーターに乗せることも考慮すると、絨毯のように丸めて持ち込めるフレキシブルなディスプレイが望まれる。医学・ライフサイエンス関係では、細胞内での空間的な生体物質の分布の変化を追うだけであれば、分解能はいらない。蛍光色素のようなものを付けて間接的に見るということでもユーザーの要求は満たせるので、分解能を光学の中で追いつめるだけではない新たな視点の発想も必要である。

光技術の最新動向については、光産業技術協会（OITDA）の光技術動向調査委員会報告より8つの産業分野（無機材料・デバイス、光通信ネットワーク、光ディスクと光情報処理、ディスプレイ、加工・計測・メディカル、太陽光発電、有機材料・デバイス）の最近の注目されている技術に関して紹介された。

研究の現場からの今後重要となる科学技術の話題提供が6つあった。「ナノ材料と集積フォトンクスの融合による革新的光技術の創成」では、微小共振器、フォトニック結晶、プラズモニクス、メタマテリアルなど基板上に微細加工でつくるものとナノ材料とを組み合わせて新しいことができるとの提案があった。「フォトンクスによる情報機器の省電力化とフォトンクス研究者の異分野参入」では、シリコンフォトンクスは幅広い産業展開が可能であり、チップ間のインターコネクトやデータセンタの基盤だけでなく、分析や医療用レーザー、ディスプレイなどにも応用可能であり、若手研究者のこの領域への進出の必要性が示された。「メソスケール分子材料による有機光エレクトロニクス」では、有機EL、有機トランジスタ、有機太陽電池は薄膜中の秩序という意味では全く違う状況にあり、高次構造あるいは膜の分子配列よりももう少し大きな領域（メソスケール）を「意図的に制御」することで今後のブレイクスルーに繋げていくことが提案された。「光による物質状態制御と生体模倣光技術」では、バイオセンシングの高速化・高感度化、生体材料の機能を模倣した新しい分離分析法や新材料の創出を目指し、光物理学と生命科学との異分野横断的な連携・融合により、ナノテクに基づく食品の分析や製薬および医療応用などへの展開加速の必要性が示された。「光の可能性を拡大する光科学」では、光をツールとして使うことにより、普通では手の届かない原子・分子レベルの物質の形や状態を変化させたり、メゾスコピック領域の物質制御の開発により高分子の動きを自由に制御できることが提案された。「新しい光源で拓く融合科学」では、応用を見据えた光源技術の高度化を進めると同時に光を操り制御する技術を開発することで、バイオメディカル、エネルギー、環境などの融合分野でのイノベーション推進の必要性が示された。

総合討論では、光の俯瞰図、今後の光関連科学技術の研究開発の方向性、政策・制度上の課題などについて議論した。「光の俯瞰図」については、座標軸の取り方、光の特長を活かしたものに分けて考えた方がわかりやすいことや、社会と技術とのつながりなどに関して多くの意見が出され、またワークショップ後に6人の話題提供者が意見交換して作った俯瞰図の修正案が示された。「今後の光研究開発の方向性」については、同じような性質を持った人たちの融合ではなく、全く違う性質を持った人たちとの協業により、新しい価値を作っていくことが重要だとの意見が出された。また、従来型の光産業は海外企業との競争ではコスト的に勝てないこと、欧米のやり方のように「新しい価値を作る」ことを自分たちでやる必要があるとの意見が出された。「政策・制度上の課題」については、新しい技術をバイオに持ち込むことは日本の現状ではハードルが高いことや、科研費で購入した設備の用途制限から、外部への装置の貸し出しや加工・試作サービスの提供ができないといったことがあり、これらの規制や制約の改善が必要という意見が出された。また、公的研究開発投資に関して、価値の創出という意味で異分野の人たちにも重要性を示すパッケージングが必要なことや、課題解決だけではなく基盤技術に対する新たなテーマも必要との意見が出された。

今回のワークショップで全ての光領域について俯瞰し議論できたわけではないので、今後は今回取り上げられなかった光領域についてもヒアリングなどで有識者の意見を伺い、この領域の全体像を明確にしていく。これらの活動の結果は、2014年度末に発行予定のナノテクノロジー・材料分野の俯瞰報告書の中で光領域としてまとめていく。

目 次

エグゼクティブサマリー

1. ワークショップの趣旨説明	馬場 寿夫（JST-CRDS）	1
2. 今後の「光」科学技術への期待（産業側からの要請）		6
2.1 光情報処理技術と集積ナノフォトンクスの将来展望	納富 雅也（NTT）	6
2.2 光インターコネクト技術のサーバへの応用	山本 毅（富士通研）	11
2.3 放送技術と入出力デバイス	山本 敏裕（NHK）	15
2.4 医療・ライフサイエンス領域で光に求められるもの	橋本 武（オリンパス）	20
3. 話題提供		25
3.1 光技術の最新動向 ―OITDA 光技術動向調査委員会報告より―	中野 義昭（東京大学）	25
3.2 ナノ材料と集積フォトンクスの融合による革新的光技術の創成	加藤 雄一郎（東京大学）	36
3.3 フォトンクスによる情報機器の省電力化とフォトンクス研究者の異分野参入	高橋 和（大阪府立大学）	43
3.4 メソスケール分子材料による有機光エレクトロニクス	中山 健一（山形大学）	51
3.5 光による物質状態制御と生体模倣光技術	飯田 琢也（大阪府立大学）	58
3.6 光の可能性を拡大する光科学	芦原 聡（東京農工大学）	64
3.7 新しい光源で拓く融合科学	小関 泰之（東京大学）	70
4. 総合討論（コーディネーター：河田 聡（大阪大学/JST-CRDS））		75
付録		80
付録1 開催趣旨・プログラム		80
付録2 参加者一覧		83

1. ワークショップの趣旨説明

馬場 寿夫（科学技術振興機構 研究開発戦略センター）

CRDS では分野俯瞰を 2 年毎にアップデートしているが、ナノテク・材料関係として今年度は、光、ナノ計測、バイオナノテクノロジー、新物質・新材料、製造・生産技術の 5 つの領域を深掘りするというので、活動をしている。その一環として、今回の光ワークショップがある。

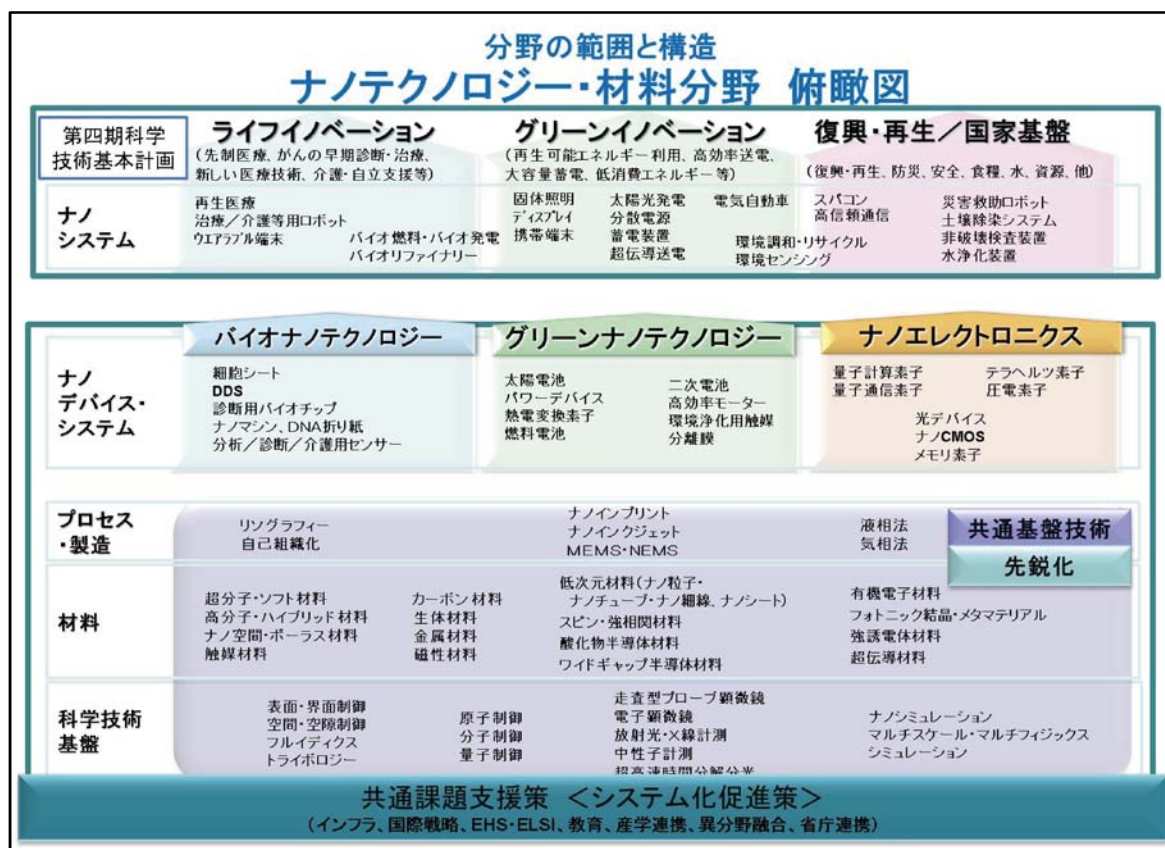


図 1-1

図 1-1 は 2012 年度に作成したナノテクノロジー全体の俯瞰図である。上部には社会あるいは第 4 期科学技術基本計画に記載されているライフイノベーション、グリーンイノベーション、復興再生を記載している。それらに貢献するナノテクノロジー・材料技術は、科学技術基盤からナノデバイスシステムまでを記載している。これらの技術を融合あるいは統合して社会全体の役に立てていくということを示している。この中にはいろいろなキーワードが入っており、光に関するキーワードもいくつか入っている。これを 2013 年から 2014 年にかけて更新していく予定である。

今回、光を取り上げた理由について述べる。光の技術はいろいろな領域に分散し、部分的には図 1-1 のナノテクノロジー・材料の俯瞰図にも記載されているが、光技術全体を俯瞰する形では取り上げられていない。また、情報通信分野の中でも光は非常に重要な領域であるが、最近では CRDS の情報科学技術ユニットではシステム化あるいはビッグデータなど、ソフト寄りの話が多くなり、デバイスを含めた形での議論ができていない。さらに、

光関係の大きなプロジェクトがそろそろ終了するが、共通基盤技術として、今後も光は新たな技術領域を拓いていく必要があると考えている。

現在の光を取り巻く環境については、インタビューやヒアリングをしてまとめている。社会との関係においては、光通信、ディスプレイ、太陽電池などそれぞれの光関係の産業が成熟期に入っていると。また、日本の産業競争力が低下しているということが非常に顕著になっている。

光産業の状況（光産業国内生産額の分野別推移）

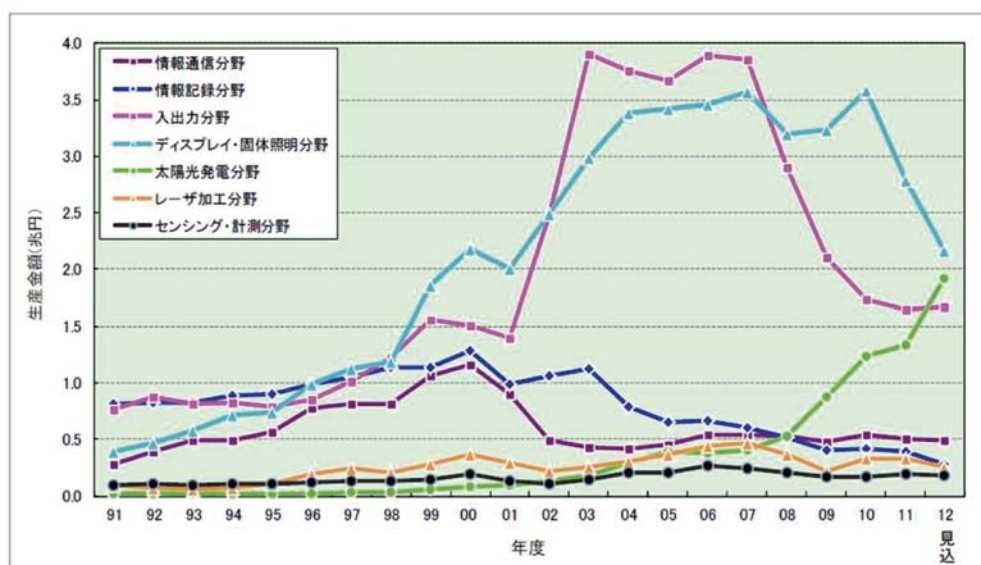


図 2.1.3 分野別光製品生産額の推移

出典：光産業技術振興協会 2012年度 光産業に関する報告書 FY2012-003 光産業の動向

図 1-2

図 1-2 は光産業技術振興協会の資料であり、分野別の推移を表している。ディスプレイや入出力デバイスは落ち込みがかなり急になっている。太陽電池分野はまだ伸びているが、他の分野は皆落ち込んでいる状況にある。

バイオや医療といった新領域では、海外がかなり活発に動いていることが見えるが、日本の存在感があまりないと感じられる。また、それぞれの光の技術分野はある程度の産業にはなっているが、それぞれ独立しているようなイメージがあり、学術分野も研究テーマや技術領域で細分化されている。このようなところが問題であり、もう少し異分野の動きや産業界、アカデミアとの協業によって新しい領域を切り開くことが必要ではないかと考えている。

光関係のコミュニティとして応用物理学会の中にもいくつか関係していることがあるが、こういったところで連携が進んでいるか、あるいは学会間の連携、産業界との連携、こういったところが本当に大丈夫かという疑問がある。コミュニティ間の連携をもっと活発化してほしいと思う。

今後必要な取り組み（仮説）

■ 光の研究開発の新たな方向性や新規テーマの提示

1. 縦割りになっている**光関係のコミュニティ(学会)の相互の連携強化、光研究領域の再構築**
2. **他分野の技術(ナノ材料等)を積極的に取り入れた新研究領域の立ち上げ**
3. **社会の課題や桁違いの技術ブレークスルーに挑戦(超低消費電力化、超小型化、超低価格化など)**
4. 従来の光関係の産業から、**他の産業分野への挑戦(バイオ・医療、エネルギー、社会インフラ、ものづくりなど)⇒新たな柱の創出**
5. 多様な研究や技術融合・統合化を可能にする**研究開発ネットワークや拠点(ハブ)の整備**
6. 研究ネットワークや拠点の利用と**産官学の連携、国際連携による、技術の融合・統合、新たな技術領域の形成、実用化の加速、若手人材の育成**

図 1-3

先ほどの問題の裏返しになるが、今後取り組むべき重要な取り組みということで、図 1-3 に仮説という形で記載している。光の研究開発の新たな方向性、新規テーマを提示していく必要がある。特に、学会間、コミュニティ間の連携強化、他の分野の技術、例えばナノ材料といったところを積極的に取り入れて新しい研究を立ち上げること、あるいは社会の大きな課題や桁違いの技術ブレークスルーへの挑戦が必要である。また、他の産業分野への挑戦も必要である。バイオ・医療、エネルギー、社会インフラ、ものづくりなど一見遠いような感じもするが、こういった所にも光技術を活用し、新たな大きな柱を作っていくことが必要と考える。さらに、研究開発のネットワーク、ハブ拠点のようなものも含めて、このようなネットワークを広げていくことや、産学官連携、国際連携といったことによって新たな領域を作っていくこと、若手を育成していくことも非常に重要と考えている。

図 1-4 は CRDS が検討中の光領域の俯瞰図案である。本日の総合討論では、このような俯瞰図が妥当なのか、もっと違った形のものはないか、といったことについても議論する。この図では、上の方に社会、グリーンや次世代インフラ、健康長寿などがある。その下に、光の技術が活用される応用領域あるいは産業領域が列挙されている。さらにその下には光の技術として、上の方のデバイスコンポーネントから一番下の物理現象まで重要なキーワードを挙げてある。また、光の中身としてももちろんオーバーラップも多いが、フォトンクスとオプティクスという形に分けている。こういったキーワードで足りないものがないか、もう少し違った視点はないか、などを総合討論では議論する。

今回の光のワークショップでは、本当はこの応用領域全部をカバーするようにやりたいところであるが、時間的な制限や集まっていたく人の制限もあり、今回は主にこの真ん中辺りの方に集まっていたいでいる。もちろん他の領域もヒアリングあるいはインタビューも行っているので、来年度の俯瞰報告書の中にはこれらの結果も反映させていくことになる。

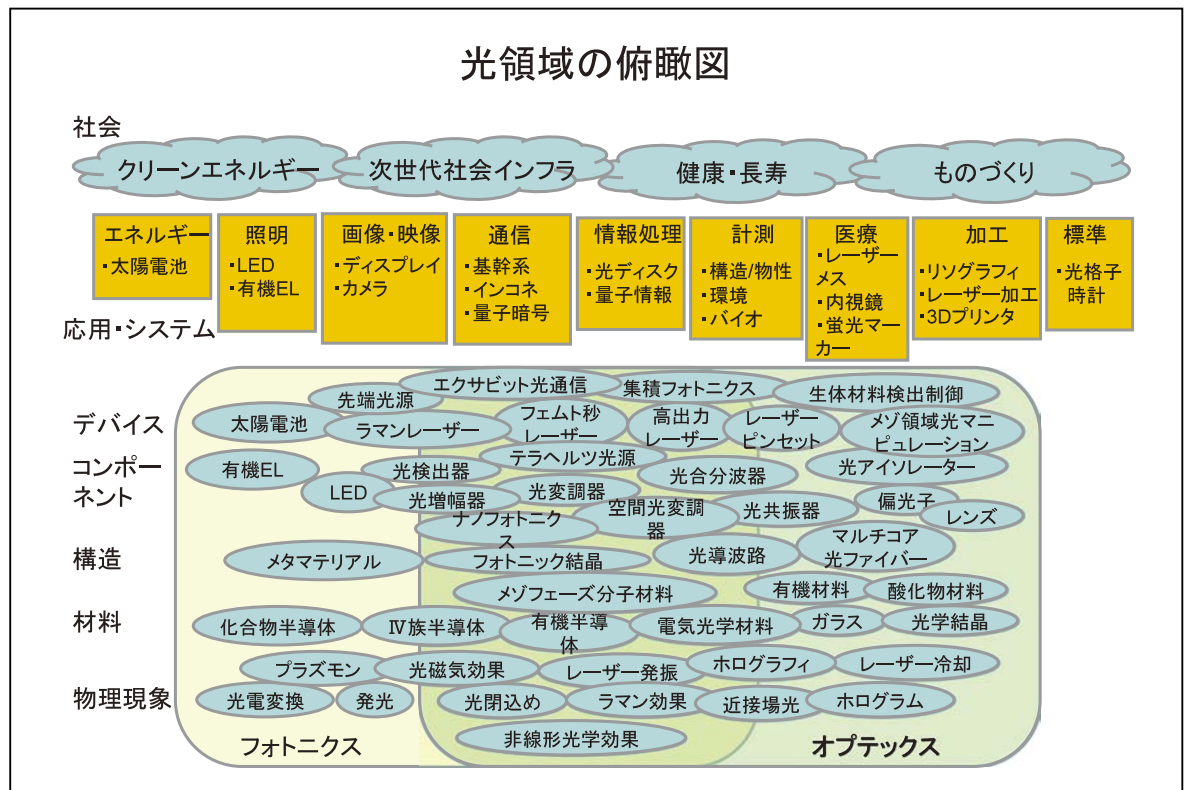


図 1-4

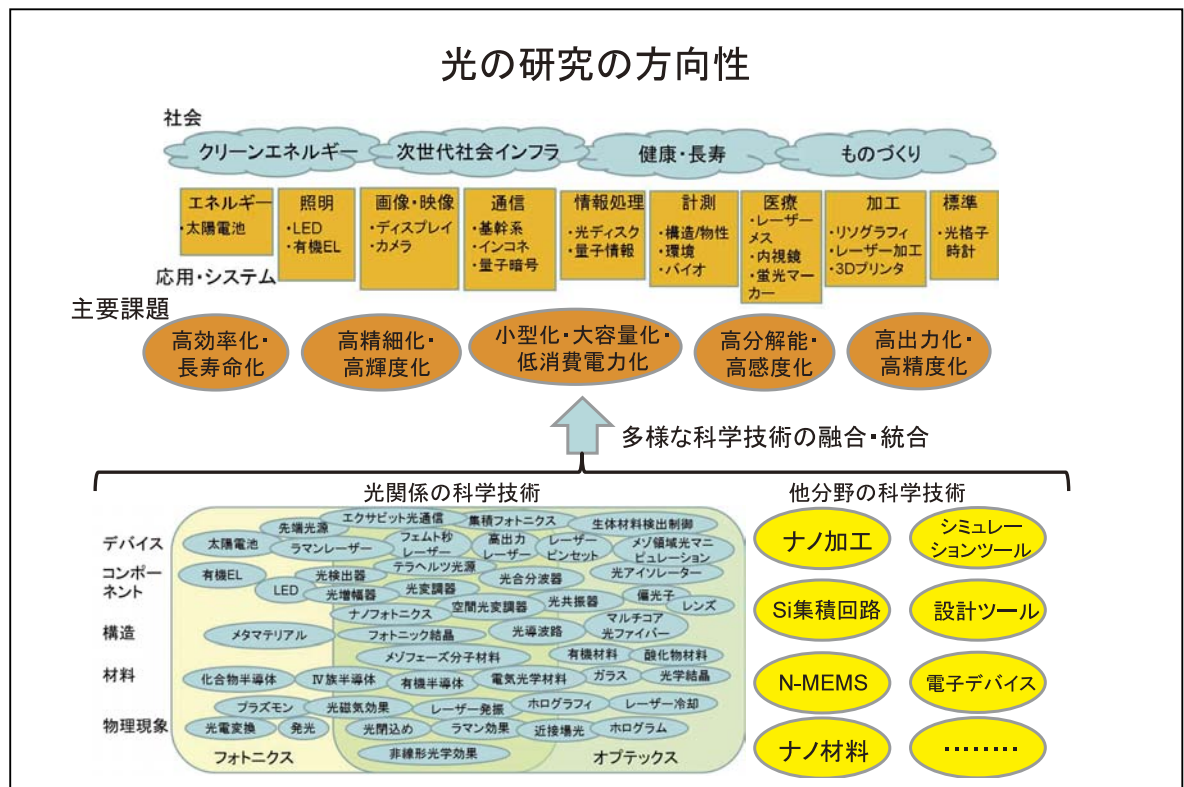


図 1-5

図 1-5 には今後の光の研究の方向性として、このようなものが必要ではないかということで一例を示している。この図の左下にあるのが、図 1-4 で示した光全体の技術であり、これに他の分野、例えばナノ加工、シリコン集積回路、電子デバイス、設計ツールといったものも含め、新たな価値あるいは主要課題に挑戦していくということを示している。ここで示した主要課題はほんの一例である。例えば通信、情報関係では小型化、大容量化、低省電力化といったことが非常に重要になってくるので、何らかのこういった新しい取り組みをしていく必要がある。

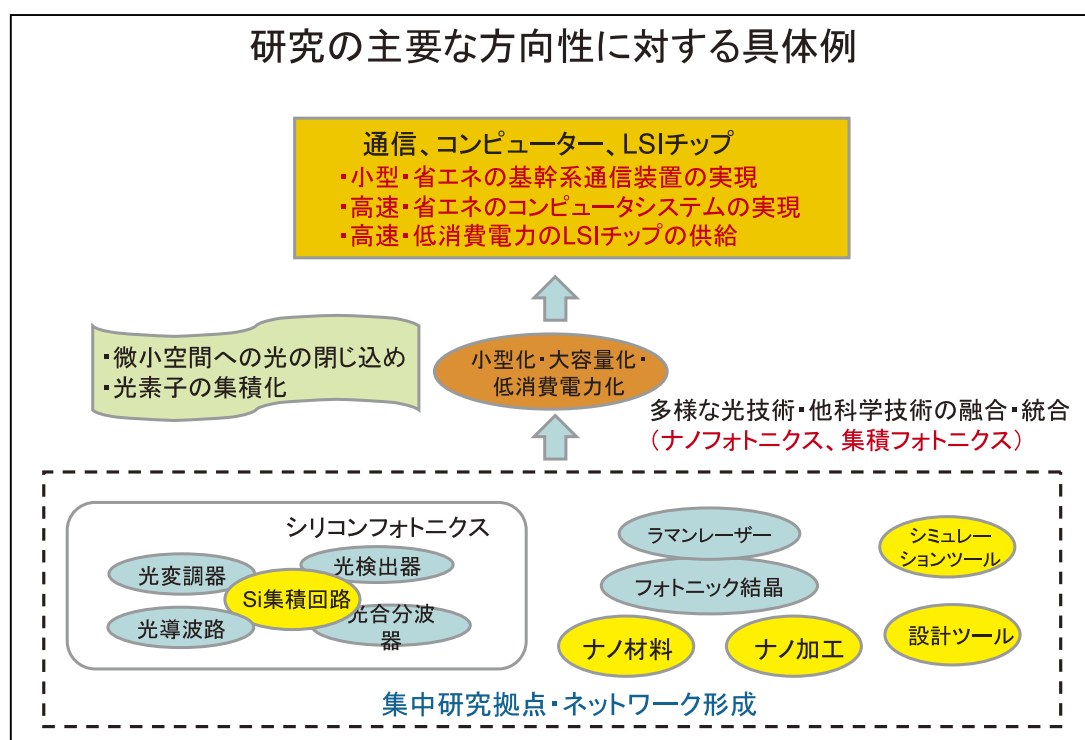


図 1-6

図 1-6 にはもう少し細かい具体的な例を示す。ここでは、シリコン集積回路と一緒になったシリコンフォトンクス、ナノ材料、ナノ加工、ラマンレーザー、フォトンクス結晶といった技術を集めて、微小空間へ光を閉じ込めて光素子の集積化を実現し、新たな価値を作っていくことを示している。これが結果的には通信、コンピュータ、LSI といった産業に応用できるものと考ええる。できるだけ他の具体例も示していきたいというのが CRDS の意図であり、本日の議論の中から出てくれば良いと思う。

最後の総合討論では、ここで示した俯瞰図案について議論し、研究開発の方向性、その他政策や制度上の問題、あるいは産学官連携といった点に関する議論をする。

2. 今後の「光」科学技術への期待(産業側からの要請)

2.1 光情報処理技術と集積ナノフォトニクスの将来展望

納富 雅也 (NTT)

現在、ナノフォトニクスの集積化技術を研究する時期に来ている。情報通信産業は近年非常に進歩拡大してきており、消費エネルギーも無視できなくなっている。10年、15年後にはかなり深刻な問題になると考えられる。

情報通信の中では、主に長距離は光で、短距離は電気が担ってきているが、現在、データセンター、ルーターなどの後者の要素が多くエネルギーを消費することが問題となっていており、それらの要素の内部ではプロセッサチップの中でエネルギーが多く消費している。我々光の技術者は、このような短距離スケールに光の技術を導入することで、消費エネルギーの青天井の上昇を抑えられないかと期待している。

プロセッサチップの中は多層の配線があり、CPUの半分くらいの電力を電気配線が消費しているということが分かっている。また、最近のトレンドとして、メニーコア化が進んでいるが、例えば、最新の80コアのインテルのCMOSプロセッサでは、オンチップのルーターによるチップ内ネットワーク制御が全体の28%のエネルギーを消費していると言われている。この傾向はますます今後増加していくと思われ、結局このプロセッサの中の非常に小さい世界のネットワークをどうするかという問題に帰着する。

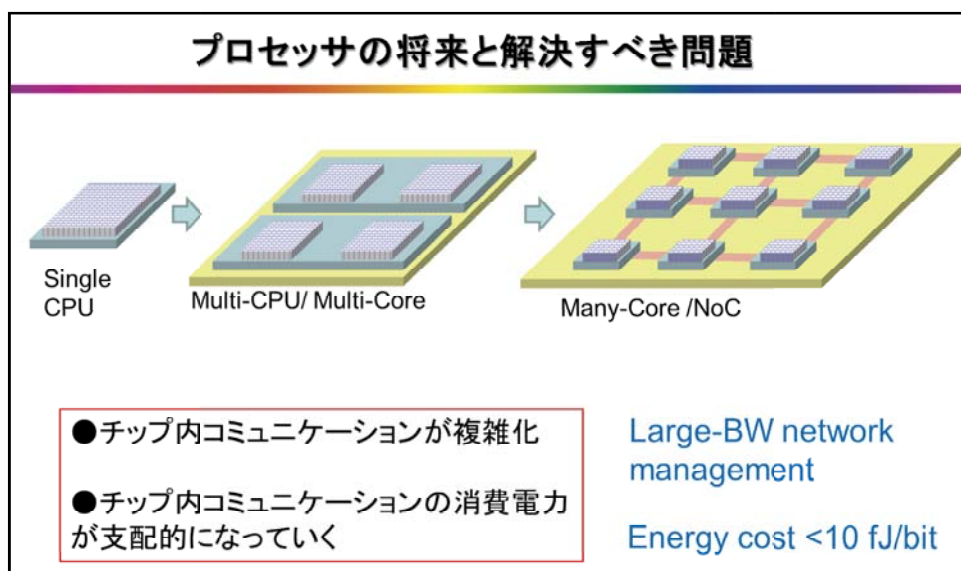


図 2-1-1

このようなネットワーク処理は、ハイビットレートになると光が有利なのではないかと考えられる。電気配線の問題点は2つある。1つはRCで決まるディレイである。RもCもどちらも体積に依存する量で、実際に帯域を確保するためにどれだけの電気、どれだけのボリュームが必要かを計算をすると、ボリュームリミットになることが分かる。従って、

帯域を増やすためにはボリュームを増やす必要がある。チップ中の体積は限られているので、そこで、コンフリクトが生じているのが現状である。

もう1つの問題点は、電気配線の中に存在するキャパシタンスである。キャパシタンスを充電しながら情報を転送していくが、この充電エネルギーは従来は無視できる量だった。1ビット当たり数十から100フェムトジュール必要だということが分かっており、現在はまだ許容範囲であるが、10年、15年先になると大きな問題になると言われている。一方、光で情報転送を行う場合、体積リミットはない。さらに光では、波長多重が使えるので、非常に狭い体積の中に大量の情報を送ることができる。もう1つ、先ほど述べた准電エネルギーの問題が光の場合はない。理由は、電気エネルギーを一旦フォトンに変えて、そのフォトンを受けるといった量子光学的な過程を使っているからである。以上、2つの点から考えて、ハイビットレートになると光のほうが有利だろうことが一般的に言える。

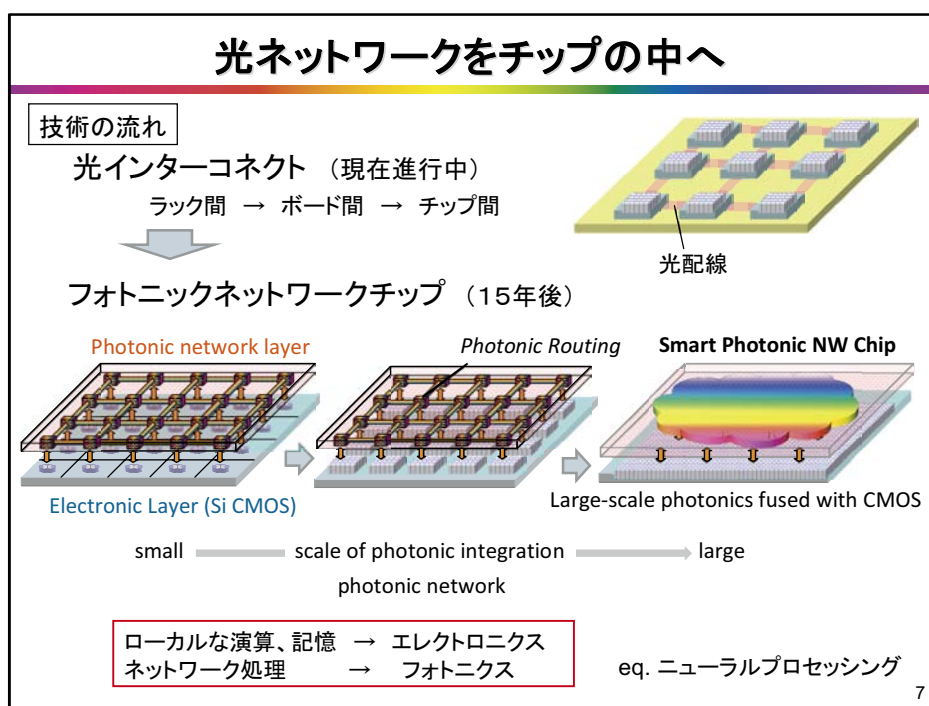


図 2-1-2

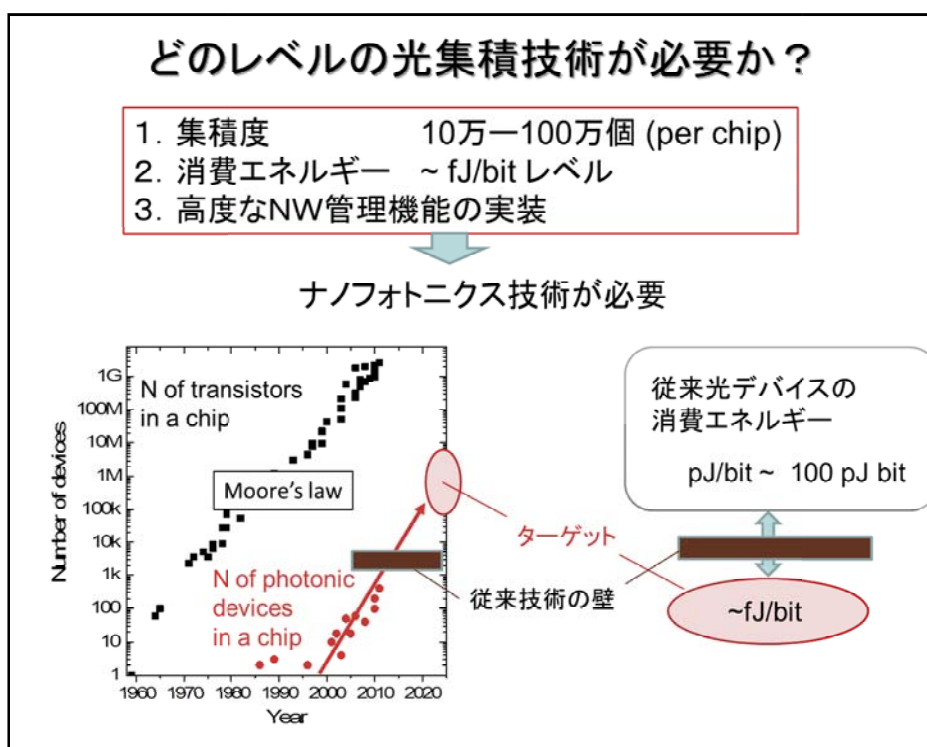
現在のプロセッサの計算性能はムーアの法則にほぼ従って成長しているが、この割合でプロセッサが進歩していくと、当然1ビット当たりに消費するエネルギーを下げしていく必要がある。要求されるエネルギー水準が今から10年、15年経つとフェムトジュール当たりの領域にいくと予想される。

現在、インテルやIBM、日本でも大きなプロジェクトで光インターコネクトの研究が進行している。10から15年くらい先にはかなり大量の大規模な光ネットワーク処理をチップの中に入れられることが期待される。イメージとしては、かなり大規模なメニーコアのプロセッサの上に光のレイヤーが載っていて、このチップ内のネットワークはほとんど光が担うことが期待される。この光のネットワーク処理をどんどん進歩させて、最終的には融合するような形にもっていければと考えている。つまり最終的にはローカルな演算や記

憶はエレクトロニクスが担い、ネットワーク処理は短距離から長距離までチップ中でフォトンクスがやるのが最終的によいのではないかと考えている。

そうした場合、どのぐらいの光の集積技術が必要かを大まかに見積もると、だいたい 100 万個ぐらいの光デバイスをチップの中に収納しなければいけなくなる。しかも消費エネルギーを 1 フェムトジュール/ビットくらいにしなければいけない。かつ高度なネットワーク管理機能が必要になる。ハードルはかなり高い。

光デバイスの集積度の向上をグラフにすると下記になる。2000 年くらいから急激に立ち上がっており、このレートがだいたいトランジスタのムーアの法則と同じ程度である。ただよく見ると現在の光集積化は従来型光デバイスを集積するというやり方で進んでいるので、明らかに 1000 個ぐらいのところで壁があるはずだと思う。この壁を越えるためにはデバイスサイズを劇的に小さくしなければならず、ナノフォトンクスの技術が必要になる。消費エネルギーに関しては、ほぼピコジュール/ビットくらいなので、必要としているフェムトジュール/ビットに対して 3 桁ぐらいの差がある。ここにも別の壁があり、この 2 つの壁を越えるためにブレイクスルーが必要になる。それがナノフォトンクスの集積化と考えている。



ブレイクスルーのための技術はいろいろあるが、そこに要求される水準として、小型でエネルギー消費が低く、ロスが低く、かなり大規模な集積が出来なければならず、ネットワークマネジメントが必要になる。現在のナノフォトンクスがすぐに使えるというレベルには残念ながら達していないが、これらを今後高めていき、10 から 15 年くらい先にな

り大規模かつ低消費エネルギーのナノフォトンクスの集積化が必要ではないかと考えている。

ナノフォトンクスを集積化するには、次の3つの点が大事であろう。まず一番大事なのは、光の情報処理の低消費エネルギー化の極限を追求することである。もう一つは、本格的な大規模集積化を実証することである。光の集積化の研究は非常に長い歴史があるが、そこにナノフォトンクスを使って大規模なもの、つまり10個や20個ではなく1000個、1万個、最終的には100万個レベルの大規模な集積化に向けた技術を実現できれば重要なブレイクスルーとなる。もう一つ重要なことは、光の集積と電子の集積の一番大きな違いは、光はいろいろな物質の機能を使わなければいけないので、異なった材料と異なった機能を実装していかなければならず、これが難しいところである。それをどうやっていくか。一つの回答として、最近非常に活発に研究されているナノマテリアルとナノフォトンクスを融合するというのも重要と考えている。

最後にNTTの研究を紹介したい。フォトンクス結晶の光スイッチで1ビット当たり1フェムトジュールを切るような非常に低エネルギーで動く光スイッチが最近実現している。

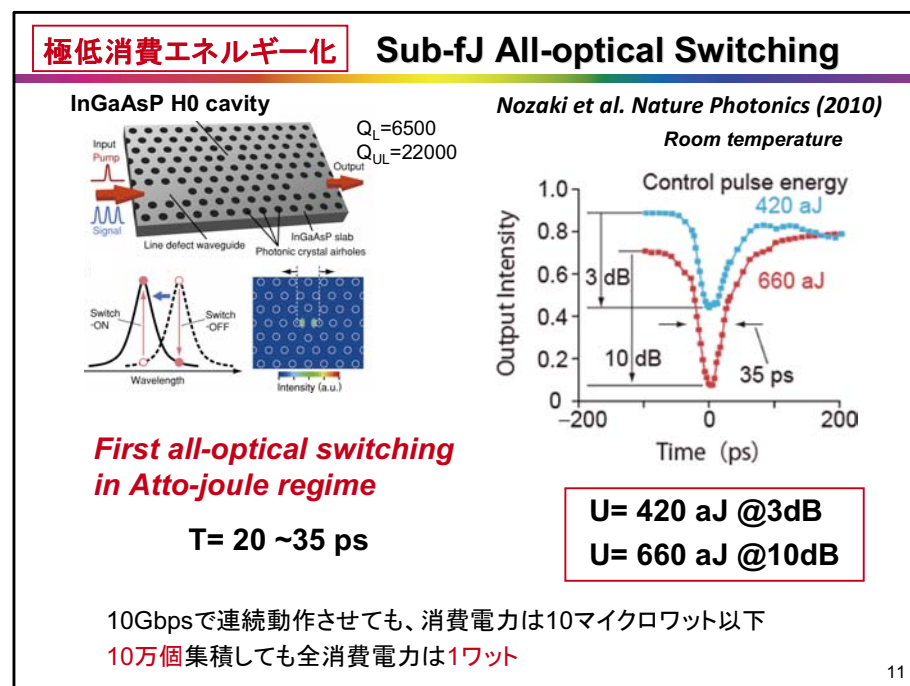


図 2-1-4

この性能を従来の光スイッチと比べると、3桁くらい改善されていることが分かる。理由は非常に簡単で実効的な光デバイスサイズが小さくなったからである。このような傾向は、トランジスタの世界では何十年も前から見られてきたもので、小型化するとエネルギーとスピードが速くなり、ムーアの法則をドライブしてきた。光デバイスにおいては、従来はサイズを非常に小さくすると閉じ込めがうまくいかなって効率が下がってしまうが、ナノフォトンクスの技術を使って有効な光閉じ込め機構を適用すると、トランジスタ

と同様な傾向が実現されるのである。NTT では同様な傾向を、光スイッチだけでなくレーザなど他の光デバイスにおいても実現している。

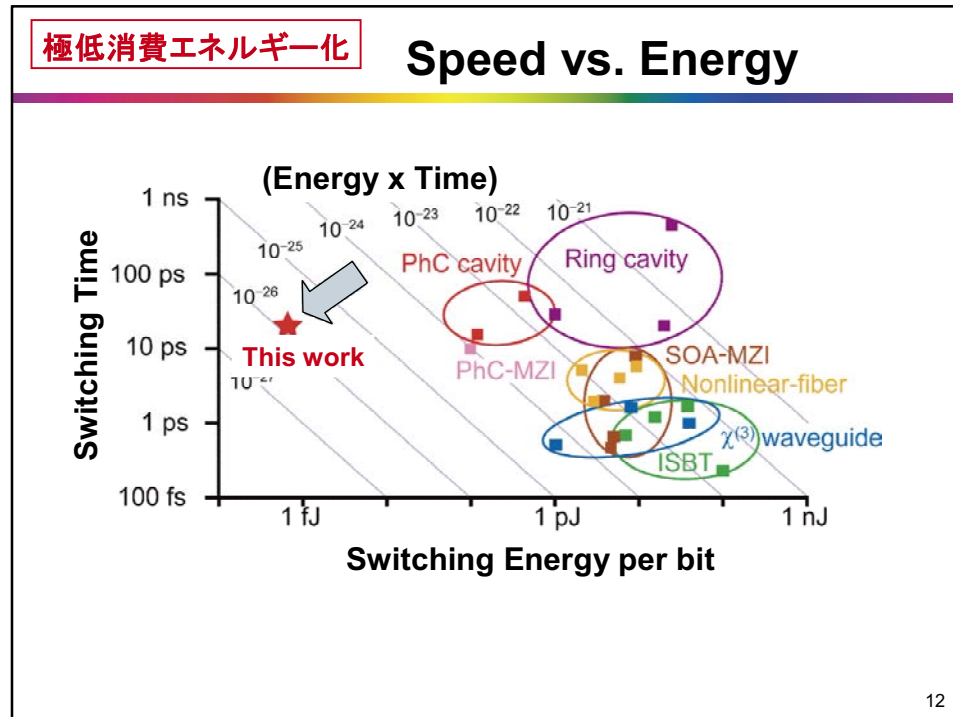


図 2-1-5

【質疑応答】

河田聡：光インターコネクトは 1980 年代から研究が行われているが、以前と現在では何が異なるのか？

納富雅也：以前は光技術の高速性が注目されていたが、今はむしろエネルギーを下げることに関心が移っている。

佐藤勝昭：エレクトロニクスに比べて、光技術は波長で制約される。ここを今後どうクリアしていくのか？

納富雅也：電子と光の違いは認めたうえで、ローカルな演算や記憶はエレクトロニクス技術でやり、エネルギーを消費している情報やりとりの部分を光技術が担うなど、住み分けが必要だろう。

2.2 光インターコネクト技術のサーバへの応用

山本 毅（富士通研）

サーバに光インターコネクトを使う観点からの議論をおこなう。最初に、光の特性を簡単に振り返る。光はどんなに飛ばしても波形が乱れないという特徴と、非常に損失が小さいという特徴を持ち、電気にはない高速伝送特性、長距離伝送特性を有している。光のもう1つの特徴は低干渉性であり、電気に比べて非常に高密度な配線が可能である。低損失、低干渉の伝送ができるため、30年以上前から幹線網の高速通信に使用され、数十ギガbpsレベルにまで達している。さらにその後加入者網にまで展開してきている。今後の有望な用途としては、サーバなどで使うインターコネクトと考えている。

しかし実際は、20年、30年前から光インターコネクトを使うと言いつつ入ってきていないのが現実である。理由はコストであり、光配線を安価にする間に電気配線の技術が進歩して、電気を超える事ができない歴史を繰り返してきた。ここで、少し考え方を变える必要がある。

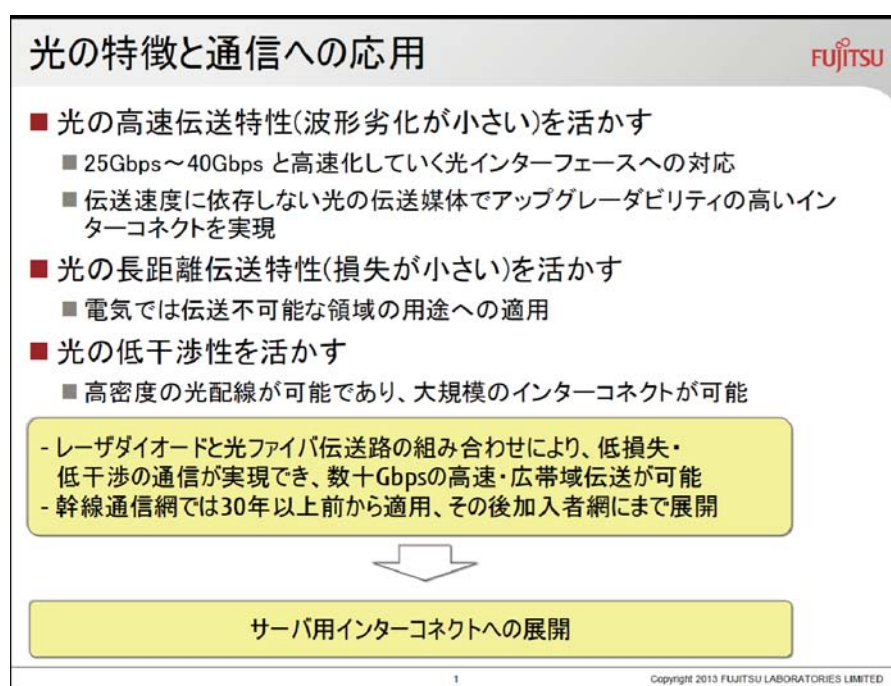


図 2-2-1

光をより活用できる場所、電気配線が苦手な場所、そのあたりに焦点を当て、適材適所な光インターコネクトを提案し、それを最適化してコストを下げていくという戦略が重要である。用途、特性、コストのミスマッチの解消、過剰なスペックの再考等が必要となる。例えば、10~300m程度のラック間伝送では、10Gbps、25Gbpsといった高速信号は電気配線では飛ばす事は困難であり、既に光インターコネクトが実用化されている。現在研究開発が盛んなのは、もっと距離が短い1m程度の装置内、ボード間の配線を光化する技術である。その次はボード内でチップとチップの間も光で接続する技術や、最終的にはチップ内も光配線する技術の開発が進められている。

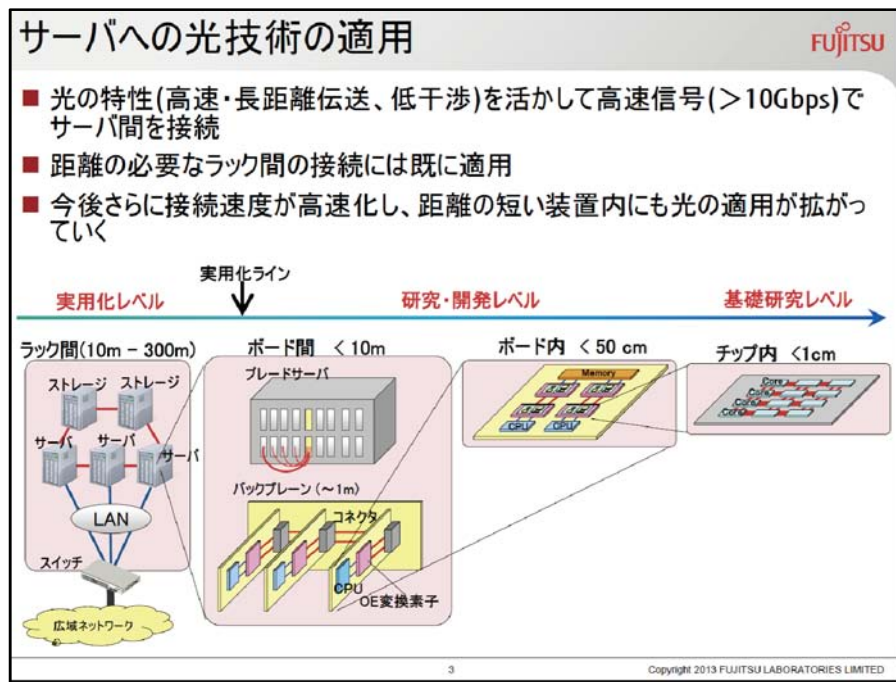


図 2-2-2

下図は富士通のラインナップであるが、サーバにもいろいろな種類がある。例えば、単独で稼働するタワー型サーバから、19 インチラックに並べて使用するためのラックサーバまである。さらには、筐体に小規模のサーバをたくさん詰め込むブレードサーバがある。その究極的な形として、今までのメインフレームのところで使うようなミッションクリティカルサーバもある。

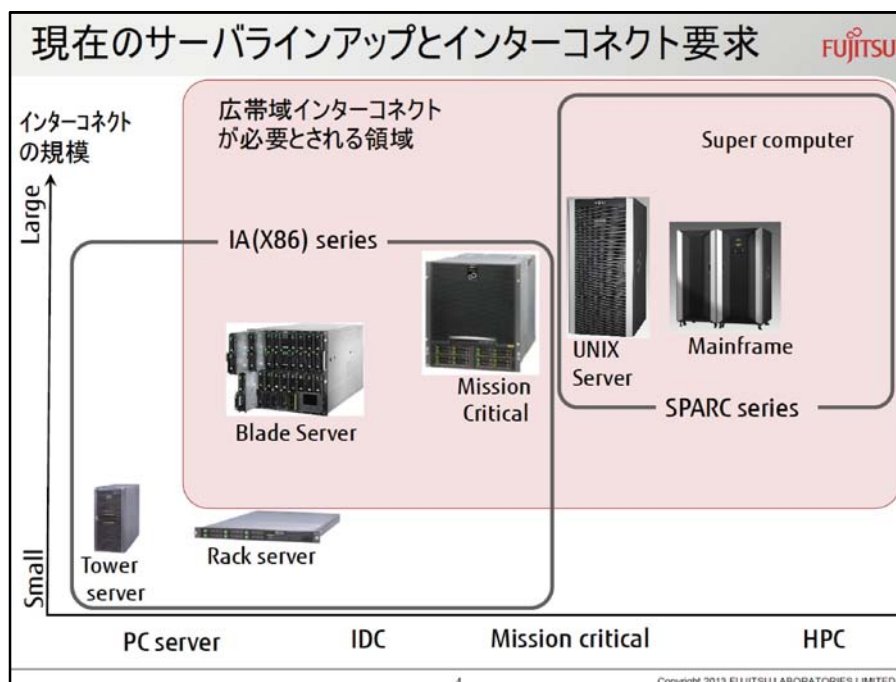


図 2-2-3

独自 CPU を用いたものは、SPARC シリーズや、スーパーコンピュータがある。数コアの Intel CPU から数十コアの SPARC CPU まで、右上へ行くほど性能が上がって、光のインターコネクトが使える領域になる。

光技術への要求は適材適所で行うのが重要である。コスト要求に関しては、基本的に電気配線への付加物となるため、可能な限り安くしなければならない。伝送帯域への要求については、基本的にサーバの単体性が高いものほど、より性能が高い CPU(速度が速く、コア数も多いもの)を搭載しており、広帯域の伝送が必要になる。フォームファクター、サイズへの要求では、メンテナンス性が重要なものは、光部品の取り外しが簡易な筐体に装着するタイプが、より広帯域の配線が必要なものは高密度に実装可能なエンベデッド型のものが使われる。

システム全体のチャンネル数が大きくなるほど信頼性に対する要求は厳しくなる。また、データセンタのような冗長性を高く取れるシステムでは信頼性よりコストが重視される。いずれにしても、それぞれに応じた最適のインターコネクトを考えていく必要がある。実際の光インターコネクト技術の適用例として、ブレードサーバ(サーバブレード(小型のサーバ)を電気のミッドプレーンでつないだもの)内のインターコネクトの光化を検討した。

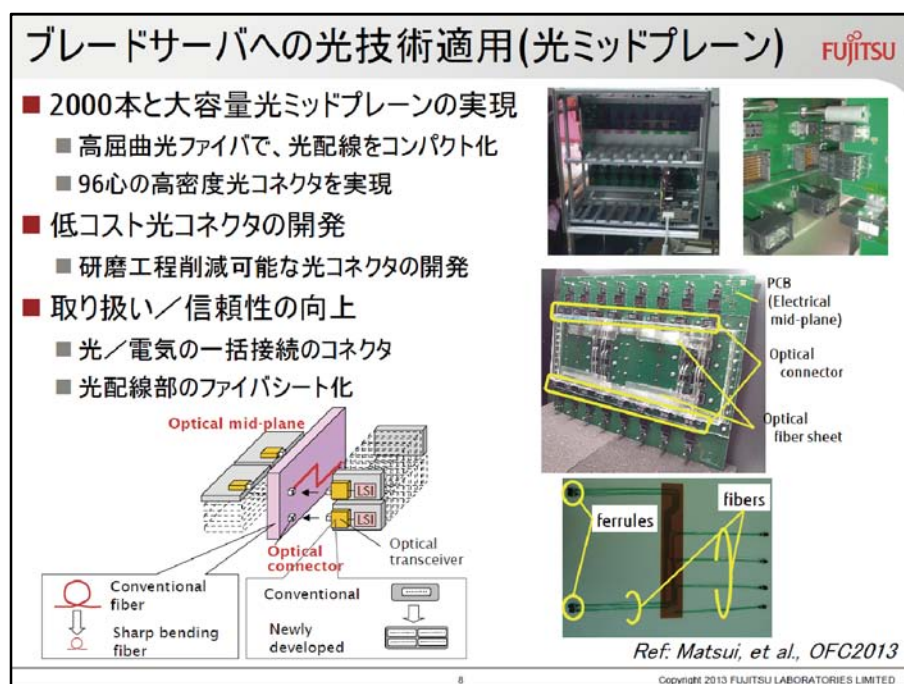


図 2-2-4

図に示すように、ブレードサーバのシステムボード上で CPU と接続した小型光モジュールからの光を光ファイバで形成した光ミッドプレーン経由で接続したものを試作・検証した。実際、ミッドプレーン内に 2000 本の光ファイバが集積できており、25Gbps の光信号で 50Tbps と非常に広帯域のミッドプレーンが実現できた。光を使うことで非常にコンパクトに大容量の接続ができるという特徴がある。

将来的な流れとしては、光電変換部をマザーボードの上に乗せるものからパッケージの上に乗せるもの、さらにチップの上に乗せるものに展開していき、さらにシリコンフォトンクスにつながっていくことが予想される。シリコンフォトンクスを使った技術が発展していく。シリコンフォトンクスを使うと、基本的に変調器を小さく集積でき、非常にコンパクトなモジュールが実現できる。さらに波長多重も可能であり配線密度の向上が期待される。

【質疑応答】

加藤雄一郎： 光インターコネクト技術における日本の位置づけ（シェア）は？

山本毅： モジュールのシェアはほとんど海外である。ビクセルは日本が開発したが、信頼度を高める努力をしている間に、海外勢が進出してシェアを確保してしまった。日本は、ローコストよりハイエンド志向である。

納富雅也： 通信から見た場合、標準化を取ることが重要だと思うが、現状は？

山本毅： インターコネクトの分野では、標準化より先に、他社と組んで企画を作り、それでデファクトスタンダードに持っていくのが主流である。

高橋和： 今後ボード内やチップ内の光インターコネクト技術を日本が開発したら、シェアを取り戻せると思うか？

山本毅： 取り戻せると思う。中へ入るほど、交換も不可能になり、信頼度の重みが増す。冷却など細かい技術は日本が得意な分野で、十分巻き返しは可能である。

2.3 放送技術と入出力デバイス

山本 敏裕（NHK）

本日は放送技術と入出力デバイスについて紹介したい。次世代の高臨場感テレビシステムの1つであるスーパーハイビジョンは、ハイビジョンの16倍の画素数を持ち、臨場感、実物感を再現するディスプレイとして研究開発が行われている。スーパーハイビジョンのシステムは2016年の試験放送を開始することを目標に、現在NHKでも研究開発を進めている。究極の2次元テレビというものにふさわしいパラメータ設定となっている。

NHK

スーパーハイビジョン(SHV)

SHVのコンセプト:
2次元映像における「究極のテレビ」

- ・あたかもその場にいるような「臨場感」、実際の物がそこにあるように感じる「実物感」を再現し、新たでかつ多様な視聴環境を提供
- ・人間の視聴覚科学についての基礎実験に基づいて、「究極の2次元テレビ」にふさわしい映像・音響パラメータを検討



大画面でのパブリックビューイング



家族みんなでも、一人でも



離れても、近づいても
家庭での視聴イメージ

図 2-3-1

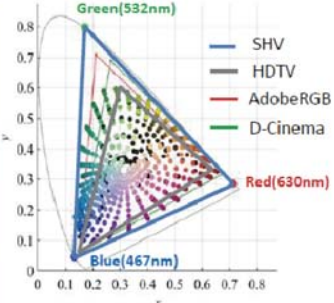
NHK

スーパーハイビジョンの方式パラメータと標準化

スーパーハイビジョンの基本パラメータ

アスペクト比(横:縦)	16:9
画素数	水平7,680×垂直4,320 (8K, 3300万画素)
フレーム周波数(Hz)	120, 60, 59.94
走査方式	順次走査
階調ビット数	12, 10
表色系	広色域3原色
音響	22.2チャンネル

スペクトル軌跡上に三原色を選定



実在する表面色データベース
(Pointer's colors)の包含率

SHV: **99.9%**

3

図 2-3-2

ハイビジョンシステムと大きく異なるのが、画素数がハイビジョンの 16 倍であるということである。また、フレーム周波数、走査方式がそれぞれ 120 Hz、順次走査ということで非常に滑らかな動画再生が可能である。また、表色系も広色域の三原色を採用している。図中の色度図で説明すると、グレーのところがハイビジョンの表現できる色域、ブルーの三角がスーパーハイビジョンの表現できる色域となっている。非常に広い色域を再現でき、実在する表面色データベースの中で 99.9%の色を再現できるパラメータ設定となっている。

スーパーハイビジョンの試験放送は 2016 年を目標にしているが、家庭用のディスプレイを考えると、2020 年位をターゲットに研究開発を進める必要がある。家庭用でも 100 インチ程度のものが望ましいが、ガラスベースで作ると玄関を通らず、エレベーターに乗せることも難しい。そこで絨毯のように丸めて持ち込んで家の中で設営をするといったフレキシブルなディスプレイが検討されている。フレキシブルディスプレイの中で特に大きなものをシート型ディスプレイと呼んでおり、80 インチ以上、できれば 100 インチといったディスプレイを目標に検討を進めている。



図 2-3-3

図に現在私たちが試作しているフレキシブルディスプレイを示す。現在は 8 インチであるが、まだ欠陥は多いものの、曲げた状態でも画像表示が可能という段階まで試作できている。ベースフィルムはガラスではなくプラスチックフィルムで、画素数は VGA、薄さは 0.2 mm であり、画素内の半導体は酸化物半導体である IGZO を用いている。これを今後 100 インチ級の大型ディスプレイに展開していきたいと考えているが、さまざまな課題がある。プラスチックフィルムは伸び縮みが大きいので、大型化したとき位置合わせがしづらい。また、ディスプレイを見る側の基板は透明でなければいけない。発光材料である有機 EL では長寿命化、高効率化が課題になってくる。有機 EL 材料は酸素・水蒸気に非常に弱く、これが劣化の要因となる。ガラスは水蒸気を通さないので問題はないが、プラ

スティック上に作ると基板が酸素や水蒸気を通してしまい、素子がすぐに劣化してしまう。また、大画面になると電力を消費するので更なる高効率化が必要である。作製法に関しては、できれば印刷のような簡単な作り方をしてコストダウンを図りたい。

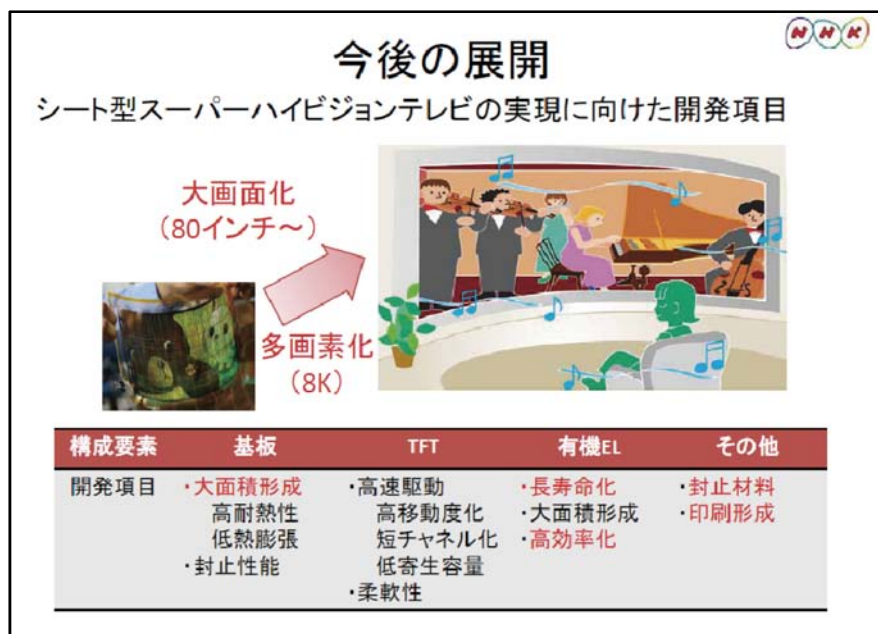


図 2-3-4

当所で検討しているそれぞれの課題に対する対応を紹介する。フィルムに関しては、これまではガラスの上にフィルムを貼りその上に素子を作っていたが、フィルム材料を支持基板の上に垂らして溶液からフィルムを作り、その上にデバイスを作る方法を検討している。透明なポリミド材料を使うことによって、耐熱性もあり、低い熱膨張率のものを用いることにより、非常に高精度なディスプレイができるのではないかと考えている。

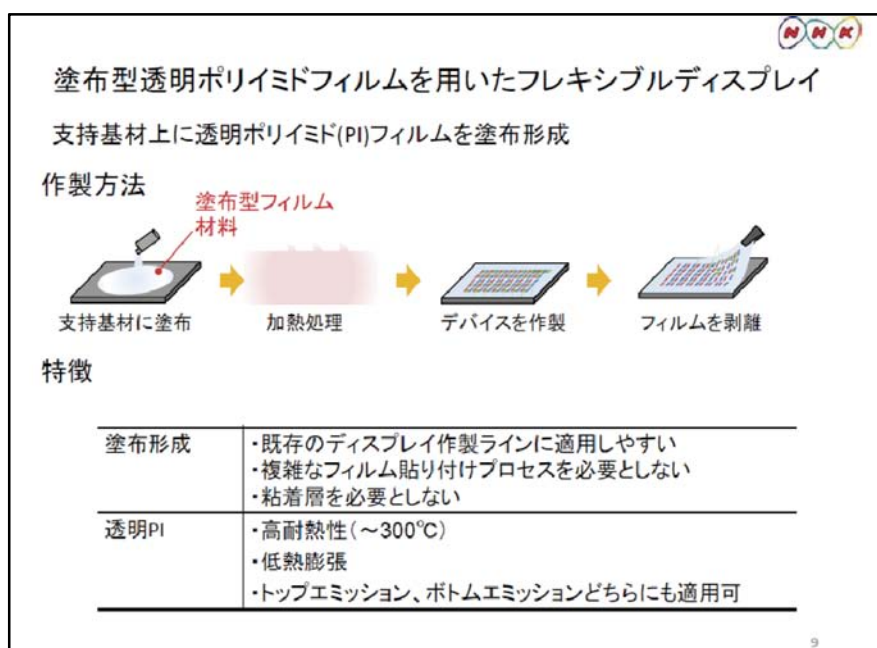


図 2-3-5

次に有機 EL 素子の長寿命化技術に関して、検討の一例を紹介する。先ほど、有機 EL 素子は酸素・水蒸気に弱いと述べたが、その最も大きな原因は、陰極にアルカリ金属やアルミニウムが使われていることである。それに対して、陰極として酸素や水蒸気に強い材料を用い、さらに通常の有機 EL 素子とは逆に陰極から膜を積層していく逆構造 OLED を検討している。このような構造とすることで、通常の OLED では 6 日程度から劣化が始まるのに対し、この逆構造の有機 EL は 250 日経っても劣化しないことが確かめられた。大幅に酸素・水蒸気に強い素子が出来たことで、スーパーハイビジョンのディスプレイに応用することを検討している。

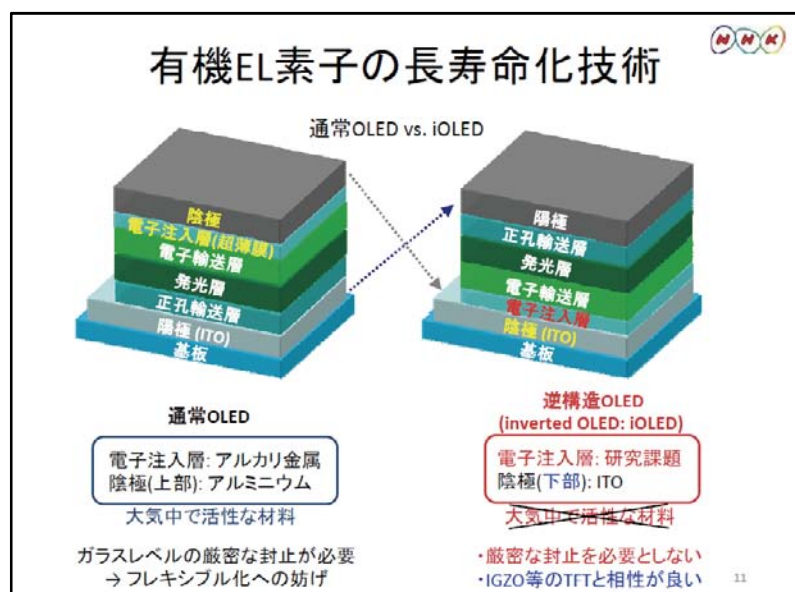


図 2-3-6

さらに高効率化に関して述べる。通常、実用化されている有機 EL ディスプレイでは、蛍光という発光が使われているが、これをりん光という発光機構を入れることによって、約 4 倍の発光効率を得られる。このりん光発光についてもいろいろ報告はされているが、寿命を兼ね備えた高効率な材料というものはほとんど発表されていない。当所では、高効率かつ長寿命なりん光有機 EL 材料の研究を進めている。作製法に関しては、通常、マスク蒸着法で有機材料を真空チャンバーの中で蒸発させて、塗り分けている。この方法だと、100 インチを作る場合、大きな真空チャンバーが必要でコストもかかる。そこで、先ほど述べた印刷の 1 つであるインクジェットを用いた検討を行っている。この方法では真空チャンバーは必要なく、大面積が容易、低コスト、材料の利用効率が高いといったメリットがある。

いくつかの課題が残っているが、1 つ 1 つ解決して、2020 年を目指して、大型のスーパーハイビジョンディスプレイを実現したいと考えている。

【質疑応答】

川合知二：有機ELは日本が優位であったが、韓国に抜かれてしまった。原因は？

山本敏裕：一番の要因はコストと聞いている。特に民生用はコストが重要で、技術そのものでは日本が勝っていても、コストで太刀打ちできない。

川合知二：次世代のスーパーハイビジョンに行く際の問題は？

山本敏裕：有機ELでは材料の問題が一番大きい。カメラに関しては材料に加えて設計も重要である。新しい材料に加えてプロセス技術も課題と思う。

中山健一：多層の有機センサーのメリットは何か？

山本敏裕：有機膜を使うと、波長の分離が良くなり、特に今後のカラー化には適している。

2.4 医療・ライフサイエンス領域で光に求められるもの

橋本 武（オリンパス株式会社）

顕微鏡、内視鏡などの技術開発をしている。顕微鏡は、我々にとって大変面白いシステムであり、空間情報、時間情報、波長情報、位相情報、偏光情報を処理して、細胞やがん化しているところを見るという点で、光情報処理マシンと言える。現在は基礎研究の先生たちに使われ、主にがんなどの疾病関係分子の相互作用を見るような研究が盛んに行われている。こういう研究の成果は、臨床にもって行って人間の健康に役立つような機器にしてこそ意味があり、弊社の内視鏡もその一翼を担っている。基礎の研究が臨床の中でさらに研究され、それが製品として人の健康に役立っている。

内視鏡は疾病を診断し治療する機械である。内視鏡には体内に直接アプローチできるというメリットがあり、患部に達して診断だけでなく治療もできる。基礎や臨床研究の先生たちが、例えば動物の中で試してみたい、人間の中で試してみたい、という時に唯一、体の中で試せる機械として多用されている。そのため、「こういう方法でがんを治したい」、「こういう研究のために装置を作ってもらえないか」といったオファーが弊社には多くの先生から寄せられる。これは、内視鏡が臨床研究をやる先生たちにとって大きなメリットのある機械だからだと思っている。

光機器に求められるものは、より詳細に、より広範囲に、より高速に、より微弱な光を、小さく、安く、といった性能向上であり、それらは開発する我々の永遠の課題でもある。こういった課題を、自分たちの得意とする領域の技術で改良や工夫を加え解決する、いわゆる「技術の正常進化」が、おそらく私を含めてほとんどの方たちのアプローチだと思う。

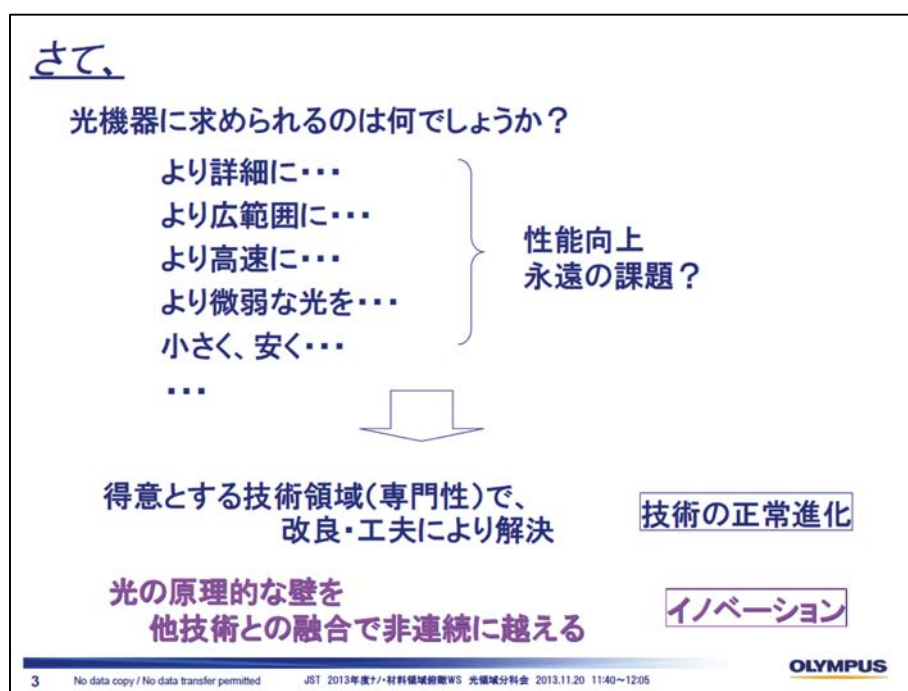


図 2-4-1

一方で、光には原理的な壁があり、より細かく見たいといっても、それほど簡単に越えられるわけではない。しかし何かを少し融合すると、「あれ、こんなことでできちゃっているのかな」ということがままある。「こんなにコンパクトにできる」、「こんなに安くできるからどうぞ使って」、というシーズ発想ではなく、「こんなことができれば嬉しいな」というところをベースにニーズ発想でいくと、イノベティブなことが最終的にはユーザー先で出来てしまうということがある。その例を「え、こんなこと？」と思われるかもしれないが、少しお話しする。

蛍光顕微鏡での観察では蛍光色素を使う。これで何を見ているかという、細胞の中の核、細胞骨格、アクチン繊維といったものを見ている。これらがどれくらいのサイズかというと、細胞核は数ミクロンぐらい、細胞骨格に至っては20~30 nm、アクチン繊維は6~7 nmである。光の分解能はどれくらいかというと、500 nmの光で250 nmぐらいで、なぜこれが見えているのかというと、実は見えているわけではなく、間接的に見ている。別に7 nmのものを見ているわけではなく、7 nmのものに蛍光試薬をつけて、それがある程度のSNが確保できるぐらいの集団になり、集団として見えている。生物研究者にとり、これがこの細胞の中でどういう空間にどれだけの量がおおよそ分布しているか、それがどのように変化しているかを追うだけであれば、分解能はいらない。ここに発想の違いがある。分解能を光学の中でどんどん追いつめるのではなく、蛍光色素のようなものをつけて間接的に見るということでもユーザーの要求は満たせるということである。ニーズとして光の分解能を超えた領域の情報をユーザーに与えるという意味では1つの解答だと思う。

顕微鏡は生物学研究者と二人三脚で発展してきた。分子生物学や遺伝子工学の進歩とともにどんどん発展している。最初は、細胞の固定標本や、固定した細胞をスライスしてみるという世界から、だんだん機能を見たり、生かしたまま見よう、個体を見よう、という世界に移ってきた。生かしたまま機能を見るということになると、顕微鏡の世界から内視鏡の世界などにどんどん技術が移っていくということになる。

さらに、細胞の中でどういう生体分子がどのような相互作用をしているのか、病気の場合は相互作用がどう変化するのか、どこの経路が駄目だから、病気やがんになってしまうのか、といった研究が盛んにされるようになった。相互作用を生かしたまま見なければならなくなってきたということである。その中で下村先生がノーベル賞を受賞した緑色の蛍光タンパク質は、生体にその遺伝子を導入し、生かしたまま細胞や動物を観察できる技術として、大きく進歩してきた。

たとえば、細胞分裂の場合、通常であれば細胞を殺してしまうので分裂してゆく過程は見えないが、Fucci (Fluorescent Ubiquitination-based Cell Cycle Indicator) という蛍光プローブを用いれば、細胞を生かしたまま分裂期の細胞を緑と赤に染めて、どうやって細胞が分裂しているかを連続的に見ることができる。要するに、細胞をずっと生かしながら、例えば、がんがどう進んでいくかという観察が出来るようになってきたということである。

一方で、我々が顕微鏡を使う上では、光通信の進歩などはすごくありがたく、例えば蛍光顕微鏡のフィルターは、光通信で大きく発展したフィルターが入ってきている。また、超短パルスレーザが利用できることによって、非線形の光学現象でものを見るような2光子励起顕微鏡などができた。2光子励起顕微鏡は、チタンサファイヤレーザの波長800 nmを「生体の窓」の光として使え、非常に深部まで見えるようになってきている。たと

例えば、2008年度頃は、2光子励起顕微鏡を使っていた700ミクロンぐらいまで中が見えるようになった。これはレーザーと光学が融合して、非線形光学としてうまく製品化した例である。現在では、スケール溶液という生体試料を透明化する溶液を使って、マウス胎仔の脳の部分を大脳皮質の領域から海馬を超え視床まで、4～8mmぐらいの深さまで見えるようになってきている。

光を使って生体の内部を見ようとするすると散乱があつてまったく見えない。光の散乱理論、シミュレーションを使つても、数mmを超えると全然見えない。光音響やOCT（Optical Coherence Tomography）を導入してもまだ駄目だということであれば、散乱を除いてしまえば見えるようになる、という発想が必要なのではないかということである。散乱でまったく見えないものが、10mm、20mmの深さまで見えるとなると、通常の内視鏡でも奥まで色々見え、手術もより簡便になる。

こういったことは、すぐできるわけではないが、例えば手術で誤って血管を切つてしまつて患者を危ない目にあわせることもなくなるし、分子イメージングなども、がんの深いところまで見えることになる。深いところまで見えるようになると、2mm、3mmのところから発生しているがん自体も見つけることができ、もちろんOCTなどもすごくよく見えるようになる。

解像度の壁を越えてここまで到達した、ということも大事だと思うが、他と組み合わせでこんなに簡単に出来るではないかというところに気づくためにも、いろいろな人と付き合うような状況を作った方がいいと思っている。

医療やライフサイエンスの領域では、生体試料が自由に手に入る環境が重要である。ヒトの切除切片などを入手しようとする、倫理的な問題が大変厄介で、しかも臨床研究、治験になってくると法規制がすごく大変になる。これを研究者がやろうとすると大変な話で、医療やライフサイエンスの領域で研究をやろうとしたら、技術の融合と同時に環境の整備をどんどんやっていかなければいけない。

早期診断、早期治療を目指す技術開発をすることも重要だが、最終的にはユーザーとしての患者一人一人をみたものでなければいけない。いくら我々がこれはすごくいいだろうと言っても、患者にとって本当にいいのだろうかというところを考える必要がある。もちろん政治的には医療費削減などを考えなければいけないと思うが、やはりここをみたものでなければいけない。

ユーザー価値として、光でこれをこうしたいという時に、ではトータルのシステム、装置、それからバリューチェーンの中でどうするのかということをおそらく国のようなレベルで戦略的にやっていかなければいけない。その一端として、研究開発というものがこういうゴールを目指してやるものだということにきちんと位置づけられたら素晴らしいと思う。



図 2-4-2

【質疑応答】

飯田琢也：血液検査のように体外に抽出した後の検体を対象とした検出に関する取り組みに関してご意見があれば伺いたい。

橋本武：診断と治療が一体になって、それがユーザーに効果をもたらすように、いろいろな検査や体外診断もセットでやるべきだと思っている。体外診断だけでなく、それが治療とセットになるのが今後の方向かと思う。

飯田琢也：レーザーで生体の状態を変化させ、脳の中の異常を発見する、といった取り組みはあるか。

橋本武：無染色で、レーザーで細胞の状態を観測するような技術は昔からやられているし、それをうまく工学的に装置にすることは、今いろいろな技術があるのでできると思う。あまり光だけにこだわらない方がいいと思っているのは、オプトジュネティクスのような分野で、試薬との相互作用をうまく使ってエネルギーを供給できるとか、情報を伝達できるといった光のメリットを活かすのがいいと思う。たとえば心臓などは、オプトジュネティクスを使って、直接除細動を与えるような研究をされている海外の先生もいる。脳の研究から治療として心臓のところまで発想が行くところがすごいと思う。

小関泰之：イノベーションの種というものを、今後どのように見つけていこうと考えているか。

橋本武：私自身も探さなければいけないし、部下も探さなければいけないが、とにかく楽しい、もしくは、自分がやっているものとは全然違う技術を見つけてこいと言っている。業務の中でも、ほんの10%だが、自分の技術以外の業務をやらせる。それは学会に行くこ

とでもいいし、外に出て先生の話聞きに行くことでもいい。それが違う分野であればすごくいい。

川合知二：ライフサイエンスなどに関しては、網羅的な複合情報をどうやって取るかという問題が重要だと思う。例えば、細胞を見るのでも、より小さく高速にというのは分かるが、できれば2次元、それから深度も含めて3次元的に見て、そのときにいくつかのタンパク質それぞれが別々にそれだけが見えるのではなく、それぞれが違う色で見えて、それがどう変化するか。それで網羅的に調べて、相互作用がわかって初めて理解できることがある。こういう問題に対し、光機器に求められるものとして、何が課題か。

橋本武：我々も将来の絵として、人体の中のグーグルマップのようなものを描いて、微細な物質から、臓器レベル、身体レベルまでマップ化して、その中に機能を盛り込むような絵をよく描くが、問題になるのは、それをつなげていくところをやろうとすると、一企業では得意不得意もあり無理で、そこをつなげていくような仕組みなどが課題である。

川合知二：国の政策などできちんと拠点を組むなり、グループ化してやったほうが良いということか。

橋本武：それに尽きると思う。

川合知二：技術的にはどうなのか。世界的に、いろいろな分子の、例えば1細胞の中の相関を取ったり、1細胞だけでなくもう少しマクロなスケールでも相関を取るのがすごく流行っている。しかし、それほどうまくいっていない。

橋本武：うまくいかない理由は人体だから。例えばモデルであればうまくいくが、人体はやはり違いがあり、個性がある。人種もある。リアルな人間で相関を取ろうとすると、ものすごく難しいと思う。

河田聡：突き詰めても分子は皆ブラウン運動をしている。固体ではないので、生体試料はより詳細に高速にといえば情報が増えるわけではなく、いかにいらぬ情報を捨てて、必要の情報だけをそこから取り出すかといった複雑系の数理学の中でのパラメータを見つけるようなことが、次のフェーズとしておそらく必要になってくるような気がする。

3. 話題提供

3.1 光技術の最新動向 -OITDA 光技術動向調査委員会報告より-

中野 義昭（東京大学）

私は光産業技術振興協会の光技術動向調査委員会の委員長を務めている。河田先生は前代の委員長でいらした。通称「光協会」と呼ぶが、そこには発足のときからやっている二つの基幹事業がある。ひとつは、産業動向調査で、どのくらい光ビジネスがあるのかという統計をとっている。もう一つがこの技術動向調査で、光産業に関わる技術がどのように世界で進展しているかをウォッチしている。

今日冒頭に説明があった配布資料の10ページ目の「社会との関係」という項目に、「1. 光関係のそれぞれの産業が成熟期に入っている。（光通信、ディスプレイ、太陽光発電（第一期）、レーザー加工等）」「2. 日本の産業競争力が低下傾向（エレクトロニクス、通信機器、計測装置等）」「3. 光関係の個々の要素技術は着実に高度化・進展しているが、社会にインパクトを与える新たな発見や技術革新が見えにくくなっている」とあるが、これらの問題意識をそのまま持っている。光産業の第一世代が非常に高い成長率で成長してきたが、今は飽和している。

今日お集まりの若い方々は、その成熟、停滞を十分認知した上で、この先の世界をつくっていただく。そのためのたたき台に使っていただけるのではないかと考えている。

この資料はインターオプトという展示会のときの「技術動向調査」報告のスライドからの抜粋である。

今までの光産業の枠組みで、分野ごとに調査している。第1分科と第8分科はどちらかと言うとシーズ的な無機材料と有機材料、光応用に関連する材料デバイス技術である。残りはアプリケーション、ニーズ側からの括りであり、「光通信」、主に光ディスクの「光メモリ」、「ディスプレイ」、スキャナなどいろいろなところに使われている入出力機器の「ヒューマンインターフェイス」、光を使った「加工・計測・メディカルへの光応用」、エネルギー応用としての「太陽光発電」となっている。

これらの分野をずっと定点観測しているが、概ね先ほどの仮説「光を取り巻く環境」は当たっていて、どこも閉塞感を感じはじめている。何とかしなければいけないと思っている。

第1分科は、ミリ波の上のTHz（テラヘルツ）から可視光までの間の光源や受光器がどのようになっているか調べている。

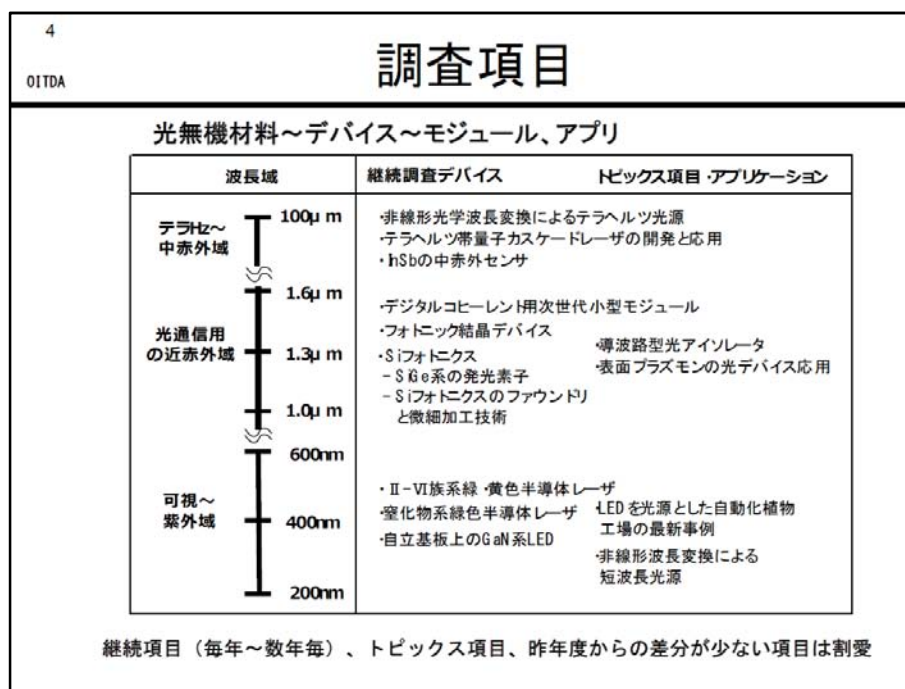


図 3-1-1

最近では、THz（テラヘルツ）光源の高出力化が年を追って進んでいるという話や、量子カスケードレーザの進展、近赤外・中赤外光源の発展があり、これらは検査技術・環境技術とリンクして発展してきている。残念ながら、このような分野では日本の存在感は小さい。近赤外・中赤外のセンサーなどは日本が得意なところもある。

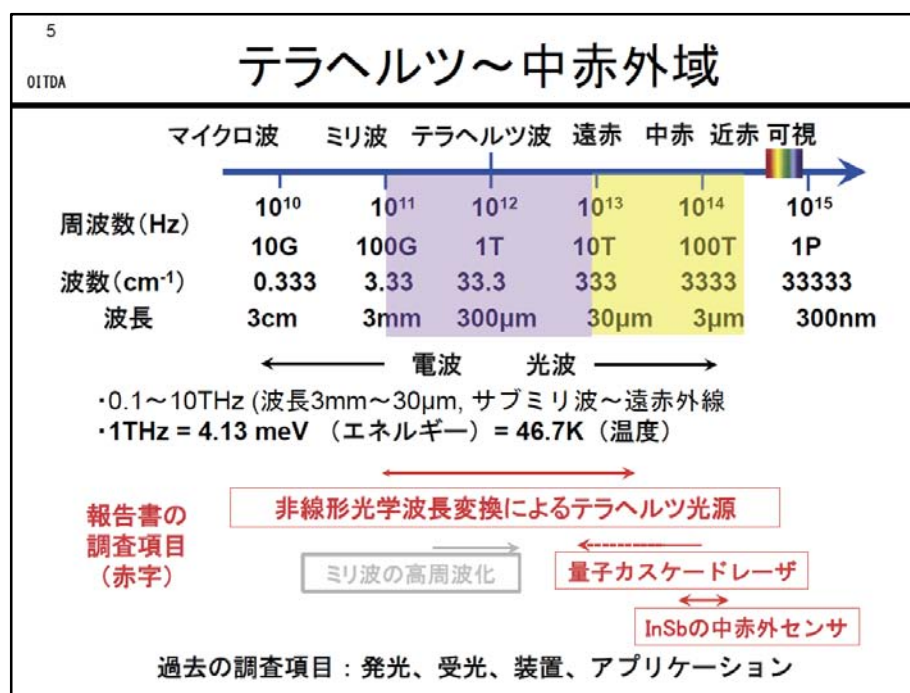


図 3-1-2

光通信系は日本のお家芸になっていて、今はシリコンフォトンクスが流行っている。ただ、商売としてはそう簡単にはいかない。競争が激しいし、儲からなくなっている。デジタルコヒーレントは、昨今では珍しく成功した例であり、これがひとつのデバイス開発のターゲット（中心）になっている。

可視・紫外域はガリウムナイトライド（gallium nitride/GaN）がずっと頑張っているが、問題は緑がなかなか出ないというところである。この辺では日本はまだ頑張っていて、II-VI（ニロク）が復活して緑や黄色を出している。

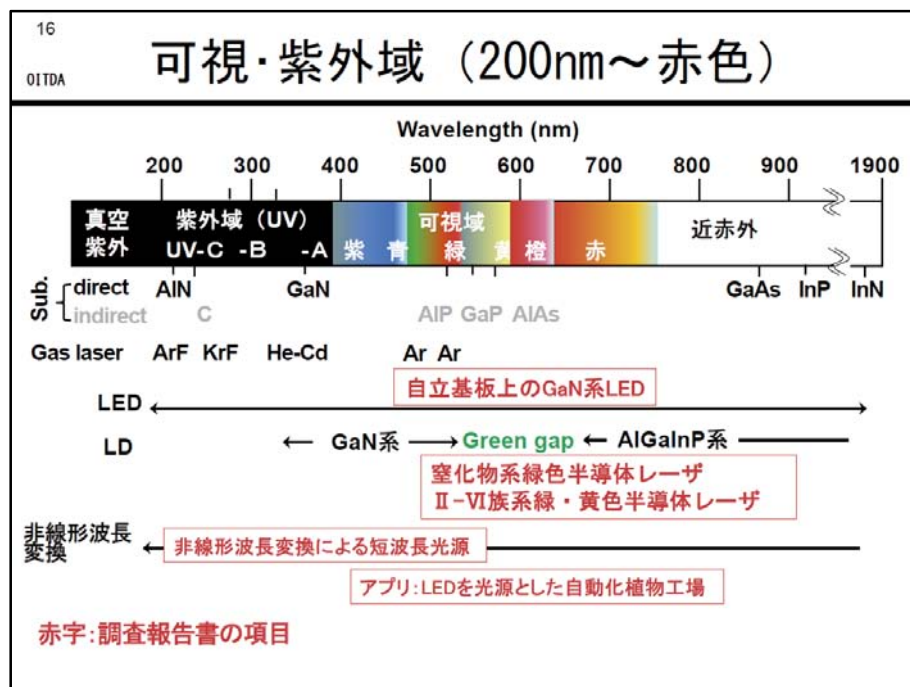


図 3-1-3

どこまで演色性が稼げるかという意味で、光源の色度図における頂点にどれだけ寄せられるかということを一生涯懸命やっていて、かなり良くなっている。これらは、より演色性が高く、色の表現の良いディスプレイを作ることにも活用されようとしている。

白色 LED は照明が主な用途でどんどん進んでいるが、最近はガリウムナイトライドをシリコン基板上に作ることが行われていて実際に製品も出てはいるが、いろいろな問題がまだ残っている。LED を使った植物工場などという応用もある。

第 2 分科は、「光通信ネットワークの最新動向」である。

基幹伝送システムはどんどん進歩している。今は 1 本のファイバーで 1Petabit/s に到達している。そのほか「光 LAN/インターコネクト」でももう 100G 競争は終わって、400G に向かって進化している。

ネットワークは、オープンフローや SDN（Software defined network）などのネットワークをいかにうまく使っていくかという、ソフトウェア的な考え方に寄ってきている。

最近、マルチコアやマルチモードのファイバーが非常に発展していて、接続が難しくてどうなるかと思ったが、非常にうまく使えるようになってきており、これが先ほどの伝送容量の飛躍的増加をもたらしている。

まとめ

- ・ **概観 1P/空間多重, Elastic/SDN, ポストxx**
- ・ **技術動向報告**
 - 基幹光伝送システム: **1P到達/空間多重進展**
 - フォトニックノード: **ElasticNW向けフレキシブルグリッド化**
 - 光ネットワーキング: **Open Flow/SDN**
 - アクセスネットワーク: **NG-PON2(ポスト10G)加速**
 - 光LAN/インターコネクト: **100Gからポスト100Gへ**
 - 光ファイバ: **マルチコア/マルチモード(ポスト100Tへ)**

一般財団法人光産業技術振興協会
Optoelectronics Industry and Technology Development Association

光技術動向セミナー 2013/10/17「光通信ネットワークの最新動向」

47

図 3-1-4

第3分科は、光ディスクと、最近は「光情報処理」ということで、データセンタで利用されるサーバ類、その周辺で用いられる光技術を扱っている。

光ディスクはブルーレイで一息ついていて、今後は100年やそれ以上の長い期間にわたってデータを保存するという方向に転換していくための研究開発がやられている。ただ、そうすると「一家に一台」というわけではなくなるので、「爆発的な数が出る」というような話ではなくなり、静かなことになってきている。

光演算も、昔からはそばそ続いているというとな怒られてしまうが、いろいろな活動がいろいろなところで行われている。

まとめ(1)

光メモリ

1. アーカイブ用途への展開
記録容量, データ転送速度, 長寿命
2. 記録容量向上
多層化
ホログラフィックメモリ (多値化)
3. データ転送速度
データ長縮小(近接場), 薄型(>10,000rpm)
4. 長寿命
石英材料へのマーク記録

CITDA 光技術動向セミナー, 10/17/2013 60

図 3-1-5

まとめ(2)

光インターコネクション
ラック間, チップ間の実装実験が進展
10~25 Gbpsのデータ転送速度

光演算
光技術(計測, 相関器, 近接場)とデジタル技術(イメージセンサ, GPU)の融合によるシステムの高性能化に向けた研究が盛んである
デジタルホログラフィックイメージング
近接場相互作用の光演算への利用
光相関器による高速画像検索

CITDA 光技術動向セミナー, 10/17/2013 61

図 3-1-6

第4分科はディスプレイである。ディスプレイ自体はスマートフォンやタブレットに代表されるように、非常にたくさん使われて、市場は拡大する一方だが、技術的には飽和している。液晶、有機LED等の開発が今も進んではいるが、なかなか商売として難しくなっている。IGZOはひとつの希望が持てる材料である。

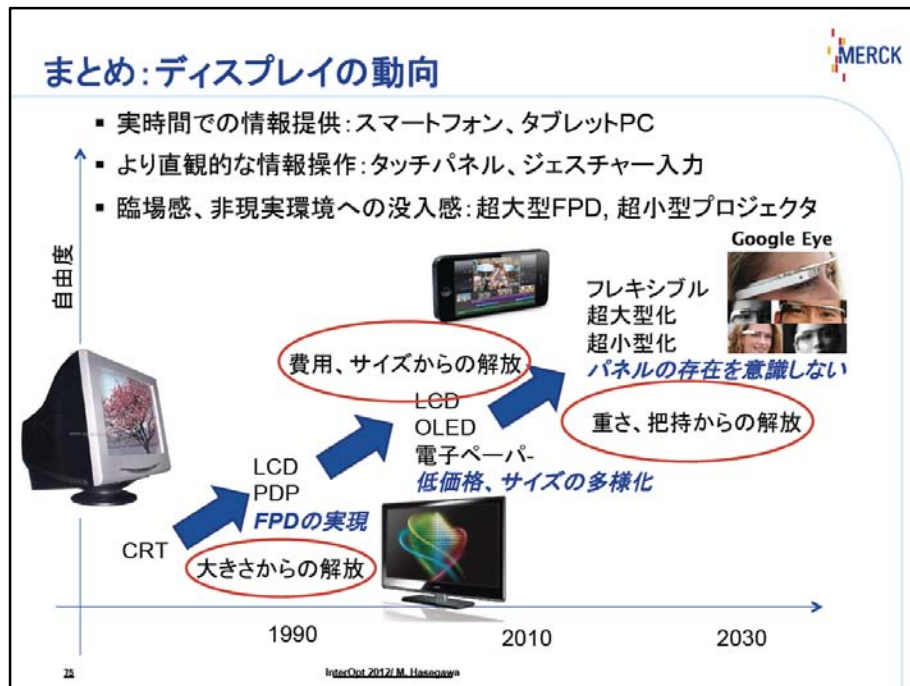


図 3-1-7

第5分科は入出力である。最近では CMOS のイメージセンサーが中心で、あとはそれをどう使っていくかという辺りにシフトしている。

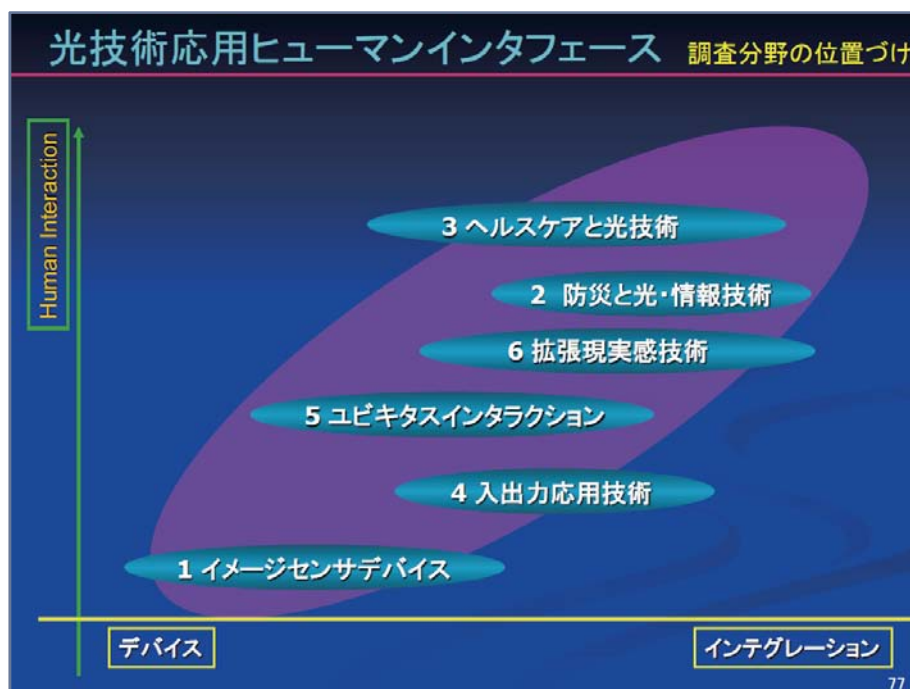


図 3-1-8

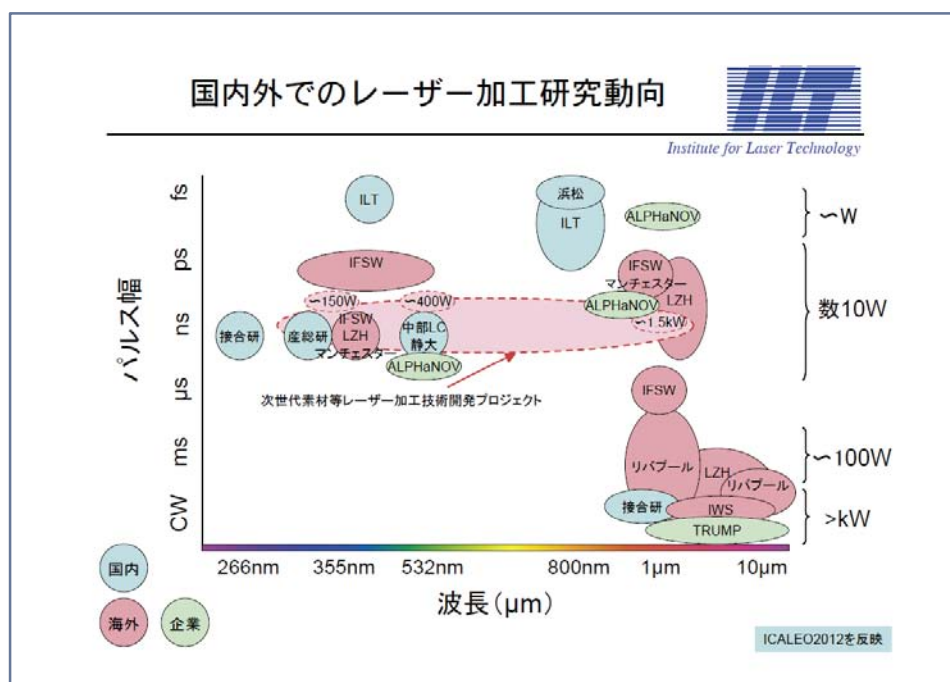


図 3-1-11

3D プリンタと俗称される、レーザーで削るのではなく、積み上げる技術がある。マスコミでは全部まとめて「3D プリンタ」と呼んでいるが、学会的には「laser additivemanufacturing」と称されている。さらにそこから発展して「digital photonic manufacturing／デジタルフォトニックマニファクチャリング」という名前も使われるようになってきている。

第 7 分科は太陽光発電であるが、相変わらず変換効率の競争が熾烈である。図 3-1-12 では、青がシリコン系統、緑が薄膜系統、オレンジが有機系太陽電池である。紫の化合物半導体単結晶の太陽電池における効率競争のフロントでは、6 月にシャープが 44.4% で世界記録を達成したが、9 月には早くもドイツの Fraunhofer が 44.7% というのを発表して、わずか 3 カ月で世界一の座を奪われた。そのほか、結晶系シリコン太陽電池や化合物薄膜太陽電池、CIS や CIGS と呼ばれているものも、技術的には確実に進歩しているが、ビジネスがなかなかうまくいっておらず、必ずしも研究開発が元気とはまだ言えない。

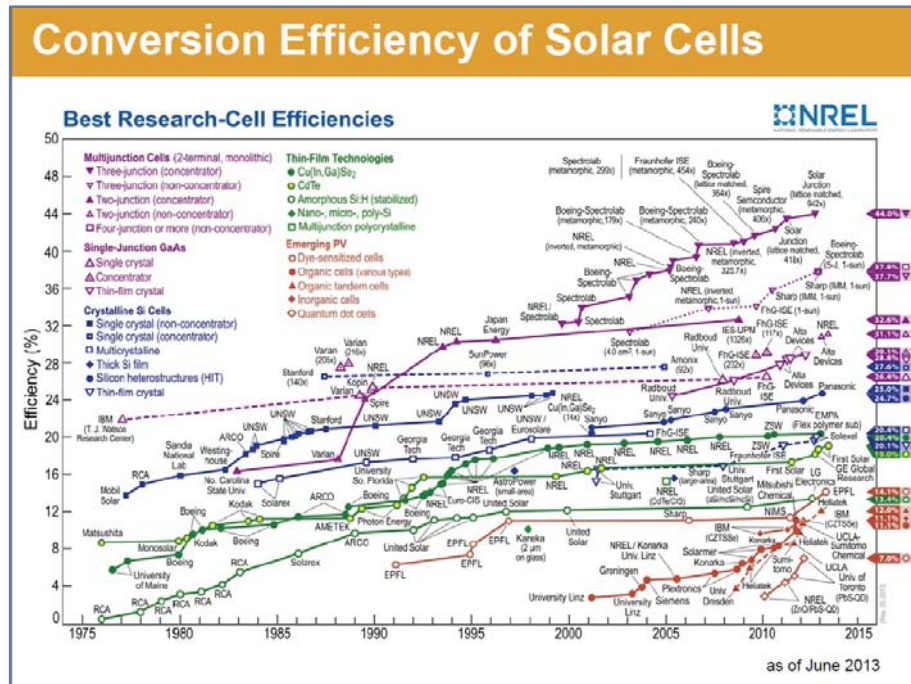


図 3-1-12

最後の第 8 分科は、光有機材料・デバイスである。最新動向として、エレクトロクロミック（EC）ガラスや有機単結晶トランジスタその他の有機材料のエレクトロニクス応用が確実に進展しているということで、比較的元気という印象がある。

調査項目

- ・有機発光材料（EL発光材料、応力発光材料）
- ・有機半導体材料
- ・透明導電性材料—IITO代替—
（導電性高分子、メタル系透明導電性材料、新炭素材料、配線材料）
- ・有機透明材料・（ポリマー導波路材料）
- ・クロミック材料（エレクトロクロミック、フォトクロミック、塗布材料）
- ・光加工関連技術
（プリンテッドエレクトロニクス技術、フレキシブル基板、接着剤）
- ・有機デバイスの共通課題
（物性/信頼性評価技術）

図 3-1-13

【質疑応答】

高橋和：半導体レーザー可視光の領域では「グリーンギャップ」という言葉がずっとあって、数年前に確か、日亜化学工業と住友電気工業が緑を出したというニュースのあとにあまり続報がないと思っていたが、黄色などの今までなかった波長の半導体レーザーの波長域というものは、今、どのような状況にきているのか。そろそろ緑の半導体レーザーが市場投入されるところまで来ているか。

中野義昭：ほかの色、特に窒化物だと青や紫に比べると難しいことに変わりはないが、技術は進んでいる。純粋な緑色の研究発表があったあと、製品開発に向けてやっているの、少し水面下に潜っているという状況かと思う。

辻伸二：純粋の緑は、557nm くらいなので、その領域にはまだ到達していない。今は 530nm 程度のところが実現されていて、それについては製品化が済んでいる。しかし、演色性などということを考えると波長が短か過ぎるので、その辺が今後の課題となっている。それから、「照明」を考えると黄色い光がほしいと言われている。それも今後の課題である。「グリーンギャップ」から「イエローギャップ」というように考えてよいかと思う。

馬場寿夫：このⅡ・Ⅵ（ニロク）のイエローはいかがか。

辻伸二：否定するのは難しいが、「信頼性」という部分が最大の課題で、ナイトライド系やほかのもっと安定した材料で実現していくというのが大事であろう。

荒川泰彦：常々、高出力レーザーに一番向いているのは量子効率が本質的に高いということから半導体レーザーだろうと考えている。今は、出力はどれくらいか。

中野義昭：ディスプレイ用ではなくて、加工用という意味では、10kW を超えて 100kW に向かっているという状況かと思う。ただ、これは単一出しているということではなくて、例えば、WDM で集めるということで、集合としての出力である。単一のレーザーだと数十 W くらいではないか。それをたくさん集めて、100kW に向けて進歩している。

荒川泰彦：今、ファイバーレーザーの最高値はどれくらいか。

中野義昭：ファイバーレーザーは 100kW 当たりであろう。ファイバーレーザーのエネルギー源は、実は半導体レーザーである。従来は半導体レーザーをポンプ光にして、その光を全部ファイバーレーザーに集めて出力を上げていたが、もうファイバーレーザーに集めるのではなくて半導体レーザーの光自体を集めて、直接加工するという方向に変わっていると聞いている。この分野も日本は非常に遅れている。加工分野はなぜ日本で育たなかったのかがよくわからないが、やはりある種の成功モデルに浸っている間に海外のベンチャーに追い抜かれたのではないか。日本の会社が成功ストーリーに囚われている間に海外のベンチャーが抜き去っていくという形で、すべてやられているのではないか。

川合知二：光産業の中でも「これが弱くなっていくだろう」というものと、それから逆に「まだまだ伸びる」というものを、第1分科から第8分科までまとめると、どのような感じになるのか。

中野義昭：「シーズ」はとても良いものがある。それが、まとめてもらった世界との関係の仮説の中の「コンポーネントレベルでは頑張っているところもある」というところに反映

されている。「無機材料」もいろいろな展開ができる材料技術、デバイス技術は良いものがたくさんあって、まだ宝がたくさん埋まっているし、「有機材料」もこれから伸び代がすごくあり、いろいろな材料が試せて、日本が得意としているのではないかと思う。「光通信」には課題がある。もともと、NTTは国内だけを見ていれば良かったからかもしれないが、通信機器メーカーは海外勢との事業競争で劣勢のように見える。「光ディスク」は、民生ではブルーレイの先があまり見通せなく、ハードディスクにはできない領域を狙ってはいるが、ブルーレイを目指したときほどの勢いはない。「光情報処理」もボチボチ続けているが、これから伸びると言うより、まだ水平飛行をするのではないか。「ディスプレイ」は本当に厳しくなってきたり、今朝の新聞にも「篠田プラズマ株式会社が事業を辞める」ということが出ていたが、テレビ事業としてはかなり苦しい状況にある（パネル部品としては売れている）。「入出力」はもうほとんどソフトウェア化している。「加工・計測・メディカル」は、どちらかと言うとニッチな領域なので、海外のベンチャーのほうが強い。日本の多くの大企業はそのようなニッチな部分はあまり扱っていないので、ここも産業的には後れを取っている状況かと思う。「太陽光発電」も、技術的には良いものをたくさん持っているが、ビジネスとしては必ずしもうまくいっていない。

川合知二：資料（図 1-2）で、「入出力とディスプレイが落ちている」とあるのは、ディスプレイは「コスト競争で負けた」、「入出力」はそもそも「必要がなくなって落ちた」、「太陽光」はとにかく需要だけはあるが気を付けないと「ディスプレイ」のように「ドンと落ちる可能性もある」、ということでしょうか。

中野義昭：「入出力」は恐らく必要なデバイスというものが集約されて、本当はコモディティ生産の一番良いところだが、コモディティになってしまったところはみな海外に出ていってしまったということであろう。「太陽光」は今はフィードインタリフ（Feed-in Tariff、固定価格買い取り制度）でブームになってはいるが、それはサステナブルではないので、世界的に見れば明らかに供給過剰になった状況である。

3.2 ナノ材料と集積フォトニクスの融合による革新的光技術の創成 加藤 雄一郎（東京大学）

今日は、「ナノ材料と集積フォトニクスを組み合わせればすごいことができるのではないか」というテーマでお話したい。最初に、光と相性の良いナノ材料にはどのようなものがあるのか、次に、微細加工技術がとても進化して、いろいろな構造が作れるようになってきている。そして、実際にこのようなものを組み合わせて何かをやってみた例を、いくつか紹介する。

最初に、「なぜその二つを組み合わせるのか」というビッグピクチャーから入りたい。光科学技術はこの先どうなるか。

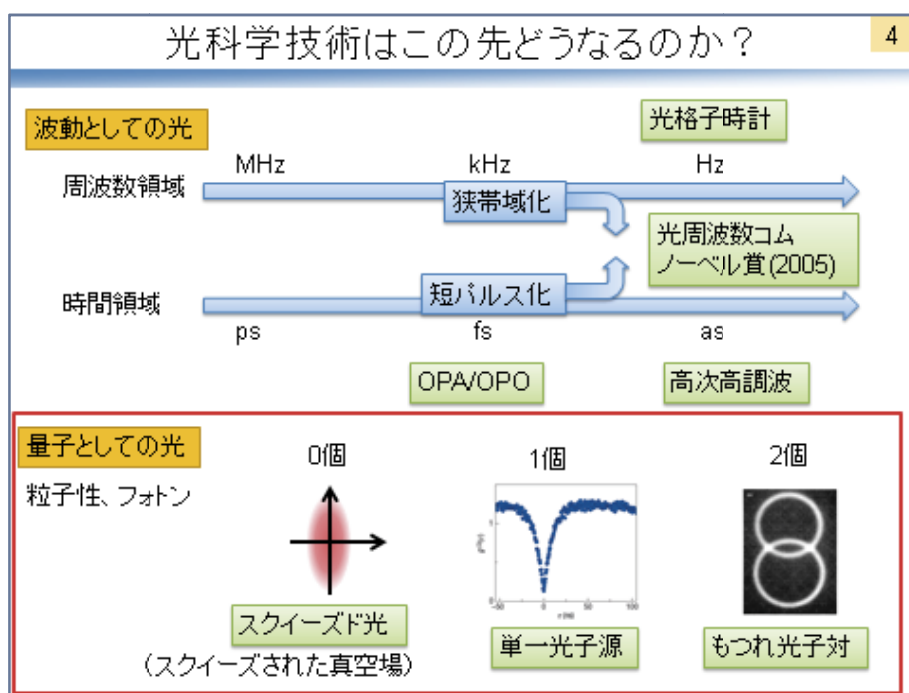


図 3-2-1

「波動としての光」というのは大昔から知られていて、これをコントロールするために二つの大きな潮流があった。まずひとつは「周波数領域」で光をコントロールすること。つまり CW で精密に制御する。これを MHz (メガヘルツ) の線幅から KHz (キロヘルツ)、あるいは H (ヘルツ) といった線幅にどんどん狭帯域化が進んで、周波数という意味では素晴らしい波が作れるようになってきた。そういうものを使って、例えば光格子時計などの技術も進んできている。一方で、逆に、「時間領域」でできるだけ短いパルスをつくるという流れもあって、短いパルスを作ることによって電場が強くなるので、非線形性が見られるようになり、OPA/OPO というような技術や、最近だと高次高調波、そして非常に画期的だったのが「狭帯域かつ短パルス」という二つを組み合わせた光周波数コムの出現であり、波としての光というのは極めて厳密に制御できる技術レベルに達している。

一方で、光というのは量子力学的に波であると同時に粒子でもあって、こちらのほうの技術はそこに比べると遅れている。例えば、真空場があってスクイーミングすることによって量子力学的な性質が出てくる。あるいは、1粒だけ光を出す、2粒の光が量子力学的にもつれているといった特殊な光、量子としての光、こういうものを制御する技術はあまり開発されていない。個人的には、こういう光がレーザーダイオードくらいに日常的に使えるようになれば、何かイノベーションが起こるのではないかというイメージを持っている。粒々としての光を扱うので、自然と光るものとしてナノ材料を使う。これを1個1個使うわけではなく、チップ上で何らかの形でコントロールできる光構造と組み合わせて使う形になるだろうと思う。

光るナノ材料というのはどのようなものがあるか。歴史はそれなりにあり、私が学生の頃にもっとも流行っていたのは、直接半導体でよく光る材料を小さくした自己組織化量子ドットである。これの素晴らしい点は、基板上にエピタキシャル成長でつくれて、その上にゲート電圧、電極を付け電界で制御でき、また、単一光子の発生もできる。また、ナノワイヤももの凄く流行っていた。ナノワイヤの良いところは、長いので電極を付けるのが簡単であり、pn接合を作ってここから光を出すというような研究がある。

最近流行っている研究は、結晶中の単一欠陥である。特に有名なのはダイヤモンド中の窒素-空孔色中心（NV センター）である。結晶格子中のひとつの欠陥が固体中に固定して動かないような、原子のような特性を示す単一光子源になっており、スピンを量子ビットとして使うような研究がなされている。スピンの歳差運動の観測がもの凄く信頼性良く、何回も量子操作ができるというような実験がある。最近、新たに出てきたのは、例えばシリコンカーバイドでも似たような欠陥があるとの報告があり、同じようなワイドバンドギャップのガリウムナイトライドでも同様な欠陥がないかという研究も進められている。

私自身はナノカーボン、カーボンナノチューブの研究をやっている。半導体のナノ構造、ナノワイヤだと「全く同じものを原子レベルでつくれ」と言われても難しいが、ナノチューブだとラマンピークが巻き方のひとつひとつに対応しているので、1本だけ計ると1個だけピークが出る。同じところにピークが出るものは、原子レベルで同じ構造を持っている。カーボンナノチューブではそのような構造の再現性がある。

もちろんグラフェンもあるし、特に最近出てきたのが遷移金属ダイカルコゲナイドの単原子層があり、これの面白いところは光の偏光を使ってバレーの自由度を制御できる可能性があることであり、今年になって報告されている。非常に新しい材料で注目している。

次は微小共振器の話をする。微小共振器にもいろいろある。Fabry-perot 型のものをピラーにして閉じ込めるもの、マイクロディスク、リング共振器、マイクロトroid、フォトリック結晶共振器などがある。ナノテクノロジーが進歩して、シリコン基板上、あるいは半導体基板上にこのような構造を上手につくれるようになった。光を本当に小さな領域で、精密に制御するために必要な微細加工技術がすでに手に入っている。

フォトリック結晶は光を閉じ込めるだけではなく分散関係もいじれるので、スローライトや、逆に位相速度がとても速いものをつくれ、かなり研究されている。その他に面白いと思っているものは、プラズモニクスである。いろいろな金属の構造を使って電場を局所

的に増強できる。メタマテリアルもある。いろいろな形の構造を使って、例えば負の屈折率や変な円二色性だとか、ちょっと不思議な光の特性を出す。これも全部、基板上に微細加工でつくるものなので、こういうものとナノ材料とを上手に組み合わせたら何か面白いことができるのではないかと考えている。

それでは、ナノ材料と光構造を組み合わせたら、具体的にどのようなものができるのかという事例をいくつか紹介したい。ひとつ目はもっともよく研究されている半導体の自己組織化量子ドットとフォトニック結晶共振器の組み合わせである。

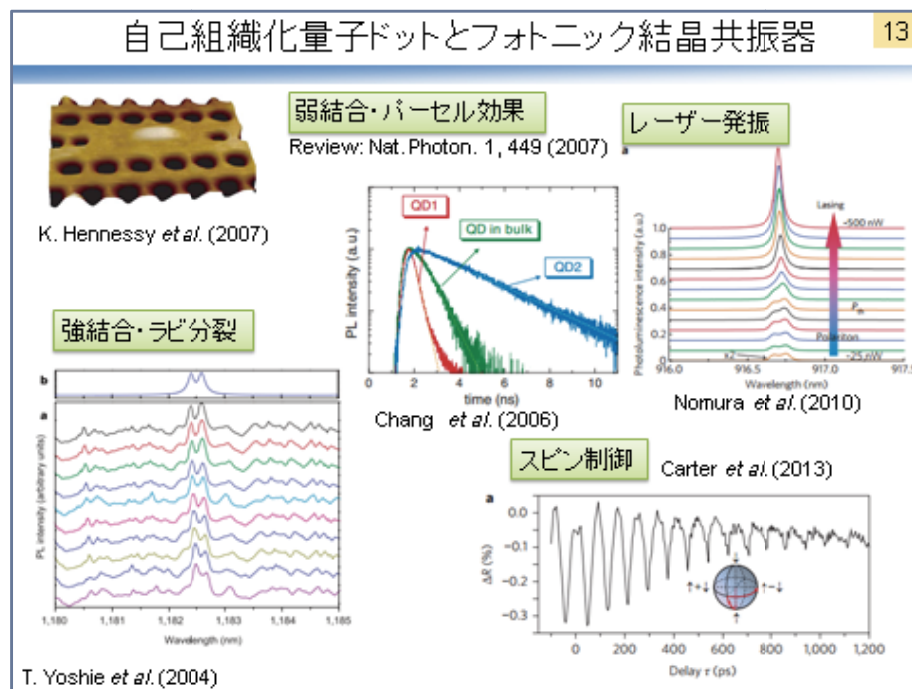


図 3-2-2

フォトニック結晶共振器のど真ん中のところに量子ドットがあり、その共鳴波長がぴったり合うと面白いことが起きる。まずは、結合がそんなに強くなくても量子ドットが発光する緩和時間を変えることができる。光の状態密度をここに集めて、レーザー発振しやすくなる。この結合がもっと強くなるともっと変なことが起きる。図 3-2-2 の左下の図でピークが二つに分裂しているが、これは真空ラビ分裂と呼ばれていて、光と量子ドット中にある励起子が半分半分混ざったような状態になっている。光と物質がひとつになって区別がつかないような状態ができている。さらには、ひとつの量子ドットでレーザー発振をしたり、最近はこのように結合させることによって、量子ドットの中のスピン制御を光を使って効率良くできるというような論文も出ている。

もうひとつはダイヤモンド NV 中心と微小共振器の組み合わせである。

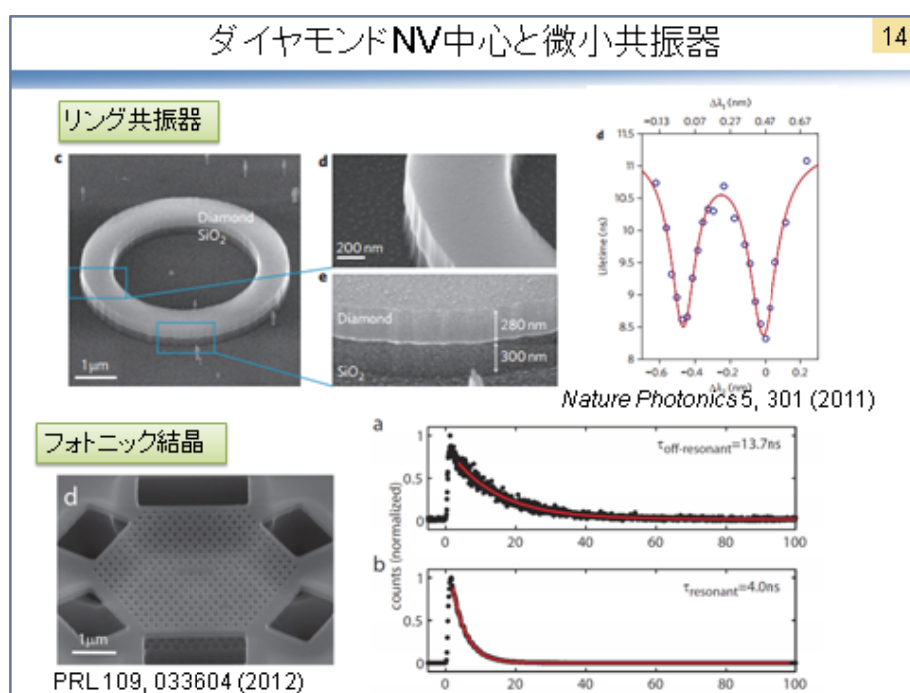


図 3-2-3

CVD でつくったダイヤモンドを頑張って削るとリングの形に加工することができる。ダイヤモンドは屈折率が高いので、非常に良い共振器になり、ダイヤモンド NV センターのパーセル効果（弱結合の効果）で発光するのに掛かる時間が短くなるという現象が見えている。これをつくるのだけでも大変だが、フォトニック結晶までつくってしまっている。

最後に、自分の仕事の宣伝にもなるが、私はカーボンナノチューブとシリコンフォトンクスの組み合わせを研究していて、フォトニック結晶によってナノチューブの発光を増やしたり、1本のナノチューブと共振器を結合させることが最近はどうもいくようになってきている。

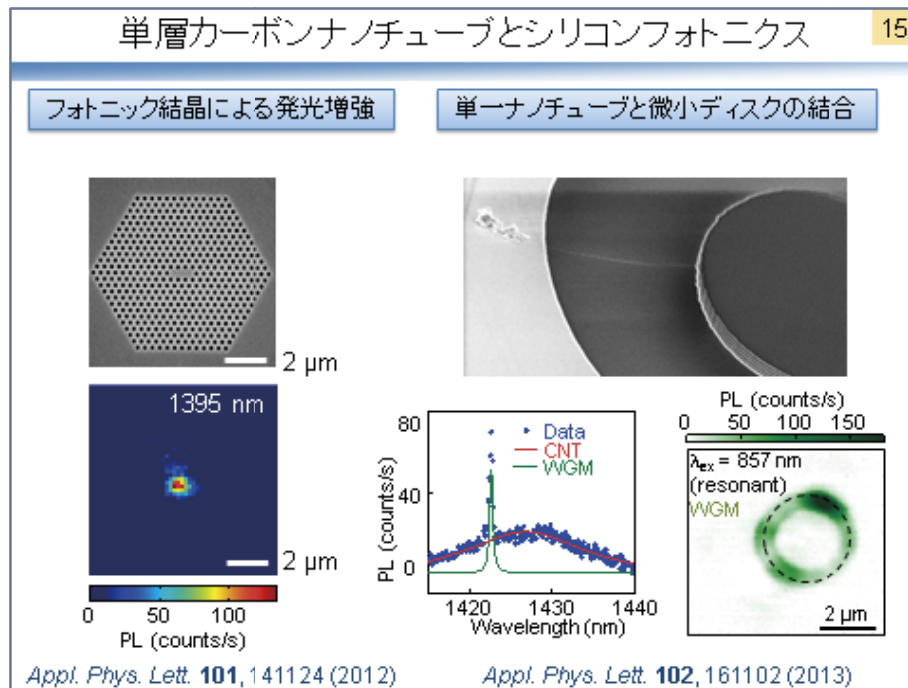


図 3-2-4

ナノ材料と光構造を組み合わせ、「小さい領域で弱い光を操る技術」なので、場合によってはこういった従来の波動としての光を、より小さい領域で制御できる。そういったところに結び付いていく技術も、こういった研究をすれば出てくるのではないかと考えている。

日本が世界一になるためにはどうしたらよいかということを考えてきた。これは、光だけではなく、おそらくいろいろな分野に共通する。まず、日本は若手研究者を活用しきっていないということがある。アメリカで同期の学生だった人たちは、皆、研究室を主催していて、自分のアイデアで思い思いの研究を進めている。日本にもそういう人は結構いるのだが、独立して自分一人でやる人はあまりいない。「何か新しいことをやってみよう」、「思い付いたことを無鉄砲にやってみよう」ということができる環境が用意されていない。若い者の特権をフルに活用しないといけな。もうひとつは、「でかいボス」にぶら下がっているような人と、1人で頑張っている人とを区別しないで、同じ条件でお金を渡すというのはあまり賢いことではない。1人で頑張っている人をもう少し応援してほしい。

では、なぜ、1人になるのは難しいのか。なぜ新しいことにチャレンジする能力や挑戦心が出てこないのか。日本はコツコツ型の研究者がやはり多い。「ちょっとそれは自分の専門ではないのでわからない」という人が多いが、アメリカなら自分の専門でなくてよくわからないことだったら、「教えてくれ」とすぐに言う。そういう「新しいことを知りたい」という熱意を持った人というのはとても少ない。良くないのは、おそらく博士号をとったあとも、ずっと同じことを続けている人が多いことだろう。能力がある人だったら、日本でそのようなことができないのであれば、いっそのことアメリカに送り込んだらどうか。例えば、最初の1年はアメリカのお金で雇ってもらい、2年目は日本が出すようにする。そうすれば向こうも真剣にその人が使えるかどうかを判断してくれ、そこで研究能力が十分かどうかのフィルターが掛かると思う。

なぜ、博士号をとったあとにも同じことをやっているのかというと、実質的に博士課程が終わっていないのに博士号をあげてしまっているというケースが多い。これが一番の問題である。奨学金が切れるから、学振が今年までだからとの理由で卒業させてしまう。就職が決まったから卒業させてしまう。卒業させて、ポスドクとして雇うくらいなら、学生のままきちんとトレーニングし、実力をきっちり付けさせて、そのあとに新しいことに挑戦させるべきである。ポスドクで違う分野の人を採るというのは、異分野の融合、共同研究などをすれば良いのではないかと思うかもしれないが、共同研究の相手のところに行って「ちょっと教えてくれ」と言うのと、自分がポスドクとしてそこに乗り込んで本気でその技術を学び取ろうとするのとでは、全然真剣度が違う。ひとつのことをきちんと博士のうちにやらせて、それから違う分野に飛び込ませるということをやらないと、本当の意味の技術の融合、そこから起きるイノベーションというのは起きないと思う。

【質疑応答】

佐藤勝昭：ナノ構造とフォトンという切り口で、「今後発展していくだろう」ということだが、これはかなり前から言われていることではないか。その割に、やっとエンタグルメントも4キュービット(qbit)か5qbitぐらいまでいった程度で、もうひとつ進みが鈍いように思うが、この辺は何か原因があるのか。

加藤雄一郎：今まで使えるシステムとしては、Ⅲ-V族半導体のインジウムヒ素の量子ドットとフォトニック結晶を使う以外になかった。新しいナノ材料、光るナノ材料がかなりいろいろ出てきている。光構造のほうも、量子ドットと組み合わせるためにいろいろな開発がされている。一方で、例えばナノトライド共振器では、原子とカップリングさせたりしており、いろいろ出てきている。だから、「これまでこんなに時間が掛かったじゃないの」という目で見るとは、これまで培ってきた、量子ドットでわかってきた仕組みがたくさんあるのだから、どの組み合わせが理想的かはわからないが、ここにはオポチュニティがたくさんあるのではないかと見てほしい、というのが私のメッセージである。

河田聡：若手予算などというものをつくるから、若手はそれを採らないといけないと思っている。大きい予算を直接取れるような仕組みにして、年齢の若いとか年寄りとかという区別をなしにしたらどうか。年寄りも独立して、1人で論文書く人も、3人で論文書く人も。それと人数でやるかで区別はされるべきかもしれないけども、これも、若手が年寄りではなくて、独立しているか、していないということではないか。

加藤雄一郎：独立しているか、していないかでわけるとするのは、まさにその通りだと思う。ただ、私は若手なのでポジショントークになるが、若くて1人で頑張っている人にエールを送ってほしい。

川合知二：若手か老人か、どちらが発想力があるか、オリジナルかというのを調べた人がいて、その結果、老人のほうが発想力があるということだった。例えば、科学の場合にダーウィンはものすごく遅くやったとか、芸術でもセザンヌという人もすごく年寄りになってから開花した。何が違うかということ、もともと保守的なものを持っている人は年取るとま

すます保守的になるだけであるということである。だから、私も若手研究者を応援するのは賛成だが、日本の学生の場合は若いうちからすごく保守的になってしまっているの、そこを直さないといけないと感じる。

魚崎浩平：ここにいる人は、昔から「変な若手」だった人だと思う。だから、われわれの時代はそんな「若手」粹なんてなかったけれど、大人と一緒に勝つしてお金を取ったりした。私も外国で Ph.D. を取った。その頃の若手に比べて今がどれだけ元気なのかとかいうこともある。だから、「若手の発想力と挑戦力が評価活用されていない」という意味では、アメリカは定年なしである。そういう意味では、日本はアメリカに比べて老人の発想力と挑戦力が評価、活用されてないという言い方もあり得るから、年齢は関係ないのではないかと思う。

加藤雄一郎：私が言いたいのは、私と全く同じ時に卒業したアメリカ人で、今、アシスタント・プロフェッサーをやっている人たちとの比較である。日本の同世代が完全に 1 人で、自分のアイデアで、自分で責任を持って全部研究を進めることができるような状況にあるかという、アメリカでやってきた立場から言うと、物足りない。日本人のポテンシャルはもっとあるはずで、それをフル活用しないのは非常にもったいないと思う。

魚崎浩平：私は反対しているのではなく、「発想力」という意味だと、「案外、老人って発想力がある」というコメントをしたのである。また、アメリカのほうが若い人が独立するシステムがよりはっきりしているので、それはもっと日本も進めたら良いという意味では賛成だ。

3.3 フォトンクスによる情報機器の省電力化と、フォトンクス研究者の異分野参入 高橋 和（大阪府立大学）

私は佐藤勝昭先生が研究総括をされた「さきがけ」、いわゆるナノエレクトロニクスを中心とした革新的デバイスの領域に参加させてもらった。この領域では、フォトンクス研究者というのは、33名中3名のみだった。ところが、半分以上の研究者は、光測定を重要なツールとして利用しており、光技術というのは研究現場においては不可欠なものとなっている。私は他にも関西、関東を中心に若手研究者が集まる異分野融合の会議や五神真先生が代表を務められていた半導体光物性に関する新学術領域研究などにも参加させていただき、100名近いフォトンクス関連の若手研究者と交流してきた経験を元に話をしたい。まず、シリコンフォトンクスを中心とした情報機器の省電力化については、これまでやってきたことを今後も続けたほうが良いという話。次に、フォトンクス研究者が今後どういう異分野に参入していくべきかという話しをする。

最初に、情報機器の話をする。光技術の源とも言える半導体レーザーは、そのほとんどが我が国で開発され、様々な産業を創出してきているが、Ⅲ族とⅤ族の六つの元素だけでほぼできていて、Ⅳ族、特にシリコンというのはレーザーを作るのが困難ということが知られている。もちろんシリコンは半導体産業の中心で、資源量も豊富で安全で、「超」が三つぐらい付く成熟した技術を持っているので、電子だけでなく光もシリコンで制御できればすごいことになると長年考えられてきた。最近は光デバイスとしてもシリコンは有用になってきている。理想のシリコンチップの1つの形態として、図3-3-1に示すように情報処理はトランジスタなどで電気的に行い、情報の伝送の部分は光で行うというのがある。トランジスタが小さくなり過ぎてムーアの法則が破綻するから、新原理のトランジスタを作ろうと良く耳にするが、実はトランジスタが小さくなると、それらを繋ぐ電気配線も小さくしなくてはならないので非常に複雑になる。現在のパソコンなどのシリコンチップでは10層以上の電気配線層がトランジスタの上に作られている。電気配線を使うと電流によるジュール熱発生が不可避なので、今のハイエンドなチップ（LSI）では消費電力の50%強が配線で消費されるということになってきている。光配線を使うと、1本の光配線にさまざまな波長を一度に通せば、原理的には無限に大容量化が可能であるし、平面交差が可能で、立体交差にしなくても良く、基本的には発熱もしないというメリットがある。こういうものを「シリコンフォトンクス」と言っていて、「ムーアの法則」の限界に対抗する上で今のところ一番現実的な技術だろうと考えている。実際に、チップの外側ぐらいまでは光による情報通信がすでに入ってきていて、多くの主要素子が実証済みになっている。シリコンフォトンクスは、チップ間のインターコネクトやデータセンタの基盤だけではなく、科学分析や医療用レーザー、ディスプレイとかにも使えるというようなことも強く期待されていて、幅広い産業展開が可能であるから、世界中の企業でも盛んに研究されている。

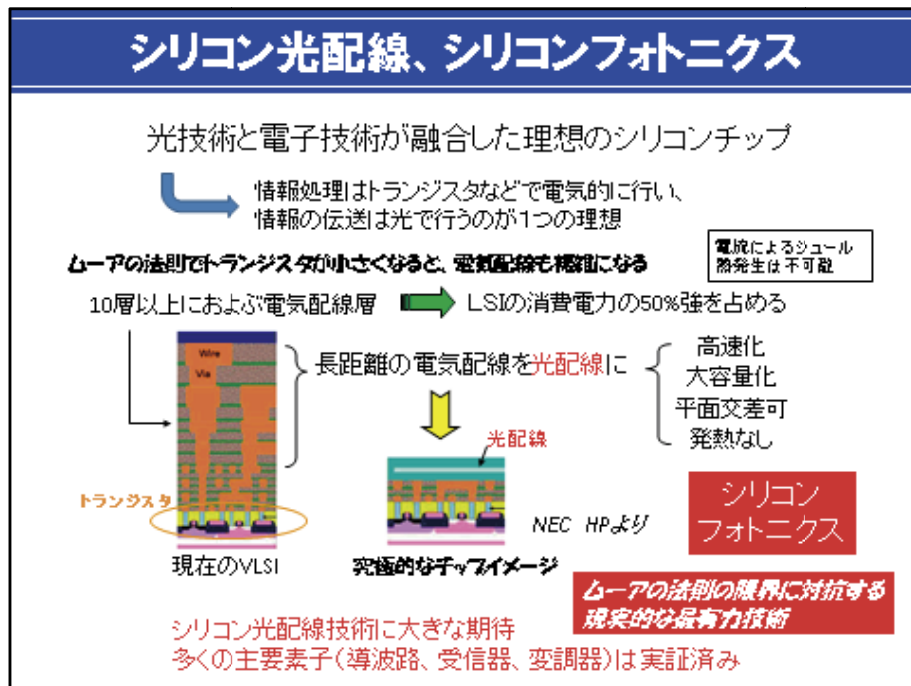


図 3-3-1

実例を挙げると、昨年の暮れ頃に IBM は「工場レベルで光配線を導入したシリコンチップの生産ができた」という発表をしている。つい最近日本でも、図 3-3-2 に示すような富士通の報道資料などがある。ただ、チップの模式図を見ると、CPU であるシリコンチップと、光を送ったり受信したりする部分は分離した形態になっている。PETRA では、だいたい 2020 年頃に今のスパコンを 10 倍以上の低消費電力化、高速化にしようとしている。

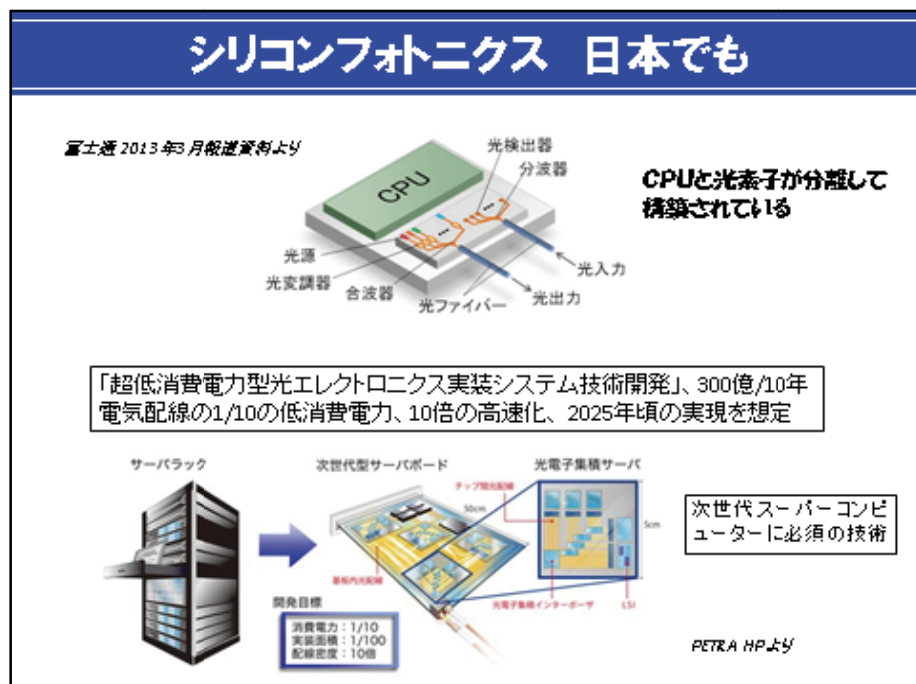


図 3-3-2

シリコンでの光配線を大雑把に考えると、図 3-3-3 のようにレーザー光源から光が出て、それを導波路に通し、分波や合波をして、情報を送るために変調をする。できれば光増幅もして、最後に受光器であるフォトダイオードで光情報を受け取るということになる。

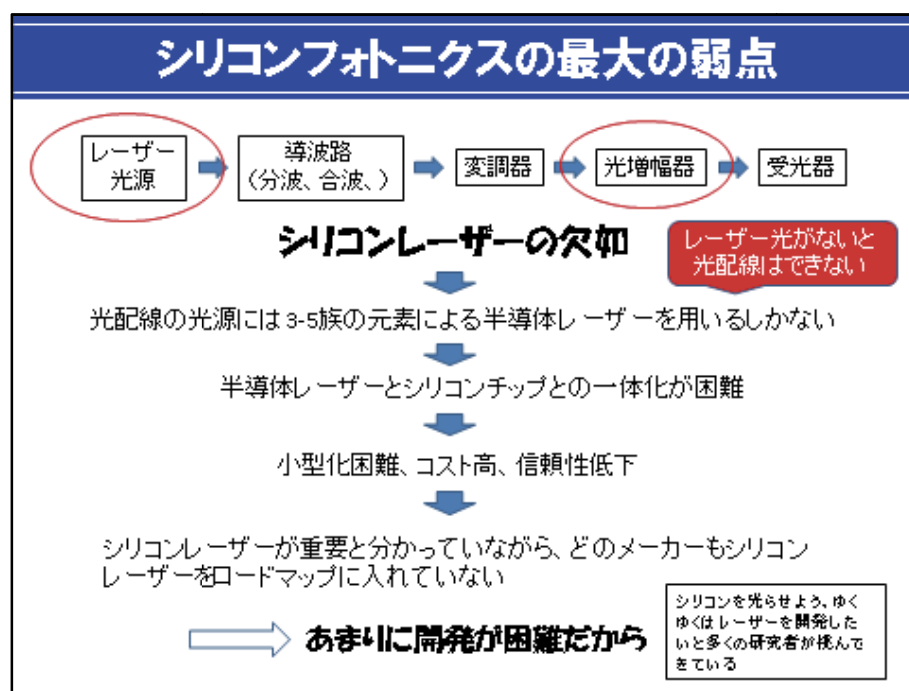


図 3-3-3

レーザー光源と光増幅器の作製がシリコンでは物理的に困難で、特にシリコンのレーザーが欠如していることが大きな問題である。シリコンレーザーが重要だということは、皆分かっているが、どのメーカーも開発は困難であり、今のところロードマップに入っているような雰囲気はない。

シリコンチップ上の光配線技術を大学の 1 研究者が全部やるのは現実的ではないので、大学研究者はどこかの要素技術に特化して、その部分では世界一を目指してやっていくのが重要だろうと思っている。私は「シリコンでレーザーをつくる」というところをやったので、それについて簡単に説明する。

私はシリコンでレーザー発振を起こすために、フォトリソニック結晶ナノ共振器と呼ばれる素子を用いた。これは図 3-3-4 に示すように小さな空気孔が周期的に開いていて、空気孔がないところが光導波路として光ファイバーのような役目をする。空気孔を局所的に抜いたところがナノ共振器になる。ピッチや穴の大きさをちょっと変えれば、閉じ込められる光の波長を変えることが可能である。このナノ共振器を用いると既存の光デバイスよりも小さい光デバイスを作製可能である。たとえば 32 個のナノ共振器を並べると、いわゆる波長多重光通信で必須となっている AWG と似た機能を出せる。既存の AWG と比べると、1 万分の 1 のサイズとか、10 万分の 1 のサイズにできる。

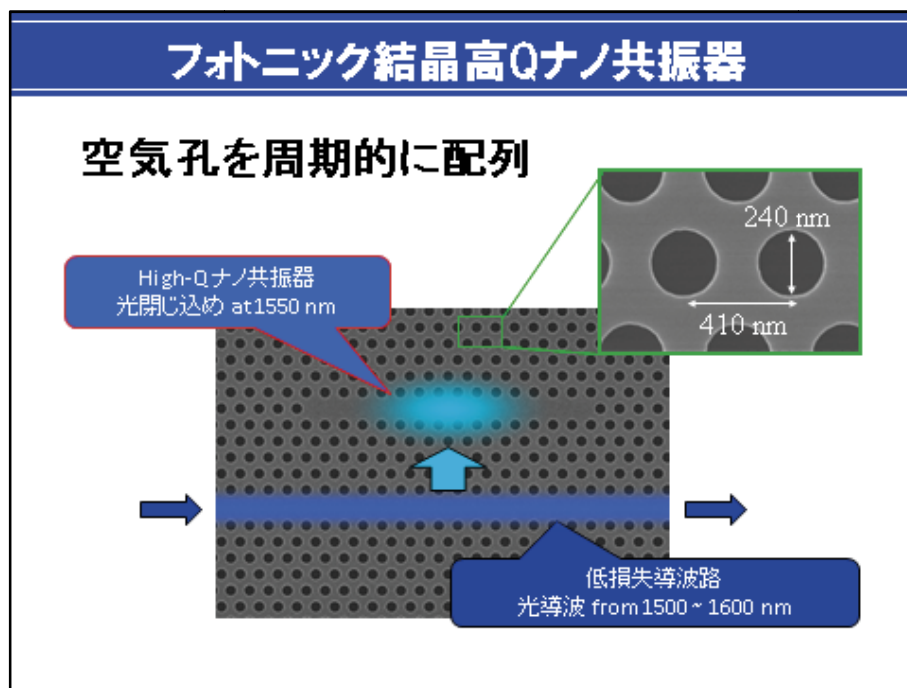


図 3-3-4

私はこのナノ共振器において世界最高の Q 値を京都大学野田研究室との共同研究で達成しており、その技術を生かして、インテル (Intel) が開発したものの 1 万分の 1 のサイズと閾値、つまり 1 万分の 1 の低消費電力を持つシリコンラマンレーザーを作った。インテルが作ったものはシリコンのサイドに $p-i-n$ 構造をつくり、金属なども必要とするが、私が作ったものはただのシリコンに穴を開けただけである。ナノ共振器にレーザー光を入れると、そこでラマンレーザー発振を起こして新しい波長をもったレーザー光が出てくるといふものである。大気中でしかも初めから室温での連続動作を実現した。その開発が可能となったのも、さきがけ研究に採択されたお陰である。今年、『Nature』誌に成果が掲載され、図 3-3-5 のように色々な形で報道され、海外でもかなり詳しく報道された。歩留まり 100% で発振させられるかというところにまだ問題はあがあるが、シリコンで小型レーザーをつくることのできる可能性が出てきて、しかも応用の範囲が格段に広がることになる電流注入シリコンレーザーもつくれる可能性まで出てきたというのは非常に重要なことだと思う。



図 3-3-5

（これらの記事の著作権は朝日新聞、科学新聞、日刊工業新聞、化学工業日報に帰属する。また、記事の掲載は転載許可を受けたものである。）

ここまでの話をまとめると、情報機器の高速化や省電力化というのは、これまでもこれからフォトンクス研究の中心テーマの1つだろうと考えている。光配線に関しては、幅広い技術が必要な分野なので、大学レベルでは、私がやっているようにレーザーに特化するか、変調器に特化するか、フォトダイオードに特化するかという部分でやっていくことが重要だろうと思っている。それらを統合して、集積化を行うことに関する部分はPETRAのような企業連合で担ってもらいたいということだと思う。

個人的には、難しいとはわかってはいるが、産業界のほうから、今は何が問題で、今後10年後に向けてどういうことを大学の若手研究者はやればいいのかということについて、問題点、解決すべき課題などをたとえ結果的に間違っていたとしても構わないので、提起してもらえたら非常にありがたいと思っている。そういう場がとても少ないと感じている。

今後、光配線とか光レーザーチップができなくても、小型の光デバイスの需要というのは非常に強く、自動車とか携帯機器とか製造現場などで、どんどん伸びていくので、産業界にフォトンクス分野の人材を供給していくという意味では、フォトンクス研究を大学でやり続けていくことは大切だと思う。シリコンフォトンクス分野、エレクトロニクス分野全体かもしれないが、大学レベルでの研究の多様性が失われつつあり、個人的に危機感を持っている。アカデミックの面では特に若手研究者の台頭が見られなくなっている気がする。出口イメージを重視する政策（施策）を取っていくというのであれば、シリコンは不可欠な材料だと思う。

もうひとつの話に移る。今から話すフォトンクス研究者とは、私の中の定義では量子力学とか電子物性物理を背景に持つ人を想定している。このフォトンクス分野は実は、手厚い研究支援をこれまで受けてきて、有能な研究者群がすべての年代層に隙間なくいると感じている。日本の1つの特徴で、大きな強みなのではないかと思う。しかし、昨今は国の重点分野が変わってきているので、特に若手のフォトンクス研究者はセンシング、創エネルギー、生命分野などの新領域分野への進出が必須になりつつある。同年代の人と話していても、異分野進出を目指している人が非常に多い。ところが太陽電池関連を除くと、これらの異分野にフォトンクス研究者はあまり参入できていないというのを感じている。対象となるさきがけ研究領域を見ても、フォトンクス研究者は生物系、化学系の研究者に比べてあまり採用されていない。具体例としては、今の「さきがけ」の藻類分野にだって、物理系をバックグラウンドに持つ光の研究者が入っても良いのではないかと、生体の維持領域でも、まさに光、テラヘルツを使って生体機構を解明するとか光を使って制御するということは可能だと思う。実を言うと、アドバイザーの中に、フォトンクス関連の研究者が見当たらないことが多い。私がさきがけに採択された4年前には、4~5つくらいの領域に名前を知っているアドバイザーの先生が1人はいたが、今の領域には名前を知っている先生がいないことがほとんどである。つまり、それくらい現在はフォトンクスが傍流に追いやられているということである。

物理系の研究者がこれから生命系に向かうのはコンピュータなどがどんどん進化してきた現在では自然だと思う。これまでは、材料的に安定な半導体などでしか、きちんとした物理が理解、構築できないというのがあったと思う。

フォトンクス関連のポスドクや若手学生には、ぜひ異分野にいつてもらいたいし、いかなないとダメだろうということは本人達が一番自覚していると思うので、そういう動きを支援してもらえそうな制度が少しでもあったら良いと思う。たとえばフォトンクス研究者に異分野研究に挑戦することを促すようなさきがけ領域があるととても良いと思う。そこに光技術の情報機器に関する研究者や、単一フォトン、ダイヤモンドや新規光材料の人たちといった従来からの重要テーマも混ぜたら、何かいろいろ起きないかと思っている。幹となる専門領域は、やはり固体電子物性とか量子力学で一致した人間を集合させないと、なかなか相乗効果が生まれないなということを佐藤先生のさきがけに参加して感じた。

最後に、今後の産学連携を考えた時に1つ検討していただきたい政策がある。大学で任期付きでない助教や講師、准教授などが、企業にインターンシップに行くような制度である。今後、私も含めて、ますます企業に勤めた経験がない大学研究者が増えるはずで、若手研究者を国費で外国に送り込む事業と同じかそれ以上に有益になるのではと思う。大学における基礎研究と企業での実用化研究への橋渡しがなかなか進まない現状の打破を期待している。

【質疑応答】

中野義昭：1番目のステートメントは、私が言ったことに完璧に反している。要は、今までそうやってきたけど「それで行き詰っている」というメッセージを出したつもりだった。それから、光配線はある程度できるようになっている。だから、これから大々的に大学も入っ

てやっていくという感じでもない。海外での成功というのは、同じことをやるのに、未来の技術でやろうとしているのではない。新しい技術を新しいアプリに繋げていくということで成功する。あなたのやっていることは先物の技術を使って今のニーズを満たそうとしているように見える。若い人たちに期待したいのは、我々が想像できるような出口ではなくて、全然我々が想像できない出口に持っていこうとしていると言ってもらえることである。それが10年後にできるようになったとしても、もうその時にはその産業すらないかもしれない。

高橋和：今のインターコネクトは海外に抑えられているが、チップ内までいければ逆転も可能だと、個人的には思っていた。凄いデバイスをつくったなら、それでベンチャーを作るなり、新しい産業をつくるぐらいの勢いで頑張ってもらいたいという励ましと理解した。

中野義昭：ただ、その目指すところが、例えば「今、こういうのがほしい」と言っているのを、今から一生懸命研究開発して10年後に出しても、そのときには別のものがほしいと言っている可能性が高い、ということを上げている。

橋本武：「産業界から明確に10年先を見越した要望を出してほしい」と言っていたが、絶対に出てこない。産業界で出てくるのは数年先のことで、自分たちが商品にすることは明確になっているが、その先というのは全然明確ではなくて、私たちも先生方と同じように想像している。私も異分野融合と言っているが、技術から一旦離れて、とにかくコンセプトを書いてみようとする。ニーズはこうであって、たぶんこういう世界だろうと考える。そのときに光がいるかどうかは全部抜きにして考えてみて、それで技術をあとから貼り付けていく。それで最終的には、また光が復活したりすることもある。やはり、「ベースとなる光ありき」、「シリコンはありき」はやめたほうがいいのではないかと感じてしまう。それからあまり産業界に期待せずに、一緒に考えてほしいと思う。

荒川泰彦：私は出口イメージ、あるいは出口論から入っていくのが必要であると思う。その観点から、シリコンフォトンクスがなぜ重要かと言うと、ひとつの側面はコンピュータ技術の実現において、電気の配線の限界というのはやはり確実に来るという認識である。その中で光というのが、ひとつのソリューションになるかもしれない。またはその開発の過程において、いろいろなビジネスが発展するかもしれない。そういうことから、今、シリコンフォトンクスの研究開発が、企業、大学において行われていると考えている。それで、大学のスタンスでいうと、産学連携で集積化を一緒にやっていくというのもひとつだが、高橋先生のようにひとつの極限を目指しながらこのように研究をやっていくのも良い。先ほどのストーリーの中で、コンピュータ技術の革新において、あるいは今後の発展を持続的に続けるための光の役割をエンハンスするデバイスとして役に立つかもしれないという、そういう視点で研究するというのも、ひとつの大学としてのやり方ではないかと思う。

いわゆる集積化、あるいはそのリニアな研究開発と、あるいはロードマップ的な研究開発に加えて、一方である種、革新技術のいろいろなメニューを揃えておくことも重要ではないかと思う。そのメニューのどれを拾うかというのは、それは使う側の、あるいは出口を目指した研究者、あるいは開発者、あるいはそのビジネスの人たちが決めることである。そういうことも基礎研究の役割のひとつではないかと考えている。そういう意味で、先ほどから先生方がおっしゃっている「出口からの視点」というのは大変重要だと私は思っている。

中野義昭：「出口からの視点が重要だ」と言ったつもりでなく「今の出口に囚われるな」ということを言った。

河田聡：シリコンのラマンレーザーをフォトニック結晶で実現したのは、すごく素晴らしい。順番としては、シリコンでラマンレーザーというニーズがあった。それから、フォトニック結晶でラマンレーザー発振したいというのもすでにあって、二つをうまくベストコンビネーションしたと思うのだが、技術論の話ではなくて発想はどちらが先だったのか。

高橋和：まずインテル(Intel)のリブ型細線導波路を用いたシリコンラマンレーザーが 2005 年ごろ実現して大きなニュースとなった。ただ、それがしきい値が大きすぎて、素子サイズも大きくて全然使い物にならなかった。しきい値を下げるとなると、もう微小共振器で光と物質の相互作用を高めるしかない。ちょうどそのころにナノ共振器の Q 値が 100 万ぐらいになって注目が増しており、インテルのレーザーの報告のあとすぐに理論研究者から「フォトニック結晶を使ったらいいのではないか」という提案が出た。このアイディア自体は誰でも思いつくことで、フォトニック結晶だけでなく、リング共振器など様々な構造でトライしようという話は 2008 年位までは国際会議で頻繁に聞いた。ただ、そのあとは実際にレーザー発振が可能となるような構造は誰も思いつかないし、サンプルを作ったとか実験してみたとかいう報告が全く出てこなかったという状況だった。

3.4 メソスケール分子材料による有機光エレクトロニクス

中山 健一（山形大学）

私は、有機エレクトロニクス分野、その中でも材料や合成ではなくてデバイスが専門である。どちらかという「使う側」の立場から、今後ブレイクスルーをもたらすためにどうするかという話をする。

山形大学では、大学を挙げて当該分野に取り組んでおり、2年半前に有機エレクトロニクス研究センターを設立した。「なぜ有機でやる必要があるのか、有機じゃないとダメなのか」ということを何千回、何万回と自問自答するが、やはり最終的に行きつく先は、「フレキシブル」と「プリンタブル」という二つの生命線である。その本質は、有機材料が基本的にはファンデルワールス固体であり、非常に相互作用が弱い固体なので、低温で成膜できることからフレキシブル基板が使える、また、溶液に溶けるからプリンタブルにもできる。10年前には、「将来的にはそういうことができる」という絵に描いた餅だったが、幸いここ数年の間にそれがかなり目に見える形で「実証」されるようになってきた。

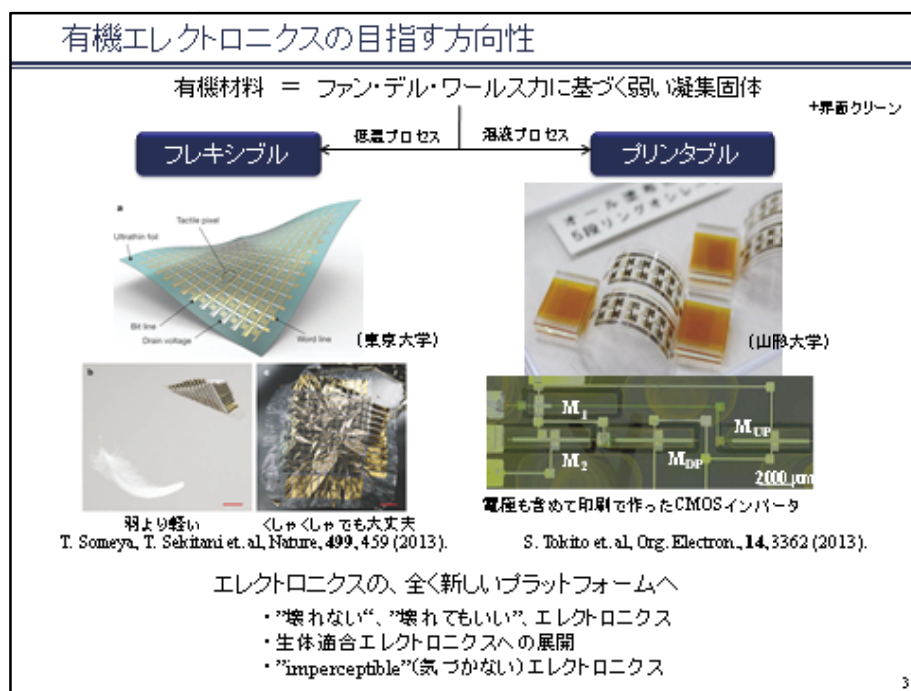


図 3-4-1

山形大学では、NHK 技研から移られた時任先生がオール・プリンティッドで回路をつくる研究を精力的にやっている。東大の染谷先生、関谷先生のグループでは、フレキシブルをさらに通り越して、「くしゃくしゃとやっても大丈夫」というエレクトロニクスを研究されており、鳥の羽根よりも軽い、一緒に落とすとこちらのほうが遅く落ちるというデモをされている。

エレクトロニクスの新しいプラットフォーム、「壊れない」、あるいは「安いから壊れてもいい」エレクトロニクス、あるいは「体の中に入れても大丈夫」なエレクトロニクスを

目指している。染谷先生のところでもインパーセプティブル（Imperceptible、感知できない）という言葉が使われている。絆創膏やシールのように体に貼り付けても気付かない、あるいはその辺の包装紙に電子回路が入っているというものを指す、というのがこの分野のイメージである。

具体的なターゲットとしては、いわゆる「OLED」と「OTFT トランジスタ」と「OPV 太陽電池」という三つがある。

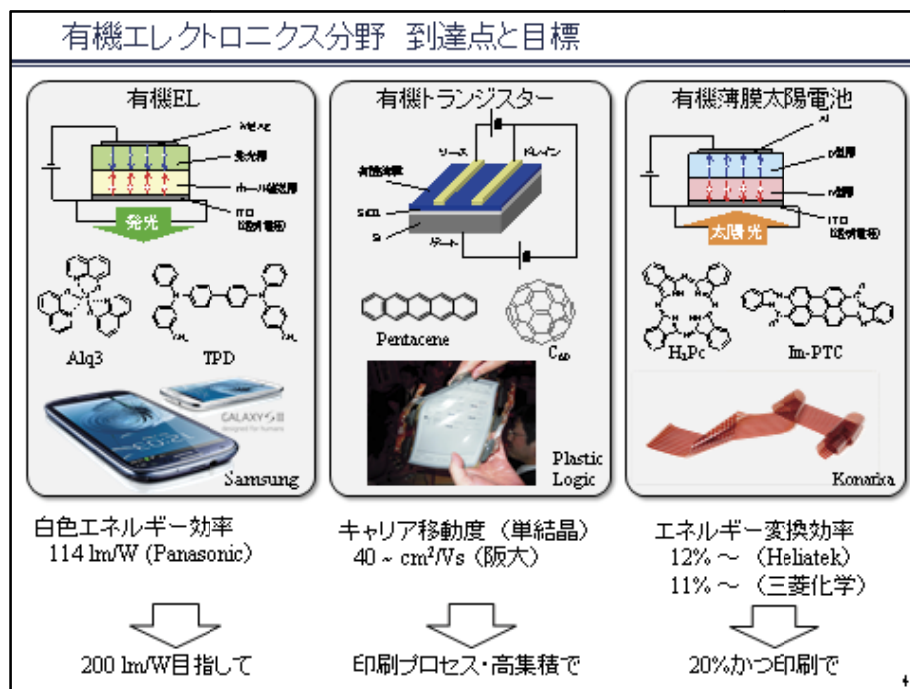


図 3-4-2

現状の到達点としては、OLED はディスプレイと照明という二つの大きなターゲットがあり、照明ではパナソニックが 114lm/W（ルーメン/ワット）を SID（The Society for Information Display、ディスプレイ関連最大の学会）で出している。蛍光灯で 80 から 100lm/W ぐらいなので、コスト、耐久性は度外視すれば、同等なところまで来ている。TFT に関しては、移動度 40cm²/Vs を東大の竹谷先生のところが少し前に出されている。これは単結晶であり、現実的なプロセスとしてはまだそこまではいかない。OPV では効率 11 ~ 12% という値が今年報告されている。これも 10 年前からすると夢のような値であり、急速に発展している。さらにブレイクスルーという意味では、例えば 200lm/W、印刷で IGZO 並かそれ以上の移動度、高集積で大面積化、あるいは印刷の太陽電池で効率 20% というようなところを目指して模索している。

これまで、有機エレクトロニクス分野におけるブレイクスルーは新材料、すなわち新しい分子の合成そのものでもたらされることが多かったが、最近ではいろいろな分子が合成されてやや飽和しているという感じがある。実際にデバイスを研究している立場としては、薄膜の中の秩序構造の制御が次のブレイクスルーには非常に重要だと感じる。EL、ラン

ジスタ、太陽電池、三つを比較すると、分子の中の薄膜の中の秩序という意味では全然違う状況にある。

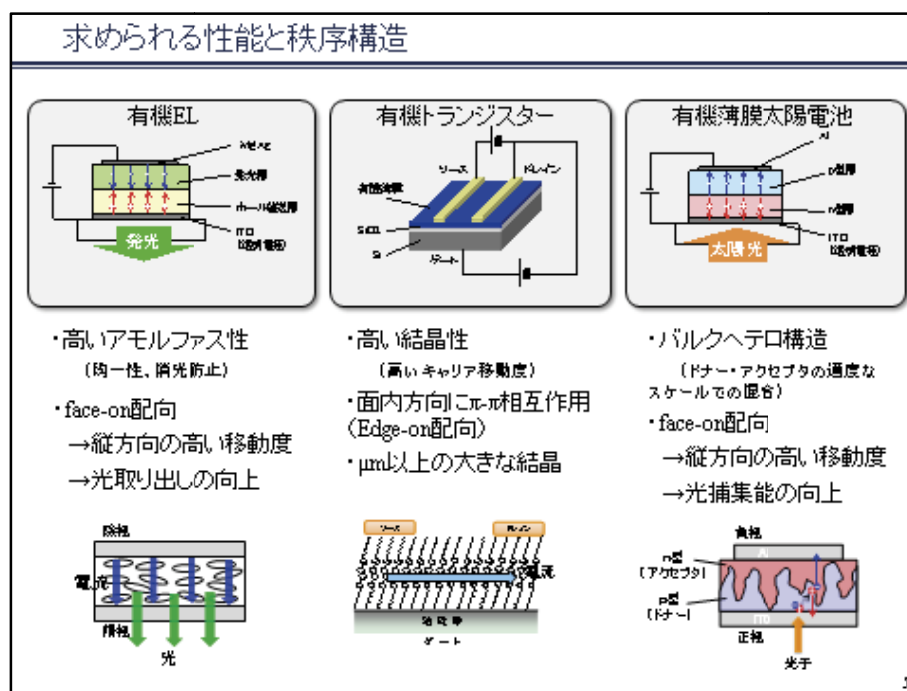


図 3-4-3

EL は非常に高いアモルファス性の膜が必要とされる。トランジスタは電子の移動度を上げるために結晶性の高い膜が必要になる。太陽電池はバルクヘテロという非常に奇妙で複雑な n 型と p 型がごちゃ混ぜになった膜構造が良いと言われている。よって、分子配列、あるいはそれよりももう少し大きな領域の構造を「意図的に制御」することこそが今後のブレイクスルーに繋がっていくと考えており、これを提案したい。

EL の場合は光取り出しのために分子が face-on 配向している方が有利であり、太陽電池の場合も光捕集のために face-on 配向が良く、トランジスタの場合はチャネル方向の移動度向上のために立っている方 (edge-on 配向) が良い。さらに、太陽電池の場合にはその中で相分離構造を制御する必要がある。現段階では、それぞれある種の経験に基づいてやっているが、そこを学問的にきちんと確立できないかということで、「メソスケール分子材料による有機光エレクトロニクス」というタイトルを付けた。

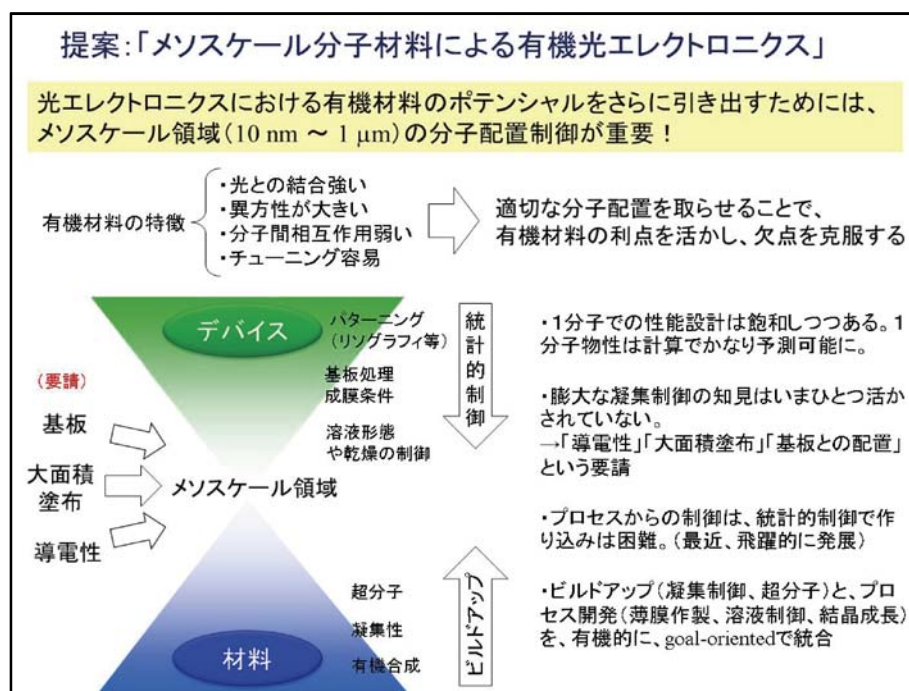


図 3-4-4

具体的には、X線に掛からないような領域である10 nm (ナノ) から1 μm (ミクロン) ぐらいの、AFMなどでしか見られないような領域の秩序をきちんと作り込んでやる。一般的にπ共役系の有機材料は、光との相互作用という意味では非常に面白い材料である。光との結合が強くて異方性が大きく、チューニングが容易である。これを適切な分子配置、空間的に配置させることができれば、「電気が流れにくい」という大きな欠点も克服できる。必要なのは、材料分子を作る人(ボトムアップ視点)とデバイス・プロセスの人(トップダウン視点)が本当の意味で協力し、技術を融合して進む必要がある。「分子を並べる」ということは有機合成、有機化学の世界では、液晶、自己組織化、超分子などいろいろな手法が多く研究されているが、デバイスの立場ではあまり活かされていない。その理由は、デバイスとしての出口を指向した形になっておらず、「その形ができて良かった」というレベルに留まっているところにある。電気を流すためにはリジット(剛直)で凝集性が強いπ電子系骨格が必要になることから、大方の自己組織化の話はうまくいなくなる。本当に役に立つためには、大面積に塗布プロセスで印刷してもできる秩序構造が必要であり、

また、「基板との相対的な配置」というところでも、ボトムアップやビルドアップでは難しいところがある。トップダウンで考えると、今できるのは基板処理と溶液の条件とかになってしまいが、最近では溶液の形態制御とか乾燥プロセス、結晶成長の制御というところに踏み込んでいる。よって、両方の視点の学問分野を融合して、本当に欲しい分子の秩序構造を作っていくような研究を真剣にやる必要があるという提案をしたい。

具体的に最近議論されているものとしては、例えばOLEDの世界では、「OLED最後のフロンティア」と呼ばれている光の取り出し問題がある。アモルファス膜だと四方八方に光が出てしまい、全反射して外に出てこない成分がかなり多くある。そのため、きれいに

分子を **face-on** に並べて正面から発光させれば、光取り出し効率も上がるし、電気特性も上がるだろうと言われている。

トランジスタに関しては、基板方向（面内方向）にきれいな結晶をつくるということが重要である。私がやった縦型トランジスタでは、逆に膜厚方向に流す必要がある。結晶はできるが、それを大きなドメインにするのはそう簡単ではない。例えば、産総研の長谷川先生のところでは、ダブルショットインクジェット法という手法を開発している。溶液から析出するところで貧溶媒を入れ、それをトリガーにして結晶成長させることで、溶液印刷プロセスなのに非常にきれいな単結晶を作れる。**FET** で移動度 $16\text{cm}^2/\text{Vs}$ ぐらいの値が出されている。

FET は光とは直接関係ないと思われるが、有機レーザーという大きなターゲットがある。これは有機エレクトロニクス分野の積年の夢であり、この **FET** 構造でホールと電子を注入して発光させる。早稲田の竹延先生がかなり良いスペクトルナローイングの観測をされている。

太陽電池はバルクヘテロ構造を持つ、ぐちゃぐちゃに混ざっていてその絶妙の混ざり具合が良いというダーティな系であり、この構造を制御するのが性能向上の主なターゲットになっており、膨大な数の研究論文が発表されている。材料そのものや、アニーリング、添加剤、溶媒などいろいろなものを制御して、相分離構造を制御するという研究がたくさんある。この相分離のターゲットは数十 **nm** ぐらいであり、光吸収によって生成した励起子の拡散長オーダーのものを作りたいという話になっている。最近では、三菱化学、あるいは東大の松尾先生のところでは前駆体法で溶液塗布から結晶化させる方法で、**p** 型と **n** 型半導体の入れ子構造を作っている。また、広島大から理研に移られた瀧宮先生のところでは、高分子の分子構造そのものをいじることで、**face-on** 配向、太陽電池に有利な方向に並べるという研究をされている。

最後に、われわれが **CREST**（研究代表者は奈良先端大の山田容子先生）でやっている太陽電池の話をする。千葉大の矢貝先生は超分子が専門であり、超分子を使ってきれいなナノロッド構造を作っている。超分子構造を実際にデバイスに使うと特性が良くなったという例は非常に少ない。分子うまく並べるために必要な置換基の部分が電氣的には邪魔をするが、それをうまく剥いで電気が流れる部分を表面に出すことで、太陽電池の性能が飛躍的に向上することを見つけている。このようなボトムアップ、ビルドアップで分子から積み上げる手法とともに、融合液の制御、プロセスの制御、溶液、流体力学的な制御、非平衡熱力学的な制御により、この中間領域の構造を制御したい。これができれば飛躍的に性能が向上できると考えている。

【質疑応答】

荒川泰彦：有機レーザーは前から非常に大きな課題だったと思うが、光ポンピングはうまくいっているということか。これは何らかのメカニズムの解明、新しい発展というのがあった上で、こういう結果が出てきたと理解してよいか。それとも単に材料の品質の向上という程度の話なのか。

中山健一：最近の傾向としては、発光 **FET** 構造を使うのが主流になっている。電極での消

光を防ぐために、電極から遠いところで発光させるというのが目的である。それ以前のアプローチでは、有機 EL の延長上で何とかレーザー発振をさせようとしたが、電極で消光するのにどうしても勝てなかった。有機の場合でも FET のチャンネルのところは数分子層に電流が集中するので、電流密度としてはものすごい値になる。そのため、そこで光らせれば反転分布を作れるだろうという発想である。あとは、単結晶を使ってたくさん電流を入れること、そして発光効率を上げることがあった。竹延先生の発表のポイントは、この結晶を 2 枚貼り付けて、光を中に閉じ込めることをやったことにある。

佐藤勝昭：有機物を使っているものの一番難点はライフタイムだと思うが、基本的にこれを強くしていくという戦略はあるか。

中山健一：寿命が短い理由はいくつかあり、化合物そのものの弱さ、例えば「こういう置換基は寿命が短い」というのはある。このため、非常に丈夫であり化学反応しない材料を使えば、少なくとも封止下においては、十分な耐久性はある。ただし、大気下となるとかなりハードルは上がる。一般に EL が一番大気に敏感で一番耐久性を出にくい素子なので、NHK 技研さんが発表されているぐらいの耐久性が大気下で出ているというのは、非常にポジティブな流れなのではないかと思う。

佐藤勝昭：太陽電池のほうでも同じ問題がある。もうひとつは、OPV で電流の変換効率は良くなっていると思うが、電圧を上げるという戦略はあるか。

中山健一：今は 1 ボルトぐらいであるが、それは低いとみるか。先ほど紹介した 10% ぐらいの性能が出ている系は、だいたい 1 ボルト弱ぐらいの開放端電圧と十数 mA/cm^2 ぐらいの J_{sc} が出ている。

佐藤勝昭：先ほど「20%を目指す」と言っていたが、その戦略がもうひとつ見えない。

中山健一：有機太陽電池のネックは、光吸収が大きいので、薄い膜で太陽電池は動くが、厚くすると電気特性が非常に悪くなってしまう。有機材料は絶縁的なので、光吸収を稼ぐために厚くすると、性能が逆に激減してしまう。そのトレードオフの中で徐々に改良されてきている。入ってきた光を全部拾えるぐらいに厚くでき、かつ半導体の光の吸収波長範囲を広くすることができれば、20%は言い過ぎかもしれないが、15%ぐらいはいくと考えている。

最近、有機のほうフィルファクター（FF）を上げるのに有利だというような話もあり、80% ぐらいのフィルファクターが出るという話がいくつか出ている。また、タンデム構造もある。これらを合わせて「必ずできる」とはなかなか言いにくい、20%というのはできなくはないと思う。

魚崎浩平：分子をどう並べていくかということだが、ゴールオリエンテッドで統合といっても、結局はやってみなきゃわからないという世界なのか。

中山健一：いろいろな有機化学の方と共同研究をしているが、やはり言語の違いや温度の違いが大きい。「統計的」という言葉をちょっと使ったが、やはり熱力学的なものから集団として制御するという考え方と、ビルドアップの考え方には差が大きい。

魚崎浩平：ビルドアップだと小さいところの話であり、バルクヘテロジャンクションというもう少し大きなスケールのアレンジメントにはなかなかいかないと思う。それを包括的に考えるような、理論的なシミュレーションを含めてそういうアプローチはないのか。

中山健一：それで「メソスケール」という言葉を使わせていただいた。自己組織化をやられている先生方はAFMとかで構造を見てそれで終わりというところが少しある。ナノロッドで良い方向に働いたという意味では新しいが、これを基板に対して立てたい。そういう、次のスケールの構造制御は一筋縄ではいかない。

伊藤正：有機材料の場合、デバイスとしてプリンタブルというのがひとつの大きなキーワードになっていると思うが、それ以外に、分子設計でもって新しい機能を生み出すということがあるが、これから先はどちらで勝負すべきか。

中山健一：一分子の性質という意味では、ある程度出揃ったと思う。もちろん有機化学の先生にはまた違うご意見があると思うが、シミュレーションの技術が非常に発達しており、Gaussianとかで計算して、一分子レベルの性質についてはかなりの精度で予測ができるようになってきた。最近では、二分子間の電子カップリングを計算する方法で、電荷移動度に関しても、かなりわかるようになってきており、一分子の性質からという意味では、多少飽和してきているところにある。したがって、構造の制御のほうは律速になっていると個人的には思う。

中野義昭：このワークショップの趣旨説明資料の14ページ目（図1-3）に書いてある、今後の方向性についての仮説の3番目に、「社会の課題や桁違いの技術ブレイクスルーに挑戦」が必要だとあるが、これを考えたときに、今の話は少しおとなしい。「今、皆が言っていることを言っている」という感じがする。そういう意味ではとても良い模範的発表とも言える。では、今後、有機材料を使って、何を桁違いに変えていこうとしているのか。あるいは、その前のところに「領域融合」というものもあるが、無機などほかの材料と組み合わせ、「今までできないこんなことをできるようにしてやろう」という若者としての夢を教えていただきたい。

中山健一：数字でスライドに気持ちとしては入っているが、やはりシリコンの置き換えでは意味がない。いくら安いといっても、シリコンだって決して高くはない。そういう意味では、「壊れない」、「壊れてもいい」エレクトロニクス、エナジーハーベスティング、センサーネットワークなどエレクトロニクスをありとあらゆるところで利用できるように、この有機のエレクトロニクスを生かしていくというのがある。例えば、生体情報を常にモニターして、クラウドと繋ぎ、遠隔の親戚縁者に健康状態を知らせるとかが考えられる。そのときにいちいち大きな装置でなく、生体適合あるいは気付かないエレクトロニクスというようなところで実現していければ良い。私のアイデアというよりはこの分野全体の意見ではある。

3.5 光による物質状態制御と生体模倣光技術

飯田 琢也 （大阪府立大学）

光物性物理をバックグラウンドに、ナノフォトンクス、光化学に関する研究を行って来た。特に最近では、「揺らぎ」と関連した非平衡物理との融合による新しいナノフォトンクスの構築を目標に、理論的アプローチに基づく研究を行っている。特に、「光誘起力」を使って揺らぎの下でナノ物質を制御するための理論を構築し、光バイオセンシング、ナノ粒子の高精度選別、光温熱療法などの医療応用に関する研究を推進している。

バイオフォトンクスに関係した分野、特に光を使って物質の状態を制御するという観点で、「光による物質状態制御と生体模倣光技術」という新しい研究領域を提案する。20世紀後半から21世紀に掛けて、金属、有機物、半導体などのナノ粒子や、カーボンナノ材料などの光応答性ナノ物質について、様々な光物性が調べられてきた。また、生体材料の物性もいろいろと調べられてきたが、それらが混在した共存系における物質状態を光で制御し、生体材料の特性を検出・観測するといった研究はこれまであまり行われて来なかったように思われる。提案領域は、こういった新分野を開拓することで、バイオセンシングの高速化、高感度化、もしくは生体材料の機能を模倣したような新しい分離分析法や新材料の創出を目指すものである。

光による物質状態制御と生体模倣光技術	
<背景・社会的意義> 近年の光源技術の大幅な進歩により、光の波長や指向性に加えて強度分布、偏光分布、角運動量、位相、時間幅といった多彩な自由度が利用可能になり、多様な物質状態制御が可能となった。一方、医療応用や食品業界など広い意味でのバイオ産業では新原理に基づくブレークスルーが要請されており、物理・化学・生命科学の分野横断研究や、これらの最先端の光源技術のコンパクト化・低コスト化が重要な鍵となる。	
<想定される成果> (1)光応答性ナノ物質と生体材料の共存系における「物質状態」の光制御原理の獲得 (2)生体材料の検出技術の革新(低コスト・高速・高感度)と中小医療機関・食品検査等での利用 (3)生体材料の機能を模倣した分離分析法や新材料の創出による医薬品業界への応用	
<研究課題> 光応答性ナノ物質と生体材料の共存系における「物質状態の光制御」のための原理開拓および未踏領域であるバイオ-ノンバイオ共存系における光科学の知識創出を物理・化学・生命科学の異分野横断的な連携により行い、得られた知見に基づいてナノバイオテクノロジーの革新につなげることが重要課題である。 対象とする物質状態の例：光応答性ナノ物質(金属・有機物・半導体のナノ粒子や薄膜、カーボンナノ材料など)の固体(結晶、アモルファス、準結晶)・液体・気体などの物質相、水素結合・疎水結合・イオン結合などの生体材料(DNA、タンパク質、アミノ酸、酵素など)における特異的結合、光照射されたナノ・マイクロ物質の常温媒質中での非平衡過程などプラズモンや励起子などの閉じ込め電子状態に由来する多様な電子状態	<国内外の注目すべき技術・研究開発・政策トレンド> ・金属ナノギャップ中の局在光電磁場で分子操作を実現(欧州、米国、日本) ・生命の基礎となるタンパク質の構成要素であるアミノ酸をレーザーで高密度化して10秒程度でサブmm大の結晶成長に成功(日本) ・レーザーピンセットで液晶の界面張力を制御し、10μmオーダーのマクロな領域でキラル構造体間の多形転移を実験的に示した(米国) ・マイクロ流路とナノフォトンクスの組合せによる検出技術(米国など) ・光誘起力のマイクロ・マクロの統一理論が構築、揺らぎなどの非平衡条件下でのナノ領域での理論の開発、生体分子の検出に成功(日本)
<推進方策> 異分野に渡る光科学の若手・中堅・シニア研究者の連携が成功の要となるため以下の項目の推進が必要である。 ・最先端の光源技術・理論を有する物理研究者と化学・生命科学の異分野横断的なプロジェクトを支援し、バイオ関連事業を展開する企業(光学メーカー、医療メーカー、食品メーカーなど)との連携を誘発する場を設ける。 ・准教授クラスの研究者を中心に3~4グループ程度で異分野研究者のチームを構成して行う研究を3~5年間1~2億円程度で支援する制度の整備 ・異分野横断型のテニュア・トラック制度継続のためのインセンティブ付与	

図 3-5-1

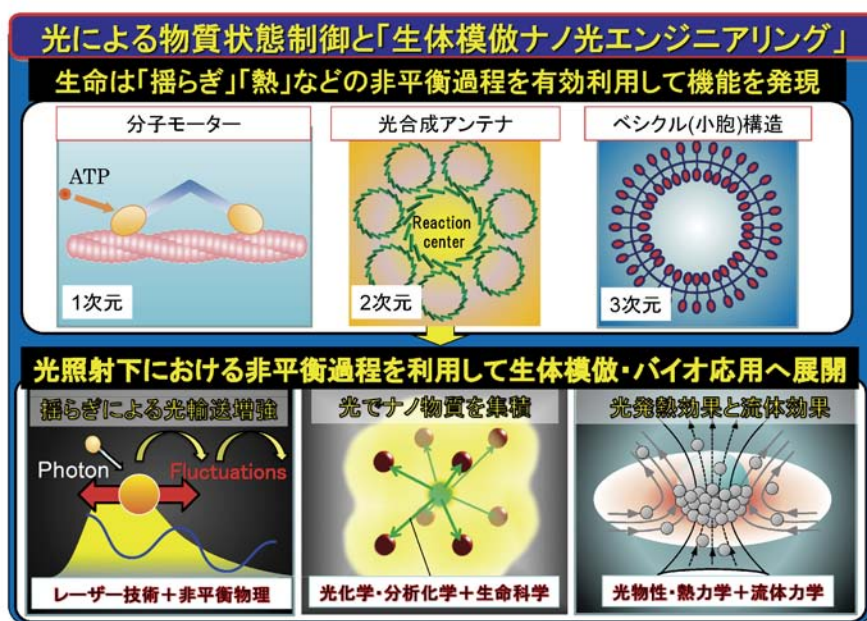


図 3-5-2

生体ナノ・マイクロシステムには、分子モーターのような揺らぎの効果を使って生体中での物質輸送を担う力学系、光合成アンテナのように太陽光に対して最適なスペクトル構造と空間構造を持つようなシステム、内部に多彩な生体由来物質を含むことで機能を発現するようなベシクル構造といったさまざまなシステムがある。こういった生体システムから学んで、光照射下における非平衡過程を利用した新規の光技術を創成することが、「生体模倣ナノ光エンジニアリング」の目的である。

近年、光の指向性や波長の選択性向上に加えて強度分布、偏光分布、角運動量、位相、時間幅などの多彩な自由度を人類が利用できるようになった。例えば、近接場光学によってナノスケールの強度分布制御が可能となり 10 nm 以下の空間分解能で物質の状態を観測・制御できるようになった。また、液晶の制御技術の発展によって偏光方向を光軸を中心として放射状にしたり、回転させたりするような高度な制御も容易にできるようになった。さらに、スピンに対応する円偏光だけでなく、軌道角運動量を光に与えることも可能になった。時間領域での発展としてはアト秒の極短パルスが生成が可能となり時間分解能が格段に向上し、波長帯域での発展としてはテラヘルツ波から X 線自由電子レーザーなど非常に幅広い波長範囲の光も使えるようになった。また、10TW クラスの高強度光源も実現している。これらの著しい光源技術の発展は、ある種の極限に到達しつつあるが、この先どういったサンプルを観測・制御すればいいかというところで、異分野間の横断・融合が重要な鍵になっていると思われる。一方、バイオ関連分野では、既存の原理や装置を組み上げる試みは数多くあるが、性能向上や低コスト化が飽和傾向にあり、上記のような最先端の光源技術のコンパクト化、低コスト化により、物理、化学、生命科学の分野を横断する観点から導かれた新原理に基づくブレイクスルーが必要なフェーズにあるのではないかと感じている。

このように光科学は光源技術の進歩や光と物質の相互作用の機構解明の過程で、物理のみならず化学、生命科学などの分野に細分化され、各分野に欠かせない存在になった。光

化学、分析化学などの化学の分野、および生命科学の分野では、いろいろな化学反応や生体反応が研究されて理解が深まってきたが、そこではさらなる最先端の光源技術が必要になっている。このことから、物理の分野で開発された最先端光源や光と物質の相互作用に関する知見を活用し、化学反応や生命機能の解明から一歩進んで制御のための原理・技術を確立し、光科学に基づくライフサイエンスの堅牢な基礎構築を目指すような研究開発領域が必要不可欠と考えている。

例えば、SPR センサーや局在表面プラズモンを使ったようなセンシング技術はあるが、積極的に物質状態を制御して検出するといった技術はこれまで少なかったように思われる。そういった物質状態制御による検出技術の基礎になる手法のひとつとして、光ピンセットがある。光ピンセットは高 NA レンズを使ってレーザー光を集光することで、光誘起力により微小な物体を捕まえたり、押したりできる。光ピンセットの開発の歴史を振り返ると、微生物の中の小器官を光で捕まえて動かすなどマイクロ領域でのバイオ応用への実績がある。その基礎にあるのが光誘起力である。

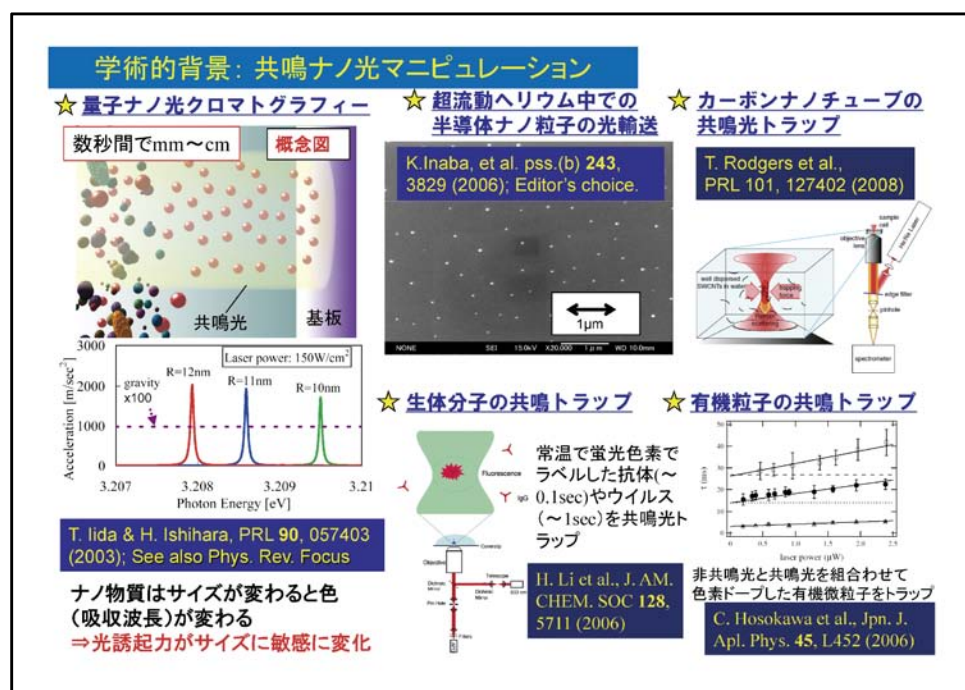


図 3-5-3

光誘起力の研究の歴史を紐解くと、1960 年にレーザーが発明されたことで、光トラッピング（光ピンセット）が可能になり、その後、原子のレーザー冷却やボース・アインシュタイン凝縮の研究などでノーベル物理学賞受賞者を連続して輩出した。1990 年代には我が国を中心に近接場光学、光化学、生命科学の各分野でナノ物質トラップの研究が試みられ、これらの現象の解明に必要なナノ物質と共鳴光の力学的相互作用の理論も研究された。こういった理論研究に影響を受け、2006 年から 2008 年にかけて世界的にも共鳴光を使ったナノ物質の運動制御に関する研究が報告され、光誘起力のミクロとマクロの統一理論も構築された。これらは最近の揺らぎと光誘起力の共存下でのナノ物質の動力学理論の研究にも繋がった。これらの時代の流れから、当初はマイクロメートルオーダーの細胞操作から

始まった光誘起力の研究が、ナノメートルオーダーのバイオ応用に繋がっていくのではないかと考えている。

ナノサイズ領域は、光の波の性質と電子の波の性質との両方が主役となるため非常に高い自由度があり、半導体、金属、有機材料、生体分子などの多種多様な特性のサンプルが存在する非常に広大なフロンティアだと考えている。物理の観点で言うと、量子閉じ込め効果が分かり易い例だが、サイズや形が変わることによって共鳴波長が変わる。サイズが大きければ大きいほど低周波、サイズが小さいと高周波になる。こういったナノ物質の特性を利用することで、光でナノ粒子を選択的に操作可能となり、さらにはカーボンナノチューブの共鳴トラップ、生体分子の共鳴トラップ、有機粒子の共鳴トラップなども可能となった。

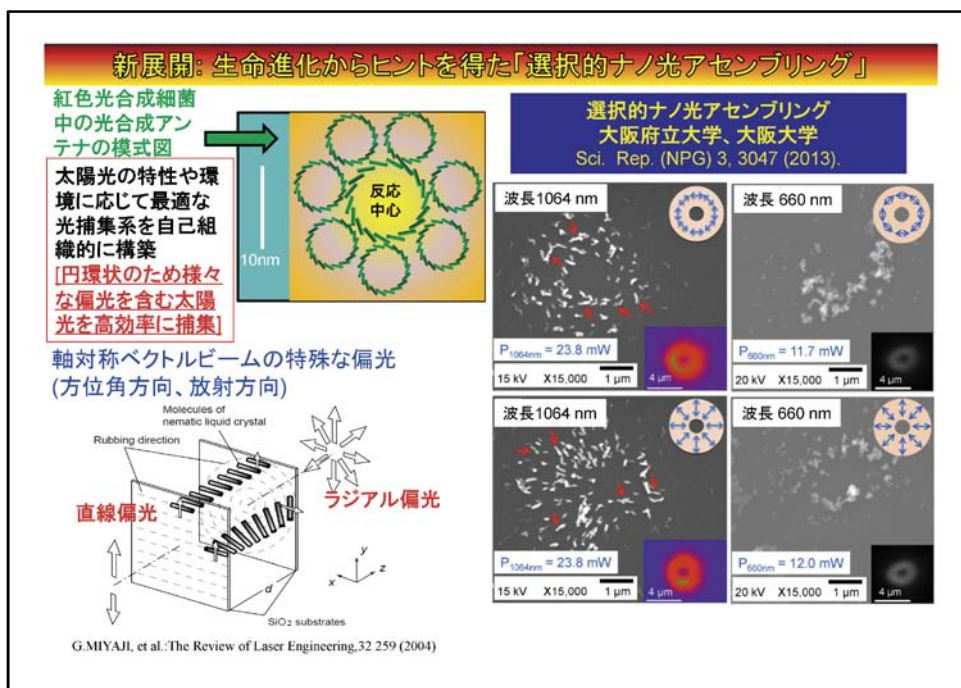


図 3-5-4

次に、「光誘起力」に加えてナノ領域で顕著となる「揺らぎ」を使った研究の新しい展開例として、ナノ複合材料の形と機能を「創る」、「見る」、「操る」ための原理開拓を目指した研究を紹介する。そこでは、光の特性をナノ物質の配列構造体に転写することで、優れた機能を持った人工光捕集系などのナノ複合体の創出ができる可能性を理論的に予言し、その実験検証にもごく最近成功している。この研究を皮切りに、物質科学と生命科学を繋ぐ異分野横断的な共同研究が今後ますます加速すると考えられる。こういった異分野横断研究の着想のヒントとして、例えば、植物が生息地によってさまざまな色（異なる吸収波長帯）の光捕集アンテナを持っているという事実が挙げられる。この事実から、外部刺激としての太陽光と揺らぎの下での自己組織的な進化のプロセスを通じて生息地によって異なるスペクトルを持つ太陽光に対して最適な光機能構造が作られたという仮説がある。このような進化の過程とのアナロジーで、光を照射しながら揺らぎの下でナノ複合体を形成

すれば、照射光に対して最適な光機能をもった新機能の構造体ができるはずという発想が、生体模倣光科学の一部である「選択的ナノ光アセンブリ」のコンセプトにつながった。具体的に上述の理論の実験検証の一例を挙げると、特殊な偏光分布とドーナツ状の強度分布を持つ軸対称ベクトルビームという光源を用いた配列状態制御により、天然の光捕集アンテナと同様に円環状の空間パターンにナノロッドを選択的に集積することに成功し、照射しているトラッピング光に対して初期状態よりも格段に強い光応答を示すような構造体ができることが明らかになっている。

この他、光による状態制御に関する注目すべき科学技術には、過飽和溶液に CW レーザーを照射することで生じた光誘起力によるグリシン（アミノ酸）の結晶化や、レーザーピンセットで液晶の界面張力を制御して 10 μm オーダーのマクロな領域でキラル構造体間の多形転移を実験的に示した例などが挙げられる。一方、バイオフィotonクス関連では、光トラップ中での細胞の変形量を通じた健康状態の計測や、DNA などのシングルナノサイズの分子のナノギャップ構造による捕捉、メタマテリアル表面に固定化した抗体による抗原の検出といった研究も行われている。さらに、ナノホールアレイとマイクロフルイディクスを用いたウイルス検出、DNA の構造転移の制御、1 本のカーボンナノチューブや DNA の可視化なども可能となって来ている。

これらの光による状態制御の技術とバイオフィotonクスの技術とが融合することで、新しい高感度、迅速なバイオセンシングに繋がるのではないかと考えられる。例えば、高効率で光を熱に変換できる特殊なプローブ粒子の分散液にタンパク質を混ぜてレーザーを照射することでピコグラムオーダーのタンパク質を凝固させてわずか数秒で検出できる可能性が示されている。この成果は従来の ELISA 法を格段に凌ぐ迅速性と感度を与える可能性を示すものであり、光誘起力と光発熱効果の相乗効果による新規バイオ技術への展開の基礎になることが期待される。この例は光によるバイオ-ノンバイオ共存系の状態制御に基づくナノサイズの生体物質検出の先駆的な例と思われる。このような原理に基づく研究開発が発展すれば、従来法に比べて検出時間の超高速化、前処理が不要、小型、低コスト、蛍光標識が不要というメリットを持つ検出技術の確立につながり、中小病院での迅速かつ簡便な検査にも貢献でき、遺伝子疾患やアレルギー、成人病の早期診断を革新し得ると考えられる。さらに、食品の産地、安全性の検査の迅速化、高信頼性の保証など食料品業界などで近年強い要請のある技術開発にも大いに貢献できるのではないかと考えている。

ここでは、光による物質状態制御と生体模倣光技術に基づく、さまざまなバイオインフォマティクスの可能性について紹介した。分野間に存在する専門用語、技術的な障壁のために意思疎通が十分でないために、こういった試みがこれまで少なかったが、今後、光物理と化学、生命科学の異分野横断的な連携・協力を積極的に推進して、ナノテクに基づく食品の分析や製薬および医療応用などへの展開を加速する必要があると考えている。

このようなバイオ応用を含む異分野横断研究のための草の根的な活動として、物理、化学、生命科学の光関連研究者、特に JST「さきがけ」の光科学分野の OB 研究者を主体とする「光科学異分野横断萌芽研究会」が近年発足し、現在会員数が 130 名に到達している。こうした取り組みで得られたシーズをインキュベートして形ある成果へと発展させるために、早急に改善する事案として、「さきがけ」と「CREST」との間のギャップを埋める支援策が必要ではないかと考える。若手研究者から中堅への移行期にある准教授クラスの研

研究者が3～4グループ程度でチームを構成して行う研究を3～5年間、1～2億円程度で支援する制度があれば、世界をリードするレベルに持っていくことができると期待される。また、光以外の各分野の若手・中堅研究者達のネットワークとも有機的に相互作用して自己組織的にチームを形成する仕組みの構築も重要課題である。

【質疑応答】

辻伸二：ELISAを凌ぐタンパク質分析方法の紹介があったが、これは選択性をもってタンパク質を集めることができるのか、あるいは何でも集められるのか。

飯田琢也：例えば、温泉卵のように黄身と白身で凝固温度が違うことを利用して異種のタンパク質の検出も可能であり、抗体を用いることで選択性を高めた検出法の構築にも繋がると思われる。

3.6 光の可能性を拡大する光科学

芦原 聡（東京農工大学）

新しい光を生み出す技術と、光と物質の相互作用の探求は、物質の計測や制御にブレークスルーをもたらすと考えている。物質の計測・制御には、走査型のプローブや電子・イオンという量子ビームを使った技術も重要だが、光による技術は、他で代替できない、大きな貢献をしている。光は真空環境を必要とせず非接触に物質を計測・制御できる上、分光法によって豊富な情報を取り出すこともできるからだ。

新しい計測・制御法を生み出すための基盤は光源技術であり、また、光—物質相互作用に関する新しい知見であろう。とはいえ、ただ新しいレーザーを開発するとか、無目的に物質だけを変えて測るような研究よりも、どういう形で計測あるいは制御するのかという方法論まで見据えつつ計画された光源あるいは光—物質相互作用の研究こそ、科学技術を推し進めると思う。このような考えに基づき、今回、「光の可能性を拡大する光科学」という大きな研究領域として提案する。

話の後半では、この大きな研究領域と深く関連しつつ、よりフォーカスした領域として“メゾスコピック領域の光マニピュレーション”という提案をしたい。既存の光源や手法を用いて、材料の構造やダイナミクスを解明する研究も、物性科学や分子科学では大切だと思う。しかし、ここでもやはり、物性の多様性に新規性を求めるのではなく、質的に新しい光、相互作用、計測法、制御法のアイデアを創出し、ユニークな実験をするという挑戦が重要だと思う。その結果、見えなかったものが見える、制御できなかつたら制御することが可能になる。

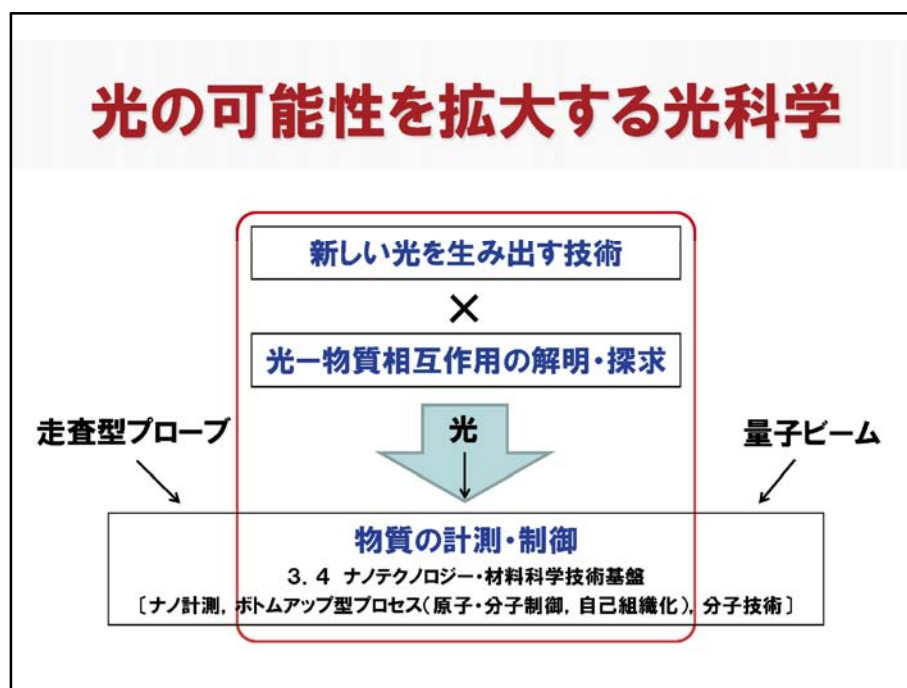


図 3-6-1

光を生み出す技術の動向について、まず最近の進展を振り返りたい。レーザー光源はいろいろな軸で極限化している。

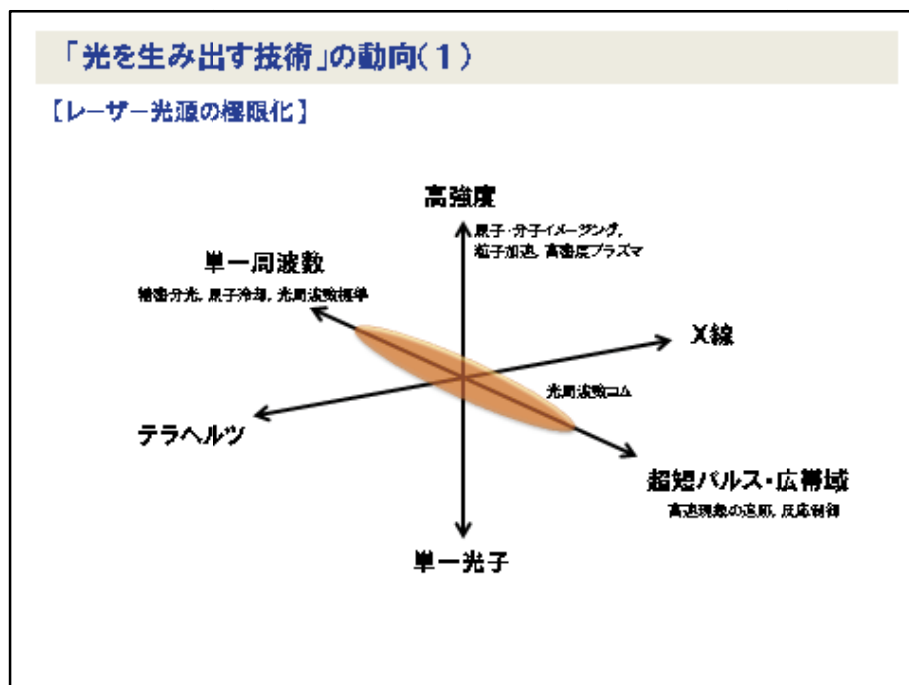


図 3-6-2

ここには波長の軸がある。低周波ではテラヘルツ領域、高周波ではエックス線の領域までコヒーレントの光を作れるようになってきた。強度に関する軸は、単一光子光源レベルそして高強度レーザーという極限に延びる。周波数のピュアリティという軸を立てると、ピュアリティの高い単一周波数光の極限と、広帯域で位相がそろったときに時間領域で局在化する超短パルス光という極限が考えられる。最近では周波数のピュアリティと広帯域性をあわせもつ光周波数コムが現われ、新しい計測技術が出てきた。このように、それぞれの軸で極限化された光源をつくることによって、物質科学、生命科学に貢献してきた。

例えば、波長域が拡大したことによって、物質の構造やダイナミクスを多面的に捉えられるようになった。その具体例として、水という液体の構造について話をしたい。液体の構造を表現するためには、分子間の平均的な距離だけではなく、分子レベルの運動、水素結合の長さや角度分布の情報が必要である。要するに、液体の構造は、空間的な不均一性とダイナミクスの情報まで含めることで初めて表現できる。古くはX線回折や振動分光によって、平均的な構造に関する知見が得られていた。最近では、軟X線領域のコヒーレント光を使って内殻電子の吸収発光を観察し、水素結合の長さ、角度分布が捉えられるようになってきた。また、テラヘルツ領域のコヒーレント光を使うことによって、水素結合の組替運動の時間ダイナミクスがわかるようになった。このように、周波数軸上での極限化は、物質のミクロな構造とダイナミクスを原子分子レベルで理解するための物質計測に大いに貢献している。

光の高強度化がもたらしたものとして、新しい「光と物質の相互作用」がある。弱い光による物質の励起は、「共鳴的な相互作用」によって起こる。電子遷移、振動遷移、回転遷移に共鳴する波長の光を照射することによって物質に変化をもたらす。これに対して、強いレーザー場中では、原子・分子のポテンシャルが大きく変形し、トンネルイオン化によって電子が引き剥がされる現象が起こる。これは非共鳴な現象で、レーザー場が強ければ波長に依らず共通して起こる。このトンネルイオン化をトリガーにしてクーロン爆発ひいては分子の解離の誘導が可能になった。また、トンネルイオン化した電子がレーザー電場によって戻ってくると、加速によって得たエネルギーに対応した波長の高次高調波が発生する。これは、コヒーレンスの高いX線源として応用が期待されている。その際の電子の再衝突を利用して、束縛電子の波束を計測する手法も生み出されている。光の高強度化から、このようなサイエンスとテクノロジーが生まれている。

先ほどお見せした光源技術の極限化とは性質の違う、光を生み出す技術の動向がある。

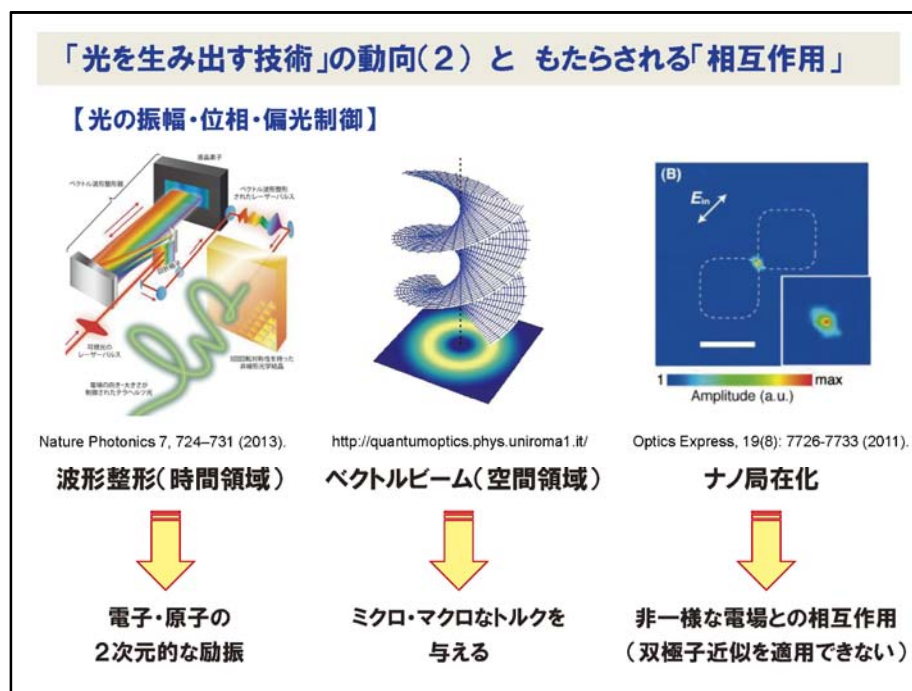


図 3-6-3

レーザー光源、光の高機能化と表現できるだろう。光の振幅・位相・偏光を自在に制御する技術である。光電場の波形整形はこれまでにできていたが、電場ベクトルの向きまで含めて波形整形された光、らせん状の波面をもつ光、偏光の空間分布をもつ光が出現した。金属微細構造に宿るプラズモンを励起することによって、光をナノ空間に局在化する技術にも着実な進展がある。

光の技術に進展があったとき、光—物質相互作用の新しいサイエンスが開けている。光電場のベクトル的なコントロールを用いると、荷電粒子、束縛された電子や原子を、二次元的に励振することができる。あるいは、ベクトルビームと呼ばれる光は、物質に対してミクロに、あるいはマクロにトルクを与えることができるので、その性質を利用して新しい

材料加工ができるようになってきている。一方、光をナノ空間に局在させることによって、ナノメートルスケールの電場勾配ができ、原子・分子が一様な電場を感じて応答するという双極子近似が適用できなくなる。この状況では今までになかったような新しい応答を示すことがわかってきた。

光を使った物質の計測技術に関しても、新しい進展が見られる。中でも振動分光技術は物質の原子レベルの構造を知る上で非常に強力なツールとなっている。光による物質計測の領域では、レーザー技術の進展が大きく貢献しているだけではなく、新しい「光－物質相互作用」の知見を生かした手法・アイデアが生まれている。例えば、界面を選択的に検出する振動分光法、液体構造・分子構造ダイナミクスや分子立体構造を映し出す非線形振動分光法、散乱型チップを利用したナノ空間分解能を有する顕微分光法などが開発されつつある今までに得られなかった情報、物質の構造、ダイナミクスの情報が得られるようになってきている。

こうした計測技術により、物質の構造の理解、化学反応や相転移の仕組みに関する知見が得られる。これは、将来の新物質開発や機能創出の知的基盤になる。また、新しい計測技術は、生体や材料イメージング技術、微量物質の化学分析に大いに役立つ。

「光源」と「光－物質相互作用」の進展は、計測技術だけでなく物質の操作技術にも生かされる。ここに進展があると、反応制御や分子マシンの操作、分子レベルの生体治療、固体を対象とすると相転移の制御、ナノ加工・ナノ造形などに夢が広がる。

このように、「光を生み出す技術」と「光と物質の相互作用の探求」は「物質の計測・制御法」を生み出す原動力となっており、そのまた逆もしかりである。このことを踏まえ、この一連の光科学技術を広く推進する研究領域が必要だと考える。

よりフォーカスした話に移ると、私は光というツールを使って、普通では手の届かない原子・分子レベルの物質の形や状態をコントロールすることに興味を持っている。光トラッピング技術が 1980 年代に提案されたが、これは勾配力によって微小粒子、あるいは高分子を捕捉して、その外部自由度を制御するものである。要するに、並進運動を制御する技術で、最近では、高分子のトラップもできてきた。これに対して、光量子制御・コヒーレント制御と呼ばれる技術がある。これは、光の振幅、位相、偏光を利用して物質の量子状態を制御する技術である。電子励起、振動励起、回転励起を使って、原子・分子の内部自由度を制御する技術である。光トラッピングと比べると、制御対象のスケールが違う。化学結合の切断や、小さい分子の異性化ができるが、それより大きい、例えばタンパク質のような高分子の折りたたみを自由に制御するには至っていない。固体の相転移も、ごく限られた物質でしか起こせていない。



図 3-6-4

この辺りのスケール領域に、光による物質操作という研究領域があるのではないかと考えている。そこで、先ほどの提案に加え、よりフォーカスした研究領域の可能性を提案させて頂く。すなわち、1 分子よりも大きくてマイクロメートルよりも小さいメソスコピック領域の物質制御に関する科学技術である。例えば、高分子・超分子の動きを自由に制御する手法である。光トラッピング・量子制御に加えて、分子のある場所の反応が違う部位にどう伝搬するのか、どう増幅するのかという機構も関わってくるので、分子科学、物性、理論家とのコラボレーションが必要であり、そのために面白い研究ができるのではないかと。

【質疑応答】

魚崎浩平：「物質構造運動を自由に制御する技術」と書いたときに、その技術で何をするのか。技術という以上はテクノロジーとなるので、サイエンスの話とはだいぶ違う。それが二分子反応、高分子フォールディングはまだ技術の適用ではないとなると、それは依然としてサイエンスの領域であり、科研費でやる話になる。

芦原聡：そういう意味では、今は原子・分子を対象とするローカルな制御ができていく程度であり、より大きな系に適用したいという話はサイエンスの域を出ていない。しかし、例えば、タンパク質のフォールディングなどが自由に制御できると、体の中の化学反応を制御できるという意味で、いずれは有益なツールになる。

曾根純一：光で励起状態を制御するとか、分子レベルの回転をさせるというのはたくさんある。また、メソスコピックといったときには集団の統計が入ってくるだとか、超分子の状態だとか、原子・分子とステージの違う物質構造というのをイメージする。具体的にメ

ゾスコピックの領域に攻め入るというのは、分子・原子のレベルと何を違えようとしているのかをもう少し詳しく言ってほしい。

芦原聡：簡単に言うと扱う対象のサイズの問題。統計性というよりは、光量子制御と光トラッピングという二つのツールが有効に機能するようなスケールを考えている。光の量子制御において励起できる現象は、電子励起であれ、振動励起であれ、ある程度ローカルなものになる。しかし、ランダムに動き回り配向した分子に対しては制御性が悪くなる。光トラッピングによって外部自由度、並進・回転の運動を制御することにより、光量子制御の効率をあげることができると考えている。さらには、ここからは、少し漠然としているが、物質中のいくつかの領域で空間選択的に光励起をすることによって、大きな分子の状態を制御することを想像している。

納富雅也：本当のイノベーションというのは、新しい光を出すとか作るほうと思ったのだが、その辺は研究として飽和しているということか。

芦原聡：光源技術が飽和しているというという意味ではない。新しい光を作り出す、光—物質相互作用を探索することを包括した、裾野の大きな研究提案と、よりフォーカスした提案を、それぞれさせて頂いた。新しい光を作り出すことに関しては、高強度化は青天井になっていて、今も伸びているという印象を受ける。その他の軸の拡大もまだ成長段階にある。10年前は、光源技術が飽和してきたかという印象を持っていたが、その印象に反してこの10年間に随分進展した。したがって、光源の極限化やその他の付加価値を高める光の制御技術にもまだまだ発展の余地があると考えている。光源技術と物質の相互作用まで含めたアイデアには、より発展の広がりがあると思う。

川合知二：二分子反応とかフォールディングを制御するとあったが、励起であるモード、例えばローカルモードだけを選べるかということ、「なかなか難しい」というのがこの20、30年の結論だった。それは、励起状態はいろいろなポテンシャルが交差していて、そこに上げて結局ランダムマイゼーションが起きてしまうから、極めて限られた例しかなかったと思う。大きくなってあまりほかの系と交差しないローカルモードに関しては可能かとの理解であったが、二分子反応とか、最後のフォールディングで出された例はできているのか。それとも想像か。

芦原聡：そう意味では想像である。

川合知二：分子科学研究所はこれをやるために建った研究所だが、ずいぶんいろいろなことをやっても、なかなかローカルモードで反応させるところまでは難しく、高分子のあるストレッチングのような本当のローカルモードだったらうまくいくという例もあるが、非常にチャレンジングだということをコメントしておきたかった。「切る」というのも難しいところがあって、すぐいろんなところと交差して、なかなか思う反応までいってくれない。

芦原聡：レーザーパワーの高強度化や赤外域での波形整形技術などが進んでいて、赤外の振動励起によってランダムマイゼーションの前にボンドを切ることも気相では可能になっている。今までの摂動論的な非線形応答とは異なる動的シュタルク効果を利用した手法が考案されるなど、状況は改善していると思う。

3.7 新しい光源で拓く融合科学

小関 泰之（東京大学）

光というものが科学技術と非常に相性がいいということは、おそらく皆が共有できるのではないかと考えている。21 世紀に入って、光の直接的な応用によって光技術が非常に身近になってきた。これは少し見方を変えると、光がもたらした科学的な知見の結晶であるとも考えることもできる。100 年前に電球が出てきて、その色を一生懸命研究していたら黒体輻射というものが見つかり、そこから量子力学ができてナノテクノロジーが生まれた。光源というのはそれくらいの威力を持っている。50 年前にレーザーが出てきて光源のパワーが圧倒的に拡大し、現代までにさまざまなことができるようになってきた。この流れを止めないで欲しいというストレートな思いで、「新しい光源で開く融合科学」というタイトルで提案したい。

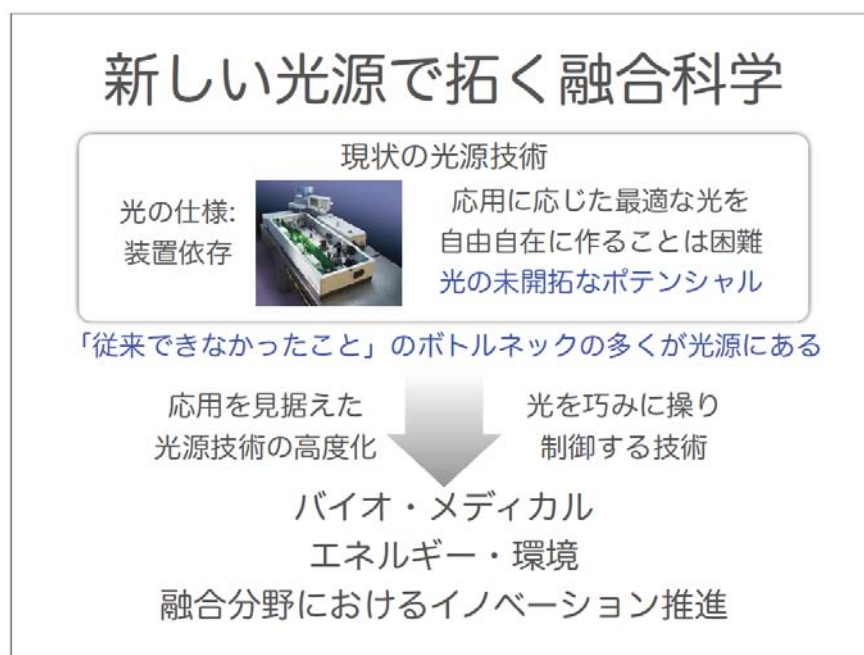


図 3-7-1

なぜ「新しい光源」なのかというと、現状の光源技術は光の仕様が装置によって決まっ
ていて、自在に自分の出したい光を出せる状況ではないと考えるからである。それは逆の
見方をすると、光には未開拓なポテンシャルがあるということだ。さらに言い方を変え
ると、従来できなかったことのボトルネックの多くが、まだ光源にあるのではないかと
思っている。これをどうするか。やはり「そのまま光源の研究をやろう」ではダメで、何
かしら応用を見据えた光源技術の高度化をやりつつ、それと同時に光を操り制御する
技術をうまく開発することで、バイオメディカルやエネルギー、環境などの融合分野
でイノベーションを推進する、ということが必要になってくる。

自分が今関わっているバイオフォトンクスの分野では、この 10 年間ぐらいに光源が果
たしてきた役割は非常に大きい。例えば光コヒーレンストモグラフィー（OCT）と呼ば

高速の眼底イメージング技術では、この10年くらいの間に超高速の波長可変光源が出て、それによって3桁、4桁感度が上がった。これによって1秒間に100万回くらいスキャンができ、1ポイントの奥行き情報が1秒間に100万回くらいとれる。高速にとれるようになって、動いている人間の目も非常に高いSNで観察できるようになった。また、最近、超短パルスレーザーがどんどん顕微鏡に使われ、2光子や3光子の多光子の顕微鏡によって、脳の1ミリぐらいの深いところが見えるようになってきている。さらに、パルスレーザーを波長可変にすることによって、非常に高速に組織のイメージングができる。これが染色の使えない手術の現場などで使えるのではないかと考えて、研究を進めている。このように新しい光源を使ってできることはいろいろある。

翻って、バイオフィotonクスやレーザーの研究室は日本に多くあるが、オリジナルなレーザーを使ってバイオフィotonクスの研究を進めているのは限られた研究グループのみである。これはちょっともったいないと思う。日本は光源技術が非常に進んでいて、世界をリードする光源技術が非常に多い。半導体、レーザー、ファイバーレーザー、超短パルス、光コム、テラヘルツなどいろいろな分野で世界をリードしていると思う。一方で、他分野との融合を見据えて、応用を意識したような光源というのはまだ不足している。医学や生物学の研究室へ行くと、だいたい海外のレーザーを使っている。海外に目を向けると、レーザーの研究者と他分野の融合研究が推進されていて、イノベーション・スタートアップ・産業を生む流れができつつある。

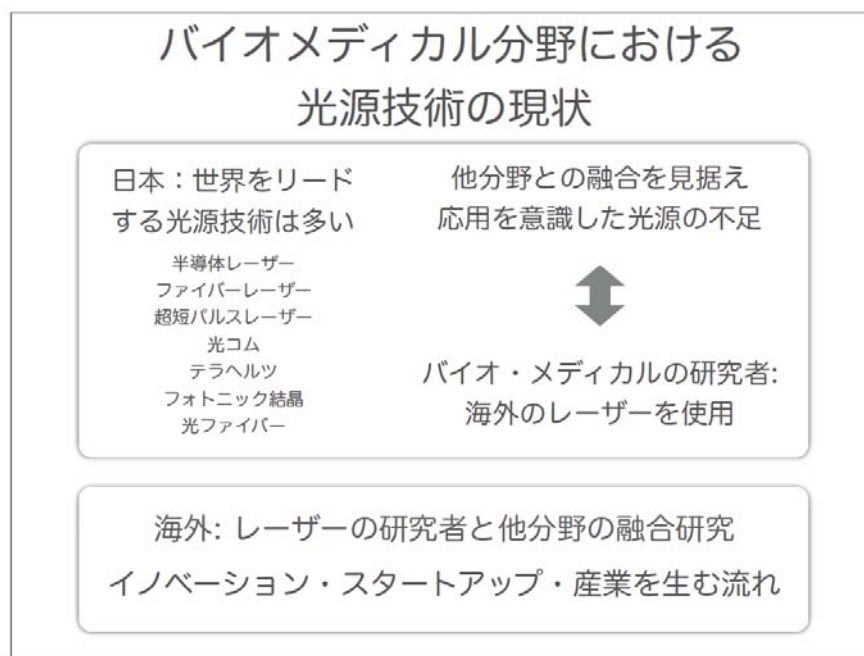


図 3-7-2

光源研究というと、未開拓領域と呼ばれるテラヘルツや紫外、X線というのが注目されがちである。こういった分野でどんどん新しいことができるようになっていくのは非常に重要だと思うが、可視や近赤外でも「出したい光を自在に出す」ことはできていない。この波長で、特定のパルスエネルギー、パルス幅ですぐに出せるかというと、まだまだ出せ

ない。言い替えると、応用に特化した、最適もしくは高機能な光源が足りていない。そして、産業やほかの研究分野へのインパクトを考えると、可視とか近赤外の光源も未だ重要である。

最初の頃のレーザーはナノ秒のパルスレーザーだったわけで、それが応用を見据えた光源に特化していった、半導体レーザー、光通信、チタンサファイアレーザー、超短パルス発生などいろいろなことができて、進化してきている。そういう中で、異分野の研究へ融合していったスタートアップカンパニーなどにうまくつながっていけば、科学を支える基盤技術のひとつとしての光技術の強化と新産業の創生に繋がるのではないかと思っている。

ただ、口でいうのは非常に簡単だが、やはり難しいところも多いと思う。レーザーの研究は世界トップの性能を出すことが使命であるが、異分野の研究者が「ちょっと融合しましょう」と言ってはじめると、そういう人たちが求めるレーザーは従来の性能、もしくは製品で済む場合も多いという話もある。得てしてレーザーの研究者が下働き状態になりがちである。では、どうすれば良いか。やはり、融合分野へ飛び込んで開拓する人材や組織が必要となってくるだろう。

海外の例を見てみると、さまざまな共同研究のスタイルで融合研究を推進している。例えば、光コヒーレンストモグラフィーという眼底イメージング法を生んだMITのFujimoto教授はレーザーの専門家だが、手法とレーザー両方を開発し、この20年くらいの間に年間3億ドルの市場を創出している。ハーバード大学のSunneyXie教授はコヒーレントラマンの顕微鏡で世界のトップを走っている人だが、化学が専門で、それでもいろいろなレーザーの専門家と積極的に組んで共同で研究を進めている。例えばドイツのコンスタンツ大学のLeitenstorfer教授はレーザー、半導体物性、ファイバーレーザーが専門だが、学内で共同研究を進めたり、スタートアップカンパニーに技術移転したりして、他分野と共同研究している。このようにいろいろなスタイルがあって、その中で何とか共同研究を推進しようとしているので、ここは見習うべきかと思う。

「CREST」や「さきがけ」は、新しい光源を作って従来できなかったことを実現する研究の受け皿だった。「光の利用と物質材料・生命機能」領域は蛍光タンパク質からアト秒物理までを含む非常に広い領域であったが、光をキーワードにして、自分のやってきたことの受け皿になってもらったというのは非常にありがたいと思っている。このようなサポートを継続していただけるとよいと思う。テーマを選定する以上に、仕組みづくりとか環境づくりが重要で、テーマの間口は広く取りつつ、イノベーションを起こしそうなテーマを総括が責任を持って選出する、今のやり方はすごくうまくできていると、非常に強く感じた。それを継続して発展させてもらいたい。

イノベーションは予想できない。従来の延長線上にない。そういう中で、「国としてどの分野を推進すべきか」というのは、自分自身がここで話しながらも、もどかしい思いがある。何かの分野にフォーカスするというのは「ターゲティング政策」と言われ、今までうまくいった試しがないと言われている。国民の税金を投資しているわけで、投資するときの責任がどうなっているのかよくわからない。フリードマンは、他人の金を他人のために使うというのは、金を使う人は値段にも商品の質にも拘らないので問題だと言っている。

将来の成果に対して誰がどう責任を持つのかというのは真剣に考えないといけないと思う。

「イノベーションは予想できない」という話に関連して、最近、衝撃を受けたのが、「レンズを使わない顕微鏡」である。この数年くらいの間に UCLA のグループから出てきた。CCD の上に物を置くだけで、サブミクロンの非常に高い解像度で、数千×数千ピクセルの非常に高精細なイメージングができるというので、これはすごいイノベーションだと思う。このようなイノベーションはまだまだ残っているのではないかと信じている。

その他の意見としては、法人税減税をやって、企業に活力を与えてあげていただきたい。法人税を多く取って、それを分配するというのは責任の所在が明確ではなく、良くないと思う。会社は自分の得た利益を、次に何に使うのかを責任をもち、企業が判断する、という社会に戻さないといけない。

最後に、光と科学技術の親和性の良さ、懐の深さ、イノベーションのポテンシャルというところはぜひ注目してもらいたいと思っている。

【質疑応答】

佐藤勝昭：「何に使えるかはわからないけど新しいものができたら」というのは無責任で、例示でも良いから、「こんなものになるはずだ」というのを、もっと出してくれると良い。特にバイオ関係というのは宝の山だと思うが、「見えました、見えました」だけでは、皆物足りないと思っている。

小関泰之：紹介したイメージング技術が、今、眼科では眼底の診断技術として広く使われるようになり、これによってどういう治療を目に対して施すかが正確にできるようになった。非常にインパクトのあることだと思う。生体を染めずに、非常に短時間で生体の組織の構造を見ることはガンの手術に使えるが、まだそのレベルにない。もっとレベルを高くしていき、さらに内視鏡と組み合わせたりすれば、メディカルに与えるインパクトは非常に大きいと思っている。こういったことを実現するには、まだ光源が良くない。固体レーザーも、現状のものでは医師が使えない。半導体レーザーでピコ秒の2色の波長可変のパルスなどが出来れば、医師は皆使う。光源の進化とともに新しくできるようになることは多いのではないかと考えている。

河田聡：イノベーションを起こしたいとは皆思っていないかも知れないのに、国が「イノベーション、イノベーション」と言っているから、何だかやらないといけない。そうしないと研究費を貰えないから、一生懸命組み合わせて研究をしているという側面がある。しかし、イノベーションを起こせば、若い先生方も非常に元気が出る。MIT の Fujimoto 教授の OCT は何年も金にならなかった。初めは自分で会社をやって、最終的にカールツァイス社が買い取って、それが今、年間3億ドルの市場ということになっているけども、1億円や10億円では、企業はビジネス化してくれない。日本の大企業がビジネス化しようとするのは100億円くらいからだろう。だから、いろいろな良いネタが出されても、日本の大企業はビジネスにしない。Fujimoto 教授のように、自分で始めないといけない。自分で始めてみて、やっと法人税に対する不満が出てくるのではないかと。「論文を書きたい」という次に「世の中に使ってほしい」、これは「儲けたい」と結局は一緒になると思うが、そうい

うインセンティブがなかなかプログラムになく、皆『ネイチャーフォトンクス』誌に書いたらハッピーで終わってしまい、その次に続かないから、産業まで届かない。大企業はモノになるかどうかわからないものに手を出してはくれない。そこが日本の国のまだ制度の抜けているところではないかと感じた。

佐藤勝昭：もうひとつは規制の問題もある。医療機器の場合、非常に大変な審査までクリアして使ってもらえるところまでいくのは時間がかかる。保険の適用ができる形になると、大変なバリアをクリアしなければならない。その辺がバイオ応用の一番大きな問題だろう。

魚崎浩平：いろいろなイメージングをするときに、ディテクションの方の問題もあって、それほど強い光を使わずに感度良く撮れたらもっと良いのではないかという気もする。本来は光とディテクターと両方セットであり、あまり強い光を使わずにディテクトできれば、特に生体などにはもっと良いのではないか。

小関泰之：近赤外の良いディテクターはまだ少ないというのはひとつの課題だと思う。

4. 総合討論

コーディネーター： 河田 聡（大阪大学/CRDS 特任フェロー）

これまでの発表を踏まえて、最初に示した俯瞰図案の構造・軸・捉え方、範囲、境界領域など俯瞰図の概念、およびその中の要素技術・キーワードとして抜けているものについて議論した。また、今後の光関連科学技術の研究開発の方向性と重要な柱・課題、およびファンディングの方法など政策・制度上の課題について議論した。この結果、得られた主な意見を下記にまとめる。

4.1 俯瞰図の概念（俯瞰図の構造・軸・捉え方、範囲、境界領域、要素技術・キーワード）

- ・光のどのような性質を利用するかという観点の切り口もある。光の特長、例えばエネルギー、周波数、時間幅、位相、光の量子性を使った物質との関わりといったものを座標の上に並べ、その特長を活かしたところに応用製品があり、応用システムにつながっていくというのを見えやすくするのが良い。一方、多次元をどう表現するか難しく、ひとつのデバイスが複数の機能をもったときにどこにマークするか悩ましい。
- ・光とエレクトロニクスとの融合のものと、光の特長を活かしたものに分けて考えた方がわかりやすい。
- ・どこへ投資すべきかが見えてくるような座標軸が入ってくると良い。
- ・例えば、バイオフィotonクス、メディカルフォトンクス、光通信などといったキーワードが書いてあり、今後力を入れるべきところがどの辺りか具体的な領域名になるものがあれば良い。
- ・フォトンクスとオプティクスというのは確かに専門の方にはよくわかるが、ユーザーの視点で考えて整理するやり方もある。
- ・上の柱と下の技術との関連付けをしたほうが良い。
- ・光技術がどう使えるかという点で、一番上の社会で必要されているものとの間には、もう一段何か必要ではないか。
- ・社会として健康長寿、エネルギー、ものづくり、インフラという種類の異なる言葉が並んでいる。ものづくりが最後の目標というのはおかしい。人間がどう生きていくかというのが一番上にくるのではないか。
- ・地域をどう活性化させていくかという手段の中で「ものづくり」が入っているので、「ものづくり」は「地域の活性化」とすればよい。「社会インフラ」についても、強靱な国土を作っていこうという問題意識からインフラをやるので、「国土強靱化」に変えることにより、健康長寿やクリーンエネルギーなどとの並びが良くなる。
- ・示された俯瞰図は今ある研究のキーワードを羅列・分類しただけである。本当にやるべきことが網羅されているか確認し、落ちているものを入れることが必要である。
- ・何か技術の隙間が見えるようなマッピングにして、空いていることがわかる方が良い。
- ・まずは挙げられるものは全部挙げて、結びつくものを全部線で結んで、整理することもやる必要があるのではないか。

- ・他の重要なキーワードとして、光源開発、基板開発、結晶成長、蛍光材料（蛍光体）の開発、顕微分光、顕微鏡などがある。また、上部の応用には計測とは異なる「分析」や、「リモートセンシング」、「食品の近赤での分光分析」などもある。
- ・化学的などところが非常に少ない。具体的には光触媒がある。また、反応制御、プロセスといった化学産業でも光科学反応を使っている。
- ・シーズから始まって研究開発に結び付けるためには、物理現象からスタートし、例えば計測では計測手法というメソドロロジーの開発があり、最後に「計測装置」というのが一番上にくる。このようなメソドロロジーの開発は、中間にあるべきものであるが、ハードウェアに埋め尽くされて、物理を考えながらアイデアを出すということが埋没している。
- ・上記の議論を反映して、下記の俯瞰図修正案を提案する。材料、構造、光の発生・検出、光の制御・計測、光による物質計測、光による物質制御に分類している。
(ワークショップ後に、小関泰之氏、飯田琢也氏、中山健一氏、芦原聡氏、高橋和氏、加藤雄一郎氏より提出)

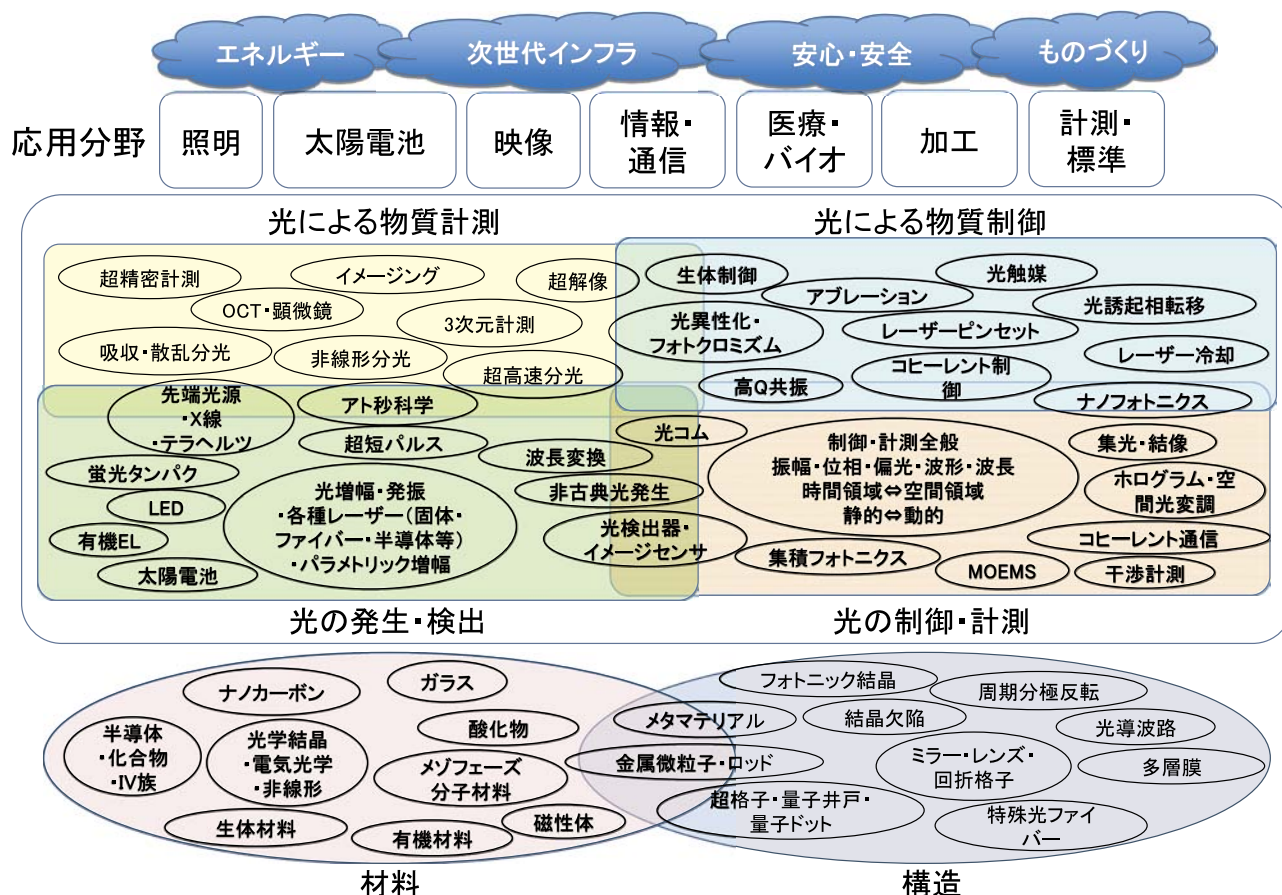


図 4-1 俯瞰図の修正案

4.2 今後の光関連科学技術の研究開発の方向性と重要な柱・課題

【研究開発の方向性】

- ・異分野融合・統合を示すスライドで、左側の光関係の科学技術と、右側の他分野の科学技術と書いてあるところは、あまりにシーズよりである。本来の異分野との融合とは、光の科学技術の研究者と、いろいろな応用の人たちが一緒に新しい価値を作るために協業することにある。下のレベルで異分野融合するのではなくて、全体で融合していくべきである。
- ・異分野の融合というのは、同じような性質を持った人たちの融合ではなく、全く違う性質を持った人たちとの協業により、新しい価値を上の空白になっているところに、作っていくことだろう。
- ・一例としてプロジェクション・マッピングを取り上げる。アーティスティックなことと、光の反射・散乱というのをすべて含めて計算しており、アーティストと環境・気象に詳しい人やプロジェクターを作る人との議論がないとできない。
- ・光科学や生命科学の人たちからのいろいろなレスポンスを見ていると、必ずしも最先端の光源が必要ではないという意見もあり、この点には注意が必要。

【光の産業について】

- ・従来の光産業の復活を目指すのか、それとも新しい光産業を作るのかという議論がある。
- ・従来の光産業においては、海外の企業との競争では、コスト的に勝てない。また、サーバーの例では設計もせずにラフデザインだけで海外の OEM に出してしまうという動きがあるが、海外に出した技術はそのまま海外で抜き取られ使われてしまう。
- ・ディスプレイの 8K では技術的に日本がリードしており、規格化に関しても NHK が中心となって世界に呼びかけて国際的な標準化までもっていつている。しかし、開発という部分ではアジアが先行してしまっている。
- ・日本で作ってもコストを下げられる製造技術とか、自動化をうまくやっていくのが重要であり、ターゲットをどこまでもっていかと、国内でどう安く作れるかが鍵になる。
- ・従来の光産業でも、日本特有の光技術ができれば挽回できる余地がある。しかし、最後の産業としての価値に結びつけることをやる人がいない。規制、参入障壁、大企業の存在など、いろいろなことでやれない状況になっている。
- ・従来の光産業が厳しい要因は二つある。ひとつは韓国や中国が従来日本がやっていたのと同じことを日本に仕掛けていること、もうひとつは欧米が日本に敗れた後に、どうするかをしっかりと考えて、日本には真似のできない新しいやり方を出していることである。
- ・日本がこれからどうするかというヒントは、欧米のやり方にあり、「新しい価値を作る」のを自分たちでやることである。
- ・ICT の性能は指数関数的に伸びているが、伸び続けると消費エネルギーリミットになり、これ以上の進歩ができなくなる。コストを安くするというよりも、やはり性能が伸び、帯域が伸びなくてはならない。
- ・最近のデータセンターやスパコンでも PUE (Power Usage Effectiveness、データセンターの電力使用効率を表す指標) とか消費電力当たりの性能という考え方をしている。

- ・光はシリコン LSI と違ってマーケットが小さいから、オーバーヘッドが無く自由に動ける企業がトップをとれるような産業である。
- ・バイオ関係と CCD や CMOS センサーといった半導体チップとをうまく組み合わせると、全く今までと違った新しいマーケットが開けるだろう。

4.3 政策・制度上の課題

【規制・制約】

- ・日本を窮状に追いつめている決定打は規制である。今の規制だと新しい技術をバイオにもっていくことは日本ではほとんどできない。
- ・アメリカはファウンドリがあって、スタンフォードでもバークレーでも、街のおじさんが最先端の機械を使ってプロトタイプでモノを作ってみせることができる。一方、日本では科研費で購入した設備には使途に制約があり、これまで一般の人たちに提供することはできていない。

【公的研究開発投資】

- ・イノベーションを起こすのはテーマではなくて人であり、個人がイノベーションを起こすというベンチャースピリッツを持たない限り、俯瞰図をきれいに書いたり、ファンディングでテーマをセッティングしても、決して日本からイノベーションは生まれない。サイエンスの結果を応援するのではなく「この人ならやるだろう」というように個人を応援する形でプログラムができていくということを期待する。
- ・価値の創出という意味では、最先端の光源が異分野の人たちにも重要だということを示すためのパッケージングといったものが必要になってくる。
- ・誰かがやってきてそれを拾ってくれるのを待つ、あるいは企業から何をやってほしいと言われるのを待つというのは、もう大学ではやってはいけない。そういう時代ではないということを大学人が理解し、この場合にはどんな研究支援をしたら良いかを考えていくのが必要だ。
- ・景気に左右されないような一定の分野が光の中にもあるはずであり、それを見失わないほうがよい。また、日本として本当の光の基礎、基礎体力の部分を若い人に担ってもらわないといけない。
- ・新しいテーマとしては、課題解決ではなく、基盤技術をもっとしっかりとやると良い。例えば、「光と物質」、「光と生命」など骨太の提案を募集する。
- ・独り立ちして独自のアイデアを出し、科学技術推進の戦力になれるように、若手向けの支援を考えてほしい。
- ・昔は自分で全部作らないといけなかったが、今はレーザー、AFM、STM、DNA、ヒーラー細胞なども買ってこられる。しかし、全部買えてしまうと、意外なものがなかなか出てこない。研究資金が乏しい間にアイデアを溜めることが重要。
- ・今の大企業の投資というのは 100 億円以上という相場観があるが、新しい市場を開発していく上では、ニッチをとっていくことが重要になってくる。研究開発とともに、企業化・市場化していくための政策をセットでやっていく必要がある。

4.4 その他

【研究開発の姿勢】

- ・ 目標となるシステムがあって、その中のコンポーネントとしての光というものが結局は今の姿につながっている。このような発想は企業の組織体にはじめて持つもので、大学ではまず持たない。大学に求められるのは、シーズにあたるところの深掘りであり、研究のための研究ではなく、大きな北極星を見て、そこに向けてこの部分をやるという自信をもってやれば良い。
- ・ 大学がこれは絶対理に叶っているから良いはずだという信念を持ってやっても、最後に産業の価値にまで持っていくところは誰か他の人がやると勘違いしていたところがある。大学人は自分の研究の価値を信じてやっているのであれば、それを本当に社会の価値にするところまで自分で責任をもってやっていく必要がある。
- ・ 他の人が絶対書かない、絶対やらないという、組み合わせではない研究ができるかどうかこれからの人たちに問われてくる。

【新たな活動】

- ・ 最近の大学はどんどん任期制になってきているので、若手は必死に新しいところに行こうとしており、この機運は高まっている
- ・ 女性研究者の視点で物事を見ると、全然違う目で研究を見ていると気づくこともあり、男女共同参画も光科学の活性において重要な点である。
- ・ まだ教授になる前のプロセスの中にいる人が会社を起こして大学が評価してくれるかという疑問はあるが、大学も変わらなくてはならない。

【関連学会】

- ・ 光関係のコミュニティとして、化学関係の学会がほとんど入っていない。具体的には日本化学会、光化学協会。

付録

付録1：開催趣旨・プログラム

開催趣旨

ナノテクノロジー・材料分野は物理学、化学、生物学を横断し、原子分子レベルでの観測や構造形成・機能発現などを通して、物質科学や材料技術、デバイス技術などを進展させ、さらには異分野の融合を促進しつつ進化する技術分野です。このため、新しい科学技術や新たな産業の創出ばかりでなく、グローバル課題の解決あるいは「社会的期待」に迅速に応える「課題解決型」を支える科学技術基盤の一つとして位置づけられます。CRDS では今春、ナノテクノロジー・材料分野における世界各国の国家計画、投資戦略、研究ポテンシャル、技術進化そして企業化動向、重要な研究開発領域を含むナノテクノロジー分野全体の俯瞰の結果を記載した俯瞰報告書（CRDS-FY2012-FR-06）を発行しました。この俯瞰報告書は、CRDS が政策立案コミュニティおよび研究開発コミュニティとの継続的な対話を通じて把握した研究開発の大きな流れを、研究開発戦略立案の基礎資料とすることを目的として、CRDS の視点からまとめたものになりますが、作成の過程では、内外の多くの専門家との議論や分析が土台となります。各分野における研究開発の方向性や主要な研究開発領域、さらに国際的なわが国のポジションを把握するのに役立つものとして、また、複数分野にまたがる新しい切り口からの研究開発戦略を立案することにも役立つことを期待しています。当該分野の動向を深く知りたいと考える政策決定者、行政官、企業人、大学・独法関係者、また、研究者にとっても、自身の専門分野を超えた範囲の状況を知る上で有益な資料となることを期待して発行しています。

既発行済のナノテクノロジー・材料分野の俯瞰報告書では、29 の重要領域について研究開発状況や国際比較を取り纏めています。調査が不十分な領域や、基盤的な技術のために複数の領域に分かれた記述となり、その技術領域全体を十分に把握できていないものもあります。このため、今年度はさらに調査が必要な5つの領域に注目し、ナノテクノロジー・材料分野の俯瞰をさらに充実させます。これらの結果は、2014 年度に発行する俯瞰報告書に反映する予定であり、CRDS における戦略立案および各界における施策立案等に活用していただくことを念頭に置いています。今年度 CRDS では、光（フォトンクス・オプティクス）、ナノ計測技術、バイオナノテクノロジー、新物質・新材料、製造・生産技術の5つの領域ごとに調査し、それぞれでワークショップを開催することを計画しています。その第一回目として、光（フォトンクス・オプティクス）領域を取り上げます。光の技術は光通信、ディスプレイ、ブルーレイディスク、LED 照明、太陽電池、レーザー加工、計測・評価装置、センサなどの民生用製品や産業用製品に広く使われ、ICT 分野、エネルギー分野だけでなくバイオ・医療の分野への利用も進んできています。今後は、各技術の高度化はもとより、複数の光の技術を組み合わせたり、異分野の技術との融合・統合により新たな技術領域や応用分野を作り出したりしていくことが期待されます。

今回、光（フォトンクス・オプティクス）の領域における技術・産業の状況把握、今後求められる技術、注目される科学技術の潮流、研究開発の方向性などについて、議論を深める目的で、「ナノテクノロジー・材料分野」光（フォトンクス・オプティクス）領域の俯瞰ワークショップを開催いたします。

プログラム

(敬称略)

開催日時：2013年11月20日（水）10:00～17:30

開催会場：科学技術振興機構 東京本部別館2階会議室A-1（東京都千代田区五番町7）

コーディネーター 河田 聡（大阪大学/JST-CRDS）
司会 馬場 寿夫（JST-CRDS）

10:00～10:05 開会挨拶 田中 一宜（JST-CRDS）
河田 聡（大阪大学/JST-CRDS）
10:05～10:25 ワークショップの趣旨説明 馬場 寿夫（JST-CRDS）

10:25～12:05 今後の「光」科学技術への期待（産業側からの要請）
(各講演15分+議論10分)

10:25～10:50 「光情報処理技術と集積ナノフォトンクスの将来展望」 納富 雅也（NTT）
10:50～11:15 「光インターコネクト技術のサーバへの応用」 山本 毅（富士通研）
11:15～11:40 「放送技術と入出力デバイス」 山本 敏裕（NHK）
11:40～12:05 「医療・ライフサイエンス領域で光に求められるもの」 橋本 武（オリンパス）

12:05～12:45 昼 食

12:45～14:25 話題提供①（各講演15分+議論10分）

12:45～13:10 話題提供-1「光技術の最新動向 —OITDA 光技術動向調査委員会
報告より—」 中野 義昭（東大）
13:10～13:35 話題提供-2「ナノ材料と集積フォトンクスの融合による革新的
光技術の創成」 加藤 雄一郎（東大）
13:35～14:00 話題提供-3「フォトンクスによる情報機器の省電力化とフォトンクス
研究者の異分野参入」 高橋 和（大阪府立大）
14:00～14:25 話題提供-4「メゾフェーズ分子材料による有機光エレクトロニクス」 中山 健一（山形大）

14:25～14:35 休 憩

14:35～15:50 話題提供②（各講演15分+議論10分）

14:35～15:00 話題提供-5「光による物質状態制御と生体模倣光技術」 飯田 琢也（大阪府立大）
15:00～15:25 話題提供-6「光の可能性を拡大する光科学」 芦原 聡（農工大）
15:25～15:50 話題提供-7「新しい光源で拓く融合科学」 小関 泰之（東大）

15:50～16:00 休 憩

16:00～17:25 総合討論 （コーディネーター 河田 聡）

- 論点 1．光領域の俯瞰概念について（俯瞰図の構造・軸・捉え方、範囲、境界領域）
- 2．今後の光関連科学技術の研究開発の方向性と重要な柱・課題に関する議論
- 3．政策・制度上の課題

17:25～17:30 閉会

田中 一宜（JST-CRDS）

付録 2：参加者一覧

招聘識者

氏名	所属・役職（WS 開催時点）
加藤 雄一郎	東京大学大学院工学系研究科 総合研究機構 准教授
高橋 和	大阪府立大学 21 世紀科学研究機構ナノ科学材料研究センター 特別講師（テニユア・トラック講師）
中山 健一	山形大学 大学院理工学研究科 准教授
芦原 聡	東京農工大学工学部 物理システム工学科（非線型光学・量子制御部門）准教授
小関 泰之	東京大学大学院工学系研究科電子系工学専攻 准教授
納富 雅也	NTT 物性科学基礎研究所 上席特別研究員
飯田 琢也	大阪府立大学 21 世紀科学研究機構 特別講師
中野 義昭	東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻（先端科学技術センター兼務） 教授
山本 敏裕	NHK 放送技術研究所 新機能デバイス研究部 主任研究員
橋本 武	オリンパス 研究開発センター医療技術開発本部 ライフフォトンクス技術開発部 部長
山本 毅	株式会社富士通研究所 ICT システム研究所サーバテクノロジー研究部 主任研究員
伊藤 正	大阪大学ナノサイエンスデザイン教育センター 副センター長
荒川 泰彦	東京大学生産技術研究所 教授

JST-CRDS

氏名	所属・役職
魚崎 浩平	科学技術振興機構 研究開発戦略センター ナノテクノロジー・材料ユニット 特任フェロー／（独）物質・材料研究機構 フェロー
川合 知二	科学技術振興機構 研究開発戦略センター ナノテクノロジー・材料ユニット 特任フェロー／大阪大学 特任教授
河田 聡 （WS コーディネータ）	科学技術振興機構 研究開発戦略センター ナノテクノロジー・材料ユニット 特任フェロー／大阪大学フォトンクスセンター センター長
曾根 純一	科学技術振興機構 研究開発戦略センター ナノテクノロジー・材料ユニット 特任フェロー／（独）物質・材料研究機構 理事

河村 誠一郎	科学技術振興機構 研究開発戦略センター ナノテクノロジー・材料ユニット フェロー・エキスパート／CREST・さきがけナノエレクトロニクス領域マネージャー
佐藤 勝昭	科学技術振興機構 研究開発戦略センター ナノテクノロジー・材料ユニット フェロー／JST 研究広報主監
島津 博基	科学技術振興機構 研究開発戦略センター ナノテクノロジー・材料ユニット フェロー
中山 智弘	科学技術振興機構 研究開発戦略センター ナノテクノロジー・材料ユニット フェロー・エキスパート／科学技術イノベーション企画推進室 参事役
中本 信也	科学技術振興機構 研究開発戦略センター ナノテクノロジー・材料ユニット フェロー
馬場 寿夫	科学技術振興機構 研究開発戦略センター ナノテクノロジー・材料ユニット フェロー
根本 光宏	科学技術振興機構 研究開発戦略センター 戦略推進室 室長
渡辺 美代子	科学技術振興機構 研究開発戦略センター 環境・エネルギーユニット フェロー
齊藤 広明	科学技術振興機構 研究開発戦略センター 環境・エネルギーユニット フェロー

オブザーバー

氏名	所属・役職
守屋 直文	内閣府 政策統括官（科学技術政策・イノベーション担当）付 政策企画調査官（ナノテクノロジー・材料担当）
高橋 正人	内閣府 政策統括官（科学技術政策・イノベーション担当）付 参事官（共通基盤技術（情報通信）担当）付
神部 匡毅	文部科学省科学技術・学術政策局研究開発基盤課量子放射線研究推進室 室長補佐
荒川 瑞穂	文部科学省科学技術・学術政策局研究開発基盤課量子放射線研究推進室 係員
渡辺 真朗	文部科学省科学技術・学術政策局研究開発基盤課量子放射線研究推進室 行政調査員
宮嶋 克彰	文部科学省科学技術・学術政策局研究開発基盤課量子放射線研究推進室 行政調査員
柄折 早敏	一般社団法人ナノテクノロジービジネス推進協議会 事務局長
平田 一郎	一般社団法人ナノテクノロジービジネス推進協議会 事務局次長
門平 卓也	（独）物質・材料研究機構調査分析室 主任エンジニア

古川 雅士	JST 科学技術イノベーション企画推進室 ナノテク・材料分野 研究監
平野 晶子	JST 科学技術イノベーション企画推進室 ナノテク・材料チーム メンバー
浅野 佳那	JST 科学技術イノベーション企画推進室 ナノテク・材料チーム メンバー
辻 伸二	JST 科学技術イノベーション企画推進室 ナノテク・材料チーム メンバー
橋本 典親	JST 戦略研究推進部グリーンイノベーショングループ 主査
竹間 清文	JST 研究プロジェクト推進部グリーンイノベーション/ICT グループ 主任調査員
五明 明子	JST 研究プロジェクト推進部グリーンイノベーション/ICT グループ 主任調査員
前野 仁典	JST 戦略研究推進部グリーンイノベーショングループ 主任調査員
勝又 康弘	JST 戦略研究推進部グリーンイノベーショングループ 主任調査員

■ワークショップ企画・報告書編集メンバー■

曽根 純一	上席フェロー
河村 誠一郎	フェロー／エキスパート
佐藤 勝昭	フェロー
島津 博基	フェロー
永野 智己	フェロー
中本 信也	フェロー
中山 智弘	フェロー／エキスパート
馬場 寿夫	フェロー
魚崎 浩平	特任フェロー
川合 知二	特任フェロー
河田 聡	特任フェロー
北澤 宏一	特任フェロー
田中 一宜	特任フェロー
田中 秀治	特任フェロー
松下 伸広	特任フェロー
村井 眞二	特任フェロー

CRDS-FY2013-WR-11

ナノテクノロジー・材料分野

俯瞰ワークショップ報告書

光（フォトンクス・オブティクス）領域分科会

平成 26 年 2 月

独立行政法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター ナノテクノロジー・材料ユニット
Nanotechnology/Materials Unit, Center for Research and Development Strategy
Japan Science and Technology Agency

〒102-0076 東京都千代田区五番町 7

電 話 03-5214-7481

<http://crds.jst.go.jp/>

©2014 JST/CRDS

許可無く複写／複製することを禁じます。

引用を行う際は、必ず出典を記述願います。

No part of this publication may be reproduced, copied, transmitted or translated without written permission.

Application should be sent to crds@jst.go.jp. Any quotations must be appropriately acknowledged.

