

ナノサイエンスで拓く新しい光科学とエネルギー応用

松田 一成 (エネルギー理工学研究所 教授)



ご紹介ありがとうございます。京都大学のエネルギー理工学研究所の松田と申します。きょうはよろしくお願いいたします。

きょうは、ナノサイエンスで拓く新しい光科学とエネルギー応用ということで、少し硬いタイトルになっていますが、後でもう少しかみ砕いてお話をします。

さて、きょうは京都大学の研究所のシンポジウムということですが、ご存じの方もおられるかもしれませんが、京都大学は3か所に大きなキャンパスがあります。一つはメインの吉田キャンパス、町中のキャンパスです。もう一つは桂地区、工学部があるキャンパスです。私はもう一つの宇治地区というキャンパスから来ています。

ここは主に研究所群があるところで、宇治という名前から皆さんが推察できるように、宇治の平等院や、宇治茶として有名な場所です。この風景からも分かつように、非常に静かな環境で研究に専念をしています。

さて、1枚だけ、私が所属しています研究所の紹介をさせていただきます。私、エネルギー理工学研究所というところに所属していますが、もともと大正3年の京都帝国大学の中央実験所から始まったところです。その間いろいろ組織が変わり、現在の名前になったのが今からちょうど20年ほど前ということになります。

我々の研究所は、何を研究のミッションとしているかという、エネルギーという

名前がついていますから、エネルギーをつくって、それを変換して、利用する、というエネルギーの高度化に向けた研究をしています。

一口にエネルギーといってもたくさんのエネルギーがありますが、核融合エネルギー、また、きょう主にお話する太陽エネルギー、光エネルギー、バイオエネルギー、こういうさまざまなエネルギーを使って、それを利用して効率よく生かすというような研究です。

非常に大きな研究施設を抱えている研究所でもあります。例えば、大型の核融合装置や、レーザー装置などの、施設を抱えて研究しているところでもあります。きょうは、その



ような大きな装置を使った話ではなく、もう少し小さい規模の研究の話をしてしたいと思います。

さて、きょうの話の主題は、「ナノサイエンスで拓く新しい光科学と応用」です。

かみ砕いてお話をすると、きょうは、「光×ナノ（サイエンス）」。「ナノ」って何なのという方がおられるかもしれませんが、それらの掛け算で、例えば、新しい光の科学もしくは光の技術だったり、エネルギーの問題に資するような、そのような研究の一端を紹介します。

きょうは、我々の失敗と挑戦ということでお話しをしますが、具体的には、「もっと光を」、明るい光を取り出したい。これは有名な人の言葉ですが「もっと光を」ということと、ナノの力、ナノスケール、ナノサイエンスでエネルギーを生み出す、そのような話をしたいと思います。

では最初に、2つのキーワード、「光とはどういうものか」、また「ナノって何なの」と、その2つについて、まず簡単にご説明をします。

一般の方にお話をする前に、必ずこのスライドから始めていますが、このスライド、「初めに光ありき」と書いてあります。これが何かご存じでしょうか？実は私も読めません。アラビア語かもしれませんが、ここに何が書いてあるのか、これが何なのかという種明かしをすると、旧約聖書の創世期の第1章の部分です。つまり聖書の一番最初の部分です。

原文はこのようなもので、私も全く読めませんが、ここに何が書いてあるかということ、「初めに神は天地を創造された。神は言われた。『光りあれ。』こうして、光があった。」つまり、万物の最初は光から始まっているということを聖書が教えてくれています。

つまり、我々人間、人間の情報を得る手段というのは視覚が一番大きく、人間の情報はそのほとんど80%を光を通して視覚から得ていると言われています。そういうことも含めて、光が万物の最初だということを教えていることになります。

このようなことから分かりますように、光に関する研究、学問というのは、非常に古い歴史があります。光に関する学問のことを、光の学問、光学という様に言います。例えば、アリストテレス、高校生の方は社会で習うと思いますが、紀元前から、気象論の中で虹などの光学現象を取り上げており、光が紀元前から研究の対象になっていたことがわかります。

少し時がたって中世になると、この方も皆さんご存じかもしれませんが、ニュートンです。この人は、プリズムを使って太陽の光を虹色に分けるという研究をしています。

もっと時がたつと、この人です。この人も多分、皆さん写真を見たことがあると思いますが、アルバート・アインシュタインです。この人は、光量子仮説を立てて、光電効果の理論を構築したことでも有名でもあります。

つまり光に関する学問というのは非常に古くから歴史があって、脈々と研究されている

学問であるということが分かります。

さて、そもそも光とは何でしょうかと、いうことから簡単にご紹介します。

光というのは難しい言葉でいうと、電磁波と呼ばれるものの一種です。電気の波みたいなものだと思います。波なので、この波の山と山、この間隔のことを光の波長と言います。

実はこの電磁波というのは我々の身近にたくさんあって、例えば電波、ラジオやタクシーの無線、これもこの一種です。もっと波の間隔が狭くなってくると、我々の目に見えるようになって、これがいわゆる光ということになりますし、もっと間隔が短くなると、いわゆるレントゲン、X線もこの一種になります。

きょう、主にお話しさせていただく光というのは、我々の目に見える光を対象にします。およそ、この波の山と山の間隔が400から800ナノメートル。ナノメートルについては後で、もう少し詳しくお話をします。

これは、光が伝わる様子をアニメーションとして見たものです。光が伝わっていく様子ですが、これを見ると、海で波が海岸に打ち寄せる様子と全く一緒です。

この山と山の間隔が、普通の海の波の場合には、10メートルもしくは20メートルなどのメートルという単位です。一方、光の場合は、この波の間隔が非常に小さく、数百ナノメートルという、たったそれだけの違いですから、光というのも実は波とほとんど同じだということが分かります。

さて我々は、光に関する学問に関わっているわけですが、学術的な意味だけではなく、光は我々の生活にも密接にかかわっています。例えば、レーザーがあります、私は今レーザー・ポインターを使っていますが、これも光を使った技術の一つですし、例えば、細胞の中を調べるツールとして、光を細胞に当てて調べる、バイオイメーjingという方法があります。またインターネット、これも光を使った技術の一つです。

ほかにLED、太陽電池など、このように多岐に渡り、光というのは学術的な意味だけではなく、技術的にも、また我々の生活の中にも、いろんな形で溶け込んでいるということになります。

さてそれでは、その次に「ナノって何なの?」、ナノとはどういうものかということをご説明します。

ナノというのは長さのスケール、非常に小さい長さのスケールです。ここにそれを説明するための物差のようなものが書かれています。ちょうどこれが10分の1、10分の1、10分の1、10分の1になるような物差しですが、エベレストだと数千メートルくらい、ビル、人間、となりここが1メートルです。指先、針先、ウイルス、原子というように、10分の1、10分の1、10分の1、更に10分の1と小さくなっていきます。

きょうお話しさせていただくのは、非常に小さい物質、もしくは材料についてです。その大きさがおよそ1ナノメートル程度ということですから、およそ原子より少し大きく、

ウイルスより小さい、このぐらいの大きさのものについてお話をします。

ナノメートルというのは、10億分の1メートル、1メートルで換算すると、この程度の非常に小さいものということになります。なかなかイメージがつきにくいと思いますので、例えば、地球の大きさを1メートル程度だと思えば、それに対して1円玉の大きさぐらい。およそこの程度のスケール感がナノメートルの世界ということになります。ですから、非常に小さい世界を扱うということになります。

さて、なぜそのような小さい世界を扱う必要があるのでしょうか。ナノメートルの世界とは、どのような世界なのでしょう？我々が現実生活中に生活している世界とは大分違います。量子力学、このあたりで、ちょっと尻込みする人がいるかもしれませんが、大学に入学すると、物理の学生はこの量子力学というのを習います。これはナノメートルの世界、つまり、ナノの世界で電子がどのように振る舞うかということをお話します。

その教えによると、電子は粒子、波として振る舞う。こういう回答を国語のテストでしたら間違いで、日本語として成り立っていません。つまり、電子は粒としての性格もあるし、波としての性格もあるという、一見矛盾したことを言っていることになります。

ただし、別に矛盾しているわけではなく、ある側面から見ると電流のもとである電子は、粒として見えるし、ある側面から見ると波として見えるということをお話します。

例えば、高校生だと、ボーアの水素原子モデルやドブロイの仮説ということで、少し習います。それはどういうことかということ、電流の源である電子というのは、普通の世界では粒として扱うことで十分だけど、このような非常に小さい世界で扱うときには、それは不十分で、やはり波として扱わなければいけないよということをお話します。

つまりナノメートルの世界というのは、非常に特異な世界、不思議な世界で、電子や光の粒としてではなく、波としての性格があらわれる、そういう舞台ということになります。

我々は、そういう特殊な世界で、新しい光の科学や技術、またそのエネルギーの応用へチャレンジしているということになります。

さて実際に、そのような小さい世界で何が起こるのかということをお話する前に、具体的に我々が探究している、研究しているものについてお話をします。

我々は、ナノ炭素材料というものを研究しており、炭素という名前がついていることから分かりますように、炭の一種ということになります。

さて、この図の点1個が炭素原子で、その炭素の原子が六角形にハチの巣構造をしていて、それがシート状になったものがあります。グラフェンシートというのですが、例えば、この炭素のシートを切って、サッカーボールの形にしたもの、これがC60フラーレンと呼ばれている材料です。1996年、リチャード・スモーリーがノーベル化学賞を受賞したことで知られている材料です。

もう一つ、皆さん鉛筆を使っていると思いますが、鉛筆は黒鉛でできています。黒鉛というのは、この炭素のシートが無数につながったもので、1枚だけ取り出したものをグラ

フェンと言います。2010年アンドレ・ガイムとコンスタンチン・ノボセロフがこのグラフェンの発見でノーベル物理学賞を受賞しています。

最後のキープレーヤー、この炭素のシートを切って筒の形にしたもの、これはカーボンナノチューブと呼ばれています。皆さんも一度は名前を聞いたことがあるかもしれません。日本人には非常になじみのある材料で、日本人の飯島澄男先生が見つけたといわれている材料です。残念ながらまだ、ノーベル賞の受賞にまでは至っていません。我々日本人にとっては、ぜひともノーベル賞を受賞していただきたい、そのような材料の一つです。

我々は、様々な材料の研究をしますが、きょうは、カーボンナノチューブにフォーカスしてお話をしようと思います。

カーボンナノチューブは、直径が1ナノメートルと非常に小さく、細長い筒です。このナノチューブですが、さまざまな使われ方や応用が検討されています。例えば、細い配線にして電気を流したり、先端から電子を放出して、ディスプレイに使ったり、また、電子回路の中に入れてトランジスターとして使う、もしくはバッテリーの電極の材料として使う、などの応用が検討されています。ですが、もしかすると、これが最大の応用かもしれません、スペース・エレベーターのケーブルです。

このような話をする、私の講演の内容は全く覚えていなくて、皆さん、このスペース・エレベーターのケーブルの部分だけを覚えている、ということが良くあります。地球と宇宙を結ぶスペース・エレベーター創るために、このようなケーブルが必要だそうです。

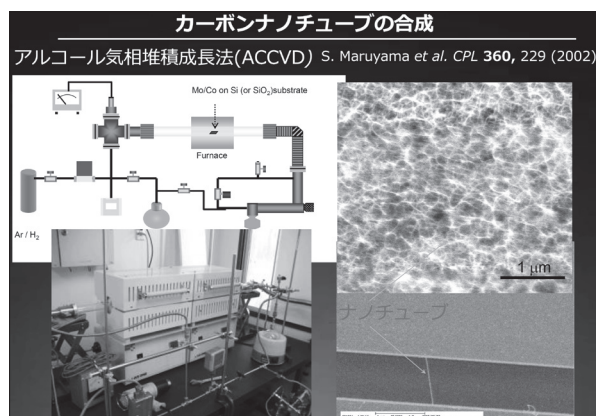
鉄でできたワイアだと、とても重すぎてケーブルがもちません。一方、カーボンナノチューブは軽くて非常に強いため、それを撚ってケーブルにすれば、このようなものができるかもしれないという、壮大な計画がNASAなどであるそうです。

実際にそれが実現するのかどうかは、私はよく分かりませんが、いずれにしても、カーボンナノチューブは、様々ところで使われる可能性があるということを示唆しています。

それでは、カーボンナノチューブという材料で「もっと光を」という話題でお話をしようと思います。

この材料、どうやってつくるかというと、お酒の原料であるアルコールを分解してつくることができます。大学ですから、この写真のような簡単な装置を使って、たくさんのカーボンナノチューブを作ることができます。カーボンナノチューブは、細長いひもからできたクモの巣のような状態で作ることができます。

実際に、カーボンナノチューブを合成します。その後、それに光を当てると、別の色の光が出てきます。例えば、カーボンナ



ノチューブに青い光を入れると、赤い色の光が出てきます。こういう現象のことを、発光もしくは蛍光と呼びます。

皆さん蛍光ペンを使われたことがあるかと思いますが、蛍光ペンの中には蛍光材料が使われています。この場合は、紫外線が当たると黄色、青、緑などに光ります。

これと同じように、カーボンナノチューブに青い光を当てると赤い光が出てくるといことになります。

さて実際に、カーボンナノチューブに光を当てて、その様子を顕微鏡で観察をします。

これは、カーボンナノチューブを水の中に入れて、その蛍光する様子を非常に高感度なカメラで見たものです。まず分かることは、明るい輝点の一つ一つが直径1ナノメートル、非常に小さいカーボンナノチューブが蛍光している様子です。

もう一つ画像を見て分かりますが、ランダムに動いている様子が分かります。これは皆さんが高校で習うブラウン運動というもので、カーボンナノチューブのように非常に小さいものでも、水の中に入るとブラウン運動することを示しています。

さらにこの画像から、カーボンナノチューブが、水の中でどのぐらいの速さで移動しているかを知ることができます。例えば、長さ400ナノメートルのカーボンナノチューブが、1秒間に10ミクロンというスピードで水の中を移動していることに相当します。このような事が分かります。

もう一つここから分かることは、カーボンナノチューブは、一見非常に明るく蛍光する（光っている）ように見えますが、実は非常に、その蛍光が暗いことが知られています。実際に、どのぐらい明るく蛍光しているかを、我々は効率という量で測りますが、カーボンナノチューブではそれが1%の値でしかありません。これは、100個の光を入れて、1個の光しか蛍光として出てこないことを意味しています。

そのためカーボンナノチューブの蛍光は、非常に暗いということになります。これはカーボンナノチューブを研究するという、学術的な意味と合わせて、光学や生命科学への応用に対して大きな障害となります。我々は、このような障害を乗り越えて、またそれを次の応用につなげるために、乗り越える必要があると考えました。

まず我々は、そもそもカーボンナノチューブの蛍光がなぜ弱いのかということを理解することを試みました。カーボンナノチューブに光が当たると、蛍光のもとである電子とホールのペアができます。何もしなければ、これらは一次元、つまりカーボンナノチューブという細長い線上を動き回り、端に到達して、蛍光する前に失活してしまいます。



例えば、すべて炭素からできたカーボンナノチューブに、コントロールして酸素を1個導入します。すると、蛍光のもとである電子とホールペアが、ここで動きが止められ端まで到達しなくなります。すると失活が抑えられて、もしかしたら強く蛍光するようになるのではと我々は考えました。

実際に炭素のみからできたカーボンナノチューブに酸素を1個ずつ入れていきます。例えば、酸素を1個入れると横軸が色に対応する光の波長、縦軸が強度である蛍光スペクトルを見ると、蛍光が明るくなることが分かりました。

最初に作製したサンプルは狙いどおりにうまくいきましたが、その後、急にうまく作ることができなくなりました。それは、酸素を導入するのに、水中に分散させ

たカーボンナノチューブに酸素の原料であるオゾンガスを入れます。化学を専門とする人はよくご存じでしょうが、水温が高ければ高いほどオゾンガスはたくさん水の中に溶解酸素がうまく導入できます。しかし、冬と春に実験したのでは室内の温度が変わり、条件がばらつくことになります。

最初に実験した時は良かったのですが、次は部屋の温度が変わってしまい、うまくいなくなりました。我々は、もともと物理を専門としており、化学の基本をきちんと理解しておらず苦戦しましたが、それに気づいた以降は、きちんとうまく実験ができるようになりました。このようにして、カーボンナノチューブに酸素を2個、3個と導入することで、非常に明るく蛍光させることができるようになりました。

カーボンナノチューブは、もともと何もしなければ、その蛍光効率はわずか1%ですが、酸素を導入することによって20倍明るく光らせることができるようになりました。

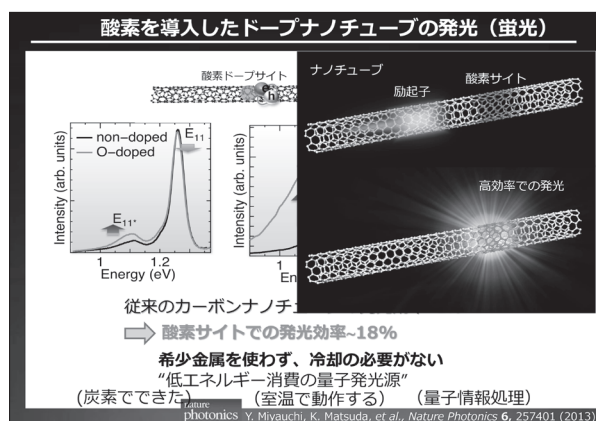
その様子をイメージで示すと、この場所に酸素を導入すると、蛍光の源である電子とホールのペアが留まって寿命が延びて、明るく蛍光する、というものです。

カーボンナノチューブからの蛍光は、炭素だけでできていますから希少金属を使わない材料で、かつ室温、つまり、冷却の必要がない省エネルギーな新しい量子効果を使った光源として使えると我々は考えています。

我々自身は、その学術的な意味、つまりサイエンスとして興味があるわけですが、この研究がどのような技術に発展しうるかということ、一枚だけご紹介します。

我々がふだん使っているインターネットの根幹は、光を使った通信です。私が今まさに使っているレーザーと光を受け取る検出器で情報のやりとりをしています。

次世代の通信では何が求められているかというと、量子通信もしくは量子暗号と呼ばれ



ているものです。

皆さんも、最近、量子コンピューターという言葉が少しずつ聞かれるようになり、量子情報通信なども多少耳にする機会があるかもしれません。これは、通信の際に情報が盗まれないための次世代の通信方式です。

例えば、ここにアリスとボブという人がいて、この間で情報をやりとりするとします。途中でイブという悪い人がいて情報を盗もうとしています。

通常、インターネットの通信では、そこで使用する光は、その中にたくさんの光の粒が含まれています。そうすると、アリスからボブへ情報を載せた光を受け渡しした際に、その中から1個光の粒を盗んだとしても、アリスもボブも盗まれたかどうか分かりません。つまり情報が途中で抜き取られても、それに全く気づけないということになります。

現在の光通信では、インジウムという金属を使ったレーザーが使われています。量子通信では、たった一つ光の粒を含んだ光で通信することが考えられており、そうすれば、アリスからボブとの情報のやりとりでも、途中でイブが光の粒を盗めば、情報が盗まれているということに気づくことができます。

つまり、このような秘匿性の高い通信をするためには、非常に小さいナノメートルの領域から、光の粒を1個だけ取り出すという技術や光源が必要です。今回、カーボンナノチューブの蛍光を強くできた事は、そのような技術に将来繋がっていきます。

つまり、希少金属を使わない炭素でできた、かつ、冷却が必要のない省エネルギーの新しい光源ができる事を、我々は期待しています。

さて、最後に少しだけ、ナノサイエンスでエネルギーを生み出すという話をしたいと思います。我々人類にとって、エネルギーの問題やエネルギーをいかに効率よく生み出すかは、非常に重要な問題です。例えば、再生可能エネルギーの一つとして太陽光を利用した発電が期待されています。

これは、皆さんの家の屋根に載っているようなソーラーパネルがその一つで、光を受け電気に変換するというものです。これを見て分かりますように、ソーラーパネルは、非常に重くかつ固い事が容易に分かります。

このソーラーパネル、つまり太陽電池の性能は効率という量で表わされます。これは、太陽光から受け取ったエネルギーのうち、何%が電気エネルギーに変わったかという量で、この値が高ければ高いほど性能の良い太陽電池ということになります。

我々は、カーボンナノチューブもしくはグラフェンという材料が太陽電池材料として、非常に興味深い材料ではないかと期待して研究をしています。

我々の研究で、このカーボンナノチューブという材料を使った太陽電池を作る様子をビデオにして紹介したものを示します。

ここではシリコンという基板とカーボンナノチューブを組み合わせ、太陽電池をつくれます。

まず、シリコン基板を洗浄します。次に、少しだけ灰色に見えている部分である薄い膜が、カーボンナノチューブの膜になっています。その膜を、小さく切り取ってそれを基板の上に張りつけます。

最後に、電気を取り出さなければいけないため、上側と下側に電極をつけます。これまでの工程が、およそ30分から60分ですので、非常に簡単に太陽電池を作製することができます。

実際に、このように簡単に作製した太陽電池ですので、もしかすると、高校生でもできるかもしれません。その太陽電池に、擬擬太陽光、つまり太陽光を模した光を当てて、そこに流れる電流を計ります。そうすることで、この太陽電池がどの程度の性能を持っているかを測ることができます。

実際にそのようにして作製した太陽電池は、12%の変換効率を持ったものであることがわかります。

最終的に我々は、様々な工夫をして変換効率として17%という非常に高い効率を持った太陽電池をつくることに成功しました。

しかしこれは、我々の最初の狙いとは違うものでした。我々が最初に期待したのは、カーボンナノチューブが光を吸収して、そこで電流の源であるキャリアをつくる層として動作させることを期待していましたが、現実にはそうになっていませんでした。

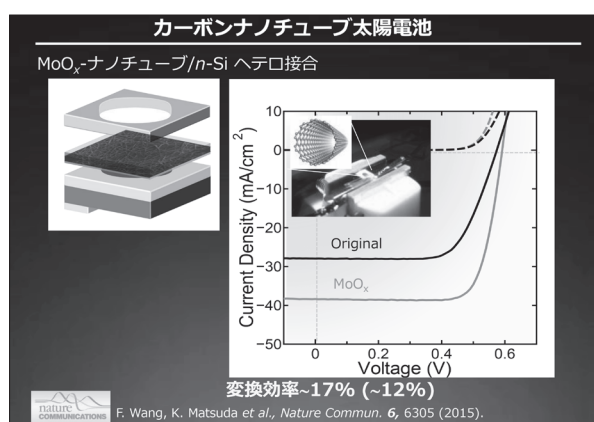
カーボンナノチューブは、光によって他の材料で電子をつくり、それを受け渡すための役割をしているということに気づきました。

結果的に、当初の我々の狙いとは違うものですが、それをもう少しポジティブに捉え、別の使い方を考えています。

ここでは新しい機能を持った太陽電池、例えば、ここで示しているように、別の新しい材料であるペロブスカイトという材料と組み合わせて、折り曲げることができる太陽電池を検討しています。

カーボンナノチューブやグラフェンという材料は、非常に柔軟な材料であるため、折り曲げに対して強く、それと組み合わせ折り曲げられる太陽電池をつくる努力をしています。

もしそれができれば、衣服に太陽電池を張る、そんな用途として使えるかもしれません。つまり、太陽電池としての高い性能と同時に、柔軟性を兼ね備えた太陽電池ができるのではないかと、我々は期待しています。この研究は、同じ宇治キャンパスの中にある別の研究所の先生との共同研究で進めており、両者の良い所を持ち寄って新しい研究に繋げる努力をしています。



以上、私の話をまとめますと、「ナノサイズで拓く新しい光の科学と応用」ということで、光とナノの接点での、お話をしました。「もっと光を」ということで、新しい材料からたくさんの光を取り出して、それを次の技術へと応用していくということ、またナノスケール材料の力を借りて、「エネルギーをたくさん取り出す」、そのような試みをしています。

きょうのお話は、物理を専門としながら工学、化学、様々な分野にまたがった研究でもあり、多くの方々と協働しながら研究を進めています。

以上です。どうもありがとうございました。