

本田財団レポート No. 147

第 125 回 本田財団懇談会 (2013 年 3 月 13 日)

## 「ナノフォトニクス～光でナノを見る～」

大阪大学大学院教授

河 田 聡

## 講師略歴

河田 聡 (かわた さとし)

大阪大学大学院教授・フォトニクスセンター長



### 《略 歴》

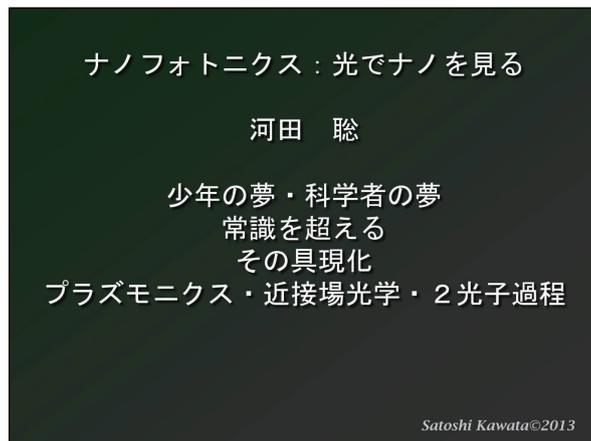
- 1974年 大阪大学工学部応用物理学科卒業
- 1979年 大阪大学大学院博士課程修了、工学博士
- 1979年 カリフォルニア大学アーバイン校電気工学科研究助手
- 1993年 大阪大学工学部教授、応用物理学専攻
- 2000年 国際学術雑誌「Optics Communications」編集長
- 2002年 理化学研究所主任研究員
- 2007年 大阪大学フォトニクスセンター長
- 2012年 応用物理学会副会長

### 《主な受賞歴》

- 1996年 日本IBM科学賞
- 1997年 ダビンチ優秀賞 (仏・LVMH財団)
- 1998年 市村学術賞
- 2002年 島津賞
- 2005年 文部科学大臣表彰 科学技術賞
- 2007年 紫綬褒章賞
- 2008年 日本分光学会学術賞
- 2011年 第8回江崎玲於奈賞

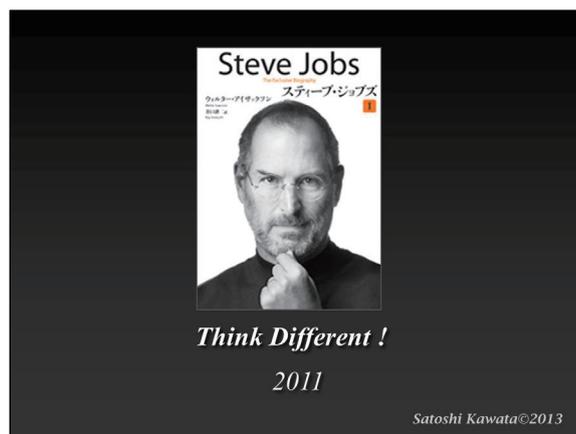
### 《主な社会活動》

- 2003年 大学発ベンチャー、ナノフォトン株式会社を創業
- 2004年 ギネスブックに「世界最小のレーザー造形物」が掲載
- 2008年 文部科学省「一家に1枚、光マップ」を監修
- 2009年 理系博士対象の「科学維新塾」を開塾
- 2010年 「論文・プレゼンの科学」(アドスリー社)を出版



今日のタイトルは、「光でナノを見る」です。私が抱いてきた夢と、それを実現するために常識を超えなければいけなかったという話をします。具現化として、最近世の中で注目の学術分野のプラズモニクス、近接場光学、2光子過程の3つの科学を、できるだけ一般向けにお話します。

## ■ 異端妄説－今日の非常識は明日の常識



図－1

〈図－1〉 1年半ほど前に亡くなりました Steve Jobs が気に入っていたフレーズの1つで、テレビのコマーシャルなどにもよく使われていた言葉が「Think Different!」です。彼はまだ世の中になかった一般向けのパソコンをガレージで作り、売り出しました。さらに True Type Font という字体がコンピュータの中から出てくるレーザープリンターを導入し、iPod、iPhone、iPad を作りました。人と同じことをするのは楽しくない、ほかの人と違うことを考えたいとずっと言っていました。

「Think Different!」という英語がまさにそう。文法が間違っています。わざと間違えて言っているのです。新しいものを生み出す人は、人と違うことをやってみたいという1つの例だと思います。起業家、すなわち会社を興す人だけでなく、芸術家にも必要な感覚です。

John Lennon の「She's got a ticket to ride, but she don't care」、 「My baby don't care」も同じです。これも文法間違いですが、わかって間違えて悪ぶっています。世の中でみんながやっていることと同じことをやっていると、新しい音楽は作れないと思います。人と違うこと、間違っただけを言うのはたいへん勇気がいるというか無謀な感じですが、そういう発想が科学者にも大切だろうと思います。

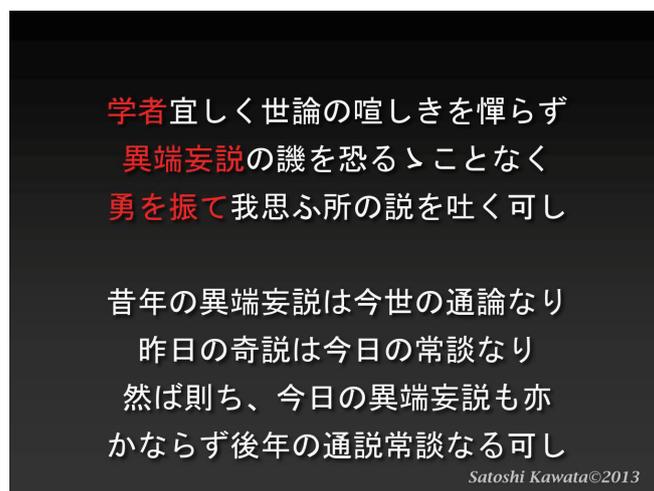


図-2

〈図-2〉 今から 153 年前の明治 8 年に、福沢諭吉が言っています。彼の著書の『文明論之概略』の中に、科学者は異端妄説を言わなければならないと出てきます。「学者宜（よろ）しく世論の喧（かまびす）しきを憚（はばか）らず、異端妄説の譏（そしり）を恐るゝことなく、勇を振（ふるい）て我思ふ所の説を吐（は）くべし」と。そんなことを言ったらみんなが批判する、君は間違っていると言うが、それが怖かったら学者ではないというわけです。

その後「昔年（せきねん）の異端妄説は今世（こんせい）の通論なり。昨日の奇説は今日の常談なり。然（しから）ば則（すなわ）ち今日の異端妄説も亦（また）必ず後年の通説常談なるべし」と。今はそんなことはできないとか、それは原理的に間違っているとされていることが、明日には真実になるかもしれないということです。

「異端」という言葉で思い出すのは、異端尋問所に幽閉されていた Galileo Galilei です。地動説を唱えたために異端尋問所に幽閉され、出てくるときに「それでも地球は回っている」とつぶやいたという話です。

## ■ 異端妄説な夢「光でナノを見たい」

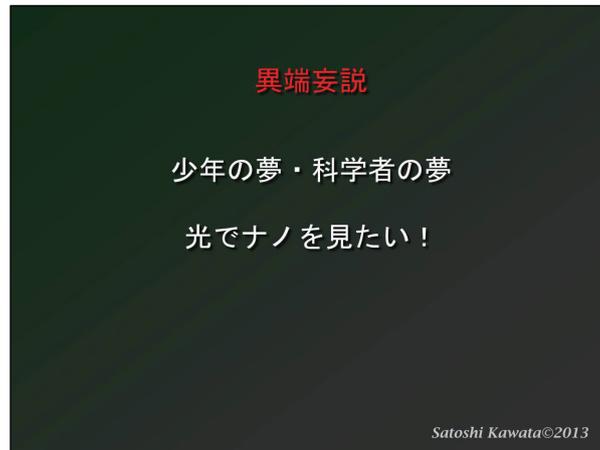


図-3

〈図-3〉 私の異端妄説は、学生のとばかりの夢であり今日のテーマでもある「光でナノを見たい」というものでした。しかし光でナノは見えないと教科書に書いてありました。光には波の性質があって、光は波の大きさ（ミクロンのサイズ）まで広がるのでナノは見えません。けれども、私は分子が見たい、原子が見たいと言ってきました。ベンゼン環という六角形に炭素が並んでいる化学式や C と O による二酸化炭素の図は、教科書に描かれてはいますが実際に目で見たことがありませんでした。タンパクならもっと複雑な化学構造が描かれます。これも見たことはありません。原子核の軌道の上を電子が回っている原子の絵が出てきます。これが本当なのかどうか、やはり見たことはありません。それらを実際に見たいと思ったのです。

当時はナノテクノロジー、AFM（原子間力顕微鏡）や STM（走査型トンネル顕微鏡）が登場する前の時代でしたので、そんなことはばかげた夢だったでしょう。原子、分子の中身までは見えなくても、分子がどう並んでいるかぐらいは見たいのですが、それすら見えない。見たこともないのに、教科書に描いてある図、化学式を暗記しないといけないのです。夢を感じさせる話ではありませんでした。それらを目で見たいというのが私の夢でした。

光は波の性質を持っているので、レンズで絞っても広がってしまうと教科書に書いてあります。回り込んで折れる「回折」という現象が生じると書いてあります。つまり光は必ず広がってしまっていて、非常に小さなものは見えないということです。どのぐらいまで光を絞り込めるかというと、光の波の長さ程度です。波の長さは  $1\mu\text{m}$ （マイクロメートル）程度です。分子の大きさは  $1\text{nm}$ （ナノメートル）ですから、 $1\mu\text{m}$  の 1000 分の 1 です。よって、波の長さの 1000 分の 1 の構造をその波で見ることは不可能であると教わりました。

当時から電子顕微鏡はありました。電子顕微鏡はエネルギーが高いので、波長が光よりずっと短いです。たとえばミトコンドリアは光の波長ぐらいの大きさですが、ミトコンドリアの中の構造を電子顕微鏡できれいに表現することはできていました。それなら電子顕微鏡を使えばよいのではないですか、なぜ光で見たいのでしょうか。

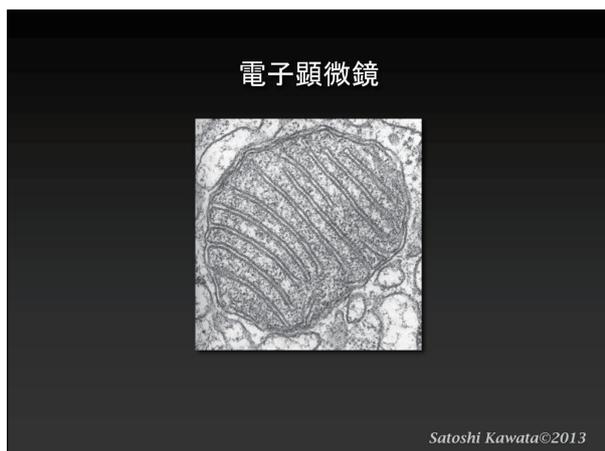


図-4

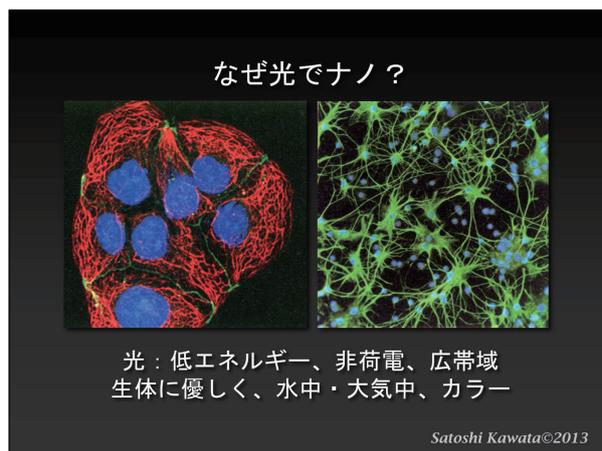


図-5

〈図-4、5〉 電子顕微鏡像は白黒写真で、密度分布を示します。一方、光の顕微鏡像はカラー写真で、色が見えます。色はさまざまな物質の情報を表します。光のエネルギーは低いので細かいものは見えませんが、エネルギーが低いということは、ものに対して優しい、ものを壊さない、ということ。だからものの中身が見えます。また光は電荷を持っていないので、水の中でも、空気の中でも飛んでいきます。液晶プロジェクターでスクリーンを映しているのもそうです。以前はブラウン管、真空の中で電子ビームを走らせ画像を表示していましたが、光を使えば空気を通して遠方のスクリーン上に画像を出すことができます。そういう光の特徴と欠点を両方見ながら、光でナノが見えないかと考えました。



図-6

〈図-6〉 光で遠くのものを見るためには、望遠鏡を使います。望遠鏡でできるだけ細かい構造を見ようとすると、できるだけ大きな反射鏡が必要です。どこまで細かいものが見えるかは、反射鏡の大きさによって決まります。正確には、大きさというより立体角です。どのぐらい大きな立体角でものを見ているかが、どこまで細かい構造を見るかを決めます。しかし星の位置から、地上にある望遠鏡までの角度はすごく小さいです。そのため、互いに近くにある二重星を2つに分離して見ることはなかなか難しく、遠くにある星を高い分解能で見ることができません。

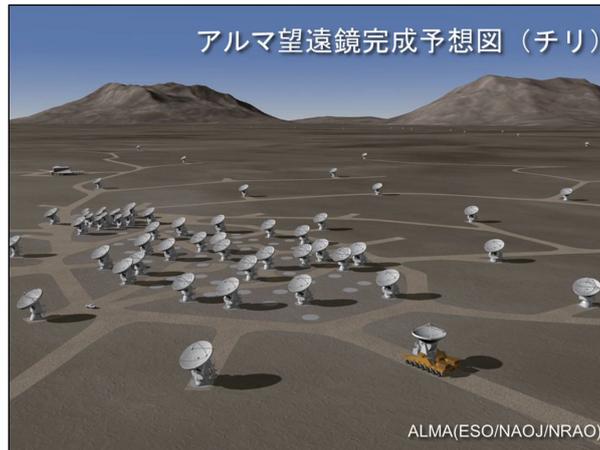


図-7

〈図-7〉 ではどうするかというと、レンズまたは反射鏡を大きくします。1枚では限界があるのでたくさん並べて、1枚ではとても作れないような巨大なレンズミラーを作ります。アルマ望遠鏡などでは、このような望遠鏡が実際に使われています。

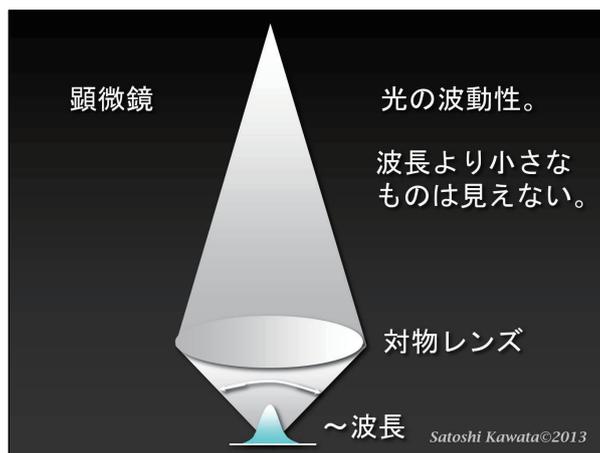


図-8

〈図-8〉 顕微鏡の世界では、観察する試料の近くにレンズを持ってくることができるので、大きな角度でものを見ることができます。顕微鏡の場合はかなり高い分解能、細かい構造を得ることができますが、それでも波動性により波長より細かいものが見えません。無限の大きさのレンズを持って、見たい光の波の長さよりも、正確にはその半分よりも細かい構造を観察することができません。拡大し、拡大し、拡大していくと、結局ぼやけてしまって何も見えません。これは顕微鏡の限界です。

## ■ 逆問題で超える回折限界

学生の頃、それならばこれを超える方法をと、考えました。当時は AFM はまだ生まれていなかったのですが、数理的に解決しようと思いました。逆問題、つまり得られた写真や画像から、見えなかった情報を回復しようとしてみました。

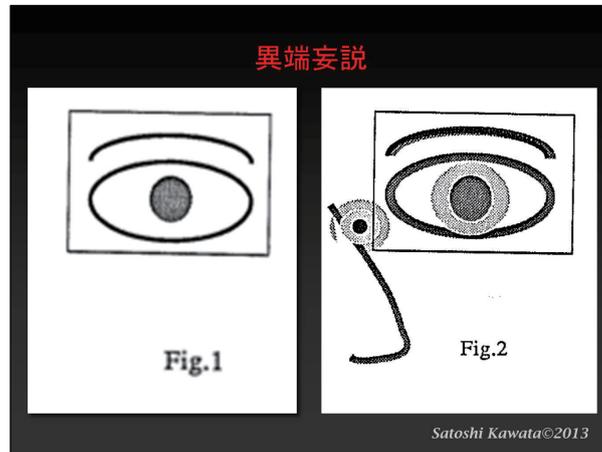


図-9

〈図-9〉 ここに人の目の画像があります (Fig.1)。その目を見ただけで、この人の鼻が見えて口が見えて顔が見えてくるのです。この画像は皆さんの顔の目を切り取ったのではなく、カメラレンズなり何かのレンズを通して見たものです。人の目を通してでもよいです。レンズを通して見ると、レンズによる光の回折限界によって細かい構造は見えません。ぼけています。拡大すればぼけている情報は広がっています。この絵では見えませんが、大げさに言うところの像は全部少しぼけているのです。画面の外にあるほくろのぼけた情報は、この画面の中に入っています。有限の大きさのレンズを使えば、ほくろのぼけの端っこは画面内に入っています。すごく小さな信号ですが、どんな遠くからの情報も必ず画面内に全部入っています (Fig.2)。それを数理的に逆変換すれば、目だけの写真からほくろが見え、鼻が見え、口が見え、顔が見え、宇宙全部が見えるという理屈です。

理屈は正しいのですが、現実には無限の検出感度で S/N 比 (signal-noise ratio, 信号雑音比) の高いディテクターがないといけないため、実現はたいへん難しいのです。レンズの帯域を超えて外を見られるか研究していました。これが私の学位論文でしたが、どうしても現実感がありません。検出器にはノイズがあって、ノイズよりも小さな信号は検出できないのです。

## ■ 光を止める

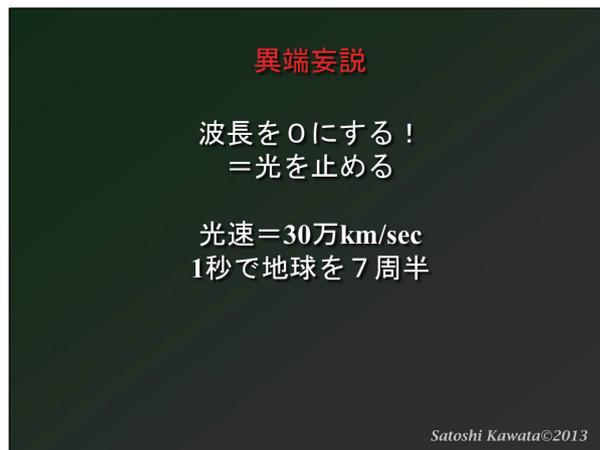


図-10

〈図-10〉　そこで次に考えたことは、波長によって見える構造の細かさに制限があるのであれば、波長を 0 にしたらよいのではないかということです。波の長さが 0 になれば、無限に細かい構造が見えるはずですが。同じ振動数で与えられた赤の光や青の光、全部の波長の光を短くすればよいのです。究極は波長が 0 になればいい。その時光は前に進まなくなり、止まります。ところが、光の速度は 1 秒間に 30 万 km、光は地球を 7 周半回ります。これを止めることは異端妄説そのものです。しかし、実は止まります。

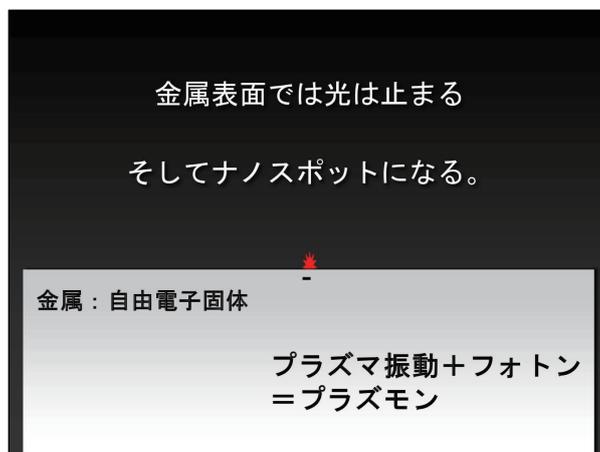


図-11

〈図-11〉　見たい構造のそばに金属を持ってくると、金属の表面で光が止まります。あるいは速度を失います。そしてナノの光スポットを作ります。水の中でも空気の中でも光は進みます。しかし、空気より水のほうが密度は高く、双極子との相互作用が大きいため、水の中の方が光の進み方は遅いのです。金属の中ではどうでしょう。金属には自由電子が入っています。この自由電子を光が揺さぶり相互作用をするので、光の速度はもっと遅くなります。

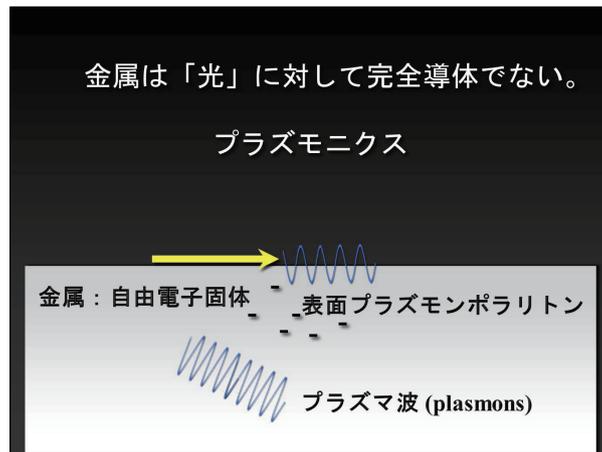


図-12

〈図-12〉 金属の自由電子が集団的に動くと、プラズマ振動（プラズマ波）が起きます。そして加速度をもって電子が動くと、そこには必ず光が発生します。この量子状態を「プラズモンポラリトン」と言います。言い換えると、金属の中にある電子がプラズマ振動すると、光の波が伝わります。プラズマ波と光波は金属内部ではすぐに消えてしましますが、表面では表面波として伝搬します。その波長は、空気を走る光よりも短いのです。

このような現象がなぜ起こるかという、金や銀などの金属は光に対して完全導体ではないからなのです。マイクロ波などの電波領域になると、金属はほぼ完全導体になります。するとプラズモンはなくなります。可視域では、金属は色を持っています。色を持つ領域はプラズマ振動数に近く、自由電子は集団的に揺さぶられて動きます。

表面プラズモンポラリトンは、金属の中の自由電子の集団的振動によって金属表面に生まれた短い波長の光、速度の遅い光と言えます。そういった現象を扱うサイエンスを「プラズモニクス」と呼びます。この言葉ができたのは最近のことです。現象は古くからわかっていますが、それをプラズモニクスと呼んで工業応用、産業応用、医療応用をしようとしてから、まだ 10 年にも満たないと思います。

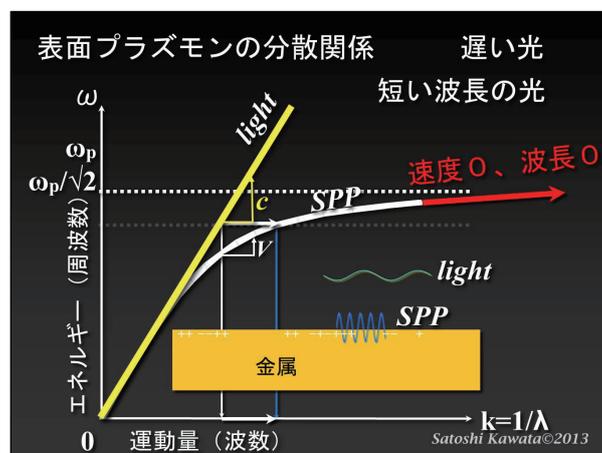


図-13

〈図-13〉 光の速度はどの振動数においても一定の  $3 \times 10^8$  m/sec ですが、表面プラズモン

ポラリトンは、共鳴振動に向かってエネルギーが高くなるほど遅くなります。そして波長が短くなります。究極の現象は紫外域にあり、速度が0、波長が0の光になります。

ここで問題なのは、空気中を伝搬する光と表面プラズモンポラリトンの波長が違うということは、この2つが結合できない、つまり金属の表面に走っている光は空気中に出でこられないことです。短い波長の光が金属表面にあってそこにものを置けば高い分解能の顕微鏡を作り得ますが、その光は遠くからは見えないのです。これが「近接場光学」という原理です。金属表面の光を扱う近接場光学は、「表面プラズモンポラリトンのサイエンス」と言うことができます。

## ■ 金属針で夢を現実に

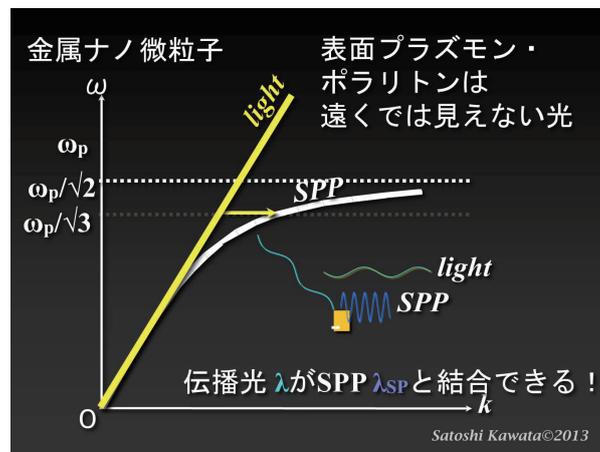


図-14

〈図-14〉 短い波長の光ができて高い分解能の顕微鏡が作れても、その光を遠くで読み出せなければ、つまり現実に我々の目やカメラで観察できなかつたら意味がありません。私が考えたのは金属の表面をほんの一部、波長程度だけの小ささの金属片を使うという原理です。普通の光とプラズモンが作る光は、そこで結合することができます。金属の表面が広いとできないのですが、小さな金属片なら遠くから来る光でもってそこにプラズモンを励起することができます。逆にプラズモンを読み出すこともできます。

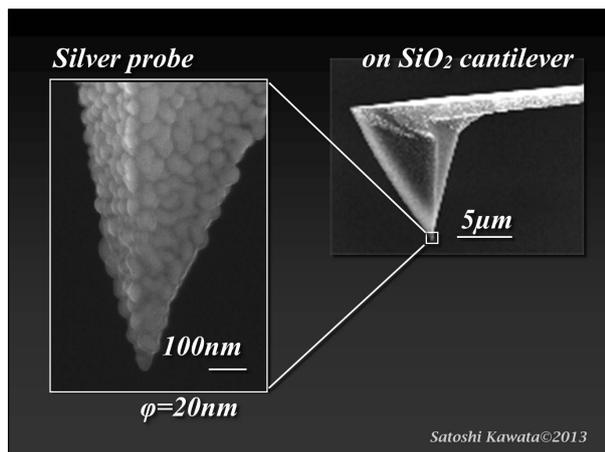


図-15

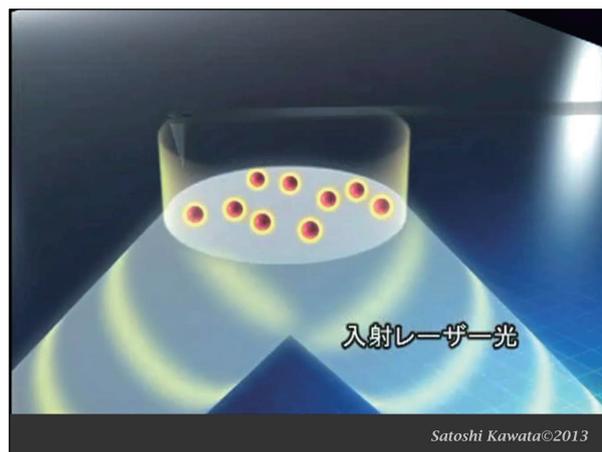


図-16

〈図-15、16〉 次にどうやってこの考え方を顕微鏡に持ち込むか。私たちは金属片ではなく、金属の針を使うことにしました。AFM で使われている針は金属ではないのですが、その先端に銀か金を塗布します。そうすると先端に短い波長の光、プラズモンが発生されます。それが普通の光と結合して遠くへ出ていきます。この針を見たい試料の上で走査します。AFM と同じ走査方法です。針を走査すると、走査中のそれぞれの場所で小さな光のスポットが生成され、その場所の分子、原子との相互作用を遠くに伝えます。それを観察するのです。

この考え方を 1992 年に特許化しました。世界最初です。論文も世界最初です。1994 年 1 月に発表しています。これを使ってナノを見る顕微鏡として世の中に博く貢献できたかという、なかなかそうはいきませんでした。研究室レベルで技術のある人が画像を見せることはできるのですが、一般の人はなかなかうまく使いこなすことができません。いくつか商品化されましたが、ほとんどビジネスになっていませんでした。

そして 2012 年 10 月に特許が切れました。20 年の間にビジネスになっていないと、特許収入が私に全く入りません。特許が切れてからですが、誰もが使える顕微鏡を最近作ることができるようになりました。そのポイントは、針の構造と針の作り方にあります。それはまた別の特許です。もうしばらくしたら発表する予定です。

## ■ 顕微鏡の様々な応用例

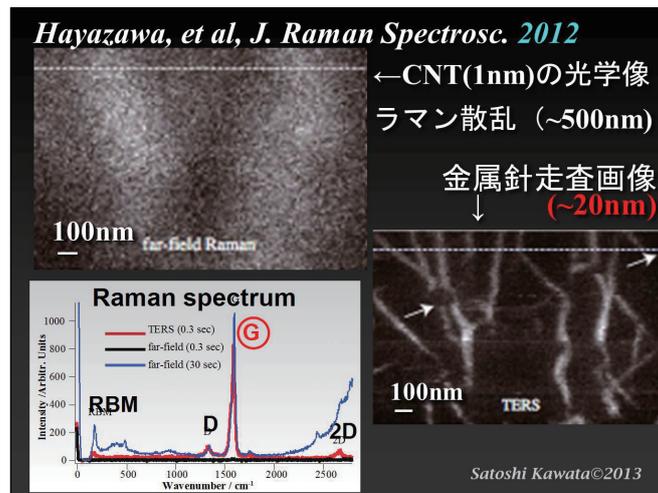


図-17

〈図-17〉 光でナノを見る顕微鏡はどこに使えるでしょう。たとえばカーボンナノチューブやグラフェンなどのナノ材料を、ナノの分解能で観察したいという要求があります。AFMは高さ分布を観察しますが、物質の情報の分布を見るときにはこの装置が使えます。

カーボンナノチューブは、文字通り炭素だけからなる直径が1nm程度の細いチューブです。普通の光学顕微鏡で見ると、ぼんやりして、その分布は見えません（上図）。これをGバンドと呼ばれる格子の振動モードがラマン散乱する光を観察すると、カーボンナノチューブが存在するときのみ信号が得られ、その分布が見えます（左下図）。しかしカーボンナノチューブのサイズが光のスポットよりも遥かに小さいので、ぼんやりとしか見えません。

我々が発明した金属針を走査して同じ領域を観察すると、見事にカーボンナノチューブの分布がはっきりと見えてきます（右下図）。20nmすなわち波長の30分の1の分解能で観察することができます。これまで不可能と言われていたことが、可能になりました。

光で観察すると、分子振動する分子は異なる色で散乱します。これを「ラマン散乱」と言います。1930年のノーベル賞です。

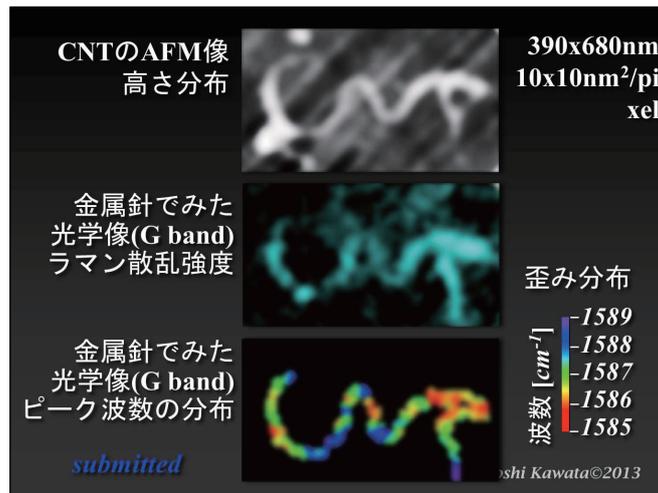


図-18

〈図-18〉 カーボンナノチューブの空間分布を AFM で見ると（上図）、カーボンナノチューブがフラットな基盤の上に載っていることがわかります。一方、光で見ると、それはカーボンナノチューブであることがわかります（中図）。もしカーボンナノチューブが引っ張られると、炭素原子6個で作られる六員環が引っ張られて、その構造がゆがみます。ラマン散乱を使えば、ナノのゆがみ構造を色の違いとして検出することができます（下図）。色の分布のある図は、カーボンナノチューブを「CNT」という文字に並べて観察したナノラマン像です。

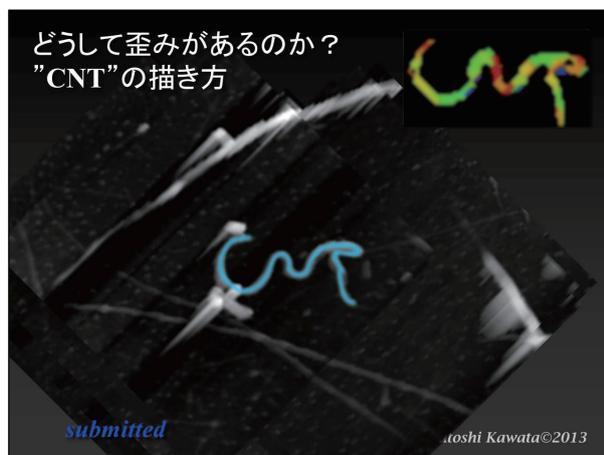


図-19

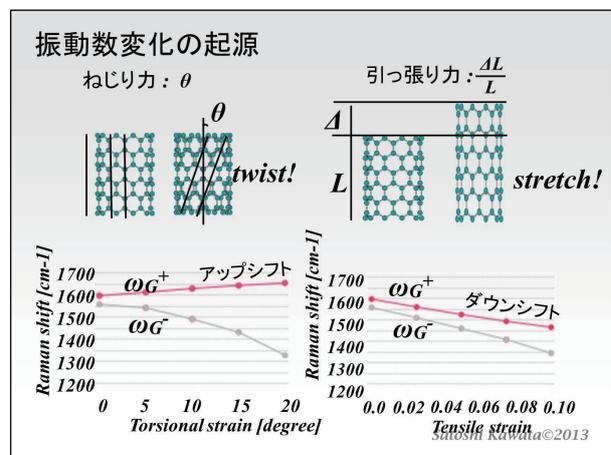


図-20

〈図-19、20〉 これがどうして場所毎に異なったひずみ構造を持っているのか。それは CNT という文字の書き方にあります。この字は、1本の直線のカーボンナノチューブを AFM の針で押したり引いたりしながら作りました。そうすると場所ごとに引っ張られたり、ねじられたり、押されたり、カーボンのチューブの構造がそれぞれ変わってしまいました。構造が変わるとラマン散乱の色が変わります。散乱色を分析することによって、ひずみの空間分布を知ることができます。

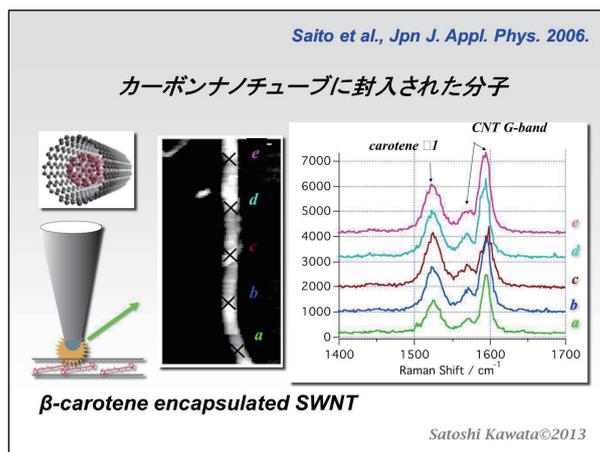


図-21

〈図-21〉 私が作った顕微鏡はレンズも開口もありません。逆に、金属の針で見たところを塞ぎます。金属の針の先端でプラズモンが励起されることによって光が強く共鳴し、ナノのスポットを作ります。金属の針の先端で見た構造を隠しているのではなく、その先端で見た構造を局部的に光らせているのです。開口を開ける、レンズをつけるのと逆のことを考えたわけです。カーボンナノチューブにいろいろな分子、原子を封入することができます。チューブの中にどんな物質がどんな風に入っているかも、この顕微鏡で観察できます。

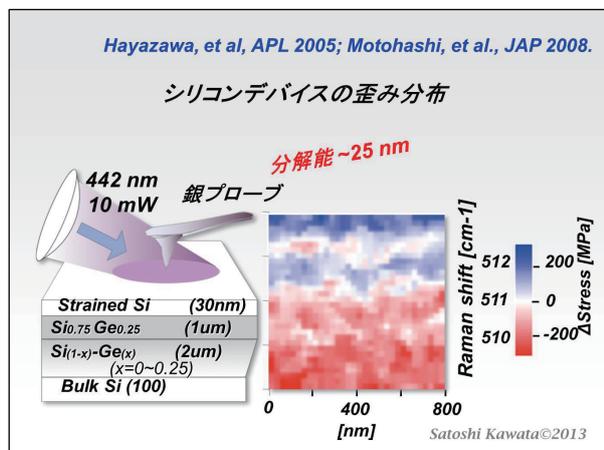


図-22

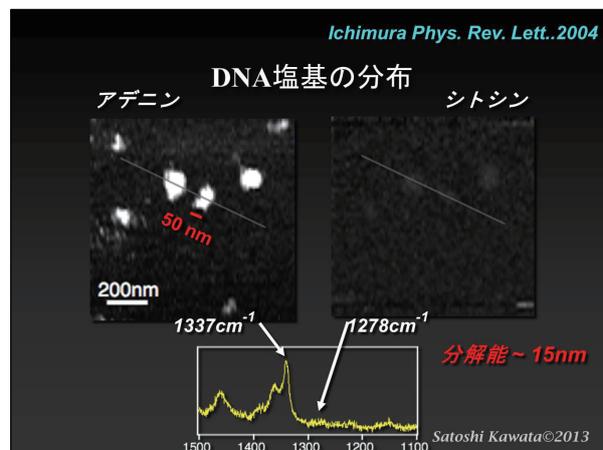


図-23

〈図-22、23〉 最近のデバイスでは、シリコンに意図的にひずみを与えます。その分布も観察できます。DNA の塩基の分布を観察することもできます。アデニン、シトシンはそれぞれ違う振動数で応答しますので、この部分はアデニン、この部分はシトシンと識別して観察できます。



図-24

〈図-24〉 私たちは、針に限らず金属のいろいろなナノ構造、たとえばピラミッドのような構造、小さな球であるとか、周囲だけ金属である球とか、2つの小さな針が向かい合わせに並んだ部分やかごなど、いろいろな構造を作ります。それぞれに異なる応用が考えられています。

## ■ 注目されるプラズモニクス

金属ナノ構造がつくる光の科学  
= プラズモニクス

- スローライト (止まる光)
- 波長の圧縮 (ナノの光スポット)
- 近接場 (遠くで見えない光)
- 電場の増強 (百万倍の増強)
- 波長選択性 (特定の波長が選択)

Satoshi Kawata©2013

図-25

プラズモニクスは何に使えるか

- ナノ顕微鏡・ナノ加工・ナノ回路
- 高効率レーザー・LED、高効率太陽電池
- 癌治療・分子センサー
- 単一分子検出・ラマン分光
- メタマテリアルズ
- カラーホログラム

Satoshi Kawata©2013

図-26

〈図-25、26〉 金属ナノ構造とは、光を止める、波長を短くする、遠くで見えないことに加え、表面で共振していて外に出ないため、光を局所的に増強する、という特徴があります。サイズを変えると色を選べることも特徴でしょう。

こういう機能を使うと、ナノ顕微鏡、ナノ加工、ナノ回路に限らず、高効率の光源や光検出器の開発、癌治療、単一分子の光検出、メタマテリアルズと呼ばれる新しい材料開発など、様々な応用分野が広がります。レーザーにも応用することができます。

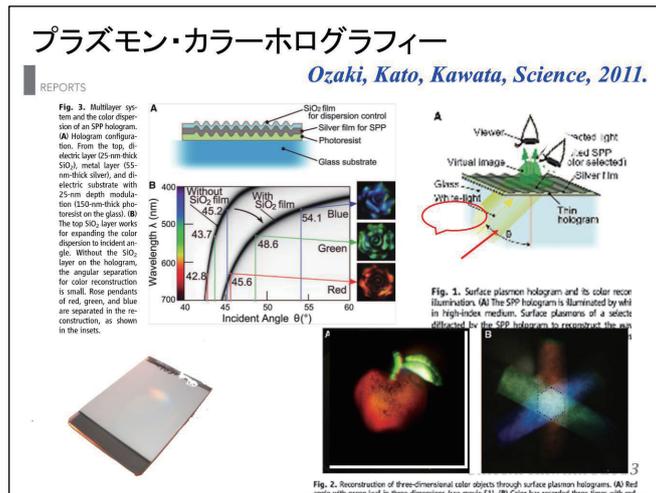


図-27

〈図-27〉 ホログラムもつくりことができます。2012年に『サイエンス』という雑誌に書いた簡単な原理です。映画の世界によく登場するホログラムは、実はまだ実用化されていません。実用化されていない最大の理由は、カラーにならないからです。白色光を使うと、それぞれのカラーが分離して表現できずに、混ざって重なります。クレジットカードに使われるホログラムは、角度を変えたら色が変わってしまいます。そこで、角度を変えても色が変わらない、見る方向を変えても色が変わらない、複数の色が同時に見えるカラーのホログラムが必要です。プラズモンを活用すると、完全にカラーの3次元立体像をバーチャルに再生することができました。



図-28

〈図-28〉 金属のナノシェル（カプセル）を使って、近赤外の光だけを增強して癌治療をしているグループもいます。この数年の間に、金属のナノ構造を使った光のナノテクノロジー、プラズモニクスは社会的に大きく注目を集めるようになりました。

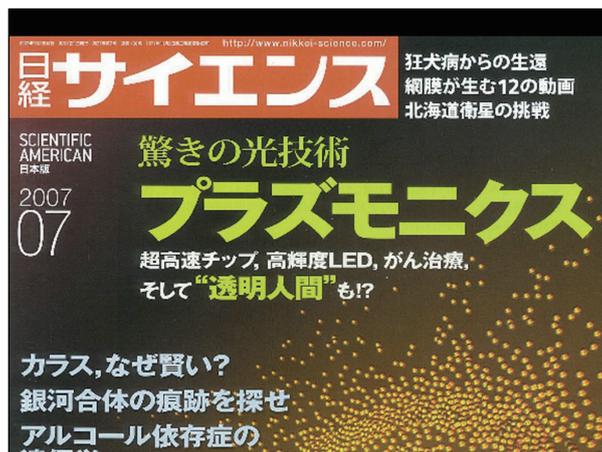


図-29

〈図-29〉 これは『日経サイエンス』の表紙です。「驚きの光技術 プラズモニクス 超高速チップ、高輝度 LED、がん治療、そして“透明人間”も!?’と書いてあります。『Nature』などの雑誌でも何度も取り上げられています。

### ■ プラズモニクスの限界を超える

しかしプラズモニクスにも限界はあります。先ほどお見せしたデータの分解能は、10nm から 20nm 程度です。光の波長の数十分の 1 なのでとんでもなく異端妄説ですが、もし分子を見ようとする、10nm はまだまだ大きい。原子を見ようとする、さらにまだまだ大きいのです。しかしあまりに金属をとがらせすぎると、空間が狭すぎて金属の自由電子が集団的に振動できなくなってしまいます。そうするとプラズモンは発生できなくなります。結局 10nm ぐらいが金属針の先端径の最小限界であり、そのサイズが空間分解能の限界になります。それをもっと高く見ようとしたら、何らかのトリックが必要です。

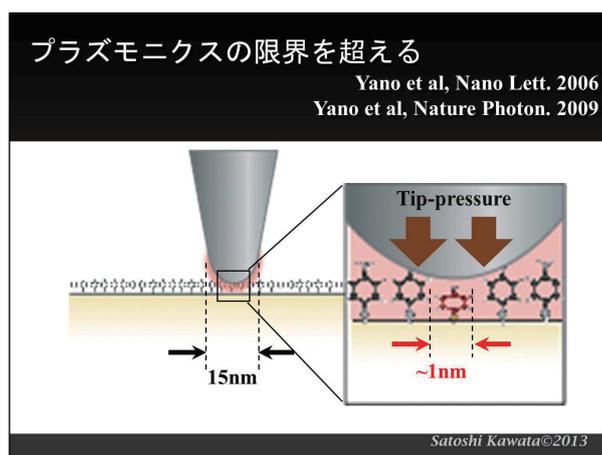


図-30

〈図-30〉 私たちは最近、1nm が見えると言い出しました。新たなる異端妄説です。それはプラズモニクスの限界を超えるという話です。金属の針を観察試料に近づけて、接触させて、押しつけて、さらに力をかけます。そうすると、試料表面の分子が金属探針先端によって順番

に1つずつひずみを受けます。分子のひずみはラマン散乱光の色を変えます。ラマン散乱の強度ではなくスペクトル変化をプロットすると、1nmの分解能でカーボンナノチューブやDNA分子のナノクリスタルを観察できるようになりました。

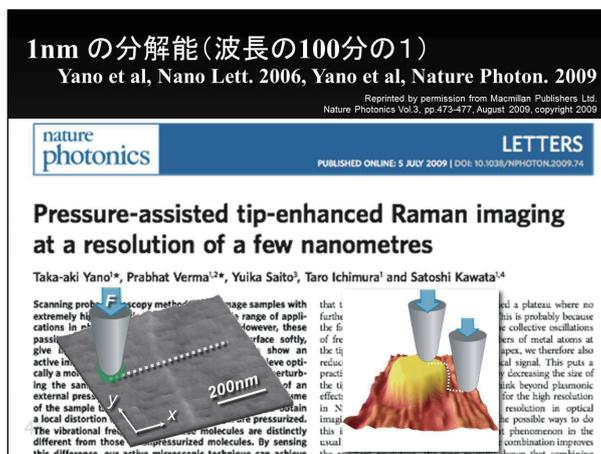


図-31

〈図-31〉 私たちは1nmと主張しましたが、雑誌のエディターは4nmだと主張されました。サイエンスの雑誌ではあまりないことですが、エディターと私たちの両方が妥協して「a few nanometres」という表現になりました。論文は3、4年ほど前に出版されました。

## ■ 2光子光重合を用いた3次元ナノ技術

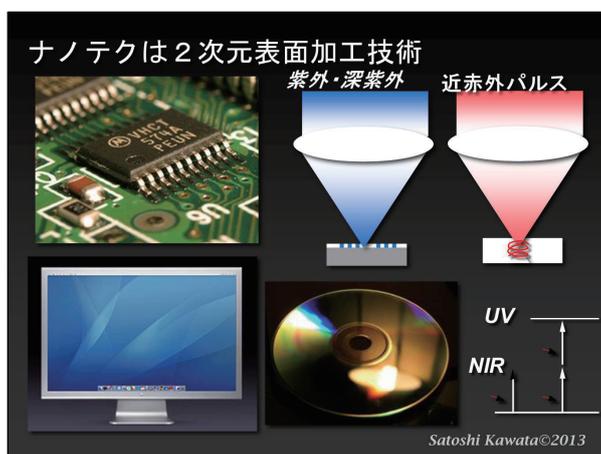


図-32

〈図-32〉 光でナノを見て操る、あるいは刻むもう1つの異端妄説をご紹介します。一般にナノテクノロジーは、2次元の表面加工技術です。シリコンの表面を酸化させる、表面を削る、表面に金属を載せる、という表面加工技術であって、3次元の内部を加工・操作することは困難です。そこで紫外線（最近はもっと短い波長の光）を使って、シリコンの表面に塗布したフォトレジスト（光硬化性樹脂）にナノ構造を描いています。

私たちは、物体の内部に3次元的に構造を作りたいと考えました。フォトレジストは近赤外

の光を吸収しないので、近赤外光を使えば光はフォトレジストの内部まで入って通り抜けます。近赤外のパルスレーザー（短い時間だけ光るレーザー）を使うと、フォーカス点に高い光密度が瞬間的に生まれます。このときにフォトレジストは、光子を2つ同時に吸収することができます。これを「2光子吸収」と言います。近赤外の2つの光子（フォトン）は、紫外の1つの光子と同じ振る舞いを示します。紫外のフォトン1つは近赤外のフォトン2つ分のエネルギーを持つからです。近赤外光に対して透明なフォトレジストの中で、フォーカス点だけで紫外光を吸収するのです。



図－33

〈図－33〉 2光子吸収現象を使うと、分厚い光硬化性樹脂に3次的に立体構造を描くことができます。写真は高さが5μm、長さが8μmの牛です。その細かさは120nmです。現在では、25nmの細かさで描くことができます。2光子過程という光と材料、双方の非線形性を使って、3次元の立体構造を描くのです。実は牛の内臓も作ることができます。レーザーで樹脂を硬化させてプラスチックにした後、光の当たっていない部分の樹脂を洗い流します。

10年ぐらい前にこのアイデアを提案しました。その後、たくさんの研究者が世界中でこれと同じようなものを作るようになりました。ロボットを作ったり、自動車を作ったりしました。でもそれら人工物は形が簡単です。複雑なのは動物、生き物です。神様が創った生き物である牛、犬、馬。毛並みからして緻密です。神の創造物がいちばん優れているのだなあと、動物を作って実感しました。では3次元ナノ構造物を何に使うか。

1986年にEric Drexlerが『Engines of Creation: The Coming Era of Nanotechnology』という本を書きました。これがClinton大統領のナノテクノロジー戦略につながります。この本の中でマイクロマシン、ナノの分解能でサイズがミクロンのロボットを作りましようと言っています。体の中でこのロボットが癌を退治するとも書かれています。

『ミクロの決死圏』という映画があります。人間の体を小さくして血管の中に入り、科学者である患者さんの脳内出血を治療に行き、最後は目の涙から帰ってくる話だったと思います。そういうことに使えるのではないかと思います。形を作るだけではおもしろくないので、動かしたいとも考えました。

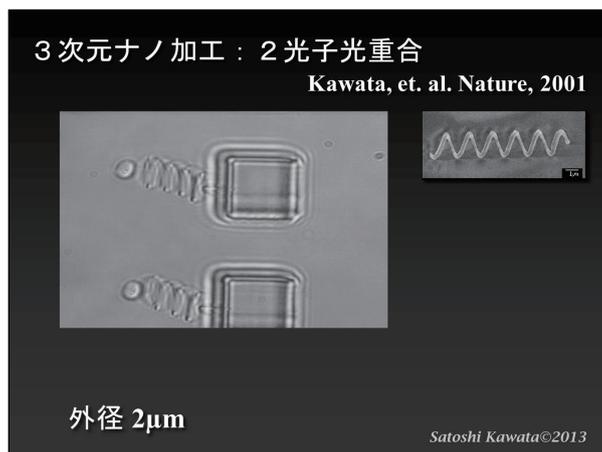


図-34

〈図-34〉 これはサイズがミクロンのばねです。左端を止めておいて右のキューブを引っ張って離すと、バネがついてきます。液体中での実験です。ナノのバネのばね定数も計算しました。

どうやってこんな小さなコイルを四角いアンカーにくっつけ、先端にビーズをつけたかという、ビーズ、キューブ、コイルは全部一体成形です。先ほどの牛の作成方法で作りました。小さなビーズを捕まえて引っ張って離すのは、レーザービームトラッピングという、光の放射圧でものを捕まえるテクノロジーを使っています。

### ■ 3次元ナノ技術の応用例

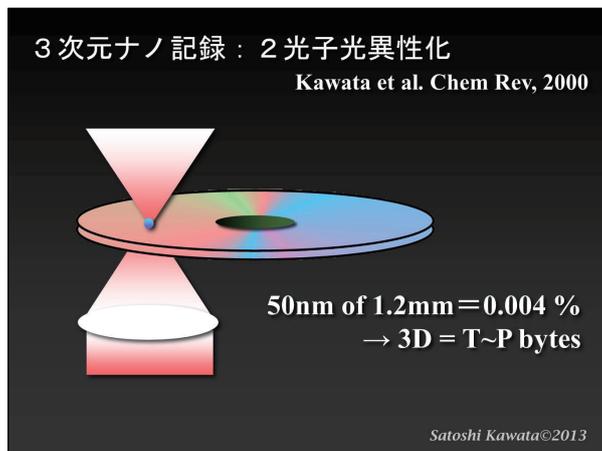


図-35

〈図-35〉 ナノの細かきで大きさがミクロンの構造を立体的に作れると、いろいろな応用が考えられます。たとえばコンパクトディスクは 1.2mm（ミリはミクロンの千倍、ナノの百万倍大きな単位）の厚さがありますから、その中にミクロンの牛をたくさん描き込めます。牛ではなく、デジタルデータを3次元的に書き込むと、テラバイト、ペタバイトの光ディスクが作れるだろうと10年ほど前に提案し、実際に作りました。



図-36

〈図-36〉 第1層の5 $\mu\text{m}$ 下に第2層があって、またその5 $\mu\text{m}$ 下に第3層があります。26層作って、それぞれの層にデータを記録して再生できることを確認しました。26は層数の限界ではありません。アルファベットの文字数です。中国の人たちは漢字を使ってもっともっとたくさんの層数を記録しました。Clinton大統領が2000年の所信表明で、角砂糖1個の中に連邦議会図書館の情報を全部書き込みたいと言いましたが、私たちは実際に1センチ角のメモリを作りました。この3次元光メモリは書き換え可能です。書いて読んで消して、また書いて読んで消して、を繰り返します。これができるのは光異性化材料を使っているからです。記録するレーザーと消去するレーザーの波長は異なります。その原理はやはり2光子吸収ですが、この場合は2光子でデータを記録する色素を異性化します。

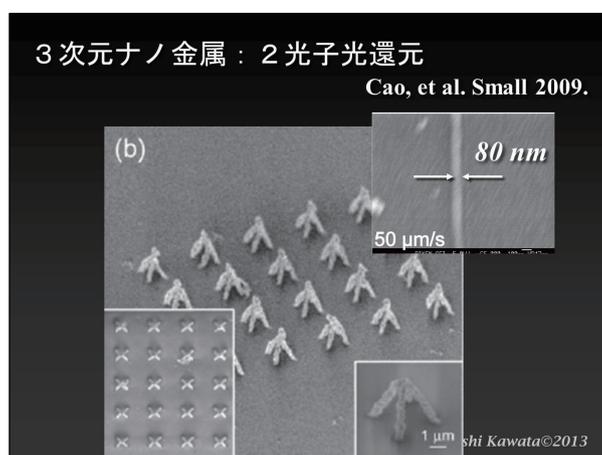
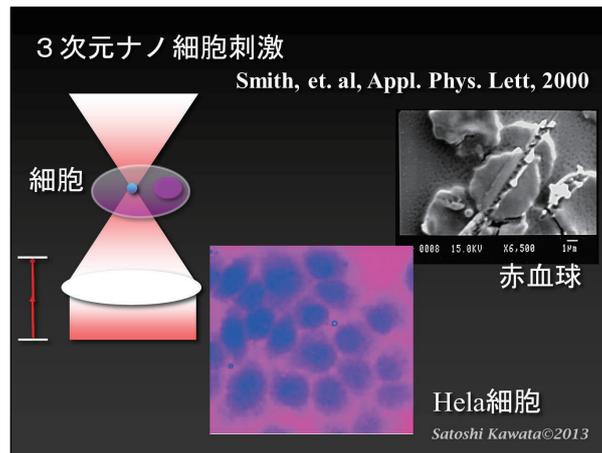


図-37

〈図-37〉 金属でも3次元の立体構造が作れます。2光子で光を吸収し、溶液に含まれる金属イオンをレーザーの焦点位置で還元します。2光子光還元を使えば、3次元の金属のナノ構造が作れます。



図一38

〈図一38〉 細胞の中にも、ミクロンの牛を描き込むことができます。これは光に応答する、細胞の機能解明の研究に繋がります。細胞の中の特定の部分にレーザービームを2光子で当てると、その特定の部分が光刺激を受けて、そこからカルシウムイオンが放出されます。そして細胞から細胞へ情報が伝達していく様子を観察することができます。

## ■ 起業による社会貢献

異端妄説なるナノテクノロジーの話をいくつか紹介してきましたが、別の話を加えたいと思います。それは起業についてです。ここまでお話したような新しいアイデアを発想し、実証するのは科学者です。しかし私はその成果をもっと世の中に使ってほしいと思うようになり、大学教授の兼業・兼職の規制緩和が行われたのを機に、学生たちと会社を興しました。

それまでは、国立大学の教授が会社を興して金を儲けるなどということはとんでもないことで、国家公務員としてやってはいけないことだとずっと言われてきました。特定の私企業と付き合い、その企業のためになるようなことをやるのはいけません、と言われてきました。それが2002年10月1日の規制緩和以降は、大学人も会社を興しなさい、私企業と産学連携しなさいと言われるようになりました。私は、自分たちが作りだしたテクノロジーを製品化したいと思いました。



図-39

〈図-39〉 私の起業は規制緩和後あまりに早かったので、新聞の一面に載るほどの騒ぎでした。そこにはリスクがあると、2面の解説に出ています。2年半たってやっと製品を発表しました。先に述べたナノ顕微鏡や3次元ナノテクは一般の人が使うには技術が高すぎて、そのときは製品化できる実感がありませんでした。10年たった今なら、普通の人にも使っていただけそうに思います。

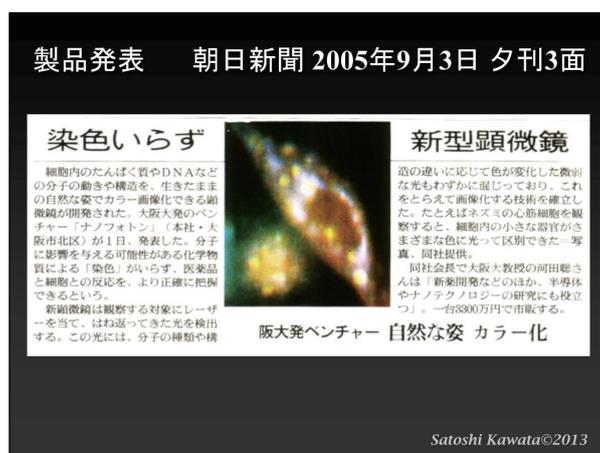


図-40

〈図-40〉 私は、分子の分布が見えるラマン顕微鏡を商品にしようと考えました。その頃は顕微ラマン分光装置はありましたが、画像を見る装置ではありませんでした。画像が見られるラマン顕微鏡ができれば、細胞を染めずに細胞の中の分子の分布が見えます。顕微鏡ですから、細胞だけに限らず他にもいろいろな試料の分子分布が見えるはずです。その後レーザー走査ラマン顕微鏡の販売を始めました。2005年のことです。



図-41

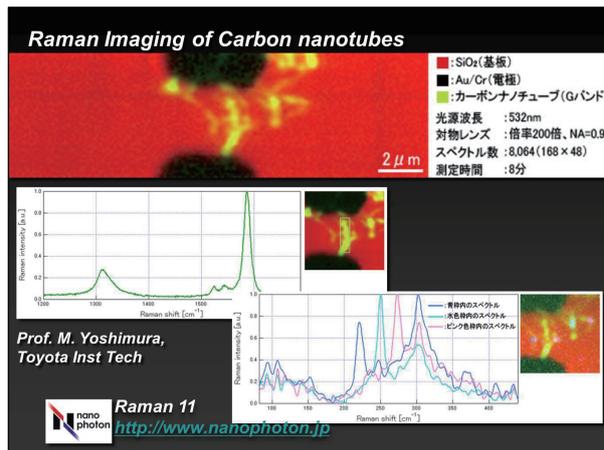


図-42

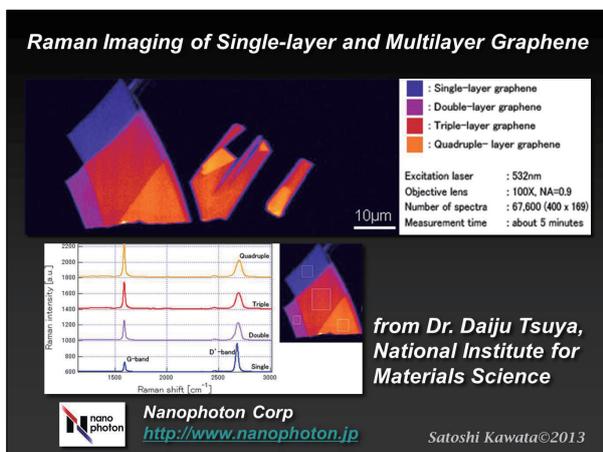


図-43

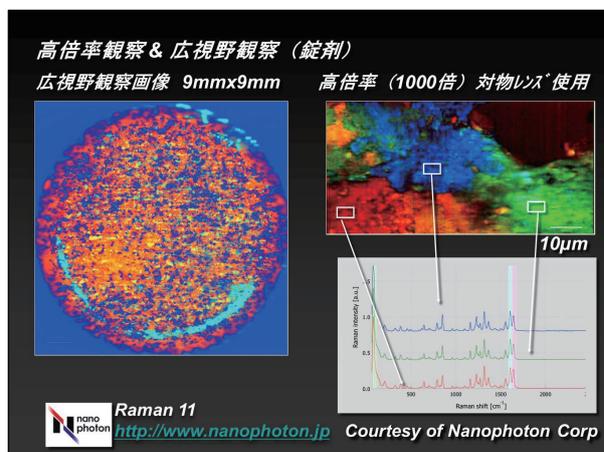


図-44

〈図-41~44〉 昨年はセンチメートル・スケールで分子の分布を見る顕微鏡を作りました。これはもう顕微鏡とは呼べないかもしれません。通常はできるだけ高い倍率で小さいものを見たいと思うのですが、大きいものが見たいというマーケットからの要請があったからです。カーボンナノチューブを観察するとか、最近ではグラフェンなどのナノカーボン材料の分野や、薬剤、錠剤などの医薬分野、バイオサイエンスの分野でラマン顕微鏡を使っています。細胞のアポトーシス、つまり細胞が自殺していく様子をリアルタイムで見ることにも使われます。この顕微鏡は iPad で操作できます。結果の画面も iPad に出てきます。だから、実験者は顕微鏡に直接触れなくても測定できます。ナノの物体観察には、できるだけ顕微鏡に触って動かしてしまったり、体温や声による影響を与えたりしないようにしたいのです。

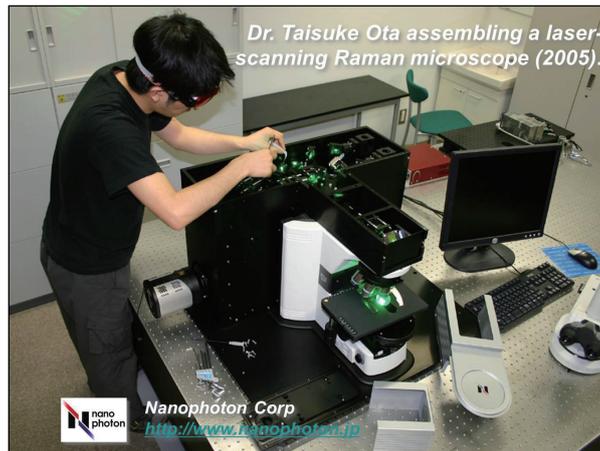
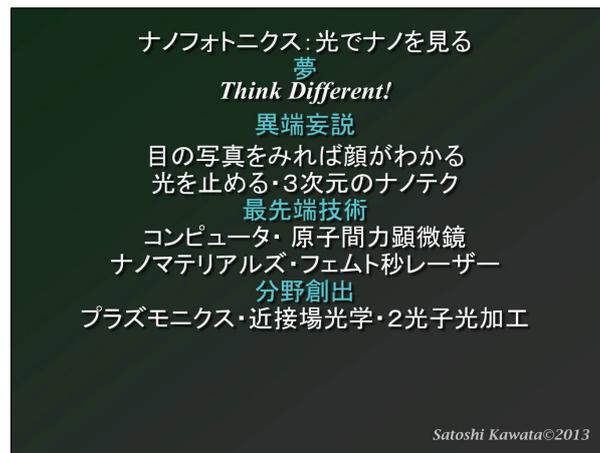


図-45

〈図-45〉 私の研究室で学位を取って卒業して、ポスドクで何年か経験を積んだ連中が、この会社に就職して顕微鏡を作っています。子どものときにプラモデルを作って楽しんでいただけのように、生き生きと実験や開発、製造をこなしています。論文発表するのも喜びでしょうが、自分が開発して自分が製作した製品にお金を出して買ってくれる人がいることも、彼らの喜びです。会社は社員が13人しかいませんが、8人が博士号を持っています。MBAを持っている人も2人います。高学歴でとんでもなく理屈に強い人たちの集団ですが、その人たちが製造し営業し、そして販売しています。

当初は、大学発ベンチャービジネスなら製造業ではなく、IT やサービス事業をやりなさいと多くの人にアドバイスされました。測定委託や消耗品で儲けなさいとも言われました。これに耳を貸さず、異端妄説で製造業にこだわりました。製造業をやらないのだったら私がやる必要はないと思ったからです。いま年間3億円ぐらいの売り上げです。東北大学、東京大学、大阪大学、神戸大学、いろいろな大学から強者どもが集まって、一緒にこの会社をやっています。

## ■ おわりに



図－46

〈図－46〉 今日にはナノフォトニクス、光でナノを見る、刻むという話をさせていただきました。私はいつも、サイエンスを学ぶよりもサイエンスを生み出したいという夢を持って生きてきました。人と違う考えでそれを実現したいと思います。数理科学的な研究から入り、原理開発をしたり、材料開発をしたり、アプローチはコロコロ変わりました。

異端妄説を唱えながら、数理的にはコンピュータ、光を止める原理実現には AFM、試料はナノカーボンなどのナノマテリアルズ、光源はフェムト秒レーザーなど、世の中で言う最先端の科学技術を駆使しました。その結果として、プラズモニクス、近接場光学、2光子光加工といった分野が創出できました。そして産業創出にも少し貢献できつつあると思います。そのことが今日呼んでいただいた本田財団、本田宗一郎さんの考え方に少しでもつながればうれしいと考えます。

ご清聴、ありがとうございました。

### 【質疑応答】

参加者： すばらしいお話をありがとうございました。聞きたいのはアントレプレナーの話です。多額の科学技術の予算がついて、産学連携でいろいろやれと文部科学省は言っていますが、日本の場合はアントレプレナーマインドがどうしてもなかなか見えません。それを進めるにはどうしたらいいと思われませんか。

河田： アントレプレナーマインドは国、政策によって大きく変わると思います。私の場合は大学を出て、アメリカに行きました。1979年に学位を取って、ポスドクでした。Steve Jobsがアップルコンピュータを作った頃です。周りでみんながガレージでものを作り、起業している様子を目にしました。教授になることよりも、自分で会社を興すことの方がかっこいいと思いました。リスクを持って冒険することや異端妄説を言うことを「かっこいい」「すごい」と褒める文化が日本にも欲しいですね。冒険への憧れがないと、ベンチャービジネスはできないでしょう。

日本に限らずアメリカもそうですが、今はどれだけ研究費を獲得したかという、研究費の額でお互いを評価し自慢し合うカルチャーになっています。私は、いかにお金を使わずに『Nature』に論文を書いたかが自分の自慢だと学生によく言います。お金を使わずにやった研究が誇りであって、お金をたくさん使ったら成果がでて当たり前です。

論文の成果や、大きなプロジェクトを獲得したことを尊敬して褒めるよりも、どれだけ人と違うことをやるかを認めて褒めてあげることです。そういうモデルが周りにもっとたくさんないといけません。大学発ベンチャーは 1000 社、1500 社とたくさんありましたが、ほとんど残っていません。休眠会社になっています。成果のない冒険に対する評価と励ましがありません。

助教授、助手がもし自分で会社を興して成功したら、日本では教授になるのは遅れるのではないのでしょうか。そんなことをやる暇があるのなら、もっとしっかり大学の研究をやりなさいと言われませんか。リスクを負って冒険する人たちをもっと応援する文化をつくるのが大事だと思います。政府や役所にはなかなか難しいでしょう。それぞれの分野での有名な先生が、起業を試みる若い科学者や学生たちをもっと褒めるのが良いと思います。外国へ行かないという話も同じだと思います。外国へ行かなくても日本で研究はできるというのではなく、海外に行く学生をもっと褒めてあげればよいと思います。

もう 1 つは、失敗することを褒めることです。失敗しない人から成功は生まれません。失敗しない人は人のまねをします。人のまねをすれば失敗しませんから。研究の失敗、勘違いをもっと褒めてあげて、プラス思考でポジティブなメッセージを与えて欲しい。日本人は減点主義、ネガティブ志向が強いかもしれません。この何年間かはさらに強くなってきました。

そんな中にも元気な人はいます。東大の応物を去年出て、新卒で私の会社に入社し営業をやっている博士がいます。そんな人たちを応援したいですね。優秀な人はたくさんいるはずですが、仕組みもありますが、文化にも問題があるかもしれません。



■このレポートは平成 25 年 3 月 13 日東京會館において行われた、第 125 回本田財団懇談会の講演の要旨をまとめたものです。本田財団のホームページにも掲載されております。講演録を私的以外に使用される場合は、事前に当財団の許可を得てください。

発行所 **公益財団法人 本田財団**  
104-0028 東京都中央区八重洲2-6-20ホンダ八重洲ビル  
Tel.03-3274-5125 Fax.03-3274-5103  
<http://www.hondafoundation.jp>

発行者 松澤 聡