

— 荒川先生は、現在多方面で活用されている半導体レーザーの課題を克服した「量子ドットレーザー」の理論構築から実用化に取り組んでこられました。その「量子ドットレーザー」とはどんなものなのか、順を追って教えてくださいませんか？

荒川 半導体レーザーは、小型で省エネのレーザー光として様々な分野で活用されています。ごく身近な製品ではDVDやブルーレイなどの光学ディスクの読み書きや光通信などに活用されています。しかし、半導体レーザーは温度変化などが起こると思うような制御が出来にくいなどの課題がありました。その課題を解決した技術が「量子ドットレーザー」です。

大ざっぱに言うと「量子ドットというナノサイズの箱」に「電子を閉じ込める」ことで、あらゆる場所で使える利便性・質・エネルギー効率などにすぐれたレーザー光が得られる、それが「量子ドットレーザー」ということになります。

— それはものすごく微小な“ナノレベルの技術”ということですね。

荒川 量子ドットの「箱」のスケールは10ナノメートルほどです。髪の毛の太さが50ミクロンとされていますからその5万分の1程度ですね。DNAのらせん構造の周期が3~4ナノメートルですので、それに近いようなサイズです。

最近よく耳にするようになったナ

ノサイエンスやナノテクノロジーという世界は「量子力学」という学問に支配されている分野になります。

ナノテクノロジーという言葉が社会に頻繁に登場するようになったのは、アメリカのクリントン大統領の時代で2000年頃です。しかし学問の分野ではもっと前から研究されていました。リチャード・ファインマンという有名な素粒子物理学者が、原子レベルでモノを作るような考えを唱えたのが1959年ですから、50年以上も前になります。当時は考えを唱えただけですが、記録上、ナノテクノロジーの始まりとも言われています。

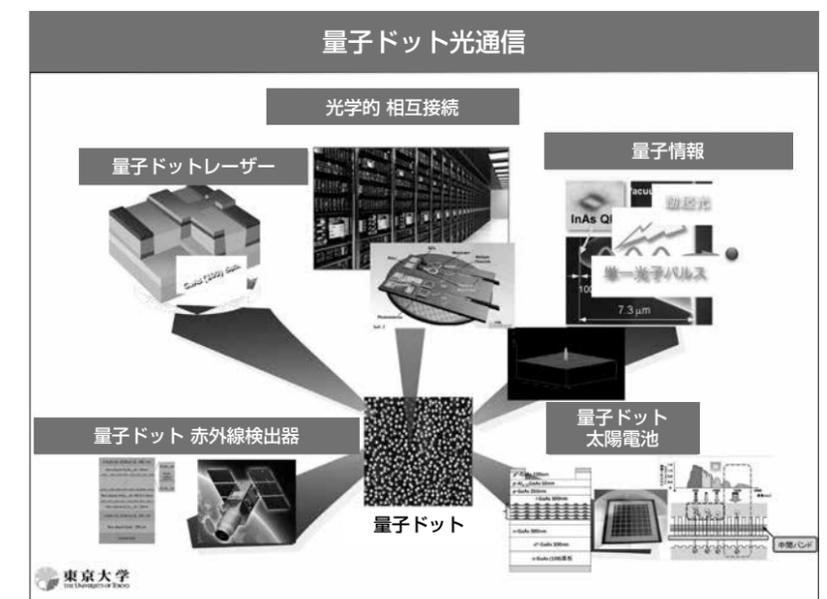
**量子ドットは
超スマート社会を創出する
国家プロジェクト技術**

— 量子ドットは超最先端のイノベーションを創出するテクノロジー

として、国家プロジェクトレベルで様々な取り組みがあるとお聞きしています。詳細な理論を何う前に、どんな実用例やこれからの応用が見込まれているのでしょうか？

荒川 既にベンチャー企業から量子ドットレーザーのチップは300万チップ以上の量産出荷を果たしています。実用例や活用が見込まれている分野は様々なありますが、まず、量子ドットレーザーは使う環境の温度が変化しても性能が変わらない、つまり温度安定性がよいという特徴があります。そのため従来の半導体レーザーではとても想定出来なかった場所で使えるのです。

例えば高温の環境では200℃以上でも使えるので、これまでの半導体レーザーは使用できなかった油田や砂漠、宇宙空間などでも使えます。



科学の
峰々 94

東京大学 ナノ量子情報エレクトロニクス研究機構 機構長
東京大学 生産技術研究所光電子融合研究センター センター長

荒川 泰彦 先生 に聞く
世界の超スマート社会を切り拓く
「量子ドットレーザー」 上

オリジナルの理論提案から技術開発までの36年

聞き手：南 明則 日本科学機器協会 広報副委員長
佐藤 文俊 同 同
谷尾 俊昭 同 広報委員
藏満 邦弘 同 専務理事
岡田 康弘 同 事務局長
(取材・撮影・編集協力：クリエイティブ・レイ(株) 安井久雄)

取材日：2017年12月14日
東京科学機器協会会議室

荒川 泰彦 先生のプロフィール

〈経歴〉

- 1975年 東京大学工学部電子工学科卒業
- 1980年 東京大学工学系研究科電気工学専門課程修了 工学博士
- 1980年 東京大学生産技術研究所講師
- 1981年 東京大学生産技術研究所助教授
- 1984年～1986年 カリフォルニア工科大学客員研究員
- 1993年 東京大学生産技術研究所教授
- 2006年 東京大学ナノ量子情報エレクトロニクス研究機構長
- 2008年 21・22期日本学術会議会員
- 2012年 東京大学生産技術研究所・光電子融合研究センター長
- 2014年～2017年 国際光学委員会(ICO)会長
- 2017年 全米工学アカデミー外国人会員

〈主な受賞〉

- 1991年 電子情報通信学会業績賞
- 1993年 服部報公賞
- 2002年 Quantum Devices賞
- 2004年 江崎玲於奈賞 / IEEE/LEOS William Streifer賞
- 2007年 藤原賞 / 産学官連携功労者 内閣総理大臣賞
- 2009年 IEEE David Sarnoff 賞 / 紫綬褒章
- 2010年 C&C賞
- 2011年 Heinrich Welker賞 / Nick Holonyak, Jr.賞
- 2014年 応用物理学会業績賞
- 2017年 日本学士院賞



エネルギーを変え、制御出来るのが量子ドットの2つ目の特徴です。

この特性を説明するためには、電子が「粒子」と「波」の2つの性質を持っていることに触れる必要があります。といっても電子が形状を変えるわけではありません。人間が電子を粒ととらえるか、波ととらえるかによるものです。

ここまではもっぱら電子を粒子ととらえて、量子ドットのことをお話してきました。では「波」はどういう現象を示すかということ、箱の大きさを変えると電子の周波数が変わられるわけです。この仕組みのもと、箱の大きさを変えることで電子のエネルギーを変えられるのです。

周波数が変わるとエネルギーが変わるということは、管楽器をイメージすると少し想像しやすいかもしれません。音は周波数の波と波の間、これを波長と言いますが、これが大きいと低い音になり、小さいと高い音になります。管楽器の管が大きいと低い音が出て、管を小さくしていくと高い音になるわけでした、これがそのままあてはまるわけではありませんが、そういうイメージで電子の周波数（エネルギー）を量子ドットの箱の寸法を変えてコントロールするわけです。

まとめますと、量子ドットは電子を閉じこめて動かなくさせるということがひとつあります。

それから形状や寸法を変えることで、電子のエネルギーや状態を制御することが出来るということがあります。

— 中学生時代の理科の教科書で「電子は原子核の周りを回っていて…」という説明を思い出しましたが、その動きをコントロールする技術があるということですね。

荒川 我々は量子ドットを「人工原子」という呼び方をすることもあります。量子ドットという箱に閉じこめた電子の性質は、原子核の周りをぐるぐると回る電子のエネルギーに対応してくる面があるのです。

量子ドットで実現した超効率化

— さらに詳しく、なぜ半導体レーザーの課題を解決することになるのか教えていただけますか。

荒川 レーザー光というのは単一の波長を出す光です。そのレーザー光を普通の半導体の中で発信したと考えると、周りには電子が自由に動き回っています。すなわちそれぞれの電子のエネルギー分布がバラバラな状態です。この電子の中には、レーザー光の強度を強めることに寄与する電子もあれば、全く寄与しない電子もあります。何によってその違いがあるかということ“レーザーの持つエネルギーと一致するエネルギーを持つ電子”だけが、レーザー光を強めることに寄与します。“電子が持つエネルギーが光に変換される”ためには、その一致が必要となるのです。

出来るのですが、なぜそうなるかを量子ドット以前の考え方である「薄膜」に電子を閉じこめる概念と比較して説明します。

薄膜構造はノーベル物理学賞を受賞された江崎玲於奈先生が1970年に作られた構造です。半導体の材料であるヒ化ガリウム(GaAs)とヒ化アルミニウム(AIAs)で10ナノメートル程度の厚さの層を作るのですが、電子がヒ化ガリウムの方に集まりやすい性質を持っていることを利用して、電子をよりコントロール出来るようになりました。

普通の半導体は電子が四方八方に、つまり三次元的に自由に動き回っているイメージでこれを自由度3としますと、江崎先生の薄膜構造はそれを二次元的に閉じこめ、自由度が少ない2に制御したものになります。

量子ドットはそれをもう一歩進めて、電子を「箱」に閉じこめるわけです。檻に閉じこめると言った方がイメージしやすいかもしれません。つまり電子を自由に動けなくするのです。

卑近な例えで恐縮ですが、自由自在に動いているパチンコ玉を受け止めて動かなくする箱を作っただけ…そんな感じですね(笑)

— とてもわかりやすい例えですね。その「箱」の大きさとエネルギーの関係はあるのでしょうか？

荒川 実は箱の大きさを変えることで、こちらが意図するように電子の

また、今後一層進んでいくIoT(Internet of Things)社会の情報通信、いわゆる量子情報分野にも量子ドットが欠かせない役割を担います。既に量子ドットを用いた“量子暗号通信”で都市間通信をカバーする120kmの通信を達成しています。これはちょっと難しい言葉になりますが「単一光子源方式」の世界最長記録です。つまり従来のレーザー技術ではこれだけの長距離を減衰することなく届けることが出来なかったのですが、量子ドットを用いることで劇的に可能になったものです。

— スーパーコンピュータをはるかに凌ぐとされる次世代の量子コンピュータにも、量子ドットは関係する技術なのでしょうか？

荒川 大きく関係します。量子コンピュータは従来とは全く違う概念で膨大な情報を処理するのですが、量子コンピュータに使う素子の基本構造に関係するのが量子ドットです。

また、身近な従来型のコンピュータの進化も後押しします。今、コンピュータの「配線」には銅が使われているのですが、これからは光になります。その時に量子ドットレーザーの温度安定性が大変役立つのです。配線と聞くと、コンピュータの脇役に思うかもしれませんが、大量の情報のやりとりを高速で行うために実は重要で、これから光が使われます。この点で量子ドットレーザーの温度安定性がなぜ

重要かという、例えばLSIはものすごく熱を出し高温になります。配線の役割を光が果たすためにはLSIの近くに光源を置かないといけませんので、量子ドットレーザーが大変有用なものになるわけです。

さらに太陽光パネルにも量子ドットの活用が進んでいます。今は太陽のエネルギーを20%程度から良くて40%程度しか電気に変えられていないと言われてますが、量子ドットを使うと計算では80%程度まで高められると見えています。これは計算上の数値ですが、これが実現すると、例えばスマートフォンに小さな太陽光パネルがあれば充電無しで使えるわけです。

他に宇宙空間での活用から、医療の生態センサー、あるいはセンサーと通信を融合させての完全自動運転を視野に入れた自動運転技術など、私たちの生活に近い場でのイノベーションの創出にも大きく関わっている技術が量子ドットです。

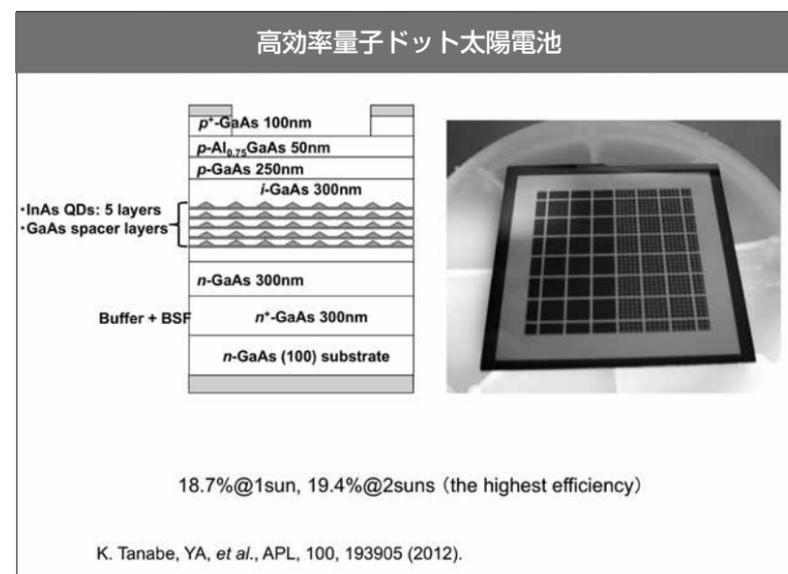
— 宇宙から日常生活のレベルまで、本当に超スマート社会をあらゆる分野で推し進めている基礎科学なのですね。

量子ドットは電子を閉じ込める「箱」

— そんな技術革新の核となる量子ドットさらには量子ドットレーザーの仕組みを教えてください。従来の半導体レーザーとどのような点が違うのでしょうか？

荒川 従来の半導体レーザーは「薄膜（薄い膜）」に電子を閉じこめ、そこでレーザー光を発光するものでした。

それに対して量子ドットレーザーは、量子ドットという「箱」に電子を閉じこめてレーザー光を発光します。こうすることで強いレーザー光を効率よく発信させることが





36年前、理論提案した量子ドットが今、量子コンピュータなど次世代の超スマート社会を支える基礎科学になっています

量子ドットの理論をジャンプさせたポイントだったと思います。

そしてその頃、世の中で閾値電流の温度依存性というのが問題になっていました。その議論は起こっていたものの、解決案はどこからも出ていなかった背景もありました。

そこで概念的なイメージを、計算してみようと取り組んだわけです。

— ひと口に「計算」といっても、今のようにどこにでもパソコンがある時代ではありません。大変ではありませんでしたか？

荒川 確かに大変でしたね。今は見ることもない計算機を回したりなど、今と比べると格段に不便でした(笑)。そして実験で検証しようにも実際の量子ドットは作れませんでしたので「磁場」を利用して量子ドットにあたる空間を作り出して実験の検証を行いました。

— 磁場で量子ドットのような空間を作って実験されたとは、どういうことでしょうか？

荒川 強磁場を作ると半径が非常に小さな筒状に電子を閉じこめられます。これを薄膜に垂直に作るわけです。こうして薄膜と強磁場でもって、量子ドットの箱と等価のものを作り実験をしました。

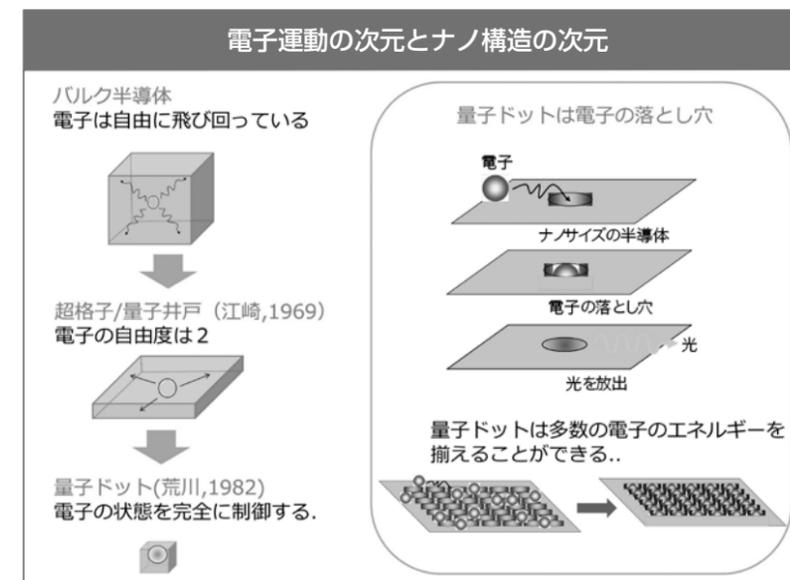
実はこうした実験の基礎的なところは、量子ドットという概念ではないものの、電気伝導の世界では既に行われていたこともありました。ただ、半導体レーザーの分野で実験に磁場を本格的に使ったのは、我々が始めてだったと思います。

1980年代、私が在籍していた東京大学の生産技術研究所の隣にあった、物性研究所に超強磁場の研究をされていた先生が

閾値電流の温度依存性が緩和されるという話が出て来ていたのです。それを耳にして「電子の運動の制御がレーザーの特性に大きな影響を与えるであろう」ということが可能性としてあるな、と直感しました。そこで薄膜は二次元だけでも、三次元的に閉じこめるとレーザー特性はどうなるだろうかと、新米の助教授の私と榊裕之先生(当時東大生研助教)が考え始めたのです。

— 電子を閉じこめるという考えは、当時からあったのでしょうか？それとも荒川先生のオリジナルの発想でしょうか？

荒川 半導体の中でそういうことをしようという考えはありませんでした。ですからオリジナルな考えです。電子を閉じこめる箱を作ったらどうなるか？そう考えたのが、



— ということは、どの電子のエネルギーも、レーザーのエネルギーと一致させることが出来れば、全ての電子がレーザー光の強度をあげることが出来るということでしょうか。

荒川 そうです。それが普通の半導体では出来ませんでした。量子ドットは、電子を閉じこめて電子のエネルギーを揃えることが出来ると先ほど申し上げました。なので、電子のエネルギーを全てレーザー光に寄与させることが可能になるわけです。

イメージ的な例えですが、100個の電子を入れたとして、従来はその内の10個しかレーザー光の発信に寄与することしか出来なかったものが、100個全てをレーザー光に寄与させることが出来るわけです。効率が10%だったものが100%になるので非常にムダがないということです。

— なるほど。つまり格段に効率よく質のよい理想的なレーザーを作り出すことが出来るわけですね。先ほど半導体レーザーは「温度が変化すると制御が困難な課題があった」とお話しされましたが、量子ドットレーザーがその課題をクリア出来たのはなぜでしょうか？

荒川 先ほど、従来の半導体レーザーで電子がレーザー光に寄与する効率を仮に10%程度と例えましたが、温度があがるとさらに低下するのです。電子の動きがさ

らに乱雑になるため、レーザー光に寄与する電子は100個のうち5個になったり、あるいは1個になったり、そんな具合です。

しかし量子ドットは、繰り返しとなり恐縮ですが、「箱」に電子を閉じこめて自由に動けないようにしているため、温度が上昇しても、電子の状態は閉じこめられたまま変わりません。そのため、従来の半導体レーザーで温度が高くなると閾値(しきいち)電流が増えざるをえなかった課題が量子ドットレーザーでは克服出来ました。

— 閾値(しきいち)電流とは何でしょうか？

荒川 半導体レーザーにおけるレーザー光の発生に必要な最少の電流値を閾値電流と言います。量子ドットレーザーは、温度が変わっても一定の変わらない電流で同じレーザー発信が出来るというわけです。

レーザー光はコヒーレント光とよばれる正弦波の量子的電磁波ですが、一方、「単一光子」は量子ドットに電子1個のみを入れて発光させることで発生出来ます。この単一光子源は、量子暗号通信の基本素子となる他、量子コンピュータなど量子情報処理に用いられます。

**35年以上前に理論提案
80年当時はまだ夢物語**

— 現在進行で進む未来の技

術、という感じがしますが、荒川先生が量子ドットの理論を提案されたのはいつ頃でしょうか？

荒川 最初に理論で提案したのは1982年です。

— えっ、1982年?というかと35年以上前のことですね。

荒川 はい。計算から導いた理論は1982年に提案したわけですが、自分で提案しながらも、当時は「10ナノメートルの箱を作る」という構造は実現出来ないだろうなど感じていました。当時は最先端トランジスタであっても最小寸法が数マイクロメートルという頃なので、ナノサイズの箱というのは夢物語のようなものでした。

私が東大の生産技術研究所で助教授をしていた頃です。

— その発想のきっかけは、何かあったのでしょうか？

荒川 ヒントとなったのは、薄膜を使ったレーザーです。これは量子井戸レーザーと言いまして、電子が薄膜の厚さ方向に閉じ込められ、膜に沿った平面内では自由に運動することができます。つまり、電子の自由度は2です。薄膜に閉じ込められる状態が、量子力学の教科書に書かれている井戸型ポテンシャル中の電子に対応するということで量子井戸レーザーという名が付いています。

その量子井戸レーザーを使うと

—つまり、ナノの量子ドットを作る技術が生まれなければ、自分で作ることにしたと。そして作ってしまったわけですね？

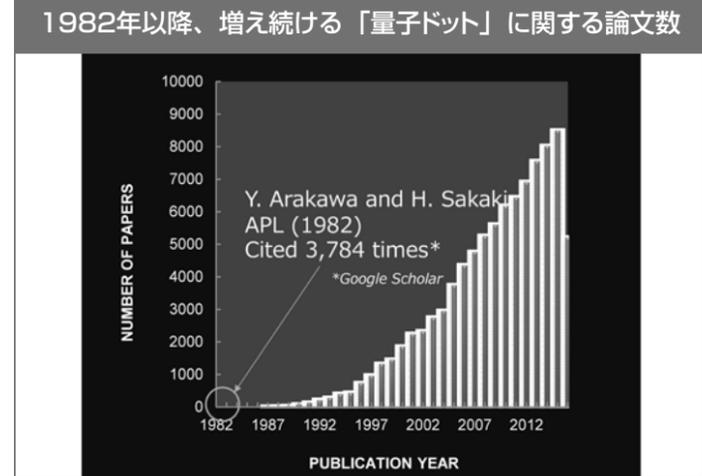
荒川 そういことになります。1990年以降は、自分のところで半導体のナノ構造を作り、そして自ら実験を行うというスタイルになっています。

1994年頃には富士通研究所やNECでも量子ドットレーザーの研究を開始し、ヨーロッパでもベルリン工科大学を中心に活発に研究が開始されるなど、少しずつ量子ドット研究が高まってきた動きがありました。

その後の詳細は割愛させていただきますが、90年代の後半頃から私自身も中心メンバーになって、光テクノロジーロードマップを光産業技術振興協会で策定を開始して提言をするなどしてきた中、2000年頃から国家プロジェクトの話が出てくるようになってきたわけです。

—2000年頃というと、最初にお話を頂いたナノテクノロジー、ナノサイエンスという言葉が社会で言われてくるようになる頃で、量子ドット研究の気運がいよいよ高まったということですね。

荒川 その流れの中で2004年に、実際の“モノ”の量子ドットで、東大と富士通で研究をして、量子井戸レーザーと量子ドットレーザーで違いがあることを実証データで



明確に示すことが出来ました。これによって、理論予測していた量子ドットレーザーの優位性が、本当のレーザーで実証出来たのです。様々な温度変化によって量子井戸レーザーの方はレーザーの閾値電流が変わり、レーザー光の強度もばらつきがあるのですが、量子ドットレーザーの方は、温度が変わっても一定なのです。

こうなると、実用が出来てビジネスになるということでベンチャー企業が立ち上がってきて、実際の製品や社会に応用する動きが出て来て、今に至っているわけです。

—35年前の1982年には、量子ドットの研究者は荒川先生1人とも言えるわけだったのですね。ちなみに今、世界にどれくらいの研究者がいるのでしょうか？

荒川 数え方にもよりますが、何万人、という単位になるのではないのでしょうか。35年以上ひとつのテーマを研究し続けられて、こうし

て発展させ続けられてきたことは、研究者としては非常に嬉しいことだと思っています。

普通、科学技術は年数が経っていくと、活用の用途などが飽和していくものなのですが、1982年に論文で理論発表してから35年たった、未だに右肩上がりに量子ドットの論文は増え続けています。1982年は私が榊先生と一緒に発表した論文1つだけだったのですけどね(笑)。その論文はこれまでに3784回も引用されて、それだけ旬の理論であり続けていると言うことで、大変嬉しく思います。

また、この論文の数と共に、先ほど申し上げたように、様々な分野でアプリケーションへの活用が増していることも、量子ドットが注目され続けていることを裏付けていると思います。

次号「科学の峰々」では引き続き、荒川 泰彦 先生に世界の超スマート社会を切り拓く「量子ドットレーザー」(下) オリジナルの理論提案から技術開発までの36年をお話いただきます。

いらっちゃったので、そこで実験を行わせてもらいました。

—それは前例のない実験だったわけですね。

荒川 実験自体は相当難しくて大変苦労しました。例えば、実験のために電流を流すワイヤーが、磁場をかけると電流が意図していた方向に働かず、ワイヤーを引っ張るように働いてしまいました。そのためワイヤーがしばしば切れ、断線したり…ワイヤーを二重にしたらどうか?など試行錯誤しました。

また、強磁場発生装置はコイルの形状なのですが、直径5ミリから7ミリほどしかないわずかな空間が実験を行うサンプル空間なのです。その狭い空間に強磁場が出来るのですが、本当に小さなところに半導体レーザーを入れたいいけない、さらには狭い空間から光のアウトプットを取り出さないと

いけない。そんな実験は誰もやったことありませんでしたので、全てが初めての挑戦でした。しかも液体窒素で冷やさないといけない等々、色々なところにうまくいくように工夫を凝らさなければいけません。実験自体は1年以上を費やしました。この実験が、量子ドットで最も苦労したことだったかもしれませんね。

—そうした大変苦労した実験の結果、意図した成果が得られたときは、どのような思いだったでしょうか？

荒川 「ああ、うまくいった!」そんな感じだったように思います。発見したというよりも計算や理論で「こうなるはず」と予想して狙った結果でした。決して自信があったわけではないのですが、うまくいけば出来るはずと考えていました。もちろん強磁場のもと量子ドット

と等価のモデルで実験した場合と、実際の量子ドットで行う場合は、物理の違いがあるので、そういった点の理解は必要でしたが、いい結果となりました。こうしたことを経て、1982年に論文として発表、量子ドットレーザーの考えを提案したわけです。

理論に続き、自ら“モノ”も作り出したナノの箱「量子ドット」

—実際にモノとして、10ナノメートルで箱を作る量子ドットが出来ようになったのはいつ頃なのでしょうか？

荒川 そうなるには結構時間がかかりました。また、量子ドットの構造についても、例えば熱力学的に安定するはずがない等のご批判も受けましたが、私自身も量子ドットをどう作ればいいのか分からなかったところもあり、当時は受け入れざるを得ませんでした。

その後、海外特別研究員という制度でアメリカのカリフォルニア工科大学に2年間派遣される機会も得て量子ドットレーザーの理論を深めたり、また日本に戻ってから、本当に量子ドットを作るべきだという思いのもとで、結晶成長の研究などに取り組みました。そして量子ドットの本格的作成の研究を始めたのが1989年頃、翌90年ぐらいに量子ドットを作り始めました。

