

第1回江崎玲於奈賞 授賞式・受賞記念講演会

2004年7月23日(金) つくば国際会議場

第1回江崎玲於奈賞 受賞者

「半導体ナノエレクトロニクスの素子の先導的研究、特に、量子細線・量子ドット構造素子研究における先駆的貢献」
榊 裕之 東京大学生産技術研究所教授 荒川泰彦 東京大学先端科学技術研究センター教授



▲ 開催風景

総会終了後には、第1回江崎玲於奈賞と第15回つくば賞の授賞式及び受賞講演会が行われた。

今年創設された「江崎玲於奈賞」は、ナノサイエンスあるいはナノテクノロジーに関する研究に携わり、世界的に評価を受ける顕著な研究成果を収めた研究者を顕彰するもので、第1回受賞者には、榊裕之 東京大学生産技術研究所教授と、荒川泰彦 東京大学先端科学技術研究センター教授が選ばれた。

ここでは、量子細線・量子ドット等の研究分野で世界をリードする研究実績を挙げておられるお二人の受賞講演を紹介する。

受賞講演(1)

榊 裕之
東京大学生産技術研究所教授



荒川先生と私がどんな経緯で、量子細線、量子ドットの研究を始め、展開してきたかを紹介させていただきます。荒川先生は光の分野で素晴らしい仕事をしておられ、後で詳しく話されるので、それ以外の部分を中心に話します。私は大学院時代にMOS-FETというトランジスタの研究に取り組みましたが、それが研究の基となりました。

MOS型トランジスタは、パソコンを始め多くの電子機器に使われていますが、ナノ物理としても大変面白い側面を持っています。このトランジスタは、シリコン半導体の結晶の上に酸化膜を置き、その上に金属電極を設けた構造を持ちます。金属電極に正の電荷を置いた場合に、シリコンの表面層には電子が蓄積されます。この電子の有無に依ってシリコン表面に沿う電流のONとOFFが決まり、スイッチ機能が生じます。これらの正と負の電荷は、

酸化膜を介して強く引き合うため、電子は半導体の表面に強く押し付けられ、ナノメートル級の薄膜状の領域に閉じ込められます。1966年IBMの研究者は、極低温では、こうした膜内で電子が量子的に閉じこめられることを実証しました。その直後に大学院に進学した私は、散乱が強く効く室温環境下での電子の状態を調べました。その結果、正負の電荷の引き合いの強弱によって、量子効果が強く効く状況から無視できる領域へと変化することを見つけました。1971年江崎先生が私の所属していた研究室に訪され、励ましの言葉をかけて頂く機会がありました。先生が70年に提案された

超格子が話題になっていたので、感激の中で、超格子の概念を強く印象付けられました。

超格子というのは、電子を閉じこめるための非常に薄い膜と、電子がトンネル現象で通り抜けられる障壁膜とを交互に重ねた構造のもので、電子の量子力学的な性質を制御する新概念です。当初、MOS型トランジスタと超格子の研究は無縁と思っていましたが、後にこの2つを結びつけられないか、と考え始めました。超格子では電子を制御するために周期的なポテンシャル障壁を導入しています。江崎先生の提案では、層状の壁を積み上げることで、超格子を作ります。私は、MOSトランジスタの電子の走る超薄伝導層内に線状または碁盤目状の障壁を10ナノメートル程の間隔で導入すれば「量子的な細線」や「ドット箱」を面内に並べた構造となるので、電子を制御できるとの着想を得て、75年に提案しました。「江崎先生の超格子効果がトランジスタの超薄伝導層内で実現できる可能性がある」ことを指摘したのです。しかし、当時は実現に必要なナノ技術がありませんでした。

江崎先生の好意で76年からIBMワトソン研究所で超格子の研究に携わる機会が与えられ、本格的な物いじりを始めました。分子線エピタキシー技術で多層構造を作る研究をし、電子がどれくらい多層膜の中に閉じ込められるかを調べました。障壁が厚いと電子が膜内に強く閉じ込められるが、障壁が非常に薄くなると電子がトンネル効果で膜の間を動き始めます。この状況を解明するためさまざまな超格子を作って調べる研究を進めました。その中で、障壁の作用が中くらいの超格子を調べた際に、通常は膜の中に閉じ込められている電子も、一つ上の量子状態に励起された場合には結合状態が緩くなり、隣の膜に移っていく可能性のあることに気付きました。こうした構造に赤外光を当てると、電子は閉じ込め状態から自由に動ける状態に移り、電流を運び始めるはずです。つまり、赤外検出器になることに気づき、新素子の提案を江崎先生としました。その後大きく発展し、40万画素くらいの赤外カメラが登場しています。

帰国後は、東京大学生産技術研究所で研究室を運営し研究を展開する立場になりました。その中で、1980年に10ナノメートル級の「量子細線」を伝導路とするトランジスタを提案しました。量子細線では電子は横ぶれが禁じられ、まっすぐに走る傾向が強まります。この研究も

江崎玲於奈賞

日本国内の研究機関において、ナノサイエンスあるいはナノテクノロジーに関する研究に携わり、世界的に評価を受ける顕著な研究業績を挙げた研究者を表彰することにより、科学技術の振興と産業の活性化に寄与することを目的として、関彰商事株式会社の協賛を得て平成15年（2003年）に創設された賞である。

- 主催： 財団法人茨城県科学技術振興財団
つくばサイエンス・アカデミー
- 後援： 文部科学省、茨城県、NHK
- 協賛： 関彰商事株式会社

形成技術が未熟なため難航しましたが、数年たつと世界中で研究が活発化し、面白いデータが次々と報告されています。例えば、良質な量子細線の伝導率は、量子力学的な定数だけで決まる量子化コンダクタンスを示すというのが、その代表例です。また、80年には荒川先生が生産技術研究所に新メンバーとして加わられたのを機に、いろいろな議論を進め、「量子細線」や「量子ドット」をレーザの発光部に活用するとの着想を得て、解析し、その論文を共同で発表しました。82年のことです。

量子細線やドットの研究は80年代後半から徐々に活発化し、トランジスタやレーザ以外にもいろんな分野で展開されています。量子ドットを使って、1個1個の電子の伝導特性をコントロールする単電子トランジスタや、量子ドットに電子があるか、ないかの情報を活用するドットメモリの研究も進んでいます。ドット内の電子の有無を入射する光で変化させることで、高感度の光の検出器に利用できることも見いだされています。さらに、量子細線やドットは、既存のエレクトロニクス分野だけでなく、新材料分野やバイオ計測の分野で活用したり、量子情報処理に利用するなど世界中で活発な動きがあり、今後は根幹的なデバイス要素として多彩な発展が期待されています。

受賞講演（2）

荒川 泰彦
東京大学先端科学技術研究センター教授



榊先生の話の補足として、これまでの研究や今取り組んでいることについて説明させていただきます。私は1975年に電子工学科を出まして、80年に電気工学部の専門課程を修了しました。大学院までは通信理論の研究をしていて、半導体の研究には携わっていません。卒業時に、東京大学生産技術研究所の講師にという話がありました。その際に研究分野を光デバイスに変えるようにとの強い要請がありましたが、私も自分の幅を広げる良い機会としてそれを受けとめることにしました。当時の生産研では、新進気鋭の榊先生が助教授として非常に充実した研究室を運営されており、私は自分の研究室を立ち上げる上で多々刺激を受けました。改めて感謝申し上げたいと思います。さて、通信から光に専門を変えるときに、どうせ変わるなら半導体、しかもアクティブデバイスのレーザに取り組もうと、やや無謀とも言えるべきことを考えました。榊先生とのディスカッションの中で、量子効果を伴うレーザの研究を始めることとなり、その中で量子ドットレーザの概念が生まれました。その後、84年から2年間カリフォルニア工科大学で在外研究を行い、Amnon Yariv先生の研究室でデバイス物理・技術を本格的に身に付けるとともにYariv研究室における量子効果光デバイス研究の立ち上げを行いました。

さて、3次元量子閉じこめ構造としての量子ドットの特徴の1つは、1個1個の電子の運動状態を制御して空間的に分離することにより、エネルギーを揃えることが可能なことです。もう1つは、個々の電子を扱うことができるので、単一の電子、あるいは単一のフォトンを制御しつくすことが可能なことです。1982年に、榊先生と私で量子ドットレーザに関する論文をApplied Physics Lettersに発表しました。非常に小さな箱型構造を何とか迷いましたが、多次元的な量子井戸のポテンシャルを使うので“多次元量子井戸”としました。1年後に“量子箱”の方がいいだろうと考え、しばらく使っていましたが、最近では“量子ドット”が一般的になってしまいました。82年の論文で、量子ドットを用いるとレーザの閾値電流の温度依存性が大幅に低減されることを予測し、強磁場を使った実験的な結果も示しています。

量子ドットレーザを提案した当初は、20世紀中には実

現できないかもしれないと考えていました。そこで80年代は理論的な研究を中心に進めま

した。今議論されているレーザ特性の大半は、私が予測したものではないかと思っています。82年に始まった量子ドットに関する学術論文は、その後細々と出ていたのですが、90年過ぎに一気に増え始めました。それは90年を過ぎると量子ドットが実際に手に入り始めたからです。このきっかけは86年頃のフランスのグループがStranski-Krastanow Modeと利用すれば半導体の量子ドットを自己組織化的に形成できるということを実験的に示したことにありました。94年にはドイツで初めて量子ドットレーザの発振実験が行われました。以後、性能が飛躍的に上がり、いまや、閾値電流、温度安定性、変調幅などのレーザ特性において、量子ドットレーザが最高の値を出しています。

このように量子ドットレーザは、光エレクトロニクスで大変重要な役割を果たそうとしています。その中で、私どもは現在2つの大きなテーマを掲げ、量子ドット光源の研究に取り組んでいます。1つは量子ドットレーザを高性能化し、現実のデバイスとして実現することです。もう1つは、単一光子の発生素子の実現です。前者では、量子ドットの寸法の均一化などの課題があり、これを超えていけば、真の意味での高性能量子ドットレーザができ上がると考えています。後者については、ナノ技術やフォトリソグラフィ技術などが課題ですが、私たちは総合的に取り組んでいます。

例えば、私どもと富士通との共同研究では、20 から70 くらいまでまったく温度調整器を使わずに10ギガヘルツの変調をかけることに成功しており、今までの半導体レーザには無かった特徴を実際に示すことができました。温度調整器が必要ないのでモジュールのロー・コスト化につながり、社会への普及にはずみをつけています。



江崎玲於奈賞委員の野依良治先生による祝辞



橋本昌 茨城県知事

江崎玲於奈賞に協賛する
関彰商事(株)の関正夫社長

他方、単一光子発生素子のほうは量子暗号通信の実現に不可欠なものです。光子1個で通信できれば、盗聴されると受け手は光子を受けとらないことになり、盗聴の有無を容易に検出することができます。しかし、光通信の波長帯で単一光子を規則正しく出すことは容易ではありませんでした。最近、富士通との連携研究で、 $1.3\mu\text{m}$ の通信波長帯で確かに単一光子が発生しているということを検証・実現しました。これは、量子暗号通信の実用化に向けて1つの大きなステップになりうると確信しています。

何といたっても私の研究は、江崎先生の人工超格子及び量子井戸から出発したものです。今後はナノエレクトロニクス、量子情報エレクトロニクスの分野が大きく展開していくと思いますが、改めて今、江崎先生のお仕事の偉大さを感じている次第であります。さて、家内がそこ

にありますが、最後に、家族に感謝してお話を終えたいと思います。

これからも2人で協力して研究を進めていきたいと思っています。どうもありがとうございました。

SAT



受賞後に（榊 裕之先生）

2人を代表し、一言お礼の挨拶を申しあげたいと思います。江崎先生はトンネルダイオードや超格子などナノ分野の世界の開拓者であり、半導体の研究を志す、私どもにとっては誠に大きな存在の方です。そのお名前のついた賞を私どもがいただくこととなり、格別の光栄と存じております。その選考にご尽力頂きました村上先生、白川先生、小柴先生にも心からのお礼を申し上げます。そして、研究者を励ますこのような賞の創設にご尽力いただいた関彰商事の関社長、および橋本知事、その他関係者の方々にも深くお礼を申し上げます。

今回認めて頂いた研究は、荒川グループや私どものグループの多くのメンバーの日夜努力に因るものです。したがって、この賞はみんなの代表として受け取りたいと思っています。また、賞が新聞に報道された結果、日ごろご無沙汰している方や懐かしい方からも連絡をいただき、嬉しい限りでした。次の世代にナノ分野を志す人達がさらに増え、この分野がより一層飛躍するよう、微力ながら2人で協力して研究を進めていきたいと思っています。どうもありがとうございました。

