

本田財団レポート No. 191

第 157 回 本田財団懇談会（2025 年 7 月 8 日）

「量子ドット研究のフロンティア ーその誕生、進化、そして展望」

東京大学 特任教授・名誉教授
（公財）本田財団 理事

荒川 泰彦

公益財団法人 本田財団

本田財団レポート No. 191

第 157 回 本田財団懇談会（2025 年 7 月 8 日）

「量子ドット研究のフロンティア ーその誕生、進化、そして展望」

東京大学 特任教授・名誉教授
（公財）本田財団 理事

荒川 泰彦

公益財団法人 本田財団

講師略歴

荒川 泰彦 (あらかわ やすひこ)

東京大学 特任教授・名誉教授
(公財) 本田財団 理事



《略 歴》

- 1980 年 東京大学大学院工学研究科博士課程電気工学専攻修了 (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 カリフォルニア工科大学客員研究員 (1986 年まで)
- 1993 年 東京大学生産技術研究所教授
- 1999 年 東京大学先端科学技術研究センター教授
- 2002 年 東京大学生産技術研究所ナノエレクトロニクス連携研究センター長
- 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
- 2009 年 ミュンヘン工科大学客員教授 (2011 年まで)
- 2012 年 東京大学生産技術研究所教授、同光電子融合研究センター長
- 2018 年 東京大学名誉教授
- 2018 年 東京大学ナノ量子情報エレクトロニクス研究機構特任教授
同機構量子イノベーション協創センター長 (現在に至る)

《主な受賞》

電子情報通信学会業績賞 (1991 年)、日本 IBM 科学賞 (1992 年)、服部報公賞 (1993 年)、
電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ賞 (2000 年)、日産科学賞 (2002 年)、
Quantum Devices 賞 (2002 年)、江崎玲於奈賞 (2004 年)、
IEEE/LEOS William Streifer 賞 (2004 年)、藤原賞 (2007 年)、
産学官連携功労者表彰内閣総理大臣賞 (2007 年)、IEEE David Sarnoff 賞 (2009 年)、
紫綬褒章 (2009 年)、C&C 賞 (2010 年)、OSA Nick Holonyak, Jr. 賞 (2011 年)、
Heinrich Welker 賞 (2011 年)、
応用物理学会化合物半導体エレクトロニクス賞：赤崎勇賞 (2012 年)、
中日文化賞 (2012 年)、応用物理学会業績賞 (2013 年)、日本学士院賞 (2017 年)、
IEEE Junichi Nishizawa メダル (2019 年)、文化功労者 (2023 年)、
URSI Balthasar Van der Pol メダル (2023 年)、市村学術賞 本賞 (2024 年)

《主な会員等》

全米工学アカデミー外国人会員、IEEE ライフ フェロー、OPTICA フェロー、
日本物理学会名誉員、電子情報通信学会名誉員・フェロー、応用物理学会フェロー

量子ドット研究のフロンティア ー その誕生、進化、そして展望

荒川 泰彦
東京大学 特任教授・名誉教授、本田財団 理事

ただいまご紹介にあずかりました、東京大学の荒川でございます。本日は講演の機会を与えていただき、誠にありがとうございます。「量子ドット研究のフロンティア ーその誕生、進化、そして展望」というテーマで一般的なお話を中心にさせていただきたいと思います。

■ はじめに



図－1

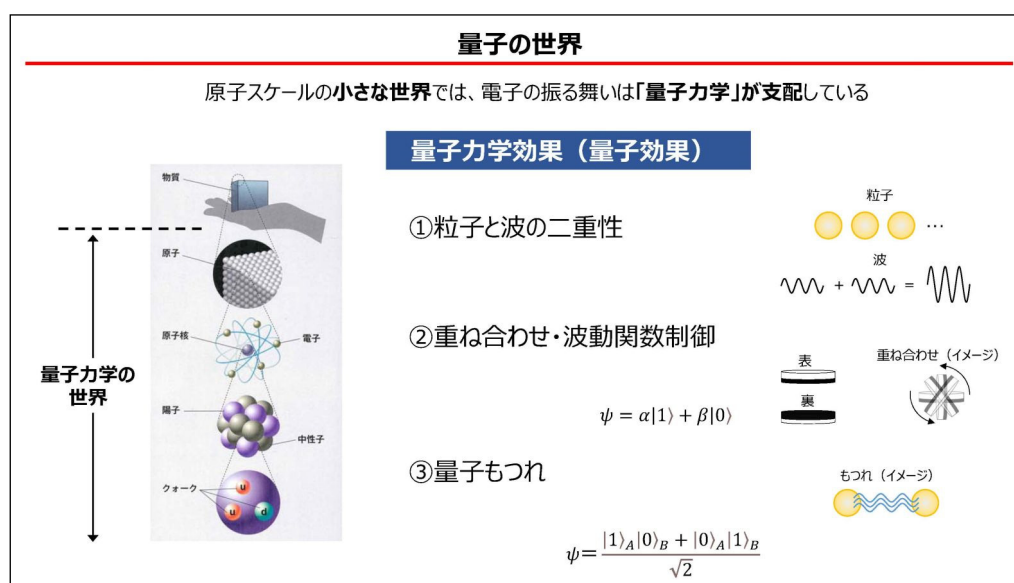
〈図－1〉 図－1 は 1927 年に開催された第 5 回ソルベー会議の有名な写真です。この会議は量子関係の物理学者がブリュッセルに集まったものです。皆さまがよくご存じの非常に著名な学者が集結しています。

特に、ハイゼンベルク、パウリ、シュレディンガーなどは 30 歳前後で、この会議の数年後にノーベル物理学賞を連続して受賞しています。そういったことで、若い人の前で話すときは、やはり 30 歳くらいにしっかり仕事をするのは大事だということを申し上げています。

また、アインシュタインをはじめ高名な物理学者がブリュッセルに集結しているわけで、このソルベー会議が初めてというわけではありませんが、量子力学の本格的発展の起点となった会議の 1 つではないかと考えています。

ソルベー会議の開催が 1927 年ですので、約 100 年経っています。今年、量子科学技術 100 年と言われているのは、ハイゼンベルクが行列表示で量子力学のダイナミクスを示したのが 1925 年のためですが、じつは、シュレディンガーの波動力学も含め量子力学が確立されたのは、ここからわずか 4 年程度の間でした。物理学において最も強力な理論体系である量子力学が、わずか数年のうちに一気に完成したことは、まさに科学史上の奇跡であり、知の探究が生み出す創造力の偉大さを象徴する出来事であったといえるでしょう。

■ 量子の世界——量子力学による支配



図－2

〈図－2〉原子スケールの小さな世界では、電子の振る舞い（動きや性質）は量子力学が支配しています。量子力学は、3つの柱で体系化されています。その第一は、量子の波と粒子の二重性で、これが最も特徴的な要素ですが、重ね合わせ、あるいは波動関数制御がもう1つの要素になります。そして、3つ目が量子もつれです。最近のノーベル物理学賞も含めて、この性質がさまざまな物理の概念を生み出し、また、量子コンピュータをはじめ、センシング、あるいは量子テレポーテーションなどで今、さまざまな形で発展を遂げようとしています。

■ 量子技術の発展——進む量子コンピュータの研究・開発

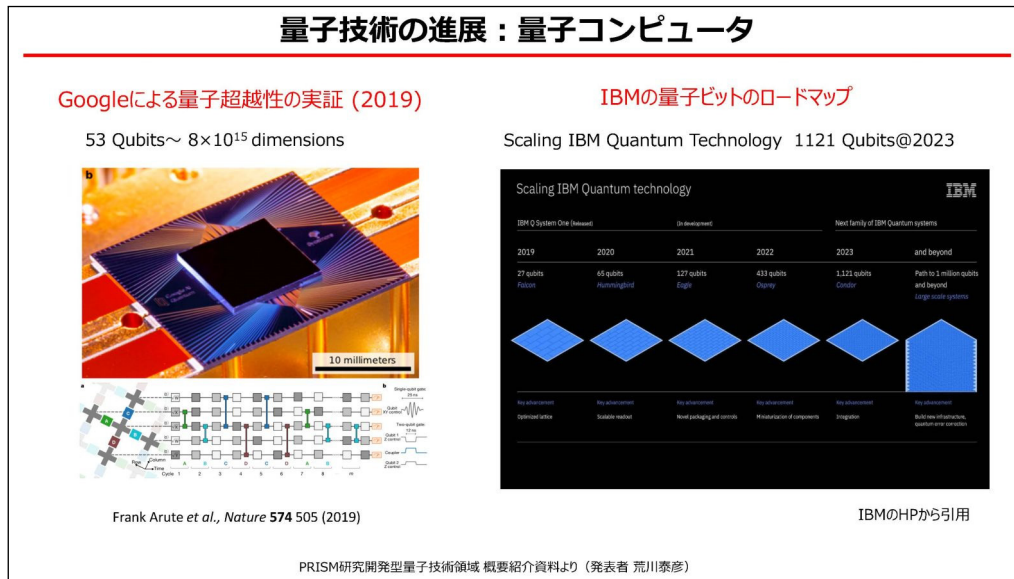


図-3

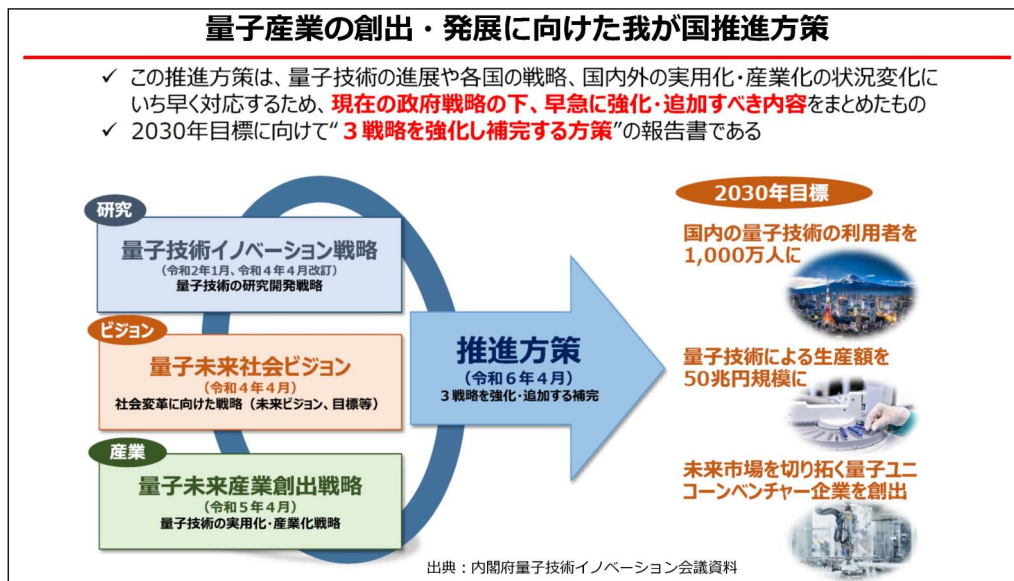
〈図-3〉量子技術の最近の発展ということで、量子コンピュータが大変重要なテーマになっています。左側は 2019 年頃に Google によって報告された「量子超越性の実証」といわれるもので、この報告からゲート型の量子コンピュータの研究に火がついてきました。

右の図は IBM が今、非常に本格的に量子コンピュータの開発に取り組んでいる中で提示しているロードマップです。2030 年頃には 1,000 量子ビット、あるいはそれ以上のものを出していくと宣言しています。

本日、資料はありませんが、量子コンピュータについては、2010 年頃に量子アニーリングという概念を用いて D-WAVE という会社が超伝導型で発売し、その後世の中に展開されてさまざまな応用につながりつつありますが、これはやや中途半端な量子コンピュータといえます。

ゲート型量子コンピュータが本来の量子コンピュータの姿になるわけで、今、大きく研究・開発が行われているところです。これについては、超伝導型のみならず、イオンあるいは中性原子、ほかにも光型などさまざまな試みが行われています。どれが成功するかは誰も分かりません。各国の国家予算がますます投入されている状況です。

■ 量子産業の創出・発展に向けた我が国の推進方策と目標



図－4

〈図－4〉図は量子産業の創出・発展に向けた我が国の推進方策に関する報告文書からの抜粋です。量子技術イノベーション戦略が2020年、令和2年に発行されています。それから、量子未来社会ビジョン、量子未来産業創出戦略が公表されました。2030年の目標として「国内の量子技術の利用者を1,000万人に」「量子技術による生産額を50兆円規模に」「未来市場を切り拓く量子ユニコーンベンチャー企業を創出」という3つの目標を掲げています。今、世界中が、米国や欧州もこのような大きな目標に向けて進んでいることは確かです。しかし、これらは、今後の量子技術の発展や産業界の努力によって初めて切り拓かれるものだと考えています。

■ 量子技術の進化



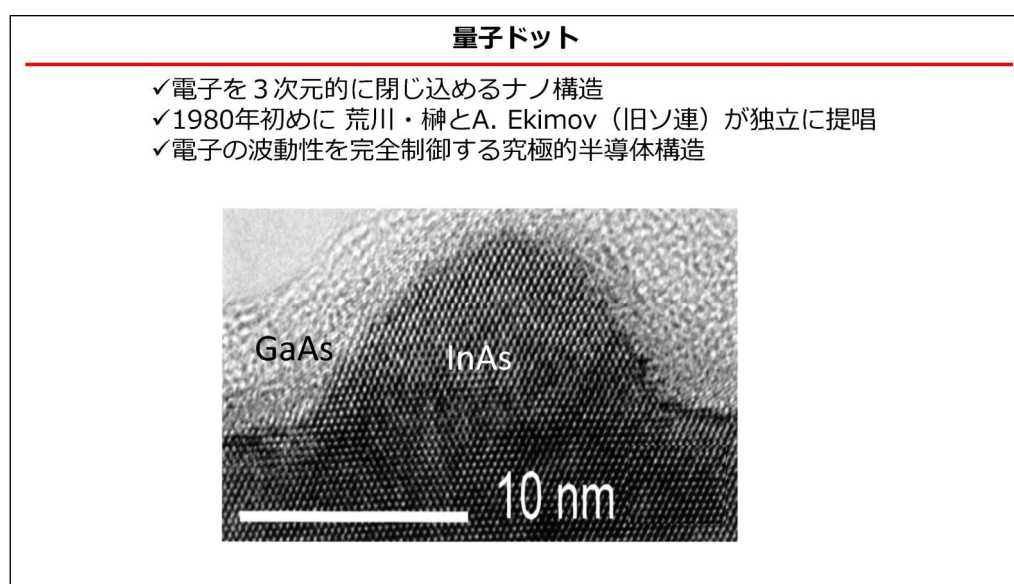
図－5

〈図－5〉量子技術の進化は、しばしば量子1.0、量子2.0という言葉で振り返られています。

まず、量子 0.0 とは、真空管から始まり、IBM の最初のコンピュータ ENIAC の時代まで遡ります。そして、1950 年代から半導体のバンド理論と粒子性の制御が中心になり、集積回路（LSI）の技術的進展が進みました。量子 1.0 の時代では、「波動関数制御」「スピンの制御」そして「単一光子の制御」などの技術が進化しつつあります。そして現在、量子 2.0 に向けて、先ほど申し上げた「重ね合わせ」あるいは「量子もつれ」を活用した研究・開発が進んでいるところです。しかし、申すまでもなく、量子 1.0 から 2.0 への進化はシームレスに展開されていると言えます。

私自身は直接量子コンピュータを研究しているわけではなく、量子ドットに関する研究で活動していますが、量子ドットはこの辺りに位置付けられ、量子技術の基本構造の一つとなっています。

■ 量子ドットとは何か



図－6

〈図－6〉量子ドットは、電子を三次元的に閉じ込める半導体のナノ構造です。1981 年に私と榊裕之先生でこの電子の三次元閉じ込め構造を提案しました。当時、榊先生は東京大学の助教授で、私も助教授になりたてでありました。

また、われわれと並行して旧ソ連のアレクセイ・エキモフ氏が、同じ 1981 年にガラスの中にある半導体の微結晶における結晶のサイズと吸収波長との相関を見いだすことによって、三次元の閉じ込めがあり得ることを提唱しています。エキモフ氏は 2023 年に他の協力者と一緒にノーベル化学賞を受賞しました。量子ドットという概念が同じ年に世界 2 か所で提唱されたことは興味深いことです。

量子ドットは電子の波動性を完全に制御する究極的半導体構造です。

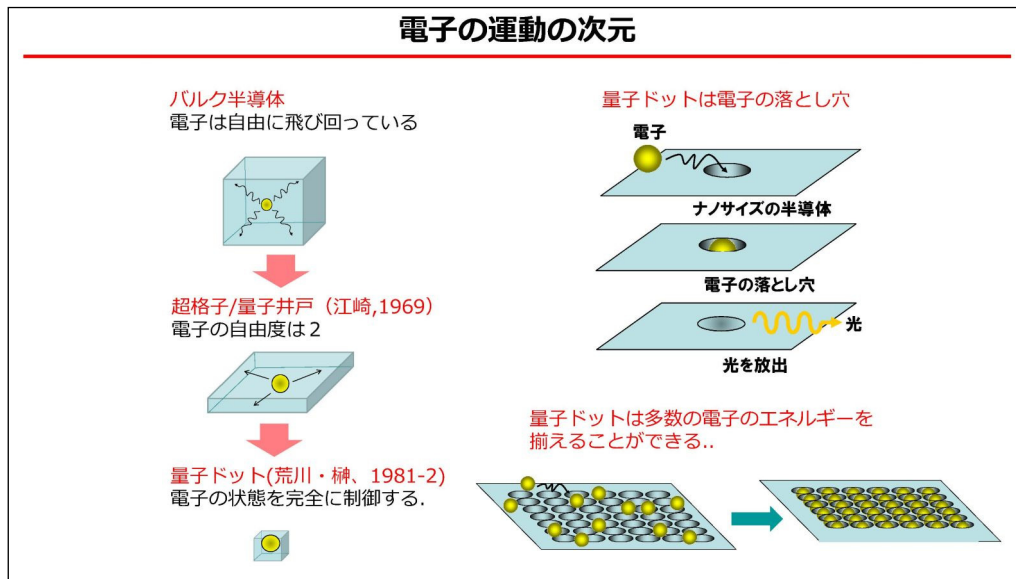


図-7

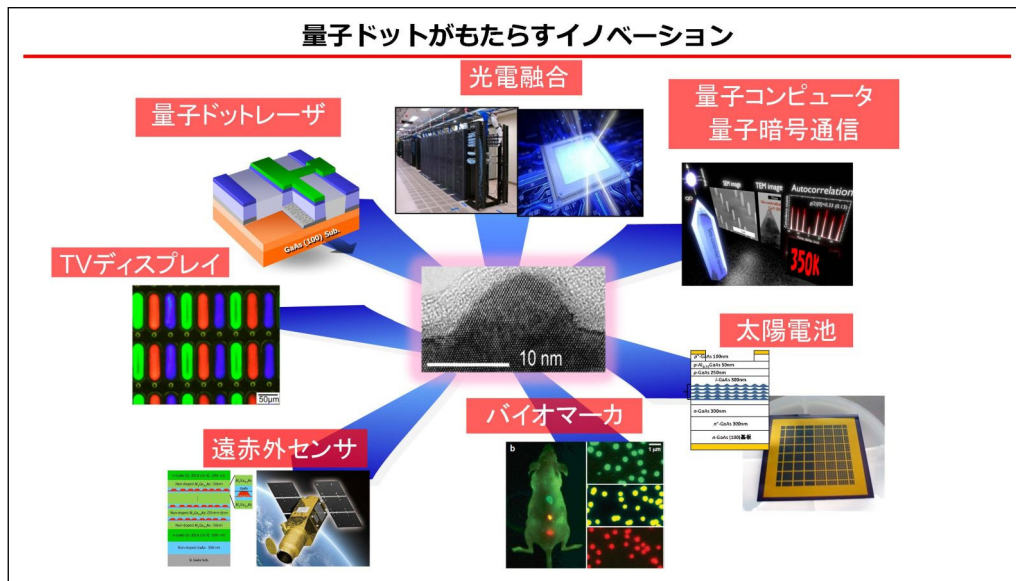
〈図-7〉バルクの半導体では三次元的に電子が自由に動き回っています。1970 年に江崎玲於奈先生は超格子・量子井戸の概念を提唱され、電子の自由度を2に落としたときの電子の振る舞いを初めて議論されました。その提唱に基づいてさまざまな人が2次元電子の研究を始めました。

江崎先生の提唱の前後で、安藤恒也先生はMOS トランジスタで二次元電気伝導と磁場による量子ホール効果の基礎となる現象を理論的に明らかにされました。

半導体において、たとえば運動場を自由に動き回っている玉が電子とすると、1つの落とし穴のようなものがあり、そこに入り込む。そうすると、玉である電子は自由に動くことができません。この穴に相当するのが量子ドットです。

同じサイズの穴を多数つくり込めば、同一のサイズ玉、すなわち同じエネルギーを持つ電子が右下の図のように配置されるわけです。通常の二次元系の場合は、フェルミ粒子の性質から電子は同じ場所に存在することができないか、あるいは熱的な励起により、さまざまなエネルギー状態を持つわけですが、量子ドットの場合には、空間的に分離することによって多数の電子を全て同じ性質にすることが可能になります。

■ 量子ドットがもたらすイノベーション



図－8

〈図－8〉量子ドットが今、どういうところで使われようとしているか、最初に申し述べておきたいと思います。

私自身が取り組んできている量子ドットレーザは、最近 NTT も推進している光電融合にも重要な役割を果たしています。量子ドットレーザが単なる光通信のみならず、新しいコンピュータシステムの実現にも貢献しつつあります。

また、量子コンピュータや暗号通信においても、量子ドットは重要な役割を果たしています。遠赤外センサ、あるいは太陽電池、バイオマーカーやテレビのディスプレイについても量子ドットが使われています。

■ 超格子から量子ドットへ

1. 量子の発展
2. 超格子から量子ドットへ
3. 量子ドットレーザの発展
4. 量子ドット単一光子源
5. 量子ドットと共振器量子電磁力学
6. むすび

図－9

〈図－9〉さて、いよいよ本題です。まず、量子の歴史的な発展についてお話しし、次に量子ドットレーザの最近の進展、さらに量子ドットを使った単一光子源について述べたいと思います。5 番については省略いたします。

■ トンネル効果とエサキダイオード

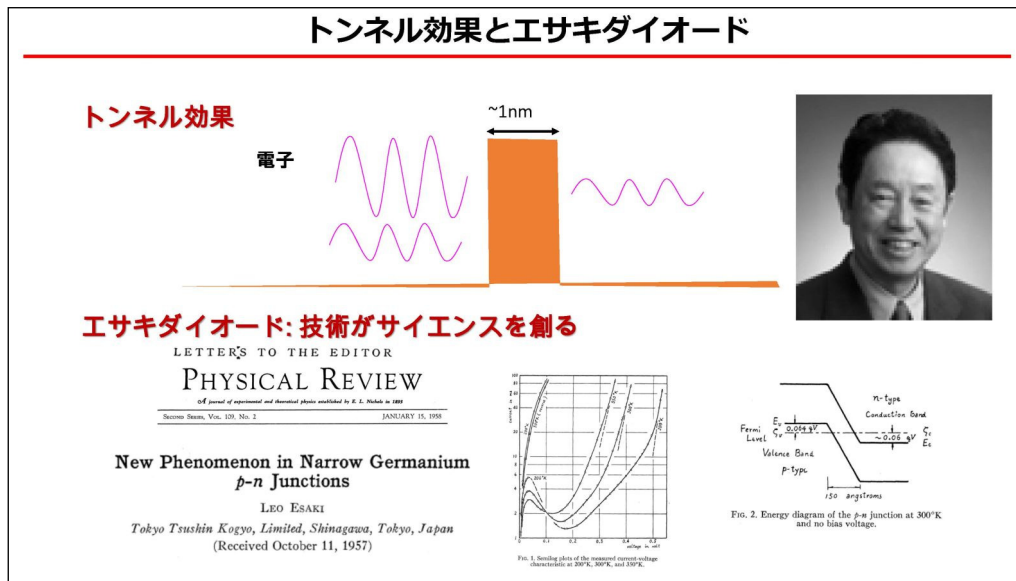


図-10

〈図-10〉江崎玲於奈先生が取り組まれた超格子の原点にあるのが、恐らくトンネル効果で、エサキダイオードにおけるトンネル効果の発見がノーベル物理学賞の対象になりました。

江崎先生の研究における大きなメッセージは、技術、つまりエサキダイオードを実現したのはヘビードーパのPN接合だったわけですが、これによってトンネル効果という量子力学の基本現象が観測されたということで、技術が新しいサイエンスのプラットフォームをつくることができるということです。

■ 超格子と量子井戸デバイスの実用化

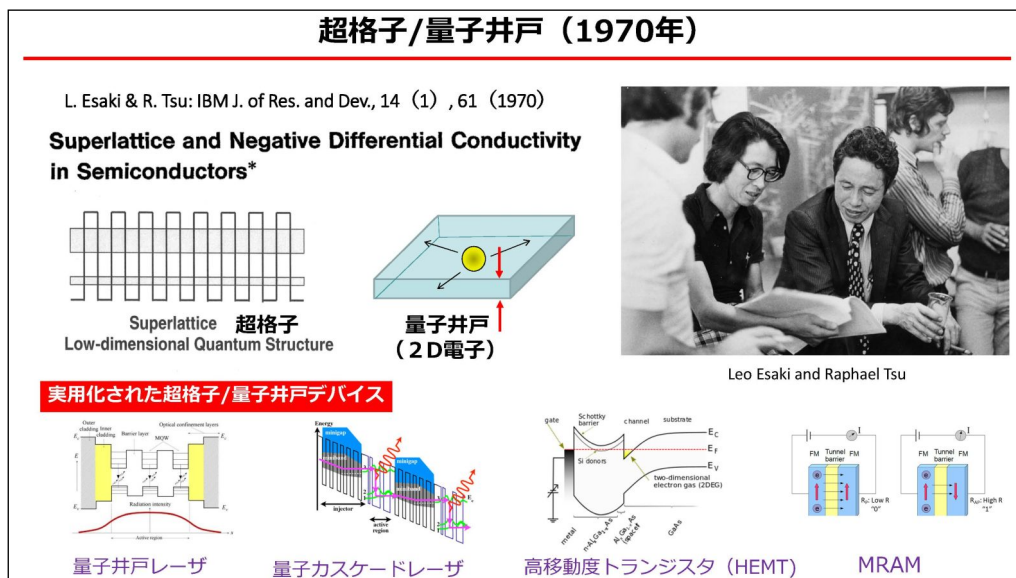


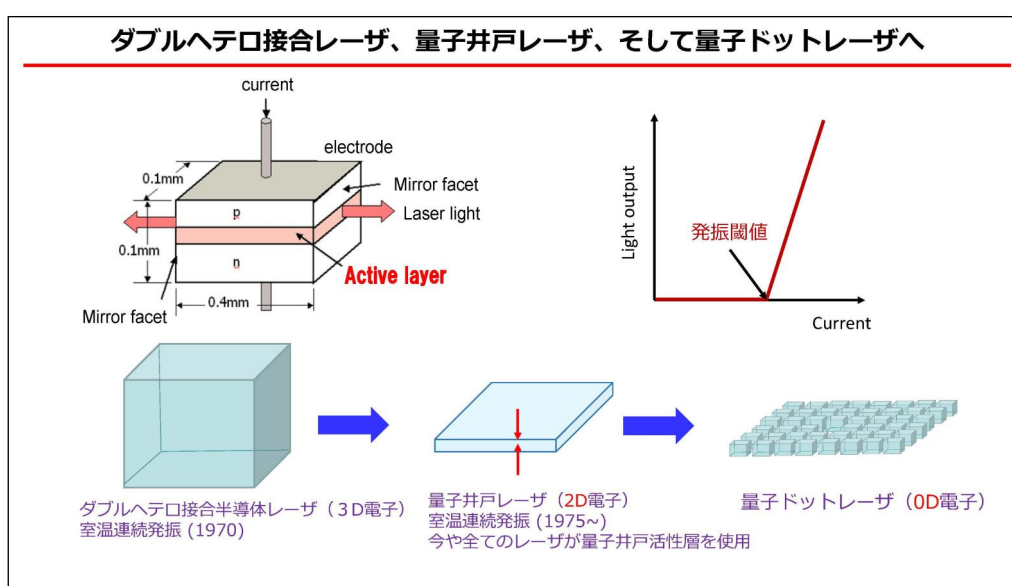
図-11

〈図-11〉さらに江崎先生は、1970年頃に薄い障壁層と半導体量子井戸の周期構造で構成される

超格子という概念を出されました。トンネル効果が重要な役割を果たします。江崎先生らは、この超格子において負性抵抗素子を実現できることを示しました。

この超格子の概念とともに、障壁層を厚くしてトンネル効果を抑制した量子井戸が非常に大きく発展しました。超格子と量子井戸を用いて、今の世の中で実用化されているデバイスが多数あります。量子井戸レーザ、量子カスケードレーザ、高移動度トランジスタ（HEMT）や MRAM というものもあります。半導体超薄膜により電子の波としての性質をきちんと制御するところから始まり、エンジニアリングで新しい物理的性質の発現をもたらし、それによって有意義な量子力学デバイスが実現されたということです。

■ 量子ドットレーザの誕生へ



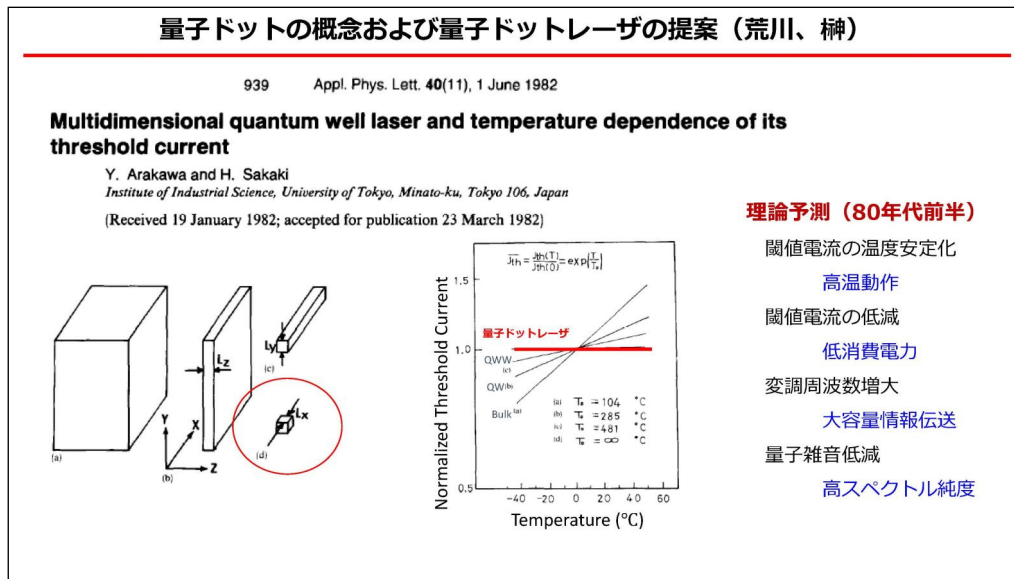
図－12

〈図－12〉私はレーザの専門家ですので、レーザについて特に申し上げたいと思います。

半導体レーザはどのようなものかという、PN 接合があって、活性層がある。共振器は、へき開した面をミラーにして構成されています。レーザとはどういうものかという、あるところに閾値^{しきい}があり発振するというものです。この発振閾値が重要なパラメータになります。いったん発振すれば、入ってきた電子がすべて光に変わっていくため、リニアに増えているのです。

活性層（Active Layer）部分は、1970 年に初めて室温連続発振がなされたときにはバルクの活性層でした。ずいぶん厚い活性層です。量子井戸レーザは、この活性層を量子井戸に置き換えたものであり、1975 年頃から研究・開発が開始されました。1982 年に量子ドットレーザが生まれました。

■ 量子ドットレーザの理論予測



理論予測（80年代前半）

閾値電流の温度安定化

高温動作

閾値電流の低減

低消費電力

変調周波数増大

大容量情報伝送

量子雑音低減

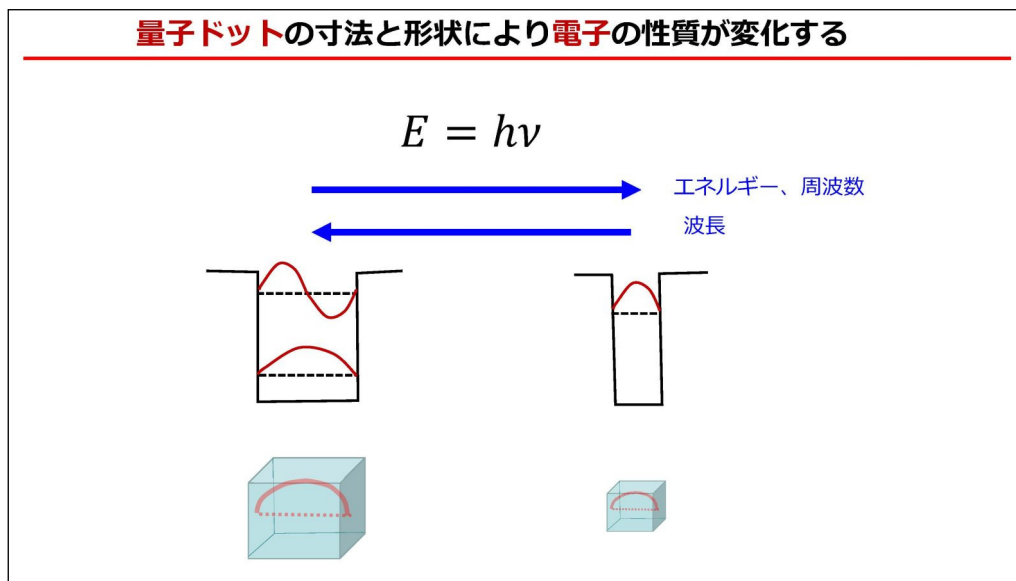
高スペクトル純度

〈図-13〉図は榊先生と私で書いた Applied Physics Letters の論文の写しです。エッセンスは図で示したようなナノメートルスケールの箱構造、すなわち量子ドットを活性として半導体レーザを実現するというものです。

われわれは、量子ドットレーザでは真ん中の図のように閾値電流の温度依存性がなくなるということを理論的に示しました。また、強磁場実験の結果も報告しています。

量子ドットレーザの特性については、閾値電流の温度安定化に加え、しばらく後に東京工業大学（現：東京科学大学）の末松安晴先生のグループが閾値電流の低減もできることを示されていますし、われわれも変調周波数帯域の増大や量子雑音低減などを理論的に 80 年代前半に示しています。

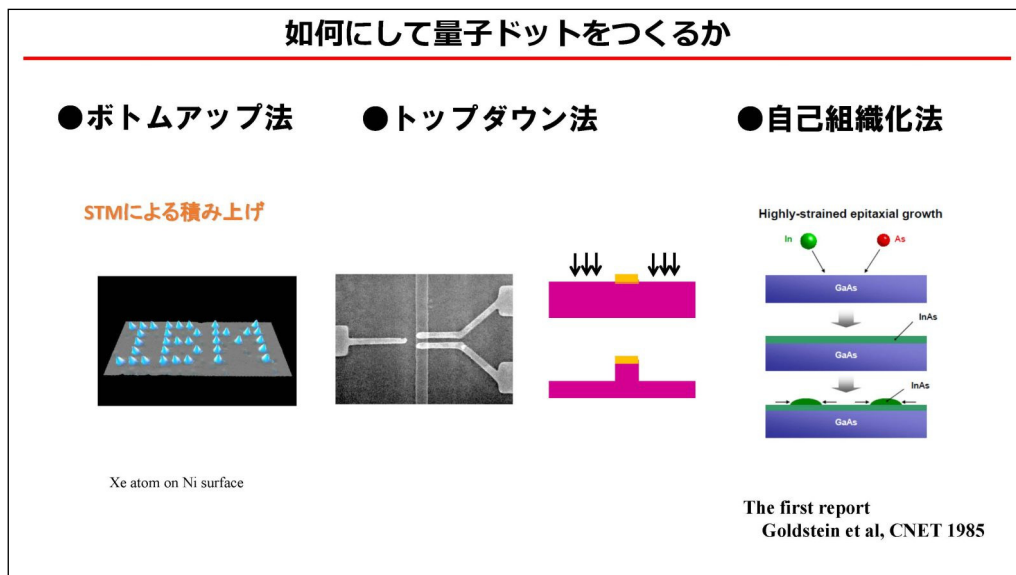
■ 量子ドットの寸法と形状により電子の性質が変わる



図－14

〈図－14〉管楽器では、管の長さに応じて特定の周波数が共鳴して音になります。今、管楽器が量子ドット、音の波が電子の波になったとお考えください。電子の場合は、量子ドット（量子箱）の寸法と形状によりその性質が変わります。波を閉じ込めるこの共振器の大きさが変わると、閉じ込められる電子の波エネルギーが変わります。また、管楽器と同じように、電子のエネルギーは離散的な値をとることになります。

■ 量子ドットの作り方



図－15

〈図－15〉私が 1982 年に論文を書いたとき、量子ドットの構造が実現するのはおそらく 21 世紀になってからであろうと考えたりしました。ただ、その中で、世界中で少しずつ努力がなされて

いました。例えば「ボトムアップ法」という手法です。いわゆる STM (Scanning Tunneling Microscope) を用いて、針で原子を一つ一つ運んでいきます。しかし、この方法だと時間がかかってしょうがない。

それから「トップダウン法」があります。電子線描画という LSI のテクノロジーです。ただ、特に光の場合には、図のようにエッチングすると界面のダメージが避けられないということで、うまくいきません。そこで出てきたのが「自己組織化法」です。これが意外に早く出現しました。

■ Stranski-Krastanov 成長モードの発見

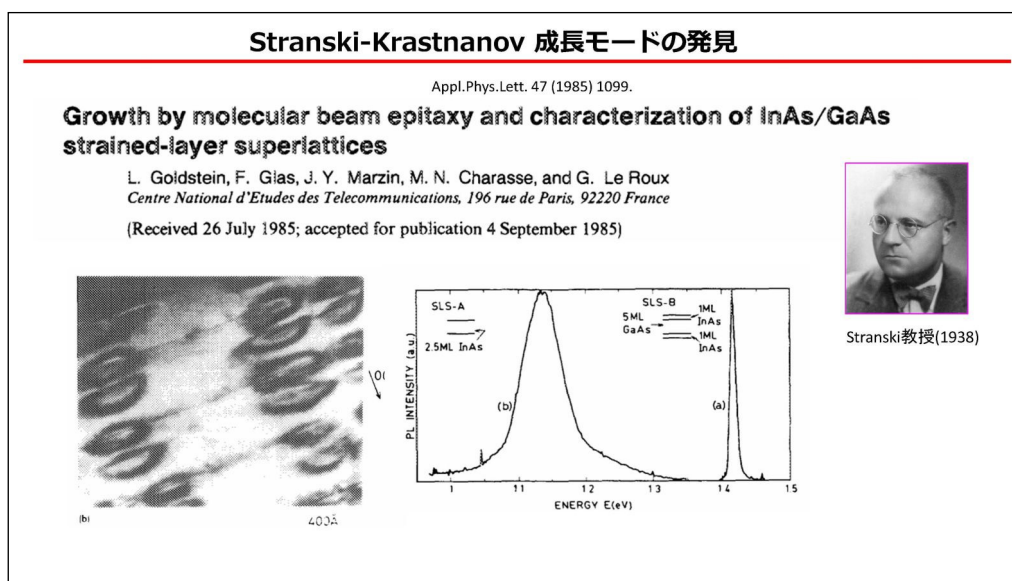


図-16

〈図-16〉私どもが論文を書いたのは 1982 年ですが、1985 年にフランスの CNET (Centre National d'Études des Télécommunications) のグループが図-16 に示した自己組織化法の報告を行っています。

タイトルに “InAs/GaAs strained-layer superlattices” と書いてあるように、インジウムヒ素とガリウムヒ素の膜を形成しようとしたのです。インジウムヒ素とガリウムヒ素は格子定数が微妙に異なり、結果として、図のような断面の顕微鏡写真が見えてしまったというものです。

世界でいくつかの研究機関が同じような構造をつくっていたと思いますが、図の写真を見て、それは欠陥だろうと、それ以上の追求をあきらめていたと思います。ところが、彼らが賢かったのは、光を当てたことです。そうすると、非常に強い発光が見えました。これにより、欠陥ではなく、しっかりしたナノ構造であろうと結論づけられたわけです。

のちにこの発見は、ベルリン工科大学のストランスキー教授らが 1938 年に理論的に提唱した「Stranski-Krastanov 成長モード」と解釈されるようになりました。ということで、一種のセレンディピティに近いと思いますが、単なる欠陥に見えた結果をあきらめずにしっかり解析したことによって、自己組織化量子ドットの発見となりました。

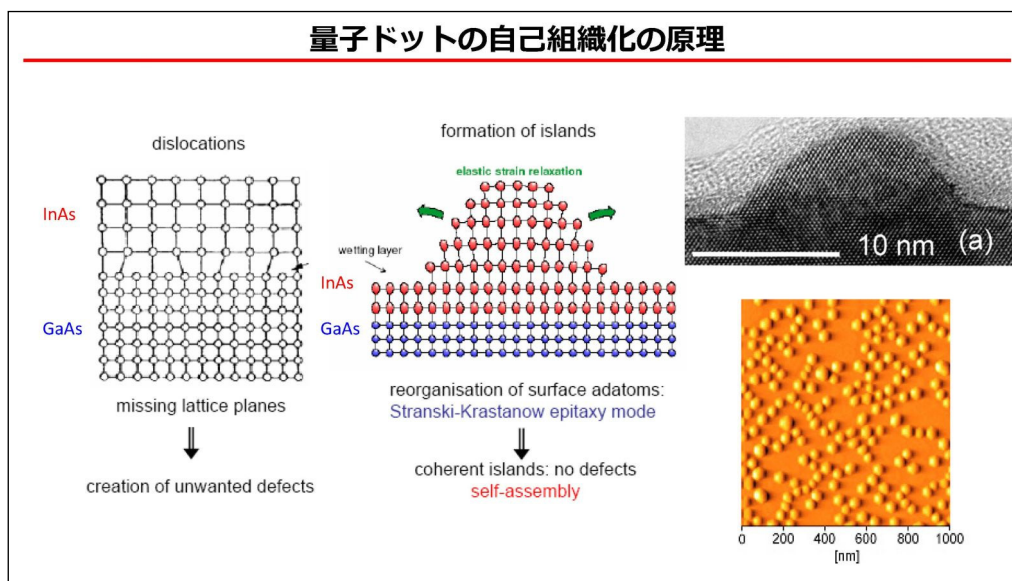
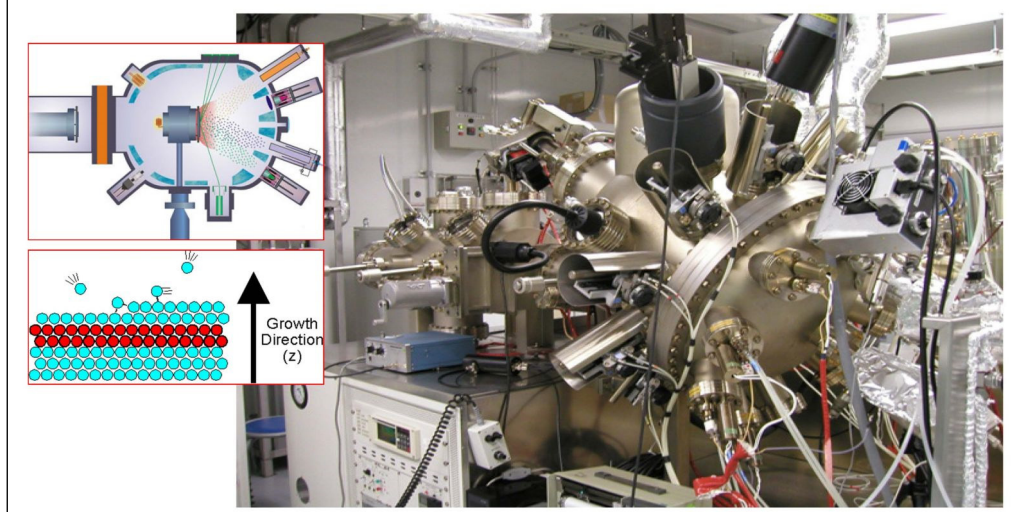


図-17

〈図-17〉もう少し説明しますと、ガリウムヒ素 (GaAs) とインジウムヒ素 (InAs) では格子定数がわずかに違います。図のように上に成長していくと、時々ボンディングを外してやることによって格子定数に合うような成長をしていきます。これが欠陥をもたらす原因となるわけです。しかし、注意深く結晶成長を行うと、まず1層目は引っ張られる。2層目も引っ張られる。結果としてエネルギーがたまってしまうわけですが、そこで何が起きるかという、ボンディングを切ってしまうのです。そうすると、結果的に中央の図のような三次元的な構造ができます。このように、三次元的な構造にしたほうが全体のエネルギーが低くなるため、量子ドットのような3次元構造が自然に形成されることになります。

分子線エピタキシー



図－18

〈図－18〉このような量子ドットを実現するツールですが、写真の装置はわれわれの研究室にあるもので、「分子線エピタキシー」という装置です。

この装置は宇宙空間の真空度を出すようなお釜であり、左上の図にあるように、原料が入っているセルを開けたり閉めたりすることによって結晶表面にビームとして原子あるいは分子を飛ばしていくもので、結果として精密に膜ができるのです。

こうした精緻な原子層レベルの技術が開発されて、先ほどのような Stranski- Krastanov 成長モードが初めて実現されました。

■ 量子ドットの研究に2つの流れ

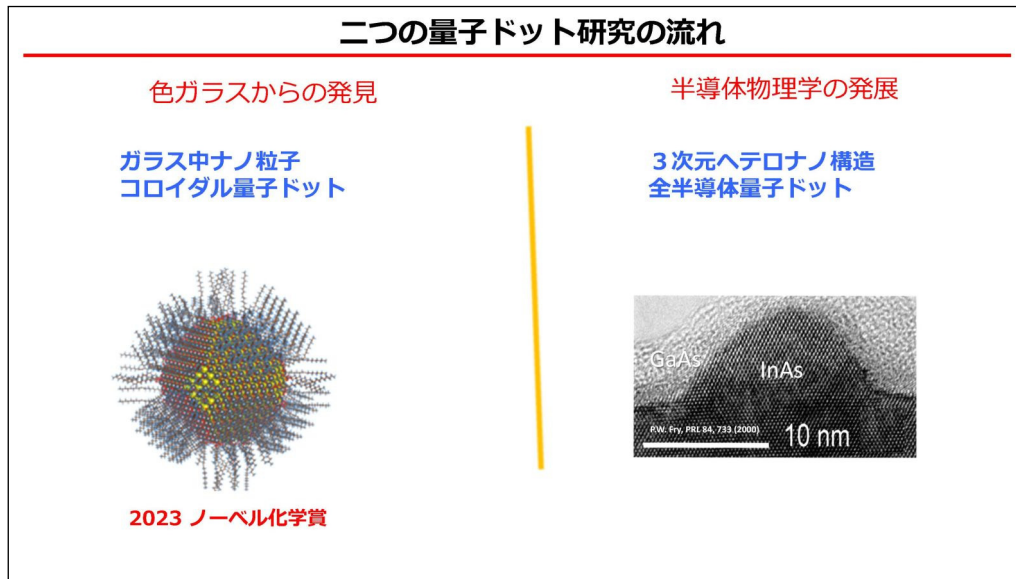


図-19

〈図-19〉量子ドットの研究には、実は2つの流れがあります。われわれ物理学者や電子工学者にとってなじみがあるのは、右の半導体物理学の発展としての量子ドットであり、その概念の国際的な出発点は1982年の英文の学術雑誌での発表です。

一方、色ガラスからの研究の流れがあり、ガラス中のナノ粒子に関するロシア語の論文、しばらくたつとコロイダル量子ドットにつながります。結果として2023年に3人の化学者にノーベル化学賞が授与されています。

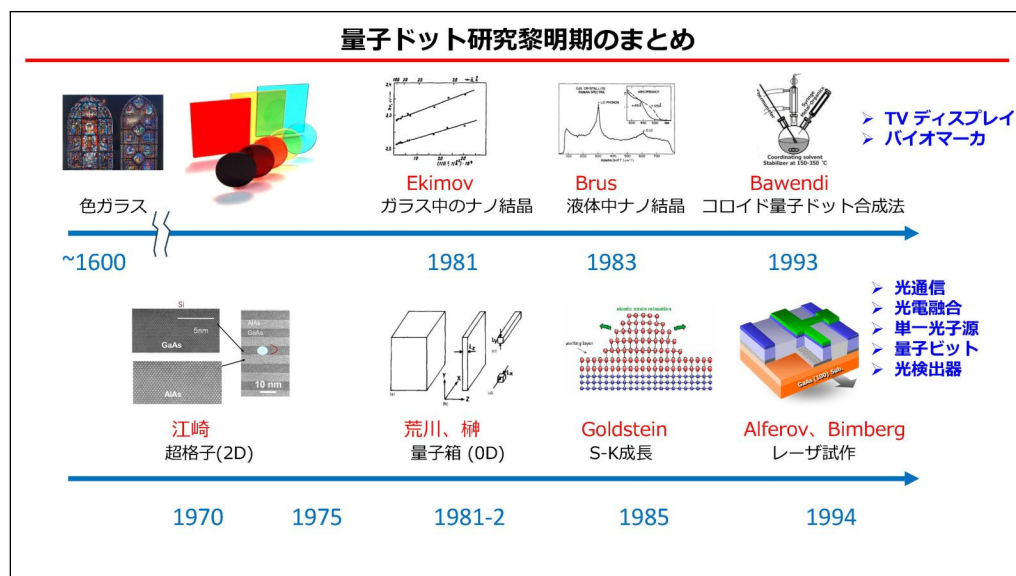


図-20

〈図-20〉色ガラスからの流れについてももう少し簡単に説明すると、色ガラスの歴史は、ステンドグラスなどで、1600年頃から脈々と続いています。そして、1981年に旧ソ連の研究者であった

エキモフ氏が、ガラス中のナノ結晶のサイズ依存性を調べ、サイズによってエネルギーが変わるという法則が成立していることを見いだしたのです。

また、ブラス氏は当時ベル研究所で同じような発見をしましたが、エキモフ氏の発表はロシア語であったために知らなかったということで、結果として、ノーベル賞受賞者に加わりませんでした。

そして一番右がコロイド量子ドットの化学合成で、成長時間を調整することによってサイズをコントロールできることを示したもので、バウエンディ氏が開発しました。この手法は、「ホットインジェクション法」という手法が非常に普及しています。

一方、物理系についてはすでにお話しした通り図の下段のような流れです。

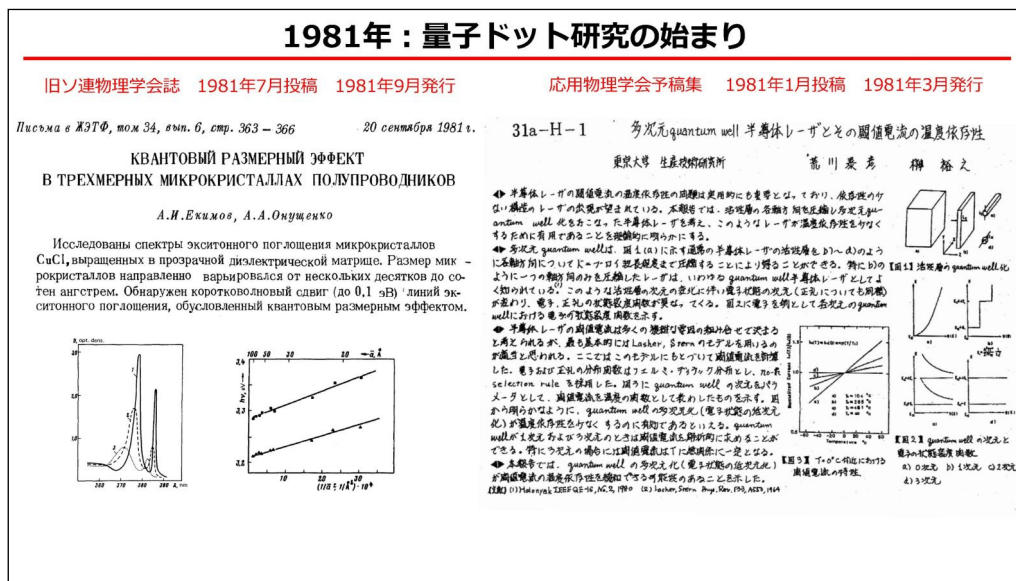


图-21

〈図-21〉スライドの左はエキモフ氏の論文です。後に英訳もされましたが、オリジナルはロシア語です。1981年7月に投稿され、9月に発行されています。

右はわれわれの研究で、「Applied Physics Letters」という英語の論文として1982年6月に出版されています。一方、日本語ではありますが、われわれは量子ドットの概念の提示と理論計算については、1982年の英文で公表した論文と同じ内容を応用物理学会で1981年3月に発表しています。投稿は1月ですので、エキモフ氏の論文より早いとも言えます。

今の若い人にこの論文を見せると、手書きであることに皆、感動してくれます。このようなフォントがあるのかと感想を言った学生さんもありました。

このように、量子ドットという概念が、同じ時期に世界の2か所で生まれたことが、この日本語とロシア語の2つの論文から理解いただけるのではないかと思います。

■「量子ドット」と呼ばれるまで

量子ドットの名称	
"Three-dimensional microscopic semiconductor crystal"	3次元半導体微結晶
1981 A. Ekimov	
"Three-dimensional quantum well"	多次元量子井戸
1981-2 Y. Arakawa	
"Quantum box"	量子箱
1983 Y. Arakawa	
"Quantum dot"	量子ドット
1986 M. Reed	

図－22

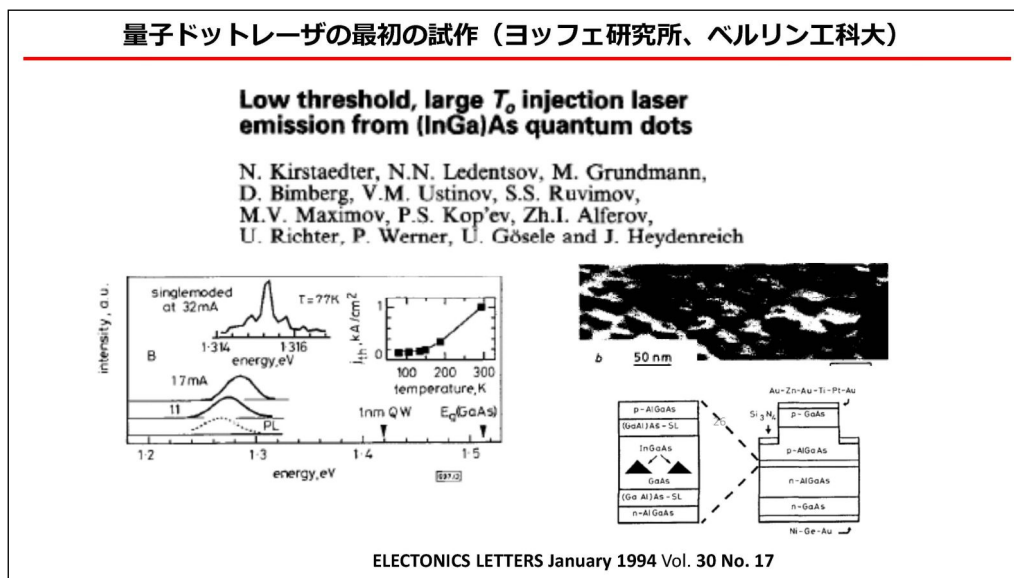
〈図－22〉今は「量子ドット」と呼んでいますが、エキモフ氏は「3次元半導体微結晶」と呼びました。われわれは最初、「3次元量子井戸」と呼びましたが、1983年くらいからは「量子箱」と呼ぶようになりました。

しかし、立方体はつくるのが難しく、1986年頃にマーク・リードという米国の学者が「Quantum Dot」と呼び始め、これが一気に普及してしまいました。確かに、ドットというとそれ自体が小さいという概念を持っています。一方、箱というと、大きいのか小さいのかよく分かりません。さすがアメリカ人で、ネーミングのセンスがいいという気がします。

■ 量子ドットのレーザの発展

1. 量子の発展
2. 超格子から量子ドットへ
3. 量子ドットレーザの発展
4. 量子ドット単一光子源
5. むすび

図－23

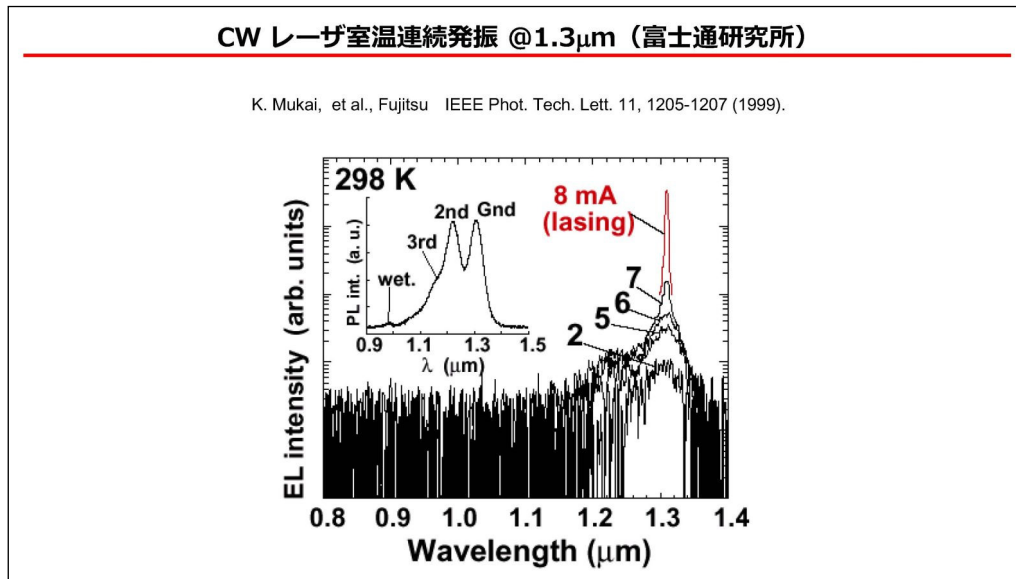


図－24

〈図－23〉 〈図－24〉 初期の量子ドット研究の状況がご理解いただけたかと思います。ここからは簡単に技術としての流れをお話したいと思います。

量子ドットレーザの最初の試作は、ヨッフエ物理技術研究所とベルリン工科大学の共同研究として報告されています。作製したレーザの特性は非常に悪いのですが、初めての試作ということでその存在は重要です。

■ 我が国における量子ドットレーザの実現

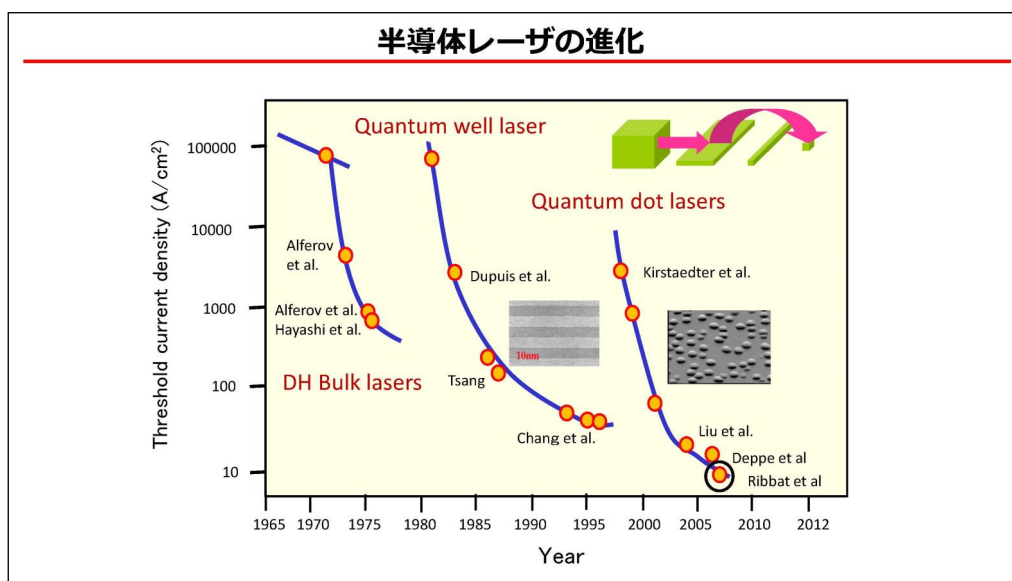


図－25

〈図－25〉それ以来、日本でも富士通研究所あるいは NEC、そしてわれわれも含めて量子ドットレーザをつくる努力をしてきました。1999 年、富士通研究所で、CW のレーザ発振、しかも波長が 1.3 ミクロンという、光ファイバ通信に適した波長帯の量子ドットレーザを実現しています。

重要なのは、もちろんレーザ発振をしていること、低閾値であること、それから閾値以下で、図のように基底状態と励起状態が見えていることが注目に値するのではないかと思います。

■ 半導体レーザの進化



図－26

〈図－26〉図は半導体レーザの進化を示したもので、普通のパルクレーザが 1970 年の室温連続発振のときに一気に下がりました(折れ線グラフ左)。次に、1975 年に光励起で最初に作製された量子井戸レーザは、1980 年ごろ、初めて室温で電流注入型が実現されました(折れ線グラフ中央)。縦軸は閾値電流密度です。閾値電流密度がずっと下がってきて、ベル研究所が非常にいいものをグラフの真ん中より下あたりで出し始めました。量子ドットレーザは、最初は高い閾値電流であったのが、世界最小の閾値電流密度は量子ドットレーザで達成されています(折れ線グラフ右)。

私は当初、いわゆるパルクレーザから量子井戸レーザ、そして量子細線レーザという一次元電子のレーザもあり得るだろうと思っていました。私自身も一次元電子のレーザをまずつくろうかと思っていたくらいですが、結論的に言うと、図のようにジャンプして、一気に量子ドットレーザという究極のレーザに到達してしまいました。このことは、科学技術史として大変面白いと私自身は思っています。ただし、閾値電流が低いだけであると、非常に低消費電力化することが可能であり、それだけではすでに普及している量子井戸レーザには勝てないので、やはり特徴が必要です。量子ドットレーザの特徴は何かというと、私が 1982 年に提唱した温度依存性です。

■ 共同研究により実現した高性能量子ドットレーザ

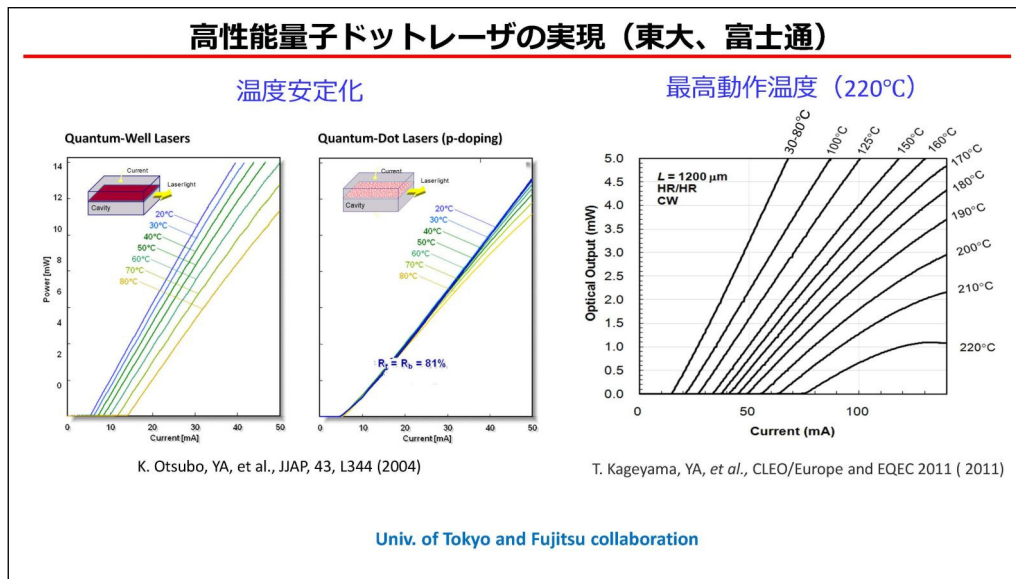


図-27

〈図-27〉温度安定化という点で、左と中央のグラフの違いは明確であると思います。温度安定性が高いということは、高温動作が可能になります。右のグラフを見ると「動いているではないか」と思われるかもしれませんが、1つの線で30°Cから80°Cを全てカバーしているのです。重なっているため1本に見えるだけです。さすがに80°C以降は閾値が動き始めますが、結果的に220°Cまで発振しています。220°Cは半導体レーザのみならず、あらゆるレーザで最高の動作温度です。以上のような状況が、東京大学と富士通との共同研究で生まれました。

■ 量子ドットによる閾値電流の温度依存性の低減

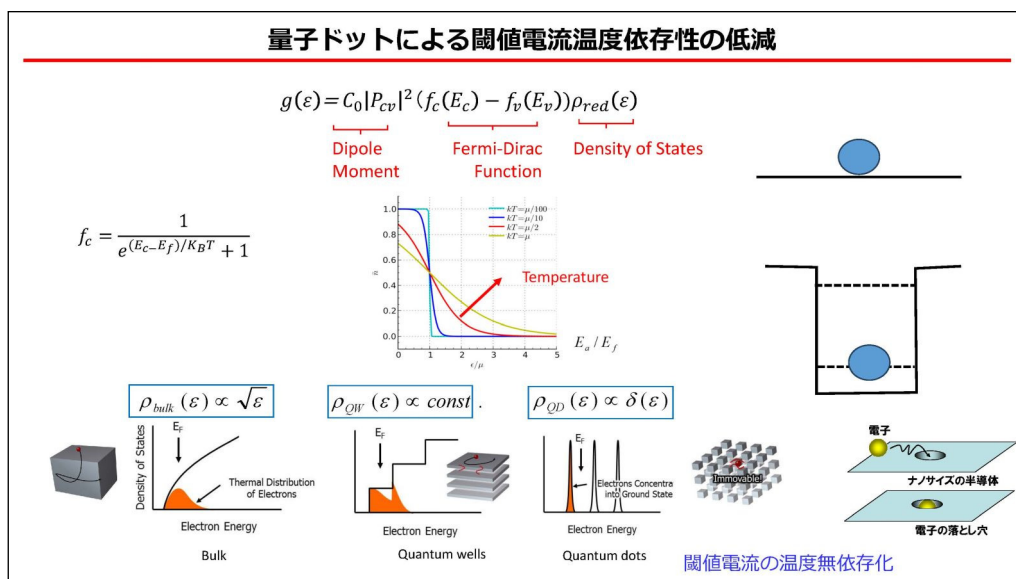


図-28

〈図-28〉では、なぜ温度依存性がよいのか。少し専門家向けに申し上げますと、レーザのゲイン（利得）は、マトリクスエレメント、電子の分布の確率であるフェルミ・ディラック関数、それ

から状態密度で決まり、図に示した式がもっともシンプルな表現です。

フェルミ・ディラック関数は、温度が上昇すると中央のグラフのように広がっていきます。そのため、温度が変わると値が変わります。値が変わればレーザーのゲインも変わるため、もともとレーザー発振した条件を満たすためには電流をさらに注入しなくてはならず、結果として閾値電流が増加します。これが閾値電流の温度依存性が生ずる理由です。

ところが、式では“Density of States”、すなわち「状態密度」という電子が座るべき席の数も含まれています。各エネルギーにどれだけの電子が入り得るかということを示すものです。次元を下げていくと状態密度はピーク化します。特に量子ドットレーザーの場合、電子のエネルギーが離散的になるため、上のエネルギーレベルが十分離れていれば、最低エネルギーレベル、すなわち基底状態に常にとどまります。したがって、キャリア数が同一である限りは、温度が変わっても同じ利得の値をとるため、閾値電流は変化しないということになります。

分野外の方には分かりにくいと思いますので、別の言い方をすると、右上の丸が普通のバルク半導体の電子だと思ってください。バルク半導体の電子は温度が上昇すると、エネルギーのレベルが高い方にもあるので、どんどん電子のエネルギー分布は広がっていくわけです。したがって、温度が上がれば上がるほど、ある特定のエネルギーの発光波長に対する電子の数は減ってくるようになります。ところが量子ドットの場合には、右中段の図にあるようなエネルギー差があるため、少々温度が上がっても跳ね上がらず、基底状態に閉じ込められたままになります。ということは、同じ状態であり、状態が変わらなければ閾値電流も変わりません。

■ 量子ドットの社会実装に向けて



図-29

〈図-29〉 以上のような研究を進める中で、2006年に株式会社 QD レーザが設立されました。三井ベンチャーキャピタルと富士通の共同出資で、当時としてはまだ珍しいスタートアップです。いろいろな応用を展開しており、結果として2021年にIPOが成立しました。したがって、一定の成功事例になっているのではないかと思います。

1981年に量子ドットレーザを提案し、2006年に会社が設立されたのですが、IPOが2021年です。つまり、最初の提案から見ると40年もかかっていることになります。会社の設立からは15年前後ですが、それでもベンチャーキャピタルとしては我慢しないといけないわけです。資金集めのときはいろいろ苦労したと聞いています。

やはり、ディープテックのスタートアップにはそれなりの難しさがあり、何が支えていたかというと国家プロジェクトです。東大が資金を受け入れて共同で研究開発を行いました。米国でもDARPA（国防高等研究計画局）あるいは軍の存在などがあります。国家資金を適切に活用しながらディープテックのスタートアップは発達していくものだと思います。今の量子コンピュータなども、同じような状況になっているのではないかと考えているところです。

■ 光電融合——量子ドットレーザが最も有望

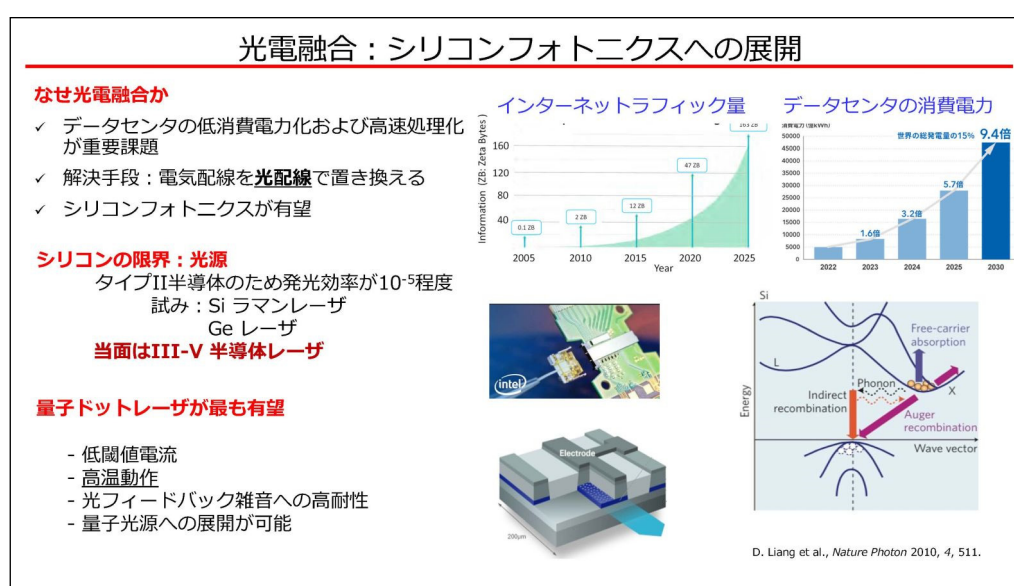


図-30

〈図-30〉今、AI でインターネットが非常に伸びていますし、消費電力も非常に大きくなっています。そうした状況の中で1つ占めているのが、CPUとメモリの間でのやり取りが非常に大きくなっているということです。CPU/メモリ間のやり取りは、エネルギーとともに伝送容量も非常に大きなものが要求されるようになっていきます。ただし、距離はどんどん短くなっています。ある一定の距離のときに伝送量が増える、あるいは消費電力に制約があるときには、光配線が有利になるということになっています。

シリコンと光を使って光配線を実現しようとする、光源が必要です。ところが、シリコンというのは非常にいい材料ではありますが、唯一の欠点が光らないということです。それをわれわれの言葉でいうと、「間接半導体だから」ということです。そのため、シリコンの上に化合物、直接遷移の半導体レーザを載せないといけません。しかも、載せるレーザは通常の量子井戸レーザも考えられますが、やはり量子ドットレーザが最適というのが以前から私が主張してきたことです。この主張が正しいことはすでに実証されており、高温動作が可能であること、光フィードバック雑音への高耐性があるなど、優れた特徴が確認されています。

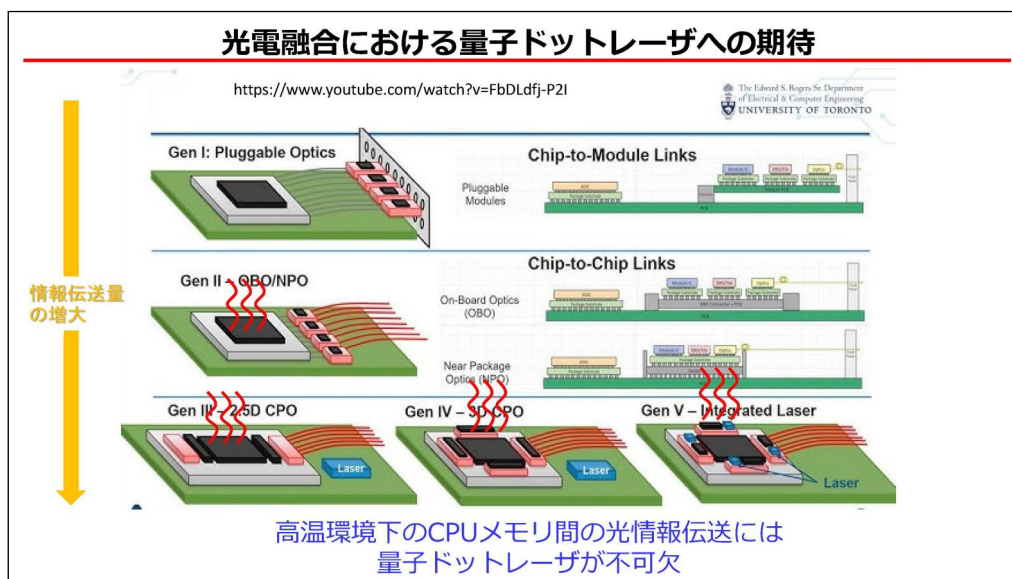


図-31

〈図-31〉この図で、黒い四角をLSI だと思ってください。そこから出ている線が電気配線です。左上の図の右端までが光ファイバできています。今、このボードの中の配線を徐々に電気配線から光配線にしていこうとしており、上段のジェネレーション 1 (Gen I) は図のような程度でしたが、中段のジェネレーション 2 (Gen II) では LSI のチップにかなり近づいてきました。左下のジェネレーション 3 (Gen III) では、さらに近づいてきています。ジェネレーション 3 は 2.5 の Co-Packaged-Optics で、レーザを少し離れたところに置いているのですが、いよいよインテグレーションが進んでくると、右下のジェネレーション 5 (Gen V) のように LSI の隣にレーザを持ってこないといけない状況になってきます。

ところが、LSI は高速演算処理をするので熱の発生が避けられず、非常に熱くなります。そこで、優れた高温特性を有する量子ドットレーザが有用になってきます。

■ 量子ドットレーザ搭載の商用チップの開発と展開

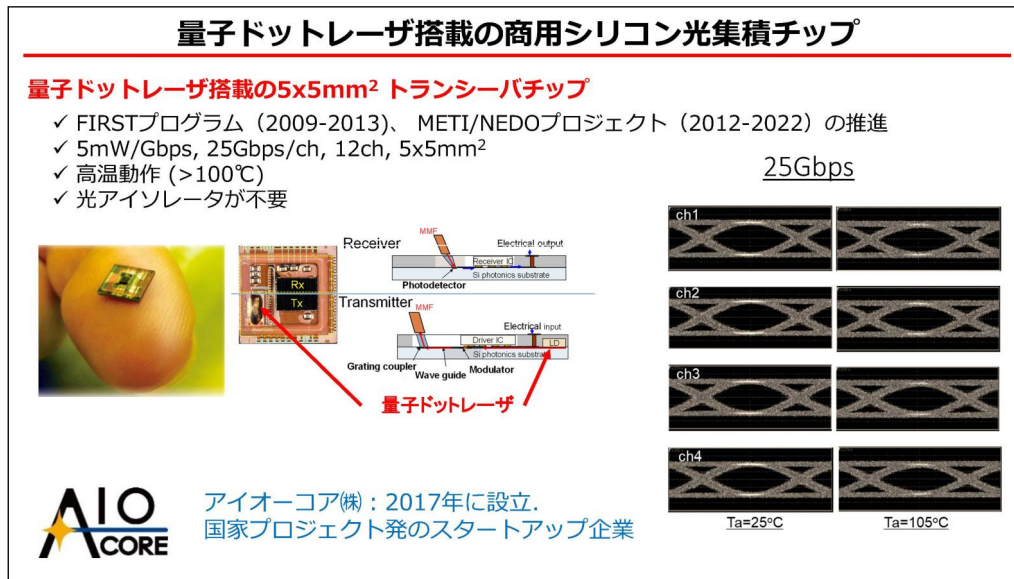


図-32

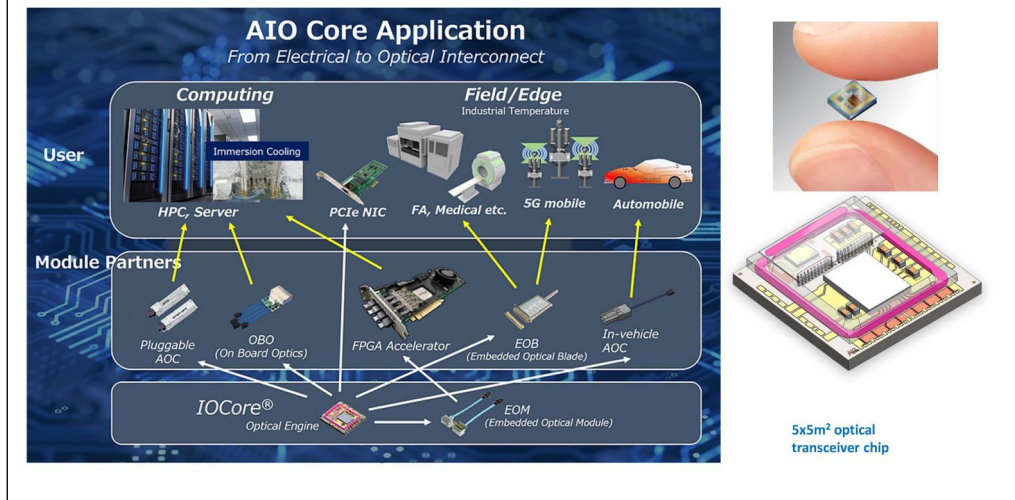
〈図-32〉量子ドットレーザ搭載の第一歩として今、光トランシーバチップをつくっています。この光トランシーバチップも、私が中心研究者として推進した FIRST プログラムという内閣府のプログラムや、NEDO と経産省のプロジェクトなどの国家プロジェクトで、産業界と協働で開発したものです。

特徴は量子ドットレーザを載せているところです。5 ミリ角のチップですが、この光の送受信機能を有する集積チップは、超小型であるため、LSI の近くまで持っていくことが可能です。

25Gbps のランダムな信号パターンを入れると、もし大きく乱れれば、アイパターン（光送信波形）が開かないのですが、25° C できれいに開いていて、105° C で同じ条件で動作しても同じように開いているのです。つまり、温度安定性がよいということで、これは、量子ドットレーザを光源に用いたことにより初めて実現されました。

AIO CORE 株式会社は 2017 年に設立されました。この会社は、ある意味では国家プロジェクト初のスタートアップ企業です。

量子ドットレーザ搭載シリコン光集積チップの展開



図－33

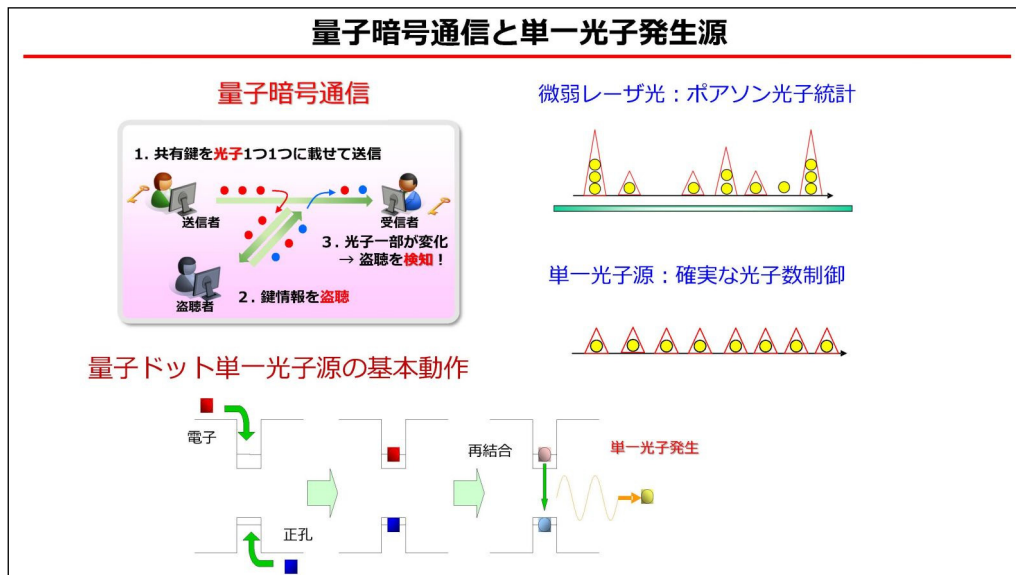
〈図－33〉今、どのような社会実装をめざしているかという、データセンターもありますが、医療機器などの応用、そして車です。今、ワイヤーハーネスというのがあります。特に EV になれば自動車の中は信号線の塊です。伝送容量も非常に高いものが要求されていますし、それから軽くないといけません。また、雑音にも強くないといけません。

2030 年、あるいは 2032 年頃には、光電融合により、オプティカハーネスが本格的に車の中に入ってくるのではないかと期待しているところです。

■ 量子ドット単一光子源の原理

1. はじめに
2. 量子ドットの黎明期研究
3. 量子ドットレーザの発展
- 4. 量子ドット単一光子源**
5. むすび

図－34



図－35

〈図－34〉 〈図－35〉最後に少しだけ量子技術の話をしてします。量子暗号通信というのがありますが、1つの光子をきちんと送っていれば、途中で盗まれると光子の一部が変化するなどの影響が出て、受信者側で盗聴が検知できます。

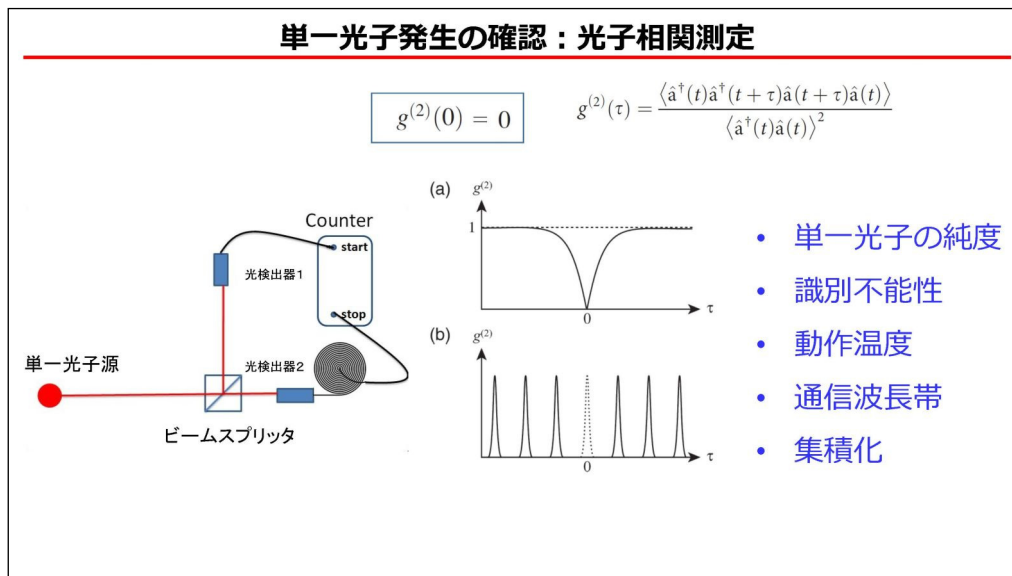
そういう意味で、単一光子をきちんと送るのがいいということになります。単一光子の発生は、今、市販されている量子暗号通信装置では、非常に弱くした普通のレーザ光を光源として使っています。

そうすると、光子統計というのがあり、それはポアソン分布するので、図－35の右上のように光子が1つの場合も0の場合もありますし、あるいは3つの場合もあるなどランダムになるのです。確実にしようと思えば非常に弱くする必要があり、そうするとほとんどのタイムスロットは0で、時々1になるため、情報の伝達に使用できる有効なタイムスロットの割合がきわめて低くなります。

そういうことで、やはりきちんと各タイムスロットで一つひとつ確実に一つの光子を発生

させたいところです。これを実現するのが単一光子源なのです。

では、単一光子源の原理は何かというと、単純です。1つの量子ドットをまず用意します。1つの量子ドットに電子を入れれば、1つの量子ドットから出光は、単一光子であるという、非常に単純な話です。

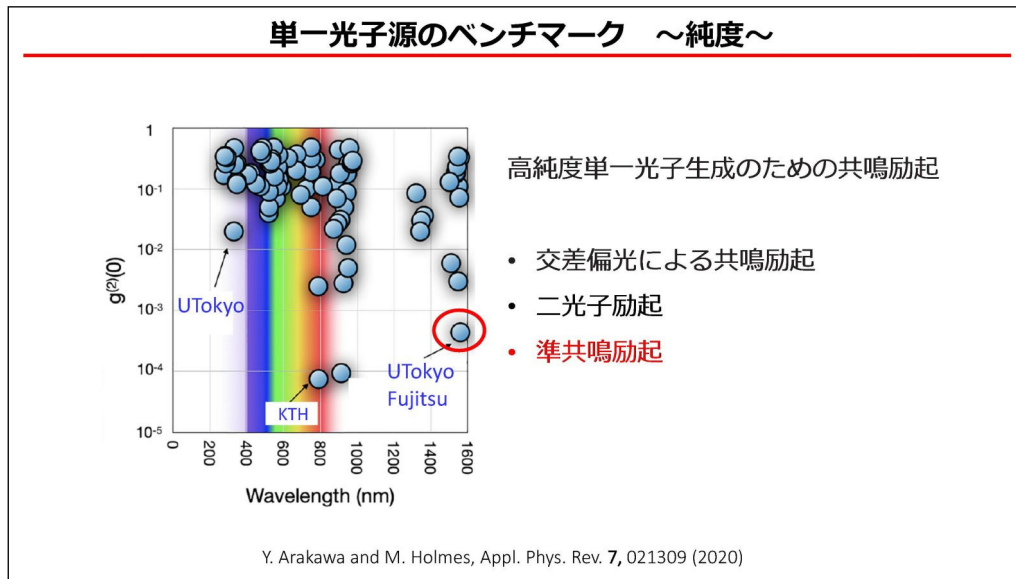


図－36

〈図－36〉問題は、単一光子を発生していることをどのように確認するかです。例えば、1つの光子が来たとし、左下の図のようにビームスプリッターを入れます。そうすると、ビームスプリッターから先は右に行くか上に行くかしかないので、1つの光子の場合、同じタイミングであれば右が1の場合には上は0、あるいは右が0の場合には上は1となり、両方とも1になることはないわけです。したがって、同じタイミングで測れば相関は0になるわけです。

一方、2つ来たとすれば、右に1つ行って、上にも1つ行く場合があります。そうすると1×1というのが生じ、相関は0になりません。もちろんディレイがあればタイミングは違うので、個数が増えてくるわけです。きちんと単一光子が発生していれば、右下の(b)のグラフのようにディレイ時間ゼロでのみ出力が0で、それ以外の相関値はきれいになっています。これをアンチバンチングといいます。現在の単一光子源の技術の課題は、単一光子の純度、動作温度、識別不能性などです。また、通信波長帯であるとか、集積化といったことも課題になります。

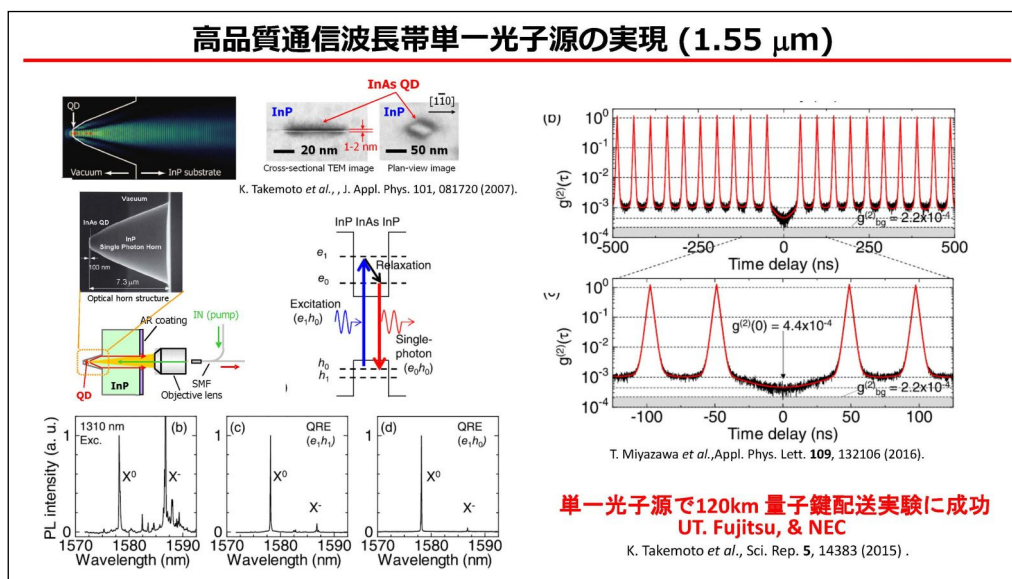
■ 単一光子源のベンチマーク——通信波長帯



図－37

〈図－37〉 少しだけ通信波長帯と動作温度の話をしたと思います。この図表は私がレビューペーパーを書いたときに、これまで報告されたほとんどすべての論文について、 $g^{(2)}(0)$ で波長を横軸にして取ったものです。小さければ小さいほどよく、世界最高なのが 800 ナノメートル付近でスウェーデンの王立工科大学（KTH）で達成されています。これは二光子励起で、励起の仕方にも随分依存します。

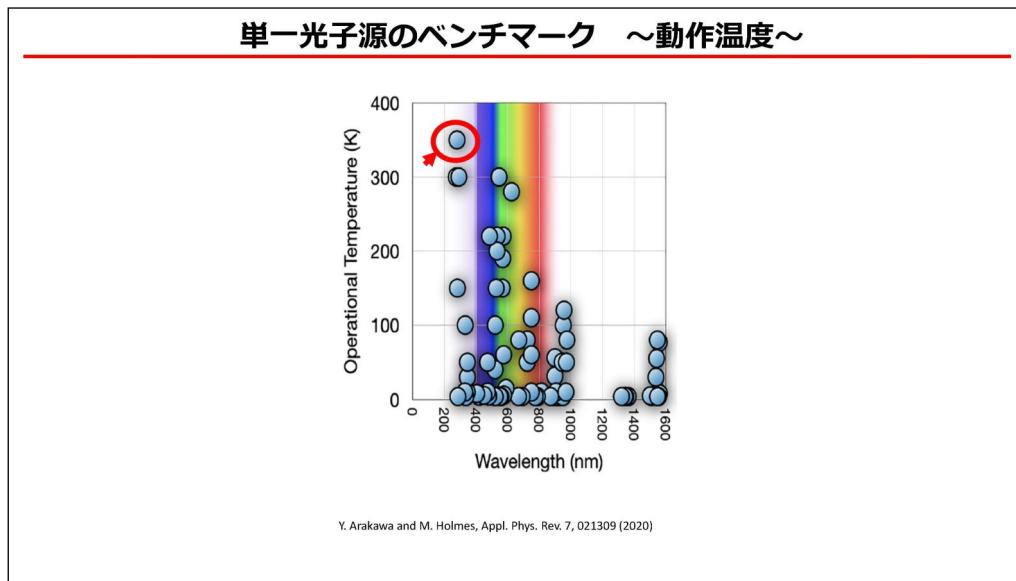
2 番目に小さい $g^{(2)}(0)$ は、光ファイバ通信が可能な 1.55 ミクロンの通信波長で達成されています。この波長は本当に量子暗号通信に使える波長です。東京大学と富士通が達成しています。



図－38

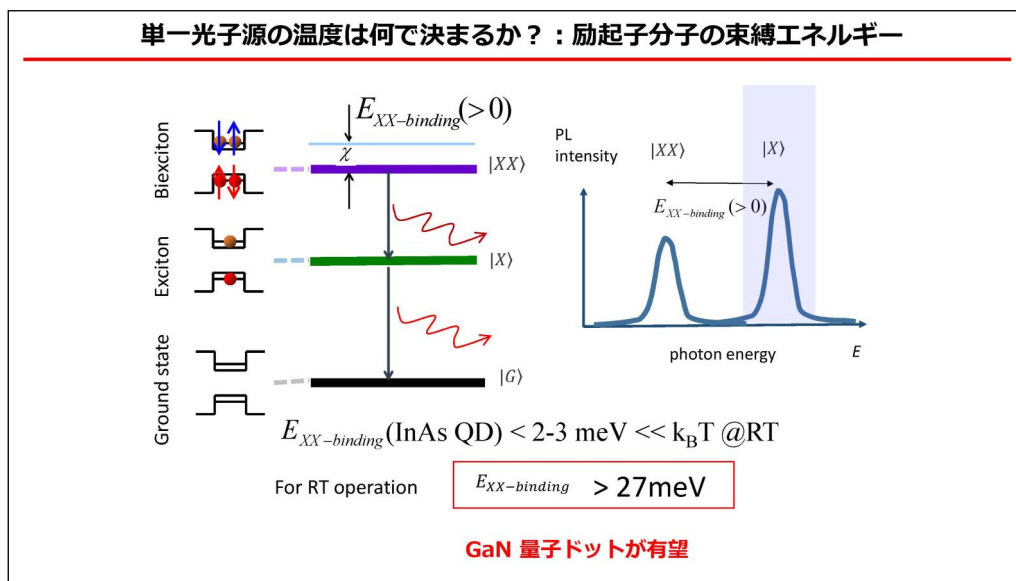
〈図－38〉 この単一光子源についての詳細は申し上げませんが、通信波長帯で $g^{(2)}(0) = 4.4 \times 10^{-4}$ を実現しています。また、単一光子源で 120 キロメートルの量子鍵配送実験に成功しており、120 キロメートルという距離は今でも破られていません。ただ、実用的な観点でいえば、この実験は低温で動作していて、先ほどのコヒーレントの室温動作と比べるとそれが難点ではあります。ただし、今は、低温技術は非常に進歩していますので、10K 程度であれば小型冷凍機で十分ですので、現実的かと思います。

■ 単一光子源のベンチマーク——動作温度



図－39

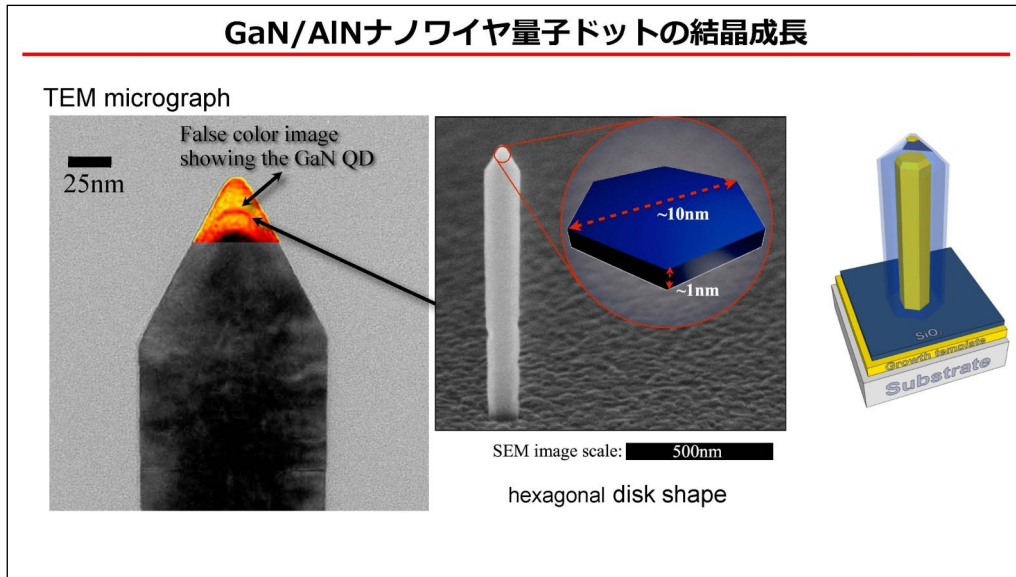
〈図－39〉それから、もう1つのベンチマークは動作温度です。この図表にあるように、最高動作温度は350Kですが、これはわれわれが達成しています。



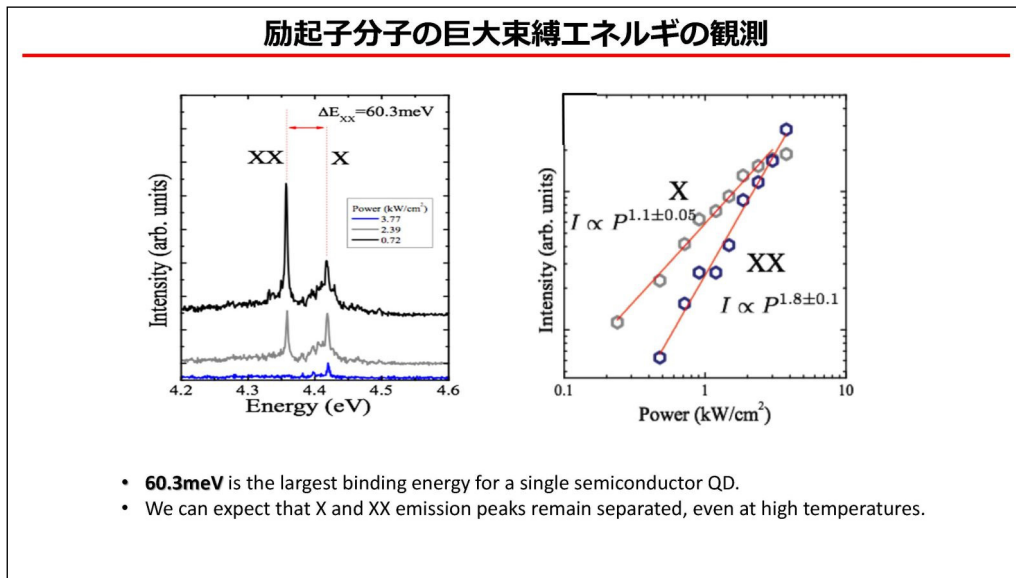
図－40

〈図－40〉最高温度 350K の実現には、青色レーザで有名な半導体である GaN 半導体で構成される量子ドットを用いています。より安定した単一光子を出すためには、実はスピンの関係で1つの量子ドットには2つの電子正孔対、すなわち励起子分子が存在し得るため、そのためわずかに異なった2つの波長で、微妙に異なった光子をひとつずつ発光します。そこで、単一の光子の発生のみを保証するためには、きちんと右側のピークだけをフィルタリングするのが重要です。しかし、2つのピークのエネルギー（波長）差が小さいと、温度が上がったときに電子の散乱等により発光エネルギーの広がりが生じるために、フィルタの効果が抑制されてしまいます。これに

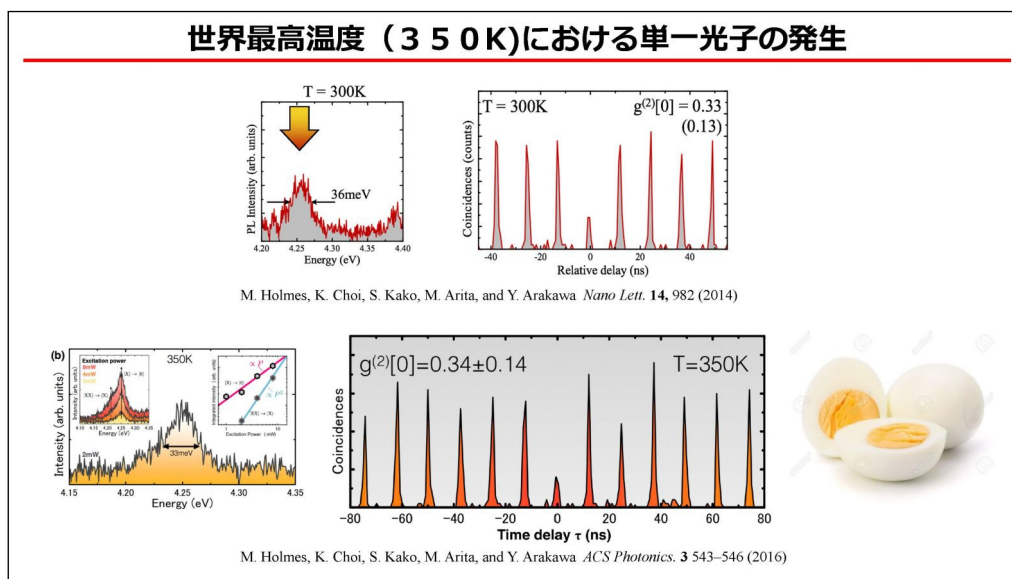
より、複数の光子が発生される確率が高まり、純度の高い単一光子の発生が阻害されてしまうのです。したがって、例えば室温で動作させるためには、このエネルギー差（励起子分子結合エネルギー）が室温の熱的揺らぎである 27meV より十分大きいことが求められます。しかし、従来の InAs/GaAs 量子ドットでは実現できないため、新たに GaN/AlN 量子ドットを開発しました。



図－41



図－42

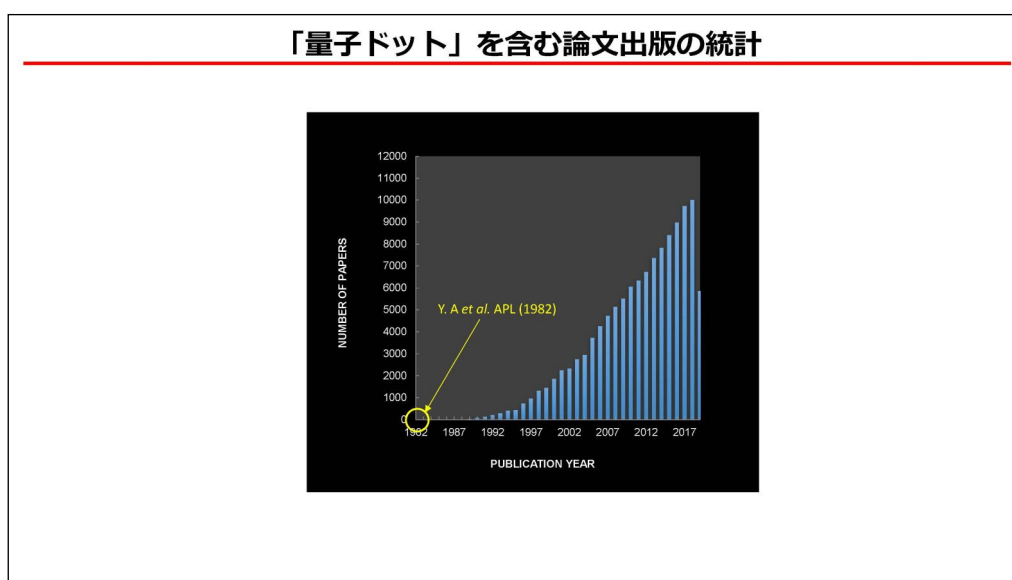


図－43

〈図－41〉 〈図－42〉 〈図－43〉 時間の関係で詳細は省略しますが、図－41 のような GaN ナノワイヤーの頂上に量子ドットを作成することで、図－42 に示されるように 60meV 以上の励起子分子結合エネルギーを達成しました。その結果、室温において、図－43 の右上のグラフのように単一光子発生の証拠であるアンチバンチングを観測しました。その結果、下図のように 350K において単一光子の発生に成功しています。

350K は、単一光子の発生素子としては今でも世界最高温度です。ちょうどゆで卵が十分できるような温度になっています。

■ 論文出版からも見える量子ドットの研究分野の伸び



図－44

〈図－44〉 最後になりますが、図－44 は量子ドット、量子箱などのいくつかをキーワードとした場合に、それらを含む論文出版数の統計で、いまだに伸び続けています。科学技術論文が伸び

ているということは、この分野は実用化が進む一方で、まだまだ研究として伸びつつあるということです。実用化のフェーズに入ると、一般的には科学技術論文の数は飽和します。したがって、量子ドット研究については、さらに新しい基礎研究テーマが出てきている、また新たな応用も生まれていることを示しているのではないかと考えています。

まとめ	
1. 量子ドットの黎明期研究（二つの流れ）	
✓ 究極の半導体ナノヘテロ構造としての量子ドット（エピタキシャルドット）	
✓ 半導体微結晶、コロイダル量子ドット	
2. 量子ドットレーザ	
✓ 光ネットワーク、光電融合、高温環境化光源などへの展開により社会実装	
3. 量子ドット単一光子源	
✓ 高品質単一光子源、高温動作単一光子源	
✓ 量子暗号通信	
✓ 光量子コンピュータへの展開	
4. 量子ドット	
✓ 量子コンピュータへの展開	

図－45

〈図－45〉以上、本日の私の講演では量子ドットの黎明期の研究、それから量子ドットレーザの発展、そして単一光子源の研究の一端をご紹介しました。

本日は特に何も申し上げていませんが、半導体量子ドットの量子コンピューティングへの応用の可能性も非常に高まっているところです。今後に期待したいと思います。

長い間ご清聴いただきまして誠にありがとうございました。以上、私の講演とさせていただきます。

■このレポートは2025年7月8日グランドアーク半蔵門において行われた、第157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 2-1-1 YANMAR TOKYO 6 階

Tel. 03-3274-5125 Fax. 03-3274-5103

www.hondafoundation.jp

発行責任者 角 田 正 樹