

2009年
年次総会

特別
講演

エサキダイオード発見から50年 『トンネルデバイスから超格子へと ナノ量子構造研究に懸けた半世紀』



江崎 玲於奈

(横浜薬科大学学長・(財)茨城県科学技術振興財団理事長) 講演要旨

今日のお話は、一昨年、日経新聞から頼まれて執筆した「私の履歴書、限界への挑戦」という本の内容がベースになっています。

私は大阪で生まれました。6歳までは大阪で、小学校、中学校、高等学校時代を京都で過ごしました。第三高等学校卒業後、1944年に東京大学物理学科へ入り、卒業したのが1947年です。1947年は半導体にとって重要な年として、この年の12月にベル研究所でポイントコンタクト方式のトランジスタが発明されています。卒業して川西機械製作所のちの神戸工業へ就職しました。その後1957年に東京通信工業(現在のソニー)へ移りました。1960年35歳のときに、ニューヨークIBM T. J. ワトソン研究所に移籍しまして、アメリカで32年過ごしました。その間、主として半導体超格子の先駆的研究に携わりました。1992年に日本に帰り、筑波大学学長、芝浦工科大学長を務め、現在は横浜薬科大学の学長と東京大学ナノ量子情報エレクトロニクス産業機構諮問委員長などを務めています。1998年より現在まで財団法人茨城県科学技術振興財団理事長を兼務しています。

私は戦争の中で育ち、敗戦直後に卒業、変動の中で生きてきました。死と破壊が身近な戦争という追い詰められた環境の中で、何にプライオリティをおいて生きるかを必死に問い詰めていました。戦時中の欺瞞情報を離れ、客観的知識、普遍的知識を渴望しました。サイエンスはユークリッドの作った形式論理を基礎とし、ルネサンス頃から始まった実験的検証により自然現象を解明する最も確実な知識であるということに引き込まれました。20世紀に入ってから物理学は世界観を変えるほどの大発展がありました。それで東京大学理学部物理学科を選び入学しました。

学生時代、1945年3月9日東京大空襲があり下宿から焼け出されました。それでも翌朝8時、大学では普通に講義がありました。学ぶことに最大の価値を置けという田中務教授の東大アカデミズムの無言の教えがありました。

大学を卒業するにあたり「わが人生、何をなすべきか。われは何を得意とするか。」という問いに自分の人生ドラマのシナリオを創作して応じました。卒業した当時はまだ量子力学の普及は限定されていました。東京帝国大学の最後の卒業生でしたが、そこで、量子力学の新知識を企業において活用し、量子デバイスを作るというシナリオを下に、人が誰もやらなかったことをやろうと決意して、エレクトロニクスの企業へ就職しました。

1947年にトランジスタが発明されましたが、真空管と半導体デバイスは質的に違うものですから、真空管をいくら研究しても改良してもトランジスタは生まれてきません。我々は、殊に安定した社会では、将来は現在の延長線上にあるものと思いがちです。しかし、変革の時代にはブレークスルーやイノベーションと呼ばれる革新的なものが誕生して将来は創られるものです。そこで決定的な役割を演じるのが個人の創造力(クリエイティビティ)です。

1953年「無線と実験」に「真空管時代去る、実用期に入るトランジスタ」と題する解説記事を書いたり、大阪中央電気クラブの専門講習会で講演もしました。この講演の冒頭では、真空管により電気通信関連の発展がもたらされたが、真空管の進歩が限界に近づいてきた今日にでは、真空管が電気通信界の発展を阻害しているともいえるようになりました。この時期にデビューしてきたのがトランジスタであると話しました。

1951年にベル研究所からpnジャンクションにおけるジナー電流の観測という論文が発表されました。pnジャンクションの逆方向にジナー電流、即ちトンネル効果が見られるとした結論は間違いだった。同じくベル研究所のミラーが1955年にpnジャンクションの逆方向はアバランシェブレークダウンだと発表しました。量子力学に基づくジナー電流はきれいな理論です。このような間違いを「Creative Failure創造的失敗」と呼んでよいでしょう。

トランジスタ誕生の重要性を認識して、ゲルマニ

ウムやシリコンなどの工学と接点の強い半導体研究に取り掛かりました。この未踏の分野は何を研究しても興味ある成果が生まれた。エサキ・トンネルダイオードもその一つ。電子障壁の巾を極端に薄くすることに挑戦しました。若い分野は若い研究者に適していたのだらうと思います。

電子波の量子力学的トンネル電流は10nmくらいの巾以下の電子障壁から観測することが出来ます。

トランジスタの製造の方式として、グロウントランジスタ、アロイトランジスタの2種があります。RCA方式はアロイで作成していました。ソニーはベル研究所、ウエスタンエレクトリック系統でグロウン方式を採用していました。結晶成長させるときに不純物を入れ、18乗から19乗の濃度のものを作ろうとしました。不純物を多くすると、ブレークダウン電圧が低くなり、トンネル効果が発生していると確信しました。逆方向の方が電流が流れやすいので、バックワードダイオードと名づけました。不純物を増やし、温度を下げると負性抵抗現象が現れることを発見しました。負性抵抗は予期しなかったサプライズでした。1957年に東京通信工業の社名でこの新現象を世界的な学会誌、アメリカのフィジカル・レビュー、1958年1月号に論文発表しました。

PHYSICAL REVIEW

Journal of experimental and theoretical physics published by I. S. Pines et al.
 Section: Solid State, Vol. 106, No. 1, JANUARY 15, 1958

New Phenomenon in Narrow Germanium p-n Junctions

Leo Esaki
 Tokyo Tsushin Kogyo, Limited, Shinjuku, Tokyo, Japan
 (Received October 11, 1957)

IN the course of studying the internal field emission in very narrow germanium p-n junctions, we have found an anomalous current-voltage characteristic in the forward direction, as illustrated in Fig. 1. In this p-n junction, which was fabricated by alloying techniques, the acceptor concentration in the p-type side and the donor concentration in the n-type side are, respectively, $1.6 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ and approximately 10^{19} cm^{-3} . The maximum of the curve was observed at 0.035 ± 0.005 volt in every specimen. It was ascertained that the specimens were reproducibly produced and showed a general behavior relatively independent of temperature. In the range over 0.3 volt in the forward direction, the current-voltage curve could be fitted almost quantitatively by the well-known relation $I = I_0 \exp(qV/kT) - I_0$. This junction diode is more conductive in the reverse direction than in the forward direction. In this respect it agrees with the rectification direction predicted by Wilson, Frenkel, and Joffe, and Nordheim 25 years ago.
 The energy diagram of Fig. 2 is proposed for the case

LETTERS TO THE EDITOR 603

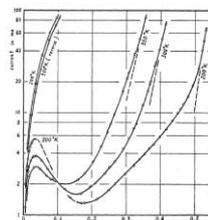


Fig. 1. Semilog plots of the measured current-voltage characteristics at 200°K, 300°K, and 350°K.

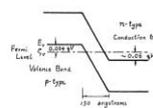
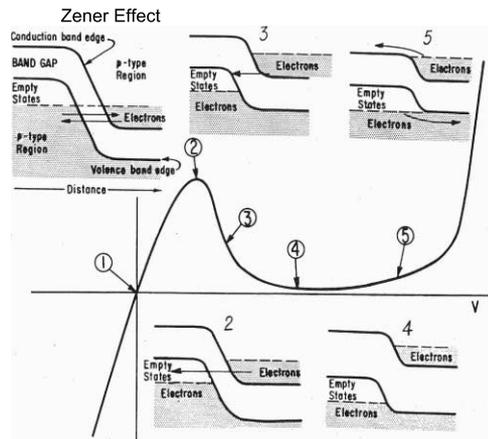


Fig. 2. Energy diagram of the p-n junction at 300°K and no bias voltage.

この図は、トンネルダイオードの動作を説明しています。ゼロバイアスから徐々に電圧を印加していくとトンネル効果で電流が流れ、その後負性抵抗領域に入り電流が流れなくなり、さらに電圧を印加すると、また電流が流れるという現象を示します。

1958年にブリュッセルで固体物理学の国際学会が開催され、トランジスタ発明者の一人、ウィリアム・ショックレー博士が基調講演を行ないました。この基調講演の中でショックレー博士は本会場で、ジナー効果（トンネル効果）に対して、これまでなされた中でもっとも美しい研究成果が東京のレオ・



Esaki Diode のN字型負性抵抗を示す電流(縦軸)-電圧(横軸)特性
Esaki Tunnel Diode 1957

エサキによって報告されると言ってくれたので、私の発表時には会場が満員になりました。

その後アメリカへ渡り、トランジスタが発明されたマレイヒルのベル研究所を訪れました。そこにはグラハム・ベルの胸像があって、「時には踏みならされた道から離れ、森の中に入ってみなさい。ここでは、きっとあなたがこれまでに見たことのない何か新しいものを見出すに違いありません。」と印象に残る言葉が書かれていました。

われわれを魅了した量子力学の歴史

1900年にマックス・プランクがエネルギー量子を発見したことから、従来の連続的に変化するアナログ量を取り扱う古典力学の時代から、不連続に変化するデジタルな量子を取り扱う量子力学の時代へ進化してきたのです。

1905年アインシュタインは、エネルギー量子として光子（フォトン）という概念を導入して波動の粒子性を唱えて光電効果を説明しました。

1913年ボーアは量子条件を適用し原子からの線スペクトルに理論的根拠を与えました。

1923年、ドゥ・ブローイが電子などの粒子の波動性、物質波の概念を導入、二元論（dualism）を提唱しました。

1925年にはハイゼンベルグのマトリクス力学、1926年シュレーディンガーの波動方程式により量子論は数式化されました。

1928年、プロッホは近代的な量子固体論の基礎を築きました。

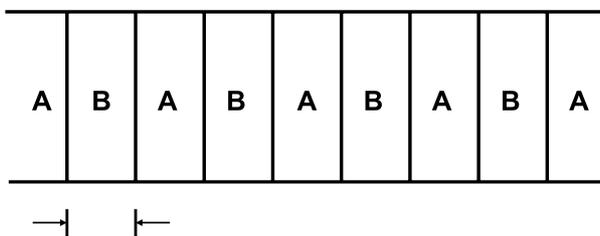
1957年、エサキダイオードにより、固体中の量子論的トンネル効果の発見がありました。

1969年、江崎と朱が半導体量子ナノ構造である人工超格子の概念を提唱しました。プロッホの理論の

人工的作りこみ（バンドストラクチャ・エンジニアリング）

人工超格子というアイデアの提案（1969年）

ABABという物質を交互に並べてAでもないBでもないという新しい物質を作ろうという試みです。これは「固体においては、結晶格子の周期的ポテンシャルにより、バンド構造ができ、それが電子の特性すべてを決定する」というプロッホが得た、言わば、金科玉条に則り、1から10ナノメートル程度のやや長い周期的ポテンシャルを人工的に固体中に作り、前例のない電気的特性を得ようとしてしました。ここで問題なのはエレクトロンミーンフリーパスが十分に長くないと、こういうアイデアは実現できないわけで高品質なものを作る必要があります。

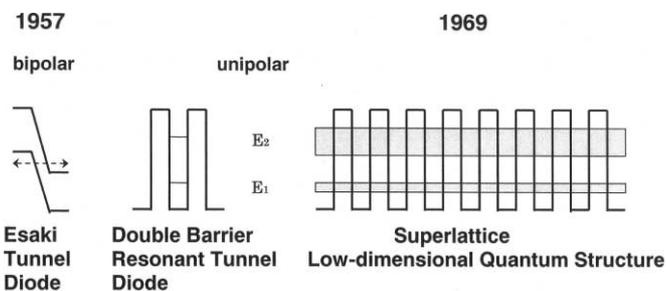


10 ナノメートル以下 ナノメートル = 10^{-9} メートル

人工超格子というアイデアの提案（1969年）

レゾナント・トンネリング

近接して2つの障壁が作られると、あるエネルギーの電子が共鳴トンネリングで透過する現象がある。エサキダイオードはpnのバイポーラーデバイスだが、これが実現するとユニポーラーのデバイスでも負性抵抗素子が実現できる、それを並べると超格子デバイスになる。最初はダブルバリアのアイデアがあり、その後で超格子デバイスを考案しました。



左からエサキダイオード、共鳴トンネルダイオード、そして超格子

電場による量子化

通常では電場による量子化は見られないが、超格子が導入されると、適度に強い電場の下で量子化さ

せることができます。

そして実験で負性抵抗が表れることを確認しました。

フランスの研究者達も超格子で負性抵抗が確認できたという論文を1990年に発表しています。

1971年ソ連レニングラードのヨッフエ研究所では超格子デバイスで電磁波を増幅できる可能性があるという理論を示した論文を発表しています。但し、現実にはそう簡単にはできませんでした。

1992年にカール・レオが初めて半導体中のプロッホ振動を観測しています。

1994年にはベル研のキャパソ達が高出力の超格子レーザーデバイスの発表を行なっています。

プロッホ振動

一つのバンド内に閉じ込められている結晶内電子は、散乱をまったく受けないと仮定しますと、直流電界が加えられた場合、真空中の電子のように一方に加速されるのではなく、速度を周期的に反転し、空間の限られた範囲の往復運動を続けますが、それをプロッホ振動と名付けます。超格子構造内で起こるプロッホ振動は超伝導下で観られるジョセフソン効果と同様、巨視的量子効果ということが出来ます。どちらも、DCをかけるとACが出てくる現象です。

通常の半導体では禁止帯のバンド幅が大きくジナートンネリングは起こりにくいが、超格子デバイスのようにミニバンドを生成すれば、ジナートンネリングが発生しやすくなります。

プロッホ振動に関する歴史

プロッホは1928年にプロッホ関数（結晶中の電子の定常状態を表す関数）やプロッホ定理（周期的ポテンシャルを示す場における波動関数にまつわる定理）などの固体物理学の基本理論を発表しました。

ジナーは1934年に固体の電氣的絶縁破壊の量子力学的理論を発表、初めてプロッホ振動の存在を指摘しました。前にも述べましたように、理論と現実が遊離しており、これは所謂Creative Failure でした。

1970年に江崎と朱が半導体超格子を提案し、理論をもとに負性抵抗とプロッホ振動実現を示唆（IBMジャーナル）。

1992年、カール・レオがプロッホ振動存在の最初の明確な立証論文を発表しています。

半導体超格子の物語

1969年、江崎と朱は自然を超える人工物質、半導体

超格子の構想を提案しました。それは思考実験を現実化するもので、自分の思い通りに新物質を設計し、高度の薄膜結晶成長技術を駆使してそれを作成しようという一つの思想です。ナノスケールの厚さを制御するので、ナノテクノロジーの嚆矢と言われていました。この人工量子構造物質では、自然の物質では見られない特性、例えば、異常に高い電子易動度、負性抵抗、電場による量子化に基づく Stark Ladder などに加え、テラヘルツ領域のプロッホ発振までも観測されるようになりました。1996年までで、超格子に関する論文は世界中で10,000件以上になり、特許はアメリカだけで465件にのぼり、人工量子構造の提案は半導体研究に新しい次元を与えることになりました。

最近、かつての共同研究者の朱氏が本を書きましたが、その本の中で「正直なところ、江崎の経験と力強さがなければ、私はとっくにあきらめていたことであろう。」と書かれています。そして私の言葉として「専門分野の権威と言えども、いつも正しいとは限らない。」を引用しています。

私たちの若い時代、例えば20世紀前半に比べると、幸いなことに、現在では、極度の貧困、不治の病、そして若者の死などにまつわる耐え難い悲劇からある程度解放されるようになりました。ここで今見られることは、人々ははやもすれば中核的課題よりも周辺的問題にとらわれがちになったようです。特にメディアなどの巧妙なコミュニケーション テクニクに惑わされると無意味なものを過大評価、基幹的なものよりも付加価値的なものの方に注意を集中する傾向になってしまいます。研究開発の分野においてもいえることであり若者たちの注意を促したい。

知的能力の二元性：分別力と創造力

A. 分別力 知識を獲得しその解析、理解、判断、選択の能力

学ぶという教育課程で養われ、没個性、既知のものが対象。

B. 創造力 核心をとらえて実体を見抜き、豊かな想像力と先見性のもとに新しいアイデアを生み出す能力

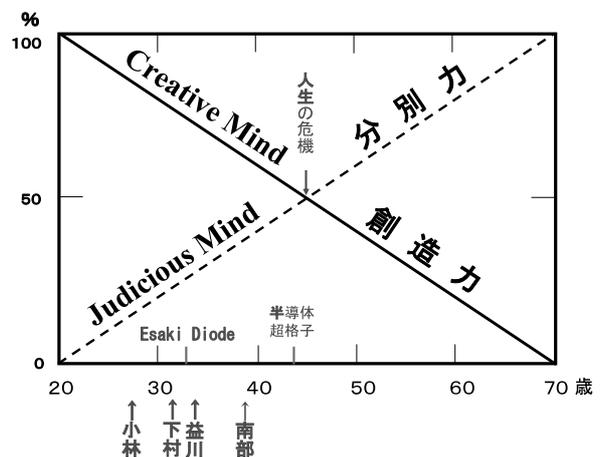
自己啓発で養われ、個性的、未知への挑戦、進歩の原動力となる。

ノーベル賞について

古代ギリシャの哲学者曰く「宇宙に存在するもの

すべて偶然か必然が生んだ果実である」。ノーベル賞も例外でなく偶然と必然の両要素を含み受賞しています。科学の受賞の歴史をたどると小さなものを見たいという顕微鏡の分解能への挑戦、できるだけ高い転移温度のものを得たいという超伝導物質への挑戦といった「科学の限界に挑戦して、それを打破りブレークスルーに成功した人たち」といえるのではないのでしょうか。

ノーベル賞受賞者の業績を上げた年齢の分布(1987~2006)を見ると30歳から45歳前までが中心です。人間の分別力は年と共に上がりますが、創造力は年と共に下がるのではないかと考えています。昨年受賞した日本人の4人は40歳までであり、エサキダイオードも32歳のときの業績です。人生のミドルエージクライシスというのは創造力と分別力が拮抗するときと言えます。



年齢による分別力と創造力の増減

最後にノーベル賞を取るためにしてはいけぬ五箇条を挙げて講演を終わります。

- 第一 今までの行き掛かりに捉われてはいけぬ。呪縛やしがらみに捉われると洞察力は鈍り、創造力は発揮できない。
- 第二 大先生を尊敬するのは良いが、のめり込んではいけぬ。のめり込むと自由奔放な若い自分を失う。
- 第三 情報の大波の中で、自分に無用なものまでも抱え込んではいけぬ。役立つものだけを取捨選択する。
- 第四 自分の主張を貫くため、戦うことを避けてはいけぬ。
- 第五 いつまでも初々しい感性と飽くなき好奇心を失ってはいけぬ。

(事務局：高木 記)