電子波が拓くミクロの世界 (2)

外 村 彰

(株)日立製作所基礎研究所主管研究員
Akira Tonomura

さて、話を元に戻しましょう。

私たちの目では見ることの出来ない磁力線を,”電子の波”は観察することが出来るという所までできました。何故,”電子の波”が磁力線を見ることが出来るのか、理由を図18で考えて見ましょう。

5. 電子の波で磁力線が見えるわけ

電子波が、磁石に入射したとします。電子は、磁場と直角方向に曲げられます。しかし電子の波が、磁場を通ったら、一体どうなるのでしょうか？電子の進行方向と、その波面は垂直であるということをヒントに考えてみましょう。平行な入射電子は“平面波”です。磁石を通った電子は一様に傾くので、“傾いた平面波”になります。

「結局のところ、磁場は入射した平面波にどう影響を与えたのでしょうか？」—電子の波面は、磁力線を回転軸として、傾けられたこととなります。この波面に平面波を重ねると、干涉縞の形で波面の等高線を観察することができます。この干涉縞は、磁力線と同じ方向を向いています。磁力線は、波面を傾けた回転軸だったからです。回転軸に沿って波面の高さは変化しません。

この様にして、干涉顕微鏡像によって、磁力線が直接観察できることが分かりました。

それでは、この手法で見たミクロの世界をもっと紹介しましょう。

サンプルは、直径0.2 μ mの小さな板状のコバルトです。図19に示した電子線の強度を観察する電子顕微鏡像では、六角形の輪郭しか見えません。厚さが一様だからで

す。

一方、この干涉顕微鏡像では、同心円状の干涉縞が観察できます。この干涉縞は、コバルト内部の磁力線を直接示しています。磁力線は Faraday の予測した通り、輪になっています。

こうして、ミクロの磁力線の観察に夢中になっていた1980年、量子力学の分野で論争が起こりました。

6. アハラノフ・ボーム効果

その現象はアハラノフ・ボーム効果と呼ばれ、電子線の干涉現象です。「電子の波は、電場も磁場もない所でも、物理的な影響を受けることがある」というのです。電子は、磁場に直接触れなくても影響を受けると言うけれども、そんなことは、別に驚くほどの問題ではないと思う方もいるでしょう。

そうではありません。振り返ってみてください。そもそも電場や磁場は、我々が目で見ることは出来ません。そこで、電子や磁石をもってきて、それに働く力で電場や磁場を定義しました。ですから、電磁場がないにも拘らず、電子が物理的な影響を受けるということになれば、“電場や磁場が一体何なのか”分からなくなってしまいます。電場や磁場を基本から問い直さなければなりません。

このアハラノフ・ボーム効果を図20に示します。コイルに電流を流すと、電磁石になります。両端はN極とS極の磁極になりますので、外にも磁場が出ます。ただ、コイルを無限に長くすると、磁極も無限の彼方に行ってしまうので、外部の磁場は無くなります。針の先から出た電子をコイルの両側に通し、バイプリズムで重ね合わ

図18 磁石線の観察原理

模式図

図19 コバルト微粒子の干涉顕微鏡像

図20 アハラノフ・ボーム効果

図21 磁場とベクトルポテンシャル

せると、干渉縞が観察出来ます。量子力学を使って、電子の波の振舞いを調べたアハラノフとボームは、「コイルの左右を通った電子線は電磁場のない空間を、全く同じ距離だけ進んだにも拘わらず、互いに波面がずれてしまう」という驚くべき計算結果を得たのです。「コイルの両側をまたいだだけで、何故電子の波面がずれてしまうのでしょうか？」アハラノフとボームは次のような説明をしました。

磁場は、コイルの中にあるけれども、外部には存在しません(図21)。しかし、「ベクトル・ポテンシャル」ならば、コイルの外にも存在し、コイルのまわりを取り囲む形でぐるぐる回っています。コイルの両側では上と下を向いています。これが電子の波面を逆にずらしたという訳です。

「ベクトル・ポテンシャル」って一体何ですか？」と聞かれても、やさしく答えるのは容易ではありません。「磁力線の周りを渦状に取りまわっている」としか言えません。でも安心して下さい。分かりにくいのは、我々だけではありません。Faraday も Maxwell も、この渦の正体が何なのか悩みました。そして、その後100年以上にわたっ

てベクトル・ポテンシャルは議論的だったのです。その経緯を少しご紹介します。

7. ベクトル・ポテンシャルの歴史

話は、Faraday に始まります。Faraday は磁力線という概念を見出しましたが、それを数学的に表現したのが、Maxwell です。

図22の上に示した Maxwell の方程式によって、電磁気の現象が、すべて説明できるようになりました。 B が磁場、 E が電場ですが、それ以外に A が入っています。これがベクトル・ポテンシャルです。 A の rotation つまり渦が B を作ります。Maxwell は A の正体を物理量と考えたのです。どんな物理量かという、最初の式を見れば分かります。 A の時間変化が、電子に及ぼす力です。Newton の方程式では、「運動量の時間変化」が力です。このため、Maxwell はベクトル・ポテンシャル A を運動量だと考えたのです。

図22の下の方の式を見て下さい。ここには A が入っていません。私たちが大学などで習うのは、実は、この方程式なのです。

実は、これは、Maxwell の30年後、Heaviside や Hertz が、物理的意味を持つのは電場、磁場だけであるとして、ベクトル・ポテンシャルを消し去ったのです。以来、ベクトル・ポテンシャルは、物理的意味をもたない、数学的な量だと考えられるようになりました。

さて、話は今世紀に移り、ご存じのアインシュタインが登場します。アインシュタインは、Maxwell の方程式を研究し、相対性理論を作り上げます。

彼の考えによれば、重い物体が存在すると、そのまわりの空間が、ちょうどトランポリンに人が乗ったときのように、へっこみます(図23)。近くの物体は、へっこんだところに引き寄せられますが、それが「重力」という訳です。重力は時間空間の歪によって生じるのです。

アインシュタインは、さらに重力と電磁気を統一する理論の構築を目指しました。この統一理論ができるはず

Maxwellの方程式	
Maxwell	
$E = - \frac{\partial A}{\partial t} - \text{grad } \phi$	$B = \text{rot } A$
$\text{rot } H = i + \frac{\partial D}{\partial t}$	$\text{div } D = \rho$
Heaviside- Hertz	
$\text{rot } E = - \frac{\partial B}{\partial t}$	$\text{div } B = 0$
$\text{rot } H = i + \frac{\partial D}{\partial t}$	$\text{div } D = \rho$

図22 Maxwell の方程式

図23 空間の歪みによって生じる重力

図24 電気と重力の統一理論

だという信念は、実は Einstein に始まるものではありません。

図24は Faraday の漫画です。Faraday は、それまで、まったく別物と思われていた電気現象と磁気現象が、実は互に関係があることをつきとめました。電気で磁気を起こして見せたり、磁気で電気を起こして見せたりしました。そして、ついに「物が落下する現象“重力”までもが、電磁現象と同じではないか」と考えます。彼は、彼の研究所 Royal Institution で、重たいものを落として、電気が発生しないかどうかを調べる実験を、やっています。これがガルバノメーターですが、電気は起こりませんでした。それでもあきらめず、再度、精度を上げて行っているのです。150年も前の Faraday の信念が、今もって物理の最前線のテーマであることには驚嘆してしまいます。

さて、その夢に挑戦したのが、数学者 Weyl です。彼はベクトル・ポテンシャルをアインシュタインの重力理論に組み込んで、重力と電磁気の統一を図ったのです。彼の理論によれば、ベクトル・ポテンシャルが存在すると時間空間の各点で“ものさし”——英語でいうと“ゲ-

ジ”——が変化します。逆にいうと、各点の“ものさし”に違いがあると、電磁場が生じるのです。しかし、アインシュタインは、「1 m の杖を持って一回りしてくると、2 m になってしまうのでは物理にはなり得ない」と一蹴したのです。この統一理論は失敗でした。

1954 年になって、ようやく統一理論が成功の第一歩を踏み出します。この間に量子力学が完成しますが、この理論では、ベクトル・ポテンシャルは、各点で長さを変える量ではなく、電子の波の位相を変える量になります。ベクトル・ポテンシャルは拡張されて“ゲージ場”と呼ばれ、最も基本的な物理量になったのです。

こうして“ゲージ場の理論”が誕生します。この理論によって宇宙がどうやって誕生したか、どうやって進化したかということまでが、分かってきました。

「アインシュタインの反論が、この場合には一体どうなるのか？」気になさる方もいると思います。今度は、ものさしの代わりに電子を一周させると、電子の位相が変化してしまうことになります。実はこれはアハラノフ・ボーム効果に他なりません。こうしてアハラノフ・ボーム効果は急に注目されるようになりました。

ところが、長い間ベクトル・ポテンシャルは数学的な量であると考えられてきたものですから、「そんな現象はあるはずはない」と強く主張する人が現れ、論争が起ったのです。すでに実験が行なわれているのですが、この実験の結果も、コイルの両端から出る磁場の効果で生じたもので、効果の検証になっていないというのです。

8. アハラノフ・ボーム効果の検証実験

私たちは、延々と続く理論上の論争に決着をつけるためには、確乎たる実験事実を確立する以外にないと考えました。

棒磁石を使う限り、どうしても N 極と S 極が生じて磁場は外にもれてしまいます。「空間に磁場が全く出ないようにするには、どうしたら良いでしょうか？ まさか、無限に長い磁石を作ることなど、実際にはできません。そもそも磁場が外にもれない磁石など、出来るのでしょうか？」——実は、簡単な方法があります。棒磁石をぐるっと曲げて、N 極と S 極をくっつけてしまえばよいのです。

ドーナツの芯が磁石で、ぐるっと回って N 極と S 極がくっついているので磁極は生じません(図25)。さらに完全を期するために、磁石からわずかにもれる磁場も除くことにしました。超伝導体でドーナツ状の磁石をくるんで、マイスナー効果によって磁場を閉じ込めてしまうのです。

しかし、こんなサンプルをどうやって作るかが問題でした。何しろ電子線の干渉実験を行うには、サンプルは極めて小さくなくてはなりません。せいぜい $10\mu\text{m}$ が限度

図25 アハラノフ・ボーム効果実験用サンプル

図26 ドーナツ状磁石の走査型電子顕微鏡像

です。ここで、半導体回路を作るときに使う微細加工技術が大活躍したのです。

図26の写真を見てください。こんなにたくさんのドーナツを作ったのです。全部で10万個も作ったのでしょうか？ よく見ると、ドーナツの外径も穴の径も、まちまちです。いろいろな条件で実験を行なったのです。

図27がサンプルを拡大して見たものです。外径が6μmです。ドーナツ状の磁石のまわりは、ニオブという超伝導体で完全に囲まれています。このドーナツに電子線を通し、出てきた電子線に斜めから平面波をあてて、孔の中と外で波面がずれているかどうかを調べました。この時、電子線ホログラフィーで磁場が全く漏れていないことを確認します。

結果は、図28の写真で明らかになりました。孔の中と外で干渉縞は1/2波長だけずれています。この1枚の写真がAB効果の存在を実証してくれました。電子は全く磁場のない所を通っています。にもかかわらず、ベクトル・ポテンシャルによって波面がずれたのです。こうして、AB効果の論争に決着がつけました。ベクトル・ポテンシャルは、これまでいろいろ議論はなされてきました

図27 ドーナツ状磁石の拡大像

図28 AB効果の検証写真

が、それが物理量であるという決定的な証拠は存在しませんでした。この写真は、ゲージ場の理論の基本となるベクトル・ポテンシャルの実在性を直接示す実験結果となり、150年以上にもわたって議論を呼び、数奇な運命をたどってきたベクトル・ポテンシャルがよみがえったこととなります。

この実験は、まさに先端技術のお陰で実現できました。AB効果が提案された30年前以上には、こんな実験は、頭の中だけで考える思考実験だったのです。それが、干渉性の良い電子線、電子線ホログラフィーや微細加工技術によって可能になりました。

9. 超伝導体磁束量子の観察

最近になって電子線ホログラフィーが再び新しい展開を見せます。超伝導体中のミクロな構造が、初めて見えるようになったのです。“超伝導体”は、抵抗無しに電流を流すことの出来る材料です。これを実用的に使うことができれば、発電所で作った電力を途中で無駄にすることなく、我々の所に運んだり、強力なマグネットを作ることにも出来ます。”超伝導体”というと、全てが氷ついた極低温中で、電流が静かに流れ、ミクロな構造など何もないというイメージをもたれているかも知れませんが、そうではありません。”磁束量子”と呼ばれるミクロな磁束の糸が沢山発生して、電流を流したりすると、走りまわって超伝導状態を壊してしまうのです。とりわけ、高温超伝導体では、磁束量子が動きやすくて実用化が難しいのです。さて、その磁束量子とは、一体どんなもので

しょうか？

超伝導体に磁場をかけると、磁力線は、超伝導体をよけて通ります(図29)。マイスナー効果です。磁場を強くすると、磁力線は超伝導体を貫きます。その場合、磁力線が束ねられて、極めて細い糸の形で通ります。これが“磁束量子”です。

磁束量子の芯は、超伝導状態が壊れ、その周りを超伝導電流がぐるぐる回って電磁石となって一定の微小磁束を作り出しています(図30)。光学顕微鏡を使っても見えない位小さいのですが、この磁束量子が超伝導体の実用化の鍵を握っているのですから、驚いてしまいます。

この磁束量子を直接観察することは、私たち、電子顕微鏡屋の30年来の夢でした。この夢が、干渉性の良い電子線を使うことによって、初めて達成できました。

サンプルとしては、ニオブの薄膜を用いました。図31中の小さな点々が磁束量子の像です。黒い縞は、入射電子線が、ブラッグ反射を起こして生じたもので、磁束量子とは関係ありません。

点々の1つ1つを、よく見て下さい。白い部分と黒い部分の対から出来ています。磁束量子が何故こんな風に見えるのか、原理を図32で説明しましょう。

入射電子は、磁束量子内部の強い磁力線によって、曲

図31 ニオブ薄膜の磁束量子

図32 ローレンツ顕微鏡法

げられます。下の面で観察すると、磁束量子の部分を通して曲げられた電子は、上にずれてしまいます。このため、磁束量子の真下には電子が来なくなり、少しずれた所に電子がやって来ます。こうして、磁束量子は白黒のペアとして見えた訳です。

アクリル板を使ったデモ (板を見せる)

この透明なアクリル板を見てください。これを使って、磁束量子の観察原理を説明します。平行な板のように見えますが、実は、表面に細工が施してあります。

図33のように表面に山と谷があり、これが磁束量子に対応します。大ざっぱにいうと、小さな三角形プリズムの形をしています。電子が磁束量子を通り抜ける時に、曲げられますが、光がこのプリズムを通り抜ける時にも、同様に曲げられます。さてこれを OHP にのせてみましょう。

Demonstration-2：アクリル板 (OHP)

スクリーンには、明暗が対になったスポットができます(図34)。少しぼけている様な気がして、もっと“はっきり”見ようと、OHPのレンズでピントを合わせようとしてはいけません。磁束量子“vortex”という文字は、はっきり見えるようになりますが、磁束量子そのもののコントラストは消えてしまいます。

我々は、この Lorentz 顕微鏡法と呼ばれる手法を用い

図29 磁束量子

図30 渦電流からできている磁束量子

図33 アクリル板表面の凹凸

図34 OHP のピントをはずした時の像

て、磁束量子が動く様子をビデオに捉えることが出来ました。これまで、静止している姿なら、観察する方法もありましたが、その動きは、誰も見たことは、ありません。実際に磁束量子の動きを見ると、まるで生き物であるかの様に、面白い振舞いをします。

超伝導体に欠陥があったりすると、さらに面白い振舞いをします。そこに磁束量子がピン止めされるためです。これが、超伝導体に電流を流せるようにして実用化する秘策なのです。

図35は動的観察の実験写真です。黒い点が欠陥で、白い点々が磁束量子です。磁束量子は欠陥がなければ、規則正しい格子を組みます。ところが、磁束量子は欠陥につかまってしまうため、きれいな格子を組むことができません。いくつかの格子のドメインに分かれてしまいます。この写真をはすから見ると、欠陥の近くで格子がずれたドメイン・バウンダリーが生じていることが分かります。

ここで電流を流して、磁束量子に力が働いた時、一体どうなるのでしょうか？とても面白いことが分かりました。ドメイン・バウンダリーに沿って“磁束量子の川”ができて、そこを磁束量子が流れるのです。といっても、少し流れるとすぐに止まり、今度は前とは別のドメイン構造を作り、今度は新しくできたドメイン・バウンダリーに沿って磁束量子の川が流れるのです。このビデオは

図35 サイエンスの表紙

Science の Internet の home page に入っていますので、世界中の人が見るすることができます。

もう1つ面白い現象を捉えることが出来ました。

磁束量子は、その周りを超伝導電流が波の形でぐるぐる回っています(図36)。一周すると、波の位相が 2π だけ変化します。これと類似のものは、自然界の各所に存在し、“位相欠陥, topological defect”と呼ばれています。例えば、宇宙は、誕生以来何度も進化して現在の状態に至っていますが、相変化を起こした時に発生したといわれる“Cosmic string”がその実例です。Cosmic string は、まだ見つかってはいませんが、その挙動が面白く理論的にいろいろな計算が行われています。

例えば、逆向きのストリングが正面衝突すると、消滅してしまいます。我々の実験で、これと同じ現象が観察されました。逆向きの磁束量子が正面衝突して消えてしまうのです。もしストリングがこのような曲がっていて、しかも勢いよく衝突すると、上下は消えても、リング状のストリングが残って、振動しながら存在し続けるなどと言われています(図37)。

この映像は物理の方々に大変関心呼びました。

アメリカ物理学会では、物理学の分野での過去1年の大きな進展を、毎年 Physics News として、まとめて報告します。そこで我々の結果がとりあげられました。本物は英語ですが、パリティーに日本語訳が出ます。

Condensed matter physics の部門ですが、読んでみましょう。

“多くの提案の中からトピックスを選び出すにあ

図36 位相欠陥 (Topological defect)

図37 衝突する逆向きのストリング

たって、私は物性物理学の本流の領域から2件、周辺領域から2件を取り上げることにした。本流の領域に属するトピックスの2件は、今年その生誕10年を迎える高温超伝導の理解と応用に向けての研究の進展に関するものである。これらの物質の電磁的性質の多くは、その中を流れる超伝導電流がつくる渦(vortex)の性質、およびそれらの渦が互いになしは物質の中の欠陥とどのように相互作用するかに支配される。ヒューズ(David Huse)は、これらの渦について最近行われた見事な直接観察の結果が何を意味しているかを総括している。”

ベル研究所のヒューズが総括した部分も、うまく表現してくれているので、これも読んでみます。

“この方面での、この1年のおもな研究成果としては、(1)個々の量子渦と反渦との対消滅の様子が“映画”に撮られたこと”

“日本の日立基礎研究所の外村のグループは、電子顕微鏡を用いて量子渦の運動を「映画」に撮ることの出来るシステムを開発した。この方法では量子渦と、それに逆向きの循環電流をもつ反渦とを識別することが出来る。彼らは磁場を適当に変化させることによって、超伝導試料のある部分には量子渦が多く存在し、近くの別の部分には反渦が多く集まっているような状況をつくって撮影した。互いに反対の電荷を持つ陽子と反陽子、あるいは電子と陽電子の場合と同じく、量子渦と反渦とは互いに引き合う。

そしてそれらが衝突すると対消滅して”静止エネルギー“を放出する。この基礎過程はずっと以前から理論的には議論されてきたものであるが、その映画はそれをはっきりと見せてくれた。この映画は最近のいくつかの国際会議で上映された。

前置きが長くなってしまいましたが、いよいよ、初めて見る磁束量子の動きをVTRでお見せしましょう。この磁束量子の写真は、超伝導体に100ガウスの磁場をかけた時の写真でしたが、急に磁場を取り除いたら、一体どうなるかというシーンから見ていただきます。

VTR-4：磁束量子の動的振舞い

1. 磁場を切ると、90%の磁束量子は消えてしまいますが、10%ほどが、欠陥にピン止めされて残ります。静止しているのかと思うと、下に向かって欠陥の間を飛び移っていきます。画面の下に、膜穴があいており、そこに向かっているのです。磁束量子は、恰も決まったルートがあるかの様に直線上をピョンピョンと飛び移ります。

さて、ここで、逆向きの磁場をかけてみます。

2. 元々の磁束量子は、膜の外へと出ていきます。それを待ち切れずに、逆向きの磁束量子が、膜の端から侵入し始めます。そしてここで衝突を始めます。互いに逆向きであることは、「上の像は、下が黒く、下の像は、上が黒くなっていること」から、分かります。磁束量子は、『超伝導体中では、これ以上分割出来ない』という意味で、素粒子です。ですから我々は、粒子と反粒子の衝突を見ていることになります。衝突した時、エネルギーは熱や光になるものと思われれます。逆向きのCosmic stringの衝突と考えることも出来ます。

磁束量子が、『ある距離まで近づくと、突然衝突して、消えてしまいます。この距離からピン止め力を知ることが出来ます。

3. 次は薄膜の表面に段差、つまりステップがある時、磁束量子がどんな動きをするかを観察したものです。磁束量子は、左下から右上に流れます。磁束量子がこのステップに到着すると、そこを乗り越えることが出来ないために、向きを変えてステップに沿って流れます。この交叉点まで流れてくると、右折し、ある時はこちらに、またある時にはこちらに、二手に流れていく様子が捉えられています。これを見ていると、磁束量子を膜の構造で意のままに動かせるような気がしてきます。

次は、点欠陥での磁束量子の動きです。

4. 点欠陥での動き

黒いスポットが点欠陥です。磁場を突然印加すると、磁束量子が流れ込みます。欠陥の横に磁束量子がトラップされていますので、それに続く磁束量子

は流れが妨げられます。磁束量子は欠陥を迂回しながら流れています。たまに、余分な磁束量子が欠陥にトラップされることがありますが、不安定なので、こちらから1つ出ていきます。こうして、磁束量子の個々の振舞いが観察できるようになりました。さて、磁束量子が格子を組んでいる時に、流れは一体どうなるのでしょうか？強い欠陥が格子全体の流れを止めてくれるのでしょうか？

5. これが、そのシーンです。白いスポットが欠陥です。磁束量子は格子全体として流れるのではありません。静止しているかと思うと、あちこちに川が出来て磁束量子が流れます。ドメイン・バウンダリーに沿って流れるのです。「川は流れては止まり、また別の所を流れては止る」といったことを繰り返します。

6. 温度が上がると、磁束量子はもっと規則正しい格子を組む様になります。川となって流れる時には、格子がくずれてランダムになります。流れが止まった時には、再び格子を組みますが、格子の配列は前とは同じではありません。このため新しいドメイン・バウンダリーに沿って川が出来て、磁束量子が流れます。

10. もっと高性能の電子線を求めて

ビデオでお見せしたのは、ニオブと呼ばれる金属超伝導体中の磁束量子の振る舞いです。我々は、こうした映像を“高温超伝導体”について得たいと思っています。実用化された暁には世の中がすっかり変わってしまう程の期待がかけられた高温超伝導体は、思ったようには実用化が進んでいません。磁束量子が動き回ってしまうからです。何故動きやすいのか、いろいろ言われています。温度が高いことはもちろんですが、材料が層状構造をもっていることも一因です。このため、ある状態では磁束量子が液体状に溶けて動き回っていたり、超伝導層に斜めに磁場がかかると磁束量子はジグザグになったり、からみあったりと、いろいろ面白そうなことが言われています。

今、我々は『加速電圧が1 MV で、しかも干渉性の良い電子線』を備えた装置(図38に完成予想図を示す)を開発して、この磁束量子の様子をじかに見たいと思っています。電子線の干渉性は、良くなったとは言えレーザーに比べてみれば、まだまだ足元にも及びません。考えてみれば当然かもしれません。レーザーの場合、軍事的な

図38 超高圧ホログラフィー電子顕微鏡

狙いもあって、アメリカは驚くほどの『研究者の数』と『予算』を投資しました。『干渉性の良い電子線』には、まだ「投資していないにも等しい」と言えましょう。『光源が、科学技術にもたらす大きな波及効果』は、今更、言うまでもありません。レーザーの出現によって、光の分野は蘇りました。そして現在、放射光によって、X線の世界に新しい可能性が開かれつつあります。

この電子線の新しい光源が出来た暁には、ミクロの世界の極限計測手段として、高温超伝導以外にもさまざまな可能性を開いてくれるものと思われます。まだ装置の開発をスタートしたところですが、ご期待と同時にご支援いただけますようお願い申し上げます、私の話を閉じさせていただきます。

外村 彰

1942年4月25日生まれ。1965年、東京大学理学部物理学科卒業。同年4月、(株)日立製作所中央研究所入社。1973-74年、チュービンゲン大学(ドイツ)留学。1975年、工学博士(名古屋大学)。1985年4月、新設の基礎研究所に移る。現在同主管研究長。1989-94年、新技術事業団位相情報プロジェクト総括責任者兼任。1991年、理学博士(学習院大学)。

主な賞罰

1987年 朝日賞 朝日新聞社

1991年 学士院・恩賜賞 日本学士院

主な著者

量子力学を見る(岩波、1993)

Electron Holography (Springer, 1993)

Aharonov-Bohm Effect (Springer, 1989)

(この講演は1996年11月29日に東京 YMCA ホテルで、照明学会創立80周年記念日行事の一つとして行われたもので、照明学会誌では3月号と4月号の2回に分けて掲載しています。)