

# 高温超伝導エレクトロニクス

正会員 岡部 洋一†

1986年に発見された高温超伝導体の出現によって、従来液体ヘリウム温度近辺でしか利用できなかった超伝導現象が、液体窒素温度まで使用できるようになった。そのインパクトを、特にエレクトロニクスを中心に解説し、将来動向について述べる。

## 1. ま え が き

1986年、IBM チューリッヒ研究所において、酸化誘電体を研究していた Bednorz 氏、Müller 氏らが、偶然の発見から、アルカリ土と銅と稀土類である La の酸化化合物が超伝導体になり、かつ高い臨界温度を持つ可能性を有することを示した。その後、東大の田中氏、北沢氏らが、その物質の臨界温度が 30 K 以上という驚異的データの確認を行い、一気に世界的なブームとなったものである。さらに、米国 Chu 氏が、Y, Ba, Cu の酸化物が 90 K 以上の臨界温度を示すことを発見し、液体窒素温度で超伝導となる超伝導体が現実のものとなったのである。

図 1 に示すように、1911年、Onnes が超伝導現象を発見して以来、臨界温度は現在までに年平均 0.3 K

ずつしか上がってこなかった。それが 1986年から 1987年のわずか1年で一気に 80 K 近く上がったのを考えれば、この一連の材料が超伝導の分野の研究者のみならず、他の分野の研究者までを興奮の坩堝に巻き込んだことは容易に理解できよう。

新しい超伝導体は物理的にも興味深い。まず、従来の超伝導体は Bardeen, Cooper, Schrieffer による BCS 理論によりよく説明できたが、それからはみ出している可能性が高い。彼らの理論によると、従来の金属系超伝導体は、電子が格子歪を仲介として引力を及ぼし合い、クーパー対と呼ばれるペアーを作る。フェルミ粒子である電子は、量子力学的に同じ状態には落ち込めないが、ペアーではボーズ粒子となり、極低温では全粒子が同一状態に落ち込んで、1つの粒子のように振舞う。つまり、量子力学的な位相がマクロに観測できるようになる。これが原因となってマイスナー効果と呼ばれる完全反磁性、あるいは完全零抵抗が現れる。

それでは新超伝導体ではどうかというと、電子間の

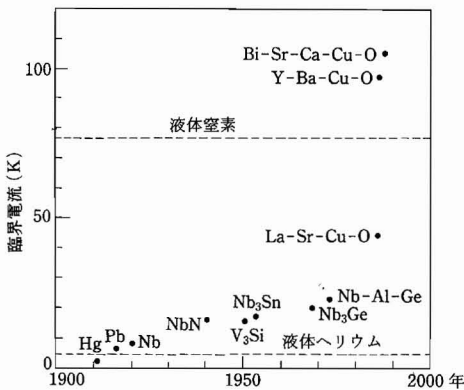
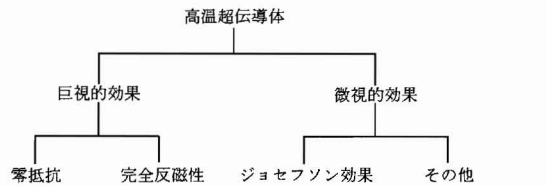


図 1 超伝導体の臨界温度の推移



- 超伝導送電線
- 磁気浮上
- 高感度磁気センサ (SQUID)
- 超伝導 3 端子素子
- 超伝導発電機
- 磁気シールド
- 超高周波素子
- 超伝導電力貯蔵
- 超高速素子
- 超伝導磁石

図 2 高温超伝導体の応用

† 東京大学 工学部

“High Tc Superconductivity Electronics” by Yoichi Okabe (Faculty of Engineering, The University of Tokyo, Tokyo)

引力の成因が異なるようである。ちょうど酸化物磁性体中の電子のように、電子のスピンが酸素を介して交換相互作用という量子力学的力により、引力を及ぼし合っているのではないかと考えられているが、結論はまだ出ておらず、当分はホットな議論が続きそうである。

新超伝導体は応用分野でも研究者達に夢を与えてくれた。これら応用分野の一例を図2に示す。まず零抵抗とか完全反磁性のように比較的大きな材料でも観測される効果を巨視的效果という。また、超伝導電子の持つ位相の効果は、 $\mu\text{m}$ の単位を用いるような比較的微細な寸法でしか観測できず、微視的效果と呼ばれる。

## 2. 巨視的效果の応用分野

まず、超伝導体を特徴づけるいくつかのパラメータのうち、代表的な臨界温度、臨界磁界、臨界電流密度について述べておこう。

臨界温度はキュリー温度  $T_c$  とも呼ばれ、超伝導性を示す最高温度である。現在最も研究されている酸化物超伝導体は  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  であるが、その臨界温度は 77 K である。また従来、超伝導エレクトロニクスでよく用いられていたニオブの臨界温度は約 10 K である。ごく最近、さらに高温の物質が発見されており、今後これが室温にまで達するかが次の目標である。

臨界磁界は、外部あるいは自分の作った磁界に対し、どのくらいまで耐えるかという量である。この値はおよそ 100 T であり、従来の物の数倍である。臨界電流密度も同様にどの位の電流密度まで超伝導が耐えるかを示したものであるが、この量は新材料では低く、従来の金属系超伝導材料の数  $\text{MA}/\text{cm}^2$  に比べ、現状ではおよそ  $100 \text{ kA}/\text{cm}^2$  である。

こうした特性から期待される応用分野として、まず零抵抗を利用したものはいくつか考えられる。一番わかりやすいものは超伝導線路であろう。例えば、送電ケーブルなどである。従来の材料では、やはり、液体ヘリウムを使用することに問題があった。資源的な問題のみならず、万が一超伝導が破壊すると、その部分のジュール損により発熱が起り、それが次々と連鎖的にまわりの超伝導性を破壊していき熱暴走の起こることがやはり最大の困難である。液体窒素は資源的にも楽であり、また、臨界温度と使用温度の差が大きいほど熱暴走の危険性も低下する。

しかし、新超伝導材料にはいくつかの問題もある。まず臨界電流密度が小さいので太い線が必要となる。

また、材料が脆く、線材化が困難である。熱暴走を抑えるために超伝導体を常伝導体でくるむ必要があるが、適した材料の組合せが得られるかどうか不明である。さらに臨界電流、臨界磁界などのパラメータが材料の結晶方向に大きく依存する点、また、結晶粒界の影響が金属超伝導体よりも大きいことなどが、今後の開発を困難にするのではないかと考えられている。

零抵抗をエレクトロニクスへ応用することは、もう少し容易そうである。その例としては超伝導配線があげられよう。これは集積回路内あるいは IC 間を結ぶ配線の抵抗を零にしようというものである。デジタル回路の速度は前段の論理ゲートの内部抵抗と配線容量の CR 積で決まってくるが、システムが大きくなると配線長が伸び、配線の抵抗が前段ゲートの内部抵抗に比べ無視できなくなってくる。このような場合には配線抵抗が効果的になってくる。

集積度が高くなってくると、あとから述べるように、いずれ IC の環境温度を下げる必要が出てくる。ところで、配線のための冷却することは考えなくてもよいと思うが、それでも、もし常温超伝導体が見つければもっと多用されよう。ただ、現在のところ臨界電流密度が低いため、IC 内部よりは IC 間、つまりボードの配線の方が先に実用化されると考えられる。

零抵抗の応用として現在最も期待されているのは超伝導磁石であろう。空心であるから、鉄の飽和磁化の影響がなく、強い磁界が形成できる。しかも抵抗 0 であるから、常伝導体を用いた空心の電磁石のように、発熱が制限要因となることがない。したがって能力を制限するものは、原理的には臨界磁界だけとなる。従来の超伝導磁石でも常伝導磁石の 1 桁上の磁界を発生することができたが、新材料は臨界磁界が高いので、もっと強い磁界を発生することができる可能性がある。さらに、新超伝導体では臨界温度が高く冷却が簡単になる。また、常温に近くなるにつれ熱暴走の危険性が減少してくる。

超伝導磁石は強力磁界の発生源として、NMR-CT などの医療用、核融合用、加速器用と各種応用分野で使われる。しかし、それ以外にも、磁界を利用した種々の電気機器に組み込むと、僅かな寸法で大きな磁界を発生できるため、機器全体の寸法を小さくし、軽量化を達成することができる。超伝導発電機、超伝導モータはいうまでもなく、磁界のエネルギーにより電力貯蔵を行う計画も考えられている。

完全反磁性つまりマイスナー効果の応用の第一は、磁気浮上である。すでに金属超伝導体とヘリウムの液化機を組合せて高速列車の浮上や位置の安定化の実験

がなされている。

超伝導体は高周波のみならず低周波の磁界に対しても、マイスナー効果により磁界を通さない性質があるため、電磁シールドとして優れている。特に常温超伝導体が実現されると、現在のシールドルームのほとんどがこれに置き代わり、簡単に良質のシールドが得られるようになるだろう。新材料は膜を磁束が通り抜けるが、その量は固定され一定となる。したがって、直流磁束はあるが、磁界の時間変動のない環境が得られるであろう。

### 3. 微視的效果の応用——高感度磁気センサ——

超伝導の微視的效果とは、先にも述べたように超伝導電子が協調運動をする結果、光のように位相という概念を持つことである。当然のことながら、こうした効果は寸法の小さいところで顕著に現れ、したがって、主としてエレクトロニクスへの応用に使われる。余談ではあるが、新超伝導材料の実用化を考えると、まずエレクトロニクスであろうと思われる。電力応用は扱うエネルギーが大きいくだけに、よほどの安全性が確保されないと実用化されないからである。

ジョセフソン素子は、電子の位相を敏感に感じるデバイスであり、超伝導エレクトロニクスの分野では、最もよく利用されている。この素子は、電極間に位相差を与えると、その位相差の正弦関数で電流を流すという面白い性質を持っている。また、位相差は電圧の時間積分、つまりインダクタンスにおける磁束のような量（フラクソイドという）に比例することが知られている。式で書くと、

$$I = I_0 \sin(2\pi\Phi/\Phi_0)$$

$$\Phi = \int V dt$$

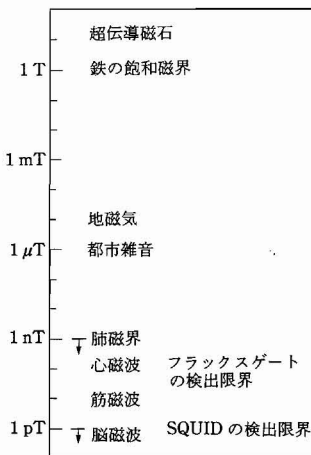


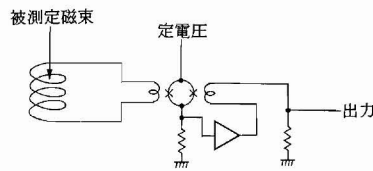
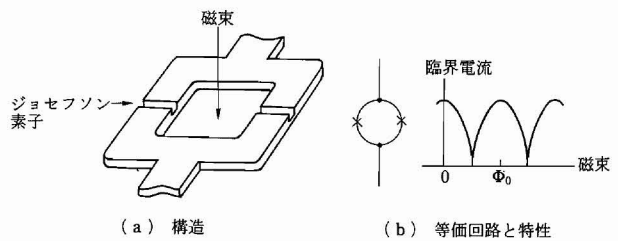
図3 磁界の強さ

ここで  $I_0$  は素子の接合面積や材料などで決まる量であるが、 $\Phi_0$  は物理定数  $h/2e = 2\pi Wb$  という一定値である。

こうしたジョセフソン素子を利用したエレクトロニクス応用として、最も期待されているのが磁気センサである。ざっと 1 pT 程度の微弱な磁界を検出することができる。図3に磁界の強さの概略を示すが、鉄の飽和磁界の約 1 T に比較し、充分小さいとされている地磁気の大きさ数  $10 \mu T$  ですら、この検出可能磁界の約 1000 万倍である。これ以外の磁界検出用デバイスで最も感度の良いフラックスゲートの検出感度が約 100 pT であるから、これは明らかに有利である。

このデバイスは、超伝導線のループに1ヵ所、あるいは2ヵ所にジョセフソン素子を配置したもので、SQUID (Superconducting QUantum Interference Device) と呼ばれる。前者は rf-SQUID、後者は dc-SQUID と呼ばれている。いずれも電子の位相が磁界の作るベクトルポテンシャルによって影響を受け、その位相の干渉効果を利用した、まさに量子力学的なデバイスである。

図4に dc-SQUID を示す。ここで電子は右および左の電流路を分かれて流れる。外部端子に位相差を与えると、何もなければ2つのジョセフソン素子には同じ位相差がかかり、全体として2つの素子が並列になっただけの2倍の電流が流れるだけとなる。しかし、ループに磁界を与えると、その作り出す磁束を打ち消すだけのフラクソイドが2つの素子に加わる。ループに鎖交している磁束がちょうど  $\Phi_0/2$  だったとすると、片方に加わったフラクソイドともう片方に加わるフラクソイドの間には常に  $\Phi_0/2$  に対応する位相差、つまり  $\pi$  の位相差が生じる。この結果、2つの



(c) 磁束計の動作原理図

図4 dc-SQUID の動作

素子に流れる電流は大きさが等しく向きが反対となり、全体として電流は流れなくなってしまう。

ジョセフソン効果の正弦的関係から、このように全体として流れる電流は、ループに鎖交する磁束  $\Phi$  に対し、 $\Phi_0$  を周期として変化する。磁界を測定するには、もう1つの別のループを用意し、それにより鎖交磁束が一定になるようにフィードバックを与える。このフィードバック量から外来磁界の値を知ることができる。また、ループが小さいため、外来の磁界は変成器を介してループに結合される。

$\Phi_0$  が極めて小さいため、磁界の高感度測定が可能であるが、地磁気よりはるかに弱いような磁気現象で興味深いものとしては、生体の発生する磁界がある。比較的大きなものは肺磁界である。肺は呼吸により空気中の塵を吸着しているが、その中には磁性物質が多く含まれている。この発生する磁界が約1 nT から10 pT である。さらにレベルの低い信号として、生体細胞が興奮するときに細胞膜をイオンが通り抜ける結果、流れる電流の作る磁界がある。心臓では巨大な筋肉がパルス的に興奮するため100 pT の心磁波が発生する。また、他の筋肉でも10 pT 程度の筋磁波が発生する。

興味深いのは脳磁波である。これは大きくても1 pT 程度であるから、現在のSQUIDの感度限界ぎりぎりである。しかし、似たような脳の電気現象である脳波に比べ圧倒的に優位な点があるので、期待されている。それは逆問題である。脳波の分布は頭の電気伝導度の分布つまり頭蓋骨や頭の形状などに大きく影響を受ける。外部での脳波の分布から発生源の位置を決めるのは大変困難である。

これに対し、脳磁波は脳から空間に至る磁氣的に一定の媒質に放散されるため、外部の測定からその発生源の位置を決定するのは比較的たやすい。現在でも発生源が比較的局在している場合には、5 mm 程度の精度で位置決めを行うことができる。このことはSQUID-CTの可能性を示しており、脳の構造のみならず、その活動の状態を画像で観測できることを示唆している。

従来の超伝導体を用いたSQUIDの代わりに高温超伝導体を用いると、まず明らかに使用温度が高くなる点が有利である。従来の液体ヘリウムに対し、液体窒素の方が價格的にもまた技術的にもはるかに扱いやすいからである。しかし、反面、周囲温度が上がると熱雑音が温度の平方根に比例して増加する。先にこのデバイスの感度を1 pT といったが、これが熱雑音で決まっていると数倍に増加することになる。しかし幸

いなことに、この値は主として外来雑音で決まっている。例えば、都市雑音は1  $\mu$ T もある。したがっていくらシールドを工夫しても1 pT 程度の雑音はなかなか除外できない。逆にいえば、このデバイスの真の限界ははるかに低く、仮りに新しい材料が開発され、使用温度が常温にまで達しても、ほとんど問題ないようである。

なお、脳磁波を測ろうとすると、そのレベルと検出限界が極めて接近している。じかに測ろうとしても雑音に埋没してしまう。そのため、何度か同じ現象を計測し、その加算平均を採ることにより信号を強めることがなされている。将来、シールド方法の改善や信号のうまい採り方によりS/Nを上げれば、リアルタイムで脳活動を見ることも可能になるであろう。

#### 4. 微視的効果の応用——高速デバイス——

ジョセフソン素子の特徴は高感度、少電力、高速の3点といえる。高速の特徴を生かしたものが高周波応用であり、高速および少電力の特徴を生かしたものがデジタル計算機応用である。

ジョセフソン素子の動作速度を決定する大きな要因は、前述の式から推定することができる。素子に一定の電圧をかけると、 $\Phi$  が  $Vt$  で変化するため電流が振動する。この周波数は  $V/\Phi_0$  である。したがって、この逆数の  $\Phi_0/V$  が素子の速度となる。つまり素子にどれほどの電圧が掛けられるかが問題となる。

先に述べたように、超伝導体の電子は結合してペアーを作っている。素子の片側の電極から反対側の電極へペアーが注入される時、その電位差が大きいとペアーは破壊して常伝導電子になってしまう。素子の結合エネルギーを電圧で表したものをギャップ電圧という。ジョセフソン素子にはこの電圧までをかけることができる。高温超伝導体の臨界温度が高いということは、この結合エネルギーが高いことを示している。当然ギャップ電圧も高い。したがって、この観点からは高温超伝導体のジョセフソン素子は高速になるはずである。

しかし、ジョセフソン素子にはもうひとつの速度決定要因がある。それは、素子の静電容量  $C$  である。素子の両端にかかる電圧を  $V$  とすると、最大  $CV$  の電荷が蓄積される。これを  $I_0$  程度の電流で充放電するから、ほぼ  $CV/I_0$  程度の時間がかかる。この時間は素子にかかる電圧に比例してしまう。従来の材料でも、単一のジョセフソン素子の速度を決める主要因は静電容量であるが、新超伝導材料の電流密度はかなり低いので、ますます問題となる。つまり単一ジョセフ

ソソ素子の速度を上げるには、電流密度をかなり上げないといけない。

素子を多く使用した超伝導集積回路になってくると、この様子は一変する。この場合、速度の律速要因は、ファンアウトなどで増えた重い負荷の駆動時間で決まってくるからである。半導体の回路の場合、負荷で問題になるのは静電容量であった。しかし、超伝導の回路では電流制御型となるので、負荷のインダクタンスの方が問題となってくる。つまり、いかに短時間でインダクタンスに所定の電流を流すか、あるいは所定の磁束を発生させるかが重要となる。この時間は  $\Phi/V$  である。したがって新超伝導の方が有利になる。従来の金属超伝導体のギャップ電圧が 3 mV 程度だったのに比較し、新超伝導体のそれは 30 mV ぐらいであり、ほぼ 10 倍の後段駆動力があることが理解できよう。

このように、新超伝導材料はいろいろ魅力的側面を持っている。まとめてみると、まず第一に高温で使用できること、電圧レベルが従来の超伝導材料と半導体の間に入ってきて扱い易くなること、さらに駆動力の高い素子が得やすくなることなどである。

### 5. 高温超伝導デバイス

次にデバイスを作る立場から新しい材料を見てみよう。まずジョセフソン素子であるが、これは大きく 2 種類に分類することができる。ひとつは超伝導体と超伝導体の間にごく薄い絶縁膜を挟み、そこをトンネルする電子で両超伝導電極を結合するトンネル型ジョセフソン素子である。もうひとつは超伝導体と超伝導体を細いあるいは薄い超伝導体、もしくは常伝導体や半導体で結合した弱結合素子である。前者は薄い絶縁膜をいかに作るかが鍵であるのに対し、後者は微細な弱

結合部をいかに作るかが鍵である。一見似ているようであるが、前者は数 nm の積層構造で作れるのに対し、後者は 10 nm の立体的な構造を作る必要があり、加工の困難さは一長一短である。

図 5 に、いままで提案されてきたジョセフソン素子の形状を示す。まず最初に開発されたのが点接触型である。これはバルクの材料にニオブのような硬い金属超伝導体の針を立てたものである。次に開発されたのが、クラック型である。これは新超伝導材料に固有な素子形態である。バルクを 2 つに割ると、その破断面には比較的きれいな表面が現れる。それを再び合わせ適当な圧力をかけると、簡単に良い特性のジョセフソン素子を得ることができる。この素子は酸化物超伝導体でも電子がペアーを構成しているということを証明するのに使用されたので有名である。これらの素子は、いずれも接触圧によってトンネル型素子になったり弱結合素子になったりする。

次に提案されたのが、バルクの中央部を刃物やエッチング、あるいはイオン打ち込みにより細くし、弱結合型の素子を構成しようとしたものである。しかし、この素子は弱結合型というよりは、むしろ酸化物超伝導体の結晶粒界がトンネルバリアになり、その粒界が細い領域にたまたま存在することによりジョセフソン効果が観測されるとの見方が主流である。したがって、たまたまこの領域に粒界が 1 つも入らなかったり、逆に複数入ったりするなどの不確定性が問題となる。

もっと確実なトンネル型ジョセフソン素子を形成しようという試みもある。我々のグループで作製した素子はバルクの表面を研磨し、その上に薄いアルミを蒸着してから酸化して絶縁膜となし、さらに、その上に対向電極として金属超伝導体であるニオブをつけたものである。対向電極の臨界温度が低いため液体ヘリウム温度でしか動作しないが、比較的経時変化の少ない良好な素子ができる。

両電極とも集積回路技術による、つまり高温超伝導体薄膜を用いたトンネル型素子がおそらく究極の姿であろうが、これにはまだいくつかの問題が残されている。まず現状の薄膜形成には高温が必要であるので、その結果、薄いトンネル絶縁膜は壊れてしまう可能性が高い。また、経時変化が少ない素子でも、まだ数週間程度の寿命しかない。おそらく薄膜の界面の化学組成が時間とともに変化するからであると思われる。

最後に超伝導 3 端子素子について述べよう。これはジョセフソン素子が 2 端子素子であり、種々の回路を作る際、入出力分離が取りにくいなど、難しい点があ

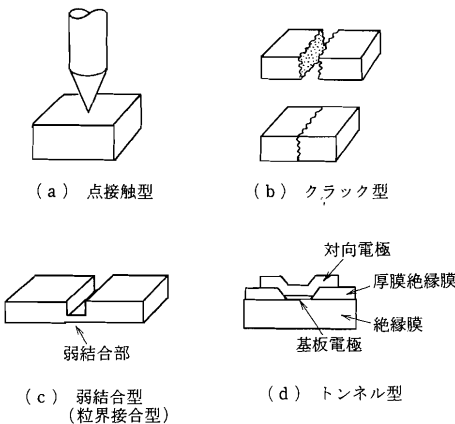


図 5 ジョセフソン素子のいろいろ

るので、なんとか超伝導でかつ制御電極を持ったものを作ろうという試みである。すでに、ニオブを主要材料とするいくつかの素子の提案があるが、その多くは超伝導体と半導体を組合せたものである。しかし、超伝導体のギャップ電圧と半導体のバンドギャップに、大きな隔りがある点が問題であった。新超伝導材料はギャップ電圧が30 mV程度もあり、狭ギャップ半導体ならば極めてスムーズに接続できる可能性が出てきており、期待されている。

## 6. む す び

以上述べたように、新超伝導体の出現は、零抵抗線路、超伝導磁石、磁気浮上といった巨視的な応用分野、さらに高感度磁気センサ、高速デバイスといった超伝導エレクトロニクスの応用分野に大きな夢を与えてくれた。それは、超伝導の動作温度を身近なものにした以外にも、半導体とのギャップを縮めてくれ、超伝導体と半導体の連続性を確保してくれた。材料的にはすこぶる取扱いの困難な物質であるが、それを乗り

越えて、夢を実現したいものである。

(昭和63年2月25日受付)

### 【参 考 文 献】

- 1) J. G. Bednorz, and K. A. Müller: "Possible High  $T_c$  Superconductivity in the Ba-La-Cu-O System", Z. Phys. B, **64**, pp. 189-193 (1986)
- 2) M. K. Wu, J. R. Ashburn, C. J. Trong, P. H. Hor, R. L. Meng, L. Gao, Z. J. Huang, Y. Q. Wang, and C. W. Chu: "Superconductivity at 93 K in a New Mixed-Phase Y-Ba-Cu-O Compound System at Ambient Pressure", Phys. Rev. Lett., **58**, 9, pp. 908-910 (1987)
- 3) A. Inoue, K. Takeuchi, H. Ito, A. Nakayama, Y. Okabe, M. Kawasaki, and H. Koinuma: "Y-Ba-Cu-O/Nb Tunnel Type Josephson Junctions", JJAP, **26**, 9, pp. L 1443-1444 (1987)



おかべ よういち  
岡部 洋一 昭和42年、東京大学工学部電気工学科卒業。47年、同大学院博士課程修了後、東京大学工学部講師。48年より、同助教授となり、現在に至る。高速高機能電子デバイス、特に超伝導エレクトロニクスおよびニューロデバイスの研究に従事。正会員。