

赤外光温度制御装置を用いた HTS SQUID 冷凍機冷却システムの検討

岩尾 聡一郎, 廿日出 好, 田中 三郎[†]

Study of Cryocooler-based HTS SQUID Cooling System Involving an Infrared Temperature Controller

Souichiro IWAO, Yoshimi HATSUKADE and Saburo TANAKA

Synopsis: A high- T_c superconducting quantum interference device (HTS SQUID) cooling system was developed based on a pulse-tube cryocooler (PTC) and a novel temperature controller. In this system, the temperature controller uses infrared irradiation instead of the commonly employed electric heater to provide accurate and low-noise performances. The infrared light was irradiated via a fiber-optic cable onto a SQUID-mount stage, where a HTS SQUID was cooled to approximately 77 K by the PTC. The output of the irradiation source was controlled with a feedback scheme while monitoring the temperature of the SQUID-mount stage. The temperature of the stage was stabilized at 77 K, and kept within ± 0.03 K deviation, for more than 2 hr by the temperature controller. The measured magnetic flux noise of the HTS SQUID magnetometer in the cooling system with the temperature controller showed little magnetic influence due to infrared irradiation.

Keywords: HTS SQUID, pulse tube cryocooler, cooling system, temperature controller, infrared irradiation

1. はじめに

高温超伝導 SQUID (HTS SQUID) は現在最高レベルの感度を持つ磁束センサである。HTS SQUID は低温超伝導 SQUID (LTS SQUID) よりも 80 K 以上高い温度で動作するため、ランニングコストが抑えられ、リフトオフも短くすることができる。そのため HTS SQUID を用いた非破壊検査や異物検出などへの応用が期待されている^{1~3)}。ただし、これら HTS SQUID 応用技術を実用化するためには、補給や事故防止のための初歩的な知識が必要な LN₂ を用いた冷却から、冷媒を補給する必要がなく AC 電源で動作可能なうえ取り扱いが容易な冷凍機での冷却への移行が必要不可欠である。実際、低温部に可動部が存在しないため低振動で長寿命な同軸型のパルス管冷凍機を用いた SQUID 冷却システムの開発が進められている^{4~6)}。

これまで HTS SQUID 冷却用冷凍機の温度調節には主に、ヒータやコンプレッサの冷媒ヘリウムガス流量を調節する方法が用いられてきた。しかし、ヒータを用いる場合、必然的に磁気ノイズが発生し、SQUID の感度を低下させる可能性がある。一方、冷媒ガス流量の調節の場合、磁気ノイズは発生しないが温度変動の時定数が遅いため、安定且つ精密な調整は困難である。そこで本研究では、SQUID 近傍で磁気ノイズを発生しない赤外光温度制御装置を用いて、

精密且つ長時間安定した温度調節が可能な SQUID 冷却システムの開発を行った。本システムを用いて HTS SQUID マグネトメータを動作させ、温度安定性および装置のノイズに関して良好な測定結果が得られたので報告する。

2. 赤外光温度制御装置を用いた冷凍機冷却システム

2.1 システム概要

本研究で開発した冷凍機冷却システムの概略図を Fig. 1 に示す。本システムは測定系、冷凍機系、温度調節系の装置群で構成した。

測定系は HTS SQUID マグネトメータ、SQUID エレクトロニクス、スペクトラムアナライザ、ノート PC で構成した。HTS SQUID マグネトメータの各パラメータを Table 1 に示す。また、液体窒素冷却時のノイズスペクトラムを Fig. 2 に示す。

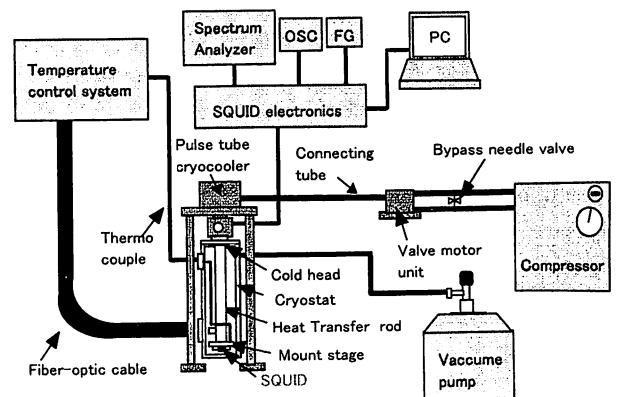


Fig. 1 Schematic illustration of the cryocooler-based SQUID cooling system with infrared temperature controller.

Received May 18, 2005
豊橋技術科学大学
〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1
Toyohashi University of Technology, 1-1 Hibarigaoka,
Tempaku-cho, Toyohashi, Aichi 441-8580, Japan
[†] E-mail: tanakas@eco.tut.ac.jp

Table 1 Characteristics of the HTS SQUID magnetometer used in this project (at 77 K by liquid nitrogen).

SQUID parameters	Characteristics
$2I_c$	85.9 μ A
$R_n/2$	4 Ω
A_{eff}	0.049 mm ²
Magnetic flux noise	50 μ ϕ_0 /Hz ^{1/2} @ 1kHz

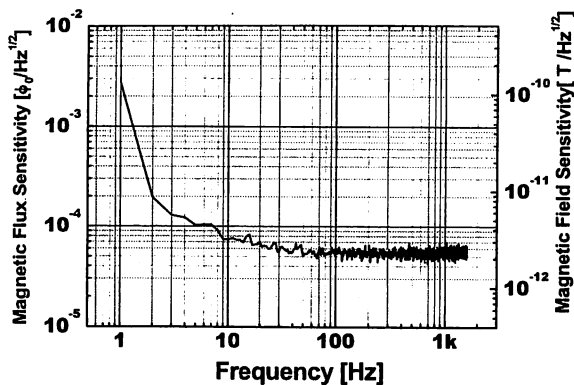


Fig. 2 Noise spectrum of a HTS SQUID magnetometer cooled by liquid nitrogen.

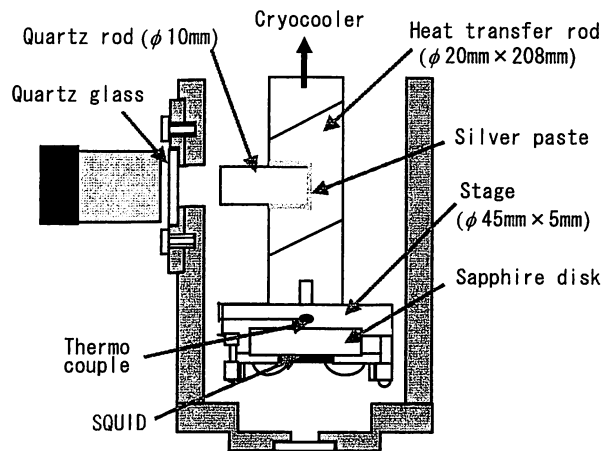


Fig. 3 Cross-sectional drawing of the bottom part of the cryostat.

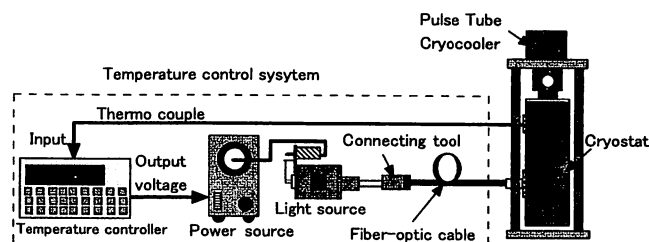


Fig. 4 Schematic diagram of the temperature controller.

冷凍機系は、同軸型パルス管冷凍機（アイシン精機 PR111）、冷凍機と一体化したクライオスタット、クライオスタット内を真空に引くためのターボポンプ、冷凍機の冷媒ガス搬送方向を切り替えるためのバルブモータユニット、冷媒ガスを圧縮するための空冷式コンプレッサで構成した。同軸型パルス管冷凍機は、パルス管と蓄冷器が同軸上に配置されたタイプである。そのため、二軸型に見られる左右方向の振動が抑制され、低振動での素子冷却が可能となる⁷⁾。本研究で用いた同軸型パルス管冷凍機の仕様を **Table 2** に示す⁸⁾。

次に SQUID 設置部の概略図を **Fig. 3** に示す。冷凍機低温ヘッド溶接部由来の磁気ノイズの影響を低減するために、冷凍機低温ヘッドと SQUID の距離を離す必要があった。そこで、冷凍機の低温ヘッドに長さ 208 mm の無酸素銅製の伝熱ロッド (φ 20 mm) を設置して、その先端に銅製の SQUID 設置用ステージを取り付けた。また、銅製ステージから発生する熱雑音の影響を低減するため、SQUID はサファイアディスクを介してステージ上に設置した⁹⁾。

温度調節系は、低温領域の測定が可能な金鉄-ノーマルシリバー熱電対、温度調節器 (Lakeshore Model 331)、赤外光ランプ用電源および赤外光ランプ光源、長さ 3 m の光ファイバケーブル

ケーブル (多成分ガラスファイバー) で構成した。温度調節系の概略図を **Fig. 4** に示す。

熱電対は SQUID 設置用ステージの側面に設置した。温度調節器は設定温度とステージ温度の差がゼロになるように電圧を出力制御し、温度調節器からの出力電圧は赤外光ランプ用電源に入力される。赤外光は赤外光ランプ用光源から光ファイバケーブルを伝達して伝熱ロッドに照射され、間接的に SQUID の温度を調節する。なお電磁的ノイズ対策として、温度調節器および各種エレクトロニクスは電磁シールドルームに設置し、冷凍機および光ファイバケーブルは磁気シールドルームに設置した。

2.2 システム設計

2.2.1 赤外光ランプの熱量計算

本システムは伝熱ロッドに赤外光を照射することにより SQUID の温度を制御する仕組みである。そのため、伝熱ロッドの低温ヘッド側の温度を 76 K、SQUID 設置用ステージ側の温度を 77 K とするためにはどの程度の赤外光出力が必要であるかを算出した。計算には下記 (1) 式を用いた¹⁰⁾。

$$Q = \frac{S}{L} \times \int \lambda dT \quad [W] \quad (1)$$

ここで Q, S, L, λ, T はそれぞれ、熱量、伝熱ロッドの断面積、伝熱ロッドの長さ、熱伝導率、温度を表している。伝熱ロッドは直径 20 mm、長さ 208 mm であるため、

Table 2 Specifications of a coaxial-type pulse-tube cryocooler.

The lowest temperature	57.1 K
Cooling power	5 W (at 87.5 K)
Electric power consumption	780 W (with AC 100 V 60 Hz)

$S=3.14 \times 10^{-4} \text{ m}^2$, $L=0.21 \text{ m}$ である。また $\int \lambda dT$ は熱伝導積分値と呼ばれ、簡易的に算出するため数表化されている¹⁰⁾。無酸素銅伝熱ロッドの低温ヘッド側の温度を 76 K, SQUID 設置用ステージ側の温度を 77 K とする時の熱伝導積分値は

$$[\lambda dT = 5.9 \times 10^2 \text{ [W/m]}]$$

となる。よって、伝熱ロッドの低温ヘッド側の温度を 76 K, SQUID 設置用ステージ側の温度を 77 K とするために必要な熱量は (1) 式より 0.93 W であると考えられる。しかし、実際には SQUID 設置用ステージ側から赤外光を照射すると冷凍機の負荷が増加するため、冷凍機低温ヘッドの温度が 76 K よりも高くなる。よって、(1) 式で算出した値よりも小さい熱量で伝熱ロッドの SQUID 設置用ステージ側の温度を 77 K に上昇させることが可能であると考えられる。次に実際に使用する赤外光ランプの熱量が計算値を上回っているかを調べるため、熱量計 (Genetec 製, TPM-300CE, PS-330) を用いて、12 V, 100 W の赤外光ランプの熱量を測定した。測定の結果、3mの光ファイバケーブルを伝達して照射される赤外光の熱量はおよそ 1.2 W であった。この値は計算値を十分上回るため、本研究では 12 V, 100 W の赤外光ランプを使用することにした。

2.2.2 サファイアディスクによる熱雑音低減に関する検討

前述したように、SQUID を冷凍機で冷却する際、銅製のステージに直接 SQUID を貼り付けると、銅の熱雑音によりホワイトノイズレベルが増加してしまう。そのため、我々は熱伝導率が高く、絶縁性のよいサファイアディスク (厚さ 0.5 mm) を介して SQUID をステージ上に設置した。しかしこの時の磁場ノイズは SQUID マグネットメータを用いて測定した結果 4.22 pT/Hz^{1/2} と高かった¹¹⁾。

そこで、銅板の熱雑音によるホワイトノイズへの影響を調べるため、理論式から銅の熱雑音を算出した。計算に使用した銅板の概略図を Fig. 5 に示す。計算には以下の (2) 式を用いた⁹⁾。ここで μ_0 , σ , k_B , T , t , a , z はそれぞれ、真空の透磁率、導電率、ボルツマン定数、ステージ温度、ステージの厚さ、ステージの内径、ステージと SQUID 間の距離を表している。サファイアディスクの厚さが 0.5 mm の場合の熱雑音を算出した結果、熱雑音は 4.71 pT/Hz^{1/2} であった。計算に用いたパラメータの値は、 $\mu_0=4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$, $\sigma=5 \times 10^8 \text{ S/m}^{12)}$, $k_B=1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$, $T=63 \text{ K}$, $t=5 \times 10^{-3} \text{ m}$, $a=22.5 \times 10^{-3} \text{ m}$, $z=(\text{サファイアディスクの厚さ } 0.5 \text{ mm} + \text{基板の厚さ } 0.5 \text{ mm}) = 1 \times 10^{-3} \text{ m}$ とした。このことから、厚さ 0.5 mm のサファイアディスクでは熱雑音の影響を低減できていないと考えられた。そこで、SQUID のホワイトノイズに影響を与えないレベルまで熱雑音を低減できるサファイアディスクの厚さを検討した。一般的な HTS SQUID の磁場ノイズは 1 pT/Hz^{1/2} 以下である

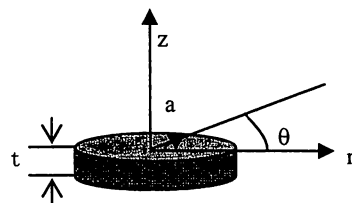


Fig. 5 Schematic illustration of copper cylindrical bulk.

Table 3 Comparison between the theoretical thermal magnetic noise due to a copper stage and the experimental white magnetic noise of the HTS SQUID magnetometer.

Distance from copper stage to the SQUID	Theoretical thermal magnetic noise [pT/Hz ^{1/2}]	Experimental white magnetic noise [pT/Hz ^{1/2}]
1 mm	4.71	4.22
6 mm	1.27	0.80

ため、現状の 1/5 程度にする必要がある。そのため、サファイアディスクの厚さを 0.5 mm から 5.5 mm に変更し、SQUID とステージ間の距離を 1 mm から 6 mm とした。この値を (2) 式⁹⁾ に代入して算出すると、熱雑音は 1.27 pT/Hz^{1/2} であった。

$$B_{nz} = \left(\frac{\mu_0}{2}\right) \sqrt{\frac{\sigma k_B T}{2\pi}} \left\{ \frac{t}{z(z+t)} - \frac{1}{2} \left(\frac{z+t}{a^2 + (z+t)^2} - \frac{z}{a^2 + z^2} \right) - \frac{3}{2a} \left(\tan^{-1} \frac{z+t}{a} - \tan^{-1} \frac{z}{a} \right) \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

理論値を算出後、実際に厚さ 5.5 mm のサファイアディスク (ステージと SQUID 間の距離 6 mm) を使用した場合の磁場ノイズを測定した。その結果、ホワイトノイズは約 0.80 pT/Hz^{1/2} であり 1 pT/Hz^{1/2} 以下となった。以上の結果をまとめて Table 3 に示す。銅の熱雑音の理論計算値と、実測したホワイトノイズレベルを比較すると、理論計算値の方が実測したホワイトノイズレベルよりも多少大きくなっている。これは実際の測定では SQUID が有限の面積を持っているため、銅板から発生する磁場ノイズの平均を計測しているためと考えられる。以上の結果から本研究では、銅の熱雑音の影響を低減するため厚さ 5.5 mm のサファイアディスクを使用した。

3. システムの性能評価

3.1 温度安定性

Fig. 1 のシステムを用いて SQUID 設置用ステージの温度安定性を調べた。ここでは、断熱のためにクライオスタット内を $6 \times 10^{-4} \text{ Pa}$ 以下の真空中に排気した後、冷凍機の冷媒ガス (ヘリウムガス) 流量を手動で調節してステージ温度が約 76 K になるまで冷却した。その後、ガス流量を固定してステージ温度が 77 K で安定するように赤外光による温調を行った。温調を開始してから約 20 分後に 77 K に到達

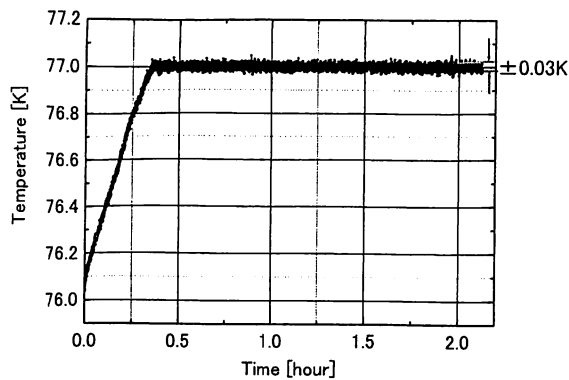


Fig. 6 Time trace of the temperature at the SQUID-mount stage with an infrared temperature controller.

した。到達後、約2時間の温度安定性を調べた結果、ステージの温度変動は ± 0.03 Kであった。以上の実験におけるステージ温度の経時変化を Fig. 6 に示す。同様にステージ温度が 63 K で安定するように温調を行った場合も 77 K の時と同じ温度安定性が得られた。一方、これまでの温度調節方法であった冷媒ガス流量の手動調節法では、ステージ温度が 77 K で安定するように温調した場合の温度変動は ± 0.2 K であった。もう一つの温度調節法であるヒータを用いた場合の温度安定性は 77 K において約 ± 0.05 K と報告されている¹³⁾。これらの結果から、赤外光による温度調節方法には十分な温度安定性があるといえる。

3.2 システムノイズ特性

次に本システムを使用することでホワイトノイズレベルが増加するか否かを調べるため、赤外光照射による温調時のノイズを測定し、冷媒ガスの流量調節による温調時の結果と比較した。赤外光による温調では、まず冷媒ガスの流量調節により約 62 K まで冷却し、赤外光を照射してステージ温度を 63 K に安定させた後、ノイズを測定した。冷媒ガスの流量調節による温調では、冷媒ガスの流量を手動で調節して、ステージ温度を約 63 K に冷却した後、短時間の内にノイズを測定した。赤外光による温調時と冷媒ガス流量調節による温調時のノイズ測定結果をまとめて Table 4 に示す。またノイズスペクトラムを Fig. 7 に示す。Fig. 7 に示すように両者はおおよそ同じノイズ波形になった。このことから、赤外光による温調時に磁気ノイズの増加が無いことが明らかになった。この時のホワイトノイズレベルは 1 kHz において約 $15 \mu\phi_0/\text{Hz}^{1/2}$ (磁場に変換すると $650 \text{ fT}/\text{Hz}^{1/2}$) であった。

4. まとめ

本研究では赤外光温度制御装置を用いた HTS SQUID 冷凍機冷却システムの検討を行った。赤外光を用いることで磁気ノイズが発生せず、安定且つ精密な温度制御が可能になった。本温度調節装置を用いて SQUID 設置用ステージの温度安定性を測定した結果、ステージ温度 77 K および

Table 4 Flux noise level of the system with and without infrared temperature controller.

Temperature control method	Flux noise at 1 kHz [$\mu\phi_0/\text{Hz}^{1/2}$]	Magnetic noise at 1 kHz [$\text{fT}/\text{Hz}^{1/2}$]
Infrared irradiation	15	650
Refrigerant gas flow	19	802

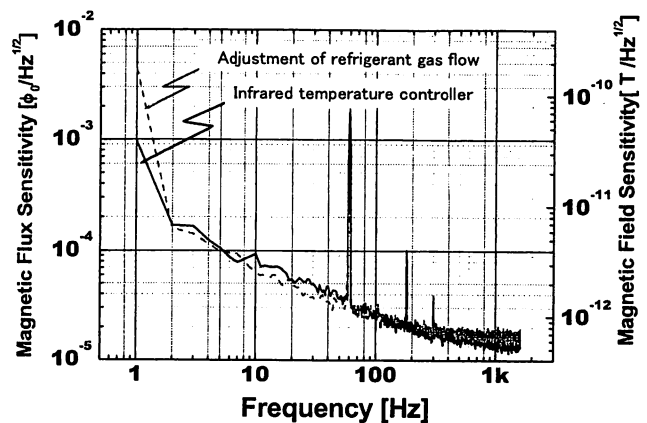


Fig. 7 Noise spectra with and without the infrared temperature controller. (SQUID-mount stage temperature: 63 K).

63 K のいずれの場合も温度変動を ± 0.03 K に抑えることができた。また、本システムのノイズ特性を測定した結果、温調動作時に磁気ノイズの増加は見られなかった。

以上の結果から、本システムは十分な温度安定性と低ノイズな温度調節システムを実現しているため、今後多くの応用に適用可能であると考えられる。

参考文献

- 1) S. Tanaka, M. Natsume, M. Uchida, N. Hotta, T. Matsuda, Z. Aspanut and Y. Hatsukade : "Measurement of a metallic contaminant in food by high-Tc SQUID," Supercond. Sci. Technol. **17** (2004) 620-623
- 2) C. Carr, D. Graham, J.C. Macfarlane and G.B. Donaldson: "SQUID-based nondestructive evaluation of carbon fiber reinforced polymer," IEEE Trans. Appl. Supercond. **13** (2003) 196-199
- 3) Y. Hatsukade, A. Kosugi, K. Mori and S. Tanaka : "Eddy current based SQUID-NDE system for thin copper tubes," Jpn. Appl. Phys. **43** (2004) L1488-L1491
- 4) Y. Hatsukade, N. Kasai, H. Takashima, Y. Maruno and A. Ishiyama : "Development of a low-magnetic-noise nondestructive inspection system using a superconducting quantum interference device cooled by a coaxial pulse tube cryocooler," J. Cryo. Soc. Jpn. **38** (2003) 686-692
- 5) S. Fujimoto, Y. Hiratsuka, H. Morishita and T. Nagaishi : "Development of a low-noise, single-stage pulse tube cryocooler,"

J. Cryo. Soc. Jpn. 39 (2004) 322-327

- 6) R. Hohmann, C. Lienerth, Y. Zhang, H. Bousack, G. Thummes and C. Heiden : "Comparison of low noise cooling performance of a Joule-Thomson cooler and a pulse-tube cooler using a HT SQUID," IEEE Trans. Appl. Supercond. 9 (1999) 3688-3691
- 7) C. Lienerth, G. Thummes and C. Heiden : "Progress in low noise cooling performance of a pulse-tube cooler for HT-SQUID operation," IEEE Trans. Appl. Supercond. 11 (2001) 812-815
- 8) アイシン精機株式会社ホームページ
<http://www2.aisin.co.jp/life/energy/cooler/52gmpals.html>
- 9) N. Kasai, K. Sasaki, S. Kiryu and Y. Suzuki : "Thermal magnetic noise of Dewars for biomagnetic measurements," Cryogenics 33 (1993) 175-179
- 10) (社)日本機械学会 編:「新編 伝熱工学の進展 第3巻」, 養賢堂, 東京 (2000) 273-277
- 11) 田中三郎, 岩尾聡一郎, 廿日出好: 第65回 応用物理学会学術講演会講演予稿集 1 (2004) 214
- 12) (社)低温工学協会 編:「超伝導・低温工学ハンドブック」, オーム社, 東京 (1993) 766
- 13) Y. Hatsukade, T. Inaba, Y. Maruno, S. Tanaka : "Mobile cryocooler-cooled SQUID-NDE system utilizing active magnetic shielding," IEEE Trans. Appl. Supercond. 14 (2004) 3231-3238

岩 尾 聡一郎

昭和57年4月1日生。平成16年豊橋技術科学大学工学部エコロジー工学課程卒業。現在、同大学院工学研究科エコロジー工学専攻在籍。



廿日出 好

昭和51年2月26日生。平成15年早稲田大学大学院理工学研究科電気工学専攻博士課程修了。同年4月より豊橋技術科学大学に勤務。現在エコロジー工学系教務職員として SQUID 応用研究に従事。低温工学協会、応用物理学会会員。工学博士。



田 中 三 郎



1983年豊橋技術科学大学大学院修士課程電気電子工学専攻修了。同年住友電気工業株式会社伊丹研究所研究員。90年～95年(株)超伝導センサ研究所主任研究員兼務。91年博士(工学)の学位取得(大阪大学)。95年住友電気工業(株)退職。同年豊橋技術科学大学工学部助教授。96年～97年カリフォルニア州立大学バークレー校物理学科客員研究員。02年より豊橋技術科学大学工学部教授。03年同未来技術流動研究センター長併任。高温超伝導 SQUID 磁気センサを利用した生体検査応用, DNA 検出, 食品異物検査システムなどの研究に従事。