高温超伝導 SQUID を用いたモバイル式非破壊検査装置

廿日出 好*

Mobile Nondestructive Evaluation Systems using High- T_c SQUIDs

Yoshimi HATSUKADE*

Synopsis: This paper reviews the recent development of mobile nondestructive evaluation (NDE) systems using high- T_c superconducting quantum interference devices (SQUIDs) for conductive materials and structures. The contents of this paper include a noise cancellation scheme using active shielding, a novel high- T_c SQUID gradiometer with robustness in magnetic fields, mobile SQUID NDE systems and NDE of complex composite-metal structures. Using the novel high- T_c SQUID gradiometer, the superior capability of the mobile SQUID NDE system compared to conventional NDE techniques is demonstrated and discussed.

Keywords: high- T_c superconducting quantum interference device (SQUID), nondestructive evaluation (NDE), mobile system, high-pressure vessel

(Some figures in this article may appear in colour only in the electronic version)

1. はじめに

超伝導量子干渉素子 (Superconducting quantum interference device: SQUID) は、小さな超伝導リングとジョセフソン接合から構成される、超伝導状態における磁束の量子化とジョセフソン効果という物理現象を組合せた超伝導デバイスである¹⁾。SQUID を磁気センサとして用いた場合、DC から数 GHz までの広い周波数帯域を有し、その優れた磁場感度は周波数に依存しない。また、Flux locked loop (FLL) 回路で SQUID を駆動することで、広いダイナミックレンジと高いスループレート、そして線形応答特性が得られる^{2,3)}。このため、金属系の低温超伝導 (Low- T_c) SQUID は、地球物理学をはじめ磁化率測定、生体磁気計測、電圧・電流などの物理量測定など多くの応用に用いられてきた¹⁻⁵⁾。これらの応用の中で商業的に最も成功した例は脳磁図 (Magnetoencephalogram: MEG) を計測するマルチチャンネル型の MEG 装置であり、これに続く実用化を目指した SQUID 応用として、心磁図 (Magnetocardiogram: MCG) 計測や非破壊評価 (Nondestructive evaluation: NDE)、免疫検査などが研究されてきた⁶⁻⁹⁾。これらの研究で当初は Low- T_c SQUID が

用いられたが、研究が進むにつれ、MEG ほど微弱な磁場を計測しなくてよいため「究極の感度」よりもむしろ「実用性」に重点が置かれることが多くなり、酸化物系の高温超伝導 (High- T_c) SQUID が主に用いられるようになった¹⁰⁻¹⁴⁾。

筆者は、早くから High- T_c SQUID の開発・応用に取り組んできた電子技術総合研究所 (現産業技術総合研究所) において、1990 年後半から Low- T_c および High- T_c SQUID を用いた非破壊評価の研究に従事してきた。前述の SQUID の特徴より、SQUID 非破壊評価は、金属表面の微小な欠陥や金属内の深部欠陥からの低周波数磁場応答を検出できる。このため、金属材料・構造物を扱う産業への応用技術が研究・開発されてきた。1990 年代初頭から、航空機の機体やホイールの微小・深部欠陥やエンジンタービンへの混入磁性異物、高速道路の鉄筋の腐食や破断などの検出に関する研究が行われ、現場でルーチンワークに組み込まれるに至った技術もあった¹⁵⁻¹⁸⁾。一方、電総研では当時新たな航空機材料として用いられ始めた炭素繊維強化複合材料に着目し、SQUID 非破壊評価の複合材料応用を世界で最初期に取り組んだ^{11,19-23)}。その後も筆者は豊橋技術科学大学にて High- T_c SQUID を用いた非破壊評価の研究を継続しており、複合材料や金属などの導電性材料に加え、空調用銅管やアルミ管、送電用配線、超高压用水素タンクなどの構造物・構造物の非破壊検査の研究に取り組んできた²⁴⁻³⁰⁾。これらの研究によって、High- T_c SQUID を用いた非破壊評価技術は、表面欠陥であれば金属材料や炭素

Received March 6, 2012

* 豊橋技術科学大学 環境・生命工学系

〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1

1-1 Hibarigaoka, Tenpaku-cho, Toyohashi, Aichi 441-8580, Japan

Department of Environmental & Life Sciences, Toyohashi

University of Technology

E-mail: hatukade@ens.tut.ac.jp

系複合材料のマイクロオーダーの欠陥を検出可能であり、深部欠陥の場合 20 mm 以上深部の欠陥を検出できるなど、高いポテンシャルを有していることを示してきた。

しかしながら、従来からよく用いられてきたバイクリスタル SrTiO₃ 基板に YBa₂Cu₃O_{7-x} (YBCO) 薄膜を蒸着して作製した High-*T_c* SQUID を用いる場合、以下に示すような課題があった。

(1) High-*T_c* SQUID を用いる非破壊評価装置は十分なスルーレート・ダイナミックレンジを備えているが、検査対象に印加した電流のつくる磁場や、印加した励磁磁場の漏れ磁束が SQUID に鎖交した際、1 μT 未満の強度であってもジョセフソン接合や薄膜の結晶欠陥に磁束がトラップされ、これによる感度低下や磁束のジャンプによる不安定動作が発生する³²⁾。

(2) 上記の理由により、約 50 μT の地磁気が含まれる通常環境中でのセンサの移動は困難である。このため検査方法はセンサ固定、対象移動という方式になり、シンプルな形状の非磁性金属の板や管などに検査対象が制限される。以上のような「磁場耐性が低い」という課題から、SQUID 非破壊検査技術は適用可能な対象・形状が比較的少なく、性能をフルに発揮できない状態にあった。

そこで、我々は、High-*T_c* SQUID を用いた非破壊検査装置のモバイル化というテーマに近年取り組んできた³¹⁻³⁵⁾。このテーマの研究を通じて、High-*T_c* SQUID を冷却する小型冷凍機の導入、磁場ノイズキャンセル技術、高い磁場雑音耐性を有する SQUID センサの導入や開発などの要素技術開発も行なってきた。このテーマ解説では、これら一連の研究と、モバイル式 SQUID 非破壊検査装置の現状について紹介する。

2. アクティブシールドを用いたモバイル式 SQUID 非破壊評価装置

2.1 非破壊評価装置

Low-*T_c* SQUID が用いられた初期の非破壊評価装置では、SQUID の高感度を保持するため磁気シールドルーム内に装置が構築されていた。その後、装置の扱い易さ等の実用性が考慮され、環境磁気ノイズをキャンセルでき、磁気シールドがない通常環境で動作可能な平面一次微分型 High-*T_c* SQUID グラジオメータを用いた装置が開発された^{19, 24)}。これらの装置では、SQUID は固定され、xy ステージやモータにより検査対象が移動され、検査が行われる方式であった。筆者らはこれら装置の実用化のため、まず、低振動・低磁気ノイズ特性を有する同軸型パルス管冷凍機を開発・導入した³⁶⁾。クライオスタット一体型パルス管冷凍機底部断面の概略図を Fig. 1 に示す。同軸型のためパルス管冷凍機の冷却端の振動は数 10 μm 程度であるが、振動によるノイズ増加をさらに抑制するため、SQUID を冷却するステージを冷凍機冷却端から分離し、

両者を銅の細線を用いて熱的に接続した。ステージの振動は、冷凍機の駆動周波数 2.4 Hz において約 0.5 μm、3 倍高調波の 7.2 Hz において約 1.3 μm であった³¹⁾。SQUID 冷却ステージには抵抗性ヒータと熱電対が設置され、温度調整コントローラで PID 制御により 77 K 以下に±0.04 K 程度の誤差で温調されている。

次に、この冷凍機で冷却した High-*T_c* SQUID グラジオメータを、磁気シールドの無い通常環境中で移動させるため、SQUID とは別の参照センサを用いたアクティブシールド技術を開発した。ここでは、地磁気中でも安定して動作するが、High-*T_c* SQUID より 2, 3 桁ノイズレベルの高いフラックスゲート磁気センサを用いて、SQUID 周辺に常時低磁場空間を発生させるアクティブ磁気シールド技術を開発した。この技術を、冷凍機で冷却したバイクリスタル接合型 High-*T_c* SQUID グラジオメータ (Fig. 2 参照) に適用し、通常環境中での SQUID グラジオメータの移動・計測が可能な非破壊装置を開発した^{32, 33)}。ここで用いた SQUID グラジオメータは、Fig. 2 の挿入図に示すように、SQUID リングのバイクリスタル粒界線上に 2 個のバイクリスタル型ジョセフソン接合 (Josephson junction: JJ) を有する。一方、ピックアップコイルにも粒界が存在しており、粒界における臨界電流 *I_c* は通常の薄膜部より 3 桁ほど小さい。このグラジオメータに数 10~100 nT の磁場を印加した場合、もしくは地磁気中で移動させた場合、ピックアップコイルに流れる遮蔽電流が粒界の *I_c* を超え、磁束が粒界に侵入して不安定動作を引き起こす。そこで、ここでは通常環境中で数 10 μT の磁気ノイズが存在しても安定に動作する約 10 pT/Hz^{1/2} の感度を有するフラックスゲートを環境磁気計測に用いた。そして、Fig. 3 に示すように、フラックスゲートの出力電圧をアンプで増幅、フィ

Fig. 1 Schematic illustration of the cross-section of the bottom part of the coaxial pulse-tube cryocooler.

Fig. 2 Pattern of the planar high- T_c SQUID gradiometer.

Fig. 3 Mobile high- T_c SQUID NDE system utilizing the fluxgate magnetic sensor for active magnetic shielding.

ルタにより帯域を低周波数（例えば 100 Hz 以下）に制限し、補償コイルにフィードバックして補償磁場を発生させ、地磁気や電源ノイズ（50～60 Hz）を含めた低周波数帯域に関して、環境磁気ノイズをアクティブにキャンセルするフィードバック回路を開発した。これによりフラックスゲート近傍に常時低磁場空間が形成され、通常環境中にて SQUID グラジオメータをロボットアームで移動させても安定動作が可能となった。Fig. 4 にロボットを用いて 100 mm/s で SQUID グラジオメータを移動させたときの磁束ノイズを示す。SQUID のノイズは移動前から幾分増加したが十分に低いノイズレベルであった。ノイズの増加は、ロボット由来のノイズか、SQUID に生じた磁束トラップ由来の感度低下によるものと考えられる。

2.2 複合材・金属材料積層サンプルへの適用

Fig. 3 に示すようなモバイル式 SQUID 非破壊評価装置の応用の一つとして、高い安全性が要求される水素燃料タンクがあげられる³⁷⁾。燃料自動車に搭載される水素燃料タンクは、35 MPa の高圧水素を貯蔵し、燃料補充のたびに大きな負荷が繰り返しかかるため、肉厚のアルミ合金の

Fig. 4 Flux noise profiles of the mobile SQUID NDE system with the active magnetic shielding (AMS) technique.

ライナー（内張）を CFRP 外層で強化した構造となっている。このようなタンクの実用化・普及のためには、使用中のタンクに万一微小な亀裂がライナー内部に発生した際に早期検出できる検査技術が必須である。しかし、ライナーは数～10 mm と肉厚で、CFRP 外層で補強されている構造のため、渦流探傷法や超音波探傷法など従来技術によるライナー内部の欠陥検査は困難である。そこで、Fig. 3 に示す装置を用いて、水素燃料タンクの CFRP・Al 合金積層構造を模擬した板材サンプルの内部欠陥の検出を行った。

CFRP・Al 合金積層サンプルはそれぞれ 3 mm と 10 mm の厚さを持つ CFRP と Al 合金平板を重ねたもので、アルミ合金裏面に幅 2 mm、長さ 10 mm、深さ 5 mm の切り欠き欠陥を作製した。ここでは、鉄心入電磁コイルを用いた渦電流法^{21, 23)}を適用し、約 1 μ T で 70 Hz（一般的な Al への侵入深さは約 10 mm）の励磁磁場をサンプルに印加しながら、ロボットによりサンプル表面から 3 mm 離れた xy 平面内で SQUID グラジオメータを移動させて二次元走査を行った。この際、上記アクティブシールドにおけるローパ

Fig. 5 Results of two-dimensional scanning using the mobile SQUID NDE system on a CFRP-covered Al plate: (a) without a slot, (b) with a slot on the near surface of the Al board.

スフィルタのカットオフ周波数は 50 Hz とした。Fig. 5 に測定結果を示す。比較のため、Al 合金に欠陥を持たない同積層構造のサンプルの測定結果を同図(a)に示す。Al 合金の表面に亀裂がある場合の検査結果を同図 (b)に示す。同図 (a)にも見られる緩やかな磁場勾配分布中に、四重極分布をもつ局所的欠陥応答が検出された。また、亀裂がアルミ合金の裏面にある場合も同様の欠陥応答を検出することができた。以上の結果から、High- T_c SQUID グラジオメータを用いたロボット式検査装置により、肉厚・積層構造材の内部欠陥による磁気応答を検出できる可能性が示された。

3. 3次元構造物のためのモバイル式 SQUID 非破壊評価装置

3.1 高磁場耐性 SQUID

近年、超電導工学研究所の田辺らのグループらによって、高温超伝導薄膜積層技術を用いたランプエッジ型ジョセフソン接合をもつ High- T_c SQUID グラジオメータが開発された³⁸⁾。このグラジオメータは、Fig. 2 とほぼ同形状の平面一次微分型直接結合型グラジオメータであるが、SQUID リング中に高温超伝導薄膜積層技術を用いたランプエッジ型ジョセフソン接合が用いられている (Fig. 6)。本グラジオメータは、77 K 冷却時に約 50 μ V という高い磁束電圧変調深さ V_{pp} を有し、磁気シールドルーム中で計測した磁束ノイズは約 6 $\mu\phi_0/\text{Hz}^{1/2}$ であった。本素子はバイクリスタル型ジョセフソン接合をもつグラジオメータと異なり、差分型ピックアップコイルに I_c を制限するような粒界が存在しない。また、計測磁場成分に対して粒界が平行で磁束が侵入しやすいバイクリスタル型と異なり、ランプエッジ型の場合、接合粒界は基板面に対して 30° の角度を有し、かつ上下の高温超伝導電極にはさまれた構造となっている。このようなランプエッジ型接合をもつグラジオメータの構造から、本素子は従来型と比較して優れた磁場耐性を有すると考えられた。

そこで、上記新型グラジオメータに AC および DC 磁場を印加した際の磁場耐性を調べた³⁵⁾。磁気シールドルームの中で、直径 50 mm の円形コイルの中心に上記 SQUID グラジオメータを設置して、素子基板と垂直な方向に 100 Hz の交流磁場を印加して、磁束トラップが発生する磁場強度を調べた。この実験で、磁場強度を増加していったとき、FLL 回路のロックが外れる現象が生じた。この場合、ロックが外れたまま印加磁場を目標値まで上げ、その後磁場を除去し、FLL 回路を再ロックしてノイズを計測した。この結果、100 Hz の交流磁場の場合、振幅 1.4 mT の磁場印加後までノイズの増加や磁束トラップが生じなかった (Fig. 7)。この結果と比較して、バイクリスタル型接合を有するほぼ同形状の従来型 High- T_c SQUID グラジオメータの場合、磁場振幅が約 30 nT に達したときに磁束トラップによるノイズ増加が確認された。後者の場合、ピックアップコ

イルに粒界が存在するため、印加された磁場に応じて発生する遮蔽電流がピックアップコイルの粒界部の臨界電流値を超えたときに常伝導転移が発生し、この部分に量子磁束がトラップされ、ノイズが増加したものと考えられる。

一方、SQUID 基板に対して垂直な方向に DC 磁場を印加してその強度を増加させながら、SQUID グラジオメータの二個のジョセフソン接合の合計の臨界電流値 I_c の値を計測した。この結果を Fig. 8 に示す。比較のため、バイクリスタル型接合を有する、ピックアップコイルを持たない High- T_c SQUID リングの臨界電流値も計測した。図に示すように、バイクリスタル型の SQUID リング場合、DC 磁場の増加に従い、すみやかに臨界電流値は減少し、120 μ T 付近で最小となり、240 μ T 付近で最大値を示し、その後 350 μ T 以降はほぼゼロとなった。一方、ランプエッジ型 SQUID グラジオメータの場合、約 160 μ T までは I_c は緩やかに減少し、その後 700 μ T 付近で最小値が現れた。このようにランプエッジ型ジョセフソン接合をもつ新型の SQUID グラジオメータは、AC および DC 磁場に対する高い耐性を有しており、磁気シールドの無い通常環境中で地磁気を切るように三次元的に移動させても、低速度ならロックが外れることなく安定に動作し続けることがわかった³⁴⁾。

上記グラジオメータの磁場耐性が接合の積層構造によるものと考えられたため、我々は、ピックアップコイルがバイクリスタル粒界に交差しないマルチループ構成の High- T_c

Fig. 6 Novel high- T_c SQUID gradiometer with ramp-edge Josephson junctions: (a) schematic pattern of the gradiometer, (b) schematic drawing of the cross-section of the multi-layer ramp-edge Josephson junction.

SQUID マグネトメータを設計 (Fig. 9), バイクリスタル STO 基板に作製した。そして, 別の通常の STO 基板に YBCO 薄膜を蒸着し, 上記マグネトメータのマルチループの隙間および素子中心の SQUID リングを覆うような十字型 YBCO 薄膜を作製し, 同図右下の挿入図に示すように, フリップチップ構造でマグネトメータ上に積層した。このマグネトメータの臨界電流値 I_c の値を, 上記同様 DC 磁場を印加しながら計測した。この結果, Fig. 10 に示すように, YBCO 薄膜を積層したマグネトメータの場合, 約 160 μT まで I_c はほとんど減少せず, 160 μT 以上では減少して 420 μT 付近で最小値が現れた³⁹⁾。同様のフリップチップ構造により, AC 磁場を印加した際の High- T_c SQUID マグネトメータの磁場耐性が増加することが報告されており, 積層構造の磁場に対する優位性が明らかになっている⁴⁰⁾。

Fig. 7 Flux noise profiles of the high- T_c SQUID gradiometer with ramp-edge Josephson junctions when fixed in a magnetically shielded room or moved in a normal environment.

Fig. 8 Critical current I_c of the high- T_c SQUID gradiometer with ramp-edge Josephson junctions and high- T_c SQUID ring with bicrystal Josephson junctions versus applied DC field.

Fig. 9 High- T_c SQUID magnetometer with a multi-pickup-loop design. The bicrystal grain boundary does not cross the multi-pickup-loop. Another cross-shaped YBCO film was overlapped on the SQUID magnetometer with a flip-chip configuration.

Fig. 10 Critical current I_c of the high- T_c SQUID magnetometer with multi-pickup-loop and bicrystal Josephson junctions covered with and without YBCO film in a flip-chip configuration versus applied DC field.

3.2 高磁場耐性 SQUID グラジオメータを用いた 3 次元モバイル式 SQUID 非破壊評価装置

高磁場耐性を有する Fig. 6 に示す High- T_c SQUID グラジオメータを, ロボットアーム搭載用に開発した重量約 500 g の軽量・小型クライオスタット (Fig. 11) にマウントして約 78.6 K に冷却した。この小型クライオスタットをロボットアームに搭載し, Fig. 12 に示すような検査装置を構築した。SQUID と室温間最小距離は約 1.5 mm である。Fig. 7 に, このグラジオメータを磁気シールドの無い通常環境で 10 mm/s の速度で移動させた場合の磁束ノイズを示す。図に示すように, 移動中のノイズ特性は, 鎖交する地磁気の影響により 10 Hz 以下の低周波数領域でノイズが少し増加しているが, その他は通常環境で見られる 60 Hz とその高調波成分が見られるだけで, 移動後, 磁束トラッ

Fig. 11 Small cryostat for the 3D-mobile SQUID NDE system.

Fig. 12 3D-mobile SQUID NDE system utilizing the high- T_c SQUID gradiometer with ramp-edge Josephson junctions for the high-pressure vessel.

ブ・ジャンプによる $1/f$ ノイズの増加や感度低下などは見られなかった。この装置は軽量で小型のクライオスタットを用いるため、数 10 cm の範囲で三次元走査が可能である。また、新型グラジオメータの磁場耐性のため、従来よりも大きな励磁磁場の印加が可能となった。

3.3 水素タンクの非破壊評価

上記ロボット式 SQUID 非破壊評価装置を用いて、Fig. 12 に示す円筒ドーム形状の水素燃料タンクの周辺の曲面内を、リフトオフを一定に保ったままグラジオメータを移動させ、その曲面内の磁場勾配分布を計測し、タンク内部欠陥を検出する自動計測プログラムを開発した。上記装置とプログラムを用いて、タンクのアリミライナーに存在する貫通亀裂の検出を行った。このタンクは圧力試験用に試供された小型の水素燃料用タンクで、円筒部の直径 168 mm、軸長さ 420 mm、内部アリミライナーと外部 CFRP 層の厚さ各 3 mm の円筒ドーム形状タンクである。このタンクに

油圧による負荷を繰返し与えることにより、アリミライナー内表面に長さ約 10 mm の周方向亀裂が発生した。このタンクに対して、Fig. 13(a)に示すように、SQUID グラジオメータのベースラインをタンクの軸方向 (y 方向) に平行、計測成分をタンク半径方向と垂直な磁場の勾配 dB_r/dy (B_r は半径方向成分の磁場) とし、リフトオフ 5 mm でタンク周辺の曲面内で SQUID を三次元走査させた。この際、クライオスタットの底部に設置したダブル D コイルを用いて低周波数励磁を行いながら、アリミライナー内部に発生する渦電流による亀裂応答磁場の測定を行った。Fig. 13(b)に、7.5 μ T, 1 kHz (Al への侵入深さは約 2.6 mm) の励磁磁場を用いた場合の、亀裂周辺曲面内での磁場勾配分布の測定結果を示す。ここでは、同図(a)に示す走査曲面の回転角度を w として、 yw 曲面の磁場勾配 dB_r/dy に比例した SQUID 出力電圧を、 xy 平面に投影した二次元分布を同図(b)に示した。亀裂中心を重心とした四重極分布の亀裂応答信号を、Fig. 5 の場合よりずっと大きな S/N で検出することができた。また、励磁周波数を変化させて測定を行った結果、

Fig. 13 (a) Inspection scheme for internal cracks in the high-pressure vessel using the 3D-mobile SQUID NDE system, (b) inspection result.

Fig. 14 Relationship between the excitation frequency and the signal amplitude from an internal crack in the high-pressure vessel. Skin depth corresponding to the frequency is also shown.

侵入深さとアルミライナーの厚さがほぼ一致する 1 kHz で最も大きな信号強度が得られた (**Fig. 14**)。

以上で示したように、これまでは困難であったロボットによる High- T_c SQUID の二次元および三次元走査が可能となっており、水素燃料タンクのような複雑な形状の先進構造物を非接触で深部まで検査可能なモバイル式ロボット SQUID 非破壊検査装置が実現されている。また、ここで示した高い磁場耐性をもつグラジオメータに対して、2.1 で示したアクティブ磁気シールド技術を応用して、グラジオメータ出力を補償コイルにフィードバックすることで、他の参照センサを用いることなく、残留磁化をもつステンレスなどの磁性体にも数 mm 以内まで接近して検査することが可能なことがこれまでに示されている³⁴⁾。

4. まとめと今後の展望

本解説では、モバイル式 SQUID 非破壊評価装置開発の近年における進捗について紹介した。ノイズキャンセル技術や磁場耐性の高い SQUID 素子の開発により、SQUID 非破壊評価技術によって検査可能な対象は複雑な構造物から磁性材料に至るまで大幅に拡張されている。さらに高い磁場耐性を有する High- T_c SQUID マグネトメータも開発されつつあり、深部欠陥の検出に対してより有効な装置の開発が行われている。近い将来における工業用 SQUID 非破壊検査装置の実用化が強く期待される場所である。

本解説は、低温工学協会から奨励賞を頂いた 2008 年後からそれ以降におけるモバイル式 SQUID 非破壊検査装置の研究についてまとめたものです。このような解説の執筆の機会を与えていただいた低温工学・超電導学会、そして学会誌出版委員長であり、恩師でもある早稲田大学の石山敦士教授に心より感謝致します。また、電子技術総合研

究所・産業技術総合研究所での共同研究者であった葛西直子氏、元岩谷瓦斯株式会社の丸野善生氏、国際超電導産業技術研究センター・超電導工学研究所の田辺圭一氏、安達成司氏、(株)クライオウェアの藤岡耕治氏、サムテック(株)、豊橋技術科学大学の田中三郎教授、田中・廿日出研究室の研究室 OB・OG・現役学生に感謝致します。

参考文献

- 1) A. Barone and G. Paterno: "Physics and Applications of the Josephson Effect", John Wiley & Sons, Inc., New York (1982)
- 2) A. Barone (Ed.): "Principle and Application of Superconducting Quantum Interference Devices", World Scientific, Singapore, (1992)
- 3) H. Weinstock (Ed.): "SQUID Sensors: Fundamentals, Fabrication and Applications", Kluwer Academic Publishers (1996)
- 4) J. Clarke and A.I. Braginski (Eds.): "SQUID handbook I", WILEY-VCH GmbH & Co. KGaA, Weinheim (2004)
- 5) J. Clarke and A.I. Braginski (Eds.): "SQUID handbook II", WILEY-VCH GmbH & Co. KGaA, Weinheim (2006)
- 6) D. Cohen: "Magnetoencephalography: evidence of magnetic fields produced by alpha-rhythm current", *Science* **161** (1968) 784-786
- 7) D. Cohen, E.A. Edelsack and J.E. Zimmerman: "Magneto-cardiograms taken inside a shielded room with a superconducting point-contact magnetometer", *Appl. Phys. Lett.* **16** (1970) 278-280
- 8) G.B. Donaldson: "SQUIDS for everything else" in H. Weinstock and M. Niesenoff (Eds.): "Superconducting Electronics", Springer, Berlin (1989) 175-207
- 9) W. Weitschies, R. Kötitz, T. Bunte and L. Trahms: "Determination of relaxing or remnant nanoparticle magnetization provides a novel binding specific technique for the evaluation of immunoassays", *Pharm. Pharmacol. Lett.* **7** (1997) 5-8
- 10) D. Suzuki, A. Tsukamoto, K. Yokosawa, A. Kandori, et al.: "A mobile and space-saving high-temperature superconducting multichannel magnetocardiograph in a vertically magnetically shielded cylinder", *Jpn. J. Appl. Phys.* **43** (2004) 117-120
- 11) N. Kasai, D. Suzuki, H. Takashima, M. Koyanagi and Y. Hatsukade: "HTS-dcSQUID gradiometer for nondestructive evaluation", *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **9** (1999) 4393-4396
- 12) H. Itozaki, T. Nagaishi, H. Toyoda and H. Kugai: "Detection of fine iron particles in high speed scrolled wire by high T_c SQUID", *IEICE Trans. Electron.* **E80-C** (1997) 1247-1251
- 13) S. Tanaka, M. Natsume, M. Ucnida, N. Hotta, T. Matsukade, Z. A spanut and Y. Hatsukade: "Measurement of a metallic contaminant in food by high- T_c SQUID", *Supercond. Sci. Technol.* **17** (2004) 620-623
- 14) K. Enpuku and T. Minotani: "Biological immunoassay with high T_c superconducting quantum interference device (SQUID) magnetometer", *IEICE Trans. Electron.* **E84C** (2001) 43-48
- 15) R. Hohmann, M. Maus, D. Lomparski, M. Greuneklee, Y. Zhang, H. -J. Krause, H. Bousack and A. I. Braginski: "Aircraft wheel testing with machine-cooled HTS SQUID gradiometer system", *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **9** (1999) 3801-3804
- 16) K. Allweins, G. Gierelt, H.-J. Krause and M.v. Kreutzbruck, "Defect detection in thick aircraft samples based on HTS SQUID-magnetometry and pattern recognition", *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **13** (2003) 250-253

- 17) Y. Tavrín, M. Siegel and J. Hinken: "Standard method for detection of magnetic defects in aircraft engine discs using HTS SQUID gradiometer", IEEE Trans. Appl. Supercond. **9** (1999) 3809-3812
- 18) H.-J. Krause, W. Wolf, W. Glaas, E. Zimmermann, M.I. Faley, G. Sawade, R. Mattheus, G. Neudert, U. Gampe and J. Krieger: "SQUID array for magnetic inspection of prestressed concrete bridges", Physica C **368** (2002) 91-95
- 19) N. Kasai, D. Suzuki, Y. Hatsukade and M. Koyanagi: "Nondestructive detection of flaw in carbon-fiber-reinforced plastics using high- T_c superconducting quantum interference device", Jpn. J. Appl. Phys. **39** (2000) 1399-1404
- 20) Y. Hatsukade, N. Kasai and A. Ishiyama: "Nondestructive detection of delamination in carbon-fiber-reinforced plastics using high- T_c superconducting quantum interference device", Jpn. J. Appl. Phys. **L606** (2001) 40-42
- 21) Y. Hatsukade, N. Kasai, H. Takashima and A. Ishiyama: "Non-contact SQUID-NDT method using ferrite core for carbon-fiber composites", Supercond. Sci. Technol. **15** (2002) 1728-1732
- 22) Y. Hatsukade, M. S. Aly-Hassan, N. Kasai, H. Takashima, H. Hatta and A. Ishiyama: "SQUID-NDE method on damaged area and damage amount of defects in composite materials", IEEE Trans. Appl. Supercond. **13** (2003) 207-210
- 23) Y. Hatsukade, T. Inaba, N. Kasai, Y. Maruno, A. Ishiyama and S. Tanaka: "Detection of deep-lying defects in carbon fiber composites using SQUID-NDE system cooled by a cryocooler", Physica C **412-414** (2004) 1484-1490
- 24) Y. Hatsukade, A. Kosugi, K. Mori and S. Tanaka: "Eddy-current-based nondestructive inspection system using superconducting quantum interference devices for thin copper tubes", Jpn. J. Appl. Phys. **43** (2004) L1488-L1491
- 25) Y. Hatsukade, A. Kosugi, K. Mori and S. Tanaka: "Nondestructive inspection using an HTS SQUID for copper heat-exchanger tubes", TEION KOGAKU **40** (2005) 319-326 (in Japanese)
廿日出好, 小杉明史, 森 憲亮, 田中三郎: 「高温超伝導 SQUID を用いた銅製伝熱管表面の微細欠陥の非破壊検査」, 低温工学 **40** (2005) 319-326
- 26) Y. Hatsukade, A. Kosugi, K. Mori and S. Tanaka: "Detection of micro flaws on thin copper tubes using SQUID-NDI system based on eddy current technique", Physica C **426-431** (2005) 1585-1590
- 27) Y. Hatsukade, S. Okuno, K. Mori and S. Tanaka: "Eddy-current-based squid-nde for detection of surface flaws on copper tubes", IEEE Trans. Appl. Supercond. **17** (2007) 780-783
- 28) Y. Hatsukade, K. Yotsugi, Y. Sakaguchi and S. Tanaka, "Nondestructive inspection using HTS-SQUID on aluminum liner covered by CFRP", Physica C **463-464** (2007) 1043-1047
- 29) Y. Hatsukade, A. Miyazaki, H. Matsuura, T. Maeda, Y. Fuke and S. Tanaka: "Inspection of wire breakage in aluminum transmission lines using an HTS SQUID", TEION KOGAKU **44** (2009) 61-67 (in Japanese)
廿日出好, 宮崎敦司, 松浦英樹, 前田龍己, 福家靖司, 田中三郎: 「高温超伝導 SQUID を用いたアルミ撚り線の素線断線の検出」, 低温工学 **44** (2009) 61-67
- 30) S. Kanai, Y. Hatsukade, K. Hayashi, K. Mori and S. Tanaka: "Eddy-current-based SQUID-NDE system for copper tubes with laser displacement sensor", IEEE Trans. Appl. Supercond. **19** (2009) 786-790
- 31) Y. Hatsukade, T. Inaba, Y. Maruno and S. Tanaka: "Mobile cryocooler-based SQUID NDE system utilizing active magnetic shielding", IEEE Trans. Appl. Supercond. **15** (2005) 723-728
- 32) Y. Hatsukade, K. Yotsugi and S. Tanaka: "Mobile HTS-SQUID NDE system with robot arm and active shielding using fluxgate", Physica C **468** (2008) 1932-1935
- 33) Y. Hatsukade, K. Yotsugi, S. Kanai, K. Hayashi and S. Tanaka: "Robot-arm-based mobile nondestructive inspection system using a cryocooler-based HTS-SQUID gradiometer", TEION KOGAKU **44** (2009) 54-60 (in Japanese)
廿日出好, 代継浩平, 金井 翔, 林 啓太, 田中三郎: 「冷凍冷却 HTS-SQUID グラジオメータを用いたロボットアーム式モバイル非破壊検査装置の開発」, 低温工学 **44** (2009) 54-60
- 34) Y. Hatsukade, K. Yotsugi, S. Kanai, K. Hayashi, H. Wakana, Y. Tarutani, K. Tanabe and S. Tanaka: "Robot-based NDE system using 3D-Mobile HTS-SQUID", IEEE Trans. Appl. Supercond. **19** (2009) 796-800
- 35) Y. Hatsukade, K. Hayashi, Y. Shinyama, S. Adachi, K. Tanabe and S. Tanaka: "Characteristics of an HTS-SQUID gradiometer with ramp-edge Josephson junctions and its application on robot-based 3D-mobile compact SQUID NDE system", Physica C **471** (2011) 1228-1233
- 36) 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", TEION KOGAKU **38** (2003) 686-692 (in Japanese)
廿日出好, 葛西直子, 高島 浩, 丸野善生, 石山敦士: 「同軸型パルスチューブ冷凍機を用いた低磁気ノイズ SQUID 非破壊検査システムの開発」, 低温工学 **38** (2003) 686-692
- 37) <http://www.samtech.co.jp/english/products/hpc.html>
- 38) S. Adachi, K. Hata, H. Suagano, H. Wakana, T. Hato, Y. Tarutani and K. Tanabe: "Preparation of multilayer films for integrated high- T_c SQUIDs with ramp-edge Josephson junctions", Physica C **468** (2008) 1936-1941
- 39) Y. Hatsukade, Y. Kobayashi, R. Kurosawa, S. Tanaka, "Suppression of change of critical current of HTS dc-SQUID in magnetic field", Abstract of CSJ Conference **84** (2011) 123
廿日出好, 小林義幸, 黒澤龍一, 田中三郎: 「磁場に対する HTS dc-SQUID の臨界電流変化の抑制に関する研究」, 第 84 回 2011 年度春季低温工学・超電導学会講演概要集 (2011) 123
- 40) Y. Hatsukade, K. Hayashi, M. Takemoto and S. Tanaka: "Determination of the robustness of an HTS SQUID magnetometer covered with a superconducting film shield in an ac field", Supercond. Sci. Technol. **22** (2009) 114010.

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, 環境・生命工学系准教授として SQUID 応用研究に従事。低温工学・超電導学会, 応用物理学会会員, 日本生体磁気学会会員。工学博士。