研究論文

3次元移動が可能な SQUID 非破壊検査システムの開発

井澤 和幸[†], 中山 哲*, 池田 正徳*, 高木 佐加枝, 登坂 滋

Development on Three-dimensionally Traveling SQUID System for Nondestructive Evaluation

Kazuyuki ISAWA[†], Satoshi NAKAYAMA*, Masanori IKEDA*, Sakae TAKAGI and Shigeru TOSAKA

Synopsis : A practical robotic three-dimensional (3D) SQUID-NDE system was developed for the first time. This system is based on a previously developed traveling SQUID-NDE (i.e., one that is not stationary, but the SQUID sensor itself moves or scans along the surface of the object), which incorporates SQUID sensor travel technologies such as the ‘pseudo’ third-order SQUID gradiometer. The system developed is composed of a traveling SQUID gradiometer, an articulated-type robot used as a SQUID sensor manipulator, a laser CCD displacement sensor, and a numerical interpolation procedure to reconstruct the surface of the evaluated object without the need for CAD data. To demonstrate the capability of this imaging system, it was used to detect artificial damage in a stainless steel (type-304) tube. The system successfully detected the artificial damage. It is anticipated that the robotic 3D SQUID-NDE imaging system will be in practical use in the near future.

Keywords : superconducting quantum interference device (SQUID), nondestructive evaluation (NDE), traveling SQUID-NDE, three-dimensional (3D), SQUID sensor movable

1. はじめに

超電導量子干渉素子 (Superconducting Quantum Interference Device: SQUID) を用いた非破壊検査 (nondestructive evaluation, NDE) は, 1980 年頃から研究が開始されている¹⁾。1 チャンネルの SQUID-NDE の場合, 通常は SQUID センサを固定し, xy ステージ上に被検体を置いて, 検査ポイントを 1 点ずつスライドさせながら, 2 次元的な走査を行う。また航空機車輪やパイプなど円筒形の形状に対しては, SQUID は固定し, 被検体を回転しながら検査することができる^{2,3)}。さらに最近では, 食肉や菓などへの異物混入を調べる装置が商品化されるまでの進歩がみられているが, この装置も固定した SQUID の下をベルトコンベアの上に寄せられた小さな被検体が移動して検査する方式が採用されている⁴⁾。これらのように SQUID センサを固定する必要があるのは, SQUID を動かしてしまうと, 被検体から発生している本来の磁気信号を環境磁気ノイズの影響で打ち消してしまい SN 比の低下により高感度測定が

できないからである。SQUID センサが固定されている場合, 被検体としては, ミリメートルからセンチメートル程度の小型のものしか通常は扱うことができず, オンサイトでの大規模な設備や被検体の検査を非破壊的に行うことは事実上できない。このため磁気シールドがない環境磁気ノイズ下でも SQUID センサ自体を自由に動かすための様々な試みがなされている^{5,6)}。このような中, 我々は, 通常環境磁気ノイズ下で自由に SQUID センサ自体を移動させることができる技術を確立し, 「移動型 SQUID-NDE (Traveling SQUID-NDE)」と名づけた^{7,8)}。

この移動型 SQUID-NDE によって, 実用レベルの大型設備の検査が技術的には可能になったものの, 検査が必要な対象物の形状は必ずしも板状の平らな物ばかりではない。実用上は, 曲面を持つ被検体を検査することも必要になってくる。曲面を検査する場合, その形状を何らかの方法で取り込んで, 被検体をのせるステージを動かすか, あるいは SQUID センサを動かすかを選択しなければならない。ステージを動かす場合の走査方法は, 形状データの逆の軌跡を辿るような複雑なメカ機構となり, 技術的なハードルが高く, さらに被検体の大きさが制限されることから実用的ではない。これに対し, 自動車の組立工場などで使われている汎用的な産業用の 6 軸多関節ロボットによって SQUID センサを移動させれば, 曲面を持つ被検体も扱える実用的な検査システムをより簡便に構築できると考えられる。

本研究では, 移動型 SQUID-NDE の技術をベースに 6 軸多関節ロボットをマニピュレータとして用いることで, 曲

Received June 9, 2005

東北電力株式会社 研究開発センター

〒981-0952 宮城県仙台市青葉区中山 7-2-1

R & D Center, Tohoku Electric Power Co., Inc., 2-1 Nakayama 7-chome, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 981-0952, Japan

* エスアイアイ・ナノテクノロジー株式会社

〒261-8507 千葉県千葉市美浜区中瀬 1-8

SII NanoTechnology Inc., 1-8 Nakase, Mihama-ku, Chiba 261-8507, Japan

[†] E-mail: kazu@rdc-tohoku.jp

面形状の被検体でも検査できる実用的な3次元 SQUID-NDE ロボットシステムを開発したので、その概要と本システムの有用性を示した基本的な非破壊検査の事例とを報告する。

2. 移動型 SQUID グラジオメータの特性

磁気シールドなしに SQUID を動かしながら検査できる「移動型 SQUID-NDE」の開発における最大のポイントは、従来にない全く新しい DC-SQUID グラジオメータ (second order planer DC-SQUID gradiometer) にある⁹⁾。この新しいタイプの SQUID グラジオメータを以降、本研究では「移動型グラジオメータ」と呼ぶことにする。移動型グラジオメータは、環境磁気ノイズを抑制するために開発した集積型同心円 DC-SQUID グラジオメータをさらに発展させたものと言える¹⁰⁾。Fig. 1 に模式的に示したように、その素子構造は、Nb/Al-AlO_x/Nb のジョセフソン接合と2次微分の平面差分型検出コイルが対を形成しており、その製作には超電導薄膜の積層化技術が使われている⁹⁾。著者らの知る限り、このような SQUID グラジオメータが実際に製作され、動作したという報告例はない。Table 1 に移動型グラジオメータの諸元を示す⁹⁾。なお、この移動型グラジオメータの磁気ノイズ特性や製作方法など、詳細については既に報告されている^{9,11)}。一般に、高次の SQUID グラジオメータほど環境磁気ノイズに強いとされているが、移動型グラジオメータは、2次微分コイル1対を1次的に連結

Fig. 1 Schematic diagram of the pickup coil connected with the traveling SQUID gradiometer⁹⁾. Inner and outer pickup coils are 1.1547×1.1547 mm² (three-turns) and 2×2 mm² (one-turn), respectively. The baseline is 3 mm.

させた構造であることから、特性上は3次微分型と見なせることが、簡単な数値シミュレーションと実験との比較で検証している¹²⁾。なお、現状の High-*T_c* SQUID と比較して Low-*T_c* SQUID は、元来ノイズ特性が良いこと、作製プロセスが確立されていること、及びバッチ間のバラツキが少ないなど利点があることから、液体ヘリウム冷却の手間はあるものの、本研究では Low-*T_c* SQUID を使用している。複合酸化物系である高温超電導薄膜の積層化技術が確立されれば^{13,14)}、検査費用の低コスト化や使い勝手の向上がはかれるため、この分野のさらなる進展が待たれる。

移動型グラジオメータは、通常の実験室レベルでは何ら動作に問題がない⁹⁾。しかし、実際の非破壊検査の現場やフィールドでは、さらに環境磁気ノイズが厳しいことが想定されることから、本研究ではフィールド試験を実施した。Fig. 2 (a) は、フィールドで SQUID の磁気ノイズレベルを測定した変電所構内である。計測地点は、① 450MVA の変圧器 (2 次側) 直下と ② 275 kV の母線真下のガス遮断器付近の 2 箇所である。なお、275 kV の母線には計測時に 840 A (50 Hz) の電流が流れており、母線と SQUID との距離は、5.9 m であった。ノイズのレベルは、磁気シールド中での計測値と比較すれば約 200 倍高いものの⁹⁾、結論的にはいずれの計測地点においても移動型グラジオメータは正常に動作した。一例として得られたノイズスペクトルを Fig. 2 (b) に示すが、ノイズレベルには大差はなく、例えば、10 Hz で約 2000 μφ₀/Hz^{1/2} であった (ここで、φ₀ = 2.07 × 10⁻¹⁵ Wb)。このように実験室レベルを出たフィールドでも移動型グラジオメータの動作に問題がないことが検証できたが、実際のフィールドでの非破壊検査に十分な SN 比が得られるかについては、当然、検査目的など個別に依存することとなる。なお、このフィールド試験は、クライオスタット中に液体ヘリウムを充填した状態で、変電所までタクシーで 30 分ほど移動した後に実施したものである。その間、磁束トラップや液体ヘリウム切れ等のトラブルは全くなく、移動型グラジオメータのシステム全体が携帯型として、ポータブルでモバイル性能も高いことが同時に検証されている。

Table 1 Parameter of traveling SQUID gradiometer⁹⁾

SQUID inductance (Ls)	79 pH
Mutual inductance between Ls and Li (input coil inductance)	3.14 nH
Size of pick-up coil	Inner coil: 1.1547 mm × 1.1547 mm Outer coil: 2 mm × 2 mm
Number of turns of pick-up coil	Inner coil: 3 turn Outer coil: 1 turn
Pick-up coil inductance (Lp)	123 nH (total)
Length of baseline	3 mm

(a)

(b)

Fig. 2 (a) Photograph of the ① 450 MVA transformer and ② 275 kV transmission line close to the 275 kV electric gas circuit breaker (GCB), where the SQUID noise spectra were measured. The measuring points are marked with arrows. (b) SQUID noise spectra measured at an electric power substation without using magnetic shielding. Noise level at 10 Hz was about $2,000 \mu\phi_0/\text{Hz}^{1/2}$.

3. 3次元 SQUID 非破壊検査ロボットシステムの開発

移動型グラジオメータは、SQUID センサを自由に移動させて検査したり、現場フィールドに携帯したりできる高耐環境磁気ノイズグラジオメータであることがわかった。本研究では、この特長を活かして、市販の 6 軸多関節ロボット (M-16iB, FANUC) を利用して、次のような方法により 3 次元 SQUID-NDE ロボットシステムを開発した。Table 2 に使用した 6 軸多関節ロボットの性能を示すが、その諸元は汎用性の観点から、前述のように自動車組立工場など産業用として広く使用されているものを応用している。なお、研究を進める過程で明らかになったことで

Table 2 Specifications of articulated-type (6 axes) robot (M-16iB, FUNUC) for 3D SQUID-NDE

Controlled axes	6 axes
Maximum load capacity	20 kg
Allowable load inertia	0.25 kgm^2
Drive method	Electric servo drive
Repeatability	$\pm 0.08 \text{ mm}$
Maximum speed	2,000 mm/s

あるが¹⁵⁾、SQUID を 5 軸ロボットアームにつけるプロトタイプ機については、10 年以上前の日立グループの研究がある¹⁶⁾。この前例では、SQUID センサは 5 軸ロボットに搭載されており、測定ポイントを手動でロボットに教えるようなシステムであり、文献 16 には、3 次元的な検査データは報告されていないなど、その技術レベルの詳細は不明である。なお、5 軸ロボットの場合、xyz 方向の回転が 1 軸分不足していることから、結果して任意の曲面の法線方向に SQUID を傾けるようなロボットの姿勢はとれない。曲面の被検体に対しては、SQUID が傾かない状態での測定になり、SQUID センサと被検体表面との距離は一定間隔には制御できない。またロボットメーカーによって異なるかもしれないが、本研究で採用した最新機種¹⁷⁾の 6 軸ロボットでも、ペンダントと呼んでいるリモート操作盤が標準で装備されており、ロボットを所定の測定ポイントに手動で動かし、その位置座標をロボットに一点ずつ教えていくような旧来の操作も一応可能である。手動でロボットに座標を与えることは、まだ組立工場などでは広く行われているものの、人間が扱えるデータ点数には限界があることから、手動の教示方法のままでは実用的な非破壊検査装置ではない。そのため、何らかの方法で被検体の形状データを自動でロボットに取り込むが必要になってくる。まず、一つの方法として、被検体の製作過程で出てくる CAD (Computer-aided design) データの応用が考えられる。CAD データは形状そのもののデータであるが、3D SQUID-NDE システム上への座標系の変換が必要になることや被検体によっては CAD データがないものや入手できないものもある。そこで本研究では、SQUID-NDE 用として、3 次元座標をロボットに教示する新しい方法を開発した。

形状を認識させ、その座標を数値化するような技術は、対象物の形や大きさ、並びに測定精度によって、針、ボール、レーザー光などを使用する接触式と非接触式など様々なものが既に製品化され、3 次元座標測定機やプロファイルスキャナーなどの名称で販売されている。これらの中から、本研究では、半導体レーザーで三角測量することから、検査対象物の表面状態が多少荒れていても高精度測定のメリットがあり、非接触測定ができる CCD レーザー式の変位計を応用した。使用したレーザーの出力は、安全上の観点から、レーザー光の遮蔽などが必要ないクラス 2 のものである。Fig. 3 (a) は、6 軸多関節ロボットとレーザー変位計とを組合せてシステム化した写真である。このシステムでは、Fig. 3 (b) に示したように、まず z 方向のある一定レベルの高さを固定した状態で、xy 平面を 5 ~ 10 mm 程度の間隔で 2 次元格子状に刻んで一点ずつ被検体の高さを計測して xyz 座標を得る。この時の格子の刻み幅を α とする。使用したレーザー変位計 (LK-502, Keyence) の長距離測定用としての分解能 (同一ポイントを繰返し測定した場合のばらつき) は、 $50 \mu\text{m}$ であると高い数字が示されている。

Fig. 3 (a) Photograph of laser CCD displacement sensor equipped with an articulated-type robot to measure the xyz-coordinates of the object. (b) Measurement of the shape of the object at each point in a x-y lattice by the laser CCD displacement sensor while maintaining a constant height level above the surface. A constant interval (α) (i.e., linearity) is requisite to the surface reconstruction in our system.

しかしながら、予備的な試験として、ロボットの先端にレーザー変位計を取り付けて平板を色々なポイントで測定した場合の凹凸のばらつきが ± 0.1 mm あったことから、本システムのような使用方法では、経験値として $0.1 \sim 0.2$ mm 程度の精度 (β) であると考えている。SQUID 測定は、**Fig. 4 (a)** のように、ロボットのツールをレーザー変位計から SQUID が内蔵されたクライオスタットへと付替えて行う。言うまでもなく、被検体の曲面に対して垂直な方向、すなわち法線方向に SQUID センサを傾けて被検体表面との距離を一定にして各計測ポイントで SQUID 測定を行う必要がある。そこで、レーザー変位計で計測した座標データに基づいて、**Fig. 4 (b)** のような配置で SQUID 測定ができるように、次のような方法によって法線ベクトルを算出した。

まず、単純な方法として、計測点と周りの最近接 (NN: nearest neighbor) の 5 点間を平均する近似法を試みた。この方法では、レーザー変位計の 2 次元格子のピッチ (**Fig. 3(b)**) が、そのまま SQUID の計測間隔に反映される。しかし、定量的な評価まではしていないが、この NN5 点近似では、ロボットがスムーズな動きをしない場合があった。その原因の一つとしては、単純な見積りとして、ロボットアームの立体角は $\tan(\beta/\alpha)^{-1}$ に依存することから、格子の刻み幅 α が小さくなるにつれてレーザー変位計の検査精度 β が無視できないほど誤差が発散的に増大することが挙げられる。

このため被検体の座標データから法線ベクトルを求める方法をさらに改善し、数学的にベジエ曲線と B スプライン曲線と呼ばれる 2 つ曲線を用いる補間方法を検討した。これらの曲線を数学的に厳密に表現することは、本稿の主旨ではないので、その概略を簡単に述べる¹⁷⁻²⁰⁾。ベジエ曲線は、ベルンシュタイン多項式を係数とする制御点 (P_0 ,

Fig. 4 (a) Photograph of the robotic 3D SQUID-NDE imaging system developed incorporating an articulated-type (6-axes) robot used in industry. (b) Prior to the SQUID measurements, the vertical direction, which is perpendicular to the surface of the object, is continuously calculated using the surface reconstruction program (see text).

$P_1, P_2, \dots, P_n$) のアフィン結合として、一方、B スプライン曲線は、B スプライン関数を係数とする制御点のアフィン結合として表される。ここで、アフィン結合とは、線形結合のうち、係数の和が 1 であるものである。数学的には、ベジエ曲線では各制御点の影響の及び方が均等でないとの欠点があることから、これを改善したのが B スプライン曲線と言われている。つまり、言い換えるとベジエ曲線はローカルな近似法、B スプライン曲線はグローバルな近似法である。ベルンシュタイン多項式や B スプライン関数については、文献 17) が詳しいが、本研究では式 (1) で定義される 3 次の B スプライン関数を用いた。この関数は、 $t=0$ で最大値を示し、そこから離れるにつれ両端では左右対称に単調減少する。

$$N^3(t) = \begin{cases} (3t^3 - 6t^2 + 4)/6 & (0 \leq t \leq 1) \\ -(t-2)^3/6 & (1 \leq t \leq 2) \\ 0 & (2 \leq t) \end{cases} \quad (1)$$

先に述べたように、NN5 点近似では、予め設定した一定間隔の 5 点間を平均化するため、レーザー変位計の計測点と SQUID 測定点とも離散的であった。これに対し、ベジエ曲線と B スプライン曲線では、レーザー変位計で得られた被検体の座標データに基づいて、数学的に各曲線を生成し、それを縦方向と横方向に拡張して、それぞれベジエ曲面と B スプライン曲面を得ることができる。一例として、NN5 点近似と B スプライン曲線を用いて再現した被検体の曲面とを比較して **Fig. 5** に示した。一見すると、再現されたこれらの曲面には差異は見られない。しかし、レーザー変位計を法線ベクトルの位置に傾けて計測した実測値と数値計算で求めた近似値との差異 (γ) を 2 次元マップで示すと、(a) B スプライン曲線の場合には $\gamma \approx 0$ なのに対し、(b) NN5 点近似では、 γ は $-0.44 \sim +0.47$ mm と

Fig. 5 Comparison of the surface reconstruction of the object between (a) B-spline interpolation, and (b) nearest neighbor (NN) averaging. The area is 300 x 160 mm. Experimentally, it was found that the B-spline interpolation was likely superior in ‘fairness’ and ‘visually pleasing’. Actually, γ is approximately zero for B-spline interpolation, whereas $\gamma < 0.5$ mm for NN averaging, where γ is the difference between the numerically obtained distance (i.e., the direction which is perpendicular to the surface of the object) and experimentally measured distance using the CCD laser displacement sensor.

バラツキが見られ、B スプライン曲面は、よりスムーズに曲面を再現していると言える。また、ベジエ曲面やB スプライン曲面では、もはやレーザー変位計の測定点のみという離散的な近似ではなく、被検体の曲面を連続的に再現しているため、曲面の任意の点での法線ベクトルを算出できる利点がある。したがって、なだらかに変化しているような曲面に対しては、一例として、まず縦 40 mm、横 30 mm と広いピッチでレーザー変位計によって被検体の高さを計測し、縦横 10 mm ピッチと狭い間隔で SQUID 測定を行う事が可能となり、形状認識の時間を大きく短縮できる。ただし、ベジエ曲線とB スプライン曲線を用いる補間方法では、線形性が条件となっており²⁰⁾、レーザー変位計で計測する形状データの間隔が一定間隔で並んでいる必要がある。なお、B スプライン曲線を用いた補間方法は工学的な応用も多く、一般にはベジエ曲線から得る曲面より美しい曲面が得られると言われている。本研究においても、両方とも動作上は全く問題ないが、B スプライン曲線を使った方がロボットの動きが見た目にはスムーズになる。

4. 3D SQUID-NDE ロボットシステムの検査例

開発した非破壊検査システムで曲面を検査できるか簡単な試験を行った。まず、Fig. 4 (a) のように、6 軸多関節ロボットの先端にクライオスタットを取り付けた状態で測定した本 3D SQUID-NDE ロボットシステムのノイズレベルは、 $20 \times 10^{-5} \phi_0 \text{ Hz}^{-1/2}$ (100 Hz) であった⁷⁾。この値と

1. Laser CCD displacement sensor scans the shape of the object at each point in the square lattice.

2. Surface reconstruction of the object by a computational-geometry, such as B-spline curve.

3. Calculate a vertical vector which is perpendicular to the surface of the object.

4. Remove the laser CCD displacement sensor and mount the SQUID sensor as the end-effectors of the articulated robot.

5. SQUID sensor travels the surface of the object for the NDE measurement.

Fig. 6 Flowchart of the robotic 3D SQUID-NDE system. The evaluation procedure can be divided into five steps. To teach the robot system 3D (xyz) coordinate of the object at the inspection area, the acquired data utilized by the laser CCD displacement sensor is conveyed to the computer-aided numerical approximation program to reconstruct the surface of the object and to calculate vertical vector of the surface of the object.

Table 1 に示した移動型グラジオメータのパラメータから見積もった最小磁場分解能は、 $4.5 \text{ nT Hz}^{-1/2} \text{ cm}^3$ である。試験片は、外径 508 mm × 長さ 500 mm × 厚さ 6 mm のステンレス鋼管 (SUS304 溶接管) で、溶接箇所がちょうど半円筒状の頂点部分となるように半分に切断したものである (Fig. 4(a))。SQUID センサを移動させながら、メートル長の範囲を平面的に検査した場合と同様に⁷⁾、本実験においても、米粒大のフェライト磁石 (重さ 10 mg、長さ約 5 mm) を試験片の裏側にダミーとして貼り付けて損傷を模擬した。3 次元的な検査は、Fig. 6 のフローチャートに従って 5 段階の手順で行うが、その一例を示す。まず、レーザー変位計によって、設定した 160 mm × 300 mm の検査範囲をこの例では x 方向 30 mm、y 方向 40 mm の間隔でスキャンし、各点における試験片の形状データ (xyz 座標) を測定した。次に、開発した補間方法の中から B スプライン曲線のプログラムを選び、検査範囲の曲面を再現し、SQUID 測定を行うため、10 mm ピッチで法線ベクトルを計算する。ロボットのツールをレーザー変位計から (Fig. 3(a))、先端に SQUID センサが内蔵されたクライ

Fig. 7 Evaluation of artificial damage of cylindrical-shaped SUS304 stainless tubes to demonstrate the capability of the robotic 3D SQUID-NDE system. A small ferrite magnet (approx. 10 mg in weight and 2 mm in length) was attached as artificial damage at the reverse side of the tube. The scanning area was 300 mm × 160 mm. (a) 2D image and (b) 3D SQUID images. Strong signals were detected at the position of the magnet (indicated by arrow).

オスタット (Fig. 4(a)) に付替えた後、本来の SQUID 測定を行う。試験片の表面とクライオスタットの底面との距離は任意に設定できるが、この試験では 2 mm に設定している。以上が測定の手順である。なお、ツールの取替えは手動で行うが、自動化することも技術的には可能である。また Fig. 4 (a) のように、“鉄製”のロボット先端にアルミ製の延長用アームを介してクライオスタットを取り付けている点には工夫を要している。本実験では、ロボットの先端と SQUID センサとの距離を 800 mm としている。

Fig. 7 は、上記の手順で得た SQUID 測定結果を 2 次元、3 次元で表示したものである。この測定では、ロボットアームの移動速度を 100 mm/s として、SQUID 自体を連続的に試験片の表面を移動させて 23 分で計測を終了している。一方、メートル長の平板を検査例では、ロボットアームの移動速度を 1000 mm/s として設定して、本システムが正常に動作することを既に報告している⁷⁾。本測定例のデータ点数は、全数で 480 点であるが、先に述べたように、この数の計測ポイントを 1 点ずつ手動でロボットに位置座標を教示するのは一般には困難である。ただし、著者らの採用したロボットメーカーの機種では、曲面形状の対称性が高く、緩やかなカーブの場合には、サブルーチン的な方法によって手動の教示方法を簡素化できる。図中の矢印のように、ダミーの磁石を置いたところに対応して、強い SQUID の信号が得られている。Fig. 7 に示したように SQUID の信号強度は、ピーク間で ± 0.2 V であり、この強度は簡単な換算から $3\phi_0$ に対応することが明らかになった。なお、この鋼種では、特に溶接箇所には欠陥等がないため、SQUID 信号には変化は見られなかった。一方、

STK400 など SQUID による溶接部などの検査が有効と思われる鋼種もあり¹²⁾、溶接部の熱影響部の脆化²¹⁾などが本システムで検査できるか興味をもたれる。また、溶接部の内部欠陥は 10 ~ 20 mm 程度の肉厚であれば、移動型 SQUID-NDE で検査できることがステンレス鋼を事例として検証されている⁷⁾。

以上のように、開発した 3D SQUID-NDE システムが曲面形状の検査に有効であることが確認できた。この 3 次元システムでは、Fig. 6 に示したフローチャートのように①レーザー変位計を用いて検査対象物の形状を把握すること、②そのデータに基づいて数学的な方法によって検査範囲の曲面形状を再構築し、SQUID 測定に不可欠な法線ベクトルを算出させること、③所定の延長アームに SQUID 冷却用クライオスタットを取り付けて、計算した法線ベクトルに基づいて、6 軸多関節ロボットが SQUID センサをマニピュレーティングするという一連の動作が連携して正しく行われることが必要不可欠である。このように、SQUID センサ自体が 3 次元的に移動しながら検査できる「3D SQUID-NDE」が有用であることがわかった。本研究は、大型の設備や被検体の任意曲面を SQUID センサが自由に移動して検査する実機レベルの検査システムへの発展が可能なコア技術であり、SQUID-NDE の実用化を今後さらに加速するものと期待される。

5. まとめ

大型の設備や被検体を 3 次元的に検査できる実用的な 3 次元 SQUID 非破壊検査ロボットシステムの概要について報告した。このシステムは、SQUID センサ自身が移動し

て検査できる移動型グラジオメータ, SQUID を 3 次元的に移動させるためのマニピュレータの役割をする 6 軸多関節ロボット, レーザー変位計で計測した曲面の座標データから, その曲面を連続的に再現して法線ベクトルを求める数値演算プログラムから構成されている。SUS304 ステンレス鋼管の裏側に小さなフェライト磁石をはりつけて人工的なダメージを模擬した試験片を用いて本システムの有用性を検証した。

これまでは難しかった大型の設備や被検体に対しての, SQUID-NDE の技術的な障壁は徐々になくなりつつあり, 今後は実験室レベルから適用先を絞り込んだ実機レベルの実用化研究へ移行していくであろう。最後に, 液体窒素や小型冷凍機で動作する High- T_c SQUID で積層化技術が確立され, 本研究で用いたような高耐環境磁気ノイズの移動型グラジオメータが作製されれば, クライオスタットの小型化で複雑形状や狭隘箇所の検査が可能になるとともに, 検査コストの削減や使い勝手の面など, より実用的なシステムが構築できるものと期待される。

ベジエ曲線と B スプライン曲線については, 東京大学大学院情報理工学系研究科数理情報学専攻 杉原厚吉教授と室谷浩平博士から技術的な指導を頂いた。ここに深謝する。

参 考 文 献

- 1) H. Weinstock and M. Nisenoff : "Nondestructive evaluation of metallic structure using SQUID magnetometer", SQUID' 85-Superconducting Interference Device and Their Applications, H.D. Hahlbohm and H. Lubbing, Eds., de Gruyter, Berlin (1985) 853-858
- 2) R. Hohman, M. Maus, D. Lomparski, M. Gruneklee, Y. Zhang, H.-J. Krause, H. Bousack and A.I. Braginsli : "Aircraft wheel testing with Machine-cooled HTS SQUID gradiometer", IEEE Trans. Appl. Supercond. **9**, No.2 (1999) 3801-3804
- 3) H.-J. Krause and M. v. Kreutzbruck : "Recent developments in SQUID NDE", Physica C **368** (2002) 70-79
- 4) S. Tanaka, M. Natsume, M. Uchida, N. Hotta, T. Mastuda, Z. Spanut, and Y. Hatsukade : "Measurement of metallic contaminations in food with a high- T_c SQUID", Supercond. Sci. Technol. **17** (2004) 620-623; S. Tanaka: "Possibility of new measurement application using high T_c SQUID", Oyo Buturi **72** (2003) 1039-1045
田中三郎 : 「高温超電導素子を用いた新しい応用計測の可能性」, 応用物理 **72** (2003) 1039-1045
- 5) Y. Hatsukade, T. Inaba, Y. Maruno and S. Tanaka : "Study on noise cancellation for sensor-mobile nondestructive inspection system using HTS-SQUID", Abstract of CSJ Conference **70** (2004) 190
廿日出好, 稲葉友洋, 丸野善生, 田中三郎 : 「SQUID 移動式非破壊検査システムのための磁気ノイズキャンセル手法の検討」, 第 70 回低温工学・超電導学会講演概要集 (2004) 190
- 6) D.F. He, M. Daibo and M. Yoshizawa : "Mobile HTS rf SQUID magnetometer", IEEE Trans. Appl. Supercond. **13** (2003) 200-202; D.F. He and M. Yoshizawa : "Mobile high- T_c SQUID magnetometer", Proc. of LT-23, Hiroshima (2002); 何 東風, 中村光輝, 大坊真洋, 八代 仁, 吉澤正人 : 「産業用 SQUID 応用機器の開発」, 岩手県地域結集型共同研究事業報告書 (2003)
- 7) K. Isawa, S. Nakayama, T. Morooka, M. Ikeda, S. Takagi, K. Chinone and S. Tosaka : "Traveling DC-SQUID gradiometry for nondestructive evaluation", Physica C **418** (2005) 1-8; K. Isawa, S. Takagi, S. Tosaka, S. Nakayama, M. Ikeda and K. Chinone: "Practical scanning SQUID system for nondestructive evaluation", IEEE Trans. Appl. Supercond. **15** (2005) 715-718; K. Isawa, S. Nakayama, T. Morooka, M. Ikeda, S. Takagi, K. Chinone, and S. Tosaka : "A traveling SQUID magnetic imaging system and its application for nondestructive evaluation", TEION KOGAKU **39** (2004) 488-494 (in Japanese)
井澤和幸, 中山 哲, 師岡利光, 池田正徳, 高木佐加枝, 茅根一夫, 登坂 滋 : 「自走式 SQUID による磁気イメージング装置とその非破壊検査への応用」, 低温工学 **39** (2004) 488-494
- 8) Reviews ; K. Isawa, S. Takagi and S. Tosaka : Electrical Review **90** (2005) 72-76 (in Japanese)
井澤和幸, 高木佐加枝, 登坂 滋 : 「移動型 SQUID 非破壊検査技術 その基礎と応用」, 電気評論 **90** (2005) 72-76
K. Isawa, S. Takagi and S. Tosaka : Inspection Engineering **10** (2005) 59-65 (in Japanese)
井澤和幸, 高木佐加枝, 登坂 滋 : 「非破壊検査用移動型 SQUID の開発 現状と実用化の課題」 検査技術 **10** (2005) 59-65
K. Isawa, S. Takagi and S. Tosaka : Power Electric Technique **43** (2004) 57-61 (in Japanese)
井澤和幸, 高木佐加枝, 登坂 滋 : 「超電導量子干渉素子を活用した非破壊検査技術における移動型 SQUID の開発」, 電気現場技術 **43** (2004) 57-61
- 9) S. Nakayama, T. Morooka, M. Ikeda, K. Chinone, K. Isawa, S. Takagi and S. Tosaka : "Portable SQUID NDE system for practical application", Appl. Supercond. **15** (2005) 699-702
- 10) S. Nakayama, A. Odawara, T. Morooka, N. Shimizu and K. Chinone : "Development of high performance DC-SQUID system for nondestructive evaluation", T. IEE Jpn. **115A** (1995) 1228-1235
中山 哲, 師岡利光, 小田原成計, 清水信宏, 茅根一夫 : 「非破壊検査用高性能 DC-SQUID システム」, T. IEE Jpn. **115A** (1995) 1228-1235
- 11) T. Morooka, S. Nakayama, A. Odawara, N. Shimizu, K. Chinone, T. Akita and N. Kasai : "Development of integrated direct current superconducting quantum interference device gradiometer for nondestructive evaluation", Jpn. J. Appl. Phys. **35** (1996) L486-L488; T. Morooka, S. Nakayama, A. Odawara and K. Chinone : "Observation of superconducting device using magnetic imaging system with a micro-DC SQUID magnetometer", Jpn. J. Appl. Phys. **38** (1999) L119-L122
- 12) K. Isawa, S. Nakayama, M. Ikeda, S. Takagi, S. Tosaka and N. Kasai : Physica C (in press)
- 13) K. Enpuku, T. Minotani, A. Kandori, F. Shiraishi, J. Beyer, D. Drung, F. Fudwig : "Direct-coupled high- T_c DC superconduct-

ing quantum interference device magnetometer on SrTiO₃ substrate: theoretical description and comparison with experiment”, Jpn. J. Appl. Phys. **37** (1998) 4769-4773

- 14) J. Beyer, D. Drung, F. Ludwig, T. Minotani and K. Enpuku : “Low-noise YBa₂Cu₃O_{7-x} single layer dc superconducting quantum interference device (SQUID) magnetometer based on bicrystal junctions with 30 misorientation angle”, Appl. Phys. Lett. **72** (1998) 203-205
- 15) Private communication : Regarding the 5 axes robotic SQUID system reported by Hitachi group, Prof. H. Itozaki of Osaka University informed the authors at the Applied Superconductivity Conference (ASC2004) in Florida, USA
- 16) M. Otaka, K. Enomoto, M. Hayashi, S. Sakata and S. Shimizu: “Evaluation of mechanical properties of stainless steel after simulated serve conditions (3rd report, an advanced SQUID sensor for detecting damage in stainless steel)”, Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. Series A **59** (1993) 25-30 (in Japanese)
大高正廣, 榎本邦夫, 林 真琴, 坂田信二, 清水禎人: 「経年模擬ステンレス 鋼の機械的特性評価 (第3報, 実用小型 SQUID センサの開発とステンレス鋼の損傷検出)」, 日本機械学会論文集 (A 編) **56** (1993) 25-30
- 17) K. Sugihara : “Mathematics in Graphics”, Kyoritsu-Publishers, Tokyo (1995) (in Japanese)
杉原厚吉 : 「グラフィックスの数理」, 共立出版, 東京 (1995)
- 18) For example, K. Murotani and K. Sugihara : “Globally smooth interpolation using Gregory patches over irregular meshes”, Int. J. Shape Modeling **9** (2003) 21-39
- 19) N. Sapidis and G. Farin : “Automatic fairing algorithm for B-spline curves”, Computer-aided design **22** (1990) 121-129
- 20) G. Farin : “NURBS from Projective Geometry to Practical Use”, AK Peters, Natick, MA (1999)
- 21) Y. Watanabe, S.H. Kang, J.W. Chan, J.W. Morris, Jr. and J.

Clark : “High-Tc superconducting quantum interference device observation of heat -affected zone in a spot welded FE-Cr-Ni system”, Appl. Phys. Lett. **88** (2003) 1878-1880, and their references in.

井 澤 和 幸 1964 年 9 月生。1988 年筑波大学第三学群基礎工学類 (物理工学主専攻) 卒業。1988 年東北電力 (株) 研究開発センター勤務。2000 年～2003 年 東京工業大学非常勤講師勤務。専門分野: 材料科学。日本物理学会会員。工学博士。

中 山 哲 1963 年 10 月生。1986 年電気通信大学電子工学科卒業。1986 年セイコー電子工業 (株) (現 セイコーインスツル (株)) 勤務。2003 年エスアイアイ・ナノテクノロジー (株) 出向。超電導素子の応用開発に従事。応用物理学会会員。

池 田 正 徳 1960 年 9 月生。1984 年広島大学理学部物理学科卒業。1989 年セイコーインスツルメンツ (株) 入社。2003 年エスアイアイ・ナノテクノロジー (株) 出向。主に超電導関連のソフトウェア開発に従事。

高 木 佐加枝 1954 年 10 月生。1977 年岩手大学工学部電気工学科卒業。同年東北電力 (株) 入社。1988 年より同社応用技術研究所 (現 研究開発センター) 勤務。2001 年新エネルギー・産業技術総合開発機構出向。2003 年より東北電力 (株) 研究開発センター勤務。電力貯蔵システム・SQUID に関する研究に従事。

登 坂 滋 1951 年 7 月生。1975 年 3 月東京理科大学理工学部電気工学科卒業。1975 年 4 月東北電力 (株) 入社。送電関係に従事。2001 年 8 月より同社研究開発センターに勤務。電気学会会員。