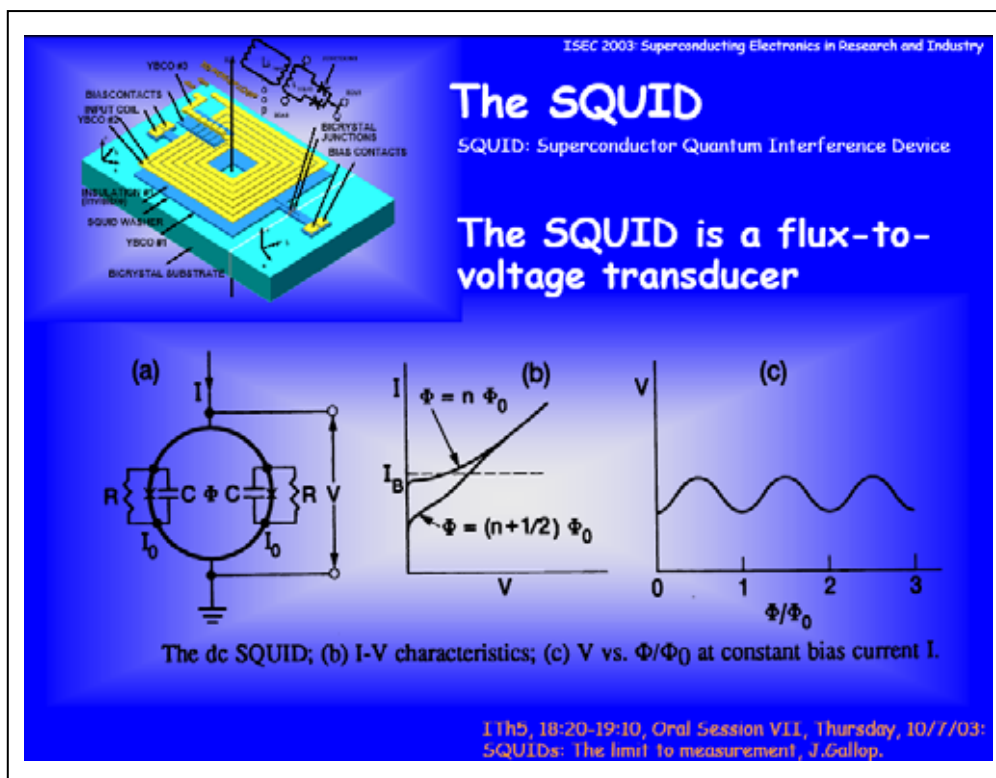


(4) SQUID 磁気センサシステム

(a) SQUID 磁気センサ

SQUID(Superconducting QUantum Interference Device)は超伝導における磁束の量子化を利用した超高感度な磁気センサであり、フェムトテスラ(10^{-15} T)までの極めて微弱な磁界を検出することが出来ます。この高感度性を利用して、医療・バイオ、分析・検査、環境・資源探査、等の分野における先端計測システムが開発されています。

SQUID 磁気センサは、図(a)に示すように、2つのジョセフソン接合を超伝導ループで結合した構成となっています。このタイプを dc SQUID と呼んでいます。図(b)に示すように、SQUID の電流 電圧(I-V)特性は超伝導ループに鎖交する磁束 Φ により変調されます。鎖交磁束 Φ が磁束量子 Φ_0 ($=2.07 \times 10^{-15}$ Wb)の整数倍($n\Phi_0$)のときに超伝導電流(ゼロ電圧電流)が最大となり、 Φ が $(n+1/2)\Phi_0$ の時に最小となります。従って、SQUID に流すバイアス電流を一定にしておくと、図(c)に示すように、その出力電圧 V は鎖交磁束 Φ に対して周期的に変化し、その周期は磁束量子 Φ_0 で与えられます。すなわち、SQUID は磁束を電圧に変換する変換器として動作することになるため、この特性を SQUID の磁束 変換(Φ - V)特性と呼んでいます。従って、この変換特性を利用すれば SQUID を磁気センサとして用いることが出来ます。なお、磁束量子 Φ_0 が極めて小さな値のため、高感度な磁気センサが実現できます。

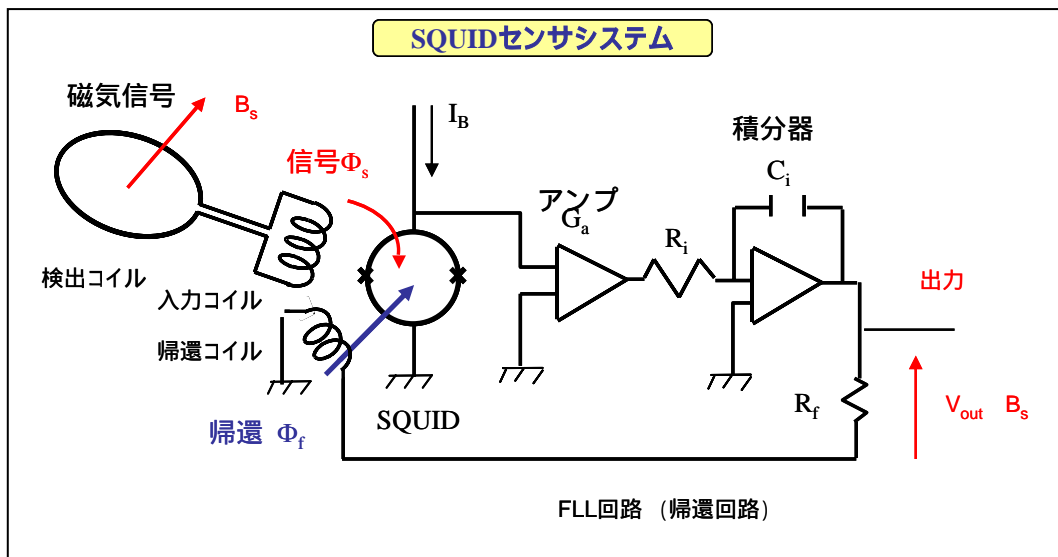


(b) SQUID 磁気センサシステム

SQUID を用いた磁気センサシステムは図のように構成されます。信号磁界 B_s を検出コイルで集め、これを入力コイルを介して SQUID に信号磁束 Φ_s として与えます。この時の伝達効率を有効面積と呼び、 $A_{\text{eff}} = \Phi_s / B_s$ で与えられます。即ち、有効面積が大きいほど、信号磁界を効率的に信号磁束に変換出来る事になります。検出コイルとして 1 cm 角のコイルを用いた場合、有効面積としては $A_{\text{eff}} = 2 \text{ mm}^2$ 程度が得られています。この場合には、検出コイルに 1 nT の磁界を与えると、SQUID には磁束量子 Φ_0 が印加される事になります。

前述した様に、SQUID は入力磁束 Φ を電圧 V に変換する変換器として働きます。しかしながら、 Φ - V 特性は周期的に変化するため、このままではセンサとして用いた場合には直線性やダイナミックレンジに問題が生じます。この問題を解決するため、FLL(Flux Locked Loop)回路と呼ばれる負帰還回路が用いられます。SQUID の出力電圧を積分した後に、帰還コイルを介して帰還磁束 Φ_f として SQUID に帰還します。この帰還磁束 Φ_f と信号磁束 Φ_s が互いに打ち消しあい、SQUID に鎖交する磁束は常にゼロにロックされることとなります。このとき、積分器の出力電圧は信号磁束に比例したものとなり、直線性やダイナミックレンジの問題を解決できることとなります。

なお、この回路により量子磁束 Φ_0 の $1/10^6$ 程度の信号磁束 Φ_s を検出することが出来ます。従って、有効面積が $A_{\text{eff}} = 2 \text{ mm}^2$ の場合には磁界感度は $B_s = \Phi_s / A_{\text{eff}} = 1 \times 10^{-15} \text{ T}$ となり、フェムトテスラの極めて微弱な磁界を検出できます。



(c) 応用分野

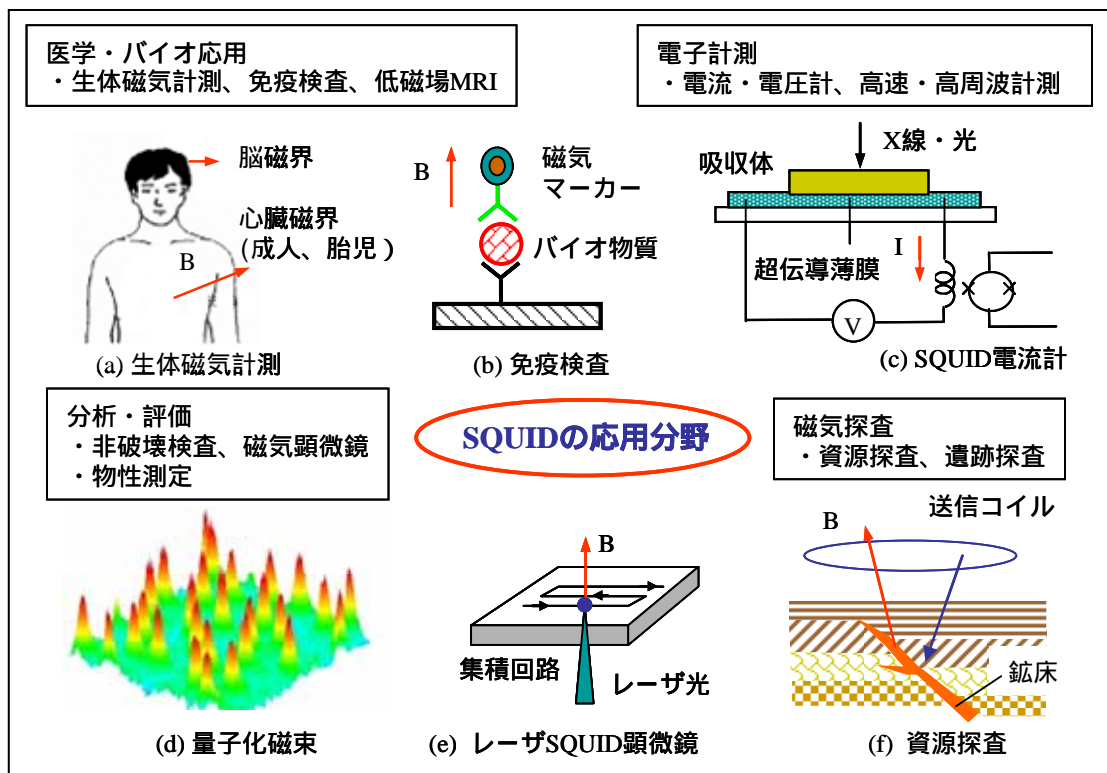
SQUID 磁気センサの高感度性を利用して、図に示す様な医療・バイオ、分析・検査、環境・資源査、等の分野における先端計測システムが開発されています。

医学・バイオ関係では心臓・脳磁界を計測する生体磁気計測（図(a)）、疾患診断のための免疫検査（図(b)）及び超低磁場 MRI 等への応用がなされています。

材料分析・評価関係では、構造物内部の欠陥や食料品・高純度材料内の磁気不純物の検出を行う非破壊検査、及び超伝導・磁性材料の局所的な評価や集積回路の故障解析のための SQUID 磁気顕微鏡が開発されています（図(d), (e)）。

電子計測応用では、電流分解能が数 $\text{pA/Hz}^{1/2}$ 程度で応答周波数が数 MHz の SQUID 電流計が開発されており、図 (c)に示す様な超伝導体を利用した光や X 線検出器用に用いられています。

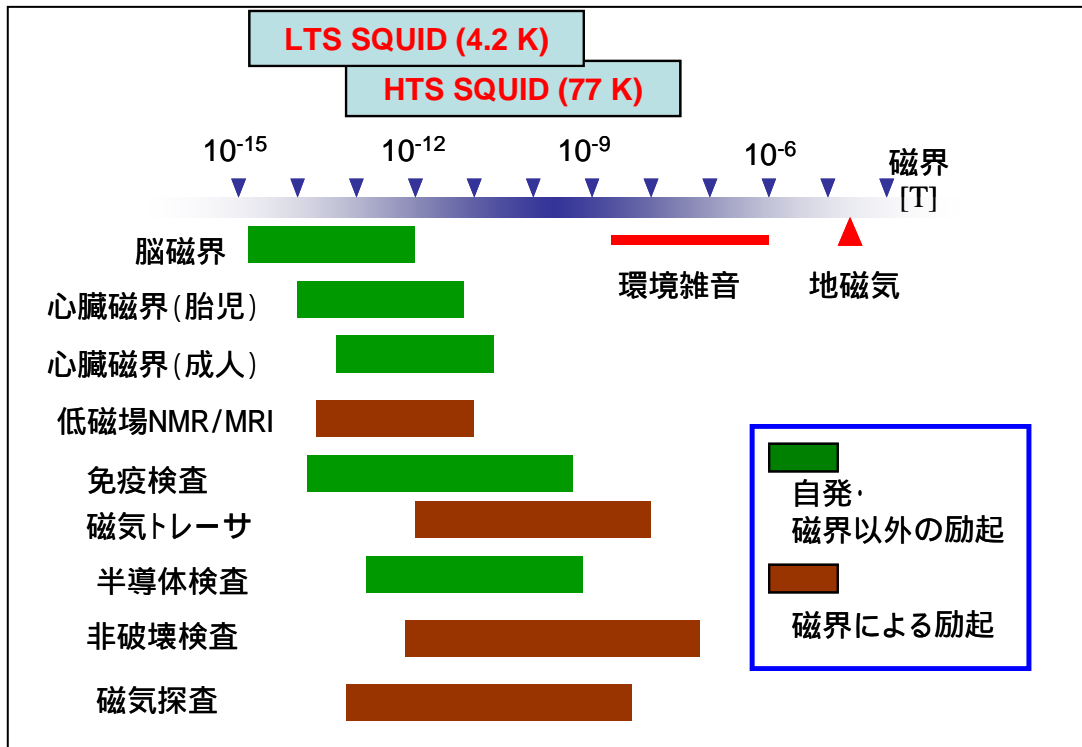
SQUID 磁気センサを用いて地下数 100 m から数 km の地下構造や地下資源を探查する研究も行われています。（図(f)）



これらの応用における磁界強度を図に示します。信号磁界の大きさとしてはフェムトテスラ (10^{-15}T)からナノテスラ (10^{-9}T)の範囲にあります。これらの信号強度は、地磁気や環境磁気雑音に比べて非常に弱いので、システム開発においてはこれらの雑音除去技術も非常に大切となってきます。

また、信号の計測法は以下の2つに大別されます。一つは、試料からの自発磁化や磁

界以外の方法で試料を励起した場合に発生する磁気信号を検出するものです。他方は励起磁界を試料に印加して試料を磁化し、その磁気信号を検出するものです。この場合には、励起磁界が SQUID 動作に及ぼす悪影響をうまく除去する方法の開発も重要となります。



(d) SQUID センサシステム

これまでに、高温超伝導 SQUID センサ、及びこれを用いた種々のセンシングシステムを開発しています。その一例を以下のファイルに示します。

HTS-SQUID 設計 (ファイル)

免疫検査装置 (ファイル)