

4.2 磁気の測定

アンペールの法則

ビオ・サヴァールの法則

磁場の発生

磁場の測定

SQUID

MEG

核磁気共鳴

MRI

磁石(magnet)の語源は、古代ギリシャ時代にマグネシア地方で産出した磁鉄鉱 Fe_3O_4 (マグネタイト) が鉄を引きつける磁力を示したことに由来するという説、鉄を引き付ける石を発見した羊飼いの名前のマグネスに由来するという説、などがある。

古くから、方位磁針として利用されたようである。北宋時代の中国の文献に記述がある。

16世紀、ウィリアム・ギルバートは地球が磁石であることを示した。

1820年、エルステッドは電流によって方位磁針が影響を受けることを発見し電磁気学の発展の契機となった。

アンペールの法則

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_S \vec{j} \cdot d\vec{S} = I$$

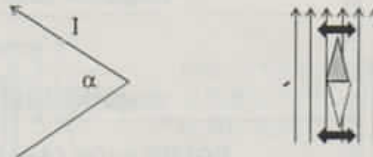


1820年、アンペール (André-Marie Ampère) は、エルステッド (Hans Christian Ørsted) の実験に刺激を受けて、2つの平行な電流の間に働く力を計測する実験を行った。電流の方向と力の方向 (磁場の方向) の関係、電流間の距離と力の強さ (磁場の強さ) の関係を定式化することに成功した。

ビオ・サヴァールの法則

$$d\vec{H}(\vec{r}) = \frac{I d\vec{l} \times \hat{r}}{4\pi r^2}$$

$$H(\vec{r}) = \int_V \frac{\vec{j}(\vec{r}') \times (\vec{r} - \vec{r}')}{4\pi |\vec{r} - \vec{r}'|^3} d^3r'$$



1820年、ビオ (Jean-Baptiste Biot) とサヴァール (Félix Savart) は、直線電流が作る磁場の強さを磁場中の磁石片 (双極子モーメント) の振動によって計測した。さらに、直線電流を折り曲げて、その角度を変えながら実験することによって、微小電流の方向と磁場の方向の関係を決定する実験を行った。

振動の同期の角速度を測る

磁場の発生

永久磁石

固体中の電子の軌道運動あるいはスピンによる磁気モーメントがお互いを打ち消し合うことなく生き残り、電流を流さなくても磁場を発する。

- フェライト磁石 マグネトプランバイト $BaFe_{12}O_{19}$ など
- 高周波領域 スピネル $MnFe_2O_4$ など、ガーネット $Y_3Fe_5O_{12}$ など
- ネオジム磁石 $Nd_2Fe_{14}B$ 最強の磁石
- サマリウムコバルト磁石 $SmCo_5, Sm_2Co_{17}$ 高温で活躍

地磁気

地球内部のコア（主として鉄からなる）を流れる電流によって生じる。地上では30000~60000nT (0.3~0.6ガウス) 程度の強さ。

電磁石

磁性体の芯にコイルを巻いたもの。コイルに電流を流すと磁場が発生。

超伝導電磁石

ニオブチタン (Nb, Ti) で構成されている。超伝導転移温度は10Kであり、4.2Kの状態では約15Tの臨界磁場をもつ。転移温度18Kのニオブスズ (Nb, Sn) では、より高い臨界磁場をもつ電磁石を作ることができ、4.2Kの状態では25~30Tという臨界磁場まで耐えられる。しかし、ニオブスズ (Nb, Sn) の線材を作るのは難しく高価なために、一般的にはニオブチタン (Nb, Ti) が用いられている。

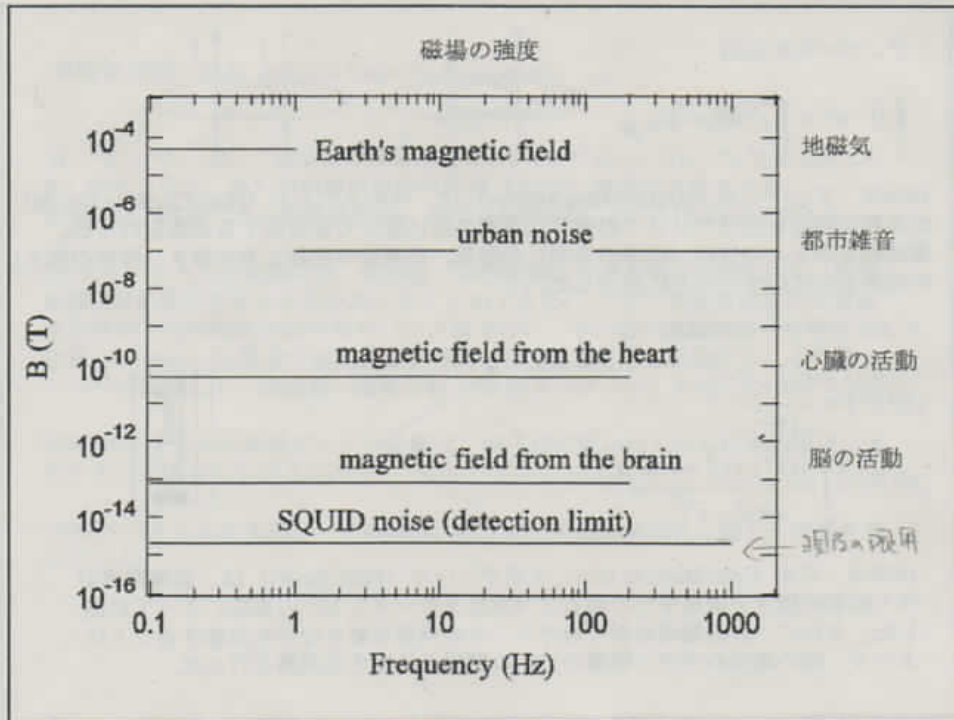
4.2Kのニオブチタンは強磁性体

4.2Kのニオブチタンは強磁性体

高周波領域は通常電子スピンの軌道運動による

音の伝播は地磁気と関係する電流を流れる電線

磁場の強さは超伝導に依存

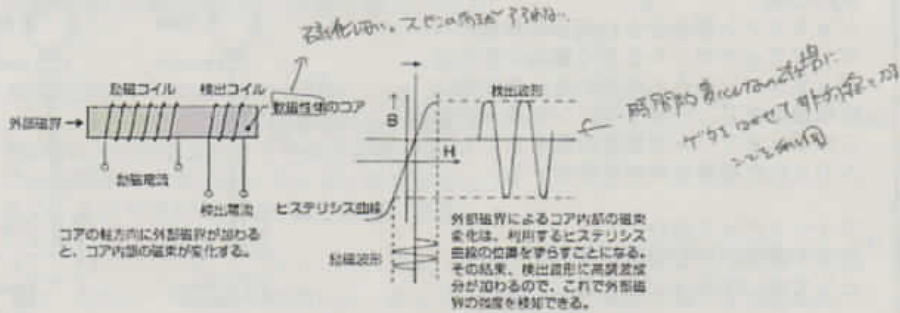


磁場の測定 (1)

(非常の感度と、局所的な磁場を測定可能)

フラックス・ゲートセンサー:

フラックス・ゲート型のセンサーは、高透磁率コアを交流駆動コイルにより飽和させて、検出コイルに流れる電流を計測する。外部磁場の影響がない状態では、検出コイルの出力電流の半波サイクルにおける周期は交流駆動コイルの入力電流の周期と等しい。この状態で、一方向からの外部磁場がコアを通過すると、半波サイクルのどちらかが早く飽和し、他方は遅れて飽和するので、高感度で外部磁場の強度を計測することが可能となる。



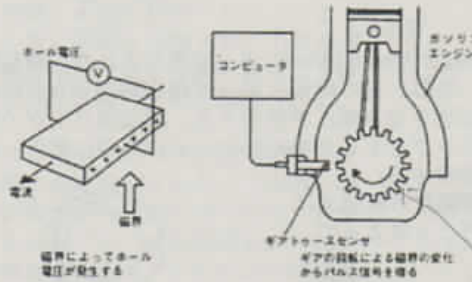
<http://www.tdk.co.jp/techmag>より

磁場の測定 (2)

ホール素子:

ホール効果 (Hall effect) は、電流の流れているものに対し、電流に垂直に磁場をかけると、電流と磁場の両方に直交する方向に起電力が現れる現象であり、1879年にエドウィン・ホール (Edwin Hall) によって発見された。ホール素子は、p型あるいはn型の半導体を用いて、外部磁場の強度 B 、入力電流 I に対して、ホール効果による起電力 V_H を計測する。

このとき、 $V_H = R_H I B$ の関係がある。比例係数 R_H をホール係数と呼び、材質や温度などで決まる。キャリア密度を n 、キャリアの電荷を e として $R_H = g_H / ne$ の関係がある。ここで g_H は散乱因子と呼ばれる。



InSb , InAs , GaAs 等が市販のホール素子に用いられている。

せいと電...
位置制御

<http://www.tdk.co.jp/techmag>より

↑ 同様の電流が流れる

超伝導量子干渉計
(Superconducting Quantum Interference Devices, SQUID)

入力部分:

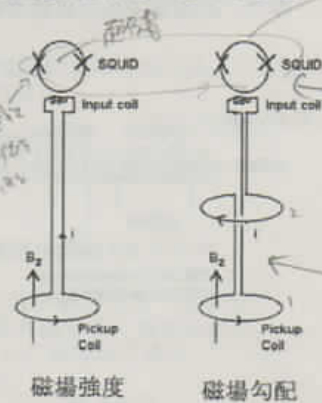
超伝導状態の線材で作った閉回路を貫く外部磁束が時間変化すると、その時間変化を打ち消す磁束を作る電流（遮蔽電流）が閉回路に誘起されることを利用する。この閉回路は、ピックアップコイル部分とSQUID素子に磁束を伝える部分からなりピックアップコイルの形状により磁場の強度や磁場勾配を計測することができる。

SQUID素子:

ジョセフソン接合を含む超伝導状態のループ。ピックアップコイルを貫く磁束の変化は、ジョセフソン接合の両端の超伝導状態に位相差を生じ、ジョセフソン電流が変化する。このジョセフソン電流を計測することによって、入力された磁場を精密に測定する。

フィードバック部分:

出力の電流が作る磁場を負のフィードバックとしてSQUID素子に伝える。



高感度の磁束計
磁束の勾配を測る
箱音は
磁束の勾配を測る
1. 2. 3. 4. 5. 6. 7. 8. 9. 10. 11. 12. 13. 14. 15. 16. 17. 18. 19. 20. 21. 22. 23. 24. 25. 26. 27. 28. 29. 30. 31. 32. 33. 34. 35. 36. 37. 38. 39. 40. 41. 42. 43. 44. 45. 46. 47. 48. 49. 50. 51. 52. 53. 54. 55. 56. 57. 58. 59. 60. 61. 62. 63. 64. 65. 66. 67. 68. 69. 70. 71. 72. 73. 74. 75. 76. 77. 78. 79. 80. 81. 82. 83. 84. 85. 86. 87. 88. 89. 90. 91. 92. 93. 94. 95. 96. 97. 98. 99. 100.

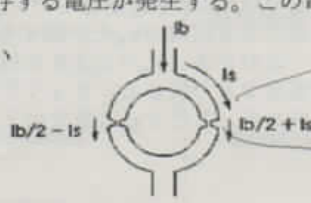
磁束の勾配を測る
箱音は
磁束の勾配を測る
1. 2. 3. 4. 5. 6. 7. 8. 9. 10. 11. 12. 13. 14. 15. 16. 17. 18. 19. 20. 21. 22. 23. 24. 25. 26. 27. 28. 29. 30. 31. 32. 33. 34. 35. 36. 37. 38. 39. 40. 41. 42. 43. 44. 45. 46. 47. 48. 49. 50. 51. 52. 53. 54. 55. 56. 57. 58. 59. 60. 61. 62. 63. 64. 65. 66. 67. 68. 69. 70. 71. 72. 73. 74. 75. 76. 77. 78. 79. 80. 81. 82. 83. 84. 85. 86. 87. 88. 89. 90. 91. 92. 93. 94. 95. 96. 97. 98. 99. 100.

↑ 再直形と流す部分
↑ 磁束の勾配を測る

↑ 磁束の勾配を測る
↑ 磁束の勾配を測る

SQUID素子について

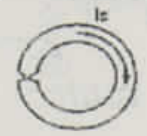
dc-SQUIDは1964年にRobert Jaklevic, John Lambe, Arnold Silver, James Mercereau によって発明された。超伝導体のリングの2箇所（ジョセフソン接合）に、磁束に依存する電圧が発生する。この電圧を計測することによって、SQUID素子に入力される磁束を計測する。感度がよく雑音もあまり発生しない特長があるため、このタイプを使った磁束計が広く使われている。



↑ 磁束の勾配を測る
↑ 磁束の勾配を測る

↑ 磁束の勾配を測る
↑ 磁束の勾配を測る

rf-SQUIDは1965年にJames ZimmermanとArnold Silverによって発明された。超伝導体のリングの1箇所（ジョセフソン接合）に、磁束に依存する電圧が発生する。この電圧を計測することによって、SQUID素子に入力される磁束を計測する。感度がよく雑音もあまり発生しない特長があるため、このタイプを使った磁束計が広く使われている。



<http://www.yokogawa.co.jp> より

脳磁図 MEG (magnetoencephalography)

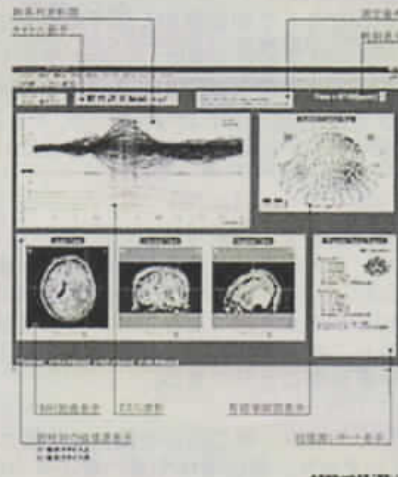
脳神経の活動に伴って発生する微弱脳磁場を計測し、画像化する手法。脳の活動に伴って頭部の周囲で観測される磁場は大きさは、 10^{-12} Tから 10^{-15} T程度の強度であり、高感度なSQUID磁束計を用いて計測できる。

頭部の周囲に多数のSQUID磁束計を配置することによって、脳の電流分布を非接触で計測し、画像化する。

聴覚、視覚などの様々な外部刺激と同期させて脳磁図を測定することにより、聴覚、視覚など一次感覚野の応答や記憶や言語活動など高次機能における脳の活動部位を推定することができる。

<http://www.yokogawa.co.jp> より

オールインワン形式ですべての測定装置は一体化されたシステムで最新の技術開発が蓄積です。最新のレイアウトや表示形式、操作は自由に選択できます。



核磁気共鳴 NMR (Nuclear Magnetic Resonance)

^1H 、 ^{13}C 、 ^{19}F 、 ^{15}N 、 ^{31}P などの核種はスピン $I=1/2$ であり、 ^2H 、 ^{14}N などはスピン $I=1$ を持つなど、多くの核種が核磁気共鳴 (NMR) 観測の対象となる。
磁場強度1.0T中での共鳴周波数は、 ^1H で42.58MHz、 ^{13}C で10.71MHzである。

NMRスペクトルの観測には、電磁波 (振動磁場) の周波数 ω を固定して、静磁場強度 H を変化させる方法が用いられることができる。一方、共鳴周波数での電磁波の吸収を 10^{-5} s程度の短時間のパルス波で行い、その後の遷移状態から熱平衡状態への10ms~10s程度の磁気緩和を時間-強度分布として計測する。それを、フーリエ変換して、周波数-強度分布 (NMRスペクトル) を得ることができる。

NMRスペクトルの共鳴ピークの位置は、原子核の置かれている化学的環境に依存する (ケミカルシフト)。

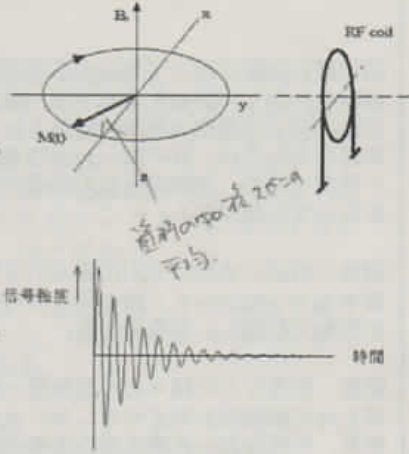
NMRスペクトルの共鳴ピークの幅は、核スピンの緩和時間 T_2 に関する情報を含んでいる。

★
共振

静磁場のよって核スピンを鉛直方向に揃えたとする。共鳴周波数においては、モーメント（核スピンの期待値）は、水平軸のまわりに回転する。この周期をTとすると、パルス波の継続時間がT/4の場合にモーメントの向きは水平になる。この位置から信号の減衰する緩和時間 T_2 が横緩和（スピンスピン緩和）である。

また、次に共鳴条件が満たされるためには平衡状態まで戻らなければならないが、それまでの回復時間 T_1 が縦緩和（スピナー格子緩和）である。

共鳴周波数で、継続時間T/4のパルスによって、スピンの方向を90度回転させた後、継続時間T/2のパルスによって180度回転すると、スピンの水平方向で揃ってエコー信号が得られる。これをスピナーエコー法と呼び、正確に T_2 を求めることができる。



特に、スピナー格子緩和時間 T_1 は、核スピンの相互作用による緩和を含んでおり、超伝導体や重い電子系の研究で活躍する

核磁気共鳴画像法 MRI (Magnetic Resonance Imaging)

MRIはNMRに位置情報を加えて、信号の強度分布を画像化したものである。MRIで主に用いられるのは、体内に多く存在する ^1H の核磁気共鳴である。

MRI装置は、以下のような要素から構成される。

- 静磁場コイル：核磁気共鳴を起こすための静磁場磁石。超電導磁石が用いられる。
- 傾斜磁場コイル：x, y, z軸に勾配を持つ磁場をパルス的に印加して、NMR信号に位置の情報をエンコードする。傾斜磁場コイルには数百アンペア程度の電流が流される。
- RFコイル：共鳴周波数の電磁波を照射すると同時に、NMR信号の検出に用いられる。

RF照射から次のRF照射までの時間（繰り返し時間）を短く設定することによって、 T_1 の短い組織を強調する。 T_1 を強調する画像では繰り返し時間を数百ミリ秒以下に設定し、脂肪などが強調される。

スピナーエコー法でエコーが帰ってくるまでの時間を長く設定すると、 T_2 が長い組織の方が信号が相対的に強くなる。 T_2 を強調する画像では、この時間を80~120ミリ秒程度に設定し、自由水などが強調される。

