

特集 地球磁場 —地磁気と地球・宇宙科学—**地磁気観測用磁力計**

Magnetometers for geomagnetic field measurement and space research

遠山 文雄

(東海大学)

Fumio TOHYAMA

Key Words: Magnetometer, geomagnetic field.**1 はじめに**

地球周辺の磁場は、二つに大別される。地球固有の内部磁気モーメントに起因するものと宇宙空間磁場や磁気圏や電離圏を流れる電流から誘導される磁場である。これらはそれぞれ単に内部磁場、外部磁場と言うこともある。前者は岩石や地殻が持つ磁気の観測から地震や火山などの地殻変動に伴う磁場変動の観測に波及し、地球固有が持つ磁気を基準として地層・地殻構造解明や地下資源探査を目的とする磁場観測がある。後者は電離層電流や磁気圏電流による磁場や太陽磁場などの観測から、地球を取り巻く電磁場環境の計測、太陽活動や宇宙空間現象の物理的構造解明の観測が主体である。地磁気観測とは両者を総称して呼ぶことが多いが、岩石が持つ磁気の強さと宇宙空間の物理現象に伴う磁場変動や地磁気の大きさには4-8桁の開きがあるので、利用される磁力計の種類も多種である。

ここでは主に地球物理学および宇宙空間物理学の分野で多用される磁場計測用の磁力計について紹介する。

2 磁力計の種類と用途

地磁気の観測とは地球の固有磁場や地球周辺の磁場変化を観測するだけでなく、広い意味で岩石や地殻の持つ磁場の計測も含んでいる。その意味で磁力計の種類は地磁気や宇宙空間磁場の観測磁力計および岩石磁気の計測磁力計について紹介する。これらの観測磁力計の他に医学用の磁力計や地磁気の100~1,000倍もの強磁場用磁界計測器については省くことにする。ここで扱う磁力計の種類と用途、感度などの特徴をまとめてTable 1に示す。

3 岩石等の試料磁化計測磁力計

岩石に残留している自然磁化を計測することは、残留磁気が過去の地磁気の記録であるので、地質学はもとより、地殻・地層の変動から地震学、火山学など大陸移動や地磁気極性逆転に至る磁性物理学に寄与している。堆積岩などの非常に微弱な残留磁化も短時間で高精度に計測できるようになった。ここでは岩石磁気に良く用いられる磁力計について紹介する。

3.1 スピナー磁力計 (Spinner Magnetometer)

この磁力計は原理から言えば後述の誘導磁力計やフラックスゲート磁力計やSQUID磁力計を利用した応用的磁力計システムであるので、厳密には磁力計の種類ではないが、岩石磁気の計測には欠かせない。Fig.1のように試料の岩石を回転台でスピンさせ、その近くに置かれたコイルに誘導される起電力を計測するという原理を利用する。試料は3方向に置き換えて3成分の磁化を計算する。最近では誘導コイルの代わりにフラックスゲート磁力計を用いている。また、試料を置き換える手間を省いたり、測定から消磁までをオートマテックに出来るスピナー磁力計や超伝導金属で磁気シールドした磁力計システムも開発されている。また、試料の回転の代わりに試料を一定の周波数と振幅で振動させることによってコイルに誘導される交流電圧から磁化を計測する振動試料磁力計と呼ばれるものもある[1][2]。

3.2 無定位磁力計 (Astatic Magnetometer)

古典的な微少磁化試料を計測する初期の磁力計である。Fig.2のように10 cm程度の棒の上下2箇所に強さの等しい磁石を反対方向で平行に取り付けて糸で

Table 1 Classify and Characteristics of magnetometers.

磁力計名	主用途	原理	利点/欠点	分解能・感度等
スピナー	岩石等の帯磁計測	試料の回転で誘導される磁界変動	微少磁化量の検出 回転装置が必要	磁気モーメント 10^{-7} e.m.u./cc
無定位	岩石等の帯磁計測	複数磁石を吊るして無定位での磁化試料の変位計測	光てこで高精度計測 補償コイルが必要	磁気モーメント 10^{-9} e.m.u./cc
SQUID (超伝導)	岩石磁化の磁化量 医療機器	ジョセフソン接合超伝導体のマイスナ効果を利用	高感度検出, 高価 超伝導装置が必要	0.001~0.0001 nT
フラックスゲート (倍周波)	地磁気・宇宙磁場のベクトル, 変動計測	高透磁率材を交流励磁して二次高調波を検出	ベクトル計測 相対値計測, 高信頼性	1~0.01 nT
プロトン	地磁気の絶対値計測 火山, 海底観測	ケロシン中のプロトン核磁気共鳴周波数の計測	スカラー絶対値計測 不連続計測	0.1~0.01 nT
サーチコイル	磁場の変動計測 磁波の周波数解析	コイルに誘導される磁束の時間変化計測	構造簡単, 周波数解析 誘導起電圧が微少	$100 \mu\text{V/nT Hz}$
ベクトルヘリウム	地磁気の絶対値・成分観測	光ポンピングによる核磁気共鳴	コイルで成分測定可能 消費電力大	0.01 nT
アルカリ蒸気 (Rb, Cs)	磁場の全磁力測定	アルカリ蒸気的光ポンピング発振のラーモア運動	スカラー絶対値計測 ランプの温度制御	0.1~0.001 nT
ガウスメータ (磁気デバイス)	強磁場のモニター	磁界中で起電力を生じる半導体のホール効果	小型軽量, 省電力 感度・温度特性劣る	100 nT~10 T

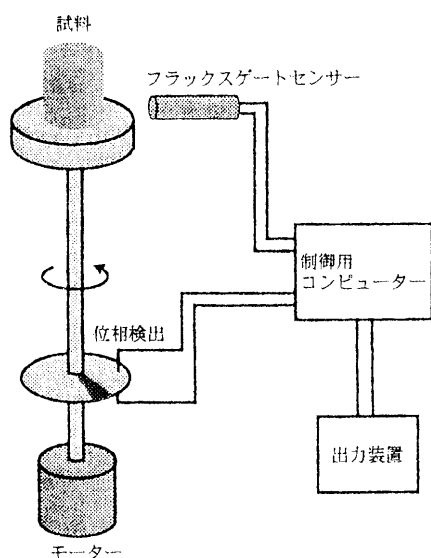


Fig. 1 Schematic diagram of the spinner magnetometer [1].

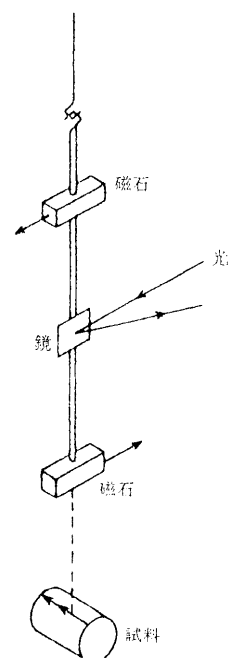


Fig. 2 Schematic diagram of the astatic magnetometer [1].

吊り下げると、地球磁場の方向に影響なく無定位に回転することが出来る。下方の磁石の傍に磁化した試料を置くと無定位が崩れ、磁化試料による磁気トルクと糸のねじれトルクの釣り合ったところで回転は静止する。その回転量を棒に取り付けられたミラーを用いた光テコを用いて計測をする。この無定位を保つためには二つの磁石の磁気モーメントが完全に等しいだけでなく、この磁力計の系内で磁場勾配がないことが必要だが、非常に困難である。そのため、片方の磁石の傍に補正用のコイルで磁場を作ってやったり、周囲にヘルムホルツコイルを持たせて系内の地磁気を打ち消したりする工夫がなされる [1][2]。原理的には振動や外部磁界雑音に弱く、計測も大変であることからあまり見られなくなった。

3.3 SQUID 磁力計 (Super-Conducting Quantum Interference Device Magnetometer)

超伝導素子を用いるこの磁力計は、超伝導磁力計とか量子干渉磁力計とも呼ばれ、極微少磁界の検出が可能である。

液体ヘリウムを用いてリング状の超伝導金属を冷却すると電気抵抗はゼロに近づく。超伝導体では磁束の侵入が出来ないが、ある臨界磁場を超すと超伝導状態から常伝導状態になり、磁束の侵入が起るというマイスナ効果を利用している。超伝導状態のリングに磁化した試料を近づけると磁場の侵入を防ぐ方向にリング内に電流が生じる。この電流は磁場強度が限度を超えると磁場の侵入が起り電流変化となる。この磁場に比例する超伝導電流変化をジョセフソン素子で電圧変化として計測するのが SQUID 磁力計である。この磁力計は高感度な磁場測定が可能であるが、液体ヘリウムなどによる冷却が必要なため、装置が大きく、重く、高価である [1][3][4][5]。Fig.3 に磁力計の概略を示す。微少な磁界の変化の検出ができるので、岩石磁気のほかに医学用 MRI に利用されているが、飛翔体搭載用としては装置が大きく重くなるので使用されていない。

4 磁場観測と磁力計

地磁気や帯磁量の計測の主な目的と使用磁力計は次のようなものがあり、地上での計測でも宇宙空間での計測でも使用する磁力計は共通である。

- ## 1. 地磁気の地上での日変化記録（主に太陽活動に因

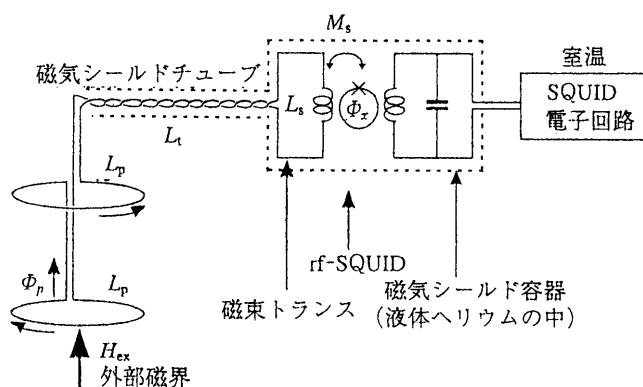


Fig. 3 Schematic diagram of the Super-conducting Quantum Interference Device (SQUID) magnetometer [4].

る地球周辺磁場環境のモニター)

フラックスゲート磁力計, プロトン磁力計, 光ポンピング磁力計, ベクトルヘリウム磁力計, サーチコイル (インダクション磁力計) など

2. 地表・海上または航空機高度での地磁気異常観測 (地殻構造のリモートセンシング, 地下探査, 地磁気マップ)
プロトン磁力計, フラックスゲート磁力計など
3. 気球・ロケット・衛星による宇宙空間および惑星磁場観測 (太陽活動の監視, 電離圏, 磁気圏構造の解明, 惑星探査)
フラックスゲート磁力計, プロトン磁力計, サーチコイル, ベクトルヘリウム磁力計など
4. その他 (医学機器として人体の血液が持つ磁気の計測, 強磁場や磁石の帯磁計測)
SQUID 磁力計, ホール素子磁束計など

ここでは地球上での磁場観測に限らず広く宇宙空間、惑星磁場観測の視点から磁力計について述べる。

4.1 磁場測定器概略

観測目的に応じた磁力計が利用されるが、一般的な磁力計の特性として、次のパラメータが磁力計仕様を左右するものである。

- (1) 測定磁場範囲 (2) ベクトル測定かスカラー測定か
(3) 磁力計の感度 (4) 雑音レベル (5) 温度特性 (6) 零点ドリフト (7) 周波数応答 (8) 較正方法 (9) 寸法・重量

量・消費電力

例えば、惑星磁場に注目すると、地球は固有の磁場を有し、大まかに言えば南北両極近くに磁気双極子を持っていて、地表での磁場強度は両極でおおよそ 60,000 nT (0.6 Gauss), 赤道付近で 30,000 nT である。また、木星磁場は地球のそれに比べて 100 倍も大きく、月面は 1/1000 以下と推定されている [6]。また、土星付近の宇宙空間磁場は地球磁場の 10^{-5} 倍程度ときわめて小さい。また、温度環境は、水星付近の太陽側では +100 から +200°C にもなり、深宇宙空間や月面での日陰では -200°C にもなるという。惑星の持つ固有磁場の大きさや分布は未知の部分が多いが、地球の強度に比べて非常に小さい惑星が多い。惑星探査では殆どの探査機に磁場計測器が搭載されているが、特に最近フラックスゲート磁力計の使用が主流となった [7]。温度環境の厳しい下で微小磁界の変動を高感度で計測するための磁力計の改良開発が行われている。

4.2 フラックスゲート磁力計 (Fluxgate Magnetometer)

この磁力計は現在、地上観測や飛翔体観測に最も多用されていて信頼性が高い。人工衛星の観測で最初に磁力計が使用されたのは 1958 年スプートニク 3 に約 80 nT の精度を持つフラックスゲート磁力計であった。その後アポロ月探査、月面磁場観測、マリナー、パイオニア、ボエジャーなどの探査衛星を初めヨーロッパ及び日本の殆どの衛星で使用されるようになった [6]。これはフラックスゲート磁力計が成分測定器として最もポピュラーで古くから使用され、多くの改良がなされ、現在では小型軽量化、省電力化および高精度化された磁力計となったからである [7]。

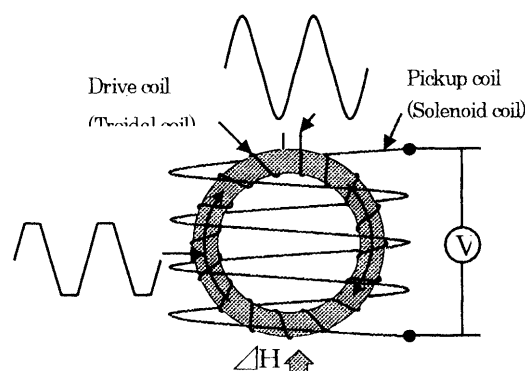


Fig. 4 Ring-core sensor system of the fluxgate magnetometer.

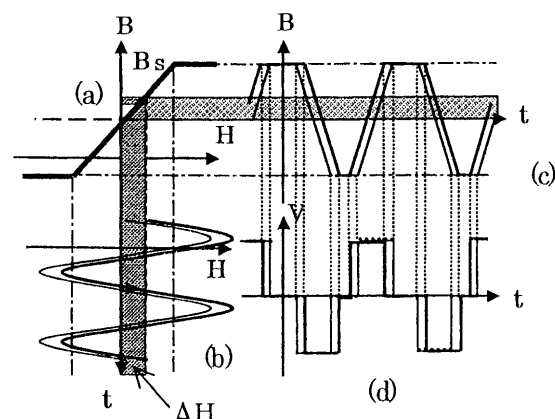


Fig. 5 Fundamentals of the fluxgate magnetometer.

フラックスゲート磁力計は、高透磁率を持つ金属が B-H 磁気履歴特性を持つ事を利用した磁気増幅器である。まず、センサは Fig.4 のような直径 20–30 mm のリング状の枠に 10 μm 程度の薄いパーマロイ箔を 10 層程度巻き、トロイダル状にドライブコイルを巻く。そのリングをケース内に入れ、検出コイルをソレノイド状に 500–1,000 巻いて増幅器などの電気回路部に接続する。パーマロイコアが Fig.5(a) に示すような直線的 B-H 特性を持つと仮定し、磁芯を十分に飽和する強度の交流磁界 H で Fig.5(b) の如く励磁コイルに電流を印加すると、誘導磁束 B は Fig.5(c) のような $\pm B_s$ で飽和する波形となる。その外側に巻いた検出コイルに誘起される出力は、Fig.5(d) のような磁束の時間変化 dB/dt であって、これが $\pm B_s$ でパルスの開閉 (ゲート) が起るということからこの名称が付けられた。もし、Fig.5(b) において外部磁界 ΔH がなければ、印加交流磁界は細い実線のように $H=0$ の正負で対称になり、B の飽和時間も正負で等周期となるが、外部磁界 ΔH に相当した零点がずれるために出力パルスの時間間隔が正負で非対称となり、出力波形は偶数次高調波を含む。一般には ΔH が小さく高調波振幅に比例するので二次高調波を増幅、位相検波して取り出す。Fig.6 にフラックスゲート磁力計の構成を示す。出力を負帰還させて動作点を零点付近で使用している [2][3][4][11]。

このような原理からフラックスゲート磁力計はセンサの検出コイルが巻いてある軸成分の磁場測定が可能であり、三成分方向に検出コイルを置けば磁場のベクトル計測ができる。センサが持つ磁性体の雑音は磁力計の計測感度を左右する。特に温度変化によるパルク

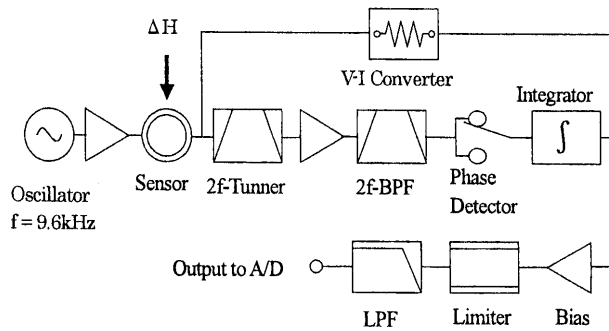


Fig. 6 Schematic diagram of the fluxgate magnetometer.

ハウゼンノイズが大きいと考えられていて、パーマロイ泊を温度膨張率が余り変わらないボビンに巻く工夫がなされている。磁場変動量の計測感度は現在 $1 \sim 0.005$ nT 程度である。しかし出力電圧が外部磁界に比例したものであるため、電気的オフセットやドリフト、温度変化による磁気特性変化からの感度変動があり、磁場の相対量の計測に適している。

4.3 プロトン磁力計 (Proton Magnetometer)

最初のスカラー磁力計として 1959 年バンガード 3 やソビエトのコスモス衛星にも搭載されたが、センサが大きく重く、また、高速で磁界の中を走る衛星では誘導電流の補正が複雑となり、宇宙観測磁力計としては使用されなくなった。しかし、この磁力計はフラックスゲート磁力計のような相対出力量でなく、磁場の絶対値を高精度 ($0.1 \sim 0.01$ nT) で計測できる利点があり、地上観測用磁力計として殆どすべての観測所で使用されている。磁場のベクトル計測は出来ないが、センサの方向依存性が無いので、航空機や船舶から吊るして探査するエアボーンやシーボーン用磁力計としても使用される。また、フラックスゲート磁力計の較正用磁力計としても有効であり、地震予知や火山予知の無人観測所や海底磁力計として幅広く利用されている [2][7]。

この磁力計は一種の共鳴磁力計で、水やアルコールなどの液体に含まれる水素原子のプロトンの基本原子定数を利用するものである。実際は氷点の低いケロシンの入ったセルにコイルを巻き、数アンペアの強い電流を印加して強磁場をかけてプロトンの個々の磁気モー

メントをその励磁磁場方向に揃える。次に急激に電流を遮断すると磁気モーメントは磁気共鳴によって外部磁界の周りに歳差運動を行い、その歳差周波数は外部磁界に比例したものとなる [3][4]。従って出力周波数をいかに高精度で計測するかは磁場計測の感度を左右する。プロトンの歳差周波数と外部磁場の大きさの関係は、プロトンの共鳴定数を比例常数とする比例関係にあり、日本付近では 2 kHz 前後の周波数計測となる。2 kHz を 10^{-6} の精度、即ち 0.001 Hz の精度で周波数計測すれば地球磁場の大きさを約 0.05 nT の精度で計測できることになる。また、コイルで検出される出力信号は $10 \mu\text{V}$ 以下の非常に微弱な信号で、すぐ減衰してしまう。従って、プロトン磁力計の難しさは周波数の高精度検出とスイッチ回路の雑音除去及び 100 ~ 120 dB の増幅度を持つ増幅器が要求されるところにある。Fig.7 にプロトン磁力計の構成図を示す。最近ではトロイダル状にコイルを巻いたリングコアセンサが用いられ、計測不可能な方向は無くなった。しかし、動作原理で述べたように、強磁界を数秒かけてから急激にスイッチを増幅器側に切り替えて周波数計測するため、連続観測が出来ないという欠点がある。この欠点を補うオーバーハウザー型プロトン磁力計も開発されているが [8]、全磁力の 1 分値をプロトン磁力計で計測し、微小な変動や早い変化はフラックスゲート磁力計で計測する地上観測システムが多く使われているので、従来型のプロトン磁力計が主流である。

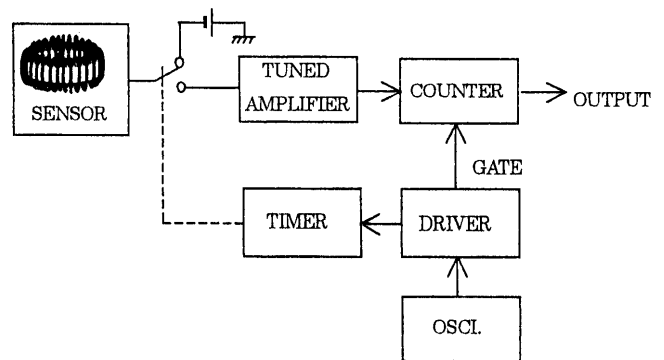


Fig. 7 Schematic diagram of the proton precession magnetometer [6].

4.4 サーチコイル磁力計 (Search Coil Magnetometer)

この磁力計は衛星搭載用としては古い磁力計で1958年のパイオニア1以来、エクスプローラ6やOGO衛星に搭載された[6].

コイルそのものをセンサとし、磁気誘導によるファラディの法則を用いた磁力計で誘導磁力計 (Induction Magnetometer) と呼ばれる。即ち、磁束密度の時間微分が電場を励起することを利用したもので、磁場の時間変化を検出する。従って、磁場の強度そのものを計測するのではなく、地磁気の時間変動や宇宙空間の磁波の周波数計測に多用され、他の磁力計と併用して用いられることが多い。

電磁誘導による磁界の測定は磁界の絶対値を測定できる利点があるが、定常磁界では時間変動が小さいためコイルに生じる誘導起電力も小さく実用的でない。そこで検出コイルを回転させコイルに誘導された起電力を交流電圧計で測定する回転コイル法がある。回転軸が地磁気方向と一致すると出力が0となるから、この方法で地磁気ベクトル方向を検出する地磁気計測もある[4][7].

この磁力計は飛翔体に搭載する場合は、磁力線を横切って飛ぶことによる磁場変動が生じるので、磁場の空間的変動なのか時間的変動なのかの区別を必要がある。磁場変動の周波数解析には適しており、宇宙空間のプラズマ観測や波動観測を目的とした衛星に搭載されている。地上での観測では磁気脈動や電磁波観測に用いられている。Fig.8にサーチコイル磁力計の構成図を示す[6].

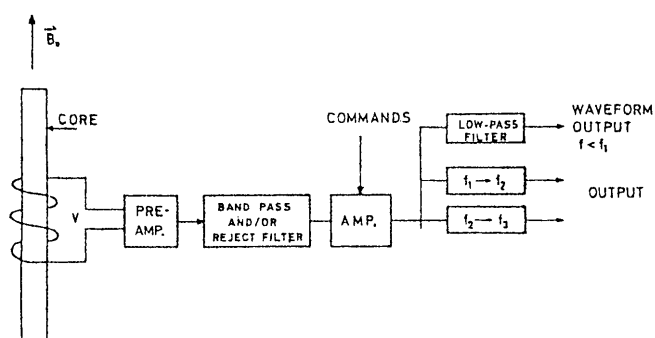


Fig. 8 Schematic diagram of the search coil magnetometer [6].

構造はパーマロイなどの高透磁率材を用いた300mm程度の棒状のセンサコアに10万回程度のコイルを巻いたもので、増幅器、帯域フィルター、スペクトル解析器により構成されている。出力感度は10–100 $\mu\text{V}/\text{nT} \cdot \text{Hz}$ 程度である。

4.5 ベクトルヘリウム磁力計 (Vector Helium Magnetometer)

過去の米国のパイオニア10, 11, マリナー4, 5などに搭載された磁力計で、共鳴磁力計の一種である。光ポンピングを利用したものであるが、自己発振型のルビジウム磁力計やセシウム磁力計とは区別されるものである。ヘリウム磁力計は磁場のスカラー量を測定するが、センサの周囲にコイルを置いて、既知の電流磁界を印加することによって成分測定を可能にしている。

Fig.9に磁力計構成図を示す。Heはパラヘリウムとオーソヘリウムの二つの状態が存在し、エネルギー状態が最初に磁気サブレベルが+1または-1の基底状態にあった原子がRFランプにより励起される。その間、円偏光により磁気サブレベルが限度内の範囲へのエネルギーレベルへ光ポンピングされる。このポンプされた状態は光の変調として得られる。中央のヘリウムセルの周囲に3軸のヘルムホルツコイルがあって、外部磁界に比べて非常に大きな磁界の周波数で掃引磁場がかけられる。掃引磁界と外部磁界の合成磁界および合成磁界と光軸のなす角度によって光の吸収強度である出力が決まる。セル内での安定磁界を得るために、出力をフィードバックして外部磁界を打ち消して感度を上げている。ヘルムホルツコイルによる掃引磁場から磁場の成分計測を行う[6][7][10].

この磁力計はセンサが磁化することも無く安定性は電気部だけに因り、ルビジウム磁力計のような温度依存性もないことが特徴であるが、電気的なゼロレベルを決める方法はない。消費電力はRFランプのためやや大きく周波数応答も10Hz程度であるが、磁場の計測精度は0.01 nTという高性能を持っている。

4.6 アルカリ蒸気自己発振磁力計 (Alkali Vapor Self-Oscillating Magnetometer)

米国の初期の探査衛星、エクスプローラ10, OGO衛星やマグサット衛星に用いられた[6]. 日本でも1970年代にルビジウム磁力計やセシウム磁力計を搭載して、ロケットによる電離層電流観測を行った実績があるが、

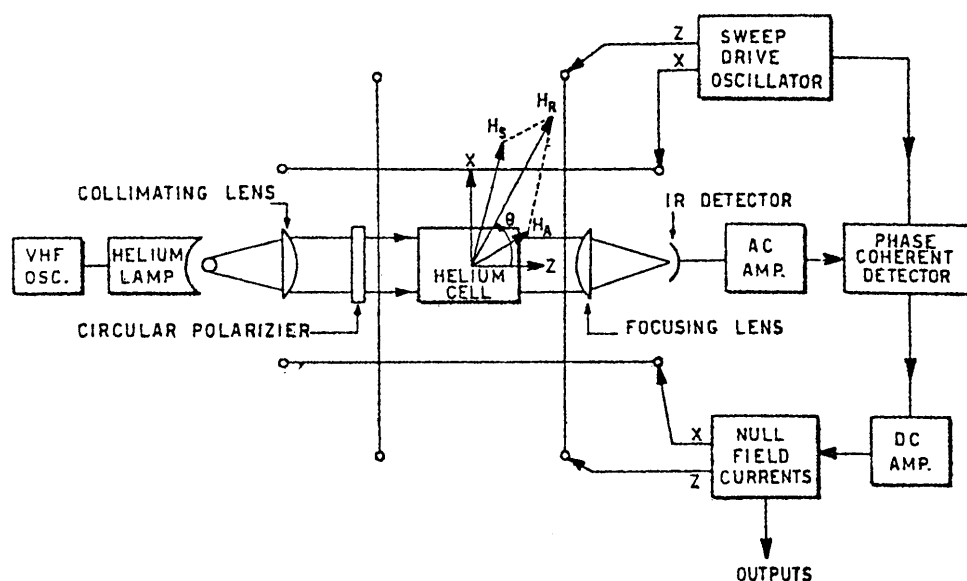


Fig. 9 Schematic diagram of the vector Helium magnetometer [6].

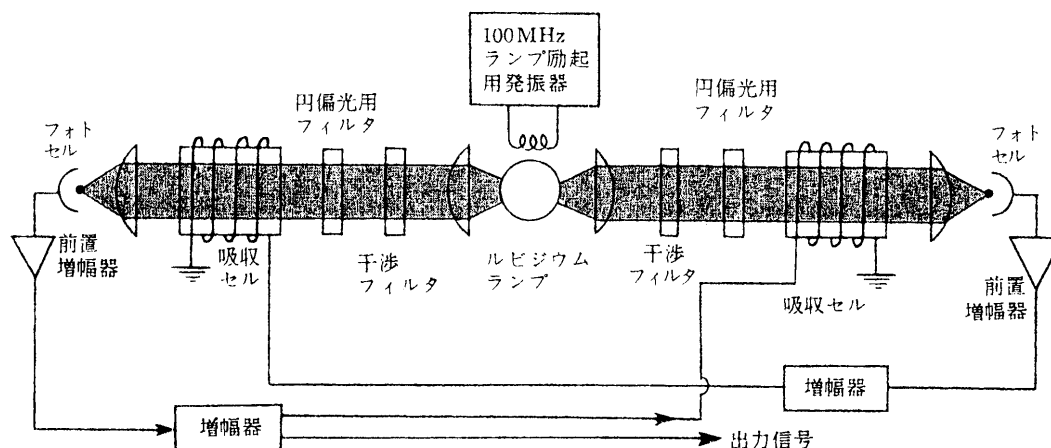


Fig. 10 Schematic diagram of the rubidium magnetometer [3].

近年はフラックスゲート磁力計が広く利用され、高価で取り扱いが難しいこの磁力計は利用が少なくなった。

この磁力計は、Rb や Cs などのアルカリ金属蒸気を封入したガスセルをセンサとし、原子のエネルギーレベルのゼーマン分裂による遷移周波数が外部磁界に依存することを利用した磁力計である。一般にルビジウム (蒸気) 磁力計 (Rubidium Vapor Magnetometer) やセシウム (蒸気) 磁力計 (Cesium Vapor Magnetometer) と呼ばれる。Fig.10 にルビジウム磁力計の構成図を示す。中央のルビジウムランプから Rb^{87} ガスセルに円偏光励起し、エネルギーレベルを基底状態から励起状態に光ポンピングして、磁気量子サブレベル内での状態変化に伴う遷移周波数がその原子のジャイロ磁気率と外部磁界の強度の積となることを利用している。セルを通過した光はフォトセルによって検出され、増

幅して位相変換の後にセルに巻かれたコイルにフィードバックされる。このような閉ループ内での位相遅れがなければ発振し、発振周波数は外部磁界に比例して、その周りに歳差運動する原子磁気モーメントのラーモア周波数となる [3]。外部磁界と光軸とのなす角度によって S/N 比が変わり、感度が悪くなる指向性があることと遷移周波数が外部磁界と直線的でないために共鳴周波数の誤差が生じるという欠点がある。これをなくすために、ガスセルを二重にして中心周波数での共鳴を得ている。また、励起ランプやガスセルの温度を一定に保って光ポンピングを行わせるために温度制御が必要であり、飛翔体搭載に難点がある [7]。

5 その他の磁界測定

磁石のような大きな磁気モーメントを持つ部品や帯磁部品の磁界を計測する測定器として、ホール効果を用いた磁気デバイスによるガウスメーター (Gauss meter) と呼ばれる磁力計がある。ホール効果は、電圧を印加したホール素子を磁界の中に入れると磁界と電流に直角に起電力を生ずる現象である。小型で消費電力も小さくハンドリングが簡単なので、大まかな磁界の強さのモニターセンサとして用いられるが、温度による感度変化が大きく、地球磁場の変動などの検出には感度不足であるので、地磁気観測には余り使われない。ホール素子としては GaAs, InSb, GaAs などが使われ、磁界測定範囲は 100 nT から 10^{10} nT と広範囲である。

また、NiSb や InSb などが磁界の中で電気抵抗が変化することを利用した磁気抵抗素子や Ge, Si などの電気的特性が変化する磁気ダイオードがあるが、いずれも地球磁場よりも強い磁界中 (0.01 T から 10 T 程度) での計測用としてのデバイスである [4][9]。

参考文献

- [1] 小玉一人：古地磁気学，東京大学出版会，(1999)，pp.127-139.
- [2] 力武常次：地球電磁気学，岩波書店，(1972)，pp.23-36.
- [3] 友田好文，鈴木弘道，土屋淳：地球観測ハンドブック，東京大学出版会，(1985)，pp.773-805.
- [4] 川西健次，近角聡信，櫻井良文：磁気工学ハンドブック，朝倉書店，(1998)，pp.109-115.
- [5] 小沼稔：磁性材料，工学図書，(1996)，pp.230-242.
- [6] N.F. Ness：Magnetometers for Space Research, Space Science Review, 11, (1970), pp.459-554.
- [7] 遠山文雄：磁場観測装置，宇宙開発事業団委託業務成果報告書，日本航空宇宙学会，(1980)，pp.187-205.
- [8] Ib Laursen：The Overhauser Scalar Magnetometer, <http://www.iau.dtu.dk/~il/ovhpaper.html>
- [9] 山田一，宮澤永次郎，別所一夫：基礎磁気工学，学献社，(1975)，pp.197-207.
- [10] O. Gravrand, A. Khokhlov, J.L.Le Moueland and J.M. Leger：On the Calibration of a Vectorial 4He Pumped Magnetometer, *Earth Planets. Space*, 53, (2001), pp.949-958.
- [11] 毛利佳年雄：磁気センサ理工学，コロナ社，(1998)，pp.78-88.