

Cs-光ポンピング磁力計の安定度に関する実験結果 およびその考察

佐野 幸三

概要

新標準磁気儀製作にともない光ポンピング磁力計を導入することになった。光ポンピング磁力計は安定度、分解能に関して、他種類の磁力計よりすぐれているといわれているが、44年度に製作した試験用 Cs-光ポンピング磁力計について実さいの動作試験および基本特性に関する実験を行なった結果、本磁力計は極めて温度依存性が強いことがわかった。光ポンピング磁力計の安定度には理論式よりも知れるように吸収セルの横緩和時間をもっとも重要な要素となるが、試験用 Cs-磁力計の同緩和時間はほぼ 2.8ms と実測され、あまり安定度の面からは好ましい値ではないことがわかった。この横緩和時間はランプエキサイターすなわちポンピング光の強さにより変化するものであり、エキサイターの安定化が絶対的に必要であることがわかった。

これらの実験結果について理論と比較し、2, 3 考察する。

§1 光ポンピング磁力計の測定原理および特性

一般に原子は定常磁界中にある場合、原子の磁気モーメント状態は磁場の強さに比例するエネルギー差を持って、いわゆるゼーマンサブレベルに量子化され分離した状態を取る。Fig. 1 に実さいに磁力計に用いるアルカリ原子のうち Cs 原子の基底状態におけるゼーマンサブバンドのエネルギー構造を示した。隣接間レベルのエネルギー差 (E) は、前述したように外部磁場の強さに比例し、地球磁場においては $E = h\nu$ から求まる周波数は RF (Radio Frequency) 領域である。このゼーマンサブレベル間の遷移にもとずいて放射される RF 電磁波を検知すれば、その周波数より磁場を知ることができるが、これはどだいエネルギーが極めて小さく不可能である。そこでゼーマンサブレベル間の遷移とほぼ 1 : 1 に対応して観測される、基底状態から励起状態間の遷移にもとづく (この状態間のエネルギー差は光の領域である。) 光ポンピング効果 (Optical Pumping) を応用した磁気共鳴を観測することにより磁場を測定することが可能になった。これによりゼーマンサブレベル間エネルギーを、 $10^8 \sim 10^{10}$ 倍増巾して検知することができるようになった。この技術は J. Brossel etc (1952)¹⁾ によって最初に成功し、H. G. Dehmelt (1957)²⁾ によって磁力計に応用された。

この技術については種々³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾etc. と述べられているので、Cs ガスを用いた磁力計について以下に簡単に述べる。Cs ガスランプを高周波磁界で励起して発光する光の特定成分 (例えば D_1 光 ($= {}^2S_{1/2} - {}^2P_{1/2}$ 遷移に相当) の +円偏光) を、外部磁界と平行な方向で Cs-ガスセルに照射すると (この光を Z 光と呼ぶ、通常基底状態 (${}^2S_{1/2}$) のゼーマンサブレベルにボルツマン分布している Cs は原子は光を吸収して励起状態 (${}^2P_{1/2}$) に遷移する。遷移した原子は 10^{-8} sec 程度で自然に光を放出してもとの基底状態に戻る。この場合励起状態への遷移は

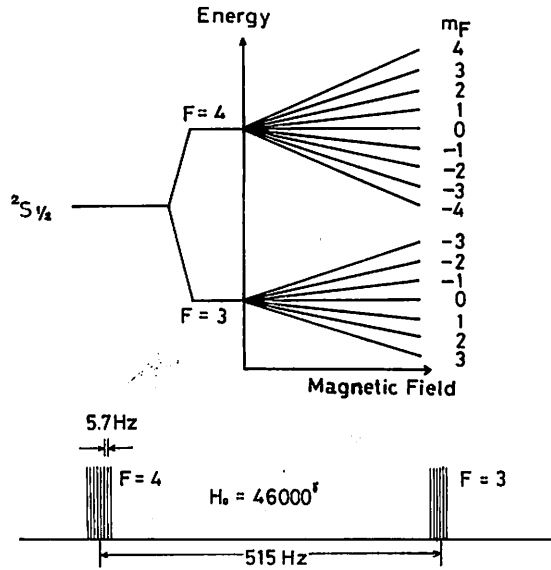


Fig. 1. Energy diagram for Zeeman sublevels of Cs atom at the ground state (upper diagram), and hyperfine spectra of calculated resonance frequency of Cs atom in the usual geomagnetic field of 0.46Γ (lower diagram).

$4m_F = +1$ にしか行なわず、励起状態から基底状態へは $4m_F = \pm 1$ および 0 に遷移するという規則がある。このような遷移を繰返すことにより、基底状態で光の吸収確率の低いレベルほど原子分布が増加し、基底状態のゼーマンサブレベルの原子分布にかたよりができる。この現象は光ポンピングと呼ばれ、また原子が整列するともいう。一方外部磁界と直角な方向にゼーマンサブレベル間エネルギーに相当する周波数（ゼーマンまたはラーモア周波数）の RF 磁場を加えると、この原子整列はこわれ、もとの状態に復帰する。この場合 Z 光と同種類の光（Xポンピング光）をこの方向に照射すると、最初の Z 光と共存することにより、X 光はゼーマン周波数で輝度変調を受ける。この変調を RF 変調と呼び、この輝度変調を光検知器で電気信号に変換し、周波数を測定すれば磁場値を知ることができる。以上が光ポンピングが磁力計の測定原理である。実さいに磁力計として応用する場合は、Z 光と X 光を被測定磁場方向と 45° の方向に照射し共用することができる。更に Fig. 1 に示したように Cs 原子の基底状態のゼーマンサブレベルは、 $F=4$ において 9 本、 $F=3$ において 7 本あり、この構造による磁気共鳴には Fig. 1 の下に示したように、夫々 8 本および 6 本の微細構造共鳴周波数スペクトルを持っている。これらは、大小は別にしてすべて磁力計とした場合の磁気共鳴に関与し、分離することは不可能である。

以上のような原理による RF 変調信号を利用した磁力計としては、二つの方式が考えられる。一つは AFC (Automatic Frequency Control) 方式と他の一つは原子発振 (Self Oscillator) 方式である。AFC 方式は RF 磁場 (H_1 と定義する) を可変発振器 (VCO) により供

給し、RF変調信号とRF磁場との位相差を 90° になるように両信号を位相検出し、VCOの周波数を磁場変化に対応して自動的に制御するものである。このVCOの周波数を知れば磁場測定となる。この信号の位相差が 90° ということは、後述するように共鳴中心周波数で磁気共鳴が起っていることを意味する。原子発振方式のものはわれわれも試験用光ポンピング磁力計として試作したもので、その構成の概略をFig.2に示した。この方式のものはFig.2に示したようにRF変調光検出器(太陽電池)、RF信号増巾器、位相調整器、RF磁場コイルおよびCsガセルの一連のループ系を構成し、このループ系の利得を1より大きくしておけば、この系は自然発振器系を構成することによるものである。この場合AFC方式と同様RF磁場(H_1)とRF光変調信号との位相差を 90° に調整すると、外部被測定磁場(H_0)で定まる共鳴中心周波数で、この系は発振する。この発振周波数を計測すれば磁力計となる。

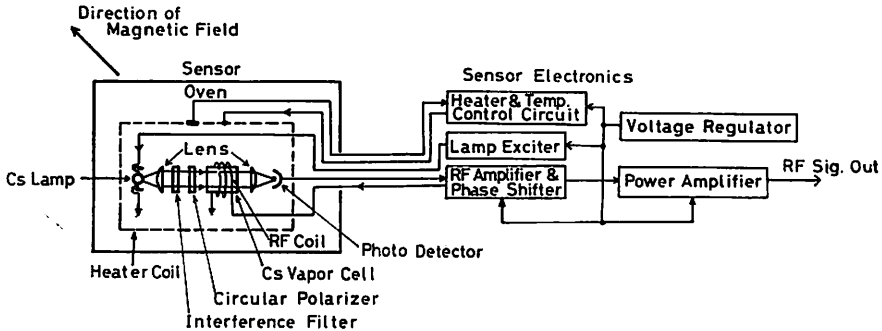


Fig. 2. Schematic diagram of the Cs optical pumping magnetometer of the self oscillator type.

このような原理に基づく光ポンピング磁力計の原理的な磁場測定精度については、後でも議論するが、ここでも簡単にふれておく。うえの二つの方式による磁力計のいずれにおいても、理論的にはRF光変調信号とRF磁場との位相が 90° になっていないと共鳴中心周波数にならず、位相角によりあるシフトした周波数で共鳴発振が起る。したがって磁場測定の絶対値がシフトすることになる。これは光ポンピング磁力計の絶対値精度に関する重要な要素である。この位相を 90° に正確に設定することはそれほど容易ではない。例えば後述するように 1° の位相誤差があると磁力計によっては $0.1\gamma \sim 0.2\gamma$ 程度のシフトを生じる。このことは磁力計の絶対値精度に関してわれわれが要求する精度からすれば無視できない。

更にもっと重要なことはFig.1に示したように磁気共鳴中心周波数が複数のゼーマンサブレベルに相当し、隣接間で約 5.7Hz (約 2γ)の周波数差を持つ微細スペクトル構造をしており、これらを単独には分離することは不可能で、これらがある不特定状態で結合され、見かけ上一つのスペクトル構造として動作し、その中心周波数は一義的には定まらないことである。これも絶対値精度に関する重大な不確定要素となるものである。また微細構造スペクトルが複雑になると、例えば $F=4$ および $F=3$ 状態が結合されたような場合においてはうえのことは当然問題になるが、更に見かけ上にしても共鳴中心周波数での共鳴が、前述の位相

角 90° で起るとはかぎらなくなってくることも無視できない。

以上の主な理由により光ポンピング磁力計の絶対値精度は、数ガソマの不確実さを一般に持っている。しかもこれらは温度、光の強度、外部磁場と光軸との角度などにより大なり小なり影響を受ける。すなわちこれらは温度シフト、角度シフトおよび光強度シフトと呼ばれ、その実態は種々な人達³⁾⁷⁾によって報告され、理論的にも究明されている。ここでも温度および光強度シフトについての問題を主題にして、我々の C_s -磁力計で行なった実験結果とそれについての2, 3の考きつを述べる。

§2 C_s -磁力計の安定度に関する試験

44年度に日本電気K.K.の協力で製作した単一セル原子発振型 C_s -磁力計の安定度試験を46年度に実施した。同型の三菱電気K.K.製の C_s -磁力計の安定度および各種シフト特性について大地等⁷⁾が報告しているが、ここでも同様の方法で試験を行なった。すなわち C_s -磁力計と地震予知研究観測用に製作設置されているMO-PEI型プロトン磁力計との測定値を比較した。測定値は全磁力値である。 C_s -磁力計の計測は10 sec ゲートで測定し、それを $F=0.285801f+1.6\gamma$ (F =全磁力値, f =周波数計測値 H_z) で全磁力値に変換した。

最初に C_s -磁力計とプロトン磁力計とを比較して、どの程度の精度で C_s -磁力計の安定度が議論されるかを考えてみる。一般にプロトン磁力計は一個一個の単独の測定値には $0.3\gamma\sim 0.4\gamma$ 程度のバラツキはあるが、長時間のドリフト的な不安定さは原理的にはないものである。しかしこれについても 0.1γ の精度の長期間の安定度を問題にするような場合には、実さい上ドリフト的な不安定さを無視することはできない。Fig. 3に柿岡におけるMO-P型

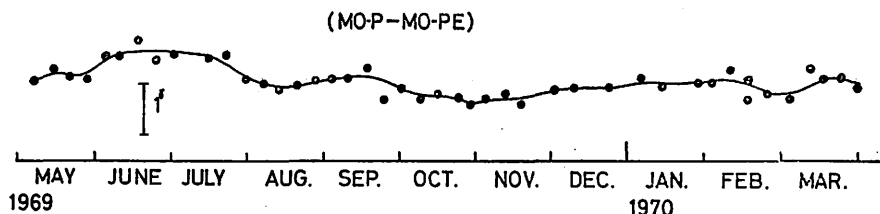


Fig. 3. Variation of the difference in geomagnetic total force between simultaneous values measured by two different proton magnetometers equipped with the distance of a few handrend meters in the Kakioka Magnetic Observatory.

およびMO-PEI型プロトン磁力計相互間の測定値の差の年間の変化の推移を示したが、これより分かるように年間ほぼ 1γ 近くの変化がみられる。これは単なる測定誤差とも考えられず、別の理由によるものと考えられる。またこれはプロトン磁力計の器差の変化(安定度)によるものだけとは断定できないが、いずれにしても長期間の 0.1γ 精度の安定度を論ずる場合、この種のプロトン磁力計の測定値の変動は無視できない。しかしながら今回の比較試験は長くて数日を対象とするもので、ここではプロトン磁力計のこの種の不安定さはないものと仮定して議論を進める。一方プロトン磁力計のバラツキについてはFig. 4に示すよ

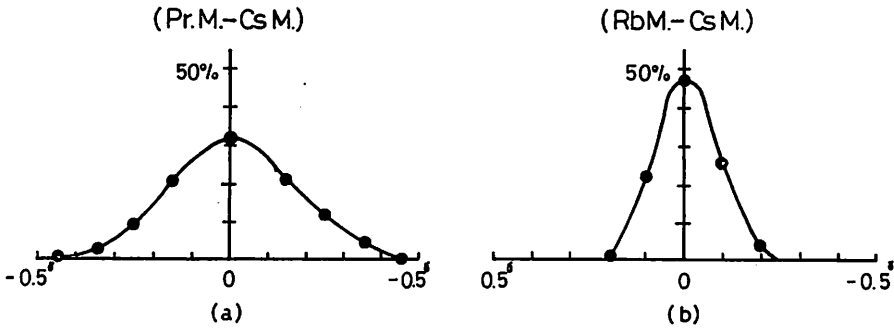


Fig. 4. Distributions of occurrence percentage in the deviation of difference between simultaneous values of total force measured by two magnetometers for the two cases of the pairs; (Pr.M.—Cs.M.) and (Rb.M.—Cs.M.). Pr.M., Rb.M. and Cs.M. indicate the proton, Rb-optical pumping and Cs-optical pumping magnetometers, respectively.

うに、光ポンピング磁力計よりも相当に大きい。すなわち Fig. 4(a) はプロトン磁力計と光ポンピング磁力計による測定値の差の平均からの分散を示したものであり、Fig. 4 (b) は2台の光ポンピング磁力計間の同様の分散を示したものである。説明するまでもなくこの2つの分散よりうえのことは明きらかである。しかしながらプロトン磁力計のバラツキの分散も正にガウス分布をしており、プロトン磁力計の測定値の平均を取れば相当の精度がえられる。結論として今回の C_s -磁力計と MO-PEI 磁力計の測定値の毎時平均値（毎分または毎10分サンプリング）の比較により、 C_s -磁力計の安定度をほぼ $\pm 0.1\gamma$ の精度で議論することができる。以下その比較結果を示す。なお C_s -磁力計は種々の事情でしばしば設置位置、周囲条件および回路状態を変え、または変っているため、今回は長期間の安定度および絶対値精度については問題にしない。

Fig. 5 に C_s -磁力計が比較的安定な動作をしている場合の比較結果を示した。黒丸でプロットしたものは10分インターバルで同時測定した11月17日～同18日（1970）における C_s -磁力計（10 sec 間計測）と MO-PEI プロトン磁力計（約 1.2 sec 間計測）の測定値の差で、その下の実線で結んだ黒丸はその毎時平均値を示したものである。横線は両日の同じレベルを示している。実線で結んだ×印はその日の外気温をプロットしたものである。なお黒丸の分散が相当に大きいようであるが、これは前述したように主としてプロトン磁力計のバラツキによるもので、この期間は通常よりもやや大きく、プロトン磁力計の動作状態がやや悪かったことを附記しておく。

Fig. 5 の毎時平均値プロット曲線より知れることは、 C_s -磁力計は両日ともほぼ $\pm 0.2\gamma$ 程度の不安定さを示しており、11月18日においては外気温とこの変化の様相が小さな位相の違いを除いて極めてよい逆相関の特性を示していることである。11月17日においては温度変化も小さく、この様相は見られず不規則な変動をしている。この C_s -磁力計の極めて良い外気温と関係の深い不安定さは、ほぼ全期間にみられる特性で、更にこの特性の明瞭な例を示

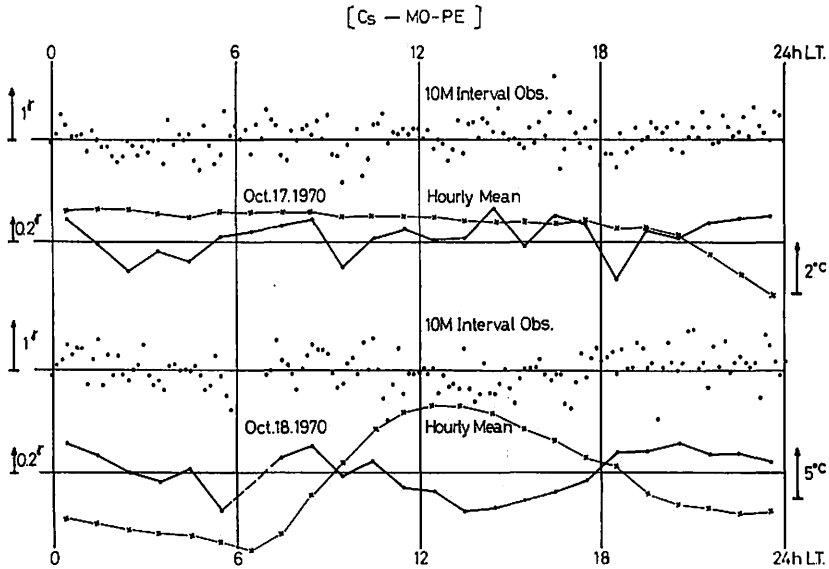


Fig. 5. Stability of resonance frequency in the Cs-magnetometer and variation of open air temperature on Oct. 17 and 18, 1970. Scattered dots indicate differences between simultaneous values of total force measured by the Cs-magnetometer and the proton magnetometer, MO-PE, at every ten minutes. Dots connected by straight line show their hourly mean values. Crosses indicate hourly open air temperatures.

す。なお毎時平均値にも見られる短時間の不規則状変化は、主にプロトン磁力計にまだ責任があるように思われる。

Fig. 6 は数少ない外気温にあまり関係のない他の 1 例（8 月 3 日）を示したものである。ここでは毎時平均値をプロットしていないが、Cs-磁力計の安定度と外気温との相関は Fig. 5 の 11 月 17 日の例と同様にあまり見られない。図の上段にプロトン磁力計の計測値をラフに示したが、これとも全く関係がない。ともかく以上 Fig. 5 および Fig. 6 に示したものが、今回試験をした期間で、Cs-磁力計が比較的安定動作をしめた代表例である。

以下に示すものはCs-磁力計の絶対値シフトが外気温と全く良い相関を示した例のうちの代表的な 3 例である。まず Fig. 7 は 7 月 23 日のもので、Cs-磁力計の絶対値は正に外気温と逆相関の温度変化を示している。このように両者の相関は良いのでCs-磁力計の温度シフトの温度係数が正確に計算でき、この場合は $-2.5\gamma/12^\circ\text{C} = -0.2\gamma/^\circ\text{C}$ の温度係数となる。同様に前述の 11 月 18 日の場合は $-0.4\gamma/12^\circ\text{C} = -0.03\gamma/^\circ\text{C}$ となり、7 月 23 日の約 1/6 にすぎない。一方 8 月 3 日および 11 月 17 日の例からは計算できない。ここで注意しておかなければならないことは、7 月 23 日および 8 月 3 日におけるCs-磁力計の状態は、ランプエキサイターの電源電圧を 40V から 22.5V に変えた以外は変っていないことである。これは重要なことでこの種の温度シフト現象はランプエキサイターの電圧、換言すればポンピング光の強

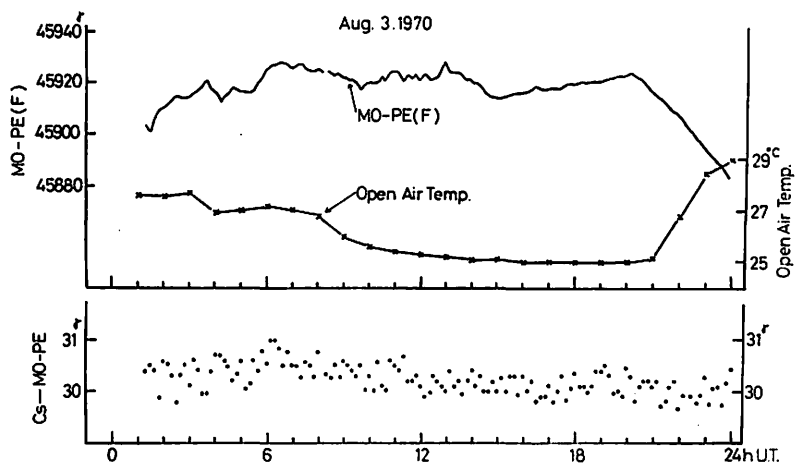


Fig. 6. Stability of resonance frequency in the Cs-magnetometer, variation of open air temperature and variation of the total force on Aug. 3, 1970. Scattered dots indicate differences between simultaneous values of total force measured by the Cs-magnetometer and the proton magnetometer, MO-PE, at every ten minutes. The upper curve of full line shows the variation of total force measured by MO-PE. Crosses indicate hourly open air temperatures.

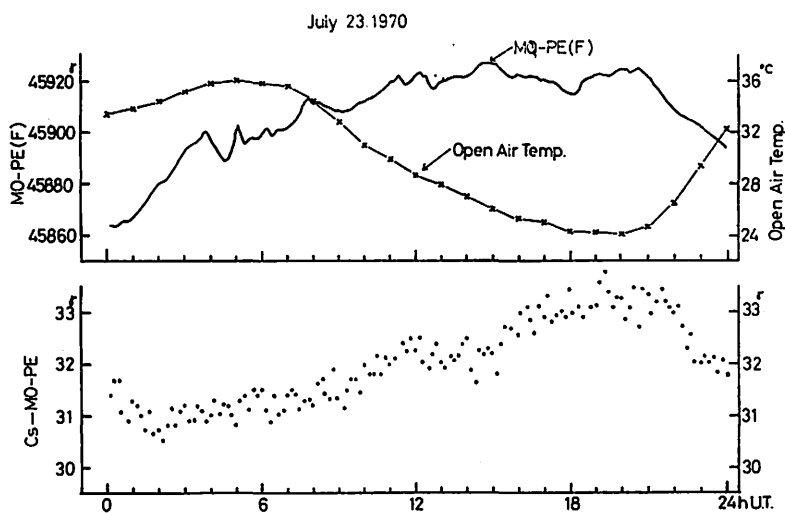


Fig. 7. Stability of resonance frequency in the Cs-magnetometer, variation of open air temperature and variation of total force on July 23, 1970. The detail of description is the same as Fig. 6.

度が密接な関係を持っていることを示している。更に両日の間に約 1.2γ の絶対値シフトがみられるが、これは温度シフトでは説明できない。すなわち両日の外気日平均温度には約 4°C の差があり、 C_s -磁力計の絶対値が大きくなった7月23日の方が温度が高くなっている。これは通常検出された温度特性とはセンスが反対である。したがってこれは後で実験事実からも証明できるように、ポンピング光強度変化にもとづくシフトだと考えなければならぬ。

次に更に温度の影響を受けている11月18日から同19日の結果を Fig. 8 に示した。この例

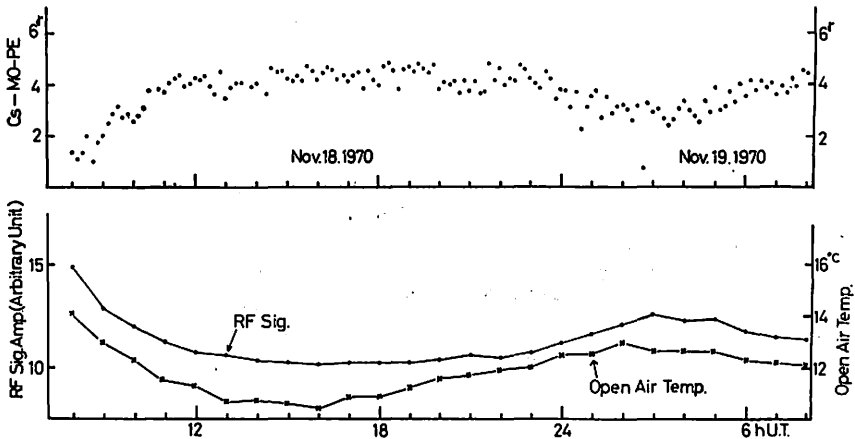


Fig. 8. Stability of resonance frequency in the Cs-magnetometer, variation of open air and variation of amplitude of RF modulation signal on Nov. 18 and 19, 1970. Scattered dots indicate differences between simultaneous values of total force measured by the Cs-magnetometer and the proton magnetometer, MO-PE, at every ten minutes. Dots connected by straight line in the lower part show the amplitude of RF modulation signal. Crosses indicate hourly open air temperatures.

の同様の温度係数は $-3.0\gamma/4^\circ\text{C} = -0.75\gamma/^\circ\text{C}$ となり、一段と温度シフトが大きくなっている。この日は同時に RF 変調信号の電力増巾器からの出力を整流し、ペンレコーダーに記録した。Fig. 8 の下部にその対応する期間の振巾変化を任意スケールで示した。これに見られるように RF 変調信号の大きさも、 C_s -磁力計の絶対値シフトと逆相関の関係を良く示している。しかしこの事実を即 RF 磁場の変動と考えても、これは絶対値シフトの原因となるものではなく、その結果またはそれに伴って生じた現象ではないかと考えられる。これは後述の実験結果からも結論されることである。

最後に異常に大きな温度シフトを示した11月2日から同3日の例を Fig. 9 に、前図と同様の形式で示した。但しこの場合はランプエキサイター電源電圧を通常26V 近辺で動作させていたものを、30V に上げ、回路利得も相当に上げた状態で動作させたものである。すなわち C_s -磁力計の作動条件を悪くして、その安定度を試験したもので全く大きな絶対値シフト

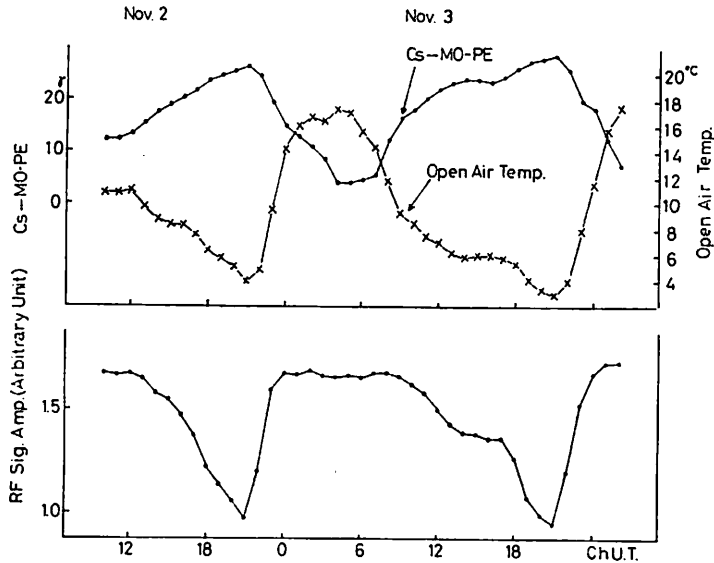


Fig. 9. Stability of resonance frequency in the Cs-magnetometer, variation of open air temperature and variation of amplitude of RF modulation signal on Nov. 2 and 3, 1970. Dots connected by straight line in the upper part of the figure indicate hourly means of the difference between simultaneous values of total force measured by the Cs-magnetometer and the proton magnetometer, MO-PE, at every minutes. Crosses show hourly open air temperature. Dots connected by straight line in the lower part of the figure indicate the amplitude of RF modulation signal.

の温度特性を示している。温度係数にして $-22\gamma/13^{\circ}\text{C} = -1.7\gamma/^{\circ}\text{C}$ と誠に大きな数値となっている。この場合残念ながら正確な光強度シフトに相当するシフト量は記録されていないが、 20γ 程度はあったと推定される。

以上 Fig. 5 から Fig. 9 に今回の Cs-磁力計の動作安定度試験結果を示したが、一部を除き全く外気温と逆相関の関係がみられた。その影響の度合は Table 1 にまとめて示したように種々雑多であり、このことに限ればそれが何によるか充分にはつかめなかった。2, 3 確かな事実とし次の事は言える。ランプエキサイターの電源電圧すなわちポンピング光の強度に大いに関係があること。外気温と密接な関係があり、これはセンサー自身の温度変化に起因するものではなく（一次的原因である）、帰還増巾器系に主として起因するものであること。なぜならばセンサーは温度制御をし、すべての場合 43°C に設定された恒温槽になっているからである。少なくとも冬期は問題（冬期には温度制御しきれなかった）があるとしても、夏期および中間期には、十分に温度制御できたはずである。実さいに帰還増巾器内部温度を測定しておけばよかったが、今回は外気温としか比較することができなかった。帰還増巾器はセンサーと同じ簡易観測小屋に設置されており、ほぼ外気温の直接の影響を受け、少

Table 1. Coefficients of the resonance frequency shift of the Cs magnetometer due to the open air temperature.

No. of Test	Date (1970)	$\Delta f^{1)}$	$\Delta T^{2)}$	Temperature coefficient
No. 1	Oct. 17	2 ^{Hz} 0.5 γ	4.6°C	? Hz/°C ? γ /°C
No. 2	Oct. 18	2 0.5	14.3	-0.2 -0.04
No. 3	Aug. 3	2 0.6	4.0	? ?
No. 4	July 23	8 2.5	12.1	-0.7 -0.2
No. 5	Nov. 18, 19	11 3.0	3.8	-2.9 -0.8
No. 6	Nov. 2	79 22.0	13.3	-5.9 -1.7
No. 7	Nov. 3	75 21.0	14.7	-5.1 -1.4
No. 8	June 9 ³⁾	46 13.0	7.7	-6.0 -1.7

- 1) Range of frequency shift
- 2) Range of temperature change.
- 3) This data from the direct observation due to temperature of the sensor electronics.

なくとも平行な温度変化をしたと考えられる。なお冬期におけるセンサー内部温度は設定温度より時々数度低めを示していた事実がある。

更にもう一つ重要な試験結果は、期間が短いとしてもほとんどCs-磁力計の安定度が外気温に影響されない時もあることである。このことは光ポンピング磁力計の安定度、特に光強度シフト特性に関する重要なポイントになる。このことは後で議論する。

このようなCs-磁力計の動作試験結果および簡単な分析結果より、Cs-磁力計の動作条件についてもっと本質的かつ基本的な観点からの特性実験をしなければならないと結論される。そこで各種の基本的な実験を日本電気K.K.の全面的な協力のもとに実施した。次節で光ポンピング磁力計の特性の理論式にしたがった実験結果について述べる。

§3 光ポンピング磁力計の理論的動作特性およびCs-磁力計の特性実験結果

1) 光ポンピング磁力計の理論的動作特性

光ポンピング磁力計の動作原理については第1節で述べたが、ここでその動作特性についての理論的計算結果とそれより求められる動作特性について簡単にふれておく。BellおよびBloom (1957)⁹⁾はBloch方程式を用いて、ゼーマンサブレベルが2本しか存在しない単純な場合のポンピング効果を考慮に入れた光ポンピング光の磁気共鳴吸収特性を計算した。これをもとにして久保⁹⁾の同様のモデルについて、 D_1 および D_2 光が同じ強度で混合しており、吸収セルはバッファガスを含まない場合について計算を行なった。ここで基底レベルから励起レベルへのポンピングレートは同じであり、基底レベルへの復帰確率は相違し、夫々Kおよび1-Kであると仮定される。この久保の計算結果によれば磁気共鳴におけるポンピング光のRF変調振幅(S_x)および位相(φ)特性は次式で表わせる。

$$S_x = \frac{\gamma H_1 S_1 S_2 \sqrt{1 + (S_2 \Delta \omega)^2}}{1 + (S_2 \Delta \omega)^2 + \gamma^2 H^2 S_1 S_2} (2K-1) C_0 \cos(\omega t + \varphi) \quad (1)$$

$$\varphi = \tan^{-1}\left(-\frac{1}{S_2 \Delta\omega}\right) \quad (2)$$

$$\Delta\omega = \omega_0 - \omega \quad (3)$$

ここで H_1 は前述の RF 磁場の大きさ、 $\gamma = \omega_0/H_0$ は磁気回転比、 S_1 および S_2 はポンピング効果を含む夫々縦および横緩和時間、 C_0 はポンピング光の強度およびゼーマンサブレベルに分布する原子総数などで定まる定数である。

以上3式により光ポンピング磁力計の作動を論じることができ、動作条件を考察することができる。これらの特性の概略を Fig. 10 に示した。この図よりもわかるように RF 変調信

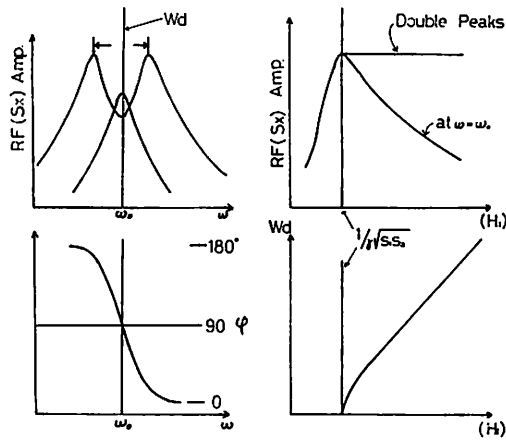


Fig. 10. Schematic representations on characteristics of the calculated modulation signal (S_x) around the resonance center frequency. W_d , φ and H_1 are the width of the angular frequency between double peaks, the phase angle and the intensity of RF magnetic field, respectively.

号 (S_x) の振巾は、 H_1 の強度により特性が大きく変り、 $H_1 \geq \gamma/\sqrt{S_1 S_2}$ となると S_x は Double peak となり、共鳴中心周波数の振巾はしだいに小さくなっていく。したがって $H_1 \cong \gamma/\sqrt{S_1 S_2}$ で動作させるのが好ましいと考えられる。 S_x と H_1 との位相差は前述したように共鳴中心で 90° となり、位相が変れば共鳴周波数および S_x の振巾が変ることは当然である。この位相差の変動による共鳴周波数の変化比は、磁力計の安定度に関する重要な要素である。第1次的には共鳴中心点 ($\Delta\omega=0$) における位相曲線のグラジエントにより、磁力計の本質的な安定度を表わすことができる。位相曲線のグラジエント $d\varphi/d(\Delta\omega)$ は

$$d\varphi/d(\Delta\omega) = -S_2/\{1 + (\Delta\omega S_2)^2\} \quad (4)$$

で現わされ、 $\Delta\omega=0$ 点においては $-S_2$ となる。すなわち吸収セルの横緩和時間が光ポンピ

ング磁力計の安定度に関する絶対的な要素となり、 S_2 が大きいほど安定した動作をすることが知れる。

いずれにしても RF 変調信号 (S_x) の特性は RF 磁場 (H_1)、縦、横緩和時間 (S_1, S_2) および位相角 (φ) によって大きく変化する。また S_1, S_2 はポンピング光強度に一次的に依存するので、この光強度によっても大きく変化することはゆうまでもない。この理論的結果の実験による検証は久保等⁽⁶⁾⁷⁾ によって行なわれ報告されているが、ここでもまずわれわれの C_s -磁力計のこのような特性を実験的に求めて、理論式と比較してみた。

2) C_s -磁力計の RF 変調信号の特性実験結果

Fig. 11 にわれわれの C_s -磁力計で測定した RF 変調信号 (S_x) および位相 (φ) 特性の実験結果を示した。この測定は RF 磁場 (H_1) を可変発振器よりその振巾および周波数を種々

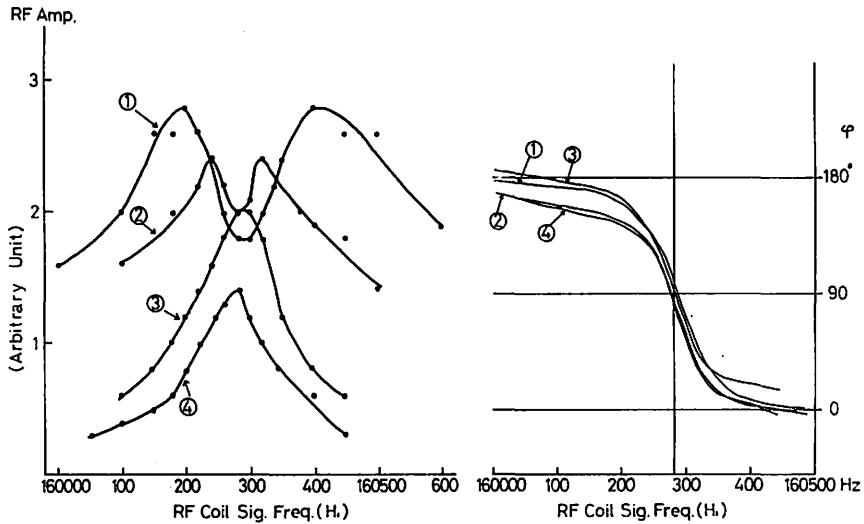


Fig. 11. Measured characteristics of RF modulation signal (S_x) with the parameter of the intensity of RF magnetic field, H_1 .

Relative intensities of H_1 are 4:3:2:1 for ①:②:③:④.

に変えて与え、RF 変調信号を独立の系として帰還増巾器で増巾して、その振巾および両信号の位相差を 2 現象シンクロスコープで測定したものである。なおランプエキサイターの電圧は 22.3V、セル温度は 50°C で実験を行なった。

予想される当然の結果として H_1 大きさにより、Single peak と Double peak を示し、Double peak の S_x の振巾が H_1 の大きさによって違う点を除けばほぼ前述の理論式どおりの特性を示している。ここでは久保等⁽⁶⁾⁹⁾ によって報告されているような Double peak の振巾が左右相違するという結果はみられない。これは注目すべき事実で磁気共鳴に関与するスペクトルが単純であることを示しており、 $F=4$ 状態のみが関与していると考えられる。一方位相特性については理論式から H_1 の依存性がないが、実験結果からも概略についてはそ

の通りである。しかし測定精度からしてあまり細かな点についてはいえないが、ある弱い依存性はあるようで、これは久保等⁴⁾⁹⁾の報告ともほぼ一致している。位相特性に関してはその共鳴中心周波数において、正確に 90° であったかどうかの確かめは行なえなかった。Fig. 11では共鳴中心において 90° であると仮定して表示してある。この種の位相測定においては、光検知器より帰還増巾器（位相器も含む）までの位相シフトを補正しなければならない。この点の正確なチェックはそれほど簡単ではなく、今回は残念ながら行なえなかった。実さいに測定した共鳴中心附近の位相差は 30° であった。原子発振型方式の帰還増巾器等のうえの系の位相シフトは 90° に設定されているはずのものであるが、そうだとすれば共鳴中心においてうえの両信号の位相差は 120° となり、これは理論結果よりも 30° ずれていることになる。これは考えにくく、帰還増巾器系の位相シフトがたまたま 120° 近くに設定されていたためと思われる。なぜならば Fig. 11 で示した S_2 特性および位相特性が夫々線対称および点对称に近いことから考えられることである。いずれにしてもこの点は重要なことで正確に実験しておく必要がある。

Fig. 11 の結果から C_s -磁力計の安定度に関する共鳴中心附近での位相角と共鳴周波数のシフトとの関係は、ほぼ $10\text{Hz}/10^\circ = 2.8\gamma/10^\circ$ と求められる。これより逆算して、セルの横緩和時間 (S_2) は 2.8ms となる。この値は後述するように C_s -磁力計の安定度の観点か

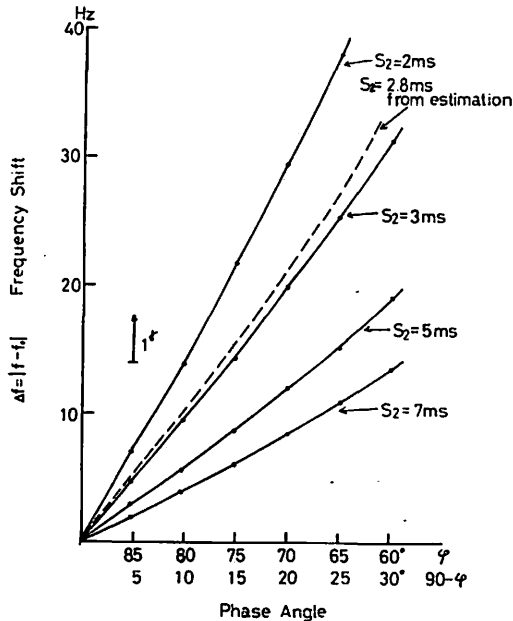


Fig. 12. Calculated shift in the resonance frequency due to the change in the phase angle with the parameter of transverse relaxation time (S_2). The one shown by broken line is what is for the transverse relaxation time of 2.8ms obtained from the estimation in the present experiment.

らすれば、あまり好ましいものではない。なおこの特性は H_1 の大きさによって前述したようにあまり変ることはないが、ランプエキサイター電圧すなわちポンピング光の強さによって大きく変わる。このことは理論式からも知れる当然の結果である。すなわち Fig. 12 に (3) 式より導びかれる位相角 (φ) に対する共鳴周波数のシフト量を、横緩和時間 (S_2) をパラメータにとり示したように、 S_2 の値によりこの特性は大きく変わる。 S_2 はポンピング効果を含むもので、 $S_2 = 1/(P + 1/T_2)$ であり、ポンピング光の強度に依存するのでその結果は当然である。但し、 P はポンピングレート、 T_2 は横緩和時間 ($P=0$) である。この図からも明らかなように S_2 は大きければ大きいほど磁力計の安定度特性は良いものとなる。点線で示したものは今回実測されたもので S_2 の値としては小さく、前述したように特性上好ましくないものである。これはポンピング光の強度が強すぎたためによるものか、 T_2 が小さいためによるものか定かでないが、今後早急に検討していきたい。なお参考までに久保⁹⁾は S_2 の実測値として 4.0ms と 5.6ms (光の強度後者は前者のほぼ 2 倍) および T_2 として 15ms と報告していることを附記しておく。

いずれにしてもこの Fig. 12 に示した特性から光ポンピング磁力計の本質的な安定度は詳細に議論される。後節でこれらについては今回の C_s -磁力計の安定度試験結果と関連して、まとめとして議論する。

3) C_s -磁力計各部の温度特性実験結果

光ポンピング磁力計の共鳴周波数シフトの原因となるものとして、うえに述べてきた吸収セルの横緩和時間、(S_2)、位相角 (φ) および RF 磁場 (H_1) の他に、これと密接に関連するが、第 2 節で事実として示したように温度変化に起因するシフトがあった。このことを究明するために C_s -磁力計のセンサーエレクトロニクス、吸収セルおよびランプハウス各部の共鳴周波数シフトにおよぼす温度特性を求めた。

Fig. 13 はセンサーエレクトロニクス (帰還増巾器およびランプエキサイター) の温度対 C_s -磁力計の周波数相対的シフト量をプロットしたものである。図より明らかなように両者は全く直線的な関係を示している。すなわちセンサーエレクトロニクスの温度が上がると C_s -磁力計は発振周波数が低くなるセンスでシフトする。この周波数シフトの温度係数は $-1.7\gamma/^\circ\text{C}$ の値を示し、Fig. 9 でみた C_s -磁力計の外気温に対する温度係数と全く同じ傾向を示している。ではこれはセンサーエレクトロニクスのどの部分の温度特性であろうか? まず単的に帰還増巾器 (位相器も含む) の位相変化が考えられるが、これに関して実測したところ $0.2^\circ/^\circ\text{C}$ 程度の変化しかなかった。これによるシフトは小さく、とうていいうえのような大きな温度係数は説明できない。となると位相特性に重大な関係を持つランプエキサイター回路にはほとんどすべての責任があることになる。この点については十分な追求がなされていないが、これはランプエキサイター回路の温度変化に伴うポンピング光の強度変化による、いわゆる光強度シフトに起因するものであろう。光強度の直接の測定はないが、それ以外に考えられない。しかしこの点は光強度シフトに伴うものとしても相当に大きいものであり、今後さらに追求して行く方針である。ただ今回は次のような実験を行ないある程度の可能性を事実としてつかむことができた。

すなわちランプエキサイターの電圧(電流)を変化して、それによる周波数シフトを調べ

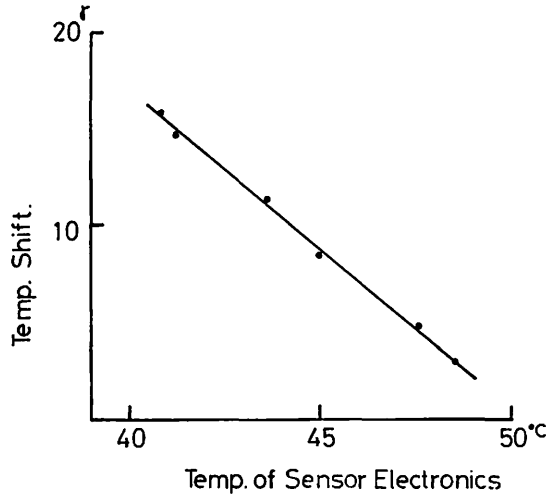


Fig. 13. Shift in the resonance frequency of the Cs-magnetometer due to the temperature change of the sensor electronics is shown in the relative scale of gamma.

てみた。結果を Fig. 14 に示した。測定点は3点だけで正確なことはあまりいえないが、平均的にみてエキサイター電圧の1%の変化に対して約 2γ のシフト、最大にみると約 5γ のシフトを示している。これは相当に大きい。この程度のエキサイター回路の温度特性は充分に考えられるところである。しかしながら実験事実としてはこのことによりエキサイター回路の温度特性として今までに述べてきたCs-磁力計の温度シフトは充分に説明できるが、理論式よりこれを如何に説明するかという点になるとそれほど容易ではない。エキサイター電圧の数%の変動でポンピング光の強度が少なくとも数倍に変化したとしなければ説明がつかない。これは相当に考えにくいことである。ただ一つ考えられることはこの実験を実施した時のCs-磁力計の状能（動作条件）が相当に悪い条件にあったのではないかということである。なぜならば第2節の Fig. 9 に示した最大級に悪い状態の場合の温度特性に、実験結果は極めて近いからである。この点についても最後にまとめて議論するが、他のCs-磁力計の光強度シフトとして、三菱電気の安藤³⁾は光の強度10%の変動に対して、 $0.4\gamma \sim 0.5\gamma$ の周波数シフトを観測したとの報告があることを記しておく。

次にランプハウスおよび吸収セルのいわゆる温度シフト（主に共鳴周波数のスペクトル構造変化に起因するもの）の実験結果を Fig. 15 に示した。両者とも周波数シフトの温度係数としては $0.3\gamma/^\circ\text{C}$ 程度である。但しセンスは互に反対であり、吸収セルは負、ランプハウスは正の温度係数となっている。この結果は種々報告されている温度シフトと大差はない。この実験事実によってはとうていCs-磁力計の大きな温度依存性は説明されない。但し小さな $0.4\gamma \sim 0.5\gamma/\text{Day}$ 程度の不安定さは、これによっても量的には説明がつく。

最後に Fig. 16 に吸収セルの温度と RF 変調信号 (S_x) の大きさとの関係を、 H_1 をパラメ

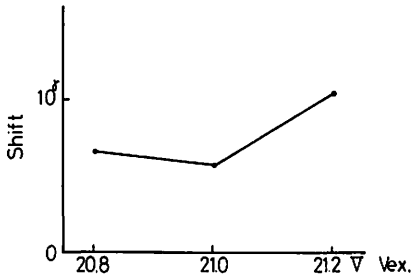


Fig. 14. Shift in the resonance frequency of the Cs-magnetometer due to the voltage change of the lamp exciter output is shown in the relative scale of gamma.

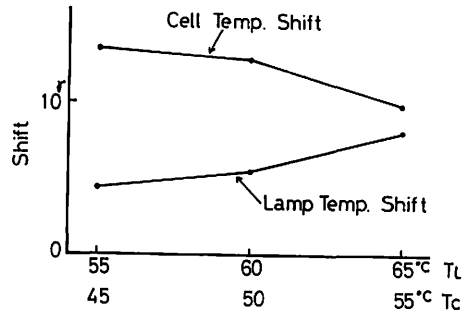


Fig. 15. Shifts in the resonance frequency of the Cs-magnetometer due to the temperature change of the lamp house and the absorption cell are shown in the relative scale of gamma. T_L and T_C indicate each temperature of the lamp house and of the absorption cell, respectively.

ーターにして示した。この実験は第2節で示した RF 変調信号の温度変化を究明するために行なったものである。Fig. 16 にみられる特性は大きな温度依存性がみられ、大体 H_1 の大きさに無関係に吸収セル温度 45°C で、 S_x の振巾は最大になり、これより温度が高くても低くても S_x の振巾は急激に小さくなるような特性を示している。実さいの C_s -磁力計の場合は

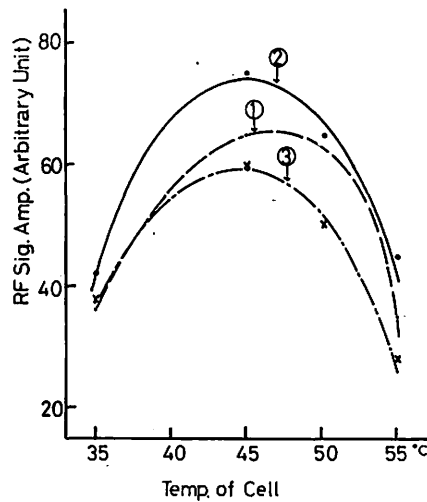


Fig. 16. Variation of the amplitude of RF modulation signal due to the change of the temperature in the absorption cell with the parameter of the intensity of RF magnetic field, H_1 . Relative intensity of H_1 are 4:3:2 for ①:②:③.

条件によっては、吸収セルの温度変化により RF 変調信号が小さくなり、これにともなって RF 磁場が小さくなり、また変調信号が小さくなるといった一連の関係で、RF 変調信号の温度変化は説明できるように考えられる。なおここには示さなかったが、ランプハウス温度と共鳴周波数シフトとの関係は、温度 $50^{\circ}\text{C}\sim 75^{\circ}\text{C}$ の範囲内ではほぼ平坦な特性を示している。

§4 実験結果についての考察

今回の Cs-磁力計作動試験および諸特性実験結果をまとめると次のとおりである。

(1) 試験用に製作した Cs-磁力計は、外気温と極めて良い逆相関の不安定性（共鳴周波数シフト）を持っていること。しかもその度合すなわち温度係数は日によって種々雑多な値を示していること。しかし今回の結果からは温度係数が常に負、つまり外気温と周波数シフトは逆相関である特性だけを示していること。

(2) うえの特性の例外として、期間は極めて短い、時々両者には関係がないとみなされる日があること。

(3) 共鳴周波数の温度シフトは主としてランプエキサイター回路の温度特性に起因するものであること。

(4) RF 変調信号の振巾は(1)および(2)の現象に関連して、外気温度変化と極めて良い相関を持って変動すること、（但しこの実測例はそれほど多くはないが、実測例では全てそうであった。）

(5) うえの事実に関連する RF 磁場の大きさの変化による共鳴周波数のシフトへの影響は全々ないとはいえないが、決定的に大きいものではないこと。換言すれば 50% 程度の RF 磁場の変動に対しては、ほとんど無視されること。

(6) ランプおよび吸収セルの共鳴周波数の温度シフトは、ほぼ $0.3\gamma/^{\circ}\text{C}$ 程度であること。

(7) Cs-磁力計のある動作状態において、実測されたポンピング効果を含む（ポンピング光が照射されている状態）横緩和時間 (S_2) は、2.8ms であったこと。これは安定度の観点からすれば少々短か過ぎること。

(8) 吸収セルの温度により RF 変調信号の振巾は大きく変化し、ほぼ 45°C で最大値を示していること。

以上が今回実施した Cs-磁力計に関する動作試験および実験結果の主な点である。これらの結果についての解釈は？ Cs-磁力計の安定動作条件は？ 現在の Cs-磁力計の問題点は？ といったことについて、2, 3 考察してみる。

まず今回安定度試験を行なった Cs-磁力計の温度依存性についての問題は、現在なお十分に実態が判明したとは言えないが、次のように考えることが可能である。定性的には前にも言ったように、ランプエキサイター出力の温度変化に伴うポンピング光の強度が大きく変わり、これにもとづく横緩和時間 (S_2) の変化等による共鳴周波数のシフトとして説明がつく。すなわち横緩和時間 (S_2) が変化すると、Fig. 12 に示したように共鳴中心周波数 (ω_0 , $\Delta\omega=0$) 点以外においては、位相角 (φ) がずれておれば、 S_2 とほぼ直線的な関係で共鳴周波数 (ω) はシフトする。またこの位相角 (φ) のずれの大きさによりこの共鳴周波数シフト量は変ってくる。このことにより Cs-磁力計の周波数シフトの温度係数が、種々雑多である事実も説明が

つくと考えられる。さらに日によっては温度特性を示さない場合もあったことは、たまたま C_s -磁力計のその時の動作状態が、共鳴中心周波数で発振していたとすれば、この事実も説明ができる。

しかしこの後者の説明については次のような反論、疑問がある。それは C_s ガスの複雑な (Fig. 1 に示したような) 共鳴周波数微細構造からすれば、共鳴中心周波数は一義的には決まらず、換言すればそれは常に見かけ上のものであり、光強度が変化すれば微細構造も変わり、したがって共鳴中心周波数も変わるものである。これが本来の光強度シフトであると考えられるもので、この効果を論外に置くことはできない。ここでもう一度試験結果をふりかえってみると、一見外気温とは全く無関係ではあるが、 $\pm 0.2\gamma$ 程度の不安定さを示している。したがってこの様な特性は、うえに述べた共鳴中心周波数の極近くにおける作動の場合に起る、うえの二つの効果による不安定さだと考えられる。

再び最初の問題に帰って位相角 (φ) に、あるずれがあった場合の光強度変化にともなう共鳴周波数のシフトによって、 C_s -磁力計の温度特性が定量的に説明がつくかということである。これについては相当にこづつけないと十分に説明できない。すなわち最大級の温度特性を示した場合の温度係数は $-1.7\gamma/^\circ\text{C}$ であったが、これを説明するためには C_s -磁力計の位相角 (φ) の設定誤差を 30° と仮定し、ランプエキサイターの温度特性によるポンピング光の強度が変わり、 S_2 が 4ms 程度から 2.5ms 程度に変化したとしなければならぬ (Fig. 12 参照)。この二つの仮定は相当に苦しい仮定であるが、前者については位相器回路の特性からして充分にありうることである。この位相回路は 200° 程度回転するボリューム抵抗により、位相を $0^\circ \sim 180^\circ$ まで調整するものであり、この間の調整により位相器自身の振巾特性が平坦でないことなどを考え合せれば、位相角を 90° に設定することは非常に困難である。充分に位相誤差は数10度は起り得る構造になっている。後者についてはランプエキサイターの電圧 (電流) が、 $1\%/^\circ\text{C}$ 程度の変動比を持っておれば、同電圧変動シフト実験からは説明される。しかしこの程度のエキサイター電圧の変動により、光強度が2倍近くも変化しなければ、 $S_2=4.0\text{ms}$ が $S_2=2.5\text{ms}$ に変化したことは説明できない。この点は問題で、今後早急に追求しなければならぬと考えている。

一方もう一つの問題は、 C_s -磁力計のこの種の温度係数が常に負値を示していることである。今までに考察したことが事実とすれば、位相誤差角は常に 90° より一方向 (位相増加の方向) にずれていなければならない。今回の動作期間中しばしば位相調整を行なったが、いずれの場合もその設定が一方向にずれていたということは考えにくいことである。このことについても今後検討しなければならない問題ではあるが、位相器の特性に大きな問題があるように考えられる。現在の C_s -磁力計の共鳴中心周波数の設定は、正確には不可能である。これを今後どう改良するかということも大きな問題である。

他の温度シフトに関しては一般的に考えられている、またここでもしばしば説明して来たように、共鳴周波数の微細構造の変化によって説明できると考えられる。これは本質的な特性であり、解決することは困難で、光学系つまりセンサーの温度を $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 以内に一定化する以外にはないといっても過言ではない。ただランプおよび吸収セルの特性、更に干渉フィルターおよび偏光板の特性とも関係があり、この点については専門分野からの研究が待たれ

るところである。なお今回の C_s -磁力計は D_1 光だけを使用しているが、 D_1+D_2 光を使用した方が条件によっては、磁力計として安定であるという報告もあることを附記しておく。

次にうえのことと全く無関係ではないが、吸収セルの横緩和時間(S_2)の問題がある。この実測はただ一回しかなく、今後もっと種々な光強度について実測しなければならない。さらにこれにより T_2 の値についても求める必要がある。今回実測された比較的短い $S_2 = 2.8\text{ms}$ の値が、本質的に吸収セル自身の T_2 の値が小さいためによるものか、光強度が強過ぎるためによるものか検討しなければならない。 S_2 の値としては少なくとも 5ms より長いことが必要である (Fig. 12 参照)。

最後に RF 変調信号の振巾の温度変化についてであるが、これは周波数シフトにとまなり S_2 特性によってはとうてい説明されない。一方吸収セルに温度変化があるとすれば、その温度変化によっては説明することができる。すなわち今回の吸収セルの設定温度は 43°C であり、冬期には完全にこの設定温度に制御できなかったきらいがあった。それで RF 変調信号の変化を実測した時期は冬期に近い時であり、うえのことによるセンサー内部温度変化がこの振巾の変化を起した主原因だとも考えられる。他方この原因として最も可能性の強い掃選増巾器の温度特性については、現在試験中である。

§5 む す び

以上のように C_s -磁力計の安定度に関する各種の実験結果および理論式との比較検討の結果、多くの重要な事実が判明してきた。しかしまだいくつかの前節で指摘したような問題点、疑問点更に S/N に関する別の問題があることも事実である。これらについても早急に実験を行ないほほ解決できる見通しであり、新標準磁気儀として本製作する C_s -光ポンピング磁力計は、 $0.1\gamma/\text{month}$ の安定度に近い性能のものに改良できるつもりである。

最後にこの論文を書くにあたり御指導並びに助言をいただいた柳原所長に深謝の意を表します。また種々と便宜をはかっていただいた河村技術課長にも同様の意を表します。更に今回の各種実験にあたり、データの提供をいただいた日本電気 K.K. 電子装置事業部量子装置部の皆様に深く感謝申し上げます。

文 献

- (1) J. Brossel, F. Bitter; Phys. Rev. 86, 308, 1952.
- (2) H.G. Dehmelt; Phys., Rev., 105, 1924, 1957.
- (3) S. Ando; J.J.A. P., Vol. 4, No. 10, 793, 1965.
- (4) 安東滋, 久保高啓, etc; 三菱技報, Vol. 39, No.9, 21, 1965.
- (5) 大橋一則, 藪崎努, 小川徹, 量子エレクトロニクス研究会資料 (電気通信学会), 1964.
- (6) 佐分利昭夫; 電気磁気精密測定専門 (委) 資料, 1964.
- (7) 大地洗; 地磁気観測所技術報告, 第 8 巻, 第 4 号, 11, 1968.
- (8) W.E. Bell, A.L. Bloom; Phey. Rev. 107, 1559. 1957.
- (9) T. Kubo; J.J.A.P. への投稿原稿. 1969.

Several Experimental Results on the Stability of Cs Optical Pumping Magnetometer with Some Discussions

Yukizo SANO

Abstract

Tests of the stability of the Cs-optical pumping magnetometer as well as some related fundamental experiments have been carried out. In this paper, their important results are shown and discussed mainly about several operating conditions of the Cs-magnetometer for its stability including some comparison with the theoretical results which have to be led by Bloom, Kubo, etc. Main results of the present study are as follows;

1) The resonant (self oscillating) out put frequency is shifted depending closely upon the open air temperature. This shift is generated mainly by temperature characteristics of the sensor electronics.

2) Temperature shifts of the order of $0.3\gamma/^\circ\text{C}$ are observed as regards the lamp house and the absorption cell. So it is necessary that the sensor should be kept its seting temperature within the range of $\pm 0.1^\circ\text{C}$.

3) The transverse relaxation time is estimated as about 2.8 ms. This value is rather smaller for the stability of the Cs-magnetometer.

4) Almost all of these experimental results can be nearly explained by the theoretical results.

5) It is fined out that there are a few defects of the sensor electronics and they are main origins of the above temperature dependence of the out put frequency of the Cs-magnetometer.