

単一スペクトル線光ポンピング磁力計*

小川 徹**・北野 正雄**・藪崎 努**

(1983年11月30日受理)

Optically Pumped Magnetometer with Single Spectral Line

By

Toru OGAWA, Masao KITANO and Tsutomu YABUZAKI

Abstract : Optically pumped magnetometer with single spectral line is proposed as a space magnetometer and a station geomagnetic standard.

The results obtained can be summarized as follows.

- (1) ^{39}K is most suitable for this purpose due to the separation of Zeeman sub-levels and its high natural abundance.
- (2) Errors due to spectral asymmetry is very small.
- (3) Errors due to the nearest neighbor line can be made very small.
- (4) Stability in the short time and the long time intervals will become to the order of 10^{-2} nT and 10^{-1} nT, respectively.

The light sources of optical pumping are also discussed.

1. はじめに

現在、ロケットによる電離層電流の観測に用いられている光ポンピング磁力計は、昼間はもとより、夕方などのように電流の弱い時刻においても観測が可能である[1]。しかしこの磁力計は多くのゼーマンスペクトルの包絡線を基準としている複合スペクトル線磁力計[2]であって、改良の余地は残されているが、より微弱な例えば夜間の電流観測のためには充分とは云えない。また地上観測における標準はプロトン磁力計によっているが、その確度の限界は0.1nT程度であると推定されている[3]。一方複合スペクトルの光ポンピング磁力計はスペクトル構造の複雑さにもかかわらず、0.1nT程度の安定性をもっていることが報告されている[3]。従って次段階の標準磁力計として単一スペクトル線光ポンピ

*宇宙研特別事業費による研究論文

**京都大学超高層電波研究センター

ング磁力計，特にアルカリ金属磁力計が有望と考え，光ポンピングの基礎実験データをもとに検討を行った。検討項目は適当な原子の選択，隣接ゼーマンスペクトルによる誤差，単一スペクトルの非対称性，系全体の雑音特性，システムなどである。（表1）

表1 単一スペクトル線光ポンピング磁力計
の検討項目

Single Line Alkali Magnetometer (SLAM)	
I	Accuracy (absolute, relative), Stability
(1)	Line Shape (shift, broadening)
	i) collision (self, buffer gas)
	ii) optical photon
	iii) RF photon
(2)	LF Modulation (frequency, index)
(3)	Local Static Field
	i) disturbance (variation)
	ii) uniformity
II	Signal Strength
(1)	Transition probability
(2)	Vapor Density (temperature)
(3)	Photon Number (optical ; RF)
III	Noise
(1)	Source Noise
(2)	Detector Noise
	i) zero signal noise
	ii) photon noise
(3)	Circuit Noise
IV	System Design
(1)	Cell
	i) material
	ii) buffer gas a) material
	b) pressure
	iii) dimensions
(2)	Lamp
	i) material ii) dimensions
	iii) exciter
(3)	Detector
(4)	Optical Circuit
	i) cell-lamp distance
	ii) filter (sharpness, transparency)
	iii) focusing
(5)	Static Magnetic Field
(6)	Electronics
	i) modulation frequency
	ii) feedback loop
	a) dc loop (digital)
	b) ac loop
	iii) integration time

2. 原子の選択

光ポンピング磁力計を対象とする場合利用する原子の種類が問題となる。種々の原子の中でアルカリ金属原子が適当と思われるがその理由は以下の通りである。

- (1) 最外殻電子が1個であるからエネルギー準位の構造が簡単である。
- (2) 閉殻をもっているから、水素原子などと比較してポンピング光の領域が可視光、近赤外にあり光源や光検出器が容易に得られる。
- (3) 磁力計に適した蒸気圧が常温附近で得られる。

単一スペクトル線の磁力計は ^{39}K と ^{87}Rb について既に実験が行われている。しかし ^{39}K では光ポンピング磁力計の開発当初にアルカリ金属の一例として報告されたのみ[4]で確度についての研究はなされていない。また ^{87}Rb では短期間の観測が行われた[5]が、確度については報告されておらず、後で述べるように ^{87}Rb のスペクトル特性から標準として適しているとはいえない。

次にアルカリ金属原子の中で単一スペクトル線磁力計に適しているのはどの原子であろうか。図1はアルカリ金属原子のゼーマンスペクトルを示したもので、簡単のために各々の線強度は同一にとってある。ただし量子数Fの小さい線は弱く示してある。この図から従来のような複合スペクトル線の磁力計としては ^{133}Cs が全体の線幅が狭い点で最適である。これに反し単一スペクトル線としてはゼーマンスペクトル線の間隔が最も広い ^{41}K が最適であることが分る。

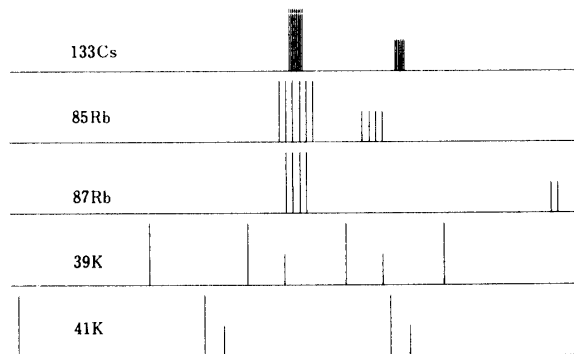


図1 アルカリ金属原子のゼーマンスペクトル

種々のアルカリ原子およびプロトンの諸要素の比較を表2に示す。 ^{39}K は自然含有率、ゼーマン線の数においては ^{87}Rb 、 ^{133}Cs よりも特性は勝れている。しかし光ポンピングで重要な D_1 、 D_2 線の波長差は十分とは言えない。また原子が軽いためスペクトル幅、 ΔF_0 ではやや劣ることが分る。プロトン、セシウム両磁力計の現在の特性およびカリウム磁力計の予想される特性を表3および図2に示す。横軸は観測時間であって、 C_s は 10^5sec (1日)程度より短い時間の安定度はプロトンより勝れているがより長時間では劣っている。またKにより長時間でもプロトンを上回り得ると予想されるのである。

表2 磁力計に用いられる原子の特性比較

	³⁹ K	⁸⁷ Rb	¹³³ Cs	¹ H
natural abundance (%)	93.1	27.2	100	
no. of lines	4	4	8	1
$\omega/2\pi$ (Hz/nT)	7.0	7.0	3.5	0.045
ΔF_0 (nT)	0.9	0.5		1.3
D_1 (nm)	769.9	794.8	894.4	
D_2 (nm)	766.5	780.0	852.1	
T (°C)	60	40	20	
$F=0.5 \times 10^{-4}$ T				
$(\omega_{i+1} - \omega_i) / 2\pi$ (Hz)	531	36	6.7	
$F_{i+1} - F_i$ (nT)	76	5.2	1.9	

表3 種々の磁力計の比較 (単位: nT)

プロトン磁力計		光ポンピング磁力計			
		複合 スペクトル	単一 スペクトル	磁場掃引型 (アナログ型)	Hanle効果
確度	0.2	1	?		
安定度	0.1	0.1	0.02		10^{-4}
感度	0.1	0.01	0.03	0.01	10^{-5}

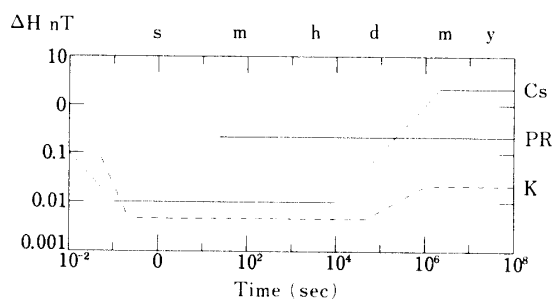


図2 種々の絶対磁力計の安定度比較

3. 確度, 安定度

さて以上のような単一スペクトル線カリウム磁力計を実現するため検討すべき項目は表1の通りである。最も基本的な項目は無論予想される確度, 安定感であるが, それを具体化するには信号強度, 雑音さらには磁力計全体のシステムの検討が必要である。確度, 安定度は様々な要因で決定されるが, 最も重要なものはスペクトルの非対称性, 間隔, 幅, 強度および隣接スペクトルの影響である。またスペクトル中心を高感度で検出するため外

部変調幅や雑音も重要である。さらにこれらの全体に種々の過程を通じてポンピング光強度が影響を与える。以上の点を逐次検討する。

(1) ゼーマンスペクトルの非対称性

通常の磁力計に用いられるゼーマンスペクトルの幅の主要原因は原子衝突と光ポンピングの効果である。従ってその形は

$$I = I_0 \{ [1 + (\omega - \omega_0)^2 / \Delta\omega^2]^{-1} + [1 + (\omega + \omega_0)^2 / \Delta\omega^2]^{-1} \} \quad (1)$$

ただし I_0 は最大吸収率、 $\Delta\omega$ は半値半幅、 ω_0 は幅が無視出来る場合の中心周波数である。いま弱い周波数変調、或いは磁場変調を掛けてスペクトル中心を検出する場合を考えると

$$dI/d\omega = 0 \text{ より}$$

$$\frac{\omega - \omega_0}{\Delta\omega} = - \left(\frac{\Delta\omega}{\omega + \omega_0} \right)^3 \quad (2)$$

ただし $\omega - \omega_0 \ll \Delta\omega \ll \omega + \omega_0$ とした。実際の光ポンピング磁力計では $\Delta\omega / (\omega + \omega_0)$ は 10^{-5} 程度に出来るので $\Delta\omega$ が 10 Hz 程度の場合、誤差は 10^{-14} Hz (磁場換算で 1.4×10^{-15}) 程度となり問題にならない大きさである。従って以下では

$$I = I_0 \{ 1 + (\omega - \omega_0)^2 / \Delta\omega^2 \}^{-1} \quad (3)$$

と近似する。

(2) 隣接スペクトルによる誤差

図3はスペクトル半値半幅 $\Delta\omega$ をパラメータにした全スペクトルの合成曲線である。 $\Delta\omega$ が大きくなると独立していたスペクトルが徐々に重なり合い一本化するのである。従つ

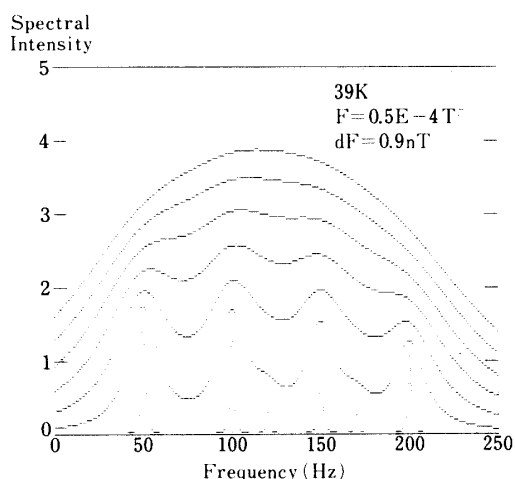


図3 ゼーマンスペクトルの形状

て $\Delta\omega$ が狭い場合でも隣接スペクトルの存在による誤差の検討が必要である。図のように基底状態のゼーマンスペクトルは ^{39}K の場合強い4本の成分と、弱い2本の成分がある。(3)より、

$$I = \sum_i I_{oi} \{1 + (\omega - \omega_{oi})^2 / \Delta\omega\}^{-1} \quad (4)$$

の場合に特定のスペクトルのピーク周波数、例えば ω_{01} が隣接スペクトルにより $\omega_{01} + \delta\omega$ と変化したとする。(4)より $i = 1, 2$ のみを考え $dI/d\omega = 0$ より

$$\delta\omega = -\frac{I_{02}}{I_{01}} \cdot \frac{\omega_{01} - \omega_{02}}{\{(\omega_{01} - \omega_{02})^2 / \Delta\omega^2 + 1\}^2}$$

もし $\Delta\omega \ll \omega_{01} - \omega_{02}$ ならば

$$\delta\omega = \Delta\omega \frac{I_{02}}{I_{01}} \left(\frac{\Delta\omega}{\omega_{01} - \omega_{02}} \right)^3 \quad (5)$$

$\Delta\omega = 2\pi \cdot 20$ (rad/s) とすれば ^{39}K の場合は δF は 10^{-2} nTとなり充分小さいが、 ^{87}Rb では1 nT程度となり大きな誤差となることが分る。

(3) 検出確度

I_0 はポンピング光強度 S_0 に依存するが、最初は指数関数的に増加し、後飽和する。また $\Delta\omega$ も S_0 に依存する。従ってポンピング光の微弱な場合は、

$$\Delta\omega \cong \Delta\omega_0 + \alpha S_0 \quad (6)$$

$$I_0 \cong \beta S_0 \quad (7)$$

図4のように原子槽を通過した光強度は

$$S = S_0(1 - I_0) \quad (8)$$

また図5の光検出器における雑音は入射光強度 S に依存し

$$N \cong K(S \cdot B)^{1/2} \quad (9)$$

ただし B は磁力計システム全体の周波数幅である。

一方、スペクトル幅 $\Delta\omega$ は隣接のゼーマンスペクトル間隔 ω_F よりも小さい必要がある。

$$\Delta\omega = \varepsilon \omega_F \quad (\varepsilon < 1) \quad (10)$$

また変調周波数幅 $\Delta\omega_m$ は $\Delta\omega$ より充分小さくならねばならぬ。

$$\Delta\omega_m = \gamma \Delta\omega \quad (\gamma < 1) \quad (11)$$

発振器の周波数がゼーマンスペクトルより $\delta\omega$ だけ誤差があったとすると、(3)より誤差信号比 ΔI は

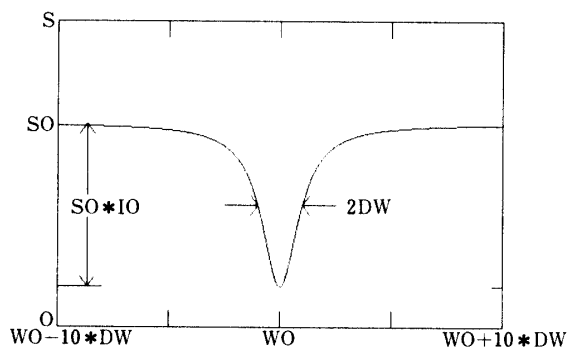


図4 吸収スペクトルの形状

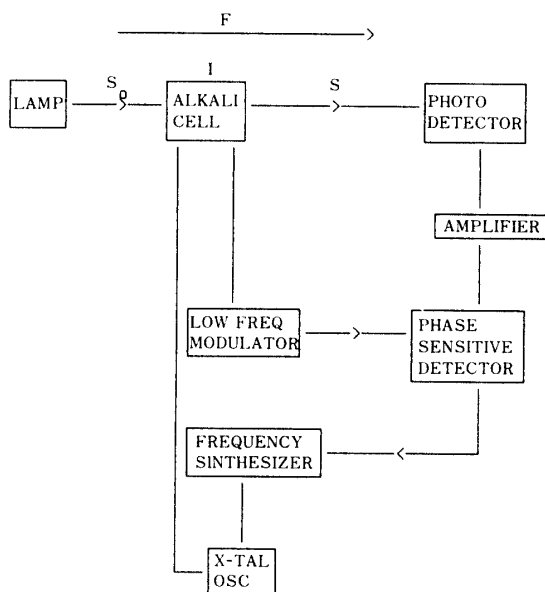


図5 光ポンピング磁力計のブロック図

$$\Delta I \cong 2I_0 \frac{\Delta\omega_m}{\Delta\omega} \frac{\delta\omega}{\Delta\omega} \tag{12}$$

ただし $\delta\omega = \omega - \omega_0$ である。従って誤差の検出限界では

$$\Delta S = S_0 \cdot \Delta I = N$$

磁力計の周波数誤差は

$$\delta\omega = \Delta\omega \frac{N}{2S_0I_0} \cdot \frac{\Delta\omega}{\Delta\omega_m} \tag{13}$$

全磁力の誤差は γ_e を電子の磁気回転比、 I を核スピンとすれば

$$\delta F \cong \frac{1}{\gamma_e} (2I+1) \delta\omega \tag{14}$$

(5)–(9)に代入して

$$\delta\omega = K (B/\omega F)^{1/2} [1 - \xi(1 - \xi)]^{1/2} (1 - \xi)^{3/2} \tag{15}$$

ただし

$$K = a^{3/2} \chi / 2\beta\gamma_e^{1/2}, \quad \xi = \beta\epsilon\omega_F / \alpha, \quad \xi = \Delta\omega_0 / \epsilon\omega_F \tag{16}$$

である。

光ポンピングの基礎実験などにより、充分に実現出来る数値として $\alpha \sim 10 (\text{Hz}/\mu\text{A})$, $\beta \sim 10^{-2} (/ \mu\text{A})$, $\gamma \sim 10^{-1}$, $\epsilon \sim 1/3$, $K \sim 3 \times 10^{-3} (\mu\text{A} \cdot \text{Hz}^{-1})^{1/2}$ とすれば $K \sim 10^2 (\text{Hz})$ となる。また $\xi \sim 0.1$, $\xi \ll 1$ と選ぶことが出来る。従って $B = 10^{-2} \text{Hz}$, $\omega_F = 5 \times 10^2 \text{Hz}$ (^{39}K) とすれば

$$\delta\omega \sim 0.4 \text{Hz}$$

従って

$$\delta F \sim 6 \times 10^{-2} \text{nT}$$

となる。

(4) 光ポンピング光源

光ポンピング磁力計は光源として高周波放電による放電管を利用して来た。これは構造が簡単で低雑音であるからであった。単一スペクトル線カリウム磁力計でも同様のカリウムランプが利用出来る。しかし他のアルカリ金属と異なり表2のように微細構造の D_1 , D_2 線の波長間隔が小さくなっている。このため D_1 線を選択する光フィルター半値幅の狭いものを使用する必要がある。このフィルターは現在の多層膜技術で可能であるがフィルターの透過度は幾分小さくなる。

一方、現在の光ポンピング磁力計の欠点、特に飛翔体搭載装置としての欠点は使用電力が大きいことであり、その相当部分は光源ランプの電力である。

従って新たなポンピング光源として半導体レーザが考えられる。半導体レーザはそれ自体としては温度、順方向電流などの変動に敏感であるのでカリウムスペクトルに波長安定化されたシステムが必要である。アルカリ金属原子の飽和吸収を利用したこの種の安定化レーザはすでに開発され、ポンピング光源として充分過ぎる安定度を持つことが確認されている。[6].

4. 結 語

現在得られた結論としては、

- i) アルカリ原子として ^{39}K , ^{41}K が適当である。
- ii) スペクトルの非対称性は十分小さい。
- iii) 隣接スペクトルによる誤差は 10^{-3}nT 程度に出来る。
- iv) 短期 ($t < 1 \text{hr}$) 安定度は 0.01nT 程度、長期 ($t < 1 \text{hr}$) 安定度は $< 0.1 \text{nT}$ が可能である。

また残された問題としては、

- i) ^{41}K は特性は良いが natural abundance が小さい。従って ^{39}K を用いるのが現実的である。
- ii) D_1 , D_2 線の波長が接近している。この対策としては sharp な光フィルターを用いるか、半導体レーザを光源とするなどが考えられる。
- iii) cell 温度が Cs に比べて高い。恒温槽の特性を向上させる必要がある。

などである。

参考文献

- [1] T. Yabuzaki and T. Ogawa, Journ. Geophys., Res., **79**, 1999(1974).
- [2] T. Yabuzaki and T. Ogawa, Journ. Appl. Phys., **45**, 1342(1974).
- [3] 河村, 佐野, 立川, 地磁気観測所技術報告, 20 卷 (1980 年 9 月).
- [4] Monsnier, Ann. Geophys., **22**, 113(1960).
- [5] J. H. Allen and P. P. Bender, Journ. Geomag. Geoelec., **24**, 105(1972).
- [6] H. Hori, Y. Kitayama, M. Kitano, T. Yabuzaki and T. Ogawa, IEEE Journ. Quantum Electron., *QE-19* 169(1983).