

2002年度後期 特別実験II
「Sagnac効果を用いた光学ジャイロの測定精度の分析」

学生証番号：s11577

氏名：山本哲朗

提出日：2003年2月13日

1 はじめに

光ファイバジャイロ (OFG) は、近年さまざまな分野で活用されている。地球の公転による角速度の検出もできるほど精度が向上しており、それは主に信号取得技術、ノイズ低減などの工夫によるところが大きい。現在の課題は、いかに低コスト・小型な方法を用いて高精度の測定が行えるかという点にあり、この課題を克服できれば、地球物理学で長らく言われて続けている回転地震計の開発や、その他、商用方面への応用にもはずみがつくと思われる。

今回の実験では、比較的構造が簡単な位相変調型光ジャイロを実際に動かし、SN比がどの程度であるかを計測する。それにより精度改善への見通しを立てたい。

2 原理

OFG において重要となる2つの点について、以下で述べる。

2.1 Sagnac 効果

図1は OFG の基本的な構造を表したものである。現実には工夫のために複雑な構造になっているが、後述することにして、ここでは最も基本的な構造についてのみ述べる。

光ファイバジャイロは、ファイバーをコイル状に巻いたセンサー部、送受光素子、ファイバの結合部および信号処理部から成り立っている。レーザーを出た光はビームスプリッター (BS) によって2つのビームに分離され、光ファイバの両端に入射する。これらの光は時計方向 (CW) と逆方向 (CCW) に伝搬し、再びBSで合成されて受光面上に干渉縞を作る。

光ファイバのループが角速度 Ω (rad/s) で回転すると、CW 光と CCW 光の光路長が異なり、干渉縞が移動あるいは受光強度が変化する。

今、それぞれの光の速度を v_1, v_2 とおくと、フレネル・フィゾーの定理により次のように表される。

$$\begin{aligned} v_1 &= \frac{c}{n} + \Omega R \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) \\ v_2 &= \frac{c}{n} - \Omega R \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) \end{aligned} \quad (1)$$

ただし c は真空中の光速、 n はファイバーの屈折率、 R はコイル半径である。又、静止系から見てコイルは回転しているので、2つの波の伝播時間を t_1, t_2 とすると、コイルの巻き数を N として、

$$\begin{aligned} v_1 t_1 &= 2\pi R N + \Omega R t_1 \\ v_2 t_2 &= 2\pi R N - \Omega R t_2 \end{aligned} \quad (2)$$

という関係式が成立する。よって CW 光、CCW 光の間に生じる時間差 Δt は (1)(2) 式よ

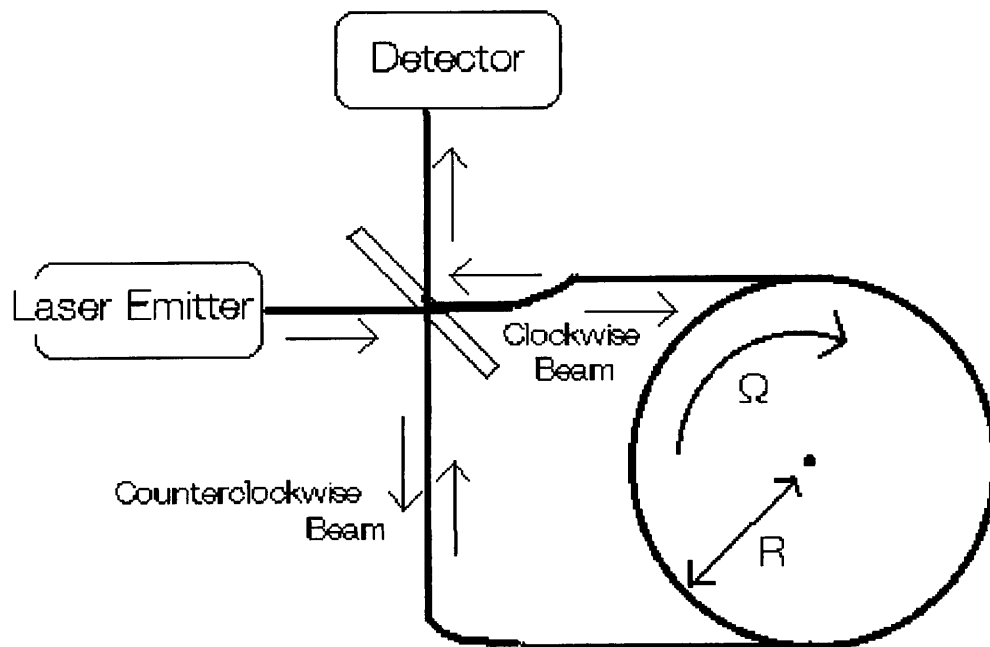


図 1: 光ジャイロ模式図

り次のように求められる.

$$\begin{aligned}
 \Delta t &= t_1 - t_2 \\
 &= 2\pi RN \left(\frac{1}{v_1 - \Omega R} - \frac{1}{v_2 + \Omega R} \right) \\
 &= 2\pi RN \left(\frac{n^2}{nc - \Omega R} - \frac{n^2}{nc + \Omega R} \right) \\
 &\approx \frac{4\pi NR^2}{c^2} \Omega
 \end{aligned} \tag{3}$$

よって位相差 $\Delta\phi$ は次のようになる.

$$\begin{aligned}
 \Delta\phi &= \Delta t \cdot \frac{2\pi c}{\lambda} \\
 &= \frac{8\pi^2 NR^2}{\lambda c} \Omega \\
 &= \frac{4\pi RL}{\lambda c} \Omega
 \end{aligned} \tag{4}$$

ただし L はコイル部分に巻かれたファイバーの長さ, λ は光源の波長である.

(4) 式で示した位相差を測定することで角速度を検知することが可能となる. 両回り光に位相差が生じるこの現象は1913年に発見され, 発見者にちなんでサニャック (仏. Sagnac) 効果と呼ばれている.

2.2 位相変調

OFG において2つめに重要な点は信号の取得方法にある。(4)式に従うと、地球の自転速度を検出する際には、 $\Delta\phi = 7 \times 10^{-4}$ となってしまう。干渉縞を見るやり方ではほとんど明暗の変化がなく、又、位相差の絶対値しか測定できない。符号付きの位相差を検出する方法としては、位相変調法が知られている。これは、位相変調を受けるタイミングが両周りの光で伝播時間だけずれることを利用している。

今、レーザー光から出た光を

$$E_L = E e^{i\Phi t}$$

とする。変調指数 ϕ_e 、変調角周波数 ω_e の位相変調を、CW 光に対してはファイバーコイルに入射する前に、CCW 光に対してはファイバーコイルから出てきた後で行う。ここで ϕ_e は十分小さいとしてよく、コイルに入射する直前の CW 光 E'_1 はベッセル関数で展開することができるので、

$$\begin{aligned} E'_1 &= \frac{E_L}{2} e^{i\phi_e \cos(\omega_e t)} \\ &= \frac{E}{2} \left\{ J_0(\phi_e) e^{i\Phi t} + iJ_1(\phi_e) e^{i(\Phi + \omega_e)t} + iJ_1(\phi_e) e^{i(\Phi - \omega_e)t} \right\} \end{aligned}$$

となる。よって Detector 位置での CW 光 E_1 は次のように書ける。

$$\begin{aligned} E_1 &= \frac{E}{2} \left\{ J_0(\phi_e) e^{i\Phi(t + \frac{1}{2}\Delta t)} \right. \\ &\quad \left. + iJ_1(\phi_e) e^{i(\Phi + \omega_e)(t + \frac{1}{2}\Delta t)} + iJ_1(\phi_e) e^{i(\Phi - \omega_e)(t + \frac{1}{2}\Delta t)} \right\} \end{aligned} \quad (5)$$

同様にして CCW 光についても考えると、変調を受ける直前の CCW 光 E'_2 は

$$E'_2 = \frac{E}{2} e^{i\Phi(t - \frac{1}{2}\Delta t)}$$

なので、Detector 位置での CCW 光 E_2 は次のように書ける。

$$\begin{aligned} E_2 &= \frac{E}{2} e^{i\{\Phi(t - \frac{1}{2}\Delta t) + \phi_e \cos(\omega_e t)\}} \\ &= \frac{E}{2} \left\{ J_0(\phi_e) e^{i\Phi(t - \frac{1}{2}\Delta t)} \right. \\ &\quad \left. + iJ_1(\phi_e) e^{i(\Phi + \omega_e)(t - \frac{1}{2}\Delta t)} + iJ_1(\phi_e) e^{i(\Phi - \omega_e)(t - \frac{1}{2}\Delta t)} \right\} \end{aligned} \quad (6)$$

一方、Detector での出力 P は、

$$E_1 + E_2 = V_0 + V_1 e^{i\omega_e t} + V_{-1} e^{-i\omega_e t}$$

とにおいて、

$$\begin{aligned} P &= |E_1 + E_2|^2 \\ &= |V_0|^2 + |V_1|^2 + |V_{-1}|^2 \\ &\quad + 2\Re\{(\bar{V}_0 V_1 + V_0 \bar{V}_1) e^{i\omega_e t}\} + 2\Re\{V_1 \bar{V}_{-1} e^{2i\omega_e t}\} \end{aligned} \quad (7)$$

と書けるので、(5)(6)(7)式より、 P は次の形に書くことができる。

$$P = K\{1 + \cos(\Delta\phi + \phi_e \cos \omega_e t)\} \quad (8)$$

位相変調法を用いると、このように変調角周波数程度の信号を測定するだけでよいことが分かる。またこの出力を調和関数展開することで、次のようにして光ジャイロの角速度を求めることができる。

$$P = P_r \cos a\Omega \left\{ J_0(\phi_e) + \sum_{k=1}^{\infty} 2(-1)^k J_{2k}(\phi_e) \cdot \cos 2k\omega_e \left(t - \frac{\tau}{2}\right) \right\} \\ - P_r \sin a\Omega \sum_{k=0}^{\infty} 2(-1)^k J_{2k+1}(\phi_e) \cdot \cos(2k+1)\omega_e \left(t - \frac{\tau}{2}\right) \quad (9)$$

ここで

$$a = \frac{4\pi RL}{\lambda c}, \quad \tau = \frac{nL}{c}$$

である。ここで展開した成分のうち、 $J_1(\phi_e)$ 、 $J_2(\phi_e)$ 、 $J_4(\phi_e)$ に注目する。

$$S_1 = K_1 J_1(\phi_e) \sin a\Omega \\ S_2 = K_2 J_2(\phi_e) \cos a\Omega \\ S_4 = K_4 J_4(\phi_e) \cos a\Omega \quad (10)$$

と書けるので、

$$\Omega = \frac{1}{a} \arctan \left(\frac{S_1 K_2 J_2}{S_2 K_1 J_1} \right) \\ \simeq \frac{1}{a} \cdot \frac{S_1 K_2 J_2}{S_2 K_1 J_1} \quad (11)$$

となる。又、

$$y = \frac{S_4}{S_2} = \frac{K_4 J_4(\phi_e)}{K_2 J_2(\phi_e)} \quad (12)$$

が一定値となるようにフィードバックをかけることで、変調を安定化させることができる。

3 OFGの較正

実際に角速度を測定する前に、スケールファクターやその他のノイズがどれほどあるのかを見るため、装置全体を一定速度で回転させて較正を行った。

3.1 実験の方法

実験に用いた OFG の構成を図 2 に示す。図 1 と異なり、Beam Splitter の代わりにファイバーカプラを用いた。表 1 に OFG の主な仕様をまとめる。

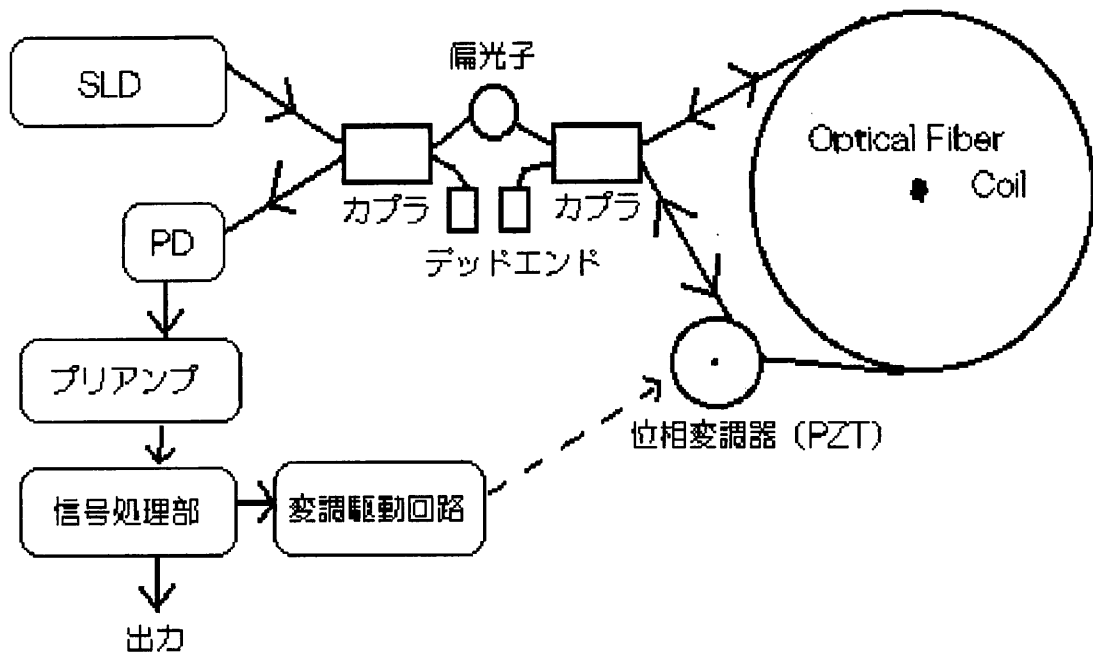


図 2: 実験で用いた OFG の回路構成

光ファイバー長	$L=93\text{m}$
コイル半径	$R=3\text{cm}$
光源	スーパーluminescentダイオード (SLD)
光源出力	約 $800\mu\text{W}$
中心波長	$1310\pm 20\text{nm}$
変調周波数	21.75kHz

表 1: 実験で用いた OFG の仕様

低コヒーレンス光源であるスーパーluminescentダイオード (SLD) を用いた理由は、ノイズの原因の中でも大きい、光ファイバー中で生じる後方レーリー散乱の影響を避けるためである。これにより信号光と散乱光の間にある大きな光路差と偏光子によって両者の干渉を減少させることができる。又、光強度に比例してファイバーの屈折率が変化する光カー効果を抑えるためにも SLD は有効で、カップラー分岐率が変化することで生じる出力バイアスを押えることができる。デッドエンドがついていることや、Detector が図のようにファイバーコイルから 2 段目のカップラーにつながっているのは、上記の理由による。

光路に偏波面保存光ファイバー (PMF) を用いている。通常のシングルモード光ファイバー (SMF) では、互いに直交した 2 つの固有偏光モードが存在するが、伝播定数がわずかに異なり、振動や温度変化などの外からの影響によってモード変換を引き起こしてしまう。これがバイアス変動の原因になってしまうため PMF を使用している。

OFG 出力のパワースペクトルを測定し、調和関数展開した際の $J_1(\phi_e)$, $J_2(\phi_e)$, $J_4(\phi_e)$ 成分を直接計測した (図 3 参照)。本来ならば、OFG 内部の変調周波数発信機からの信号と掛け合わせることで、それぞれの成分を DC 成分として見るのだが、信号を取り出すことにより、OFG がひどく不安定になったので (出力信号のノイズが大きくなった)、角度の絶対値しか測定できないという問題点が起こるが、パワースペクトルのみを測定することにした。又、装置の回転にはコンピューター制御のモーターを使用し、指定した速度で回転するように設定できるようにした。ただし、5 deg/sec 未満の速さで回転をさせる際は、モーター部での摩擦の関係でスムーズな回転ができなかった。

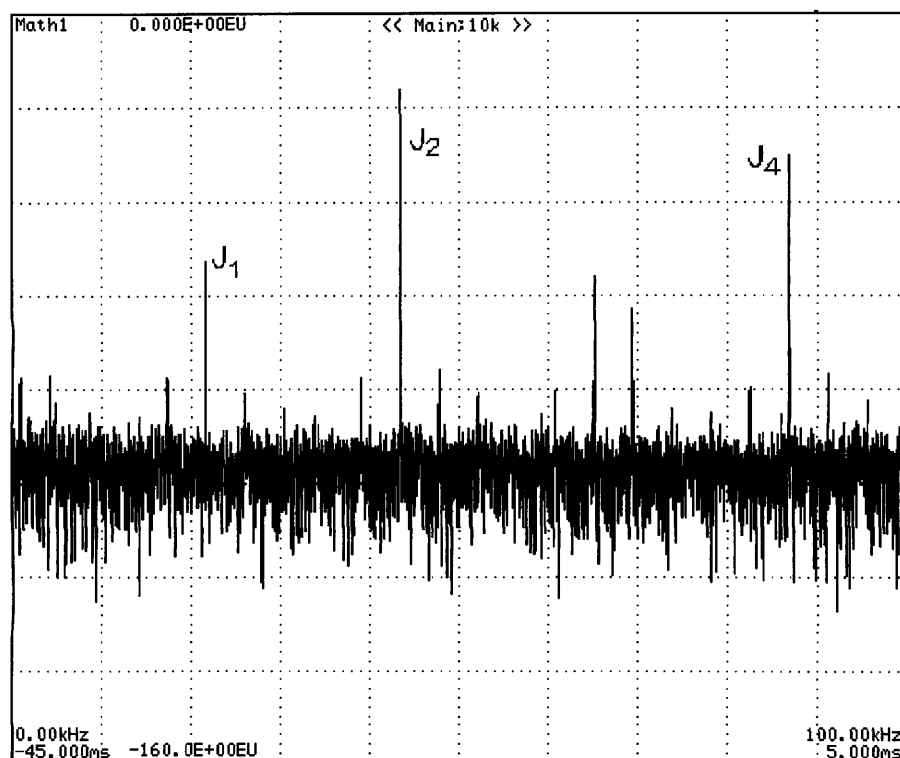


図 3: OFG 出力のパワースペクトラム

3.2 実験結果

-30~30 deg/sec までの 5 deg/sec 刻みの回転速度下で、OFG 出力の J_1 成分を測定したところ、図 4, 5 のようになった。図 4 は OFG を上から見て、時計周りに回っているときを、図 5 は反時計周りに回っているときを測定し、プロットしたものである。入力 x deg/sec と出力 $y \times 10^{-3}$ V·rms には次のような関係がある事が分かった。

$$y = \begin{cases} -0.080x+0.097 & (x \geq 0) \\ 0.079x+0.059 & (x \leq 0) \end{cases} \quad (13)$$

各点での計測で積算時間は 2 秒である。なお、 J_2 , J_4 成分は全く変化がなく、それぞれ 0.177 V·rms, 2.81×10^{-2} V·rms であった。ほとんど時間変化しなかったのは、OFG 内部での変調フィードバックがうまくいっていることを表している。

なお、回転させる台は地面に対して水平だったので、測定の間、地球の自転の影響を取り除く工夫は行っていない。しかしバックグラウンドとして常に存在しているので、零点の移動としてのみの影響を及ぼし、地球回転軸に対して OFG のコイル軸が垂直のときのスペクトラムを知ることによって、影響を消すことができる。

現段階では、長時間の測定を行っていないので、ノイズは比較的大きく、 1×10^{-4} V·rms であった。これを (13) 式の $x \geq 0$ のときの関係から角度に直すと、分解能は約 4×10^{-2} deg/sec となることが分かった。1deg/sec の入力に対し SN 比は 25 であった。地球自転が約 4×10^{-3} deg/sec なので、自転速度を有効数字 1 桁で測定するためには積算時間を 200 秒以上にする必要がある。

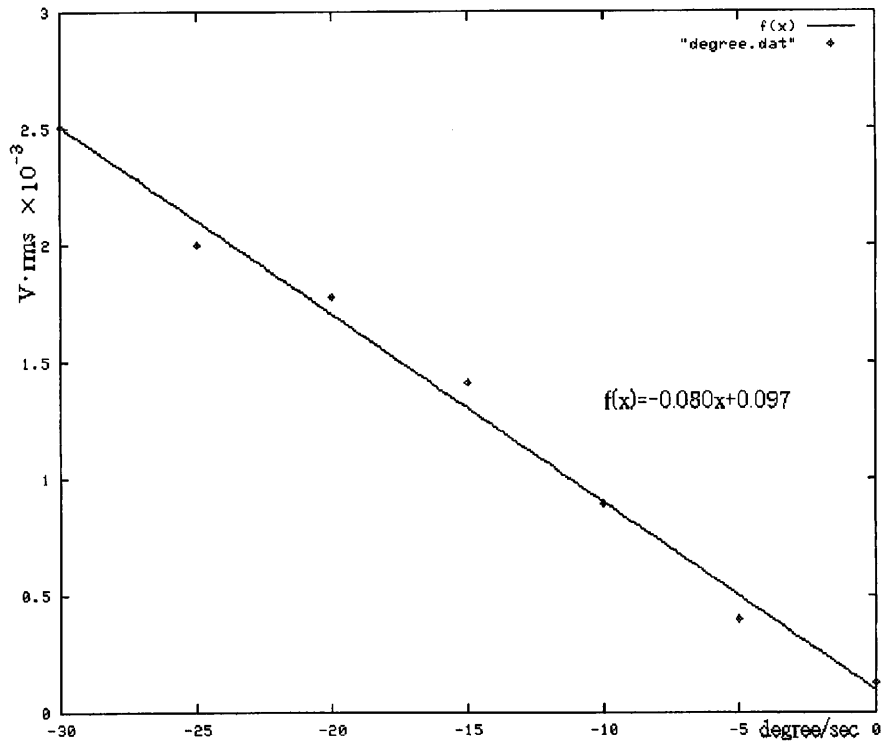


図 4: 時計周りに回るときの OFG 出力

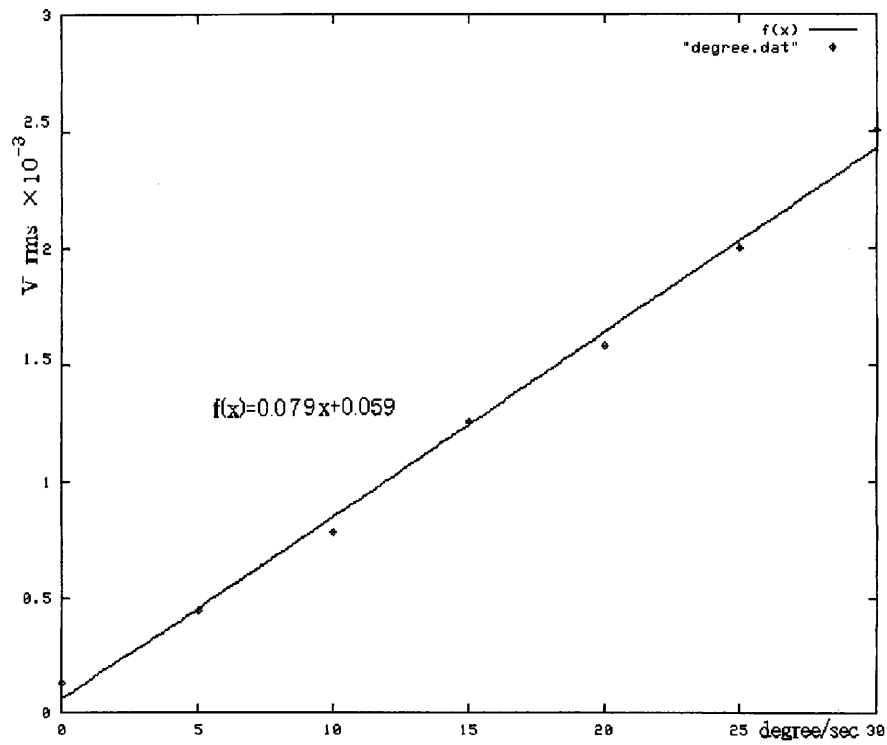


図 5: 反時計周りに回るときの OFG 出力

4 ノイズについて

ファイバー中で起こるノイズの原因には主に次の2つがあると考えられる。

- レーリー散乱 … 波長に比べて十分小さいファイバー中の微粒子，構造欠陥などで起こる。波長変化は伴わないが，光源からの信号光と直接干渉を起こすため，位相差検出において影響が大きい。
- ブリュアン散乱 … 固体媒質の屈折率が熱振動の超音波によって変化し，超音波の波面が入射光に対してブラッグ条件を満たすときに散乱が起こり，ドップラー効果で散乱光の振動数が変わる現象。光子とフォノンの非弾性散乱と考えることもできる。主にコイルの角度方向の温度の非一様性によって起こる。

ブリュアン散乱に関しては，ファイバーが長さの半分の位置を中心に対称にコイルが巻かれていること，温度変化が激しくない実験室環境で測定したことを考えると，CW 光，CCW 光共にほとんど影響を与えていないと考えられるので，それほどノイズとして考慮する必要はないように思われる。むしろ重要なのはレーリー散乱であり，分解能向上の際の最も大きな制限要因になる。

5 まとめ・今後の課題

地球自転を測定するには，測定時間を長くすればよいことは分かった。しかしノイズの原因となっているレーリー散乱の影響を根本的に少なくすることを考えなければならない。そのために今回使用した OFG にはさまざまな部品が取り付けられていた。レーリー散乱の影響を見るために，偏光子，デッドエンドを取り外す，Detector の位置をコイルから1段目のカップラーに取り付けてみるなどして，ノイズレベルを比較することが今後，必要である。それにより，低コヒーレンス光源を用いたことにどの程度の効果があるのかということ調べるができる。

6 おわりに

今回の実験では、私自身の都合により実験時間が少なくなってしまい、十分な成果を得ることができませんでした。このことに関しては本当にすみませんでした。3月も実験を続け、意味のある結果を得たいと思っていますので、よろしくお願いします。

装置の準備や実験の進行に関して、グローバル・ファイバオプティックスの梶岡博さんの協力により、光ジャイロの実験を行うことができました。また坪野研究室の方々には実験を通じて大変お世話になりました。皆様方には、心よりお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 梶岡 博, 熊谷 達也, 油原 敏哉 :
量産型光ファイバジャイロの開発とその応用 (レーザー研究, Vol.28, No.4, 1998)
- 2) 梶岡 博, 於保 茂 :
光ファイバジャイロの開発 (第3回 光波センシング技術研究会 講演論文集, 1989, June, p.55)
- 3) E.J.Post :
Sagnac Effect (Review of Modern Physics, Vol.39, No.2, 1967, April, p.475)