

# 横ゼーマンレーザーを用いた光ファイバージャイロ

Optical Fiber Gyro Using Transverse Zeeman Laser Light

田 井 秀 男\*・芳 野 俊 彦\*・久 保 田 敏 弘\*・小 瀬 輝 次\*

Hideo TAI, Toshihiko YOSHINO, Toshihiro KUBOTA and Teruji OSE

## 1. はじめに

回転系の角速度は、リング干渉計の右回り光と左回り光との位相差から測定できる。その感度はリングが囲む実効面積に比例する。近年低損失シングルモード光ファイバーが開発され、リング干渉計の光路にこの長尺のファイバーの多重ループを用いると実効面積を増加させることができるので、軽量小型で、しかも高感度の角速度測定（光ファイバージャイロ）が可能となった。

この光ファイバージャイロの測定の理論限界値は  $10^{-8}$  rad/sec といわれ地球の  $7.25 \times 10^{-5}$  rad/sec の自転の測定も容易となる。これまでも 10 通りを超える方式が提案されている<sup>1)</sup>が未だ実用段階に達したものはない。ここではわれわれが考案した横ゼーマンレーザー利用ヘテロダイン方式の光ファイバージャイロ<sup>2)</sup>についてその概要を述べる。

## 2. Sagnac 効果

図 1 に示すリング干渉計に回転角速度が加わると、右回り光と左回り光とに位相差が生じるという現象は Sagnac(サニャック)効果と呼ばれ、厳密には相対論的考察から説明されるものである。<sup>3)</sup>しかしここでは簡単のため媒質の屈折率は分散がなく 1 であると仮定して古典論的に説明する。図 1 のように半径  $a$  の円周を  $N$  回まわっている光路を考え、この光路にビームスプリッター B.S. を用いて右回り光および左回り光を入れる。それぞれの光は全く同一の光路中を互に逆回りして再び BS に達し 1 つに重ね合わされる。もしこの系が慣性空間に対して静止していれば 2 つの光の間には位相差は生じない、ところが系を含む面が角速度  $\Omega$  で回転している場合は、それぞれの光が光路中を逆方向にまわって B.S. に到達するまでの伝搬時間が、 $c$  を光速として右回り光に対しては

$$t_r = \frac{2\pi Na - a\Omega t_r}{c} \quad (1)$$

左回りに対しては

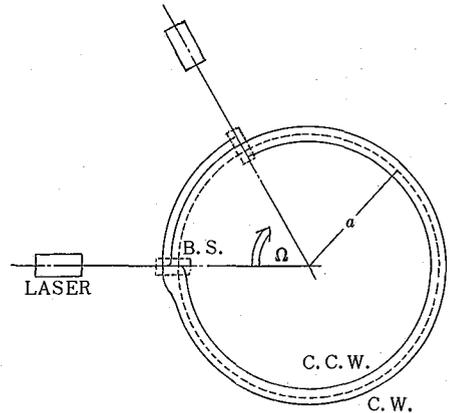


図 1 Sagnac 効果

$$t_l = \frac{2\pi Na + a\Omega t_l}{c} \quad (2)$$

となるから  $c \gg a\Omega$  とすると、(1)、(2)式から 2 つの光の時間差  $\Delta t$  は近似的に

$$\Delta t = t_r - t_l = \frac{4\pi Na^2}{c^2} \Omega = \frac{4NA}{c^2} \Omega \quad (3)$$

となる。したがってこれから

$$\Delta\theta = \frac{4kNA}{c} \Omega \quad (4)$$

の位相差が 2 つの光の間に生じることになる。ここで  $A$  は光路の囲む面積、 $N$  はファイバーの巻数、 $k$  は波数である。

この(4)式は光路の形状、回転の中心位置、光路の屈折率によらずに成立することが相対論から証明されている。<sup>3)</sup>(4)式より位相差と角速度は比例関係にあり、 $A$  の小さなきも長尺のファイバーを幾重にも巻き  $NA$  を大きくすれば、高感度の角速度測定が可能になることがわかる。

## 3. 横ゼーマンレーザー利用ヘテロダイン干渉計の基本概念

光ファイバージャイロによる微小角速度測定は、実効

\* 東京大学生産技術研究所 第 1 部

研 究 速 報

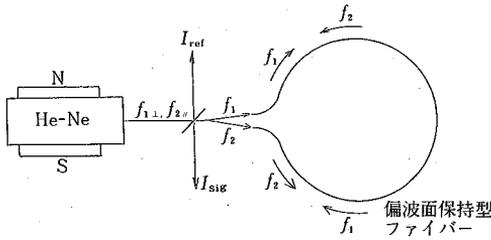


図2 横ゼーマンレーザー利用ヘテロダイン方式光ファイバージャイロの概念図

面積  $NA$  を増大しても最終的には両光間の位相差  $\Delta\theta$  をいかに精度よく検出できるかで決まる。その方法として、われわれは横ゼーマンレーザー利用ヘテロダイン方式を採用した。その概念図を図2に示す。光源として用いた横ゼーマン He-Ne ( $\lambda=633\text{nm}$ ) レーザーは共振器長 24 cm の内部鏡レーザーで、その縦モード間隔は 625 MHz である。一方、光の増幅が行われるレーザー媒質の利得幅は、レーザー遷移線のドップラー広がりであり、周波数範囲で約 1200 MHz である。そのため、この状態では縦モードは2ないし3本立つことになる。ところがレーザー管の中心軸に対し横方向に約 300 ガウスの磁場を印加すると、ゼーマン効果によって磁場に対し水平、垂直方向の利得形状に多少違いが生じ、このレーザー媒質の利得形状は、幅約 570 MHz の短形状に圧縮され縦モードは1本しか立たなくなる。<sup>4)</sup> さらにレーザー媒質はレーザー発振光に対し異状分散を示すので、その分散特性を介してレーザー媒質は複屈折性を持ち、その2方位に振動する2つの波についてわずかながら共振器長に差異ができ、約 200 KHz という微小な周波数差をもつ2つの波長の光の発振が起こる。さらに、レーザーミラーの反射率異方性(複屈折)で決まる固有の偏光軸<sup>5)</sup> とレーザー媒質の複屈折の軸とをそろえると、2つの周波数の光は完全に分離して、2周波直交線偏光レーザー光が発振する。これらの周波数を  $f_1, f_2$  とする。

図2のように、レーザーから出た2周波数  $f_1, f_2$  の直線偏光をウォラストンプリズムで分離し、 $f_1$  を右回り光、 $f_2$  を左回り光としてファイバーループに入射させる。ファイバー内を互いに逆行して出てきた2光を、再び重ね合わせて光電管で受光してビート信号を検出すると、その出力信号は系が回転している場合、直流的なバイアス項は省いて

$$I_{\text{sig}} \propto \cos(2\pi\Delta f t + \Delta\theta) \quad (5)$$

となる。一方、ファイバーを通さずに周波数  $f_1, f_2$  の光を直接干渉させると

$$I_{\text{ref}} \propto \cos(2\pi\Delta f t) \quad (6)$$

となる。これを参照信号として用いビート信号  $I_{\text{sig}}$  の位

相  $\Delta\theta$  を検出する。

このように、一般に2波長のレーザー光を用い干渉させ、ビート信号の位相差から観測対象の変調度を測定する方式を、ヘテロダイン干渉法と呼ぶ。通常の1つの波長の光を干渉させ、その強度から位相差を測る干渉光強度検出法とこのヘテロダイン干渉法を比べると、光源の出力のゆらぎの影響がなく、ダイミックスレンズが無制限などの特徴がある。また、普通ヘテロダイン方式にするには、外部周波数変調器を必要とするので、光学系が煩雑になり、しかも周波数差が数十 MHz と大きく取り扱にくいものとなるが、上述のような横ゼーマンレーザーを利用すると簡単にヘテロダイン方式を導入することができる。

リング干渉計の光路に用いた光ファイバーは、偏波面保持型ファイバーである。これはコアにひずみを加え、複屈折をもたせたもので、直交直線偏光が固有偏光モードになっているファイバーである。その偏光軸にそった偏光で光を入射させると、その偏光状態が保持されたままファイバー内を伝搬する。このファイバーを用いると、今まで光ファイバージャイロで大きな問題となっていたファイバー内での偏光の乱れを除くことができる。さらに両回り光を共通の光軸に沿って伝搬させることができるので、ファイバーループ内で完全に Common path にすることができる。

4. 装置と実験結果

実験に用いた光学配置のダイアグラムと装置の写真をそれぞれ図3、図4に示す。図3のように、横ゼーマンレーザーから発振した周波数  $f_1, f_2$  の光をその偏光の直交性を利用してウォラストンプリズム (W.P.) で2方向に分離する。もどり光によるレーザー発振の不安定性を除くため、アイソレーターとして高効率ファラデーローテーター (F.R.)<sup>6)</sup> を用い、それぞれ偏方向を逆方向に  $45^\circ$  回転させている。F.R. を通過した後の両光は同一方向の直線偏光になっている。周波数  $f_1, f_2$  の光の偏光方向をドラムに巻きつけた偏波面保持型ファイバーの偏光軸と一致するようにして、それぞれの光を互いに逆回りに伝搬させる。ファイバー出射後、2つの光を BS<sub>1</sub>, BS<sub>2</sub> のビームスプリッターと反射鏡 M で光路長がほぼ等しくなるようにして、フォトマルのカソード面で一致させる。参照ビート信号はレーザー後方よりフォトマルを用いて検出する。

図5は2つのビート信号をオシロスコープで観察したものである。ドラムの回転角速度  $\Omega$  は、ファイバー長 100 m, ドラム半径 15 cm のものを用いたので

$$\Delta\theta(\text{deg}) = 1.0(\text{sec})\Omega(\text{deg/sec}) \quad (7)$$

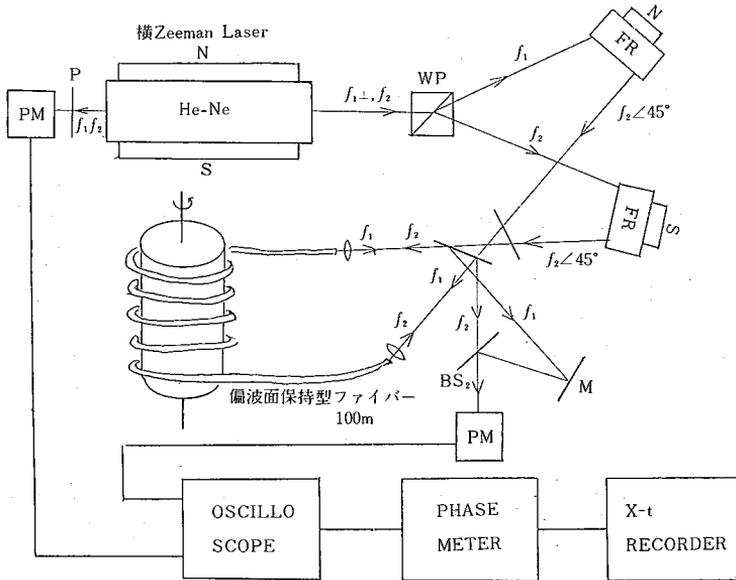


図3 実験光学系

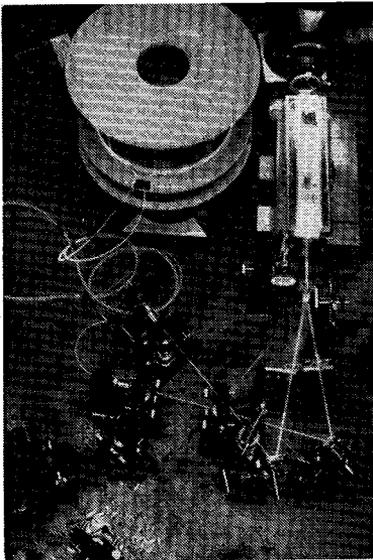
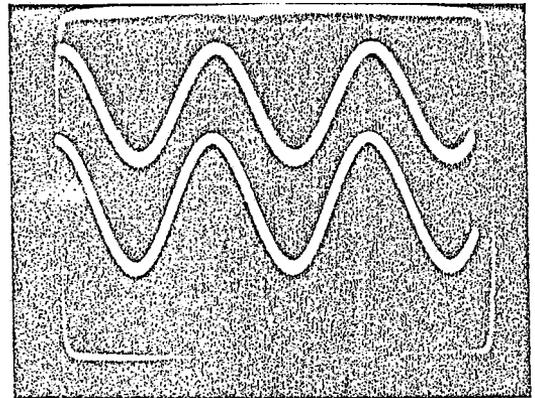


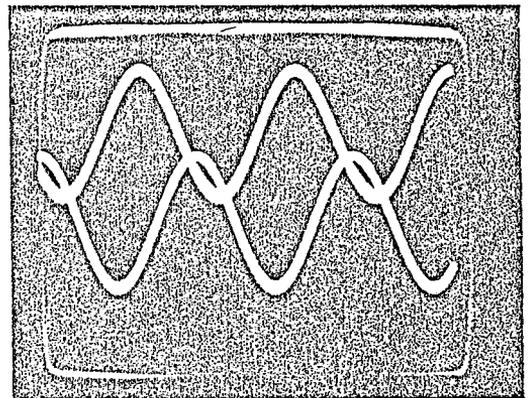
図4 実験光学系の写真

である。光源に用いた He-Ne レーザーは干渉性が良いので非常にコントラストのよいビート信号が得られている。図6は、手動でドラムを右回転、左回転させたときの出力である。図2は、この系で微小角速度を検出した例である。

この光学系ではファイバーの出射後、フォトマルに入るまでの光路が分離しているため距離が長いので、空気のゆらぎや光学系の振動のための信号出力の変動が大きい。



$\Omega = 0 \text{ deg/sec}$



$\Omega = 150 \text{ deg/sec}$

図5 ヘテロダイン信号

## 研 究 速 報

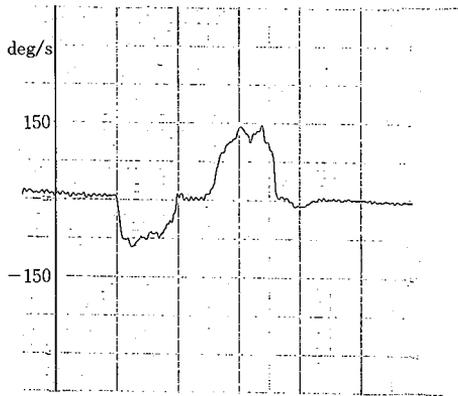


図 6 実験データ (1)

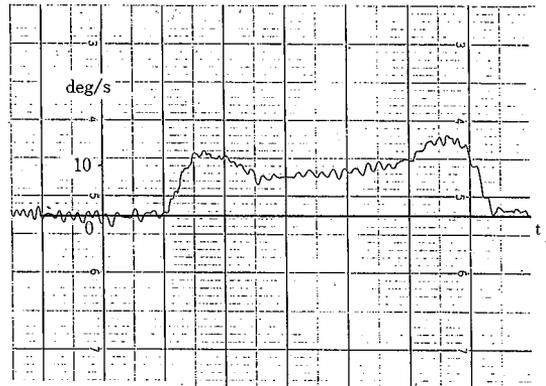


図 7 実験データ (2)

く、静止時の安別度は位相差にして2~3 degであった。ころは通常の光学干渉計でいう $\lambda/100$ に相当するものでかなりよいといつてよい。

## 5. 結 び

本方式には基本的に3つの優れた特徴がある。まず第1に、横ゼーマンレーザーを用いているための外部変調器を使わないヘテロダイン方式になっている。しかもそのビート周波数が200 KHzと取り扱い易く、そのビート周波数変動による誤差も無視し得るという点である。第2に、ヘテロダイン方式であるためレーザーの出力変動には無関係で、また測定レンジも広く感度不良点がない。第3に、偏波面保持型ファイバーを用いているため、ファイバー内での偏光の乱れは除かれ、またファイバーループ内で完全にCommon pathが達成されるという点である。

本方式によって10 deg/sec以上の角速度を検出する

ことができたが、このデータは最終目標に比べて不十分である。目下精度向上の努力をしている。

(1982年12月14日受理)

## 文 献

- 1) 保立, 東口, 丹羽: レーザージャイロ, 計測と制御, 2), No. 10 937/946
- 2) 芳野, 田井, 久保田, 小瀬: ヘテロダイン方式ファイバージャイロ, 1982年秋季応用物理学学会講演予稿集
- 3) E. J. Post: Sagnac Effect, Rev. of Mod. Phys., 39-2, 475/493 (1967)
- 4) 高崎, 梅田: 周波数安定化横ゼーマンレーザーとその応用(1), O plus E No. 19, 66/78 (1981)
- 5) T. Yoshino: Reflection Anisotropy of 6328 A Laser Mirrors, Jpn. J. Appl. Phys. 18, No. 8, pp 1503~1507 (1979)
- 6) T. Yoshino: Compact and Highly Efficient Faraday Rotators Using Relatively Low Verdet Constant Faraday Materials, Jpn. J. Appl. Phys. 19, No. 4, pp 745~749 (1980)