

光ファイバジャイロ

東京大学先端科学技術研究センター 保 立 和 夫

1. はじめに

慣性空間に対する回転計、ジャイロを光を用いて実現する研究が活発化している⁽¹⁻¹³⁾。ここでは、サニャック効果と呼ばれる現象が利用される。光ジャイロの構成法としては、能動型のリングレーザジャイロ (Ring Laser Gyro) と、受動型の光ファイバジャイロ、受動型リング共振方式光ジャイロ (Optical Passive Ring-Resonator Gyro) とがある。このうち、先行して開発されすでに実用化されたリングレーザジャイロ (RLG) は低回転域での非直線性の問題を解決するために機械的な振動を与えなければならない⁽⁹⁾。これに対し、受動型の光ジャイロにはこのような問題は本質的にない。これが、受動型光ジャイロの研究が活発化している理由である⁽⁹⁾。航空機の慣性航法用等の高級な用途には、分解能・零点安定性ともに0.01度/時、ダイナミックレンジ6桁、スケールファクタの安定性10ppmが要求される。上記分解能は、光波位相変化としては μrad に相当する。つまり、光ジャイロはまさに極限センサであり、その高性能化には、種々の雑音要因の挙動を詳細に把握してその極限的な除去手法を開発する必要がある。

本稿では、光ジャイロの構成法を概観した後、上記の2つの受動型光ジャイロについて、各種雑音要因の挙動把握とその除去手法を中心に述べる。

2. 光ジャイロの構成法

光の閉ループをそれぞれ逆回りに伝搬したふたつの光波間には、系に回転が加わると、それに比例して位相差が生じる。これは、サニャック効果と呼ばれ光ジャイロの原理である。本効果を実際のジャイロとして実現するための方法がこれまでに3つ考案されている。

その第一は図1 (a) に示したリングレーザジャイロである。これは左右それぞれ逆回りに発振する発振周波数が、サニャック効果を介して、回転に比例した差を示すことを利用する。すでに実用域に達し、Boeing 757/767の慣性航法装置に用いられている。しかし、本方式の分解能を向上させるために系全体に回転振動を与えることが必要となり、静止型という光ジャイロの利点が放棄されている。これに対し以下の2つの光ジャイロにはこのような問題はない。

図1 (b) は光ファイバジャイロの基本光学系である。センシングファイバコイル中を左右それぞれ逆回りに伝搬した2つの光波間にはサニャック効果により位相差が生じる⁽¹⁻¹²⁾。これを両光による干涉強度の変化として捉える。長尺(数百m-千m)で小半径(数cm)の多数ターンの光ファイバコイルを用いることにより、系を大型化することなくサニャック効果の感度を高める構成である。これに対し、図1 (c) の受動型リング共振方式光ジャイロは、フィネスの高い光リング共振器を用いてこの共振周波数がサニャック効果により変化するのを捉える。光ファイバジャイロより約フィネス倍だけ高感度となり、その分コイル長を短尺化できる。

光ファイバジャイロの光学系構成法として位相変調法⁽¹⁴⁻¹⁹⁾、周波数変化法^(20,21)、光ヘテロダイン方式ファイバジャイロ⁽²²⁻²⁶⁾等が考案されている。位相変調法は高い零点の安定性が特徴で、すでに、0.02度/時が達成されている⁽¹⁵⁻¹⁷⁾。周波数変化法と、光ヘテロダイン方式ファイバジャイロは広いダイナミックレンジの達成が可能であり、すでに実験系により5~6桁が達成されている^(21,23-25)。光ヘテロダイン方式ファイバジャイロは、従来筆者らが提案・開発してきた方式であるが、最近、

零点安定性をも大幅に改善する新しい構成を開発した^(27,28)。この光学系構成を図2 (a) に、出力処理エレクトロニクスを図2 (b) に示す。図3は、本ジャイロ構成で零点安定性の向上が図られたことを示す実験結果である。図 (a) は従来方式の出力、図 (b) はモニターされたドリフト、図 (c)

はこれらの差として得られた本ジャイロの出力である。優れた零点安定性が達成されたことが分かる^(27,28)。

受動型リング共振方式光ジャイロについても実験系により地球自転 (15度/時) を上回る分解能が達成されている⁽⁴⁹⁾。しかし、零点安定性等、まだ

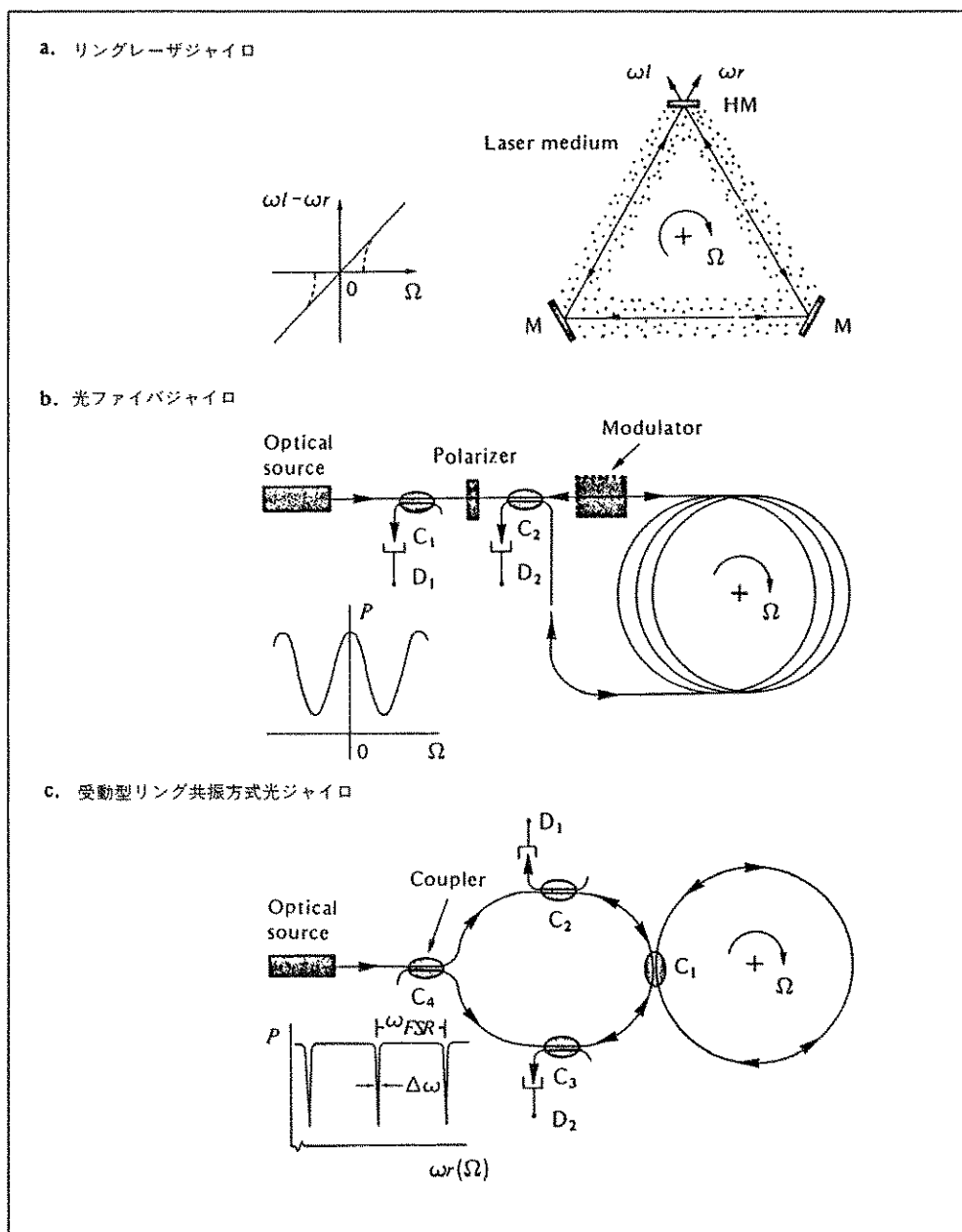
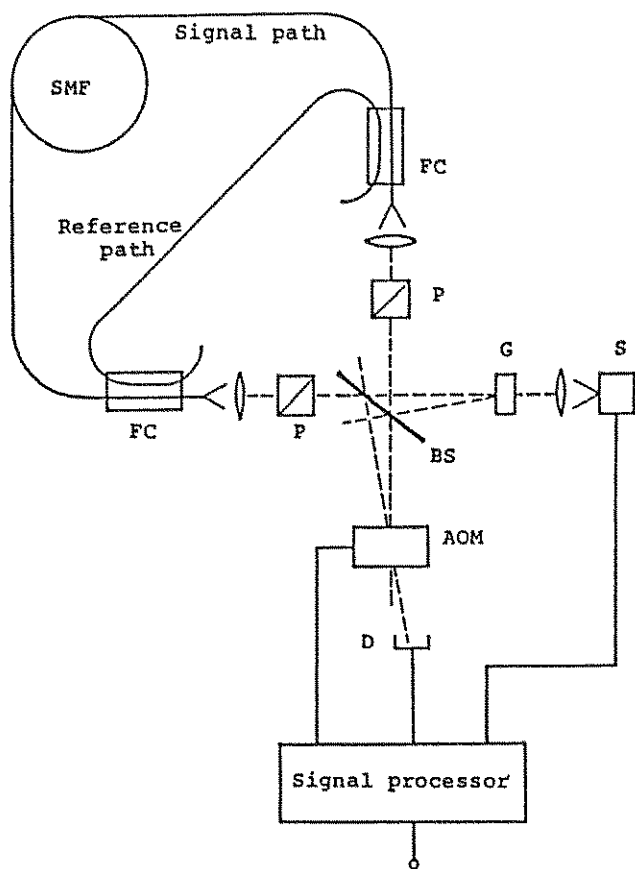
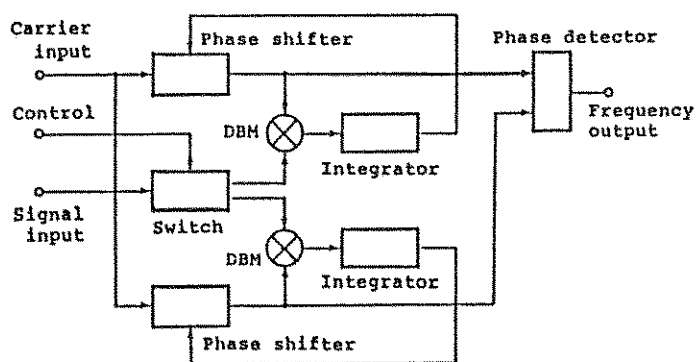


図1 光ジャイロの構成法



(a) 零点安定性の向上を図った光ヘテロダイン方式ファイバジャイロの構成概念図



(b) 信号処理回路

図2 光ヘテロダイン方式ファイバジャイロ
〔保立, 寒川^(27,28)による〕

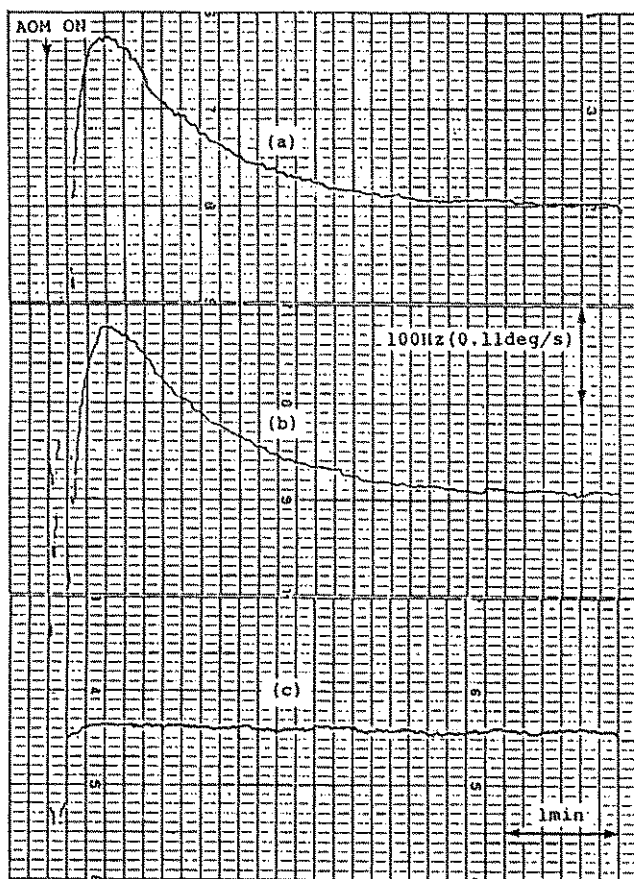


図3 AOM始動直後のジャイロ出力
(AOM温度変動の影響)
(a) 信号光, (b) 参照光, (c) 系全体
〔保立、寒川^(27,28)による〕

多くの検討が必要である。上記のような性能の達成には、以下に述べるような各種雑音要因に対する詳細な検討が大きく寄与してきた。今後も実用化を進めるうえで^(29,30)、このような雑音に対する厳密な検討が要求される。

後述するように光ファイバジャイロはその高感度化のために低コヒーレンス光源を要求するのに対して、受動型リング共振方式光ジャイロは本質的に高コヒーレンス光源が必要である。従って、雑音要因の寄与は両者で大きく異なることになる^(9,12)。

3. 光ファイバジャイロの雑音要因

光ファイバや光源の特性上生じる諸現象が雑音としてどのように挙動するかを詳細に把握し、その対策を施すことが、光ファイバジャイロの高性能化には不可欠である。表1に主な雑音要因とそれに対する対策とを示した。以下にこれらを説明しよう。

光ファイバ中で偏波状態が変動すると、左右両光間に位相差が生じ、ジャイロ出力にドリフトをもたらす。しかし、図1(b)に示したように、光路中に偏光子を挿入し干渉系光路へ単一の偏波のみを導いて出射光のうちそれと同一の偏波成分のみを取り出せば、左右両回り光に対するリング状光路(光ファイバ)の伝達関数は同一となり、この問題は解決できる⁽³¹⁾。このようにしても受光器に達する光のパワー変動は残存するので、スケールファクタの安定化には対策が必要である。周波数変調法や光ヘテロダイン法のような零位法の導入が、この問題の解決に有効である。上記の偏光子

能化には不可欠である。表1に主な雑音要因とそれに対する対策とを示した。以下にこれらを説明しよう。

表1 光ファイバジャイロの性能劣化要因とその対策

雑音要因	説 明	対 策
光ファイバ中での偏波状態変動	一般の単一モード光ファイバでは直線偏波で励振しても出射光は楕円偏波となり、その偏波状態変動により出力が変動	偏光子を挿入：直線偏波で光ファイバを励振し、出射光のうちそれと同一方向成分のみを偏光子で取り出す（出力光量の変動は残る） ⁽³¹⁾
両光間の光路差	左右両回り光間に光路差があると、光源のスペクトル変動により出力が変動	光路差のない光学系の採用、光源の安定化 ^(35,36)
光ファイバ中での両光波間の周波数差	光ファイバ中で両光波間に周波数差があると、光ファイバの温度変動等で出力が変動 ⁽²²⁾	周波数変化法では、AOMを2個用いて周波数差を必要最小限におさえる
光ファイバ中の不均一な温度変動	光ファイバの温度がその長さ方向に不均一に変動すると出力が変動 ^(37,38)	光ファイバ中央に関し対称な温度分布となるように巻く ⁽³⁷⁾
地磁気	地磁気のため光ファイバがファラデー素子として作用し、光ファイバ中のリターダ機構とあいまってドリフトを生じる ⁽³⁹⁾	磁気シールド、偏波維持光ファイバの利用が有効：特別なねじれ成分の除去が効果的 ⁽⁴¹⁻⁴⁴⁾
伝搬光強度による光ファイバの光カー効果	光ファイバ中での伝搬光強度による光カー効果は、自分自身と逆回り光とでは1:2の寄与となるので、方向性結合器の分配比が変動すると出力が変動	光源をデューティ50%の方形波で変調、低コヒーレンス光源の利用 ^(45,46)
光ファイバ中の後方レーリ散乱	光源の干渉性が良好な場合、光ファイバ中の後方レーリ散乱が信号光と干渉して出力が変動 ⁽⁴⁷⁾	低コヒーレンス光源の利用、LDの直接周波数変調性の利用、光波に位相変調、パルス法 ^(48,24,25)

には、非常に良好な消光比(90dB)が要求される⁽³²⁾。これに関しては、偏波維持光ファイバを用い、低コヒーレンス光源を導入した場合にはこの要求が緩和されることが示されている⁽³³⁾。同様の効果はデポラライザを用いても期待できる⁽³⁴⁾。

光ファイバ中を光波が伝搬する時間が有限であるため、長さ方向に不均一な温度変動が生じると出力がドリフトする⁽³⁷⁾、この点に関する実験結果を図4に示す⁽³⁸⁾。これはセンサ用光ファイバループの内側と外側に意識的に温度差を与えたときの様子である。図4 (a) は温度変化、図4 (b) はジャイロの零点ドリフトであり、温度差の時間微分に比例してドリフトが生じること、その大きさがジャイロ性能にとって大きい問題となることがわかる。光ファイバの巻き方⁽³⁷⁾、収納法を工夫することが一つの対策である。

地磁気のために光ファイバがファラデー素子として作用することと、光ファイバが完全には軸対称ではなくリターダとして働くことがあいまって、地球自転速度相当のドリフトが生じることも

指摘されている⁽³⁹⁾。この問題への対策としては、偏波維持光ファイバを用いるとファラデー効果による偏波面回転が生じにくく有効であることが示されている⁽⁴⁰⁾。筆者らは、光ファイバのリターダ機構として現実的かつ不可避なねじれを例にとり、偏波維持光ファイバによるこのドリフトの低減効果を解析した⁽⁴¹⁾。結果を図5に示す。通常の単一モード光ファイバを巻いた際に生じる程度の中途半端な複屈折率 $\Delta\beta$ では、ねじれとあいまってこれがリターダとして働き、ドリフトを増大させる。これに対し、 $\Delta\beta$ が良好な偏波維持光ファイバのそれ(5,000rad/m)ぐらいに大きくなると、偏波面回転の抑制効果が勝るようになり、ドリフトが低減できることがわかる。

更に、このドリフト（静止時にはバイアスとして働く）は光ファイバループ1ターンをちょうど1周期とするねじれ成分が存在するときのみ生じることがわかっている⁽⁴¹⁾。図6はその実験例で、同図 (a) の一方の平板FB₁のみでファイバをねじるとこの成分が生じてバイアスが増加するのに対

して、FB₂を同一方向に移動させるとねじれはこの2倍の周期およびその高調波のみとなりバイアスが元に戻ることが示される^(42,43)。この他、直交偏波モード間に大きい損失差のある、いわゆるポラライジング光ファイバや、絶対単一偏波光ファイバを用いると、更にこのドリフトの低減が可能であることも示されている⁽⁴⁴⁾。

光ファイバ中を伝搬する光波自身の強度に比例してその屈折率が変化するという光カー効果のため、ジャイロドリフトが生じる。一方の光波への寄与が自分自身と逆まわり光では1:2となるために、両回り光を作る方向性結合器の分配比が変動すると出力ドリフトが生じる。その大きさは地球自転相当となり得るもので、図7のような実験

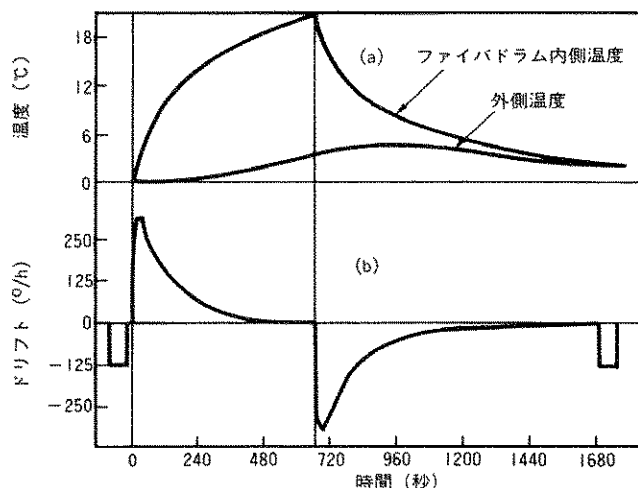


図4 光ファイバ中の不均一な温度変動によるジャイロドリフト。(a) 温度変化、(b) ジャイロドリフト [Mohr, Kiesel⁽³⁸⁾による]

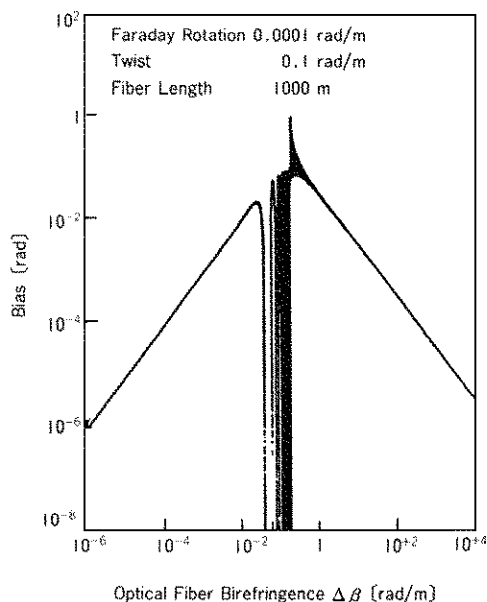


図5 偏波維持光ファイバによるファラデー効果誘起ドリフトの低減 [Hotate and Tabe⁽⁴¹⁾による]

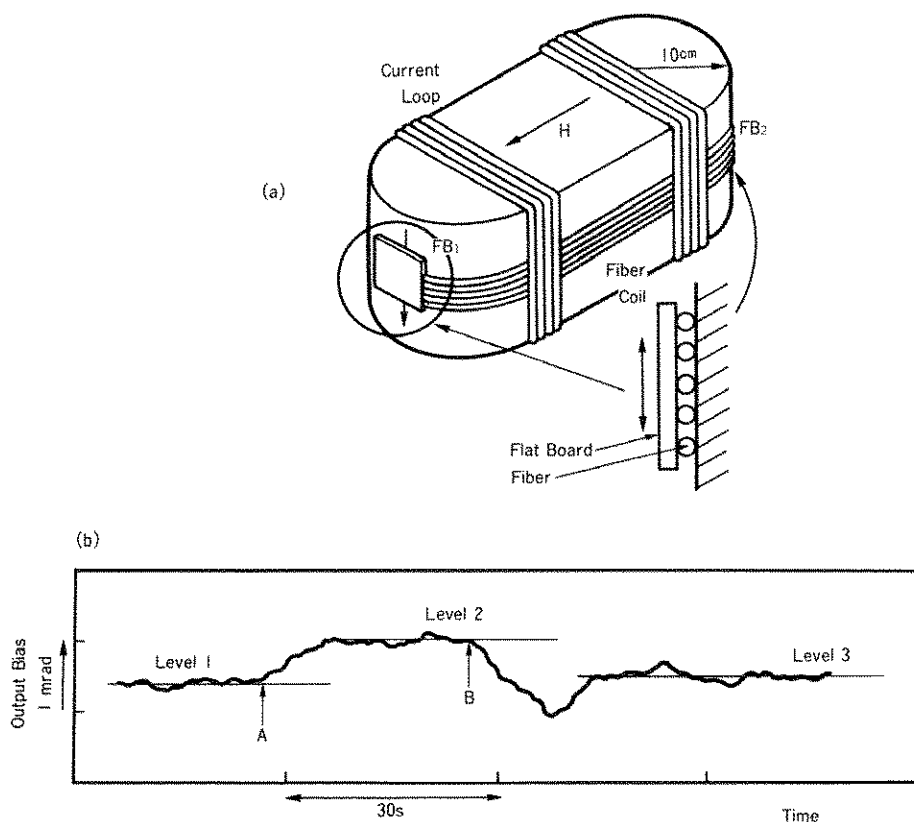


図6 光ファイバのねじれ成分とファラデー効果誘起バイアスとの関係 [Hotate and Tabe⁽⁴²⁾による]

結果が得られている⁽⁴⁵⁾。対策としては、光波をデューティ50%の方形波で強度変調することで両者の寄与の比を相殺する手法（図7の■はこのようにしてドリフトを低減したものである）のほか、スペクトル幅の広い光源を用いるとこの問題が解決できることも示されている⁽⁴⁶⁾。

短期的な分解能の制限要因として最も重要なものは光路中の後方散乱であり、光学系要素端面からのフレネル反射や光ファイバ中などでの後方レーリ散乱光が信号光と干渉すると大きな雑音を生じる⁽⁴⁷⁾。スペクトル幅が広くコヒーレンスの低い光源を導入して、後方レーリ散乱光と信号光間の大きな光路差による干渉性の劣化を利用する手法が有効である⁽⁴⁸⁾。図8は、光源のスペクトル幅を広げることにより光ファイバジャイロの分解能の

向上が図られることを実験的に示した結果である^(24,25)。

4. 受動型リング共振方式光ジャイロの雑音要因

受動型リング共振方式光ジャイロにおいても、リング共振器長の温度的、機械的変動を相殺させるために、左右両回り光を用いる必要があり、図1(c)に示した系がひとつの基本光学系となる。すでに光ファイバと光ファイバカップラーとを用いた共振器によりジャイロ系が構成されて、数度/時の短期分解能が達成されている⁽⁴⁹⁾。しかし、主に零点の安定性に関して雑音要因の挙動把握がなお必要である。これまでに行われた検討結果を表2に示す。ここでは、筆者らのグループでの検討結果を中心にまとめさせていただいた。

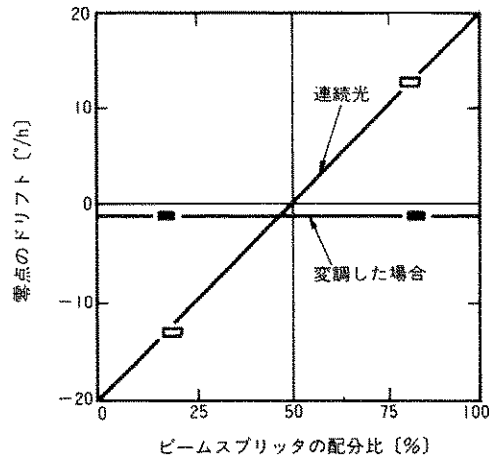


図7 光カー効果によるジャイロバイアス変化
〔Bergh, Lefevre, Shaw⁽⁴⁵⁾による〕

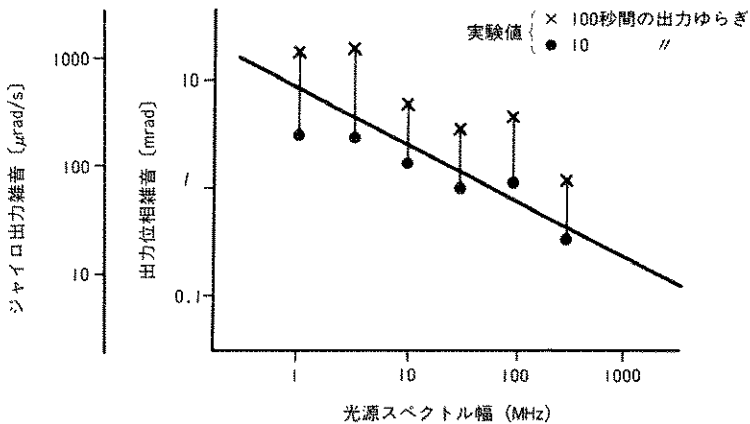


図8 光源コヒーレンスの低減による後方散乱
雑音の減少〔Hotate, Okuma,
Higashiguchi, Niwa^(24,25)による〕

OPRGでは光の共振を利用するために、光ファイバジャイロとは逆に高コヒーレンス光源が要求される。図9は、光源のスペクトル幅をパラメータにとりOPRGの理論的回転検出限界を解析した結果である^(50,51)。ファイバに最適長が存在することが分かる他、航空機用($\Omega_{SN} \sim 10^{-7}$ rad/s)の実現にはスペクトル幅として ~ 100 kHzが要求され、LDの狭スペクトル化が重要であることがわかる。

先に述べたようにOPRGでは左右両光を用いる。このため、受光器には信号光の他に、これと逆回

りのもう一方の信号光が生じさせた後方散乱光とが到達し、結果的に両者の干渉成分、及びこの後方散乱光自身の強度の2つの雑音成分が現れる。この内前者についてはEzekielらが検討し、図10に示すようにRLGと同様のロックイン現象を生じ得ることを示している⁽⁵²⁾。しかしこれは、一方の信号光に共振器へ入射する前にFMあるいはPMをかけてそのキャリア成分を除去する事で回避できる⁽⁵²⁾。これに対し筆者らは、後者の成分は回転入力時に双峰特性を示し、これがOPRGの直線性を10%

表2 受動型リング共振方式光ジャイロの性能劣化要因とその対策

雑音要因	説 明	対 策
光源のコヒーレンス	共振器の鋭い共振特性を抽出するには狭スペクトル光源が必要：スペクトル幅数10kHz～100kHz ^(50,51)	半導体レーザの狭スペクトル化が重要
光ファイバ中での偏波状態変動	リング共振器中には2つの固有偏波状態が存在し、その一方のみを励振する必要がある ⁽⁵⁷⁾	2つの偏波状態調整器の利用：要求される調整精度が極めて高い——偏波維持光ファイバの利用 ⁽⁵⁷⁾
光ファイバ中の不均一な温度変動	光ファイバの温度がその長さ方向に不均一に変動すると出力が変動 ^(27,58)	光ファイバ中央に関し対称な温度分布となるように巻く（干渉計型より光路長が短いので相対的に影響は少ない） ⁽⁵⁸⁾
伝搬光強度による光ファイバ中の光カー効果	光ファイバ中での伝搬光強度による光カー効果は、自分自身と逆回り光とは1：2の寄与となるので、方向性結合器の分配比が変動すると出力が変動	光源をデューティ50%の方形波で変調 ⁽⁵⁶⁾
光ファイバ中の後方レーザ散乱	共振器中で生じた後方散乱は、受光器上で2つの成分を形成し、いずれも共振特性を示す：信号光と散乱光との干渉成分、散乱光自身の強度 ^(50,51)	前者は入射光波周波数への帰還のある系では入力回転に比例した振動数で振動し、ロックイン現象を起こす ⁽⁵²⁾
		右あるいは左まわりの光の一方にPMあるいはFMをかけて、キャリア周波数を除去する ⁽⁵²⁾
地磁気		後者は回転入力時に双峰特性を示し直線性の劣化を起こす ^(50,51,53-55)
		左右両回り光を別々の周波数でPMあるいはFMし、受光器出力をこの周波数でそれぞれ別々に同期検波することで信号光の共振ピークを求める ^(50,51,54)
地磁気	地磁気のため光ファイバがファラデー素子として作用し、光ファイバ中のリターダ機構とあいまって両回り光間に共振周波数の差を与える ^(59,60)	偏波維持光ファイバを用い、さらにその特別なねじれ成分を除去する ^(59,60)

も劣化させることを示した^(53,54)。図11 (a), (b) は、回転入力時の共振特性の実験及び理論解析結果である⁽⁵³⁻⁵⁵⁾。この問題への対策として、筆者らのグループは、左右両回り光を共振点に固定させるための入力光へのFMを両回り光に対し図12に示すようにそれぞれ異なる周波数で行ない、PSDで分離する手法を提案した⁽⁵⁰⁾。

光共振器中での光カー効果は、光ファイバジャイロの場合と同様に、左右両回り光の強度比のゆらぎにより出力ドリフトをもたらす。このドリフトは光源の出力をデューティ50%の方形波で変調することで低減可能であること、またこの変調周期に対する制約条件があることが示された⁽⁵⁶⁾。

光ファイバリング共振器での共振には、リングをひと回りした際に偏波状態が元の状態に戻るような特別な偏波状態(固有偏波状態：ESOP) があずかっていることも示されている⁽⁵⁷⁾。これは2つ存在し、2つの共振ピークが現れる。低ドリフト化のためには一方の共振のみとすることが必須で、

2つの偏波状態調整器で入力SOPと共振器の1つのESOPとを合わせることがOPRGでの偏波状態変動への対策である⁽⁵⁷⁾。これは光ファイバジャイロとの大きな相違である。解析の結果、航空機用などの性能達成には、SOPの調整にほとんど実現不可能な要求が課され、偏波維持光ファイバ、ないしは絶対単一偏波光ファイバによる共振器の利用が望まれることが分かった⁽⁵⁷⁾。

最近、筆者らは、地磁気によるファラデー効果がOPRGに与える影響を解析し、光ファイバジャイロの場合と同様に特別なねじれ成分が光ファイバに加わると左右両光間に共振周波数の差が生じてドリフトが現れることが示された。この特別なねじれとは、光ファイバループ1ターンをちょうど一周期とするねじれである。図13に示すようにこのねじれ成分のパワースペクトルWの除去でドリフト低減が可能となる^(59,60)。ここで、破線は受光器の雑音で決まる理論的回転検出限界である。

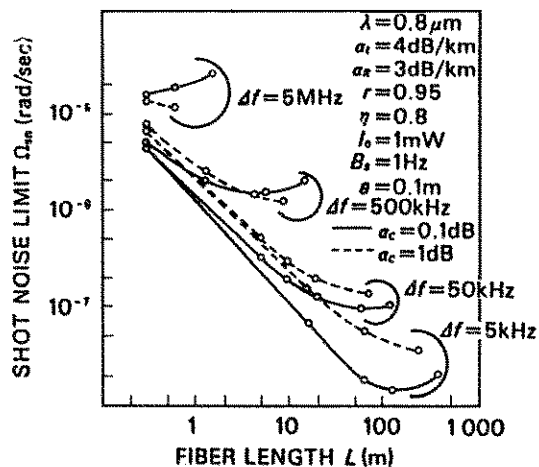


図9 光源のコヒーレンスと理論的回転検出限界 (Iwatsuki, Hotate, Higashiguchi⁽⁵⁰⁻⁵¹⁾による)

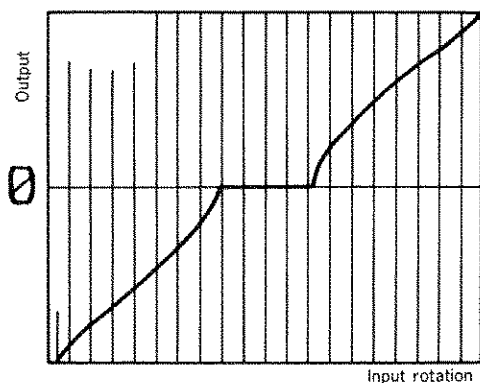


図10 OPRGにおけるロックイン減少 (Zarinetshi, Ezekiel⁽⁵²⁾による)

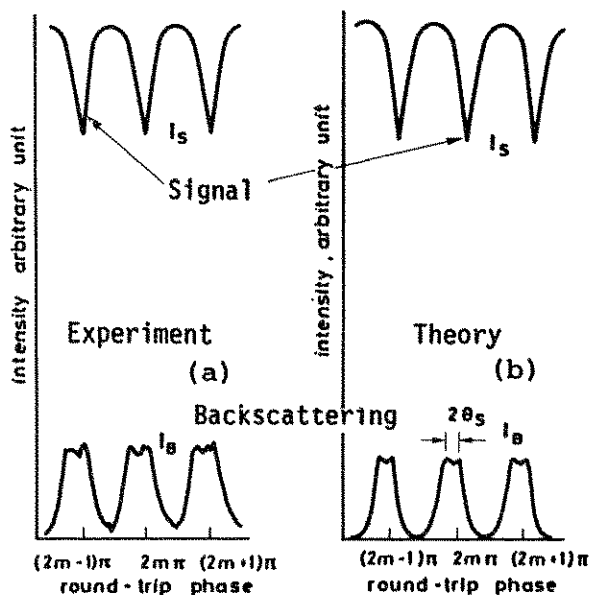


図11 回転時に生じる後方散乱光の共振点分離現象 (Iwatsuki, Hotate, Higashiguchi⁽⁵³⁻⁵⁵⁾による)

5. むすび

受動型光ジャイロの高性能化に必要な、各種雑音要因の挙動把握とその除去手法の研究を中心に、光ジャイロの研究動向を紹介した。通常の光センサでは問題とならなかったようないろいろな物理

現象を取りあげる必要がある。光ジャイロは、まさに極限センサである。

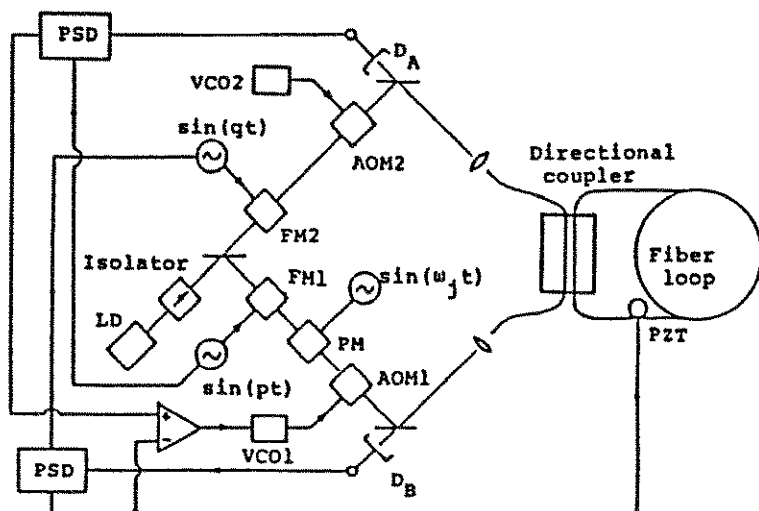


図12 後方散乱光による雑音を除去するための光学系概念図 (Iwatsuki, Hotate, Higashiguchi⁽⁵⁰⁾による)

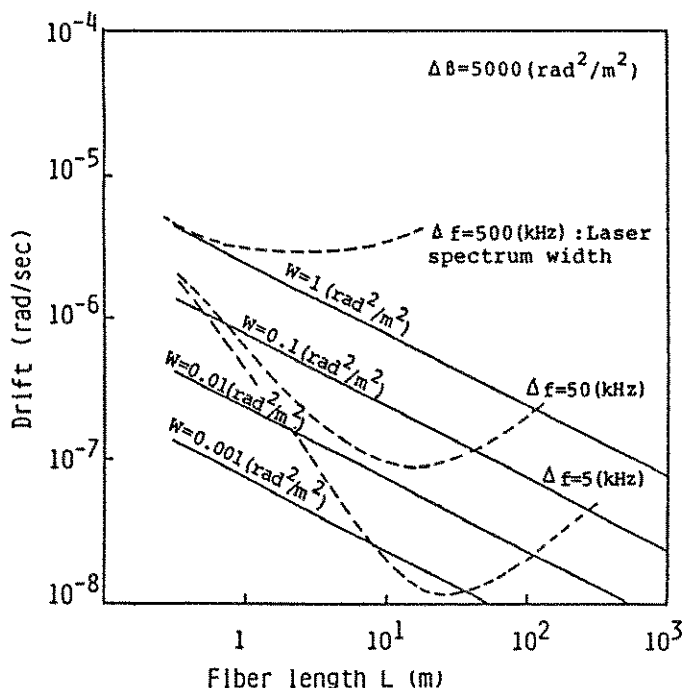


図13 出力ドリフトとファイバーループ長の関係
(破線は典型的なパラメータのもとでのショットノイズによる回転検出限界⁽⁵⁰⁾を比較のために示したものである。)
〔保立, 村上⁽⁵⁹⁾による〕

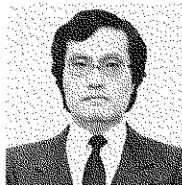
参考文献

1) K.Hotate, JARECT (OHM/North-Holland, Tokyo, 1985), Ed.Y.Suematsu, p.333.

2) S.Ezekiel and H.J.Arditty eds., Fiber Optic Rotation Sensors and Related Tech., Springer, New York, 1982.

- 3) T.G.Giallorenzi et al, JQE, **18** (1982) 626.
- 4) R.Bergh, H.Lefevre, H.Shaw, JLT, **2** (1984) 91.
- 5) 保立, 東口, 丹羽, 計測と制御, **20** (1981) 937
- 6) 坪川, 大塚, レーザ研究, **11** (1983) 889.
- 7) 保立, 日経メカニカル, (1985, 6, 3) 75.
- 8) 保立, 光学, **15** (1986) 61.
- 9) 大越, 西原, 岡本, 久間, 大津, 保立, 光ファイバセンサ, オーム社, 1986, p.207.
- 10) 保立, 光ファイバセンサ技術資料集, 監修芳野, 第一インターナショナル, 1986, p.303.
- 11) B.Kim and H.Shaw, IEEE Spect. (1986.3) 54.
- 12) 保立, 光ファイバセンサワークショップ, WOFS 4-15 (1987) 105.
- 13) V.Vali, R.Shorthill, A.O., **15** (1976) 1099.
- 14) R.Ulrich, Opt. Lett., **5** (1980) 173.
- 15) R.Bergh, H.Lefevre, H.Shaw, Opt. Lett., **6**(1981) 502.
- 16) H.Lefevre, R.Bergh, H.Shaw, Opt. Lett., **7**(1982) 454.
- 17) R.Bergh et al., Opt. Lett, **7** (1982) 563.
- 18) N.Frigo, OFS'86, Tokyo, (1986) 181.
- 19) A.Kersey, N.Frigo, W.Burns, OFS'86, 185
- 20) J.Davis, S.Ezekiel, Opt. Lett, **6** (1981) 505.
- 21) W.Auch et al., Symp. Gyro Tech. (1983) 2-1.
- 22) K.Hotate, N.Okuma, M.Higashiguchi, N.Niwa, Intern. Conf. Fiber Optic Rotation Sensors, MIT, (1981)
- 23) ..., Opt. Lett, **7** (1982) 331.
- 24) ..., Symp. Gyro Tech, Stuttgart, (1982) 4-1.
- 25) 保立, 大熊, 東口, 丹羽, SICE論文集, **19** (1983) 319.
- 26) K.Hotate, M.Higashiguchi, N.Ohgi, Y.Ueno, Symp.Gyro Tech., Stuttgart, (1984) 4-1.
- 27) K.Hotate, S.Samukawa, N.Niwa, OFS'88, New Orleans, (1988) 397
- 28) 保立, 寒川, 信学技法, OQE86-173, (1987) 1.
- 29) C.Kay, IEE Proc., **132** (1985) 259.
- 30) H.Lefevre et al., OFS'85, (1985) pd7-1.
- 31) R.Ulrich, M.Johnson, Opt. Lett., **4** (1981) 154.
- 32) E.Kintner, Opt. Lett., **6** (1981) 154.
- 33) W.K.Burns et al, IEEE JLT, **1** (1983) 98.
- 34) R.Fredrick, R.Ulrich, E.L., **20** (1984) 330.
- 35) K.Hotate, Y.Yoshida, M.Higashiguchi, N.Niwa, Electron. lett., **16** (1980) 941.
- 36) ..., Appl. Opt., **20** (1981) 4313.
- 37) M.Shupe, Appl. Opt., **19** (1980) 645.
- 38) F.Mohr, P.Kiesel, OFS'84, (1984) 305.
- 39) K.Boehm et al., Opt. Lett., **7** (1982) 180.
- 40) W.Auch, E.Schlemper, OFS'83, London, (1983).
- 41) K.Hotate, K.Tabe, Appl. Opt., **25** (1986) 1086.
- 42) ..., OFS'86, Tokyo, (1986) 189.
- 43) K.Hotate, K.Tabe, IEEE, JLT, **5** (1987) 997.
- 44) K.Tabe, K.Hotate, Optica Acta, (1987)
- 45) R.Bergh, H.Lefevre, H.Shaw, O.L.7 (1982) 282.
- 46) R.Bergh et al., Opt. Lett., **7** (1982) 563.
- 47) C.Cutler, S.Newton, H.Shaw, O.L.5 (1980) 488
- 48) K.Boehm et al, E.L.17 (1981) 352.
- 49) R.Meyer et al., Opt. Lett., **8** (1983) 644.
- 50) K.Iwatsuki, K.Hotate, M.Higashiguchi, Appl Opt, **23** (1984) 3916.
- 51) ..., OFS'84, Stuttgart, (1984)
- 52) F.Zarinetshi, S.Ezekiel, O.L.11 (1986) 401.
- 53) K.Iwatsuki, K.Hotate, M.Higashiguchi, OFS'86, Tokyo, (1986) 201.
- 54) ..., Appl. Opt., **25** (1986) 4448.
- 55) ..., Electron. Lett., **22** (1986) 135.
- 56) ..., IEEE JLT, **4** (1986) 645.
- 57) ..., Appl. Opt., **25** (1986) 2606.
- 58) D.Shupe, Appl. Opt., **20** (1986) 286.
- 59) 保立, 村上, 信学技法, OQE87-71 (1987) 39
- 60) K.Hotate, M.Murakami, OFS'88, New Orleans, (1988) 405.

〔筆者紹介〕



保立和夫(ほたて かずお)

昭和49年東京大学工学部電子工学科卒, 東京大学・宇宙航空研究所, 工学部境界領域研究施設専任講師を経て昭和62年より同大学先端科学技術研究センター助教授, 昭和54年に電子通信学会業績賞, 昭和59年に同学会著述賞, 計測自動制御学会技術賞受賞, オプトエレクトロニクスによるセンシング技術, ならびにコンピューティング技術の研究に従事, 光ファイバジャイロのような極限センサの実現に興味を持っている。