



光ファイバとその応用—IX

光ファイバ応用部品(2)—光ファイバジャイロへの応用

保立和夫

東京大学先端科学技術研究センター 〒153 東京都目黒区駒場 4-6-1

(1990年4月27日受理)

Optical Fiber and Its Applications—IX

Fiber Optic Devices (2)—Optical Fiber Gyroscopes

Kazuo HOTATE

RCAST, Research Center for Advanced Science and Technology, University of Tokyo,
4-6-1, Komaba, Meguro-ku, Tokyo 153

1. はじめに

光ファイバを用いたジャイロが実用期を迎えようとしている^{1,2)}。長尺の光ファイバコイルを左右逆回りに伝播した光波間の位相差を高精度に測定することで慣性空間に対する回転計として機能するセンサーである¹⁻⁹⁾。高い機能が要求される航空機の慣性航法用に匹敵する性能も達成されている。

光ファイバジャイロの研究・開発のなかで、単一モードファイバ型光デバイスが大きく貢献してきた。光ファイバジャイロの研究が、これらデバイス研究の牽引役であったとも言える。今回は、前回紹介した単一モードファイバ型光デバイス¹⁰⁾の役割に焦点を合わせながら、光ファイバジャイロの研究・開発状況を紹介する。

通常光ファイバジャイロと呼ばれるものは、上記の両光間位相差を干渉計を構成して測定する手法である。これに対して、数メートルといった短尺のファイバでリング状の光共振器を構成し、その共振周波数変化を捉える手法もある。受動型リング共振方式光ファイバジャイロと呼ばれるこの方式においても、単一モードファイバ型光デバイスが重要である。本稿の後半では、その研究動向も概観する。

2. 干渉型光ファイバジャイロの原理

図1が、干渉型光ファイバジャイロの基本光学系構成

である^{1-3,6-8)}。光源を発した光は、ビームスプリッタ BP₂ により二分されて光ファイバコイル中を左右逆回りに伝播する。光ファイバコイルの軸回りに加わる回転に比例して両光間に位相差が生じる。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。両光による干渉からこの位相差を読み取る。サニャック効果の感度は光ループが取り囲む面積に比例するが、きわめて小さい。そこで、長尺の光ファイバを用いて巻数倍だけ感度向上を図る。典型的なファイバ長は、数 100 m から 1 km であり、ファイバの低損失化によって初めて実現されたセンサーである。航空機の慣性航法用のような高級な用途には、 10^{-7} rad/s の分解能が要求される。この値は、長尺のファイバを用いてもなお約 $1 \mu\text{rad}$ の位相変化にしかならず、雑音要因に対する極限的な対応が必要となる。図1中の各光デバイスはこのためのものである⁹⁾。

受光器が BP₂ の位置になく、BP₁ の位置にあるのは、BP₂ の透過および反射特性を左右両回り光に等しく一はずつ経験させるためである。これらビームスプリッタの特性変動の影響が除去できる。また、左右両回り光は厳密に同じ光路(空間位置)を通る必要がある。たとえば空気の屈折率が温度等で揺らぐことへの対策である。このために、空間モードフィルタ(ファイバ)が用いられる。通常の単一モード光ファイバ中では、偏波状態は容易に変化する。この結果、左右両回り光は受光器

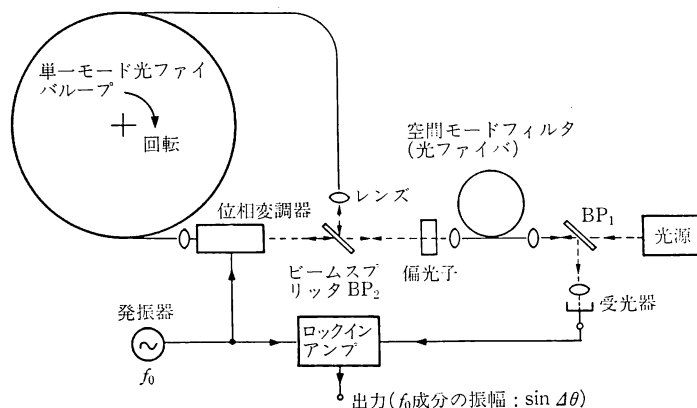


図1 干渉型光ファイバジャイロの基本光学系

上で異なる偏波状態になり、両者による干渉強度が揺らぐ。この対策が図中に見られる偏光子である。ファイバコイルへ入射させた直線偏波と同一成分のみを取り出すと、左右両回り光が示す位相差は、静止時には厳密にゼロとなる。

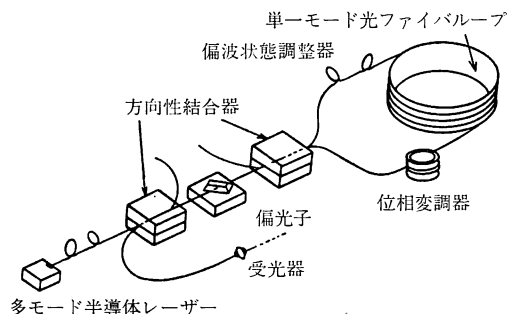
干渉光強度は回転に対して余弦関数的に変化する。つまり、微小回転に対して出力変化はきわめて小さい。両光間に $\pi/2$ の位相差が与えられれば出力は正弦関数となって都合が良いが、この位相バイアスは上記の要求分解能に比べて7桁も大きく現実的ではない。これらを背景に考案されたのが位相変調器の導入である。変調器がファイバコイルの端に位置しているのがポイントで、受光器出力から位相変調周波数成分を同期検波すると、その振幅は回転に対して正弦関数となる。

ファイバジャイロには、後述するようにこのほかにも多くの雑音要因がある。そのうちで最も大きな要因は光学系中での反射および後方への散乱である。一方の光による反射・散乱は、他方の光の位相を乱す。ファイバが示す僅かの後方レーリー散乱でも地球の自転速度を上まわる雑音を生じうる。ましてや、光学部品端面からの反射は禁物である。

3. 全ファイバ型光ファイバジャイロ

実用的な光ファイバジャイロを得るためには、少なくとも上記対策を全て盛り込んだ光学系が必要である。これは光ファイバジャイロの minimum configuration と呼ばれる。個別光学部品では、位置合せ、反射除去に困難が伴う。上記の要求全てを初めて真に達成しえたのは、単一モードファイバ型光デバイスによる構成であった。

図2は、1981年に米国スタンフォード大学の研究グ

図2 全ファイバ型光ファイバジャイロ^{11,12)}

ループによる世界で最初的全ファイバ型光ファイバジャイロである^{11,12)}。図1の全ての光学要素が単一モードファイバ型光デバイスにより実現された。ここで特記すべきことは、この系が1本のファイバで作られていること、つまり、どこにも接続点がないことである。ファイバ端面は斜めに研磨されており、最大の雑音要因であったフレネル反射は皆無となった。残存するファイバの後方レーリー散乱の影響も、光源を多モード半導体レーザーとすることで低減している。ファイバコイルの中点からの反射を除けば、信号光と散乱光の間には大きな光路差がある。したがって、低コヒーレンス光源を用いれば、両者の干渉を防止できる¹³⁾。干渉型光ファイバジャイロの光源としては、レーザーは不向きである。可干渉長数十 μm の端面発光型高輝度 LED (スーパーluminescentダイオード) が有効である。現在では、融着技術の進展に伴い、個別の単一モードファイバ型光デバイスを接続して系を構成することができる。

図3(a)は図2の系の分解能の測定結果である¹¹⁾。0.02°/h、つまり、600日かかって1回転という航空機の慣性航法用の要求が達成されている。同図(b)は5時間

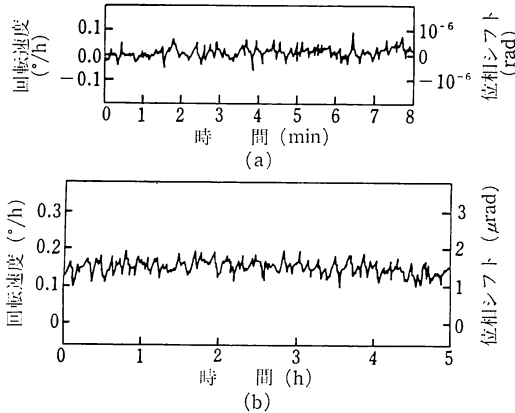


図3 全ファイバ型光ファイバジャイロの特性
(a) 短期分解能 (積分時間 1 秒)¹¹⁾,
(b) 零点安定性 (積分時間 30 秒)¹²⁾

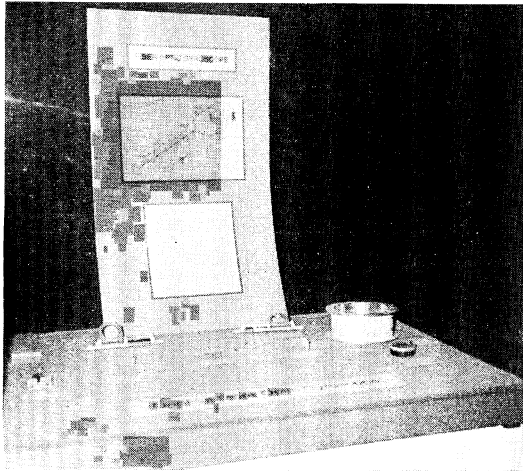


図4 世界最初の全ファイバ型光ファイバジャイロ
(スタンフォード大学 ギンツトン研究所で筆者が撮影)

にわたる零点安定性の確認結果である¹²⁾。この特性は後述する他の雑音要因に対する対策をも施した結果であるが、全ファイバ化によるところが大きい。

この研究は、光ファイバジャイロという極限センサーの実現可能性を実証したきわめて価値ある成果であり、ファイバジャイロ研究の歴史に残るマイルストーンである。図4は、スタンフォード大学、ギンツトン研究所に今も展示されている上記実験系であり、筆者が1990年2月に同研究所を訪れた際、撮影したものである。

4. 干渉型光ファイバジャイロの雑音要因

光ファイバジャイロの高性能化への要求について主に光学系構成法の観点から説明し、単一モードファイバ型

光デバイスの有効性を示した。この他、光ファイバそのものが示すさまざまな物理現象も雑音要因として働き、その挙動把握と対策の考察とが光ファイバジャイロ研究の中で大きな意味をもってきた¹⁻³⁾。

まず第一は、上記後方レーリー散乱である。光ファイバの損失は、 $1.55 \mu\text{m}$ では 0.2 dB/km 程度であるが、そのほとんどがレーリー散乱である。このうち、ファイバに再び捕捉され、逆方向に伝播する成分がジャイロの雑音となる。ファイバ長が長いことと、微小位相の測定が要求されることから、このわずかの散乱も見逃せない。上述のようにスーパーluminescentダイオードが用いられるほか、中程度の性能ならコンパクトディスク用の多モード半導体レーザーの利用も可能である。

光カー効果により光の強度に比例してファイバの屈折率が変化する。その量はやはりわずかではあるがジャイロ性能の劣化要因となる。たとえば右回り光が受ける光カー効果は、その右回り光による寄与を1とすると、左回り光の寄与は2となる。この結果、左右両光間の強度比が揺らぐと出力ドリフトとなる。その対策も、また低コヒーレンス光源の導入である¹²⁾。

図5は、ファイバコイルの内側と外側の温度を変化させたときの出力変化の測定結果である¹⁴⁾。ここで、ファイバはコイル内側から整然と巻かれている。内外の温度差の時間微分に比例した出力ドリフトが観察され、これは理論解析によっても確認された。内外の温度差が時間的に変化していると、光が有限の伝播速度をもつために、左右両光は異なるファイバの温度を、つまり屈折率を感じることになり、ドリフトが生じる。1 km のファイバが光が通過するのに要する時間は $5 \mu\text{s}$ とわずかで

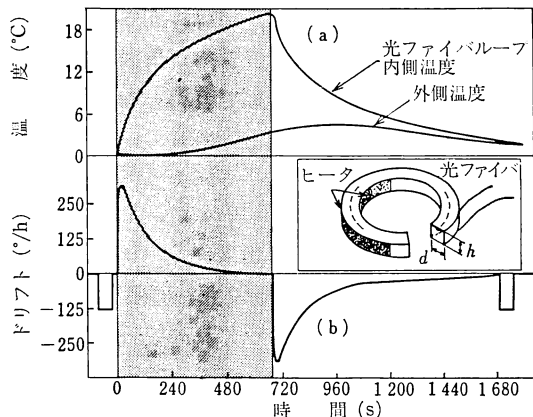


図5 光ファイバコイルの温度分布変動によるジャイロドリフト¹⁴⁾
(a) 温度変化、(b) ジャイロドリフト

ある。光ファイバジャイロが如何に極限センサーであるかがわかる。対策は左右両光が同じ温度分布中を伝播するよう工夫すること、つまりファイバの中心から同距離の2点が隣接して巻かれるようにすることである。このための特殊な巻き方が考案されている¹⁵⁾。ファイバジャイロ用のコイルは、それ自身が特殊な光ファイバ型部品である。

上述のように偏波変動によるドリフトの低減のために偏光子を挿入する。航空機の慣性航法用の性能達成には、消光比 90 dB が要求される¹⁶⁾。図2の全ファイバ型の系には、前回紹介した複屈折結晶を用いたファイバ型偏光子が用いられた¹⁰⁾。その消光比はファイバジャイロの性能から逆算して、90 dB 以上であると結論されている⁶⁾。しかし、この要求は厳しすぎる。要は、所望の偏波成分に対して干渉しうる不要偏波成分が抑圧されればよい。光源としては可干渉長の短いものが使われるので、両偏波成分間に可干渉長以上の光路差を設ければ、両者の干渉は抑圧されて、消光比に対する要求が緩和できる¹⁷⁾。前回紹介したファイバ型デポラライザはこのためのものである。偏波維持光ファイバは、縦横両偏波間に遅延を与えるので、これをセンシングコイルとすれば他にデポラライザは不要となる¹⁸⁾。最近ではこのような工夫によって偏光子への要求を緩和している。

このほか、地磁気のためにファイバがファラデー素子として作用しドリフトが生じる。筆者らは、偏波維持光ファイバによりこのドリフトが低減可能であることを示した¹⁹⁾。図6はその解析結果である。複屈折 $\Delta\beta$ が極端

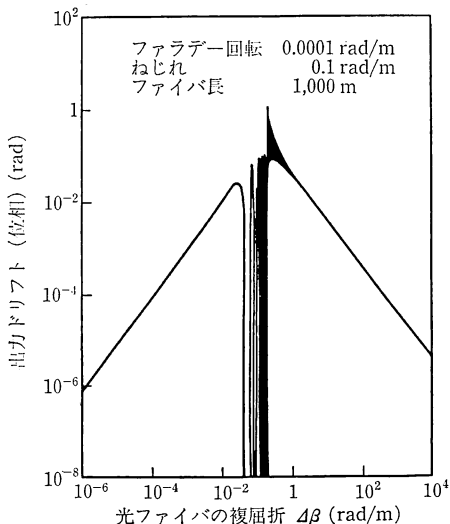


図6 偏波維持光ファイバによるファラデー効果誘起ドリフトの低減効果¹⁹⁾

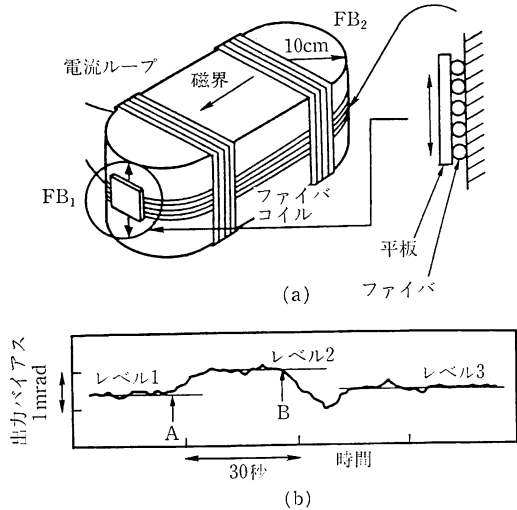


図7 光ファイバコイル中の特別なねじれ成分とファラデー効果誘起バイアスの関係²⁰⁾
(a) ねじれを起こす機構, (b) 出力バイアス変化

に小さなファイバ、つまり理想的な真円ファイバでもよいが、現実的には $\Delta\beta$ の大きな偏波維持光ファイバの導入が有効である。このドリフトは、コイル1ターンをちょうど1周期とするねじれ成分がファイバに存在するときのみ生じることも見いだした¹⁹⁾。図7はその実験例であり、同図(a)の一方の平板 FB_1 のみで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、 FB_2 を同一方向に移動させるとねじれはこの半分の周期およびその高調波成分のみとなってバイアスが元にもどる。つまり、このねじれ成分の低減により磁気シールドが不要となる²⁰⁾。このように、偏波維持光ファイバは本ジャイロにとって、重要な構成要素である。

5. 干渉型光ファイバジャイロの機能向上

図2の系で、分解能およびゼロ点の安定性としてはきわめて高い性能が達成された。しかし、航空機の慣性航法用には、これらのほかにも満たすべきスペックがある。つまり、入力回転と出力の変換係数(スケールファクタ)の安定性として約 10 ppm, さらに、測定のダイナミックレンジは7桁が必要である¹⁻³⁾。これら要求は、図2の系、つまり minimum configuration では達成できない。それは、この系の出力が位相変動成分の大きさというアナログ値であるためである。

サンニャック位相を相殺する人為的位相を作り出し干渉状態を常に零出力に保持すると(零位法)、光源のパワー変動や光学系中での損失・結合度変動は出力に影響せ

ずスケールファクタの向上に役立つ。ここで、周波数に比例した位相を作り出す。7桁もの測定が可能な被測定量は周波数以外にはないからである²¹⁾。図1の位相変調器の隣に光周波数シフタを設けると、左右両回り光がファイバ中を異なる周波数で伝播するため、この周波数に比例した位相差が得られる。ただし、導波路型の光周波数シフタでなければ minimum configuration を満たさない。そこで研究されたのが、前回紹介したファイバ型光周波数シフタである。

しかし、現状では主に不要周波数成分の抑圧が不十分なためにジャイロ用には使えない。代わって開発されたのがセラダイン周波数シフタである²²⁾。これは周波数特性に優れた LiNbO₃ の位相変調器であり、ただし変調波形として鋸歯状波を使う。この振幅をちょうど 2π に設定すると鋸歯状波周波数に等しい周波数シフトが得られる。このようにして零位法化を図った方式をセラダイン方式光ファイバジャイロ²³⁾、あるいはクローズドループ光ファイバジャイロと呼ぶ。これに対し、図1あるいは図2の構成はオープンループ光ファイバジャイロと呼

ばれる。ジャイロの応用分野はさまざまであることから、両者とも並行して開発が進み、オープンループは一部市販が開始され、クローズドループも実用化が近い。表1に最近の米国での研究・開発例を紹介する¹⁾。高い機能が達成されている。

図8は、LiNbO₃ 基盤にセラダイン方式に必要な全ての要素をモノリシックに集積化した構成の概念図であるが、すでに実現されていて 0.015°/h の分解能を達成している^{24,25)}。単一モードファイバ型光デバイスは光ファイバジャイロの研究に大きな役割を果し、オープンループ方式の有効な実現法となっている。しかし、より高級なクローズドループ型の実現には導波路型光デバイスに主役の座を譲っている。全ファイバ型にとっては、光周波数シフタの開発が鍵である。

ここで、今後の光ジャイロの進展にとって注目される光ファイバ型デバイスを二つ紹介しよう。図9(a)は、Nd をドープした光ファイバをレーザーで励起する構造のファイバレーザーである²⁶⁾。この構成により、同図(b)のようにスペクトル線幅のきわめて広い光源が得ら

表 1 干渉型光ファイバジャイロの開発状況 (米国の例)

方式	社名	ループ直径 (cm)	バイアスドリフト (deg/h)	ランダムウォーク (deg/h ^{1/2})	最大角速度 (deg/s)	スケールファクタ (ppm)
Open-loop operation	Honeywell	9.0	0.1	0.004	10	1000
	Honeywell	7.5	0.3	0.03	150	~500
Closed-loop operation	Honeywell	16.0	0.02	0.0016	~100	~30
	Litton	10.0	0.01	0.011	>100	~10
	Smith	10.0	0.5	0.08	>200	125

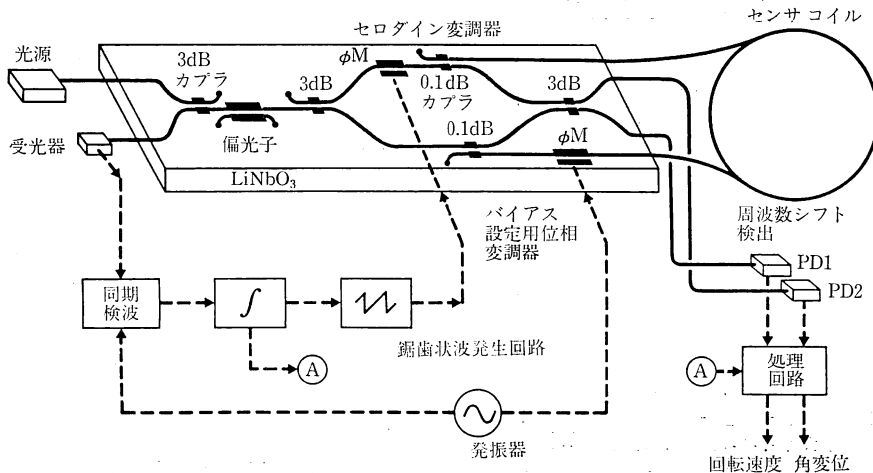


図 8 LiNbO₃ 基盤に集積化されたセラダイン方式光ファイバジャイロの構成概念図^{24,25)}

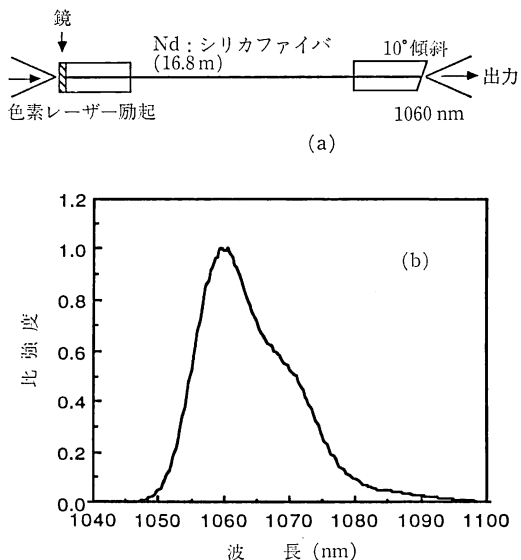


図 9 Nd ドープ単一モード光ファイバによる低コヒーレンス光源²⁶⁾
(a) 光学系構成, (b) 発光スペクトル

れる。スーパーluminescentダイオードに比べ、出力が大きい、発振波長の温度安定性が高い、寿命が長いといった特徴があり、将来の光ファイバジャイロ用光源として期待され、半導体レーザーを励起光源としてジャイロ系に組み込んだ実験も報告されている²⁷⁾。このほか、ファイバリング中で誘導ブリュアン散乱を起こさせ、これによるレーザー発振光の周波数がサニャック効果によって変化するのを利用した構成も提案されている²⁸⁾。これも全ファイバ型構成であり、今後の研究に注目したい。

6. 光ファイバリング共振器と受動型リング共振方式光ファイバジャイロ

図 10 の系は、受動型リング共振方式光ファイバジャイロ (optical passive ring-resonator gyro: OPRG) と呼ばれる。右側の光ファイバコイルは光共振器として作用し、受光器出力は特定な入力周波数に対して同図中に示したように急峻な変化を示す。その鋭さはファイバカプラの結合、ならびに共振器中での損失を小さくすることで向上できる。この共振周波数がサニャック効果で変化するのを捉えるのが本方式の原理である。温度および機械的変動による共振周波数のドリフトをモニタして補償するために、やはり左右両回りの光を用いる。

隣同士の共振周波数間隔と共振の幅の比をフィネスという。干渉型の光ファイバジャイロに対して、およそフィネス倍の感度向上が図られ、逆に言うとその分、ファ

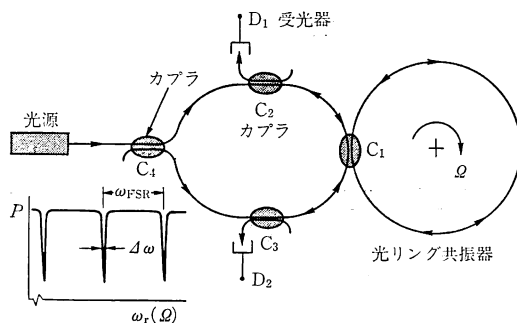


図 10 受動型リング共振方式光ファイバジャイロの基本構成

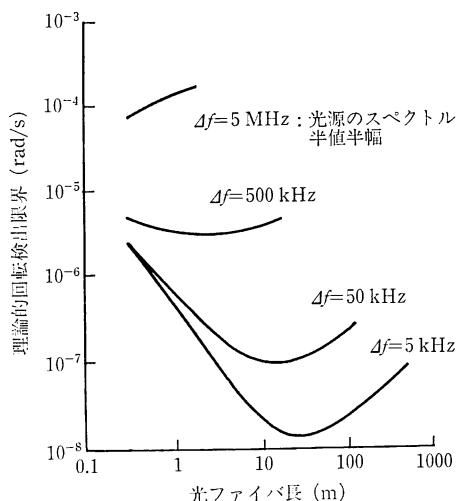


図 11 受動型リング共振方式光ファイバジャイロの理論的回転検出限界の計算例²⁹⁾。本方式では高コヒーレント光源が用いられる。

イバ長が短尺化できる。図 11 は、理論的回転検出限界を示しており、ファイバの最適長が数mから十数mであることがわかる²⁹⁾。これはフィネス約 100 に対応した計算であり、最近ではフィネス 1045 を得たとの報告もあり³⁰⁾、より短尺なファイバで済むことになる。図 11 中に示したように、ここでは高コヒーレント光源が用いられる。

本構成の研究は未だ基礎的な段階にあり、雑音要因の挙動把握とその対策の考案とが進められている。重要な雑音要因の一つは、共振器中での偏波状態変動である³¹⁾。この共振器中には一般に二つの共振が存在する。ジャイロとしてはどちらか一方のみを励振したいが、ファイバ中での偏波状態変動があると困難となる。偏波維持光ファイバで共振器を理想的に作製できれば、

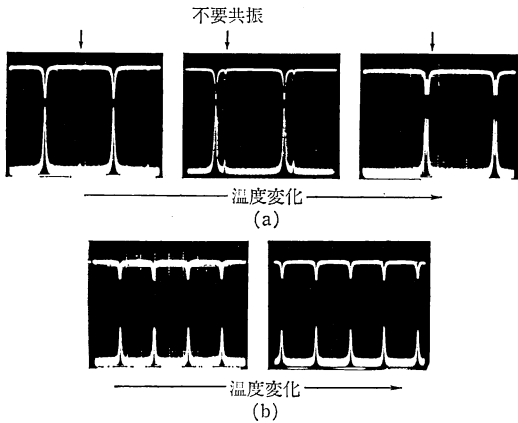


図 12 偏波維持光ファイバで構成したリング共振器の共振特性の温度変化³⁵⁾。共振器中に二つのカプラのある構成での実験で、反射共振特性(上段)と透過共振特性(下段)が同時計測されている。
(a) 偏波軸をそろえて作成された共振器。わずかにある偏波結合のため特性が大きく変動。(b) 共振器内で偏波軸を90°ひねって接続した構成。変動はきわめて小さい。

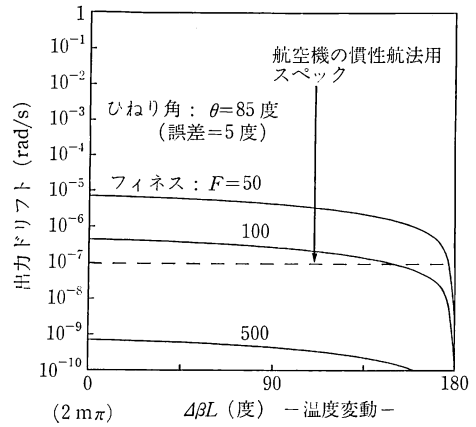


図 13 偏波軸を90°ひねって接続した偏波維持光ファイバリング共振器によるOPRGの出力ドリフト特性³⁶⁾。偏波維持光ファイバの二つの偏波モード間の共振器一周での位相差 $\Delta\beta L$ は温度変動に対応する。

二つの共振はファイバの両偏波モードに対応して、互いに直交する二つの直線偏波により生じる。したがって一方のみの励振が可能となるが、実は共振器中にわずかの偏波結合があっても、共振状態は直線偏波から大きく外

れることがわかってきた³²⁻³⁴⁾。

図 12 (a) はこの状態のとき共振特性が温度によって大きく変化する様子を示したものである³⁵⁾。これに対し、図 (b) では温度変動によっても共振特性は変化しない³⁵⁾。とくに、不要共振が必要な共振に接近してこないことがジャイロドリフトの低減にとって好ましい。これは偏波維持ファイバ共振器中の一個所で、その偏波軸を

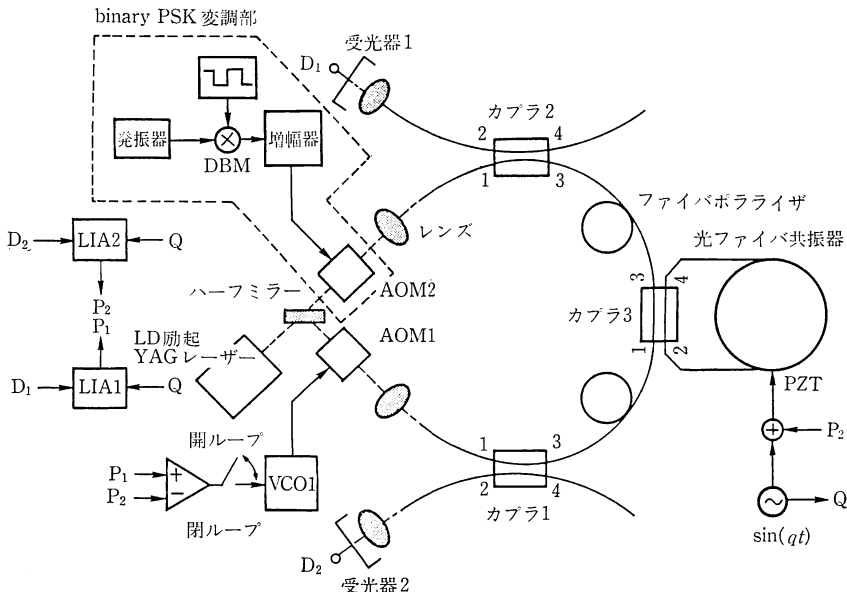


図 14 共振器中での後方レーリ-散乱による雑音を低減する手法を施したOPRG⁴¹⁾。一方の入射光波に binary phase shift keying 変調を施す。

90° ひねって融着しただけの工夫で実現された。筆者らは、このねじり角の精度とジャイロドリフトとの関係の解明を行い、図 13 のように数度の誤差があっても十分に航空機の慣性航法用の要求を満たしうることを突き止めた³⁶⁾。この方法により、偏波変動の問題は解決できたとと言える。

筆者らの研究グループでは、1983 年より OPRG の雑音要因の研究を進め、光源のコヒーレンス²⁹⁾、ファイバ中でのレーリ-散乱^{29,37)}、光カー効果³⁸⁾、ファラデー効果³⁹⁾、そして上記偏波状態変動^{31,36)}に対して、その挙動把握と対策の提案とを行ってきた。現在これら対策を施した実験系の試作と性能評価を進めている。

7. 受動型リング共振方式光ファイバジャイロの実験的研究

上記のような理論的研究を背景に、各所で実験系の試作が進められている⁴⁰⁻⁴⁴⁾。図 14 は筆者らが構成した実験系である⁴¹⁾。共振器長は 15 m、半径は 5 cm である。OPRG においては、後方散乱と信号光との干渉成分も大きな雑音となる。この低減には一方の入射光のキャリア成分を除去する必要がある⁴⁰⁾。本研究では、その有効かつ安定な実現法として、Binary phase shift keying という変調を一方の入射光に施す。光波に、0, π , 0, π という繰返しの位相変調を施すということで、このとき本質的にキャリア成分がなくなる⁴¹⁾。この変調は図示の

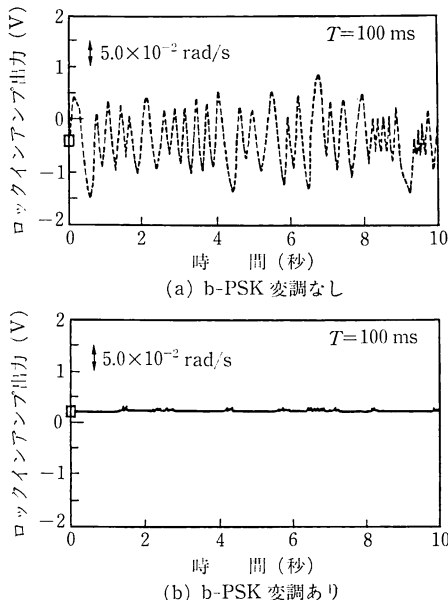


図 15 図 14 の系による出力雑音の低減効果⁴¹⁾

ように、音響光学変調器とダブルバランスミキサにより実現できる。80 dB 以上のキャリア抑圧に成功し、図 15 (a) のような雑音が、同図 (b) のように低減された。積分時間 10 秒の測定では、約 15 分間にわたり地球自転と同程度の零点安定性を得ている⁴¹⁾。

8. ま と め

光ファイバジャイロの研究において単一モードファイバ型光デバイスが果してきた役割を中心に、本ジャイロの研究動向を概観した。全ファイバ型光ファイバジャイロの登場が本方式の実現を現実視させる重要なエポックとなった。現在では、導波路型光集積回路も導入されて、干渉型光ファイバジャイロは実用期を迎えている。光ファイバリング共振器を活用した受動型リング共振方式光ファイバジャイロも、要素デバイスの研究、ならびに雑音要因の挙動把握・対策の発明とも進展が著しく、近い将来干渉型に匹敵する性能が達成されるものと期待できる。

文 献

- 保立和夫：“光ファイバジャイロ”，計測と制御，**29** (1990) 68-74.
- 保立和夫：“光ファイバジャイロ干渉方式ならびに共振方式の研究・開発状況”，電子情報通信学会誌，**73** (1990) 149-160.
- 大越孝敬，西原 浩，岡本勝就，久間和生，大津元一，保立和夫：光ファイバセンサ（オーム社，東京，1986）.
- 保立和夫：“センシング技術への光ファイバの応用”，光学，**12** (1983) 340-350.
- 保立和夫：“半導体レーザとコヒーレント光センシング”，材料科学，**26** (1989) 137-142.
- R. A. Bergh, H. C. Lefevre and H. J. Shaw: “An overview of fiber-optic gyroscopes,” IEEE J. Lightwave Technol., **LT-2** (1984) 91-107.
- B. Y. Kim and H. J. Shaw: “Fiber-optic gyroscope,” IEEE Spectrum, **23** (1986) 54-60.
- T. G. Giallorenzi, J. A. Bucaro, A. Dandridge, G. H. Siegel, Jr., J. H. Cole, S. C. Rashleigh and R. G. Priest: “Optical fiber sensor technology,” IEEE J. Quantum Electron., **QE-18** (1982) 626-665.
- “Fiber optic gyros 10th anniversary conference,” Proc. SPIE, **719** (Sept. 24-26, 1986).
- 保立和夫：“光ファイバとその応用—Ⅷ：ファイバ関連部品(1)—単一モードファイバ型光デバイス”，光学，**19** (1990) 386-396.
- H. C. Lefevre, R. A. Bergh and H. J. Shaw: “All-fiber gyroscope with inertial-navigation short-term stability,” Opt. Lett., **7** (1982) 454-456.
- R. A. Bergh, B. Culshaw, C. C. Cutler, H. C. Lefevre and H. J. Shaw: “Source statistics and the Kerr effect in fiber-optic gyroscope,” Opt. Lett., **7** (1982) 563-565.
- K. Boehm, P. Marten, K. Petermann, E. Weidel and R. Ulrich: “Low-drift fiber gyro using a superluminescent diode,” Electron. Lett., **17** (1981) 352-353.

- 14) F. Mohr and P. Kiesel: "Thermal sensitivity of sensing coils for fiber gyroscope," *Int. Conf. Optical Fiber Sensors (Stuttgart, 1984)* pp. 305-308.
- 15) N. T. Frigo: "Compensation of linear source of nonreciprocity in Sagnac interferometers," *Proc. SPIE*, **412** (1983) 268-271.
- 16) E. C. Kintner: "Polarization control in optical-fiber gyroscopes," *Opt. Lett.*, **6** (1981) 154-156.
- 17) R. J. Fredricks and R. Ulrich: "Phase error bounds of fiber gyro with imperfect polarizer/depolarizer," *Electron. Lett.*, **20** (1984) 330-332.
- 18) W. K. Burns and R. P. Moeller: "Polarizer requirements for fiber gyroscopes with high-birefringence fiber and broad-band source," *J. Lightwave Technol.*, **LT-2** (1984) 430-435.
- 19) K. Hotate and K. Tabe: "Drift of an optical fiber gyroscope caused by the Faraday effect: influence of the earth's magnetic field," *Appl. Opt.*, **25** (1986) 1086-1092.
- 20) K. Hotate and K. Tabe: "Drift of an optical fiber gyroscope caused by the Faraday effect: Experiment," *IEEE J. Lightwave Technol.*, **LT-5** (1987) 997-1001.
- 21) K. Hotate and S. Samukawa: "Drift reduction in an optical heterodyne fiber gyro," *Appl. Opt.*, **29** (1990) 1345-1349.
- 22) C. Laskoskie, H. Hung, T. El-Wailly and C. L. Chang: "Ti-LiNbO₃ waveguide serrodyne modulator with ultrahigh sideband suppression for fiber optic gyroscope," *IEEE J. Lightwave Technol.*, **LT-7** (1989) 600-606.
- 23) H. V. Lefevre, S. Vatoux, M. Papuchon and C. Puech: "Integrated Optics: A practical solution for the fiber-optic gyroscope," *Proc. SPIE*, **719** (1986) 101-112.
- 24) B. R. Youmans, R. K. Bartman, P. M. Salomon, W. J. Minford and F. T. Stone: "Design and performance of a fiber optic gyroscope using integrated optics," *Proc. SPIE*, **1165** (1989) 310-322.
- 25) W. J. Minford, F. T. Stone, B. R. Youmans and R. K. Bartman: "Fiber optic gyroscope using an eight-component LiNbO₃ integrated optic circuit," *Proc. SPIE*, **1169** (1989) 304-309.
- 26) K. Liu, M. Dignonnet, K. Fesler, B. Y. Kim and H. J. Shaw: "Superfluorescent single mode Nd: fiber source at 1060 nm," *Int. Conf. Optical Fiber Sensors (IEEE/OSA, New Orleans, 1988)* pp. 462-465.
- 27) K. A. Fesler, B. Y. Kim and H. J. Shaw: "Fiber gyro experiment using fibre laser source," *Electron. Lett.*, **25** (1989) 534-536.
- 28) F. Zarinetchi, S. P. Smith and S. Ezekiel: "New developments in fiberoptic gyroscope," *Proc. SPIE*, **1169** (1989) 300-303.
- 29) K. Iwatsuki, K. Hotate and M. Higashiguchi: "Effect of Rayleigh backscattering in an optical passive ring-resonator gyro," *Appl. Opt.*, **23** (1984) 3916-3924.
- 30) R. Dahlgren and O. Laznicka: "Ultra-high finesse polarization-maintaining fiber resonator," *Proc. SPIE*, **1169** (1989) 382-387.
- 31) K. Iwatsuki, K. Hotate and M. Higashiguchi: "Eigenstate of polarization in a fiber ring resonator and its effect in an optical passive ring-resonator gyro," *Appl. Opt.*, **25** (1986) 2606-2612.
- 32) 高橋正信, 田井修市, 久間和生: "リング共振型光ファイバジャイロにおける偏波結合の影響," *信学技報*, **OQE 88-63** (1989) 77-84.
- 33) K. Hotate, L. Takiguchi and M. Murakami: "Bias of an optical passive ring-resonator gyro due to the misalignment of the polarization axis in the resonator formed by the polarization maintaining fiber," *Int. Conf. Optical Fiber Sensors (SFO, Paris, 1989)* pp. 94-100.
- 34) Z. K. Ioannidis, R. Kadiwar and I. P. Giles: "Polarization effects in highly birefringent fibre ring resonators," *Int. Conf. Optical Fiber Sensors (SFO, Paris, 1989)* pp. 115-121.
- 35) G. A. Sanders, R. B. Smith and G. F. Rouse: "Novel polarization-rotating fiber resonator for rotation sensing applications," *Proc. SPIE*, **1169** (1989) 373-381.
- 36) 瀧口浩一, 保立和夫: "共振器中での偏波軸ずれにより受動型リング共振方式光ジャイロが示す出力バイアスの除去手法(II)," *信学技報*, **OQE 89-137** (1990) 19-24.
- 37) K. Iwatsuki, K. Hotate and M. Higashiguchi: "Backscattering in an optical passive ring-resonator gyro: experiment," *Appl. Opt.*, **25** (1986) 4448-4451.
- 38) K. Iwatsuki, K. Hotate and M. Higashiguchi: "Kerr effect in an optical passive ring-resonator gyro," *IEEE J. Lightwave Technol.*, **LT-4** (1986) 645-651.
- 39) K. Hotate and M. Murakami: "Drift of an optical passive ring-resonator gyro caused by the Faraday effect," *Int. Conf. Optical Fiber Sensors (IEEE/OSA, New Orleans, 1988)* pp. 405-408.
- 40) F. Zarinetchi and S. Ezekiel: "Observation of lock-in behavior in a passive resonator gyroscope," *Opt. Lett.*, **11** (1986) 401-403.
- 41) K. Hotate, K. Takiguchi and A. Hirose: "Adjustment-free method to eliminate the noise induced by the backscattering in an optical passive ring-resonator gyro," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **2** (1990) 75-77.
- 42) R. E. Mayer, S. Ezekiel, D. W. Stowe and V. J. Tekippe: "Passive fiberoptic ring resonator for rotation sensing," *Opt. Lett.*, **8** (1983) 644-646.
- 43) G. A. Sanders, N. Demma, G. F. Rouse and R. B. Smith: "Evaluation of polarization maintaining fiber resonator for rotation sensing application," *Int. Conf. Optical Fiber Sensors (IEEE/OSA, New Orleans, 1988)* pp. 409-412.
- 44) M. Takahashi, S. Tai, K. Kyuma and K. Hamanaka: "Effect of reflections on the drift characteristics of a fiber-optic passive ring-resonator gyro," *Opt. Lett.*, **13** (1988) 413-415.