

## 最近の技術から

# リング共振型光ファイバジャイロ

高橋 正信・田井 修市・久間 和生

三菱電機(株)中央研究所 〒661 尼崎市塚口本町 8-1-1

## 1. ま え が き

光ファイバジャイロは、サグナック効果を利用して回転角速度の検出を行なうものであり、将来の慣性航法装置として注目を集め、各所で研究開発が進められている。光ファイバジャイロは、検出方式によって干渉型とリング共振型とに分類される。このうち干渉型は研究の歴史が古く、実用化が間近に迫っている<sup>1)</sup>。これに対してリング共振型光ファイバジャイロ (fiber-optic passive ring-resonator gyro: FOPRG) は、これまで理論的な検討が主であり<sup>2-4)</sup>、実験的な研究が始まったのは、つい最近のことである<sup>5,6)</sup>。しかし、短い光ファイバでも干渉型と同等の感度が得られる可能性があるため、関心が高まっている。ここでは FOPRG について、その問題点と現状を紹介する。

## 2. 性能劣化の要因

FOPRG の基本的な構成を図 1 に示す。FOPRG では、ループ状の光ファイバとカップラよりなるリング共振器<sup>7)</sup>を用いて回転検出を行なう。図 2 に、リング共振器の共振波形の一例を示す。リング共振器は、ループ状の光ファイバ長  $L$ 、または光ファイバの伝播定数  $\beta$  が、

$$\beta L = (2m - 1/2)\pi \quad (m: \text{整数})$$

を満足するとき、図 2 に示すような鋭い共振を示す。系が回転すると、サグナック効果のため  $\beta L$  が変化し、共振点が図 2 において横軸方向に移動する。この移動量を検出することにより、回転が検出できる。実際には温度変動などによる共振点の移動を補償するため、図 1 に示すようにリング共振器に両方向からレーザー光を入射し、左右両回り光の共振点の相違を検出し、回転検出を行なう構成となっている。

FOPRG の回転検出感度は、最終的には光検出器のショットノイズで制限される。しかし、ショットノイズ以外にも、いくつかの光学的雑音要因が FOPRG の性能を劣化させることが報告されている<sup>2-5)</sup>。たとえば、光ファイバ中でのレイリー散乱光は出力の直線性の劣化、偏

波の変動はゼロ点ドリフトやスケールファクタの変動、カー効果は出力ドリフトをそれぞれ生じることが報告されており、それぞれ改善策が提案されている<sup>2-4)</sup>。これらのほかに、リング共振器外部における反射光も FOPRG の性能を大きく劣化させることが最近報告されている<sup>5)</sup>。

FOPRG は、リング共振器の右回り光、および左回り光が系の静止時に同一の共振特性をもつという、リング共振器の相反性を回転検出の前提としている。しかし実際の系では、光路中で生じる反射光、おもに図 1 の光ファイバ端面 (1)、(2) で生じる反射光が系の相反性を崩してしまう。その結果、リング共振器の共振特性は、静止時においても左右両回り光で異なる、非相反特性を示す。図 3 は、反射光の影響による共振波形の変形を計算した結果である。共振波形のフィネスが約 50、光ファイバ端面の反射率  $R$  が 4% の場合である。 $\theta$  は信号光と反射光の位相差に関連した量であり、絶えず変動する。このため、共振波形は常に変形し、この変形が出力に大きなドリフトを生じる。

典型的な FOPRG を用いた場合、このドリフトを角速度  $10^{-6}$  rad/s 以内に抑えるためには、反射率  $R$  を  $10^{-14}$  以下としなければならない。このような小さな反射率を実現することはむずかしく、ドリフトを低減するためには、別の方策が必要となる。一つの方策は、位相変調法<sup>8)</sup>を適用することである。これは、左回り光、または右回り光の一方の光に位相変調を与え、信号光と反射光の干渉成分の周波数を信号検出回路の帯域以上にして、その影響を除去する方法である。位相変調法を適用することにより、直径 10 cm、光ファイバ長 4 m、フィネス 30 のリング共振器を用いた FOPRG で、時定数 30 s で  $3 \times 10^{-5}$  rad/s の回転検出感度が得られている<sup>9)</sup>。

## 3. 光 源

干渉型光ファイバジャイロでは、散乱光等による不要な干渉を低減するため、SLD 等の低コヒーレンス光源が必要とされるのに対し、FOPRG では共振現象を利用するため、高コヒーレンス光源が要求される。コヒーレ

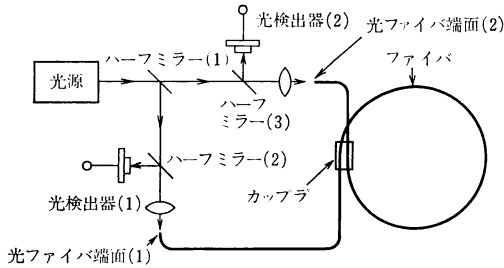


図1 FOPRGの基本構成

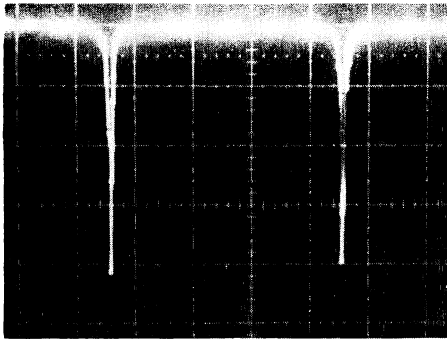


図2 リング共振器の共振波形

ンシーが高いほど、すなわちスペクトル線幅が狭いほどリング共振器の共振波形は鋭くなり、回転検出感度が向上する。たとえば、典型的な FOPRG を用いた場合、 $10^{-6}$  rad/s 程度の回転検出感度を得るためには、スペクトル線幅数百 kHz 程度の高コヒーレンス光源が要求される<sup>9)</sup>。FOPRG に用いられた最初の光源は He-Ne レーザーであり<sup>6)</sup>、高感度を得るためには適している。しかし、光ファイバ長を短くできるため小型化の可能性があるという FOPRG の特徴を生かすためには、より小型の光源を用いるほうが望ましい。最近では、小型という特長を保ったまま高コヒーレンス光が得られる外部共振器型半導体レーザー (スペクトル線幅 100 kHz) の適用も報告されている<sup>10)</sup>。

#### 4. あとがき

以上、FOPRG について、その問題点と現状を紹介した。FOPRG を実用化するためには、まだ解決すべき問題がいくつかある。光源については、小型、安定、高コヒーレンシーという条件を満足する光源として、1 MHz 以下のスペクトル線幅が安定に得られる半導体レーザーの開発が待たれる。また、偏波の変動等による性能の劣下を緩和するため、より高クロストークの偏波面保存ファイバ、カップラの開発等も要求される。これら個別部

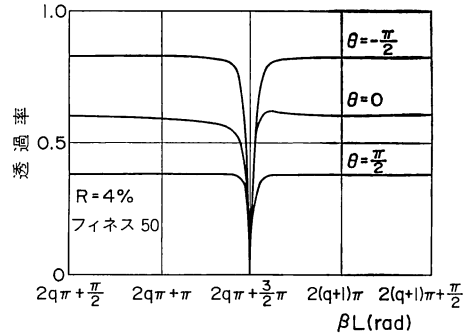


図3 反射光の影響による共振波形の変形

品の性能の向上とともに、種々の光学的雑音要因の除去をおし進めてゆくことにより、FOPRG の実用化が近づくものと期待される。

#### 文 献

- 1) R. P. Moeller, W. K. Burns and N. J. Frigo: "Scale factor accuracy and stability in an open loop fiber-optic gyroscope," Int. Conf. on Optical Fiber Sensors (Optical Society of America, New Orleans, 1988) FBB 3.
- 2) K. Iwatsuki, K. Hotate and M. Higashiguchi: "Effect of Rayleigh backscattering in an optical passive ring-resonator gyro," Appl. Opt., **23** (1984) 3916-3924.
- 3) 岩月勝美, 保立和夫, 東口 實: "光ファイバリング共振器の固有偏波状態とその受動型リング共振方式光ジャイロへの影響", 電子情報通信学会技術研究報告, **OQE 85-90** (1985) 45-52.
- 4) 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.
- 5) 高橋正信, 田井修市, 久間和生, 浜中宏一: "リング共振型光ファイバジャイロ", 電子情報通信学会技術研究報告, **CS 87-100** (1987) 61-68.
- 6) R. E. Meyer, S. Ezekiel, D. W. Stowe and V. J. Tekippe: "Passive fiber-optic ring-resonator for rotation sensing," Opt. Lett., **8** (1983) 644-646.
- 7) L. F. Stokes, M. Chodorow and H. J. Shaw: "All-single-mode fiber resonator," Opt. Lett., **7** (1982) 288-290.
- 8) G. A. Sanders, M. G. Prentiss and S. Ezekiel: "Passive ring resonator method for sensitive inertial rotation measurements in geophysics and relativity," Opt. Lett., **6** (1981) 569-571.
- 9) 田井修市, 久間和生: "リング共振型光ファイバジャイロスコープの基礎研究", 第1回光ファイバセンサワークショップ講演論文集, **WFS 1-11** (1985) 81-88.
- 10) 高橋正信, 田井修市, 久間和生, 浜中宏一: "外部共振器型半導体レーザーを用いたリング共振型光ファイバジャイロ", 電子情報通信学会技術研究報告, **OQE 87-18** (1987) 33-40.

(1988年1月28日受理)