

# 宇宙用光ファイバージャイロの現状と動向

大野 有孝

## Recent Progress of Fiber Optic Gyroscope for Space Application

Aritaka OHNO

Practical applications of the fiber optic gyroscope (FOG) have been started. This paper reviews the principle and configuration of the FOG, and recent progress of the FOG for the space application is also described.

**Key words:** fiber optic gyroscope, ring laser gyroscope, coherence

ジャイロとは回転運動を検出するセンサーであるが、古くから、高速回転するコマが空間に対して一定の姿勢を保つ性質を利用したコマ式ジャイロが利用されてきた。一方、20世紀に入って、光を用いたジャイロが提案され、研究開発が進められている。本稿で述べる光ファイバージャイロ (fiber optic gyro: FOG) は、1976年に米国ユタ大学がその原理を提案して以来、各国で研究開発が続けられ、今日では航空宇宙、一般産業機器分野で実用期に入っている<sup>1,2)</sup>。本稿では、FOGの原理と構成について概説するとともに、宇宙分野でのFOGの応用と最近の研究動向について述べる。

### 1. 光ジャイロの原理と分類

光ジャイロの原理は、一般相対論から導出されるサニャック効果に基づいており、原理を図1に示す。閉じた円形の光路に、右回りと左回りの光がそれぞれ独立に伝搬していたとする。この系が回転角速度 $\Omega$ をもつとすると、Aから左回りに出発した光が一周する間にはAはA'の位置に移動しており、回転角速度がゼロの場合に比べて、同じ位置にもどる時間が短くなっているように観測される。一方、逆の右回りの光は、同様に時間が長くなっているように観測される。

この2つの光の時間差 $\Delta t$ は、次の式で表される。

$$\Delta t = 4\pi\Omega r^2 / c^2$$

ここで、 $r$ は系の半径、 $c$ は光速である。この伝搬時間差

は、相対論による光速度一定の原理により生じるもので、音波のような光以外の波動の場合はこの時間差が生じない。この伝搬時間差は光速を乗じることで2つの光の光路長差となり、その光路長差 $\Delta L$ は $S$ を光路が囲む面積として

$$\Delta L = 4\pi r^2 \Omega / c = 4S\Omega / c$$

となる。以上がサニャック効果とよばれるもので、すべての光ジャイロの基本原則である<sup>3)</sup>。

サニャック効果を利用した光ジャイロは、閉じた光路内にレーザー光源をもつRLG (ring laser gyro) と、光ファイバーを用いて閉じた光路を構成したFOGとがある。RLGは、1970年代に航空機の慣性航法装置に使用される高精度ジャイロとして実用化されたもので、従来のコマ式ジャイロにない長寿命、瞬時起動等の特徴を有する。FOGは、1976年の原理発表後1990年ころから航空機、産業機器等で実用化されている。FOGは、RLGに比べ達成している性能は劣るものの、RLGの特徴はすべて備えており、さらに可動部が全くない純静止型センサーである。

### 2. FOGの構成

図2に、実用化されているFOGの構成例を示す。FOGは、信号処理方式により、オープンループ式FOGとクローズループ式FOGに分けられる。いずれも、光源にはファイバー中の散乱光の影響を打ち消す等、各種誤差要因の対策として低コヒーレンス光源が必要であり、半導体レー

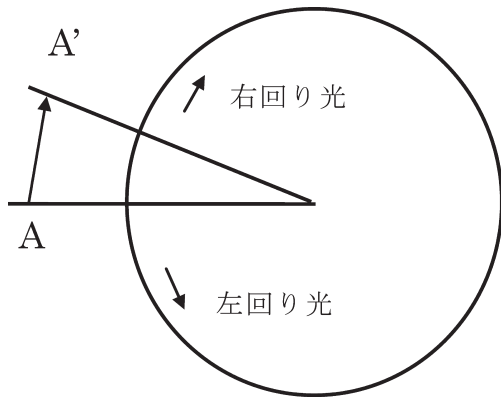


図1 サニャック効果.

ザーを改良したスーパーluminescentダイオード (SLD), ディスク用のマルチモード半導体レーザー等が多く使われている。光源から出た光は、センシングコイルと位相変調器で構成されたセンシング部を左右両回りに伝搬する。この際、サニャック効果により回転に対応して左右両回り光に伝搬時間差 (すなわち位相差) が生じるため、干渉した光の強度変化を受光器で検出することで、位相差に対応した回転角速度を知ることができる。

オープンループ式 FOG は通常、光学部をすべて光ファイバー型デバイスで構成し、オールファイバー構成としている。この方式の FOG は出力が入力角速度に対して正弦波状に変化するため、計測できる角速度範囲が制限されるが、光通信等で一般的に用いられている光ファイバー型デバイスにより光学系を構成できるため、低価格な FOG に適している方式で、おもに一般産業機器用途に使用されている。

一方、クローズループ式 FOG は、上記オープンループ方式の FOG の欠点を改良した方式であり、ニオブ酸リチウム結晶を基板とした光導波路技術を用いている。ニオブ酸リチウムの高い電気光学定数により、光の変調機能と入力角速度に比例したフィードバック位相制御機能を実現させ、回転角速度により生じた左右両回り光の位相差を常にゼロにするようにフィードバックをかける方式である。この方式は、計測できる角速度範囲が広くとれ、入力に対する出力の直線性にすぐれるとともにバイアス (ゼロ点) の安定性にすぐれるため、航空宇宙用を中心に中～高精度領域の FOG に使用されている方式である。後述する宇宙分野の応用においては、すべてこのクローズループ方式の FOG が使用されている。

\*1 <http://www.ista.jaxa.jp/>

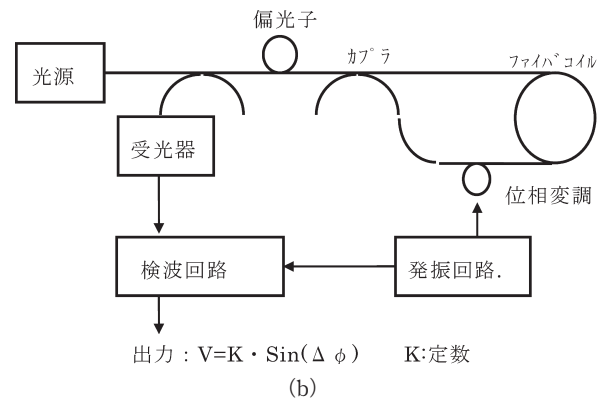
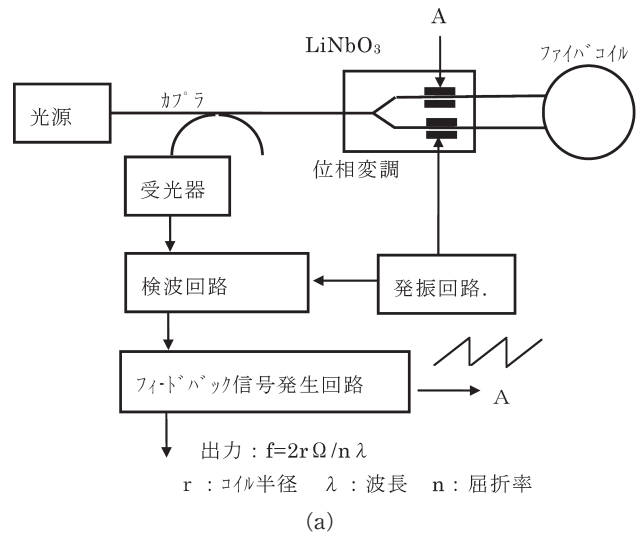


図2 クローズループ FOG (a) とオープンループ FOG (b) の構成。

### 3. FOG の宇宙分野での応用

FOG の宇宙分野での応用例に関して、ロケットの誘導制御関係では、1991 年に宇宙開発事業団 (現宇宙航空研究開発機構) の TR-1A 型ロケットの姿勢制御に FOG が世界に先駆けて使用されている<sup>2)</sup>。1997 年には、宇宙科学研究所 (現宇宙航空研究開発機構) の M-V ロケットの姿勢制御用に FOG が使用され、所定の軌道に衛星を投入している<sup>4)</sup>。

衛星分野では、2002 年に打ち上げられた宇宙航空研究開発機構の小型衛星マイクロラボサットの姿勢計測用に FOG が使用され<sup>\*1</sup>、2005 年には宇宙航空研究開発機構の小型衛星れいめいの姿勢制御に FOG が使用されている。れいめいでは、図 3 に外観を示した FOG 3 個を使用し、FOG が取り付けられているセンサーブロックの温度コントロールを実施してバイアス安定性を向上させるとも

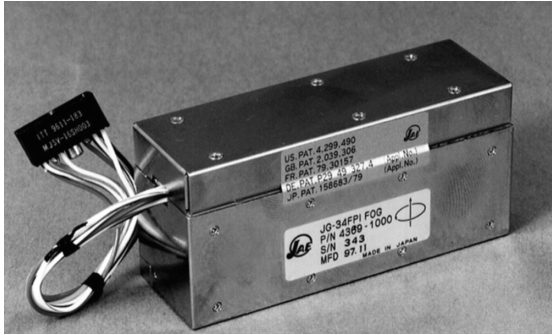


図3 小型科学衛星に使用した FOG.

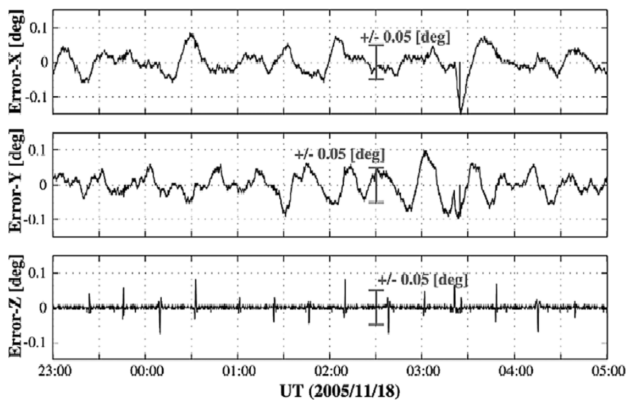


図4 小型科学衛星の姿勢制御精度.

に、スタートラッカーを併用してジャイロバイアスによる姿勢誤差を定期的に修正することで、図4に示すように姿勢制御精度として $\pm 0.1^\circ$ 以下を実現している\*2。

#### 4. FOG 高精度化の研究

大型のロケットや人工衛星の方向制御には、一般的に数 ppm 程度の高いスケールファクター安定性が要求されるが、通常使われている SLD では、波長の温度特性が数百 ppm/ $^\circ\text{C}$ と大きく、性能的に十分ではない。また、これら高精度ジャイロには、 $0.001^\circ/\text{h}$  オーダーの分解能も合わせて要求され、SLD では光強度的にも不十分である。このような理由から、FOG の高精度化において、エルビウムドープファイバー (EDF) を用いた低コヒーレンス光源の使用が注目されている。EDF 光源は光強度と波長の温度安定性にすぐれるが、FOG で用いる場合は、前述のとおり低コヒーレンス性が重要であるため、EDF の自然放出光を用いることが一般的である。筆者らは、宇宙航空

\*2 <http://www.index.isas.jaxa.jp/>

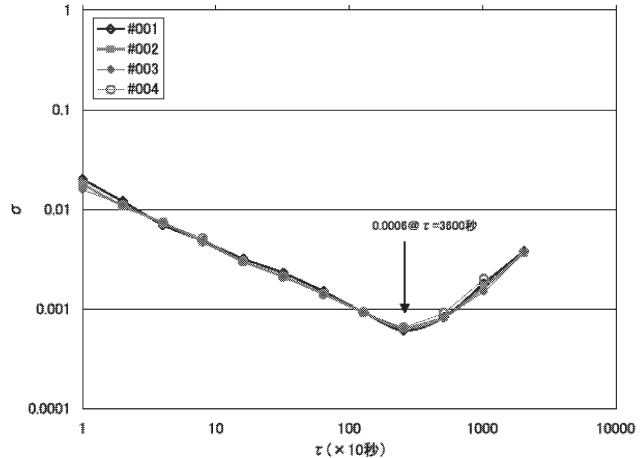


図5 高精度 FOG のバイアス変動の挙動.  $\sigma$ : バイアス変動 ( $^\circ/\text{h}$ ),  $\tau$ : 平均時間.

研究開発機構と共同で、将来の大型衛星用に EDF を用いたクローズループ方式の高精度光ファイバージャイロを開発している<sup>5)</sup>。図5に、開発中の高精度 FOG 4 台のバイアス特性の挙動を示す。図5は、アラン分散により解析したバイアスの変動の挙動で、平均時間に対するジャイロバイアスの変動を表したものである。本図から、1 時間でのバイアスの変動は約  $0.0007^\circ$  であり、きわめて微小な変動に収まっていることがわかる。

以上のように FOG は可動部のない純静止型センサーとしての特徴を生かして、宇宙分野においてロケットの誘導制御、衛星の姿勢制御に適用されはじめている。今後の研究開発の進展により高精度の FOG が衛星用途に実現されることが期待される。

#### 文 献

- 1) Proc. SPIE, **2837** (1996).
- 2) Proc. OFS-II, May 1996 (1996).
- 3) E. J. Post: "Sagnac effect," Rev. Mod. Phys., **39** (1967) 475-485.
- 4) 黒川明広, 平野隆史, 多田裕彦: "科学衛星打ち上げロケット用光ファイバージャイロの開発", レーザー研究, **26** (1998) 314-320.
- 5) 巳谷真司, 鈴木秀人, 橋本樹明, 戸田知朗, 川井洋志, 大野有孝: "高精度 FOG\_IRU の研究", 第49回宇宙科学技術連合講演会 Nov. (2005) 1H10.

(2006年4月10日受理)