

最近の技術から

光ファイバジャイロ

保立 和夫

東京大学工学部境界領域研究施設 〒153 東京都目黒区駒場 4-6-1

1. はじめに

光ファイバジャイロは、中程度の特性ではあるが商品化も開始され、さらに高性能な慣性航法用に期待できる方式も提案されるなど新たな局面を迎えている。一方で、より小型・高性能化が期待される“受動型リング共振方式”に関しても研究が進展している。本稿ではこれら光ファイバジャイロの最近の研究動向を概観する。

2. 光ファイバジャイロの実用化への進展

光ファイバジャイロは、図 1(a)に示す光ファイバリング干渉計を基本構成としたもので、多数ターン・長尺の光ファイバの導入により Sagnac 効果の感度を高めたものである。光を用いた完全静止型構成となるため、加

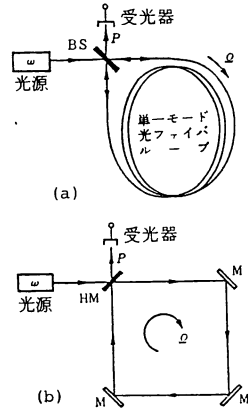


図 1 受動型光ジャイロの方式分類と基本光学系
(a) 光ファイバジャイロ (干渉型)
(b) 受動型リング共振方式光ジャイロ

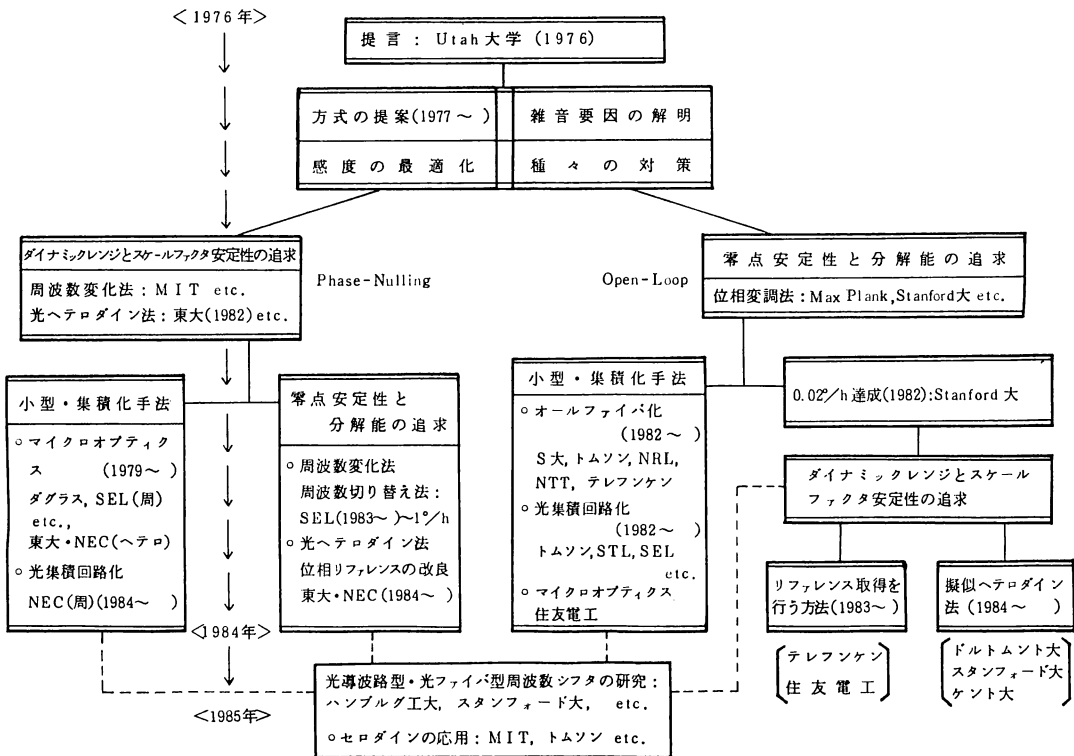


図 2 光ファイバジャイロの提言から今日までの研究経過
学会誌あるいは国際会議での発表文献を中心にまとめたものである。

速度に強い、起動時間が短い、信頼性が高いといった潜在的特性が期待され、世界的に研究が活発に展開された¹⁻⁸⁾。図2にその経過を示す。高性能な慣性航法用には高い分解能($\sim 0.01^\circ/h$)、高い零点の安定性($\sim 0.01^\circ/h$)、広いダイナミックレンジ(~ 6 桁)、そして、入力回転から出力への変換係数(スケールファクタ)の高い安定性(< 10 ppm)が要求される。結果的に、研究には大きく二つの流れが現われ、“位相変調法”を中心に分解能と零点の安定性とが追求され、“光ヘテロダイン法”や“周波数変化法”によりダイナミックレンジとスケールファクタの安定性とが追求された。それぞれに、1982年頃にはその目的が達成され⁹⁻¹²⁾、その後は上記四つの要求を同時に満足させるための方式改良と、系の小型・集積化の検討を中心とした実用化技術とが並行して研究された^{4,5)}。これは、ジャイロの用途が広範であり、慣性航法用に比べ低い性能での実用化にも意味があることによる。この結果、1985年には西独 SEL 社(Standard Electric Lorenz AG)より、零点ドリフト $< 18^\circ/h$ の位相変調法と、 $< 3^\circ/h$ の周波数変化法とが商品化されるにおよんでいる¹³⁾。その他、米国マクダネル・ダグラス社より石油掘削機用のジャイロをフィールドテストするとの発表が行なわれるなど、性能的にはまだ中程度ではあるが、いよいよ光ファイバジャイロ技術が実用域へ離陸し始めた感がある。

さらに、より高性能化にとってキーエレメントとなる周波数シフタの研究も進められている。詳細は明らかではないが、仏のトムソン CSF 社では位相変調器を鋸歯状波で駆動し周波数シフトを得るセラミック技術を利用したデジタルフェーズランプ方式¹⁴⁾により、ドリフト $0.3^\circ/h$ 以下でダイナミックレンジ7桁にもおよぶ小型(0.1 l) 試作系を得たとの発表も見られる¹⁵⁾。高性能ジャイロの実現にも大きな可能性が見えてきた。

光ファイバジャイロ技術の進展には、光ファイバ中のレーリー散乱、カー効果、偏波状態変動、温度勾配変化そして地磁気によるファラデー効果等、複雑な挙動を示す雑音要因に対する詳細な理論的・実験的検討が大きな役割を果たしてきた¹⁻⁶⁾。 10^{-6} rad という極微小な位相変化を追求する本分野にあっては、これら諸現象の十分な把握なしには高性能化はありえない。筆者らは最近ファラデー効果誘起ドリフトの偏波維持光ファイバによる低減に関する理論解析を行なった^{16,17)}。光ファイバループの1ターンがちょうど1周期となるねじれ成分が光ファイバに加わるとこのドリフトが生じることがわかった。さらに、図3に示すように、通常の単一モード光フ

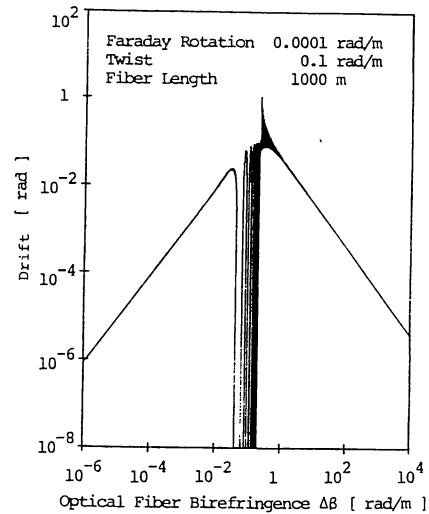


図3 光ファイバの複屈折率 $\Delta\beta$ と地磁気によるジャイロドリフトとの関係^{16,17)}

ファイバを巻いたときに生じるような中途半端な複屈折率 $\Delta\beta$ のもとではこのドリフトが助長されるのに対し、 $\sim 5,000$ rad/m という大きな $\Delta\beta$ を有する偏波維持光ファイバを用いれば、偏波面のファラデー回転が抑制されて、ドリフトが低減できることがわかった^{16,17)}。

3. 受動型リング共振方式光ジャイロ

図1(b)の受動型リング共振方式¹⁸⁾は、高いフィネスの光リング共振器の共振周波数が Sagnac 効果により変化する現象を利用するもので、干渉型の光ファイバジャイロに比べ短尺のループ状光路でも高感度化が可能とき

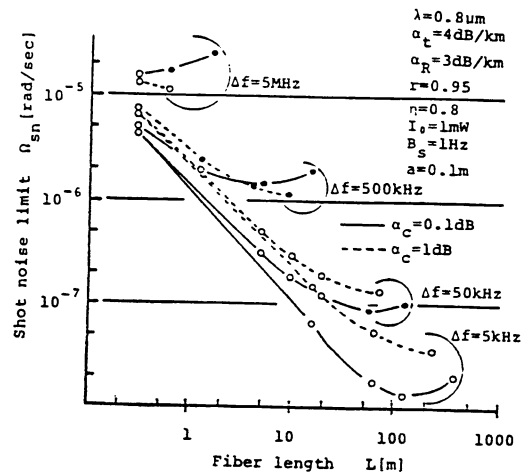


図4 受動型リング共振方式光ジャイロの性能限界と光源スペクトル幅(半値半幅 Δf)との関係²⁰⁾

れ、すでに短期分解能としては \sim 数 $^{\circ}$ /hの実験値が得られている¹⁹⁾。干渉型がその高性能化のために低コヒーレンス光源を要求するのに対し¹⁻⁶⁾、共振型には本質的に高コヒーレンス光源が必要である。このため、各雑音要因の寄与が互いに大きく異なることになり、本方式の実現には新たな雑音要因の挙動把握とその除去手法の確立が不可欠となる。筆者らはこれまでに光源のコヒーレンス²⁰⁾、共振器中でのレーリー散乱²⁰⁾、カー効果²¹⁾および偏波状態変動²²⁾に関して理論的検討を進め、その雑音除去手法を開発した。図4は光源のコヒーレンスと理論的回転検出限界との関係を示したもので、慣性航法用($\sim 10^{-7}$ rad/s)の実現には光源のスペクトル半値半幅として ~ 50 kHzが必要であることがわかる。現状のLDは ~ 10 MHz程度の値であり、狭スペクトル化が必要であるが、通信分野でも同様の要求がありすでに数十kHzのスペクトル幅も実験室段階では達成されている²³⁾。他の重要な要素である光リング共振器としては、すでにフィネス500のものが得られており²⁴⁾、要素技術と雑音要因の挙動把握・除去手法の開発とにより今後の進展が期待される。

4. ま と め

干渉型の光ファイバジャイロはいよいよ実用化が開始され、より高性能化へ向けての方式開発、作成技術の洗練にもはずみがつくものと期待される。共振型はまだ基本的な検討が不十分であるが、干渉型の開発経過に習い、今後効率良い研究が展開されよう。

文 献

- 1) 保立和夫, 東口 實, 丹羽 登: 計測と制御, **20** (1981) 937.
- 2) 保立和夫: 光学, **12** (1983) 340.
- 3) 保立和夫: オプトエレクトロニクス技術 '84 (光学工業技術協会, 1984).
- 4) 保立和夫: 光学懇話会サマーセミナー資料 (1985).
- 5) 保立和夫: 日経メカニカル, 6月3日号 (1985) 75.
- 6) K. Hotate: *JARECT, Optical Device & Fibers*, Vol. 17 (OHMSHA/North-Holland, 1985).
- 7) 野田寿一: 計測と制御, **24** (1985) 818.
- 8) R. A. Bergh, H. C. Lefevre and H. J. Shaw: IEEE/OEA. *J. Lightwave Technol.*, **2** (1984) 91.
- 9) R. A. Bergh, B. Culshaw, C. C. Cutler, H. C. Lefevre and H. J. Shaw: *Opt. Lett.*, **7** (1982) 563.
- 10) K. Hotate, N. Okuma, M. Higashiguchi and N. Niwa: *Opt. Lett.*, **7** (1982) 331.
- 11) K. Hotate, N. Okuma, M. Higashiguchi and N. Niwa: *Symp. Gyro Tech.*, Stuttgart (1982).
- 12) W. Auch, G. Domann, M. Koch, F. Mohr, E. Schlemper, W. Steudle and O. Strobel: *Symp. Gyro Tech.*, Stuttgart (1983).
- 13) SEL 社カタログ.
- 14) H. C. Lefevre, P. H. Graindorge, H. J. Arditty, S. Vatoux and M. Papuchon: *Int. Conf. Optical Fiber Sensors*, PDS 7, San Diego (1985).
- 15) 日経エレクトロニクス, 8月26日号 (1985) 209.
- 16) 田部久仁男, 保立和夫: 信学技報, **OQE 84-123** (1985) 9.
- 17) K. Hotate and K. Tabe: *Appl. Opt.*, **25** (1986) in press.
- 18) S. Ezekiel and S. R. Balsamo: *Appl. Phys. Lett.*, **30** (1977) 478.
- 19) R. E. Meyer, S. Ezekiel, D. W. Stowe and V. J. Tekippe: *Opt. Lett.*, **8** (1983) 644.
- 20) K. Iwatsuki, K. Hotate and M. Higashiguchi: *Appl. Opt.*, **23** (1984) 3916.
- 21) K. Iwatsuki, K. Hotate and M. Higashiguchi: to be published in *Lightwave Technol.*
- 22) 岩月勝美, 保立和夫, 東口 實: 信学技報, **OQE 85-90** (1985) 45.
- 23) M. R. Matthews, K. H. Cameron, R. Wyatt and W. J. Devlin: *Electron. Lett.*, **21** (1985) 115.
- 24) M. H. Yu and D. B. Hall: *SPIE*, **478** (1984) 104.

(1985年10月15日受理)