

学位請求論文

受動型リング共振方式光ジャイロの
総合的な雑音除去手法に関する研究

1991年12月20日提出

指導教官
保立 和夫 助教授

東京大学大学院 工学系研究科
電気工学専攻 97076

瀧口 浩一

目次

第1章 序論

1-1. はじめに	1
1-2. 本論文の目的と構成	4
参考文献	7

第2章 光ジャイロの原理と雑音要因

2-1. はじめに	11
2-2. 光ジャイロの原理と構成	11
2-3. 受動型リング共振方式光ジャイロの雑音要因	20
2-4. まとめ	22
参考文献	24

第3章 偏波変動誘起雑音とその定式化

3-1. はじめに	35
3-2. 解析に用いたモデル	35
3-3. 共振特性の導出	37
3-4. 出力誤差の定式化	43
3-5. 出力誤差の評価結果	45
3-6. まとめ	48
付録	49
参考文献	62

第4章 偏波変動誘起雑音の除去手法

4-1. はじめに	66
4-2. 光ファイバ偏光子を用いた除去手法	66
4-3. 単一偏波光ファイバを用いた除去手法	73
4-4. 偏波軸の90°回転接続を用いた除去手法	77

4 - 5.	まとめ	9 2
	参考文献	9 3

第5章 2 値位相変調法を用いた後方散乱誘起雑音の無調整除去手法

5 - 1.	はじめに	9 7
5 - 2.	無調整除去手法の原理	9 9
5 - 3.	実験系の構成	1 0 2
5 - 4.	実験結果	1 1 2
5 - 5.	まとめ	1 1 7
	参考文献	1 2 0

第6章 部分的デジタル制御による外乱除去制御系の高性能化

6 - 1.	はじめに	1 2 3
6 - 2.	部分的デジタル制御系の構成	1 2 3
6 - 3.	実験結果	1 2 8
6 - 4.	まとめ	1 3 1
	参考文献	1 3 2

第7章 光カー効果誘起雑音の評価と除去手法

7 - 1.	はじめに	1 3 5
7 - 2.	光カー効果誘起雑音の実験的評価	1 3 7
7 - 3.	光カー効果誘起雑音の除去手法の原理	1 4 0
7 - 4.	光カー効果誘起雑音の除去実験	1 4 6
7 - 5.	まとめ	1 4 9
	付録	1 5 1
	参考文献	1 5 6

第8章 光ファイバ共振器中の光カー効果を用いたロックイン現象の解除

8 - 1.	はじめに	1 5 9
8 - 2.	ロックイン現象の解除手法の原理	1 6 1

8 - 3.	ロックイン現象の解除手法の実験的検討	165
8 - 4.	まとめ	168
	参考文献	170
第9章 総合的な雑音除去手法を取り入れた受動型リング共振方式光ジャイロ		
9 - 1.	はじめに	174
9 - 2.	実験系の構成	174
9 - 3.	実験結果	178
9 - 4.	まとめ	178
	参考文献	181
第10章 結論		
	参考文献	185
	参考文献	190
謝辞		194
本研究に関する発表文献		195

第 1 章 序論

1-1. はじめに

1970年代以降、光通信用ファイバの著しい進展にともない登場した光ファイバセンサは、光ファイバの優れた性質（無誘導性、防爆性、高絶縁耐力、高耐腐食性、細径、軽量、可とう性等）が注目され、活発な研究開発が行われた結果、現在では我々の周囲に存在するほとんど全ての物理量がセンシングの対象となっている[1]-[11]。

光ジャイロはその中の一種で、Sagnac効果[12]-[14]を用いて慣性空間に対する回転角速度を測定するものである。光ファイバセンサの中で最も注目され、世界的に活発な研究・開発が行われている[15]-[30]。その構成のためには、光ファイバセンサに必要な全ての技術的要素を含まなければならないので、“光センサの王様[25]”などと呼ばれている。

航空機や船舶に搭載する慣性航法装置中の主要センサとして用いられ、姿勢や位置の測定に用いられる。このほか、石油掘削ドリルの先端制御、カメラやアンテナ台の安定化、ロボットの姿勢制御、自動車のナビゲーションや乗り心地の改善などにもその利用価値は大きい。最も重要な用途の1つである航空機の慣性航法装置の構成要素としての用途には、分解能・零点安定性として $\sim 0.01\text{deg/h}$ 、ダイナミックレンジとして7桁、スケールファクタの安定度として10ppmというきわめて高い性能が要求される[15]-[30]。図1・1[25]にジャイロ性能とその応用分野をまとめた。

従来広く用いられてきた機械式のジャイロでは、上記のような性能の追求が必要な結果、回転体の均一度、軸受けの摩擦低減等に困難が伴っている。それに対して、光ジャイロでは、可動部がなく加速度に強い、構造が簡単、起動時間が短い、高感度、高直線性、消費電力が少ない、高信頼性というような数多くの特徴がある[15]-[30]。

光ジャイロには、次のような5つの方式が提案されている。

(1) 光ループそのものを石英ブロックをくり抜いて構成したHe-Neレーザ発振器

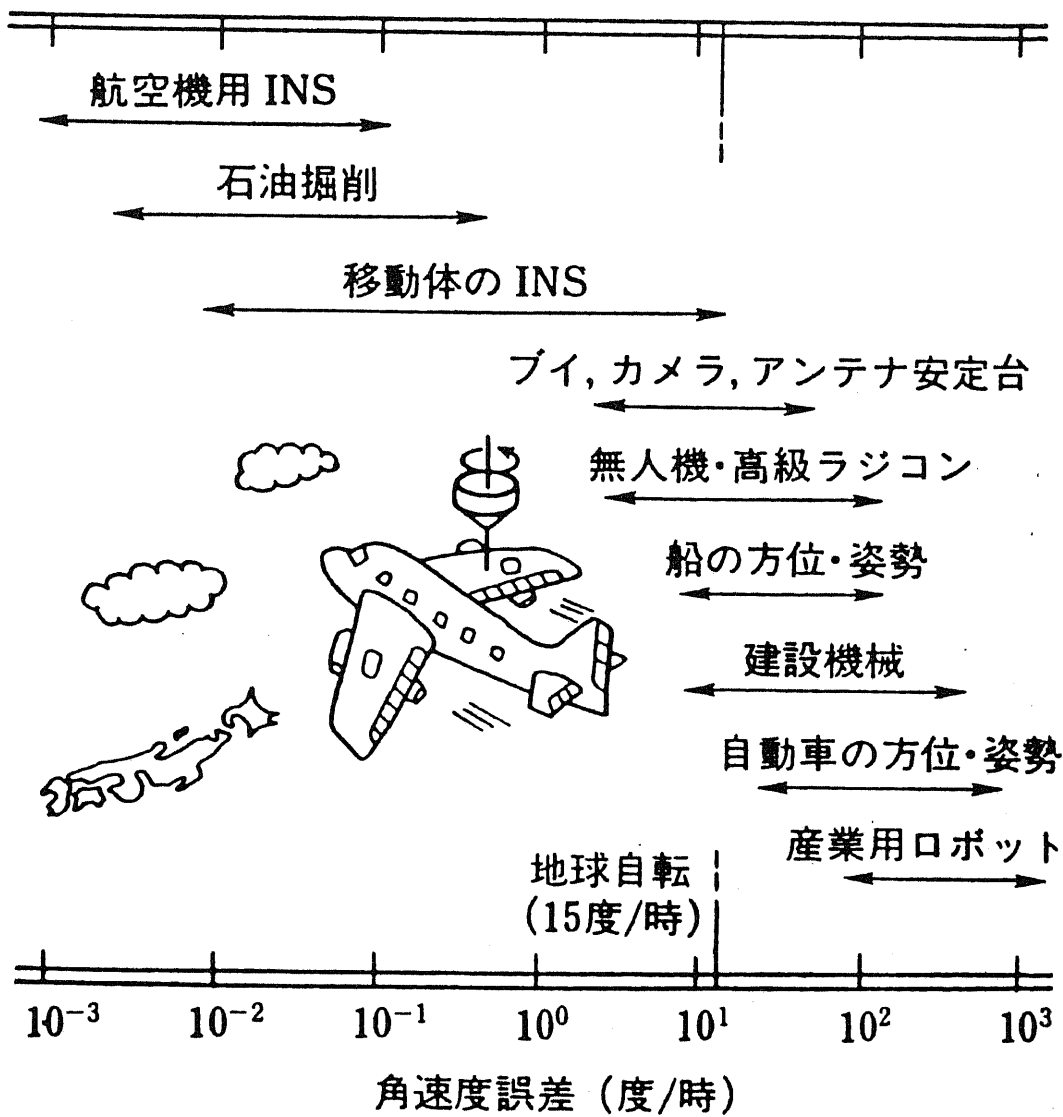


図 1・1 ジャイロ性能と応用分野 [25]

として構成し、回転検出のために両回り光のビート周波数差を利用するリングレーザージャイロ [31]。

(2) 光路を長尺の単一モードファイバで構成し、両回り光の干渉現象を利用する干渉型光ファイバジャイロ [32]。

(3) 偏波維持光ファイバでリング共振器を構成し、両回り光の共振現象を利用する受動型リング共振方式光ジャイロ [33]。

(4) リング共振器を光導波路上に構成し、両回り光の共振現象を利用するマイクロオプティクスジャイロ [34]。

(5) 光ファイバ共振器で誘導ブリルアンレーザを構成し、両回り光のビート周波数差を利用するブリルアンリングレーザージャイロ [35], [36]。

リングレーザージャイロは実用化の段階にあり、ボーイング767等の航空機にも積載されている。しかし低回転角速度時に生ずるロックイン現象（両光波間の周波数の引き込み現象）の解決を図るために系を微小に振動させており（ディザ法）、静止型という光ジャイロの大きな特徴を放棄してしまっている [17], [31]。

干渉型光ファイバジャイロは、現在最も活発に研究・開発が行われている。静止型という特徴は守られているが、高感度なジャイロを作成するためには、数百・数千mのオーダーでファイバを巻かなければならない。また後方散乱誘起雑音、光カー効果誘起雑音を除去するためには、低コヒーレンス光源を用いなければならない。現状でこの方式に適合する光源は、端面発光型高輝度発光ダイオード（Super Luminescent Diode: SLD）のみであるが、寿命が非常に短い、波長の温度安定性が良くない等の欠点があり、必ずしも使いやすい光源とはなっていない [15], [16], [18]-[21], [23]-[27], [30]。

受動型リング共振方式光ジャイロは基礎的な研究段階にある。短期的な分解能は達成されているが [37]、種々の雑音要因を考慮して長期的な零点安定性を達成した例は未だ報告されていない。高性能化のためには、種々の雑音要因の挙動を

正確に把握し、対策を立てて行くことが必須である。完全静止型として構成でき、センシンググループを10 μ m程度に短尺化できる利点がある[16],[19]-[22],[24]-[30]。また本方式ジャイロの構成に必須である半導体レーザ励起YAGレーザ[38]、半導体レーザ[39]等の高コヒーレンス光源は、最近その高性能化、高信頼性が著しい。

マイクロオプティクスジャイロは、中・低精度の性能の達成を目標にしたもので、著しい小型化が期待できる[34]。最近石英系ガラス導波路の低損失化が進み、直径6cmでフィネス50程度のリング共振器も構成されている[40]。

ブリルアンリングレーザジャイロは2年前に提案されたもので、原理的な動作確認が行われた段階である[35],[36]。今後雑音要因の挙動把握、対策の確立を行っていく必要がある。

1-2. 本論文の目的と構成

本研究では、受動型リング共振方式光ジャイロにおいて挙動把握が不完全であった雑音要因(偏波変動誘起雑音)や対策の確立が不十分であった雑音要因(後方散乱誘起雑音、光カー効果誘起雑音)に関する検討を、理論・実験両面から行う。また、ランプ性外乱を除去することが不可能であった従来のジャイロ制御系の高性能化を目指す。これらの結果とすでに本研究室で解析されている雑音要因の除去手法をもとに実際の系を作成し、受動型リング共振方式光ジャイロの高性能化への指針を探る。

本論文ではまず、第2章において光ジャイロの原理・構成方法を詳しく述べる。次に、受動型リング共振方式光ジャイロの雑音要因について述べ、共振方式光ジャイロの研究の現状と解決すべき問題点を明らかにする。

第3章ではまず、偏波維持光ファイバで構成したリング共振器中での、偏波軸の軸ずれによって生ずる偏波変動誘起雑音の挙動を明らかにする。まず共振特性を導出し、出力誤差の定式化を行った。評価の結果、共振器中に偏波軸ずれがある場合には必ず不要共振ピークが生じ、温度変動により主共振ピークに近づくため、大きな雑音要因になることがわかった。

第4章では、上記の偏波変動誘起雑音の除去手法として、3つの方法の検討を

行う。まず、共振器の入射端に光ファイバ偏光子を設置する手法について検討を行う。この構成では、共振ピーク間の励振比率が、左右両回り光でほぼ一致する。そのため両回り光の差動出力を取ることで、中・低精度ジャイロに必要な値にまで雑音を低減する効果があることがわかった。次に共振器を単一偏波光ファイバで構成する方法についての検討を行う。この場合不要共振ピークの励振比率が小さくなり、雑音を中・低精度ジャイロに必要な値にまで低減可能であることが明らかとなったので、その結果について述べる。最後に偏波軸を 90° 回転接続して共振器を構成する方法についての検討を行う。この場合、主共振ピークと不要共振ピーク間の間隔、励振比率が、温度変動があった場合でも、それぞれ π 、 1 に固定されることがわかった。そのためこの手法では、共振器のパラメータ値に対して許容度が高く、航空機の慣性航法に必要な高精度のジャイロ性能が得られることが明らかとなったので、その結果について述べる。

第5章では、後方散乱誘起雑音の除去手法として、2値位相変調法を用いた方法を新しく提案する。後方散乱誘起雑音は、散乱光自身による影響と、信号光と散乱光の干渉成分による影響とに分けられ、後者が受動型リング共振方式光ジャイロの零点安定性に影響を及ぼす。この除去手法として、共振器に入射する前の一方の光に搬送周波数成分を抑圧するように正弦波で周波数あるいは位相変調をかけ、干渉成分を信号帯域外に出す方法が従来よく用いられてきた。しかしこの方法は、搬送波成分を零とするための変調パラメータの調整に高い精度と安定度が要求されるために、十分な抑圧比をとることが困難であるという問題があった。そこで一方の光波に2値位相変調を施すだけで、無調整かつ精度よくこの雑音成分をなくす方法を新しく提案した。2値位相変調は搬送波の位相を $0, \pi, 0, \pi, \dots$ と周期的に変調するもので、このとき搬送波成分が零となる。この手法を用いて、実際に信号光と散乱光との干渉成分を無調整かつ精度よく消すことに成功したので、その結果について述べる。

第6章では、ランプ性外乱の除去手法として、部分的デジタル制御系を新しく提案する。温度、機会的変動等の外乱による共振点変動の補正は、共振器を伝搬する一方の光の共振特性を用い、圧電素子へ電圧負帰還をかけることによって行われる。しかし外乱がランプ性の場合、低域における積分器の利得飽和のために、従来用いられてきたアナログ制御だけによってこの外乱を除去することは不可能

であった。この問題を解決するために、アナログ制御系が補償できない外乱の低域成分を補償するものとして、新たにデジタル制御系を付加した制御系を構成した。この手法を用いることによって、受動型リング共振方式光ジャイロの零点安定性が著しく向上したので、その結果について述べる。

第7章では、まず光カー効果誘起雑音の評価結果について述べ、次にその新しい除去手法を提案する。受動型リング共振方式光ジャイロにおいて、光カー効果誘起雑音は両回り光の強度差に比例してあらわれる。その実験的な評価に初めて成功したので、最初にその結果について述べる。我々の研究グループではこの雑音の除去手法として、共振器に入射する光強度を共振器のフリースペクトルレンジの整数倍の周波数を持つ方形波で強度変調する方法を以前に提案した。しかし、強度変調器の帯域と消光比に対する要求が厳しく、その実行は非常に困難であった。ここでは、次のような光カー効果の除去手法を提案する。まず共振点検出に用いる変調周波数より非常に低い周波数で共振器に入射する光強度を変調し、両回り光間の強度差を検出する。次に、この差成分を用いて一方の光強度に負帰還をかけ、両回り光間の強度差を零にする手法である。この手法の有効性を確認する基礎実験に成功したので、その結果について述べる。

第8章では、光カー効果を用いた後方散乱誘起雑音の除去手法について述べる。まず、共振器を伝搬する光のうち一方の光強度を、正弦波で変調する。すると光カー効果を通じてジャイロの出力バイアスが変調され、リングレーザジャイロにおけるディザ法と同様に、後方散乱の影響が除去されることになる。この手法の有効性を確認する基礎実験に成功したので、その結果について述べる。

第9章では、本研究で得られた雑音除去手法と、我々の研究室でこれまでに得られた知見とを総合的に取り入れた受動型リング共振方式光ジャイロの系を構成する。この実験結果を基に、本方式光ジャイロの高性能化に必要な指針を明らかにする。

第10章では結論として、本研究で得られた成果をまとめ、今後の受動型リング共振方式光ジャイロの研究の展望について述べる。

参考文献

- [1] T. G. Giallorenzi, J. A. Bucaro, A. Dandridge, G. H. Sigel, Jr., J. H. Cole, S. C. Rashleigh, and R. G. Priest, "Optical fiber sensor technology," J. Quantum Electron., vol. QE-18, no. 4, pp. 626-665, Apr. 1982, Invited.
- [2] 大越, 西原, 岡本, 久間, 大津, 保立, "光ファイバセンサ," 大越編, オーム社, 1986年7月.
- [3] 大塚, "光ファイバセンサー," 応用物理, vol. 56, no. 6, pp. 702-719, 1987年6月.
- [4] 久間, 田井, "光センシング," 電子情報通信学会誌, vol. 72, no. 2, pp. 181-187, 1989年2月.
- [5] T. G. Giallorenzi, "Optical fiber sensor technology," in Proc. IOOC '89, paper 20D3-1, pp. 192-193, Kobe, Japan, July 1989, Invited.
- [6] 保立, "光の波長・位相制御技術による光センシング," 電子情報通信学会論文誌, vol. J73-C-1, no. 5, pp. 207-215, 1990年5月, 招待論文.
- [7] 芳野, "光波センシング技術の基礎と発展," 応用物理, vol. 59, no. 6, pp. 725-737, 1990年6月.
- [8] 芳野, 中谷, 都築, 廣瀬, 大塚, 田中(哲), 保立, 東口, 大野, 吉川, 伊東, "光ファイバセンサ," 光波センシングの基礎と応用, 第5章, 田中(俊)編, オーム社, pp. 167-231, 1990年8月.
- [9] A. Dandridge, "Fiber-optic sensors make waves, in acoustics, control," IEEE Circuits and Devices Magazine, pp. 12-19, Nov. 1990.
- [10] A. Dandridge and G. B. Cogdell, "Fiber optic sensors for navy applications," IEEE The Magazine of Lightwave Telecommunication Systems, pp. 81-89, Feb. 1991.
- [11] 保立, "光ファイバセンサ," レーザー研究, vol. 19, no. 8, pp. 776-786, 1991年8月.
- [12] E. J. Post, "Sagnac effect," Rev. of Modern Phys., vol. 39, no. 2, pp. 475-493, Feb. 1967.
- [13] T. J. Podgorski and F. Aronowitz, "Langmuir flow effects in the la-

- ser gyro," IEEE J. Quantum Electron., vol. QE-4, no. 1, pp. 11-18, Jan. 1968.
- [14] H. C. Lefevre and H. J. Arditty, "Electromagnetisme des milieux dielectriques lineaires en rotation et application a la propagation d'ondes guidees," Appl. Opt., vol. 21, no. 8, pp. 1400-1409, Apr. 1982.
- [15] R. A. Bergh, H. C. Lefevre, and H. J. Shaw, "An overview of fiber-optic gyroscopes," J. Lightwave Technol., vol. LT-2, no. 2, pp. 91-107, Apr. 1984, Invited.
- [16] K. Hotate, "Optical Fiber Gyroscope," JARECT, vol. 17, Optical Devices & Fibers, Y. Suematsu, Ed., Ohmsha Ltd. and North-Holland Publishing Co., pp. 333-348, 1985.
- [17] G. J. Martin, "Gyroscopes may cease spinning," IEEE Spectrum, vol. 23, no. 2, pp. 48-53, Feb. 1986.
- [18] B. Y. Kim and H. J. Shaw, "Fiber-optic gyroscopes," IEEE Spectrum, vol. 23, no. 3, pp. 54-60, Mar. 1986.
- [19] 保立, "光ファイバジャイロの雑音要因とその除去手法," 応用物理学会, 第4回光ファイバセンサワークショップ, paper WOFs 4-15, pp. 105-112, 東京, 1987年1月.
- [20] K. Hotate, "Noise sources in passive optical gyroscopes," in Proc. Sino-Japanese Symposium on Optical Fiber Sensors, paper 13, pp. 39-41, Beijing, China, Nov. 1988.
- [21] 保立, "光ファイバジャイロ — 干渉方式と共振方式 —," レーザー学会, 研究会報告, paper RTM-88-32, pp. 1-6, 東京, 1989年2月.
- [22] K. Kyuma, S. Tai, K. Kojima, and M. Takahashi, "Fiber-optic resonant ring sensors: System and device technology," in Proc. OFS '89, paper Mo-4-1, pp. 84-93, Paris, France, Sept. 1989, Invited.
- [23] H. C. Lefevre, "Evolution of fiber optic gyroscope," in Proc. OFS '89, paper Tu-5-1, pp. 124-130, Paris, France, Sept. 1989, Invited.
- [24] 保立, "光ファイバジャイロ," 計測と制御, vol. 29, no. 1, pp. 68-74,

1990年1月.

- [25] 保立, “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, vol. 73, no. 2, pp. 149-160, 1990年2月.
- [26] 保立, “光ファイバ応用部品(2) — 光ファイバジャイロへの応用, ” 光学, vol. 19, no. 7, pp. 472-480, 1990年7月.
- [27] 保立, 東口, “光ファイバジャイロ, ” 光波センシングの基礎と応用, 第5章, 第4節, 田中編, オーム社, pp. 208-221, 1990年8月.
- [28] K. Hotate, “Noise sources and countermeasures in optical passive ring-resonator gyro,” in Proc. OFS '90, paper TU01.1, pp. 11-17, Sydney, Australia, Dec. 1990, Invited.
- [29] K. Hotate and K. Takiguchi, “Drift reduction in an optical passive ring-resonator gyro,” Fiber Optic Gyros: 15th Anniv. Conf., paper 1585-14, Boston, U.S.A., Sept. 1991, Invited.
- [30] 保立, “受動型光ジャイロの研究開発動向, ” 日本航空宇宙学会誌, vol. 39, no. 452, pp. 464-472, 1991年9月.
- [31] F. Aronowitz, “The laser gyro,” Laser Applications, M. Ross, Ed., Academic, pp. 133-200, 1971.
- [32] V. Vali and R. W. Shorthill, “Fiber ring interferometer,” Appl. Opt., vol. 15, no. 5, pp. 1099-1100, May 1976.
- [33] S. Ezekiel and S. R. Balsamo, “Passive ring resonator laser gyroscope,” Appl. Phys. Lett., vol. 30, no. 9, pp. 478-480, May 1977.
- [34] W. Bernard, R. Englert, R. Fangmeier, E. Froning, K. Langner, and Kh. Schwarz, “Waveguide ring resonators in glass for optical gyros,” in Proc. Symposium Gyro Technology, paper 7, pp. 7.0-7.15, Stuttgart, F.R.G., Sept. 1986.
- [35] F. Zarinetchi, S. P. Smith, and S. Ezekiel, “New developments in fiberoptic gyroscopes,” in Proc. SPIE OE/FIBERS '89, paper 1169-36, pp. 300-303, Boston, U.S.A., Sept. 1989, Invited.
- [36] F. Zarinetchi, S. P. Smith, and S. Ezekiel, “Stimulated Brillouin

- fiber-optic laser gyroscope," Opt. Lett., vol. 16, no. 4, pp. 229-231, Feb. 1991.
- [37] R. E. Meyer, S. Ezekiel, D. W. Stowe, and V. J. Tekippe, "Passive fiber-optic ring-resonator for rotation sensing," Opt. Lett., vol. 8, no. 12, pp. 644-646, Dec. 1983.
- [38] R. L. Byer, "Diode laser-pumped solid-state lasers," Science, vol. 239, pp. 742-747, Feb. 1988.
- [39] "コヒーレント光通信用狭スペクトル半導体レーザを開発," 電子情報通信学会誌, vol. 74, no. 7, p. 782, 1991年7月.
- [40] R. Adar, Y. Shani, G. H. Henry, R. C. Kistler, G. E. Blonder, and N. A. Olsson, "Very low loss phosphorus-doped silica-on-silicon waveguides measured using a ring resonator," in Proc. OFC '91, paper TuF5, p. 22, San Diego, U.S.A., Feb. 1991.

第2章 光ジャイロの原理と雑音要因

2-1. はじめに

本章では、光ジャイロの原理と構成手法、また受動型リング共振方式光ジャイロの雑音要因について概観する。

まず、光ジャイロの回転検出原理であるSagnac効果について簡単な説明を行う。次に、そのSagnac効果を用いた光ジャイロについて、構成の分類とその特徴について詳しく述べる。最後に、本研究のテーマである受動型リング共振方式光ジャイロについて、雑音要因の挙動把握と対策の確立を中心として研究の現状を説明する。

2-2. 光ジャイロの原理と構成

2-2-1. 光ジャイロの原理

まず、光ジャイロの回転検出原理であるSagnac効果について説明を行う。

以下では、図2・1に示す円形光路を用いた簡単な説明を行う[1]。光源から出た光をビームスプリッタBSを用いて、右回り光と左回り光に伝搬させる。この際、系が慣性空間に対して静止していれば、両回り光は同一の光路を逆向きに伝搬するので、伝搬した後BSで合波される際には、両光波間の位相差は零となる。ところが、光学系が図2・1中の矢印で示したように光路を含む面内で慣性空間に対して角速度 Ω で回転すると、両回り光間に位相差が生ずる[2]-[5]。

ここで、BSにより光路に導かれてから再びBSに達するまでに要する時間は、右回り光、左回り光に対してそれぞれ以下のように与えられる。なお、簡単のために、以下では光路の屈折率を1とする。

$$t_r = \frac{2\pi a + a\Omega t_r}{c_0} \quad (2 \cdot 1)$$

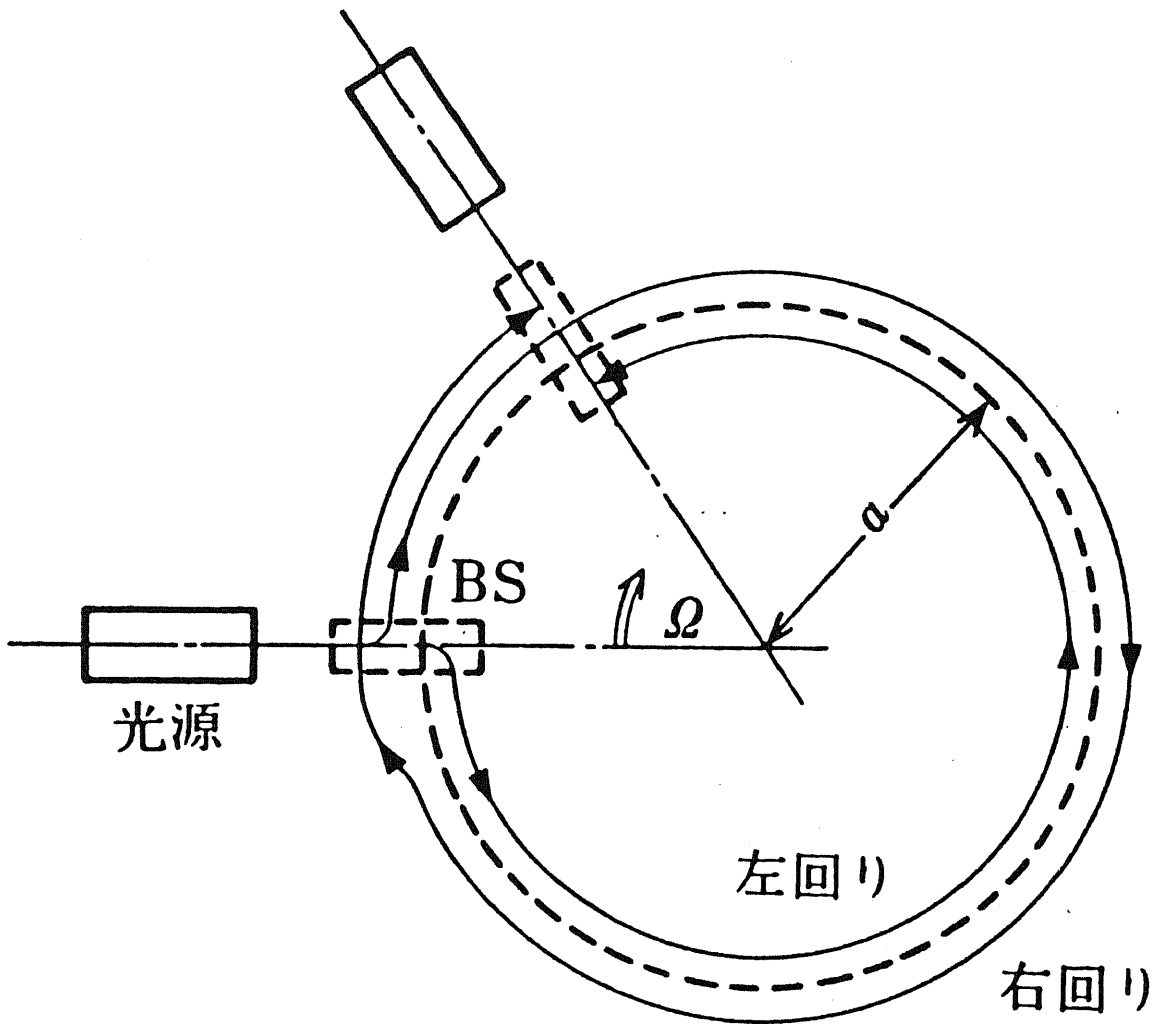


図 2・1 Sagnac効果の発生原理 [1]

$$t_1 = \frac{2\pi a - a\Omega t_1}{c_0} \quad (2 \cdot 2)$$

ただし、 a ：光路の半径、 c_0 ：光速、である。

式(2・1)、(2・2)より、両光波間の伝搬時間差 Δt は、以下のようになる。

$$\begin{aligned} \Delta t &= t_r - t_1 \\ &= \frac{4\pi a^2}{c_0^2} \Omega = \frac{4S}{c_0^2} \Omega \end{aligned} \quad (2 \cdot 3)$$

ただし、

$$c_0 \gg a\Omega, \quad (2 \cdot 4)$$

であることを考慮した。また、 S ：光路の囲む面積、である。

式(2・3)は、以下のような光路差 ΔL が生ずることを意味する。

$$\Delta L = \frac{4S}{c_0} \Omega \quad (2 \cdot 5)$$

式(2・5)は、結局、以下のような位相差 $\Delta \phi$ が生ずることを意味している。

$$\Delta \phi = \frac{4kS}{c_0} \Omega \quad (2 \cdot 6)$$

ただし、 k ：波数、である。

式(2・3)、(2・5)、(2・6)の効果はSagnac効果と呼び[2]、光路の形状、回転の中心、光路の屈折率には依存しない。

ここでは、光路の屈折率は1、形状は円形であると仮定したが、一般相対論を駆使したより厳密な解析でもSagnac効果の基本式は検証されている[4]。

2-2-2. 光ジャイロの構成

Sagnac効果は1913年に発見されたものであるが、その感度は非常に低く、ジャイロとしての実用化には工夫が必要であった[1]。

この問題を解決するために、これまでに考案された方式の構成分類を図2・2に示す。それぞれの光ジャイロの方式と特徴を以下で簡単にまとめる。

(1) リングレーザジャイロ (Ring Laser Gyro: RLG) [5]-[7]

図2・2(a)に示すように、熔融石英のブロックを三角形にくり抜いたチューブ中にHe-Neを満たしたガスレーザとして構成される。図2・2(a)の光路を互いに逆回りに伝搬する2つの発振光の発振周波数が、式(2・5)の光路差により異なり、以下のようなビート周波数 Δf が観測されることを利用する。

$$\Delta f = (4S/\lambda L)\Omega. \quad (2 \cdot 7)$$

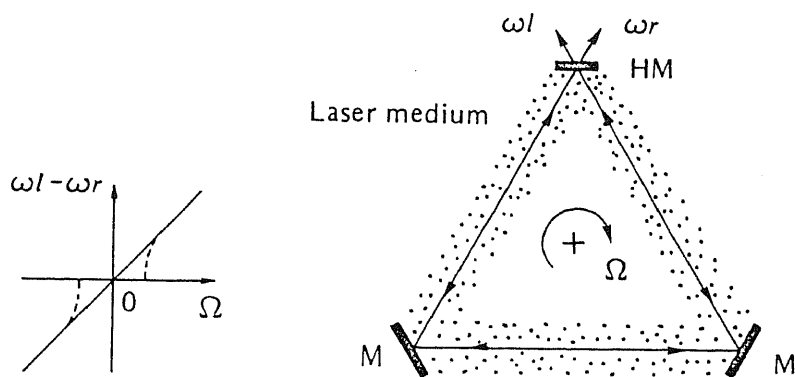
ただし、 λ : 静止時の発振波長、 L : 光路長、である。

光の周波数は高いためわずかな角速度の変化でも測定可能である。角速度に比例した周波数出力が得られるため、ダイナミックレンジがよく、慣性航法用としてボーイング767等の航空機の慣性航法装置として積載されている。

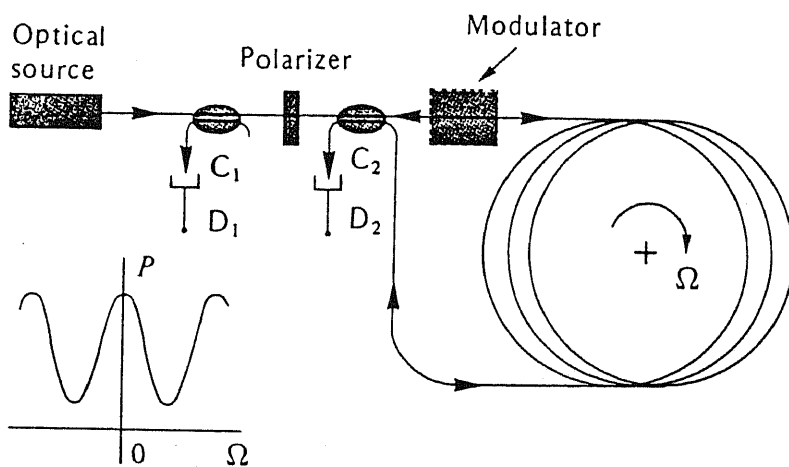
しかし、レーザガス流による出力ドリフト、レーザの発振モード安定化のため光路長変化に対する制御が必要である等の欠点のほかに、低加速度時に出力に非直線性(ロックイン現象)が現れるという重大な欠点が存在する。これは、低角速度時に、両発振光の周波数差が小さくなり引き込み現象を起こすためである。ロックイン現象の解除のためには、系全体を微小に振動させる方法(ディザ法)が一般的であるが、これでも非直線性は残り、静止型という大きな特徴を放棄してしまうことになる。

(2) 干渉型光ファイバジャイロ (Optical Fiber Gyro: OFG) [8]-[20]

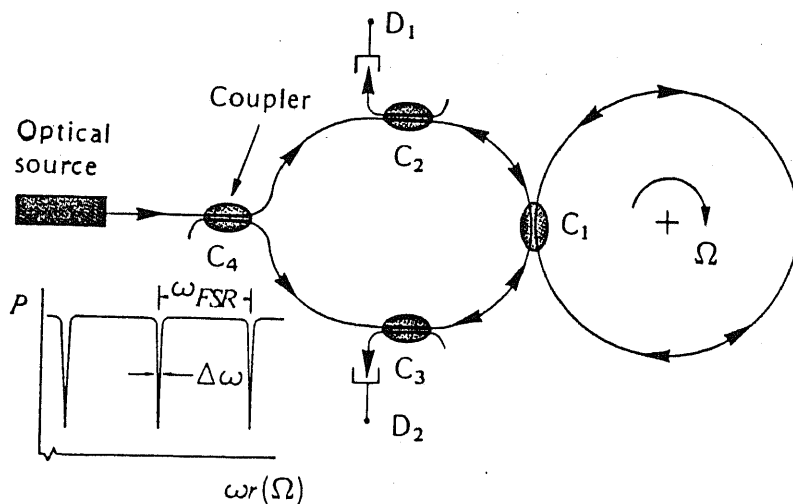
図2・2(b)に示すように、円形光路部を長尺の単一モード光ファイバルーブで置き換えた構成をとっている。Sagnac効果により誘起される両光波間の位相差 $\Delta\phi$ は、式(2・6)より以下の以下の式で与えられる。



(a) リングレーザージャイロ

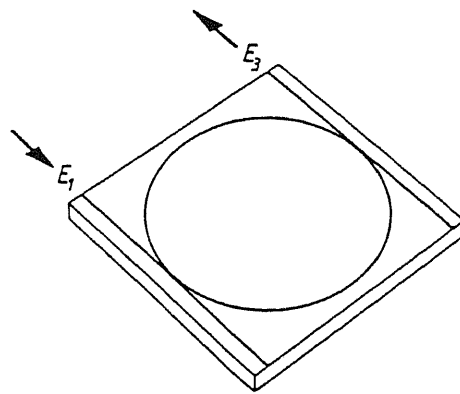


(b) 干渉型光ファイバジャイロ

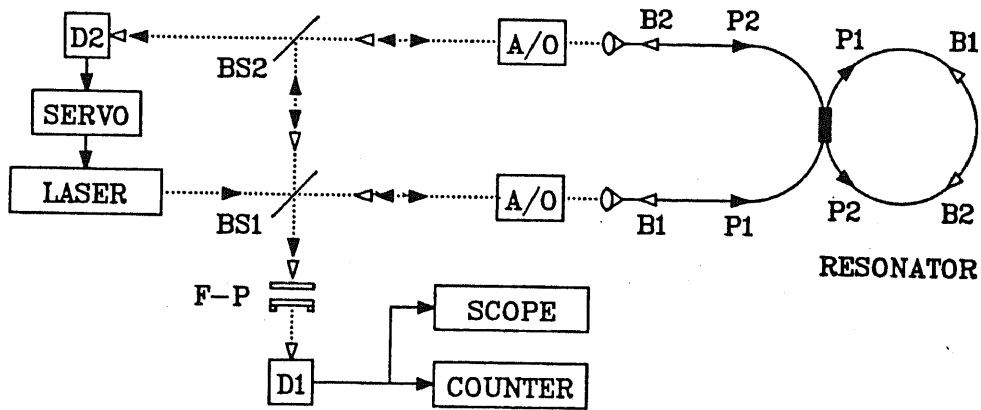


(c) 受動型リング共振方式光ジャイロ

図 2・2 光ジャイロの構成分類



(d) マイクロオプティクスジャイロ



(e) ブリルアンリングレーザジャイロ

図 2・2 光ジャイロの構成分類

$$\Delta \phi = (4kSN/C_0) \Omega = (4\pi La/C_0 \lambda) \Omega. \quad (2 \cdot 8)$$

ただし、N：ファイバループの巻数、である。

光ファイバ製造技術の発展で、ファイバの低損失化が進んだ。また、ファイバには可とう性があるために、半径数cmに巻くことも可能で、その際有意な損失の増加も見られない。そのため、半径を小さく保ったままでファイバ長を数百・数千m程度まで長くすることによって、高感度な干渉系が構成できる。 $\Delta \phi$ を高精度に測定し、式(2・8)から Ω を求めるのが干渉型光ファイバジャイロの原理である。

干渉型光ファイバジャイロは受動型構成であるためにリングレーザジャイロに見られるようなロックイン現象は見られない。また、半導体光源や光集積回路の利用により、いっそうの小型化、省電力化、高信頼化が期待されており、現在ではもっとも盛んに研究開発が進められている。また最近では、簡単な構成で部品数を少なくし、低コストで中・低精度のジャイロを作ろうとする試みも盛んになってきている[21]-[24]。中・低精度のジャイロは、既に自動車のカーナビゲーションシステムの構成部品として市販されている。また航空機の慣性航法に適合した高精度ジャイロの市場への登場もそう遠くはないと考えられる[25]-[33]。

光源としては、後方レーリ散乱[34]、光カー効果[35]によるドリフトを除去するために、低コヒーレンス光源が利用される。通常はSLDが用いられるが、寿命と波長の温度安定性に問題がある。最近ではそれらの問題点を解決するものとして、希土類ドープ光ファイバを用いた低コヒーレンス光源の開発も盛んである[36]。

(3) 受動型リング共振方式光ジャイロ (Optical Passive Ring-Resonator Gyro: OPRG) [10], [12]-[14], [16]-[20], [37]-[41]

図2・2(c)に示すように、高反射率のハーフミラー、あるいは光ファイバカップラを用いて光のリング共振器を構成し、Sagnac効果に対する感度を向上させることができる。

受光器出力は、光波がリング状光路を1周伝搬する際の位相回転に対しまわめて鋭敏に変化し、共振ピーク位置(周波数)の回転による変化を測定して高感度なジャイロが構成できる。両回り光間の周波数 Δf は、式(2・7)と同様に、以

下の式で表される。

$$\Delta f = (4S/\lambda L) \Omega. \quad (2 \cdot 9)$$

ハーフミラーあるいは光ファイバカップラの反射率を高め、光路中での損失を低減させ、かつ光源のコヒーレンスを高めることにより共振器のフィネスを増大させることが可能である。そのためセンシングループを短尺化できる。典型的な光ファイバ共振器長は約10mであり、干渉型光ファイバジャイロの約100分の1程度である。中・低精度のジャイロであれば、光導波路上に設けた一回りの光路でもジャイロ機能が実現できる。そのため、将来の光集積回路の発展にともない、小型化・低価格化が期待できる。これが次に説明するマイクロオプティクスジャイロである。

また、受動型リング共振方式光ジャイロにおいては、ディザ法を適用することなしにロックインの解除が可能であるので、静止型という特徴が保たれている。

本研究開始前にも、本ジャイロ系の雑音要因に関して理論・実験両面から検討が行われているが、挙動把握が不完全であったり、対策が不十分であったりする雑音要因がいくつかある[42]-[60]。

本ジャイロ構成では、急峻な共振特性を得るためにコヒーレンスの高い光源が要求される。最近では、半導体レーザ励起YAGレーザ[61]-[64]、半導体レーザ[65]-[77]などの研究が進んでいる。前者では線幅300kHz[64]、後者では線幅50kHz[77]が達成されている。

また、偏波維持光ファイバで構成された光ジャイロ用の素子、及びその周辺技術の発展も著しい[78]-[88]。フィネス1,000をこえるリング共振器を作成した例も報告されている[87]。

(4) マイクロオプティクスジャイロ (Micro-Optics Gyro: MOG) [89], [90]

図2・2(d)に示すように、光導波路上に直径10cm程度のリング共振器を作成し、そのリング共振器の共振特性を利用して回転検出を行う光ジャイロである。基本的には、受動型リング共振方式光ジャイロの1種であり、式(2・9)で表

現される周波数変化を測定し、角速度を測定する。

共振器長が数十cmと短いため、その応用は中・低精度の用途に限られるが、著しい小型化が可能であるという大きな利点を有する。

雑音要因の挙動も、基本的には受動型リング共振方式光ジャイロと同じである。しかし中・低精度用であることを考えると、光カー効果誘起雑音などは除去する必要がなくなるため、受動型リング共振方式光ジャイロに比べ、雑音除去機構は簡素化できることが期待できる。実験的には1rad/s内におさまるドリフト特性が達成された程度の段階であり、今後研究・開発を積極的に進めていく必要がある。

導波路型リング共振器は、有機PMMA (Polymethyl Methacrylate) 光導波路 [91]、LiNbO₃プロトン交換光導波路 [92]、イオン交換ガラス導波路 [93]、石英系ガラス導波路 [94]-[101]等での構成例がある。上記導波路の中で石英系ガラス導波路を除いた光導波路は、損失が約0.1~1dB/cmと高く、マイクロオプティクスジャイロに適合する高性能な共振器（直径10cm、フィネス30~50程度）が作成された例はない。しかし石英系ガラス導波路では、損失0.01dB/cmと他の導波路より1桁以上低い損失が達成されている [96], [98]-[100]。直径6cmでフィネス50程度のリング共振器も構成されており [99]、マイクロオプティクスジャイロ用リング共振器の最有力候補であると考えられる。

(5) Brillouin Ring Laser Gyro (B-RLG) [102]-[105]

図2・2(e)に示すように、光ファイバ共振器でリング共振器を構成し、その中に高コヒーレンスのレーザ光を比較的高強度入射する。すると共振器中で生じたブリルアン散乱が誘導増幅され、共振器がファイバレーザとして働く。こうして得られたレーザ光もSagnac効果を受け、受光器上では回転角速度に比例した両回り光間のビート周波数が観測される。このジャイロはHe-Neレーザで構成したリングレーザジャイロの光ファイバ版ということができ、ビート周波数はやはり式(2・7)で表される。

ブリルアンリングレーザジャイロは2年前に提案されたばかりで、原理的な動作確認が行われた段階である。リングレーザジャイロと同様に、ロックイン現象が観測される。今後このロックイン現象の除去も含めて、雑音要因の挙動把握、

その対策の確立を行っていく必要がある。

本方式では、極めて簡単な構成で光ジャイロが実現できるため、今後の研究が注目される。

2-3. 受動型リング共振方式光ジャイロの雑音要因

本方式については、まず反射鏡で構成した光リング共振器によるジャイロ系の実験が行われた[37],[43]。次に、光ファイバや光導波路を光路とした共振器の基礎研究が進められた[44],[45]。

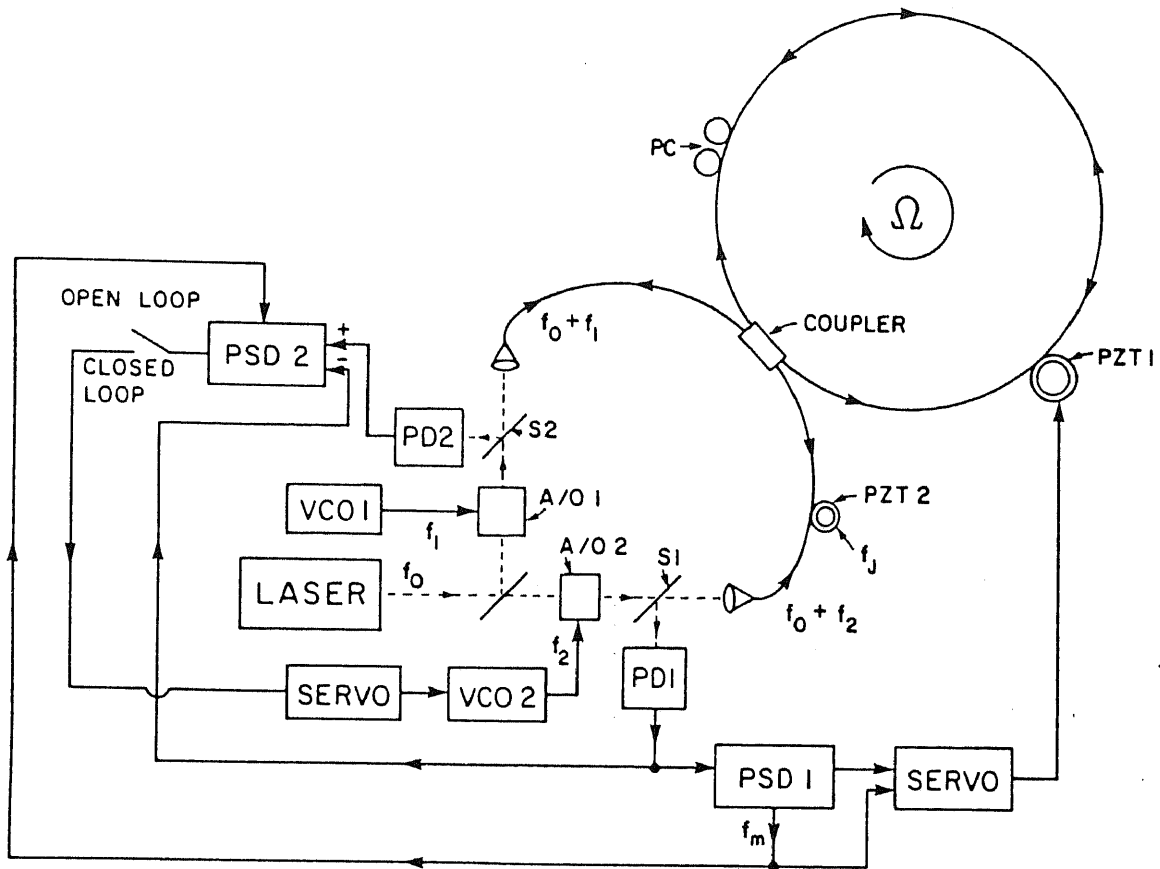
図2・3(a)は、1983年にアメリカ合衆国のマサチューセッツ工科大学から報告されたジャイロとしての光学系である[38]。反射鏡の代わりに光ファイバカップラが用いられ、共振器も同一の単一モードファイバで構成されている。共振器のフィネスは140である。両回り光の共振特性を測定し、一方の共振特性を用いて、温度変動・機械変動等の外乱を除去し、両者の差動成分として回転角速度を測定する構成になっている。本光学系では、回転による共振周波数の変化を音響光学変調器(Acousto-Optic Modulator: AOM)の駆動周波数を変えて追いかける零位法構成がとられ、角速度に比例した周波数の電気信号が出力される[38]。

図2・3(a)においては後方レーリ散乱への対策として、光ファイバ位相変調器PZT2により右回り光の搬送周波数成分を抑圧するように位相変調をかけ、信号光と後方レーリ散乱光との干渉成分が信号帯域外となるように工夫が施されている。この結果、図2・3(b)に示すように、90秒間にわたって0.5deg/h(積分時間1秒)なる短期分解能が達成された[38]。

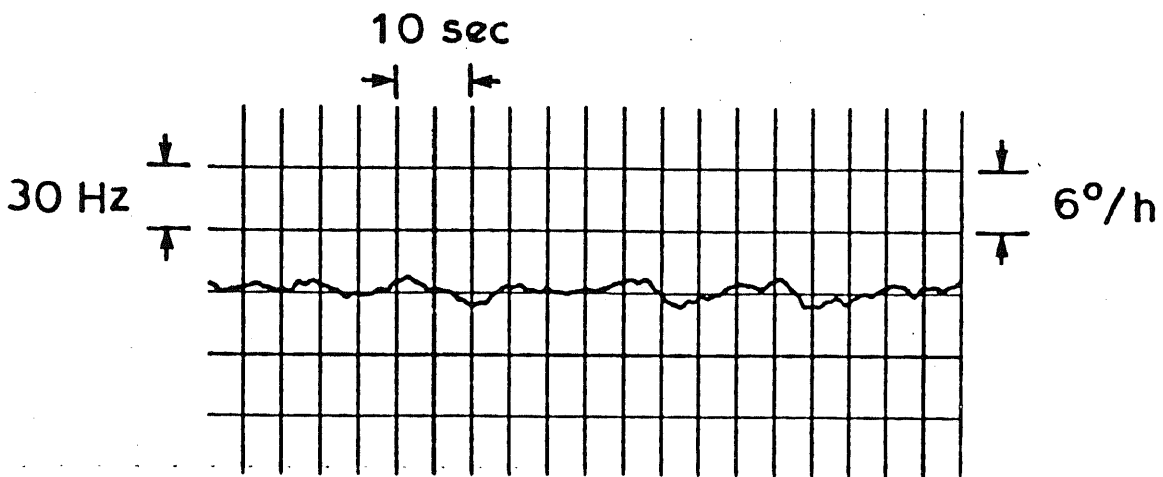
しかし、あくまでこれは短期的な特性で、長期的に安定なドリフト特性の達成のためには、後方レーリ散乱以外の様々な雑音要因に対する対策も必要である。

その他、いくつかの受動型リング共振方式光ジャイロの実験結果が報告されているが[54],[56]-[60]、いずれも短期的な特性についての報告ばかりで、全ての雑音要因に対する対策を含み、長期的にドリフトを低減した報告は未だなされていない。

本方式において問題となる性能劣化要因には、光源のコヒーレンス[40],[41],[46]、温度変動[40]-[42]、光カー効果[40],[41],[51]、地磁気によるフェラデー



(a) システム構成



(b) 達成された短期分解能

図 2・3 光ファイバリング共振器による受動型リング共振方式光ジャイロの構成例 [38]

効果[40],[41],[55],[106],[107]、偏波状態変動[40],[41],[52]、後方レーリ散乱[38],[40],[41],[43],[46],[49],[50],[53]などが存在する。その除去手法は、我々の研究室を中心にいくつか検討されている。受動型リング共振方式光ジャイロの雑音要因とその対策をまとめたものが表2・1である。

この表の中には、挙動がきちんと把握されていないもの(偏波変動)や、対策が不十分であるもの(温度変動、光カー効果、後方散乱)が存在する。長期的なドリフト特性の安定化のためには、これらをきちんと解決することが必須である。

2-4. まとめ

光ジャイロの原理であるSagnac効果について、簡単な説明を行った。次に、5種類ある光ジャイロの方式の分類を行い、それぞれの特徴を簡単にまとめた。

最後に、本研究のテーマである受動型リング共振方式光ジャイロに関して、雑音要因とその対策に関する研究の現状についての説明を行った。

表 2 - 1 受動型リング共振方式光ジャイロにおける雑音要因とその対策

Noise Sources	Descriptions	Countermeasures
Coherence of light source	* To obtain sharp resonance characteristics, a light source with a narrow spectrum linewidth is required (100 kHz for aircraft navigation) [46].	* Narrowing of the LD's spectrum linewidth is important [46].
Thermal fluctuation in fiber resonator	* When the temperature of optical fiber fluctuates unevenly in the longitudinal direction, the output varies (after Shupe [42]).	* Optical fiber is wound so that thermal distribution becomes symmetric with the fiber center along its length [42]. Since the fiber length is shorter than FOG, the influence is relatively small [42].
Optical Kerr effect in fiber resonator	* Optical Kerr effect induces the bias proportional to the power imbalance between CW and CCW propagating waves [51]. * Variation in the coupling ratio of fiber coupler, and/or that in the modulation index of FM or PM for catching the resonance peak causes the drift [51].	* Modulate the light source intensity using a square wave having a duty factor of 50 %. Modulation frequency becomes as high as 100 MHz [51].
Faraday effect due to the earth's magnetism	* The optical fiber functions as a Faraday element due to the earth's magnetism, which generates bias in combination with the retarding effect of the fiber [55], [106], [107].	* High birefringence of polarization-maintaining fiber can reduce the drift [55], [106], [107]. * Removal of special twist component is effective [55], [106], [107].
Polarization coupling in fiber resonator	* The resonance characteristics are given by the special state of polarization, named Eigen-State of Polarization (ESOP), in the fiber resonator. There are two independent ESOP's [52]. * When one ESOP resonance dip is approached by the other ESOP resonance dip, a large drift takes place [52].	
Rayleigh backscattering in fiber resonator	* Backscattering generated in the resonator forms two components with resonance characteristics [46]: Backscattered intensity itself [46] and interference between backscattering and the signal wave (after Sanders et al. [43]).	* The former shows twin peaks in the resonance under the rotation, which induces gyro nonlinearity [46], [49], [53].
		* The latter induces an output fluctuation in open loop operation [43], [46], and lock-in effect in closed loop operation (after Zarinetchi et al. [50]).
		* Apply PM or FM at different frequencies to CW and CCW waves, and synchronously detect to reject the noise component [46], [49], [53].
		* Apply PM or FM to CW or CCW wave to suppress its carrier frequency [38], [50]. Requirement for the suppression ratio is rather severe.

参考文献

- [1] 大越, 西原, 岡本, 久間, 大津, 保立, “光ファイバセンサ,” 大越編, オーム社, 1986年7月.
- [2] E. J. Post, “Sagnac effect,” Rev. of Modern Phys., vol. 39, no. 2, pp. 475-493, Feb. 1967.
- [3] T. J. Podgorski and F. Aronowitz, “Langmuir flow effects in the laser gyro,” J. Quantum Electron., vol. QE-4, no. 1, pp. 11-18, Jan. 1968.
- [4] H. C. Lefevre and H. J. Arditty, “Electromagnitisme des milieux dielectriques lineaires en rotation et application a la propagation d'ondes guidees,” Appl. Opt., vol. 21, no. 8, pp. 1400-1409, Apr. 1982.
- [5] F. Aronowitz, “The laser gyro,” Laser Applications, M. Ross, Ed., Academic, pp. 133-200, 1971.
- [6] W. W. Chow, J. B. Hambenne, T. J. Hutchings, V. E. Sanders, M. Sargent III, and M. O. Scully, “Multioscillator laser gyros,” J. Quantum Electron., vol. QE-16, no. 9, pp. 918-936, Sept. 1980, Invited.
- [7] G. J. Martin, “Gyroscopes may cease spinning,” IEEE Spectrum, vol. 23, no. 2, pp. 48-53, Feb. 1986.
- [8] V. Vali and R. W. Shorthill, “Fiber ring interferometer,” Appl. Opt., vol. 15, no. 5, pp. 1099-1100, May 1976.
- [9] R. A. Bergh, H. C. Lefevre, and H. J. Shaw, “An overview of fiber-optic gyroscopes,” J. Lightwave Technol., vol. LT-2, no. 2, pp. 91-107, Apr. 1984, Invited.
- [10] K. Hotate, “Optical fiber gyroscope,” JARECT, vol. 17, Optical Devices & Fibers, Y. Suematsu, Ed., Ohmsha Ltd. and North-Holland Publishing Co., pp. 333-348, 1985.
- [11] B. Y. Kim and H. J. Shaw, “Fiber-optic gyroscopes,” IEEE Spectrum, vol. 23, no. 3, pp. 54-60, Mar. 1986.

- [12] 保立, “光ファイバジャイロの雑音要因とその除去手法,” 応用物理学会, 第4回光ファイバセンサワークショップ, paper W0FS 4-15, pp. 105-112, 東京, 1987年1月.
- [13] K. Hotate, “Noise sources in passive optical gyroscopes,” in Proc. Sino-Japanese Symposium on Optical Fiber Sensors, paper 13, pp. 39-41, Beijing, China, Nov. 1988.
- [14] 保立, “光ファイバジャイロ — 干渉方式と共振方式 —,” レーザー学会研究会報告, paper RTM-88-32, pp. 1-6, 東京, 1989年2月.
- [15] H. C. Lefevre, “Evolution of fiber optic gyroscope,” in Proc. OFS '89, paper Tu-5-1, pp. 124-130, Paris, France, Sept. 1989, Invited.
- [16] 保立, “光ファイバジャイロ,” 計測と制御, vol. 29, no. 1, pp. 68-74, 1990年1月.
- [17] 保立, “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, vol. 73, no. 2, pp. 149-160, 1990年2月.
- [18] 保立, “光ファイバ応用部品(2) — 光ファイバジャイロへの応用,” 光学, vol. 19, no. 7, pp. 472-480, 1990年7月.
- [19] 保立, 東口, “光ファイバジャイロ,” 光波センシングの基礎と応用, 第5章, 第4節, 田中編, オーム社, pp. 208-221, 1990年8月.
- [20] 保立, “受動型光ジャイロの研究開発動向,” 日本航空宇宙学会誌, vol. 39, no. 452, pp. 464-472, 1991年9月.
- [21] H. Poisel, G. F. Trommer, W. Buhler, E. Hartl, and R. Muller, “Low-cost fibre-optic gyroscope,” Electron. Lett., vol. 26, no. 1, pp. 69-70, Jan. 1990.
- [22] A. D. Kersey and R. P. Moeller, “Open loop fibre optic gyroscope with phase shift nulling signal processing,” Electron. Lett., vol. 26, no. 16, pp. 1251-1253, Aug. 1990.
- [23] H. Negishi, Y. Takeuchi, Y. Takei, Y. Honjaya, and Y. Kasahara, “AM noise reduction in fiber optic rotation sensor,” Fiber Optic Gyros: 15th Anniv. Conf., paper 1585-34, Boston, U.S.A., Sept.

1991.

- [24] S. Motohara and A. Ohno, "Fiber optic gyroscope with single mode fiber coil," OFS '92, paper W2.2, Monterey, U.S.A., Jan. 1992.
- [25] G. Weed, G. A. Sanders, and G. W. Adams, "Fiber optic gyro productization at Honeywell, Inc.," Fiber Optic Gyros: 15th Anniv. Conf., paper 1585-01, Boston, U.S.A., Sept. 1991, Invited.
- [26] G. A. Pavlath, "Productization of fiber gyros at Litton Systems, Inc.," Fiber Optic Gyros: 15th Anniv. Conf., paper 1585-02, Boston, U.S.A., Sept. 1991, Invited.
- [27] H. Gilles, M. Harju, J. L. Page, and D. Sugarbaker, "Productization of fiber optic gyros at Smith Industries," Fiber Optic Gyros: 15th Anniv. Conf., paper 1585-03, Boston, U.S.A., Sept. 1991, Invited.
- [28] K. Sakuma, "Fiber optic gyro productization at Japan Aviation Electronics," Fiber Optic Gyros: 15th Anniv. Conf., paper 1585-04, Boston, U.S.A., Sept. 1991, Invited.
- [29] H. Kajioka, "Fiber optic gyro productization at Hitachi," Fiber Optic Gyros: 15th Anniv. Conf., paper 1585-05, Boston, U.S.A., Sept. 1991, Invited.
- [30] Y. Hayakawa, "Fiber optic gyro productization at Mitsubishi Precision Company," Fiber Optic Gyros: 15th Anniv. Conf., paper 1585-06, Boston, U.S.A., Sept. 1991, Invited.
- [31] H. C. Lefevre, P. Martin, J. Morisse, P. Simonpietri, P. Vivenot, and H. J. Arditty, "Fiber optic gyro productization at Photonetics," Fiber Optic Gyros: 15th Anniv. Conf., paper 1585-07, Boston, U.S.A., Sept. 1991, Invited.
- [32] A. Malvern, "Fiber optic gyro productization at British Aerospace," Fiber Optic Gyros: 15th Anniv. Conf., paper 1585-08, Boston, U.S.A., Sept. 1991, Invited.
- [33] W. Auch, M. Oswald, and R. A. Regener, "Fiber optic gyro produc-

- tization at SEL Alcatel," Fiber Optic Gyros: 15th Anniv. Conf., paper 1585-09, Boston, U.S.A., Sept. 1991, Invited.
- [34] K. Bohm, P. Marten, K. Petermann, and E. Weidel, "Low-drift fibre Gyro using a superluminescent diode," Electron. Lett., vol. 17, no. 10, pp. 352-353, May 1981.
- [35] R. A. Bergh, B. Culshaw, C. C. Cutler, H. C. Lefevre, and H. J. Shaw, "Source statics and the Kerr effect in fiber-optic gyroscopes," Opt. Lett., vol. 7, no. 11, pp. 563-565, Nov. 1982.
- [36] B. Y. Kim, "Broadband fiber sources for gyroscopes," in Proc. OFS '90, paper WE02.1, pp. 129-133, Sydney, Australia, Dec. 1990, Invited.
- [37] S. Ezekiel and S. R. Balsamo, "Passive ring resonator laser gyroscope," Appl. Phys. Lett., vol. 30, no. 9, pp. 478-480, May 1977.
- [38] R. E. Meyer, S. Ezekiel, D. W. Stowe, and V. J. Tekippe, "Passive fiber-optic ring-resonator for rotation sensing," Opt. Lett., vol. 8, no. 12, pp. 644-646, Dec. 1983.
- [39] K. Kyuma, S. Tai, K. Kojima, and M. Takahashi, "Fiber-optic resonant ring sensors: System and device technology," in Proc. OFS '89, paper Mo-4-1, pp. 84-93, Paris, France, Sept. 1989, Invited.
- [40] K. Hotate, "Noise sources and countermeasures in optical passive ring-resonator gyro," in Proc. OFS '90, paper TU01.1, pp. 11-17, Sydney, Australia, Dec. 1990, Invited.
- [41] K. Hotate and K. Takiguchi, "Drift reduction in an optical passive ring-resonator gyro," Fiber Optic Gyros: 15th Anniv. Conf., paper 1585-14, Boston, U.S.A., Sept. 1991, Invited.
- [42] D. M. Shupe, "Fiber resonator gyroscope: Sensitivity and thermal nonreciprocity," Appl. Opt., vol. 20, no. 2, pp. 286-289, Jan. 1981.
- [43] G. A. Sanders, M. G. Prentiss, and S. Ezekiel, "Passive ring resonator for sensitive inertial rotation measurements in geophysics

- and relativity," *Opt. Lett.*, vol. 6, no. 11, pp. 569-571, Nov. 1981.
- [44] L. F. Stokes, M. Chodorow, and H. J. Shaw, "All-single-mode fiber resonator," *Opt. Lett.*, vol. 17, no. 6, pp. 288-290, June 1982.
- [45] L. F. Stokes, M. Chodorow, and H. J. Shaw, "Sensitive all-single-mode-fiber resonant ring interferometer," *J. Lightwave Technol.*, vol. LT-1, no. 1, pp. 110-115, Mar. 1983.
- [46] K. Iwatsuki, K. Hotate, and M. Higashiguchi, "Effect of Rayleigh backscattering in an optical passive ring-resonator gyro," *Appl. Opt.*, vol. 23, no. 21, pp. 3916-3924, Nov. 1984.
- [47] Y. Ohtsuka, "Analysis of a fiber-optic passive loop-resonator gyroscope: Dependence on resonator parameters and light-source coherence," *J. Lightwave Technol.*, vol. LT-3, no. 2, pp. 378-384, Apr. 1985.
- [48] Y. Ohtsuka and Y. Imai, "Performance analysis of an all-fiber resonant-ring interferometric sensor," *Appl. Opt.*, vol. 24, no. 23, pp. 4199-4205, Dec. 1985.
- [49] K. Iwatsuki, K. Hotate, and M. Higashiguchi, "Resonance characteristics of backscattering in optical passive ring-resonator gyro," *Electron. Lett.*, vol. 22, no. 3, pp. 135-137, Jan. 1986.
- [50] F. Zarinetchi and S. Ezekiel, "Observation of lock-in behavior in a passive resonator gyroscope," *Opt. Lett.*, vol. 11, no. 6, pp. 401-403, June 1986.
- [51] K. Iwatsuki, K. Hotate, and M. Higashiguchi, "Kerr Effect in an optical passive ring-resonator gyro," *J. Lightwave Technol.*, vol. LT-4, no. 6, pp. 645-651, June 1986.
- [52] 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.*, vol. 25, no. 15, pp. 2606-2612, Aug. 1986.

- [53] K. Iwatsuki, K. Hotate, and M. Higashiguchi, "Backscattering in an optical passive ring-resonator gyro: Experiment," *Appl. Opt.*, vol. 25, no. 23, pp. 4448-4451, Dec. 1986.
- [54] M. Ohtsu and S. Araki, "Using a 1.5- μ m DFB InGaAsP laser in a passive ring cavity-type fiber gyroscope," *Appl. Opt.*, vol. 26, no. 3, pp. 464-470, Feb. 1987.
- [55] K. Hotate and M. Murakami, "Drift of an optical passive ring-resonator gyro caused by the Faraday effect," in *Proc. OFS '88*, paper FBB6, pp. 405-408, New Orleans, U.S.A., Jan. 1988.
- [56] G. A. Sanders, N. Demma, G. F. Rouse, and R. B. Smith, "Evaluation of polarization maintaining fiber resonator for rotation sensing applications," in *Proc. OFS '88*, paper FBB7, pp. 409-412, New Orleans, U.S.A., Jan. 1988.
- [57] G. A. Sanders, G. F. Rouse, L. K. Strandjord, N. A. Demma, K. A. Miesel, and Q. Y. Chen, "Resonator fiber-optic gyro using LiNbO₃ integrated optics at 1.5- μ m wavelength," in *Proc. SPIE OE/FIBERS '88*, paper 985-50, pp. 202-210, Boston, U.S.A., Sept. 1988.
- [58] M. Takahashi, S. Tai, K. Kyuma, and K. Hamanaka, "Fiber-optic passive ring-resonator gyroscope using an external-cavity laser diode," *Opt. Lett.*, vol. 13, no. 3, pp. 236-238, Mar. 1988.
- [59] 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.*, vol. 13, no. 5, pp. 413-415, May 1988.
- [60] M. Takahashi, S. Tai, and K. Kyuma, "Effect of reflections on the drift characteristics of a fiber-optic passive ring-resonator gyroscope," *J. Lightwave Technol.* vol. 8, no. 5, pp. 811-816, May 1990.
- [61] T. J. Kane and R. L. Byer, "Monolithic, unidirectional single-mode Nd:YAG ring laser," *Opt. Lett.*, vol. 10, no. 2, pp. 65-67, Feb.

1985.

- [62] T. J. Kane, A. C. Nilsson, and R. L. Byer, "Frequency stability and offset locking of a laser-diode-pumped Nd:YAG monolithic non-planar ring oscillator," *Opt. Lett.*, vol. 12, no. 3, pp. 175-177, Mar. 1987.
- [63] R. L. Byer, "Diode laser-pumped solid-state lasers," *Science*, vol. 239, pp. 742-747, Feb. 1988.
- [64] "User manual of diode pumped ring laser," Lightwave Electronics Co., U.S.A., Apr. 1988.
- [65] M. W. Fleming and A. Mooradian, "Spectral characteristics of external-cavity controlled semiconductor lasers," *J. Quantum Electron.*, vol. QE-17, no. 1, pp. 44-59, Jan. 1981.
- [66] C. H. Henry, "Theory of the linewidth of semiconductor lasers," *J. Quantum Electron.*, vol. QE-18, no. 2, pp. 259-264, Feb. 1982.
- [67] H. Sato and J. Ohya, "Theory of spectral linewidth of external cavity semiconductor lasers," *J. Quantum Electron.*, vol. QE-22, no. 7, pp. 1060-1063, July 1986.
- [68] R. Wyatt and W. J. Devlin, "10 kHz linewidth 1.5 μm InGaAsP external cavity laser with 55 nm tuning range," *Electron. Lett.*, vol. 19, no. 3, pp. 110-112, Feb. 1983.
- [69] K. Kojima and K. Kyuma, "Analysis of the spectral linewidth of distributed feedback laser diodes," *Electron. Lett.*, vol. 20, no. 21, pp. 869-870, Oct. 1984.
- [70] T. Fujita, J. Ohya, K. Matsuda, M. Ishino, H. Sato, and H. Serizawa, "Narrow spectral linewidth characteristics of monolithic integrated-passive-cavity InGaAs/InP semiconductor lasers," *Electron. Lett.*, vol. 21, no. 9, pp. 374-376, Apr. 1985.
- [71] Y. Arakawa and A. Yariv, "Quantum well lasers — gain, spectra, dynamics," *J. Quantum Electron.*, vol. QE-22, no. 9, pp. 1887-1899, Sept. 1986, Invited.

- [72] Y. Arakawa and A. Yariv, "Theory of gain, modulation response, and spectral linewidth in AlGaAs quantum well lasers," *J. Quantum Electron.*, vol. QE-21, no. 10, pp. 1666-1674, Oct. 1985.
- [73] K. Y. Liou and E. C. Burrows, "Linewidth and longitudinal-mode stability of wavelength-detuned distributed-feedback lasers," in *Proc. CLEO '87*, paper THD2, p. 218, U.S.A., 1987.
- [74] S. Saito, O. Nilsson, and Y. Yamamoto, "Frequency modulation noise and linewidth reduction in a semiconductor laser by means of negative frequency feedback technique," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 46, no. 1, pp. 3-5, Jan. 1985.
- [75] 大津, 申, 楠澤, 興柁, 鈴木, "半導体レーザの周波数・位相制御," *電子情報通信学会論文誌*, vol. J73-C-1, no. 5, pp. 277-285, 1990年5月, 招待論文.
- [76] 岡井, "狭スペクトル線幅DFBレーザ," *応用物理学会, 第7回光波センシング技術研究会*, paper LST7-20, pp. 135-140, 東京, 1991年5月.
- [77] "コヒーレント光通信用狭スペクトル半導体レーザを開発," *電子情報通信学会誌*, vol. 74, no. 7, p. 782, 1991年7月.
- [78] 鈴木, 菊地, 有川, 福田, 稲田, "光ファイバジャイロ用光学部品," *応用物理学会, 第4回光ファイバセンサワークショップ*, paper WOFs4-6, pp. 37-44, 1987年1月.
- [79] 野田, 横浜, 岡本, "光ファイバジャイロ用光素子," *応用物理学会, 第4回光ファイバセンサワークショップ*, paper WOFs4-17, pp. 121-126, 1987年1月.
- [80] E. Sasaoka, H. Sugauma, and S. Tanaka, "Polarization-maintaining fibers for fiber optical gyroscopes," in *Proc. OFS '88*, paper WBB3, pp. 18-24, New Orleans, U.S.A., Jan. 1988.
- [81] J. Noda and I. Yokohama, "Fiber devices for fiber sensors," in *Proc. OFS '88*, paper FEB1, pp. 468-471, New Orleans, U.S.A., Jan. 1988, Invited.
- [82] K. Himeno, Y. Kikuchi, N. Kawakami, O. Fukuda, and K. Inada, "A

- high-extinction-ratio and low-loss single-mode single-polarization optical fiber," in Proc. OFS '88, paper FEE2, pp. 472-475, New Orleans, U.S.A., Jan. 1988.
- [83] T. Arikawa, F. Suzuki, Y. Kikuchi, O. Fukuda, and K. Inada, "Ultra-low-crosstalk polarization maintaining optical fiber coupler," in Proc. OFS '88, paper FEE4, pp. 480-483, New Orleans, U.S.A., Jan. 1988.
- [84] 鈴木, 川上, 菊地, 塩田, 福田, "コヒーレント通信用光ファイバ形部品," 電子情報通信学会, 光・量子エレクトロニクス研究会, paper OQE88-22, pp. 71-78, 仙台, 1988年5月.
- [85] 岡本, "光ファイバの新動向," 光情報材料, 第2章, 神谷編, 丸善, pp. 5-47, 1988年12月.
- [86] Y. Kikuchi, K. Himeno, N. Kawakami, and R. Yamauchi, "Splicing characteristics of polarization maintaining optical fibers," in Proc. IOOC '89, paper 19B3-12, pp. 68-69, Kobe, Japan, July 1989.
- [87] R. P. Dahlgren and O. M. Laznicka, "Ultra-high finesse polarization-maintaining fiber resonator," in Proc. SPIE OE/FIBERS '89, paper 1169-44, pp. 382-387, Boston, U.S.A., Sept. 1989.
- [88] T. Watanabe, K. Osaka, E. Sasaoka, S. Tanaka, and Y. Asano, "Splicing of polarization-maintaining fibers," in Proc. OFS '89, paper Tu-7-8, pp. 346-352, Paris, France, Sept. 1989.
- [89] W. Bernard, R. Englert, R. Fangmeier, E. Froning, K. Langner, and Kh. Schwarz, "Waveguide ring resonators in glass for optical gyros," in Proc. Symposium Gyro Technology, paper 7, pp. 7.0-7.15, Stuttgart, F.R.G., Sept. 1986.
- [90] K. Iwatsuki, M. Saruwatari, M. Kawachi, and H. Yamazaki, "Waveguide-type optical passive ring-resonator gyro using time-division detection scheme," Electron. Lett., vol. 25, no. 11, pp. 688-689, May 1989.
- [91] J. Haavisto and G. A. Pajer, "Resonance effects in low-loss ring

- waveguides," *Opt. Lett.*, vol. 5, no. 12, pp. 510-512, Dec. 1980.
- [92] A. Mahapatra and W. C. Robinson, "Integrated-optic ring resonators made by proton exchange in lithium niobate," *Appl. Opt.*, vol. 24, no. 15, pp. 2285-2286, Aug. 1985.
- [93] J. M. Connors and A. Mahapatra, "High finesse ring resonators made by silver ion exchange in glass," *J. Lightwave Technol.*, vol. LT-5, no. 12, pp. 1686-1689, Dec. 1987.
- [94] T. Miyashita and M. Nakahara, "Silica waveguide integrated circuit technology," in *Proc. IOOC '89*, paper 18D1-1, pp. 52-53, Kobe, Japan, July 1989, Invited.
- [95] M. Kawachi, N. Takato, K. Jinguji, and A. Sugita, "Laser trimming adjustment of waveguide birefringence in silica integrated-optic ring resonators," in *Proc. CLEO '89*, paper TUJ17, pp. 84-85, U.S.A., 1989.
- [96] Y. Ohmori, T. Kominato, H. Okazaki, and M. Yasu, "Low loss GeO₂ doped silica waveguides for large scale integrated optical devices," in *Proc. OFC '90*, paper WE2, p. 61, San Francisco, U.S.A., 1990.
- [97] T. Kominato, Y. Ohmori, and N. Takato, "High finesse GeO₂-doped high silica ring resonator," in *Proc. OEC '90*, paper 12C2-2, pp. 142-143, Chiba, Japan, July 1990.
- [98] J. Bismuth, P. Gidon, F. Revol, and S. Valette, "Low losses ring resonators fabricated from silicon based integrated optics technologies," in *Proc. OFS '90*, paper WE01.2, pp. 105-108, Sydney, Australia, Dec. 1990.
- [99] R. Adar, Y. Shani, G. H. Henry, R. C. Kistler, G. E. Blonder, and N. A. Olsson, "Very low loss phosphorus-doped silica-on-silicon waveguides measured using a ring resonator," in *Proc. OFC '91*, paper TuF5, p. 22, San Diego, U.S.A., Feb. 1991.
- [100] 大森, 小湊, "石英系プレーナ光波回路 — リング共振器 —," 応用物理学会, 第7回光波センシング技術研究会, paper LST7-16, pp. 111-116,

東京, 1991年5月.

- [101] S. Valette, J. P. Jadot, P. Gidon, S. Renard, G. Grand, and E. Parrens, "Integrated optics on silicon: A technology for hybrid optoelectronics circuits in the fields of optical sensors, communications and memories," in Proc. MOC '91, paper M1, pp. 260-263, Yokohama, Japan, Oct. 1991, Invited.
- [102] F. Zarinetchi, S. P. Smith, and S. Ezekiel, "New developments in fiber optic gyroscopes," in Proc. SPIE OE/FIBERS '89, paper 1169-36, pp. 300-303, Boston, U.S.A., Sept. 1989, Invited.
- [103] F. Zarinetchi, S. P. Smith, and S. Ezekiel, "Fiber laser gyroscope," in Proc. OFS '90, paper TU01.5, pp. 31-34, Sydney, Australia, Dec. 1990.
- [104] F. Zarinetchi, S. P. Smith, and S. Ezekiel, "Stimulated Brillouin fiber-optic laser gyroscope," Opt. Lett., vol. 16, no. 4, pp. 229-231, Feb. 1991.
- [105] S. Ezekiel, S. P. Smith, and F. Zarinetchi, "Fiber laser gyros," Fiber Optic Gyros: 15th Anniv. Conf., paper 1585-38, Boston, U.S.A., Sept. 1991, Invited.
- [106] 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., vol. 25, no. 7, pp. 1086-1092, Apr. 1986.
- [107] K. Hotate and K. Tabe, "Drift of an optical fiber gyroscope caused by the Faraday effect: Experiment," J. Lightwave Technol., vol. LT-5, no. 7, pp. 997-1001, July 1987.

第3章 偏波変動誘起雑音とその定式化

3-1. はじめに

受動型リング共振方式光ジャイロにおいて、リング共振器中の偏波変動による影響は主要な雑音要因の1つである[1]。センシング部分であるリング共振器は、圧電変換素子 (Piezoelectric Transducer: PZT) に巻いた偏波維持光ファイバで構成する。リング共振器を作成する際に、融着、あるいはカプラ部分での偏波軸ずれが生ずることは不可避な問題となる。

本章では、偏波軸ずれにより生ずる出力誤差を定式化し評価する。モデルとしては、偏波維持光ファイバで構成された共振器中に偏波軸ずれが1ヶ所あり、それにより生ずるねじれも考慮したものを用いる。また第4章での評価のために、単一偏波光ファイバで構成したリング共振器、 90° 偏波軸を回転接続したリング共振器についても定式化を行う。

評価の結果、ファイバ偏光軸間の共振器1周の位相差が 2π の整数倍付近では、非常に大きな出力誤差が生じることがわかった。

3-2. 解析に用いたモデル

3-2-1. 入出射端に光ファイバ偏光子を設置した共振器のモデル[2]-[6]

解析に用いたリング共振器のモデルを図3・1に示す。比較的簡単な共振器構成法は、カプラのリードファイバ部分を融着によって接続する手法である。共振器は偏波維持光ファイバで構成されており、共振器中に融着による偏波軸ずれが1ヶ所存在する。その偏波軸ずれによって、ファイバに均等なねじれが生じていると考える。そして入出射端にはそれぞれ光ファイバ偏光子が存在している。偏光子としては、コイル形ファイバ偏光子[7]、複屈折性結晶装着研磨形ファイバ偏光子[8],[9]、金属装着研磨形ファイバ偏光子[10]などを考える。カプラは理想的に偏光依存性がないと仮定した。

共振器中を伝搬する電界を両回り光について示した。右回り光、左回り光の電界を、それぞれ、 E_{icw} 、 E_{iccw} ($i=0-4, d$) と表すことにする。解析のための座標

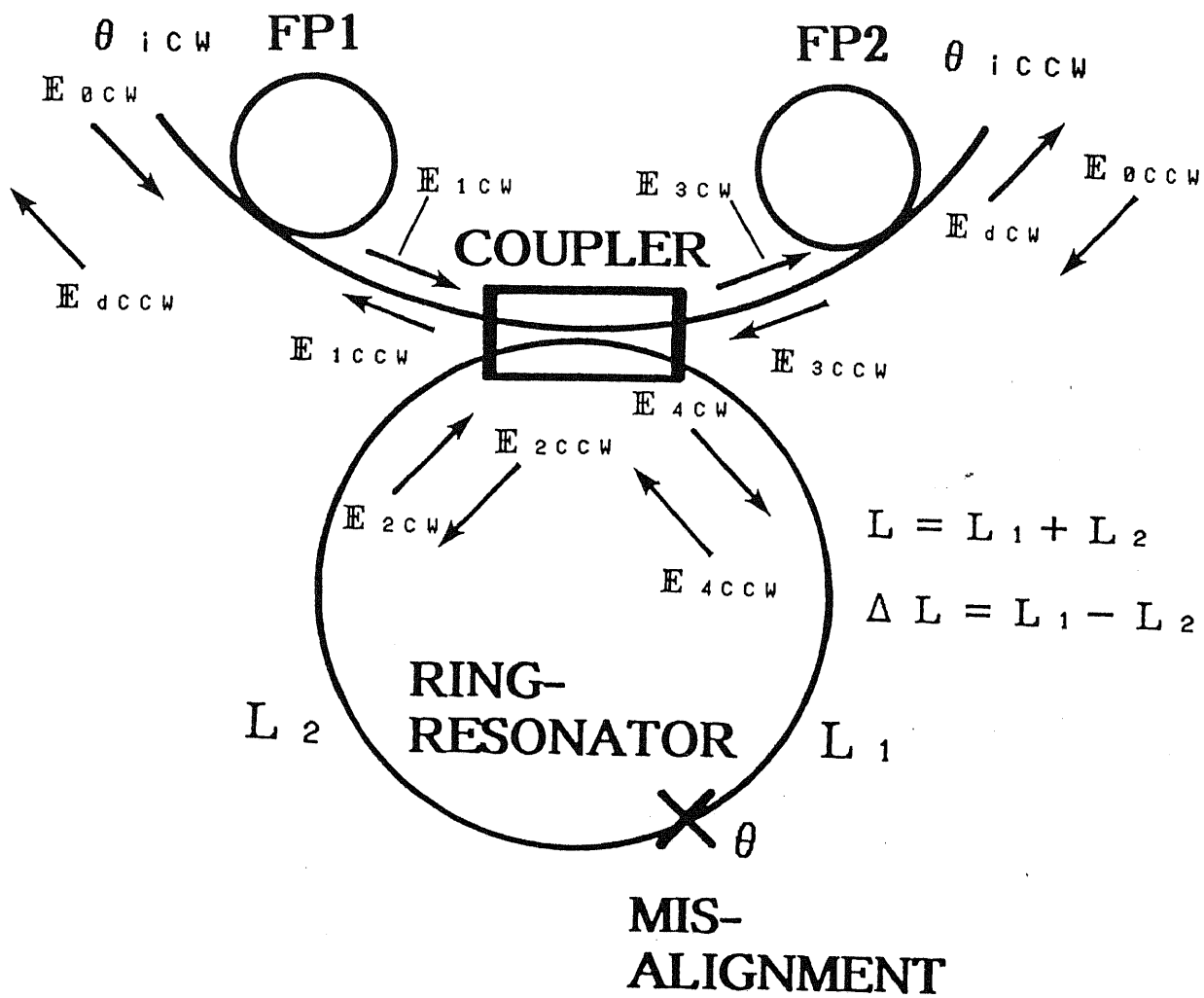


図 3・1 入出射端に光ファイバ偏光子を設置したリング共振器

系としては、右回り光に関しては右手系を、左回り光に関しては左手系を用いた。共振器への入射光は直線偏光であると仮定し、ファイバの偏波軸に対する軸ずれ角度は、右回り光と左回り光に対してそれぞれ、 θ_{icw} 、 θ_{iccw} と表した。

3-2-2. 単一偏波光ファイバで構成した共振器のモデル[11]-[14]

解析に用いたリング共振器のモデルを図3・2に示す。共振器は単一偏波光ファイバあるいは光ファイバ偏光子で構成されており、共振器中に融着による偏波軸ずれが1ヶ所存在する。その偏波軸ずれによって生ずる、ファイバのねじれは簡単のために無視した。また、y偏波の損失がx偏波の損失より大きいと仮定した。x、y軸間の偏光クロストークは無視した。

図中の E_i ($i=1-4$)は、共振器を伝搬する電界を示している。右回り光のみを扱い解析のための座標系としては、右手系を用いた。

3-2-3. 偏波軸を90°回転接続した共振器のモデル[15]-[19]

解析に用いた受動型リング共振方式光ジャイロのリング共振器のモデルを図3・3に示す。共振器は偏波維持光ファイバで構成されている。ここでは、共振器中の融着接続部分で偏波軸が90°回転しているモデルを考える。回転により、ファイバに均等なねじれが生じていると考える。

図中の E_i ($i=0-4, d$)は、共振器を伝搬する電界を示している。右回り光のみを扱い解析のための座標系としては、右手系を用いた。

3-3. 共振特性の導出

リング共振器において共振する偏波は、共振器を1周しても偏波状態が変化しないもので、それを固有偏波状態と呼ぶ[1]。固有偏波状態は、共振器の伝達行列(2×2)の固有値に対応して2つ存在する。固有値の偏角を共振器長 L で割ったものが固有偏波状態の伝搬定数に対応し、固有ベクトルは、その偏波状態に対応する[1]。

ここでは3-2節で説明した3つのリング共振器の共振特性を導出する。

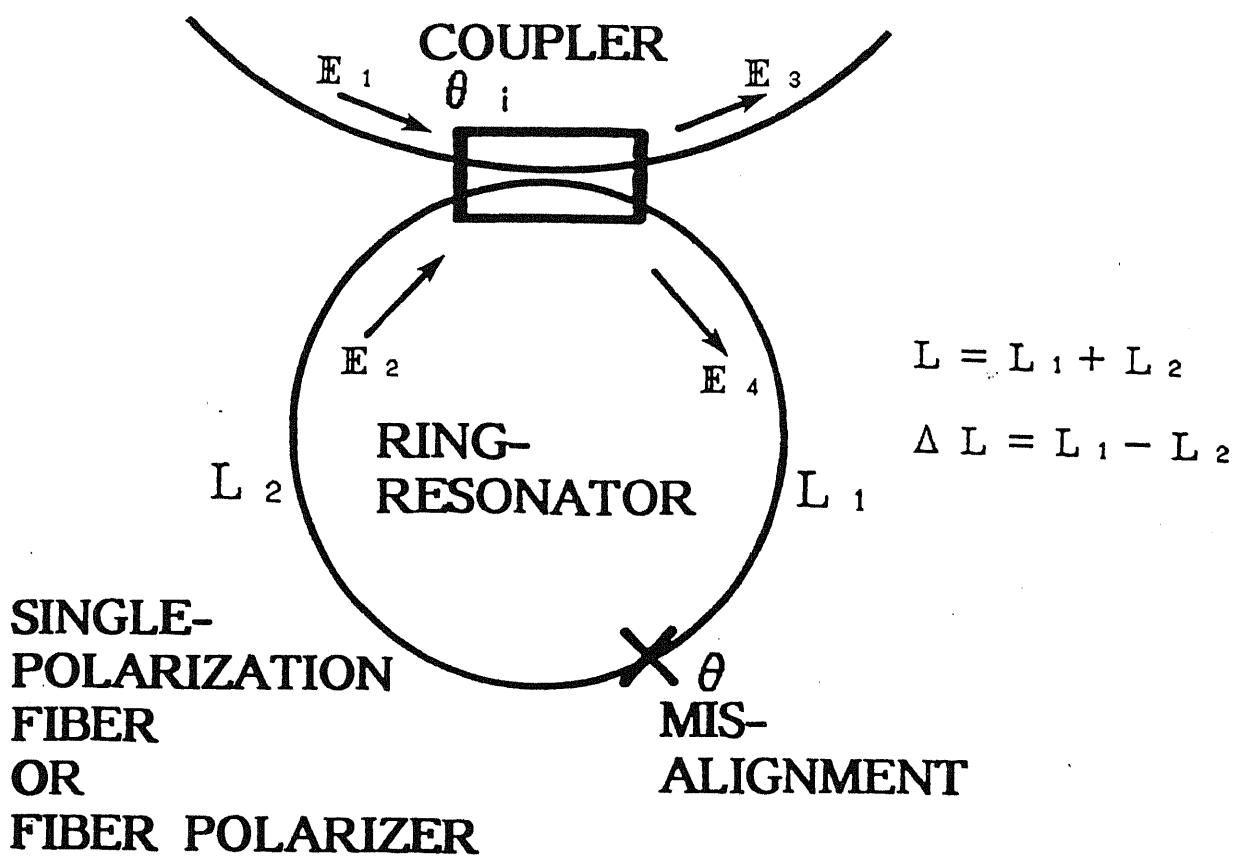


図 3 ・ 2 単一偏波光ファイバで構成したリング共振器

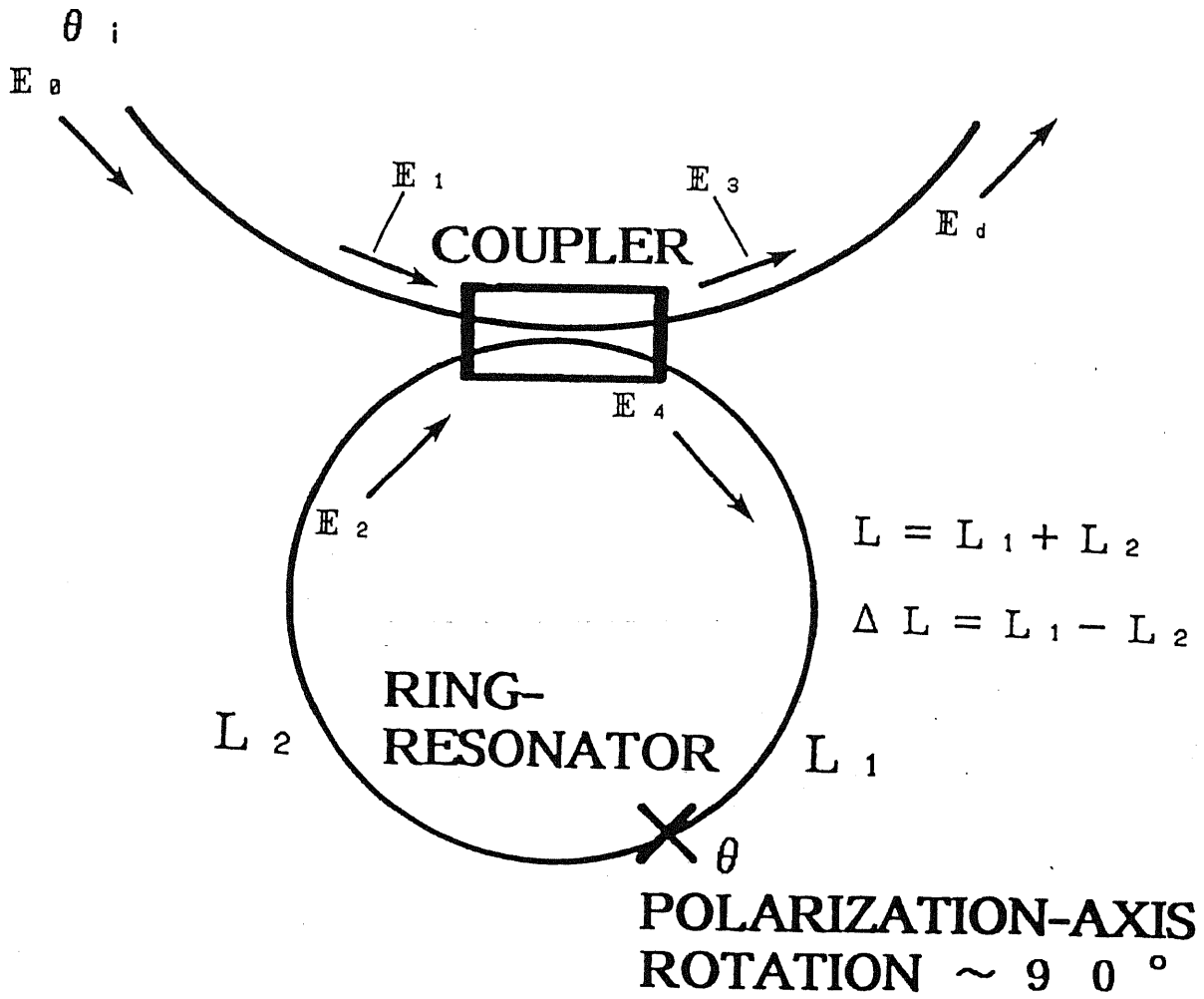


図 3・3 90° 偏波軸を回転したリング共振器

3-3-1. 入射端に光ファイバ偏光子を設置した共振器の共振特性[2]-[6]

ここではまず、右回り光の共振特性の導出手順について簡単に説明する。最初に、共振器1周の伝達行列を、ねじれを考慮した偏波維持光ファイバの伝達行列[20]と軸ずれ部分の伝達行列の積として求める。次に、共振器1周の伝達行列の固有値、固有ベクトルを計算する。カプラへの入射光の電界 E_{icw} は、偏光子FP1の伝達行列とファイバへの入射光電界 E_{ocw} との積で表される。共振器の伝達行列はユニタリ性を示し、2つの固有偏波状態は正規直交基底であるので、 E_{icw} は固有偏波状態の線形結合で表現される。共振器の出射電界 E_{ocw} を求めた後、出射側の偏光子FP2とこの E_{ocw} との積により、ファイバからの出射電界 E_{dcw} が計算される。

右回り光の共振特性は、以下のように表される。

$$|E_{dcw}/E_{ocw}|^2 = K_1 |U_1|^2 + K_2 |U_2|^2 + K_3. \quad (3 \cdot 1)$$

ただし、

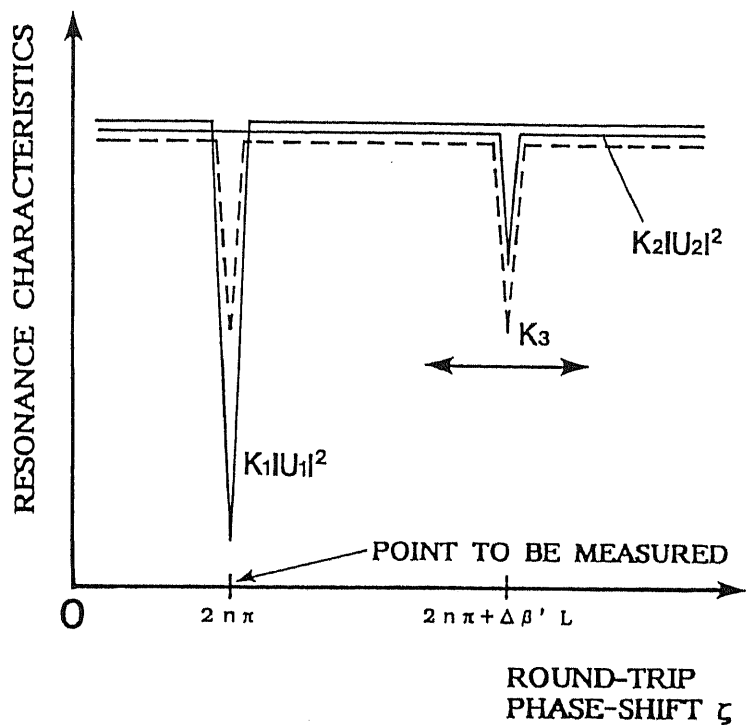
$$|U_j|^2 = K_4 \left\{ 1 - \frac{K_5}{(1 - K_6^{1/2})^2 + 4K_6^{1/2} \sin^2(\beta_j L/2)} \right\}, \quad (3 \cdot 2)$$

$K_i (i=1-6)$: 偏波軸ずれの位置・角度、偏波維持光ファイバ・カプラ・光ファイバ偏光子の特性、によって決まる定数、 $\beta_j (j=1, 2)$: 固有偏波状態の伝搬定数、である。なお計算過程の詳細は、付録3Aに示した。

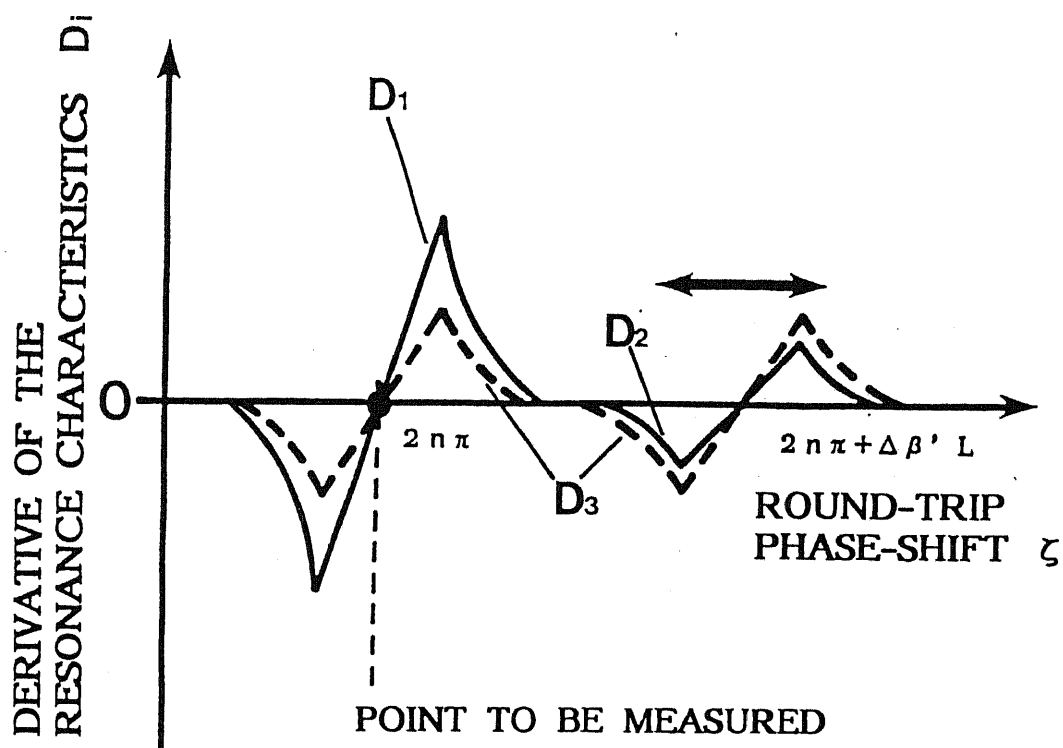
式(3・1)の第1、2項がそれぞれ、固有偏波状態の共振特性を表している。また第3項は、出射側の光ファイバ偏光子の伝達行列がユニタリ性を示さないことによって生ずる項で、第1項と第2項の積の共振特性に似た特性を示す。この様子を図3・4に示す。

左回り光の共振特性は、右回り光の共振特性の導出と同様に、以下のように表される。なお、計算の詳細は付録3Bに示した。

$$|E_{dccw}/E_{occw}|^2 = K_7 |U_1|^2 + K_8 |U_2|^2 + K_9. \quad (3 \cdot 3)$$



(a) 共振特性



(b) 共振特性の同期検波出力

図 3・4 不要共振ピークの接近によるバイアスの生起 (光ファイバ偏光子、単一偏波光ファイバを用いた場合) n : 整数

ただし、 $K_i (i=7-9)$ ：右回り光の共振特性の K_i と同様に決まる定数、である。また第1-3項は、式(3・1)と同様な項である。

式(3・1)と(3・3)との比較により、両回り光の共振は、同じ位相回転(つまり、同じ光波周波数)で起こることがわかる。

3-3-2. 単一偏波光ファイバで構成した共振器の共振特性[11]-[14]

ここでは3-3-1節と同様に、単一偏波光ファイバあるいは光ファイバ偏光子で構成された共振器1周の伝達行列の固有値、固有ベクトルを求め、2つの固有偏波状態による共振特性を求める。なお、計算の詳細は、付録3Cに記した。右回り光の共振特性は、付録の式(3C・27)より以下のように表される。

$$|E_3/E_1|^2 = K_1 |U_1|^2 + K_2 |U_2|^2 + K_3. \quad (3 \cdot 4)$$

ただし、

$$|U_j|^2 = 1 - \frac{K_{4j}}{(1 - K_{5j}^2)^2 + 4K_{5j}^2 \sin^2(\beta_j L/2)}, \quad (3 \cdot 5)$$

$K_i (i=1-3)$ 、 $K_{ij} (i=4, 5, j=1, 2)$ ：偏波軸ずれの位置・角度、単一偏波光ファイバ・カップラの特性によって決まる定数、 $\beta_j (j=1, 2)$ ：固有偏波状態の伝搬定数である。

式(3・6)の第1、2項がそれぞれ、固有偏波状態の共振特性を表している。また、第3項は単一偏波光ファイバの伝達行列がユニタリ性を示さないことによって生じる項で、第1項と第2項の積の共振特性に似た特性を示す。この第3項は、式(3・1)、(3・3)の第3項(光ファイバ偏光子の伝達行列がユニタリ性を示さないために生じる項)と同様な項である。共振特性も同様に図3・4で表される。

3-3-3. 偏波軸を90°回転接続した共振器の共振特性[15]-[19]

3-3-1と同様に、共振器1周の伝達行列をまず求め、次にその固有値、固有ベクトルを導出する。そしてこれらを用い、2つの固有偏波状態による共振特

性を求める。

右回り光の共振特性は、付録3Aの検討より、以下のように表される。

$$|E_d/E_0|^2 = K_1 |U_1|^2 + K_2 |U_2|^2, \quad (3 \cdot 6)$$

ただし、

$$|U_j|^2 = 1 - \frac{K_3}{(1 - K_4^{1/2})^2 + 4K_4^{1/2} \sin^2(\beta_j L/2)}, \quad (3 \cdot 7)$$

K_i ($i=1-4$): 偏波軸ずれの位置・角度、偏波維持光ファイバ・カプラの特性、によって決まる定数、 β_j ($j=1, 2$): 固有偏波状態の伝搬定数、である。

式(3・6)の第1、2項がそれぞれ、固有偏波状態の共振特性を表している。ユニタリ性を示さない伝達行列は存在しないために、式(3・1)、(3・3)、(3・4)のような第1、2項の積の共振特性は現れない。共振特性を図3・5に示す。

3-4. 出力誤差の定式化[2]-[19]

2つの固有偏波状態に対応した2つの共振ピークは異なる位相回転(光波周波数)で生じる。回転検出に用いる一方の共振ピークに他方の共振ピークが、温度変動等により近づくときに、動作点の理想値からのずれが生ずる。式(3・1)、(3・3)、あるいは(3・4)の第3項は2つの固有偏波状態と同じ周波数で共振ピークを持つ。そのため、この第3項も雑音要因として働く。

共振点検出のためには、周波数あるいは位相変調法を用いて光波を変調し、ロックインアンプ(Lock-In Amplifier: LIA)で同期検波をする。その際のLIA出力は、共振ピークを共振器1周の位相回転 ζ で微分した式で近似できる。

複数の共振ピークが存在するときのOPRGの動作点 ζ は、以下の式を満たす。

$$D_1(\zeta) + D_2(\zeta - \Delta\beta' L) + D_3(\zeta, \zeta - \Delta\beta' L) = 0. \quad (3 \cdot 8)$$

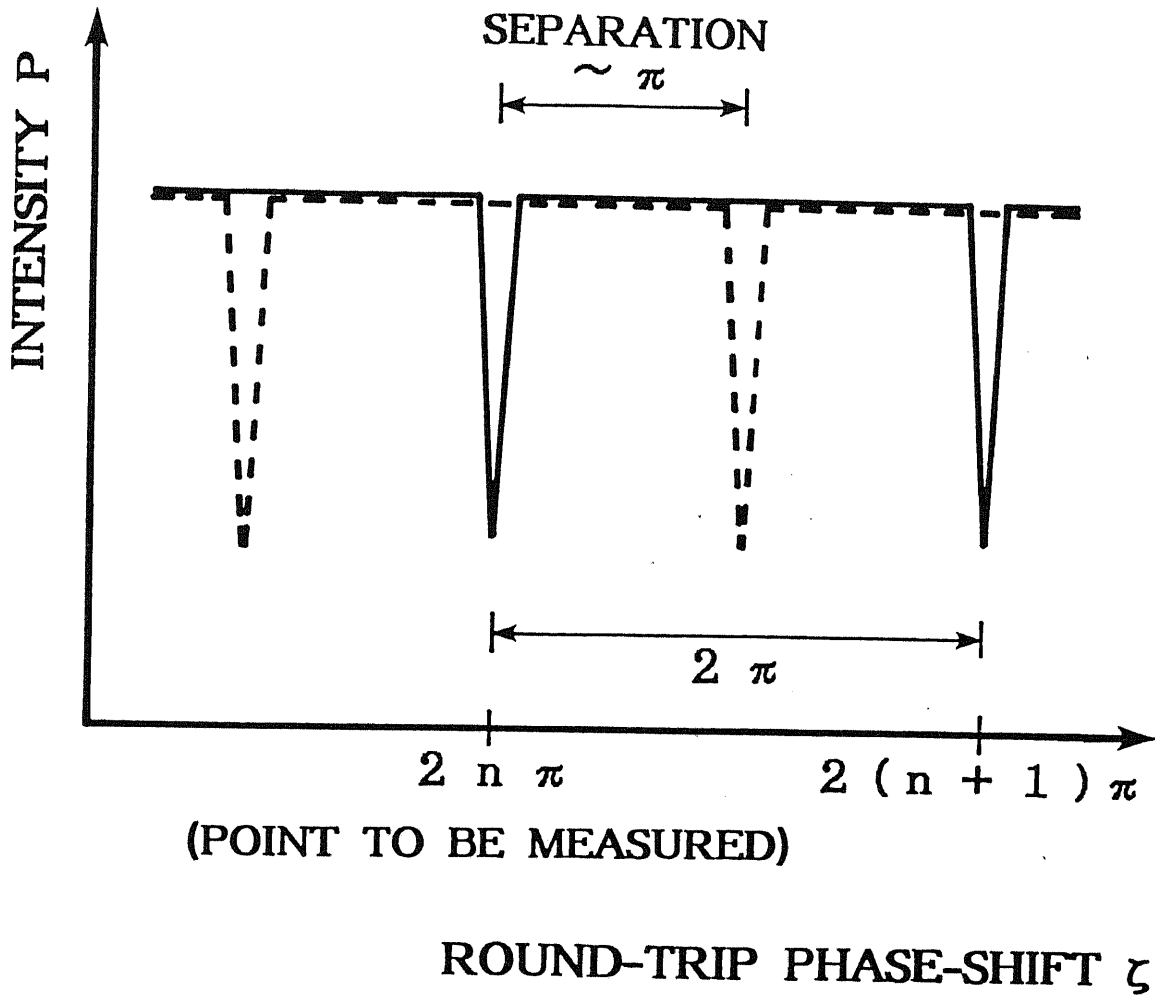


図 3 - 5 90° 偏波軸を回転接続したリング共振器の共振特性 n : 整数

ただし、 $D_i (i=1-3)$ ：式(3・1)、(3・3)、(3・4)、あるいは(3・6)の第*i*項の δ による微分、 $\Delta \beta'$ ：2つの固有偏波状態の伝搬定数差、である。ただし式(3・6)の場合は、第3項は存在しない。

式(3・8)では、図3・4、3・5に示す様に、本来 D_1 のみが回転検出に用いられるべきである。 D_2 と D_3 (図3・4のみ)の存在が、やはり図3・4、3・5に示す様に、動作点の理想値からのずれを引き起こす。

各動作点の理想値からのずれは、回転角速度の次元で表して、

$$\Delta \Omega = \frac{C_0 \lambda}{4 \pi L r} (\delta - 2n\pi), \quad (3 \cdot 9)$$

となる。ただし、 C_0 ：光速、 λ ：光源の波長、 L ：共振器の長さ、 r ：共振器の半径、 n ：整数、である。

右回り光の共振特性の動作点 ζ_{cw} 、左回り光の共振特性の動作点 ζ_{ccw} を、式(3・8)を用いて求める。 $\Delta \Omega_{cw}$ が右回り光の出力誤差を表し、 $\Delta \Omega_{cw} - \Delta \Omega_{ccw}$ が左右両回り光間の差動出力、つまりジャイロの出力バイアスを与える。

3-5. 出力誤差の評価結果[2]-[6]

3-4節の結果を基に、偏波維持光ファイバで構成したリング共振器における右回り光の動作点からのずれを評価する。この評価において光源の線幅は0であると仮定するが、このことは計算の精度を劣化させないことを確認した。

図3・6は、光ファイバ偏光子がある場合とない場合について、右回り光の動作点からのずれと偏波維持光ファイバの共振器1周の縦横偏波間の位相差($\Delta \beta L$ 、 $\Delta \beta$ ：ファイバの複屈折)との関係を示している。 $\Delta \beta L$ は共振器の温度変動に対応している。なお固有偏波状態は、パラメータの1つである $\Delta \beta \Delta L$ の値により大きく変化する。そのため、 $\Delta \beta \Delta L$ は出力バイアスが最悪になる値に選んだ。しかしこの場合でも、カップラリード部分での偏波軸間の位相差ゆらぎは考慮していないために、最悪値を正確に計算していることにはならない。しかし、典型的な出力誤差を評価していることにはなる。

図3・6より、以下のようなことがわかる。

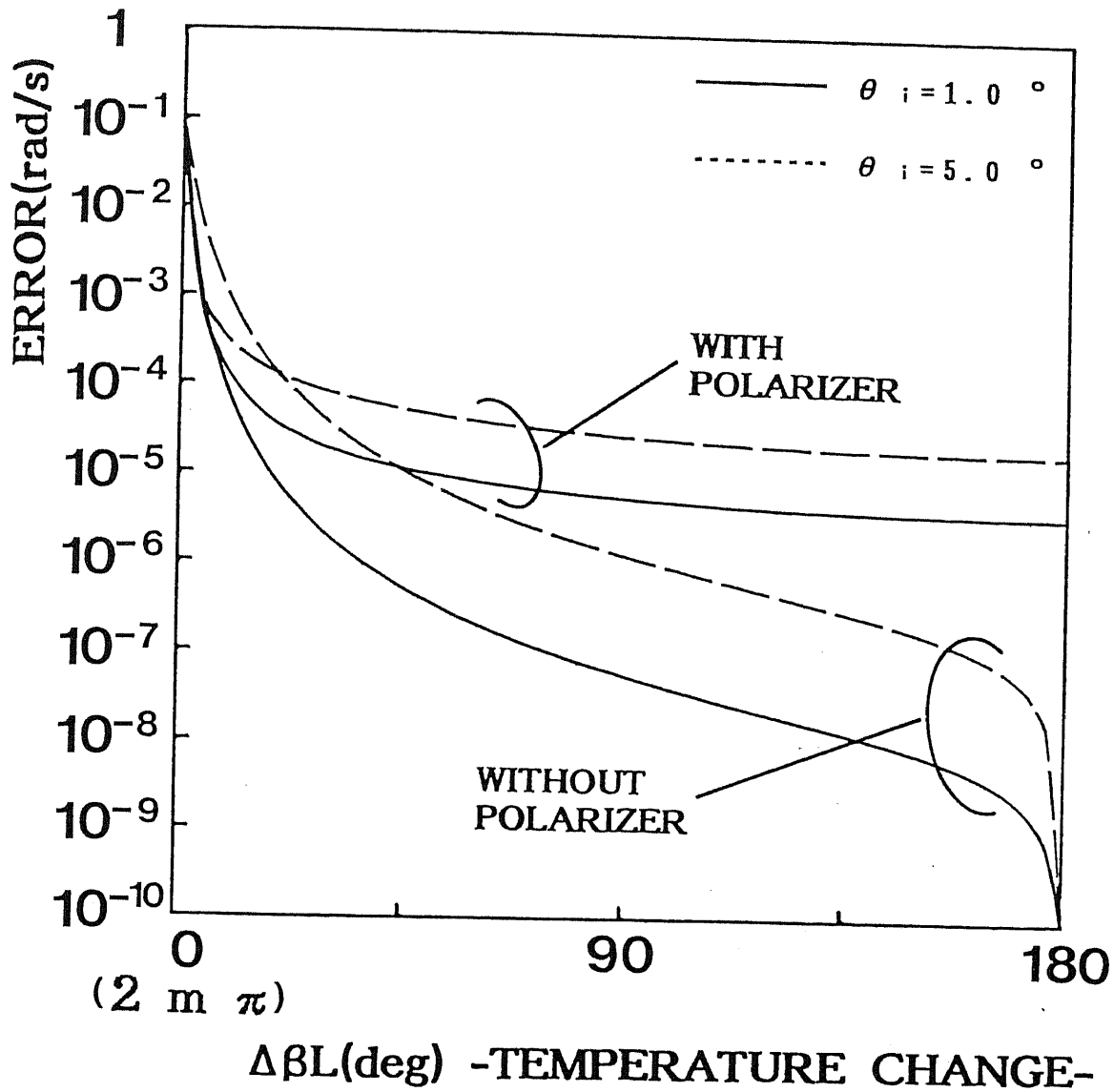


図 3・6 (a) 右回り光の動作点からのずれと温度変動との関係 θ_i : 入射光偏光とファイバ偏波軸との軸ずれ, m : 整数, 融着部分の軸ずれ: $\theta = 0.1^\circ$, ファイバの複屈折: $\Delta\beta = 5,000 \text{ rad/m}$, ファイバ長: $L = 15 \text{ m}$, 偏光子の消光比: $\varepsilon^2 = 20 \text{ dB}$, 共振器のフィネス: $F = 50$, 波長: $\lambda = 1.3 \mu \text{ m}$, 共振器半径: $r = 0.05 \text{ m}$

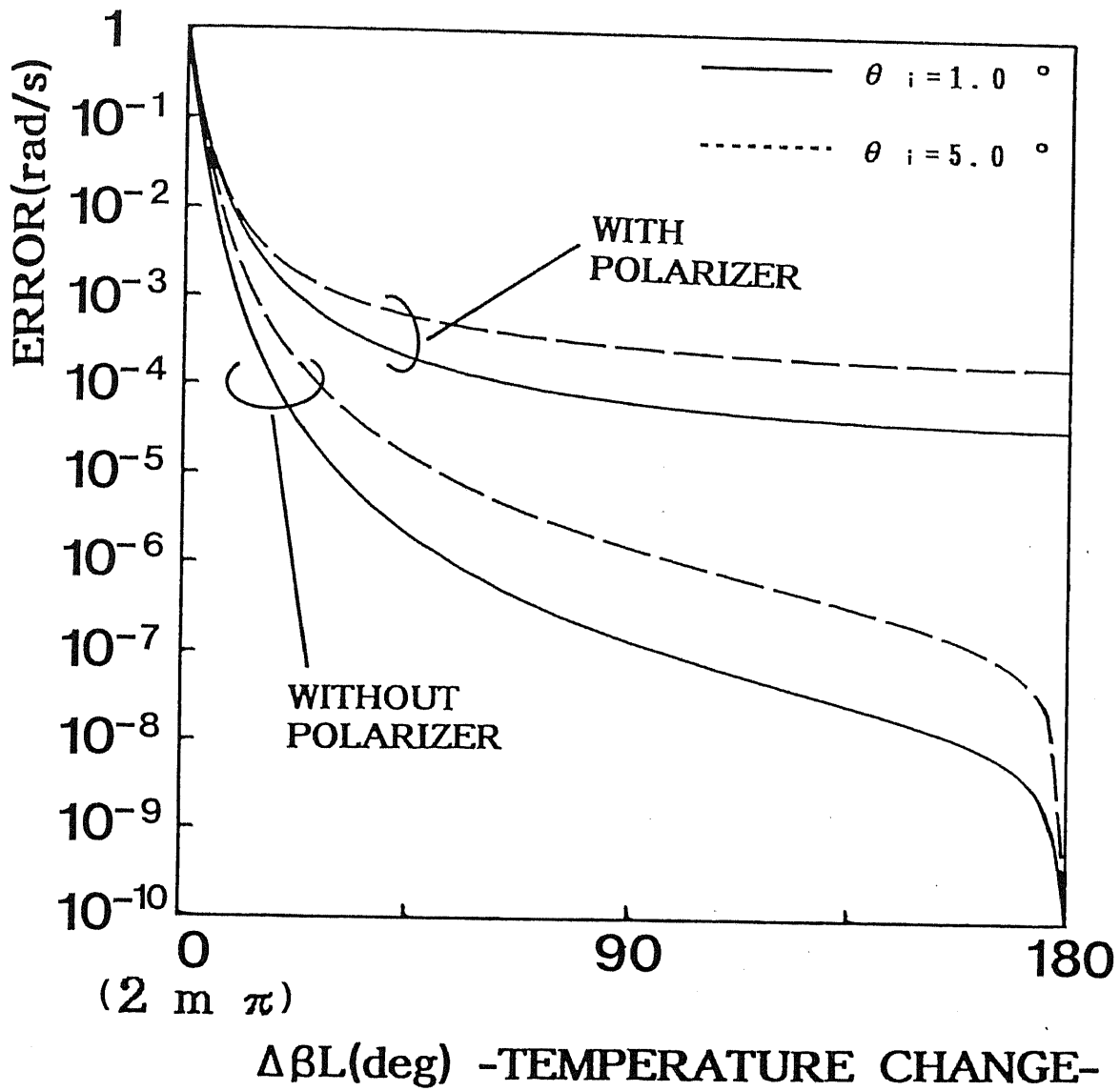


図 3 - 6 (b) 右回り光の動作点からのずれと温度変動との関係 m : 整数,
 $\theta = 1.0^\circ$, $\Delta\beta = 5.000\text{rad/m}$, $L = 15\text{m}$, $\varepsilon^2 = 20\text{dB}$, $F = 50$, $\lambda = 1.3\mu\text{m}$, $r = 0.05\text{m}$

(1) $\Delta\beta L \sim 2m\pi$ (m : 整数) の時、出力誤差が非常に大きくなっている。これはこの時には、固有偏波状態が円偏波、 45° 傾いた直線偏波、あるいは 45° 傾いた楕円偏波に近づき、2つの固有偏波状態間の励振比率がほぼ同等に励振されるためである。さらにこの場合、回転検出に用いる主共振ピークに不要共振ピークがほとんど重なった状態になるためである。この現象は、我々のグループにおける以前の研究でも指摘されている[21]。また、カップラ部分での偏波結合の影響を解析した論文でも、同様な現象が観測されている[22]-[26]。

(2) 固有偏波状態がファイバの偏波軸とほとんど等しい場合、ファイバ偏光子は、式(3・1)、(3・3)の第2項の励振を抑圧するのに有効である[1]。しかし共振器中での偏波軸ずれ θ が大きくなると、 $\Delta\beta L$ の値にかかわらず、固有偏波状態がファイバの偏波軸からずれるため、偏光子は第2項の励振を抑圧できなくなる。さらに3-3節で説明したように、共振器の出射端に設置された偏光子は第3項を生み出す。

そのため軸ずれ θ が小さい場合には、 $\Delta\beta L$ が $2m\pi$ の場合を除いて固有偏波状態がファイバの偏波軸に近づき、ファイバ偏光子はある程度まで出力誤差を減少させることができる(図3・6(a))。しかし θ が大きな場合には、ファイバ偏光子はかえって出力誤差を増加させてしまう作用がある(図3・6(b))。

3-6. まとめ

共振器中の偏波軸ずれにより生ずる受動型リング共振方式光ジャイロの出力誤差を定式化し評価した。モデルとしては、偏波維持光ファイバで構成された共振器中に偏波軸ずれが1ヶ所あり、それにより生ずるねじれも考慮したものを用いた。

評価の結果、ファイバ偏光軸間の共振器1周の位相差が 2π の整数倍付近では、非常に大きな出力誤差が生じることがわかった。

また、第4章での評価のために、単一偏波光ファイバで構成したリング共振器、偏波軸を 90° 回転接続したリング共振器についても定式化を行った。

付録 3 A —— 式 (3・1)、(3・2) の導出 ——

融着接続部分での軸ずれに対応する伝達行列 $R(\theta)$ は、以下のように表現される。

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}. \quad (3A \cdot 1)$$

ただし、 θ : 融着部分での偏波軸ずれの角度である。

共振器中では、軸ずれ角度 θ によって単位長さ当たり ϕ の一様なねじれが生じていると考える。この場合偏波維持光ファイバの伝達行列 $A(\phi)$ は、以下のように表される[20]。

$$A(\phi) = \exp(-j\beta_{av}z)C(\phi). \quad (3A \cdot 2)$$

ただし、

$$C(\phi) = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix}. \quad (3A \cdot 3)$$

$$C_{11} = C_{22} = \cos(\eta z) - j\{\Delta\beta / (2\eta)\} \sin(\eta z), \quad (3A \cdot 4)$$

$$C_{12} = -C_{21} = (\phi / \eta) \sin(\eta z), \quad (3A \cdot 5)$$

$$\eta = \{(\Delta\beta / 2)^2 + \phi^2\}^{1/2}, \quad (3A \cdot 6)$$

$$\beta_{av} = (\beta_x + \beta_y) / 2, \quad (3A \cdot 7)$$

$$\Delta\beta = \beta_x - \beta_y, \quad (3A \cdot 8)$$

$$\phi = \theta / L.$$

(3 A · 9)

上記の式において、*は複素共役を表している。また β_i ($i=x, y$)は、ファイバの偏光モードの伝搬定数である。解析のための座標は、ファイバの速軸、遅軸に一致し、ファイバのねじれと共に回転すると仮定している。

式(3 A · 1)、(3 A · 2)より、右回り光の共振器1周の伝達行列 T_{CW} は以下のように表される。

$$T_{CW} = \{(1-\kappa)(1-\gamma_{\theta})\}^{1/2} \cdot A(\phi) \Big|_{z=L_2} \cdot R(\theta) \cdot A(\phi) \Big|_{z=L_1}$$

$$= \{(1-\kappa)(1-\gamma_{\theta})\}^{1/2} \exp(-j\beta_{av}L) \begin{bmatrix} t_{11CW} & t_{12CW} \\ t_{21CW} & t_{22CW} \end{bmatrix}. \quad (3 A \cdot 10)$$

ただし、

$$t_{11CW} = t_{22CW}^* = (1/2) \cos \theta \{ \cos(\eta L) + \cos(\eta \Delta L) \} + \{ \theta / (\eta L) \} \sin \theta \sin(\eta L)$$

$$- (1/2) \{ \theta / (\eta L) \}^2 \cos \theta \{ \cos(\eta \Delta L) - \cos(\eta L) \}$$

$$- (1/2) \{ \Delta \beta / (2\eta) \}^2 \cos \theta \{ \cos(\eta \Delta L) - \cos(\eta L) \}$$

$$- j \{ \Delta \beta / (2\eta) \} [\cos \theta \sin(\eta L) + \{ \theta / (\eta L) \} \sin \theta \{ \cos(\eta \Delta L) - \cos(\eta L) \}].$$

(3 A · 11)

$$t_{12CW} = -t_{21CW}^* = - (1/2) \sin \theta \{ \cos(\eta L) + \cos(\eta \Delta L) \} + \{ \theta / (\eta L) \} \cos \theta \sin(\eta L)$$

$$+ (1/2) \{ \theta / (\eta L) \}^2 \sin \theta \{ \cos(\eta \Delta L) - \cos(\eta L) \}$$

$$- (1/2) \{ \Delta \beta / (2\eta) \}^2 \sin \theta \{ \cos(\eta \Delta L) - \cos(\eta L) \}$$

$$- j \{ \Delta \beta / (2\eta) \} \sin \theta \sin(\eta \Delta L).$$

(3 A · 12)

であり、 κ : カプラの結合効率、 γ_{θ} : カプラの挿入損失である。ここで、カプラの偏光特性は理想的であると仮定した。

式(3 A · 10)より、 T_{CW} の固有ベクトル λ_{1CW} 、 λ_{2CW} と、それぞれに対応し

た固有ベクトル $(X_{1c\omega}, Y_{1c\omega})$ 、 $(X_{2c\omega}, Y_{2c\omega})$ とは、以下のように求められる。

$$\lambda_{1c\omega} = \{(1-\kappa)(1-\gamma\theta)(|t_{11c\omega}|^2 + |t_{12c\omega}|^2)\}^{1/2} \cdot \exp\{j(\xi - \beta_{av}L)\}, \quad (3A \cdot 13)$$

$$\lambda_{2c\omega} = \{(1-\kappa)(1-\gamma\theta)(|t_{11c\omega}|^2 + |t_{12c\omega}|^2)\}^{1/2} \cdot \exp\{-j(\xi + \beta_{av}L)\}, \quad (3A \cdot 14)$$

$$\begin{bmatrix} X_{1c\omega} \\ Y_{1c\omega} \end{bmatrix} = k \begin{bmatrix} 1 \\ Y_{1c\omega}' \end{bmatrix}, \quad (3A \cdot 15)$$

$$\begin{bmatrix} X_{2c\omega} \\ Y_{2c\omega} \end{bmatrix} = k \begin{bmatrix} X_{2c\omega}' \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (3A \cdot 16)$$

ただし、

$$\tan \xi = \frac{[\{\operatorname{Im}(t_{11c\omega})\}^2 + |t_{12c\omega}|^2]^{1/2}}{\operatorname{Re}(t_{11c\omega})}, \quad (3A \cdot 17)$$

$$k = \frac{1}{[1 + |t_{12c\omega}|^{-2} \{\operatorname{Im}(t_{11c\omega}) - [\{\operatorname{Im}(t_{11c\omega})\}^2 + |t_{12c\omega}|^2]^{1/2}\}^2]^{1/2}}, \quad (3A \cdot 18)$$

$$Y_{1c\omega}' = - \frac{j [\operatorname{Im}(t_{11c\omega}) - [\{\operatorname{Im}(t_{11c\omega})\}^2 + |t_{12c\omega}|^2]^{1/2}]}{t_{12c\omega}}, \quad (3A \cdot 19)$$

$$X_{2c\omega}' = - \frac{t_{12c\omega}}{j [\operatorname{Im}(t_{11c\omega}) + [\{\operatorname{Im}(t_{11c\omega})\}^2 + |t_{12c\omega}|^2]^{1/2}]}. \quad (3A \cdot 20)$$

光ファイバ偏光子の伝達行列 $P_i (i=1, 2)$ は、簡単のために偏光モード間のクロストークを無視すると、以下の様に表すことができる。

$$P_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \varepsilon_i \end{bmatrix} \quad (3A \cdot 21)$$

ただし、 $\varepsilon_i^2 (i=1, 2)$: i 番目の偏光子の消光比である。従って、

$$E_{1cw} = P_1 \cdot E_{0cw}, \quad (3A \cdot 22)$$

$$E_{2cw} = P_2 \cdot E_{0cw}, \quad (3A \cdot 23)$$

という関係が得られる。ベクトル E_{1cw} と E_{2cw} との間には以下の関係がある[1]。

$$E_{2cw} = \left\{ \frac{(1-\gamma_B)}{(1-\kappa)} \right\}^{1/2} \left\{ (1-\kappa) - \kappa \sum_{n=0}^{\infty} \Gamma_{cw}^{n+1} \right\} E_{1cw}. \quad (3A \cdot 24)$$

カプラに入射する光の電界ベクトル E_{1cw} は、式(3A・15)、(3A・16)で表される2つの固有偏波状態の線形結合で表される。これは、共振器の伝達行列がユニタリ性を示すので、2つの固有ベクトルが正規直交基底であるためである。式(3A・22) - (3A・24)を用いて、受光出力 $|E_{2cw}|^2$ は以下のよう表現される。

$$\begin{aligned} |E_{2cw}|^2 = & \left\{ \frac{(1-\gamma_B)}{(1-\kappa)} \right\} \left[|acw|^2 \{ |X_{1cw}|^2 + \varepsilon^2 |Y_{1cw}|^2 \} |U_1|^2 \right. \\ & + |bcw|^2 \{ |X_{2cw}|^2 + \varepsilon^2 |Y_{2cw}|^2 \} |U_2|^2 \\ & \left. + 2k^2(1-\varepsilon^2) \operatorname{Re}(acw^*bcwU_1^*U_2X_{2cw}') \right]. \end{aligned} \quad (3A \cdot 25)$$

ただし、

$$|U_1|^2 = (1 - \kappa) \left\{ 1 - \frac{C_1}{C_2 + C_3 \sin^2(\beta_1 L/2)} \right\}, \quad (3A \cdot 26)$$

$$|U_2|^2 = (1 - \kappa) \left\{ 1 - \frac{C_1}{C_2 + C_3 \sin^2(\beta_2 L/2)} \right\}, \quad (3A \cdot 27)$$

$$2k^2(1 - \varepsilon_2^2) \operatorname{Re}(acw^* bcw U_1^* U_2 \chi_{2cw}') = k^4 E_0^2 (1 - \varepsilon_2^2) \{ G_1 (F_{1cw} G_2 + F_{2cw} H_2) - H_1 (-F_{1cw} H_2 + F_{2cw} G_2) \}, \quad (3A \cdot 28)$$

$$acw = (1/2)^{1/2} E_0 k (1 + \varepsilon_1 Y_{1cw}^*), \quad (3A \cdot 29)$$

$$bcw = (1/2)^{1/2} E_0 k (\chi_{2cw}' + \varepsilon_1), \quad (3A \cdot 30)$$

$$C_1 = \kappa \{ 1 - (1 - \gamma_0) (|t_{11cw}|^2 + |t_{12cw}|^2) \}, \quad (3A \cdot 31)$$

$$C_2 = [1 - \{ (1 - \kappa) (1 - \gamma_0) (|t_{11cw}|^2 + |t_{12cw}|^2) \}^{1/2}]^2, \quad (3A \cdot 32)$$

$$C_3 = 4 \{ (1 - \kappa) (1 - \gamma_0) (|t_{11cw}|^2 + |t_{12cw}|^2) \}^{1/2}, \quad (3A \cdot 33)$$

$$\beta_1 = \arg(\lambda_{1cw})/L, \quad (3A \cdot 34)$$

$$\beta_2 = \arg(\lambda_{2cw})/L, \quad (3A \cdot 35)$$

$$F_{1cw} = (1 - \varepsilon_1^2) | \chi_{2cw}' |^2 + \varepsilon_1 (1 - | \chi_{2cw}' |^2) \operatorname{Re}(\chi_{2cw}'), \quad (3A \cdot 36)$$

$$F_{2cw} = \varepsilon_1 (1 + | \chi_{2cw}' |^2) \operatorname{Im}(\chi_{2cw}'), \quad (3A \cdot 37)$$

$$G_i = (1/2) \left\{ (2 - k) - \frac{C_4}{C_2 + C_3 \sin^2(\beta_i L/2)} \right\}, \quad (3A \cdot 38)$$

$$H_i = \frac{C_5 \sin(\beta_i L/2)}{C_2 + C_3 \sin^2(\beta_i L/2)}, \quad (3A \cdot 39)$$

$$C_4 = \kappa \{1 - (1-k)(1-\gamma_0)(|t_{11cw}|^2 + |t_{12cw}|^2)\}, \quad (3A \cdot 40)$$

$$C_5 = \kappa \{(1-k)(1-\gamma_0)(|t_{11cw}|^2 + |t_{12cw}|^2)\}^{1/2}, \quad (3A \cdot 41)$$

$$E_0^2 = |E_{0cw}|^2. \quad (3A \cdot 42)$$

式(3A・25)を E_0^2 で割ったものが式(3・1)であり、式(3A・26)、(3A・27)が式(3・2)を表している。

付録3B — 式(3・3)の導出 —

左回り光の共振器1周の伝達マトリクスを T_{ccw} は、式(3A・10)と同様にして、以下のように求められる。

$$\begin{aligned} T_{ccw} &= \{(1-\kappa)(1-\gamma_0)\}^{1/2} \cdot A(-\phi) \Big|_{z=L_1} \cdot R(-\theta) \cdot A(-\phi) \Big|_{z=L_2} \\ &= \{(1-\kappa)(1-\gamma_0)\}^{1/2} \exp(-j\beta_{av}L) \begin{bmatrix} t_{11ccw} & t_{12ccw} \\ t_{21ccw} & t_{22ccw} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (3B \cdot 1)$$

ただし、式(3B・1)中のマトリクス要素 $t_{ijccw}(i, j=1, 2)$ は、以下のように表される。

$$t_{11ccw} = t_{22ccw}^* = t_{11cw}, \quad (3B \cdot 2)$$

$$t_{12ccw} = -t_{21ccw}^* = -t_{12cw}^*. \quad (3B \cdot 3)$$

式(3B・1) — (3B・3)より、 T_{ccw} の固有ベクトル λ_{1ccw} 、 λ_{2ccw} と、それぞれに対応した固有ベクトル (X_{1ccw}, Y_{1ccw}) 、 (X_{2ccw}, Y_{2ccw}) とは、以下のよ

うに求められる。

$$\lambda_{1ccw} = \lambda_{1cw}, \quad (3B \cdot 4)$$

$$\lambda_{2ccw} = \lambda_{2cw}, \quad (3B \cdot 5)$$

$$\begin{bmatrix} X_{1ccw} \\ Y_{1ccw} \end{bmatrix} = k \begin{bmatrix} 1 \\ Y_{1ccw}' \end{bmatrix}, \quad (3B \cdot 6)$$

$$\begin{bmatrix} X_{2ccw} \\ Y_{2ccw} \end{bmatrix} = k \begin{bmatrix} X_{2ccw}' \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (3B \cdot 7)$$

ただし、

$$Y_{1ccw}' = Y_{1cw}'^*, \quad (3B \cdot 8)$$

$$X_{2ccw}' = X_{2cw}'^*. \quad (3B \cdot 9)$$

付録 3 A と同様の計算により、左回り光の受光出力 $|E_{d'ccw}|^2$ は、以下のよう
に表現される。

$$\begin{aligned} |E_{d'ccw}|^2 = & \{(1-\gamma_0)/(1-\kappa)\} [|accw|^2 \{ |X_{1ccw}|^2 + \varepsilon_1^2 |Y_{1ccw}|^2 \} |U_1|^2 \\ & + |bccw|^2 \{ |X_{2ccw}|^2 + \varepsilon_1^2 |Y_{2ccw}|^2 \} |U_2|^2 \\ & + 2k^2(1-\varepsilon_1^2) \text{Re}(accw^* bccw U_1^* U_2 X_{2ccw}')] . \end{aligned} \quad (3B \cdot 10)$$

ただし、

$$2k^2(1-\varepsilon_1^2)\text{Re}(accw^*bccwU_1^*U_2X_2ccw')=k^4E_0^2(1-\varepsilon_1^2)\{G_1(F_1ccwG_2+F_2ccwH_2) \\ -H_1(-F_1ccwH_2+F_2ccwG_2)\}, \quad (3B \cdot 11)$$

$$accw=(1/2^{1/2})E_0k(1+\varepsilon_2Y_1cw'), \quad (3B \cdot 12)$$

$$bccw=(1/2^{1/2})E_0k(X_2cw'+\varepsilon_2), \quad (3B \cdot 13)$$

$$F_1ccw=(1-\varepsilon_2^2)|X_2cw'|^2+\varepsilon_2(1-|X_2cw'|^2)\text{Re}(X_2cw'), \quad (3B \cdot 14)$$

$$F_2ccw=-\varepsilon_2(1+|X_2cw'|^2)\text{Im}(X_2cw'). \quad (3B \cdot 15)$$

式(3B・10)を式(3A・25)と比較すると、左回り光の固有偏波状態は、右回り光のそれと同じ周波数で共振することがわかる。式(3B・10)を $|E_0ccw|^2 (=E_0^2)$ で割ったものが、式(3・3)になる。

付録3C —— 式(3・4)、(3・5)の導出 ——

単一偏波光ファイバあるいは光ファイバ偏光子の伝達行列Cは、ファイバのねじれを無視した場合、以下の式で表される[27]。

$$C=\exp(\gamma_{av}z) \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix}. \quad (3C \cdot 1)$$

ただし、

$$C_{11}=\exp\{-(\Delta\alpha/2+j\Delta\beta/2)z\}, \quad (3C \cdot 2)$$

$$C_{12}=C_{21}=0, \quad (3C \cdot 3)$$

$$C_{22} = \exp\{(\Delta \alpha / 2 + j \Delta \beta / 2)z\}, \quad (3C \cdot 4)$$

$$\Delta \alpha = \alpha_x - \alpha_y, \quad (3C \cdot 5)$$

$$\Delta \beta = \beta_x - \beta_y, \quad (3C \cdot 6)$$

$$\gamma_{av} = -\{(\alpha_x + \alpha_y) / 2 + j(\beta_x + \beta_y) / 2\} \equiv -(\alpha_{av} + j \beta_{av}), \quad (3C \cdot 7)$$

$\alpha_i (i=x, y)$: 各軸の損失、 $\beta_i (i=x, y)$: 各軸の伝搬定数、である。なお $\alpha_x < \alpha_y$ であるとした。また簡単のため、ファイバ中の偏波クロストークは無視している。

右回り光の共振器1周の伝達行列Tは、以下の式で与えられる。

$$\begin{aligned} T &= \{(1-\kappa)(1-\gamma_{\theta})\}^{1/2} \exp(\gamma_{av}L) \cdot C|_{z=L_2} \cdot R(\theta) \cdot C|_{z=L_1} \\ &= \{(1-\kappa)(1-\gamma_{\theta})\}^{1/2} \exp(\gamma_{av}L) \\ &\quad \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta \exp\{-(\Delta \alpha / 2 + j \Delta \beta / 2)L\} & -\sin \theta \exp\{(\Delta \alpha / 2 + j \Delta \beta / 2)\Delta L\} \\ \sin \theta \exp\{-(\Delta \alpha / 2 + j \Delta \beta / 2)\Delta L\} & \cos \theta \exp\{(\Delta \alpha / 2 + j \Delta \beta / 2)L\} \end{bmatrix} \\ &\equiv \{(1-\kappa)(1-\gamma_{\theta})\}^{1/2} \exp(\gamma_{av}L) \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} \\ t_{21} & t_{22} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (3C \cdot 8)$$

ただし、

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}, \quad (3C \cdot 9)$$

κ : カプラの結合効率、 γ_{θ} : カプラの挿入損失、である。

ところで、共振する偏波状態はTの固有ベクトルに、共振周波数はTの固有値の偏角にそれぞれ対応する[1]。まず固有値 λ_1 、 λ_2 を計算した結果、以下のように

なった。

$$\lambda_1 = \{(1-\kappa)(1-\gamma_0)\}^{1/2} P \exp(-\alpha_{av}L) \exp\{j(\eta - \beta_{av}L)\} / 2, \quad (3C \cdot 10)$$

$$\lambda_2 = \{(1-\kappa)(1-\gamma_0)\}^{1/2} Q \exp(-\alpha_{av}L) \exp\{j(\delta - \beta_{av}L)\} / 2. \quad (3C \cdot 11)$$

ただし、

$$P = \{ [\operatorname{Re}(t_{11}) \{1 + \exp(\Delta \alpha L)\} - N^{1/2} \cos(\xi/2)]^2 + [\operatorname{Im}(t_{11}) \{1 - \exp(\Delta \alpha L)\} - N^{1/2} \sin(\xi/2)]^2 \}^{1/2}, \quad (3C \cdot 12)$$

$$Q = \{ [\operatorname{Re}(t_{11}) \{1 + \exp(\Delta \alpha L)\} + N^{1/2} \cos(\xi/2)]^2 + [\operatorname{Im}(t_{11}) \{1 - \exp(\Delta \alpha L)\} + N^{1/2} \sin(\xi/2)]^2 \}^{1/2}, \quad (3C \cdot 13)$$

$$\tan \eta = \frac{\operatorname{Im}(t_{11}) \{1 - \exp(\Delta \alpha L)\} - N^{1/2} \sin(\xi/2)}{\operatorname{Re}(t_{11}) \{1 + \exp(\Delta \alpha L)\} - N^{1/2} \cos(\xi/2)}, \quad (3C \cdot 14)$$

$$\tan \delta = \frac{\operatorname{Im}(t_{11}) \{1 - \exp(\Delta \alpha L)\} + N^{1/2} \sin(\xi/2)}{\operatorname{Re}(t_{11}) \{1 + \exp(\Delta \alpha L)\} + N^{1/2} \cos(\xi/2)}, \quad (3C \cdot 15)$$

$$N = \{ [[\operatorname{Re}(t_{11}) \{1 + \exp(\Delta \alpha L)\}]^2 - [\operatorname{Im}(t_{11}) \{1 - \exp(\Delta \alpha L)\}]^2 - 4]^2 + 4 [\operatorname{Re}(t_{11}) \operatorname{Im}(t_{11}) \{1 - \exp(2\Delta \alpha L)\}]^2 \}^{1/2}, \quad (3C \cdot 16)$$

$$\tan \xi = \frac{2 \operatorname{Re}(t_{11}) \operatorname{Im}(t_{11}) \{1 - \exp(2\Delta \alpha L)\}}{[\operatorname{Re}(t_{11}) \{1 + \exp(\Delta \alpha L)\}]^2 - [\operatorname{Im}(t_{11}) \{1 - \exp(\Delta \alpha L)\}]^2 - 4}, \quad (3C \cdot 17)$$

である。

また、 λ_1 、 λ_2 のそれぞれに対応した固有ベクトル V_1 、 V_2 は以下のように求められる。

$$\mathbf{V}_1 = \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \end{bmatrix} = (1/k_1) \begin{bmatrix} 1 \\ -(t_{11} - P \exp(j\eta))/2 / t_{12} \end{bmatrix}, \quad (3C \cdot 18)$$

$$\mathbf{V}_2 = \begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \end{bmatrix} = (1/k_2) \begin{bmatrix} -t_{12} / \{t_{11} - Q \exp(j\delta)/2\} \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (3C \cdot 19)$$

ただし、

$$k_1 = \frac{1}{[1 + [|t_{11}|^2 - P \{ \cos \eta \operatorname{Re}(t_{11}) + \sin \eta \operatorname{Im}(t_{11}) \} + P^2/4] / |t_{12}|^2]^{1/2}}, \quad (3C \cdot 20)$$

$$k_2 = \frac{1}{[1 + |t_{12}|^2 / [|t_{11}|^2 - Q \{ \cos \delta \operatorname{Re}(t_{11}) + \sin \delta \operatorname{Im}(t_{11}) \} + Q^2/4]]^{1/2}}, \quad (3C \cdot 21)$$

である。ここで、共振器1周の伝達行列Tはユニタリ性を示さないので、 \mathbf{V}_1 、 \mathbf{V}_2 は直交基底とはなっていない。ただし、正規化はされている。

入射光 E_1 は、 ε_1 を入射光のファイバに対する軸ずれを表わす量と定義すると、以下のように表される。

$$E_1 = 2^{1/2} \begin{bmatrix} 1 \\ \varepsilon_1 \end{bmatrix} = a\mathbf{V}_1 + b\mathbf{V}_2. \quad (3C \cdot 22)$$

ただし、

$$a = \frac{2^{1/2} \{t_{11} + \varepsilon_1 t_{12} - Q \exp(j\delta)/2\}}{k_1 \{P \exp(j\eta) - Q \exp(j\delta)\}}, \quad (3C \cdot 23)$$

$$b = \frac{2^{1/2} \{t_{11} - Q \exp(j\delta)/2\} \{t_{11} + \varepsilon_1 t_{12} - P \exp(j\eta)/2\}}{k_2 t_{12} \{P \exp(j\eta) - Q \exp(j\delta)\}} \quad (3C \cdot 24)$$

である。

E_3 と E_1 との間には、以下の関係がある[1]。

$$E_3 = \left\{ \frac{(1-\gamma_0)}{(1-\kappa)} \right\}^{1/2} \left\{ (1-\kappa) - \kappa \sum_{n=0}^{\infty} T^{n+1} \right\} E_1. \quad (3C \cdot 25)$$

式(3C・22)を用いると式(3C・25)は以下のようなになる。

$$\begin{aligned} E_3 &= \left\{ \frac{(1-\gamma_0)}{(1-\kappa)} \right\}^{1/2} \left\{ (1-\kappa) - \kappa \sum_{n=0}^{\infty} T^{n+1} \right\} (aV_1 + bV_2) \\ &= \left\{ \frac{(1-\gamma_0)}{(1-\kappa)} \right\}^{1/2} \left\{ (1-\kappa) (aV_1 + bV_2) - \kappa \left(aV_1 \sum_{n=0}^{\infty} \lambda_1^{n+1} + bV_2 \sum_{n=0}^{\infty} \lambda_2^{n+1} \right) \right\} \\ &= \left\{ \frac{(1-\gamma_0)}{(1-\kappa)} \right\}^{1/2} \left[(1-\kappa) (aV_1 + bV_2) \right. \\ &\quad \left. - \kappa [a \{ \lambda_1 / (1-\lambda_1) \} V_1 + b \{ \lambda_2 / (1-\lambda_2) \} V_2] \right] \\ &= \left\{ \frac{(1-\gamma_0)}{(1-\kappa)} \right\}^{1/2} [a \{ (1-\kappa - \lambda_1) / (1-\lambda_1) \} V_1 + b \{ (1-\kappa - \lambda_2) / (1-\lambda_2) \} V_2]. \end{aligned} \quad (3C \cdot 26)$$

$$\therefore |E_3|^2 = E_3 \cdot {}^t \bar{E}_3 \equiv \left\{ \frac{(1-\gamma_0)}{(1-\kappa)} \right\} (LR_1 + LR_2 + LR_3). \quad (3C \cdot 27)$$

ただし、

$$LR_1 = |a|^2 \left[1 - \frac{C_1}{C_2 + C_3 \sin^2 \{ (\eta - \beta_{av} L) / 2 \}} \right], \quad (3C \cdot 28)$$

$$LR_2 = |b|^2 \left[1 - \frac{C_4}{C_5 + C_6 \sin^2 \{ (\delta - \beta_{av} L) / 2 \}} \right], \quad (3C \cdot 29)$$

$$LR_3 = \{ 2 / (1-\kappa) \} \operatorname{Re} [ab^* \{ (1-\kappa - \lambda_1) / (1-\lambda_1) \} \{ (1-\kappa - \lambda_2^*) / (1-\lambda_2^*) \} V_1 \cdot {}^t \bar{V}_2], \quad (3C \cdot 30)$$

$$C_1 = \kappa \{1 - (1 - \gamma \theta) P^2 \exp(-2 \alpha_{av} L) / 4\}, \quad (3 C \cdot 3 1)$$

$$C_2 = [1 - \{(1 - \gamma \theta) / (1 - \kappa)\}^{1/2} P \exp(-\alpha_{av} L) / 2]^2, \quad (3 C \cdot 3 2)$$

$$C_3 = 2 \{(1 - \gamma \theta) / (1 - \kappa)\}^{1/2} P \exp(-\alpha_{av} L), \quad (3 C \cdot 3 3)$$

$$C_4 = \kappa \{1 - (1 - \gamma \theta) Q^2 \exp(-2 \alpha_{av} L) / 4\}, \quad (3 C \cdot 3 4)$$

$$C_5 = [1 - \{(1 - \gamma \theta) / (1 - \kappa)\}^{1/2} Q \exp(-\alpha_{av} L) / 2]^2, \quad (3 C \cdot 3 5)$$

$$C_6 = 2 \{(1 - \gamma \theta) / (1 - \kappa)\}^{1/2} Q \exp(-\alpha_{av} L). \quad (3 C \cdot 3 6)$$

式 (3 C · 2 7) の LR_1 、 LR_2 はローレンツ型曲線であり、式 (3 C · 1 8)、(3 C · 1 9) の固有偏波状態が作る共振特性を示している。また、 LR_3 は、共振器 1 周の伝達行列 T がユニタリ性を示さないために現れる項で、 LR_1 と LR_2 との積に似た共振特性を示す。式 (3 C · 2 7) が式 (3 · 4) に対応し、式 (3 C · 2 8)、(3 C · 2 9) が、式 (3 · 5) に対応している。

参考文献

- [1] 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.*, vol. 25, no. 15, pp. 2606-2612, Aug. 1986.
- [2] 保立, 瀧口, 村上, "偏波維持光ファイバで構成した共振器中での偏波軸ずれによる受動型リング共振方式光ジャイロの出力変動," 電子情報通信学会, 光・量子エレクトロニクス研究会, paper OQE89-9, pp. 1-6, 仙台, 1989年5月.
- [3] K. Hotate, K. 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," in *Proc. OFS '89*, paper Mo-4-2, pp. 94-100, Paris, France, Sept. 1989.
- [4] 瀧口, 保立, "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," 電子情報通信学会, 光・量子エレクトロニクス研究会, paper OQE89-79, pp. 1-6, 東京, 1989年11月.
- [5] K. Takiguchi and K. Hotate, "Manner to reduce the bias of optical passive ring-resonator gyro caused by the misalignment of the polarization-axis in the resonator," in *Proc. OFSET '90*, paper 12B3-2, pp. 109-118, Fukuoka, Japan, Oct. 1990.
- [6] K. Takiguchi and K. Hotate, "Bias of an optical passive ring-resonator gyro caused by the misalignment of the polarization-axis in the polarization-maintaining fiber resonator," to be published in *J. Lightwave Technol.*
- [7] M. P. Varnham, D. N. Payne, A. J. Barlow, and E. J. Tarbox, "Coiled-birefringent-fiber polarizer," *Opt. Lett.*, vol. 9, no. 7, pp. 306-308, July 1984.
- [8] R. A. Bergh, H. C. Lefevre, and H. J. Shaw, "Single-mode fiber-optic polarizer," *Opt. Lett.*, vol. 5, no. 11, pp. 479-481, Nov. 1980.

- [9] R. A. Bergh, H. C. Lefevre, and H. J. Shaw, "An overview of fiber-optic gyroscopes," *J. Lightwave Technol.*, vol. LT-2, no. 2, pp. 91-107, Apr. 1984, Invited.
- [10] D. Gruchmann, K. Petermann, L. Staudigel, and E. Weidel, "Fiber-optic polarizers with high extinction ratio," in *Proc. ECOC '83*, pp. 305-308, Geneva, Switzerland, Oct. 1983.
- [11] 瀧口, 保立, "受動型リング共振方式光ジャイロにおける偏波変動誘起雑音の単一偏波光ファイバによる低減," 電子情報通信学会, 光・量子エレクトロニクス研究会, paper OQE91-39, pp. 43-48, 東京, 1991年6月.
- [12] 瀧口, 保立, "受動型リング共振方式光ジャイロにおける偏波変動誘起雑音の単一偏波光ファイバによる低減," 電子情報通信学会, 秋季大会, paper C-282, p. 4-312, 東京, 1991年9月.
- [13] K. Takiguchi and K. Hotate, "Reduction of a polarization-fluctuation induced error in an optical passive ring-resonator gyro by using a single-polarization optical fiber," in *Proc. MOC '91*, paper L25, pp. 250-253, Yokohama, Japan, Oct. 1991.
- [14] K. Takiguchi and K. Hotate, "Reduction of a polarization-fluctuation induced error in an optical passive ring-resonator gyro by using a single-polarization optical fiber," submitted to *J. Lightwave Technol.*
- [15] 瀧口, 保立, "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)," 電子情報通信学会, 光・量子エレクトロニクス研究会, paper OQE89-137, pp. 19-24, 東京, 1990年3月.
- [16] K. Takiguchi and K. Hotate, "Evaluation of the output error in an optical passive ring-resonator gyro with a 90-deg. polarization axis rotation in the polarization-maintaining fiber-resonator," in *Proc. OEC '90*, paper 13C2-2, pp. 264-265, Chiba, Japan, July 1990.
- [17] 瀧口, 保立, "偏波軸を90度回転接続した共振器を持つ受動型リング共振方式光ジャイロの出力誤差評価," 電子情報通信学会, 秋季全国大会, paper C-297, p. 4-339, 広島, 1990年10月.

- [18] K. Takiguchi and K. Hotate, "Evaluation of the output error in an optical passive ring-resonator gyro with a 90° polarization-axis rotation in the polarization-maintaining fiber resonator," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 3, no. 1, pp. 88-90, Jan. 1991.
- [19] 瀧口, 保立, "偏波軸を90度回転接続した共振器を持つ受動型リング共振方式光ジャイロの出力誤差評価(Ⅱ)," 電子情報通信学会, 春季全国大会, paper C-407, p. 4-424, 徳島, 1991年3月.
- [20] 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.*, vol. 25, no. 7, pp. 1086-1092, Apr. 1986.
- [21] 村上, "受動型リング共振方式光ジャイロにおける偏波状態に依存したドリフト特性の研究," 東京大学大学院, 電気工学専門課程, 修士論文, 第5章, pp. 51-67, 1988年2月.
- [22] Z. K. Ioannidis, R. Kadiwar, and I. P. Giles, "Polarization mode coupling in highly birefringent optical-fiber ring resonators," *Opt. Lett.*, vol. 14, no. 10, pp. 520-522, May 1989.
- [23] Z. K. Ioannidis, R. Kadiwar, and I. P. Giles, "Polarization effects in highly birefringent fibre ring resonator," in *Proc. OFS '89*, paper Mo-4-5, pp. 115-121, Paris, France, Sept. 1989.
- [24] G. A. Sanders, R. B. Smith, and G. F. Rouse, "Novel polarization-rotating fiber resonator for rotation sensing applications," in *Proc. SPIE OE/FIBERS '89*, paper 1169-74, pp. 373-381, Boston, U.S.A., Sept. 1989.
- [25] P. Mouroulis, "Polarization fading effects in polarization-preserving fiber ring resonators," in *Proc. SPIE OE/FIBERS '89*, paper 1169-46, pp. 400-412, Boston, U.S.A., Sept. 1989.
- [26] 高橋, 田井, 久間, "リング共振形光ファイバジャイロにおける偏波結合の影響," 電子情報通信学会論文誌, vol. J72-C-1, no. 10, pp. 610-618, 1989年10月.
- [27] K. Tabe and K. Hotate, "Drift of an optical fiber gyroscope caused

by the Faraday effect and its reduction by use of a polarizing fiber." *Optica Acta*, vol. 33, no. 12, pp. 1553-1561, Dec. 1986.

第4章 偏波変動誘起雑音の除去手法

4-1. はじめに

受動型リング共振方式光ジャイロにおいて、リング共振器中の偏波変動による影響は主要なバイアス要因の1つである[1]。第3章での検討の結果、偏波維持光ファイバ直交偏光軸間の共振器1周の位相差が 2π の整数倍付近では、非常に大きな出力誤差が生じることが明らかとなった[2]-[6]。

本章では、この誤差の除去手法として3つの方法を検討する。

まず光ファイバ偏光子を共振器の入出射端に設けた場合について検討する。この場合、左右両回り光の与える出力を差動的に得ることで、出力誤差をある程度除去できることが明らかとなった。しかし、現状の共振器パラメータ値では、慣性航法に適合する高精度のジャイロ性能 (10^{-7} rad/s) 内に偏波変動誘起雑音を抑制することは非常に困難であることも明らかになった。

次に、単一偏波光ファイバあるいは光ファイバ偏光子でリング共振器を構成する手法の検討を行う。x、y偏波間に集中的な損失の差を与えた場合の偏波変動誘起雑音の低減効果に関する検討は、既に存在する[7]。しかし、雑音の除去効果はみられなかった。x、y偏波間に分布的な損失の差を与えた場合の検討は今回が初めてである。その結果この手法では、典型的な共振器のパラメータ値において、中精度のジャイロに適用可能な値 (10^{-5} - 10^{-4} rad/s) にまで、偏波変動誘起雑音を低減可能であることが明らかとなった。

最後に、共振器中の接続部分で偏波維持光ファイバの軸を 90° 回転して融着を行った場合[8],[9]について、検討を行う。その結果、軸ずれ誤差、フィネス、温度変化等のパラメータ値に対して十分な許容度を持って、高精度のジャイロを構成できることが明らかとなった。

4-2. 光ファイバ偏光子を用いた除去手法[2]-[6]

第3章の検討で、右回り光の動作点からのずれは、光ファイバ偏光子によっては十分に抑圧できないことが明らかとなった。しかし実際のジャイロ出力バイアスは両回り光の動作点の差である。そのため、左右両回り光間の差動出力を評価

する。計算に必要なパラメータ値の一つである $\Delta\beta\Delta L$ ($\Delta\beta$: ファイバの複屈折、 ΔL : 融着部によって分けられる2つの共振器部分のファイバ長の差) は、出力誤差が最悪になる値に選んだ。

図4・1、4・2は、ジャイロの出力バイアスと偏波維持光ファイバ共振器1周の縦横偏波間の位相差(温度変動)との関係を示している。

これらの図では、右回り光のリードファイバ部分への入射偏光状態が一方のファイバの偏波軸に等しいと仮定している。このことは、右回り光は理想的な入射状態にあることを意味している。また左回り光の入射偏光状態は直線偏光で、ファイバの偏波軸とは角度 θ だけずれていると仮定する。カプラのリードファイバ部分の偏波軸間位相差が変動した場合、左回り光の共振器への入射偏波状態はポアンカレ球上で、右回り光の入射偏光に対応した部分(赤道上のファイバ偏波軸に対応した部分)の回りで円軌道を描く。ジャイロ出力バイアスは、厳密には左右両回り光の入射偏波状態の違いによって発生するが、2つの偏波状態のポアンカレ球上での距離は、バイアスを与えるパラメータの1つになる。また今の場合、この距離は入射偏波状態の変動によらず等しい。そのため、上記の左右両回り光の入射偏光に対する仮定は、バイアスの最悪値を厳密には与えないが、典型的なバイアス値を与えることになる。

図4・1のパラメータは光ファイバ偏光子の消光比 ε^2 である。この図より、共振器の入出射端に設置した光ファイバ偏光子は、 $\Delta\beta L=2m\pi$ (m : 整数) 付近の非常に大きなバイアスの除去に有効であることがわかる。融着接続の軸ずれ誤差は、 0.5° 以下が達成されている[10], [11]。

図4・2のパラメータは、リング共振器のフィネス F である。フィネスが増した場合、 $\Delta\beta L \neq 2m\pi$ ではバイアス値が減少していることがわかる。これは、フィネスの増加と共にジャイロの感度が増すためである。しかし $\Delta\beta L=2m\pi$ では、フィネスが増加した場合にバイアス値も増加してしまう場合がある。これはこの場合、不要共振ピークの回転検出に用いる主要共振ピークに対する影響は、2つの共振ピークがほぼ重なるため、共振特性を鋭くすることにより増長されるためである。

図4・1、図4・2とも、融着による偏波軸ずれ角度 θ の増加と共に、バイアス値が上昇していることがわかる。 θ が増すと、 $\Delta\beta L$ の値にかかわらず、固有偏波状態は理想的な状態、つまりファイバの2つの直交する直線偏波モードからず

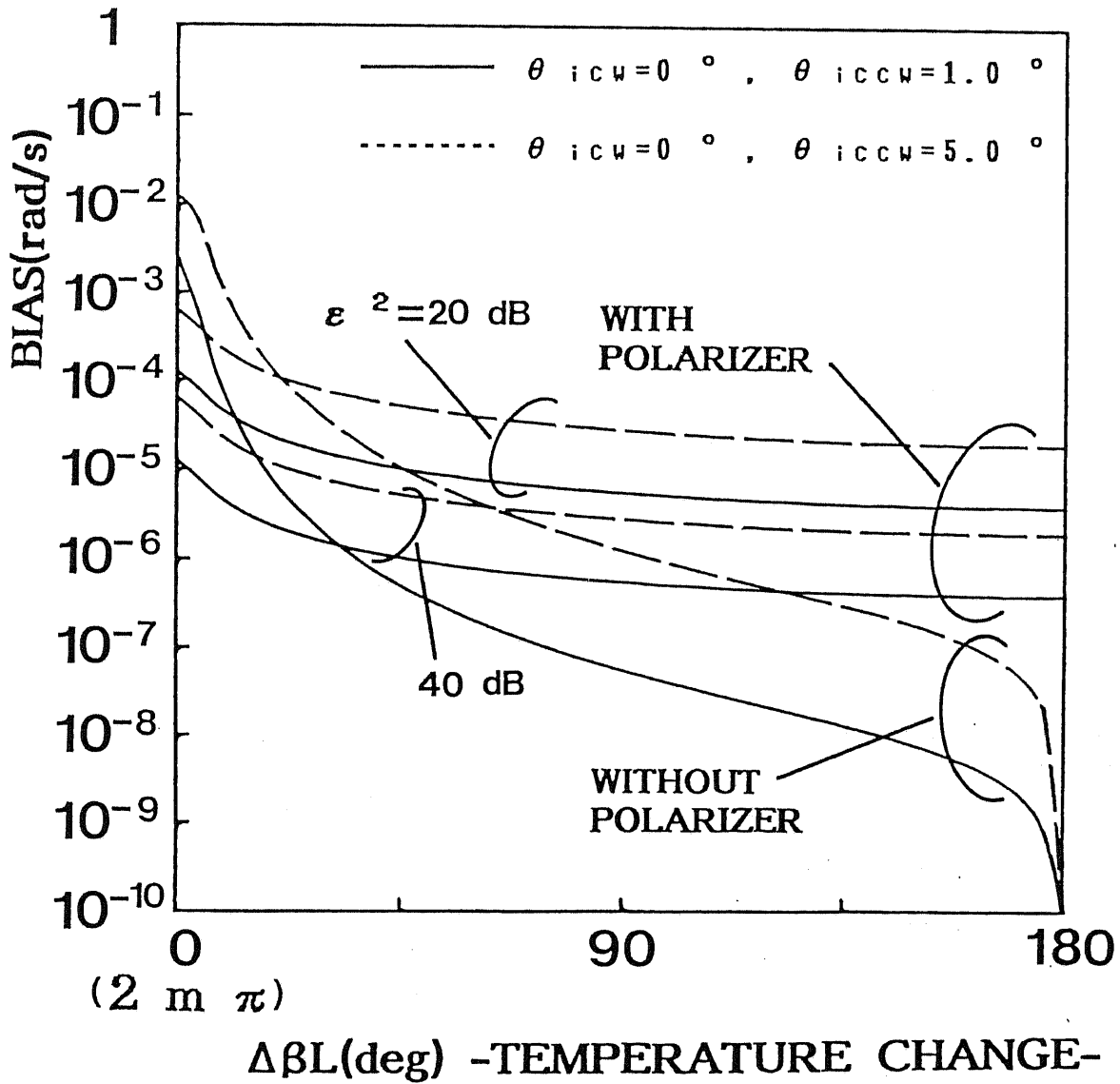


図4・1(a) ジャイロの出力バイアスと温度変動との関係 パラメータ：
 偏光子の消光比 ε^2 , θ_{icw} : 右回り入射光とファイバ偏波軸との軸ずれ, θ_{iccw}
 : 左回り入射光とファイバ偏波軸との軸ずれ, m : 整数, 融着部分の軸ずれ: $\theta =$
 0.1° , ファイバの複屈折: $\Delta\beta = 5,000\text{rad/m}$, ファイバ長: $L = 15\text{m}$, 共振器のフィ
 ネス: $F = 50$, 波長: $\lambda = 1.3\mu\text{m}$, 共振器半径: $r = 0.05\text{m}$

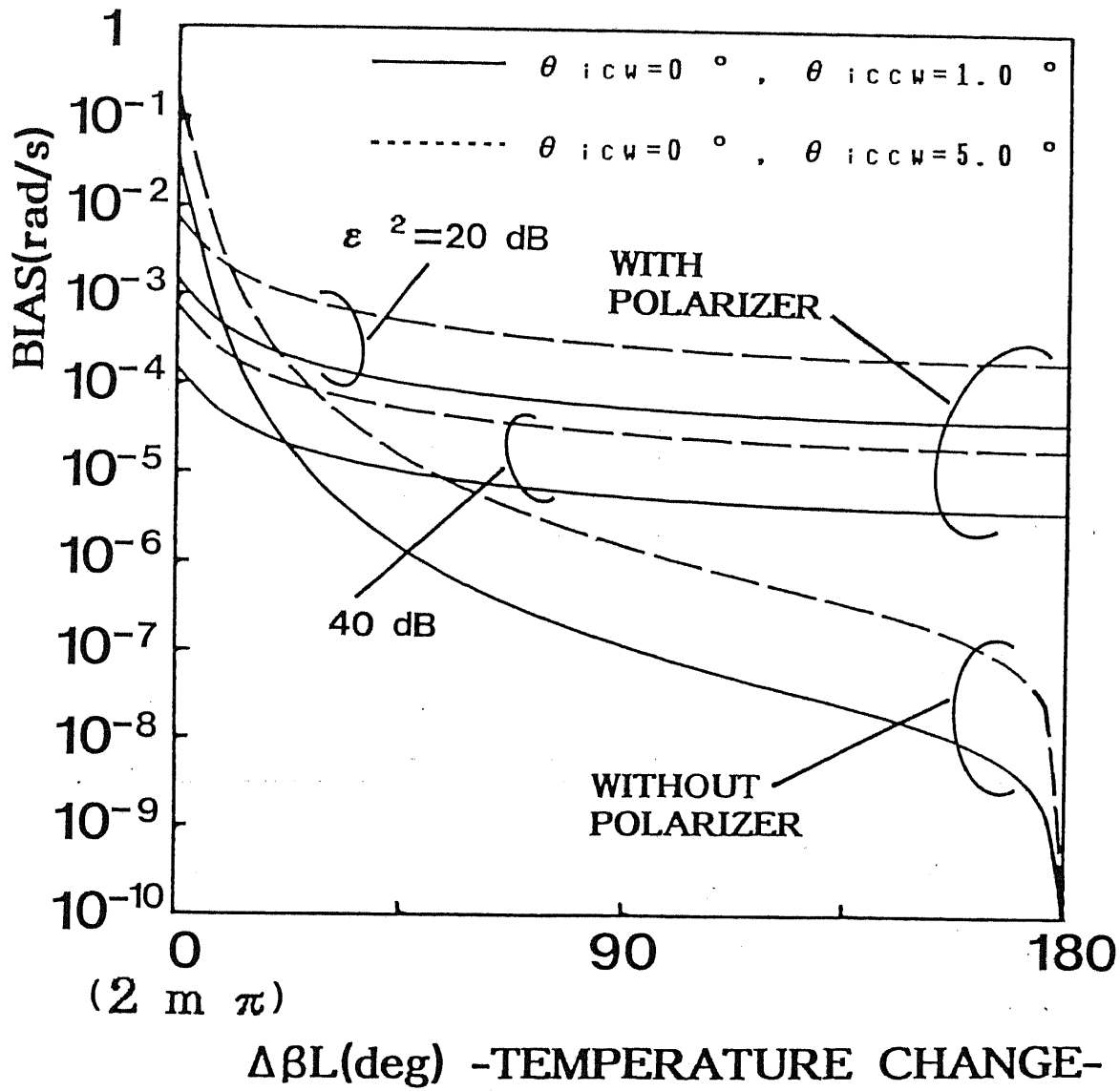


図4・1(b) ジャイロの出力バイアスと温度変動との関係 パラメータ：
 偏光子の消光比 ϵ^2 , m : 整数, $\theta = 1.0^\circ$, $\Delta\beta = 5,000 \text{ rad/m}$, $L = 15 \text{ m}$, $F = 50$, $\lambda = 1.3 \mu \text{ m}$, $r = 0.05 \text{ m}$

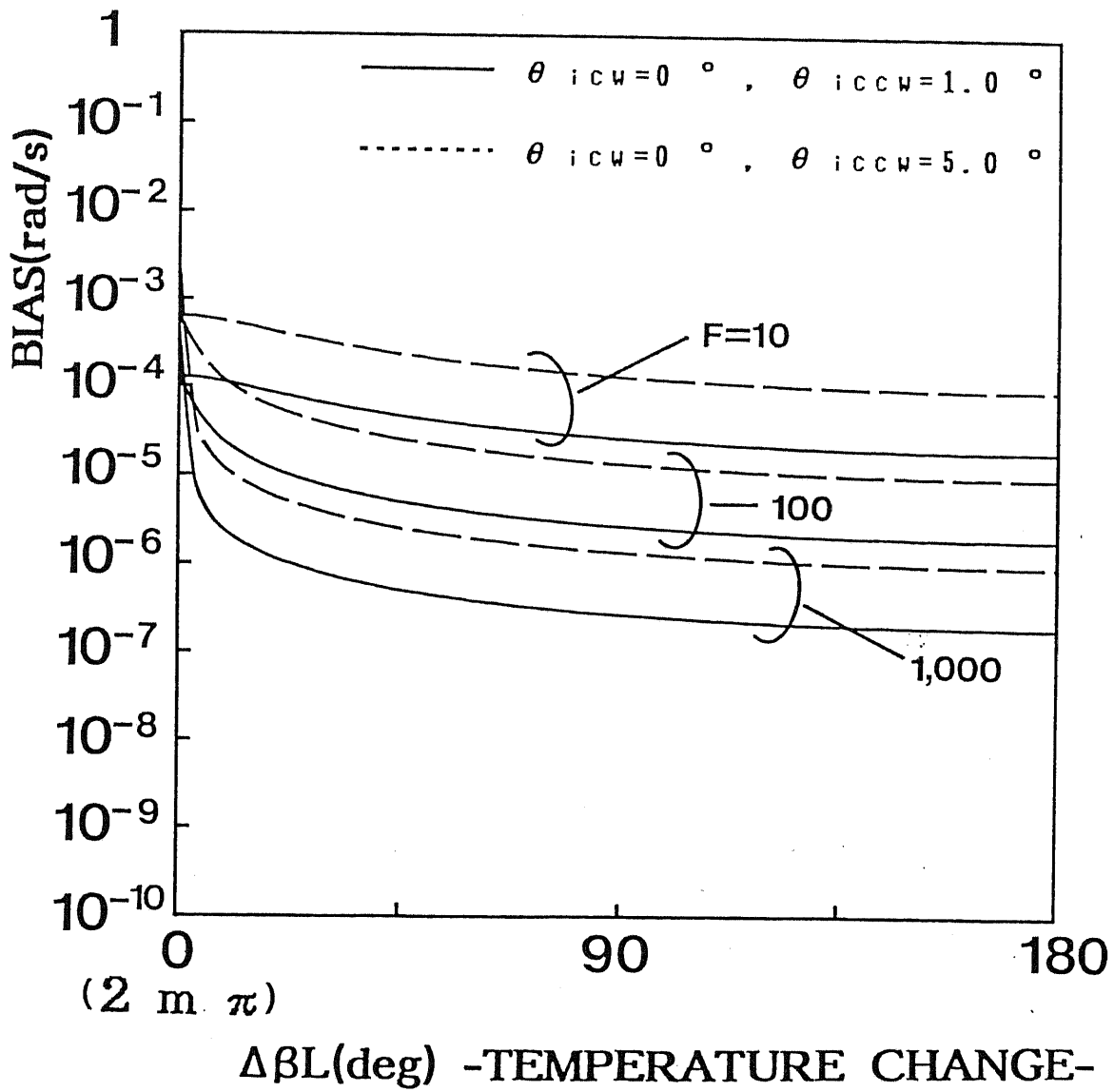


図4・2 (a) ジャイロの出力バイアスと温度変動との関係 パラメータ：
 共振器のフィネス, m : 整数, $\theta = 0.1^\circ$, $\Delta\beta = 5,000\text{rad/m}$, $L=15\text{m}$, $\varepsilon^2=20\text{dB}$, λ
 $=1.3\mu\text{m}$, $r=0.05\text{m}$

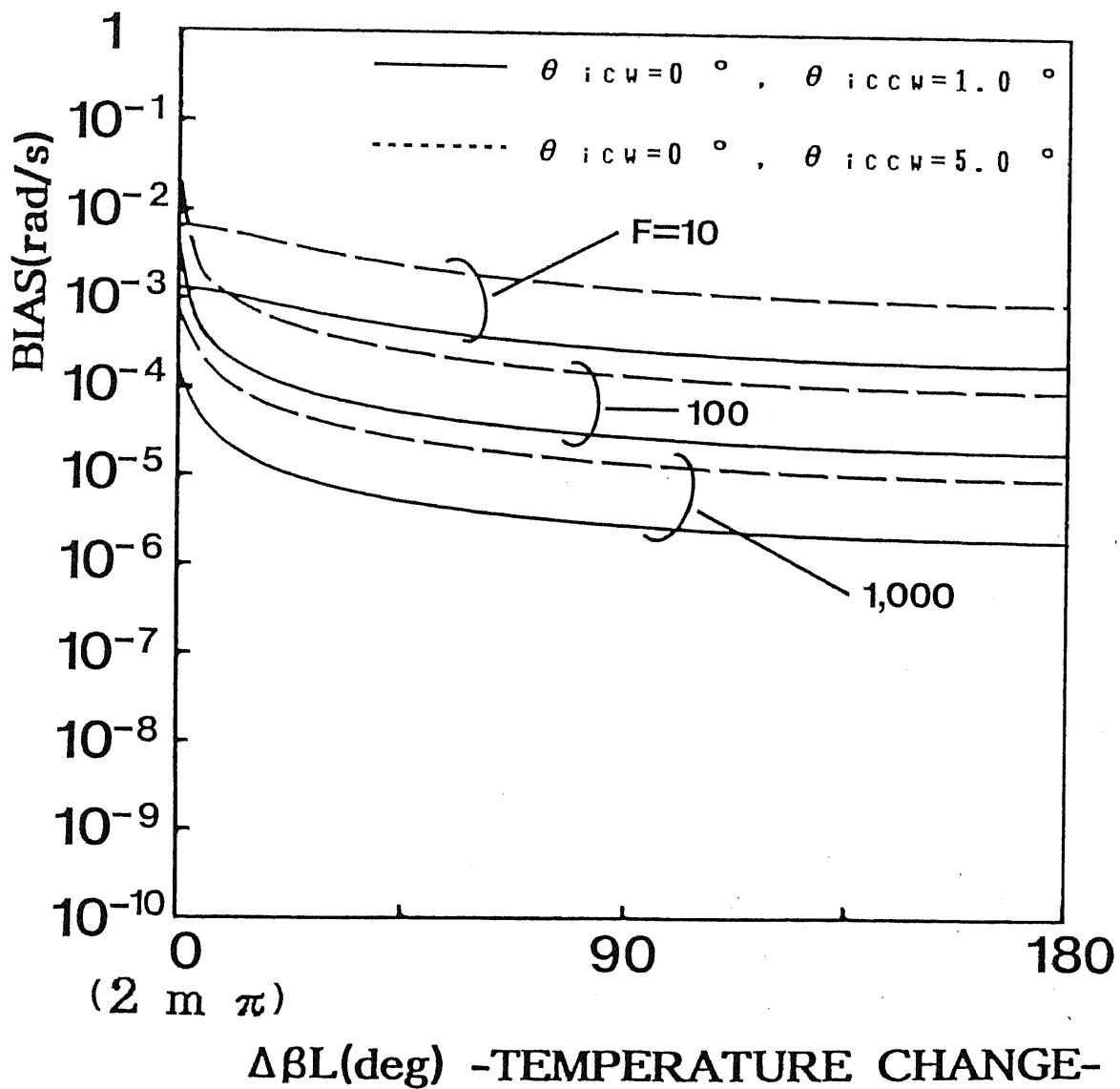


図4・2(b) ジャイロの出力バイアスと温度変動との関係 パラメータ：
 共振器のフィネス, m : 整数, $\theta = 1.0^\circ$, $\Delta\beta = 5,000\text{rad/m}$, $L = 15\text{m}$, $\varepsilon^2 = 20\text{dB}$, λ
 $= 1.3\mu\text{m}$, $r = 0.05\text{m}$

れる。そのため、第3章の式(3・1)、(3・3)の第2項の励振が助長される。さらに、両回り光に関して異なる値を示す、式(3・1)、(3・3)の第3項の影響が助長されるためである。

ここでは実際に実現できるファイバ偏光子の消光比を用いて、計算を行った。共振器へ入射する光の消光比は、実際には偏光子とカプラのリードファイバの特性によって決まり、偏光モード間のクロストークも重要な要因となる。ここでは、クロストークの影響は考慮しなかったが、消光比が現実的に実現できるクロストークの値を超えないように注意を払った。

偏波維持光ファイバのクロストークは、ファイバ長が長いときには、ランダムな摂動による偏光モード間の結合によって決まり、ファイバ長に反比例して向上する。またファイバ長が短いときには、ファイバの入射端で励振されるクラッドモードの伝搬によってクロストーク特性が制限される[12],[13]。本章の解析モデルでは、クラッドモードはカプラの前に配置されたファイバとファイバ偏光子によって除去できる。そのため偏光子が理想的であると仮定した場合、カプラに入射する光の消光比はランダムな摂動によって決定されることになる。カプラのリード部分のファイバ長は、1cm程度に短尺化することが可能であり、この場合-80dB程度のクロストーク特性の達成が可能である[12],[13]。

しかし偏波維持光ファイバで構成された偏光子では、典型的な消光比はクロストークも考慮して45dB程度である[14]。ただし、消光比自体は60dB程度まで達成されている。また通常の単一モードファイバで構成された偏光子では、90dBもの消光比が達成されている[15]。そのため、偏波維持光ファイバで構成された偏光子の消光比も将来改善されることが期待できる。

図4・1、4・2から、本ジャイロの偏波変動誘起雑音は、共振器の入出射端に光ファイバ偏光子を設置することによって、ある程度除去できることが明らかとなった。しかし同時に、航空機の慣性航法に必要な性能(10^{-7} rad/s)の実現のためには、偏光子の要求に対する要求がかなり厳しいことも明らかになった。そのためこの手法は、中程度の性能($10^{-5} \sim 10^{-4}$ rad/s)の実現に適した手法であるということが出来る。しかし将来高性能の偏光子が得られた場合、さらに高性能化が可能であるといえる。

4-3. 単一偏波光ファイバを用いた除去手法[16]-[19]

第3章での考察結果を基に、単一偏波光ファイバあるいは光ファイバ偏光子で構成された共振器中での融着による偏波軸ずれが引き起こす出力変動を計算した。なお、x、y偏波のカプラでの結合効率は、簡単のために同じであると仮定した。また、計算に必要なパラメータ値の一つである $\Delta\beta\Delta L$ は、出力誤差が最悪になる値に選んだ。

出力誤差を、温度変動に対して評価した結果を図4・3に示す。ここでは、損失の大きいy軸の損失 α_y と、入射光偏光と損失の少ないx軸との軸ずれ θ_i とをパラメータとした。なお $\alpha_y=0.1$ dBの曲線は、通常の偏波維持光ファイバを用いた場合の出力誤差を示している。

現在までに得られている、単一偏波光ファイバ（光ファイバ偏光子）の α_y の最大値は、60dB程度である[14]。またx軸の損失 α_x の最小値は、0.1dB程度である[20]。これらの値を考慮して、 α_x 、 α_y の値を設定した。

実際には、単一偏波光ファイバにおいても、偏波軸間のクロストークが存在する。現在までに得られているクロストークの最良値は、-50dB程度である[20]、[21]。従って、入射光偏光とx軸との軸ずれ θ_i はこの値を越えない程度の値とした。また、第3章、式(3C・1)での単一偏波光ファイバの伝達行列では、クロストークの効果は省略されている。そのため近似精度の劣化を防ぐため、共振器1周の消光比がクロストークの最良値を越えないように、融着接続部分の軸ずれ角度 θ を与えた。

図4・3より、以下のようなことがわかる。

(1) 単一偏波光ファイバあるいは光ファイバ偏光子を用いると、偏波維持光ファイバを用いた際に生ずる $\Delta\beta L=2m\pi$ 付近の大きな出力誤差が1-4桁ほど低減されていることがわかる。このため、典型的な共振器のパラメータ値に対して、中程度のジャイロ性能(10^{-5} - 10^{-4} rad/s)が実現可能なことがわかる。

(2) y軸の損失 α_y を大きくするほど、出力誤差が減少している。図4・4は、2つの固有ベクトル (X_1, Y_1) 、 (X_2, Y_2) のx、y成分間の大きさの比を、 α_y に対して

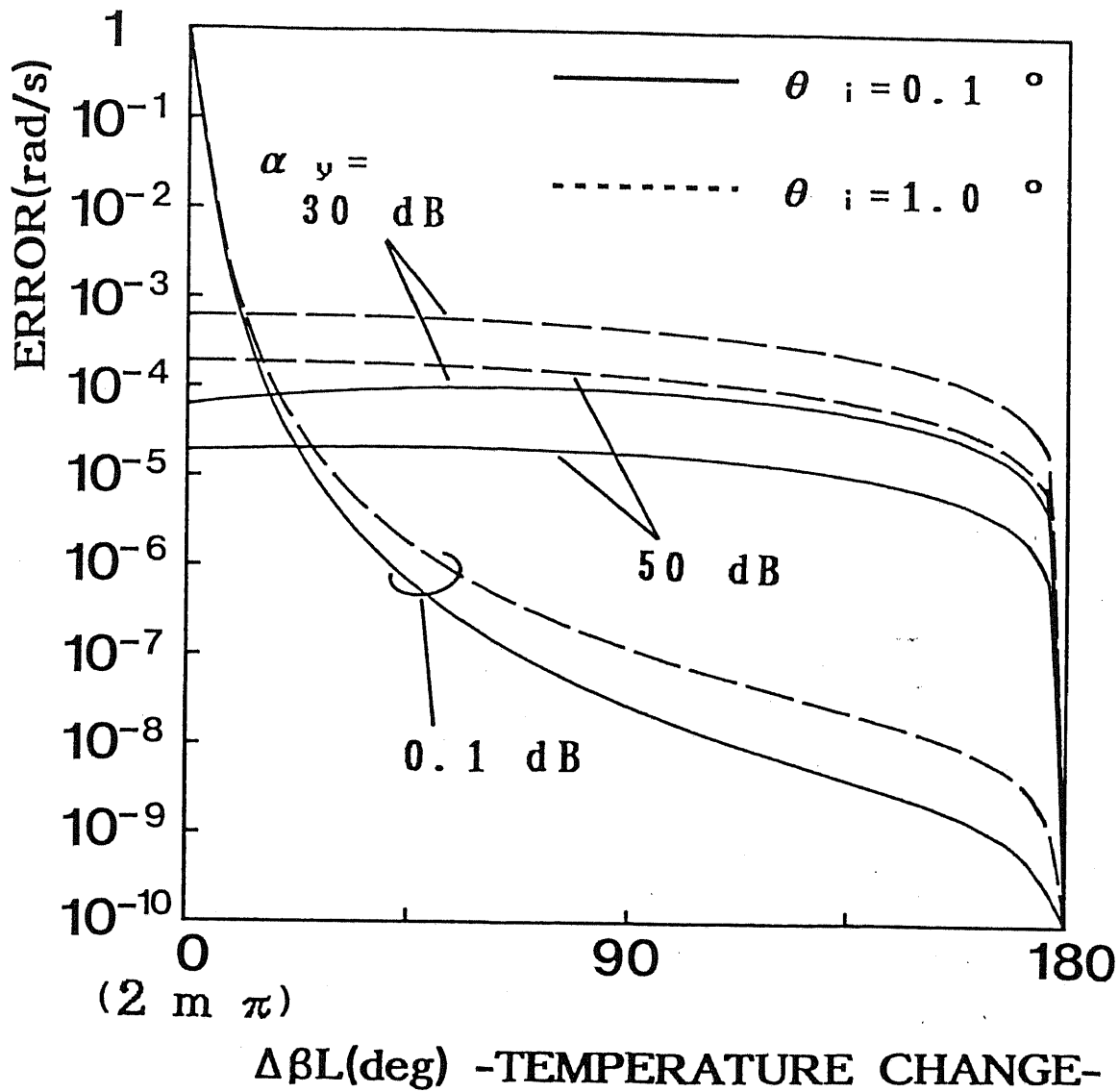


図4・3 (a) 出力誤差と温度変動との関係 パラメータ: y偏波の損失 α_y
 ・入射光偏波とx偏波軸との軸ずれ θ_i , m : 整数, 融着部分の軸ずれ: $\theta = 1.0^\circ$,
 ファイバの複屈折: $\Delta\beta = 10,000 \text{ rad/m}$, 共振器半径: $r = 0.025 \text{ m}$, ファイバ長: $L = 10 \text{ m}$,
 波長: $\lambda = 1.3 \mu \text{ m}$, 融着によって分けられる共振器部分のファイバ長の差:
 $\Delta L (\equiv L_1 - L_2) = 0$, カプラの挿入損失: $\gamma_\theta = 0.1 \text{ dB}$, x偏波軸の損失: $\alpha_x = 0.1 \text{ dB}$

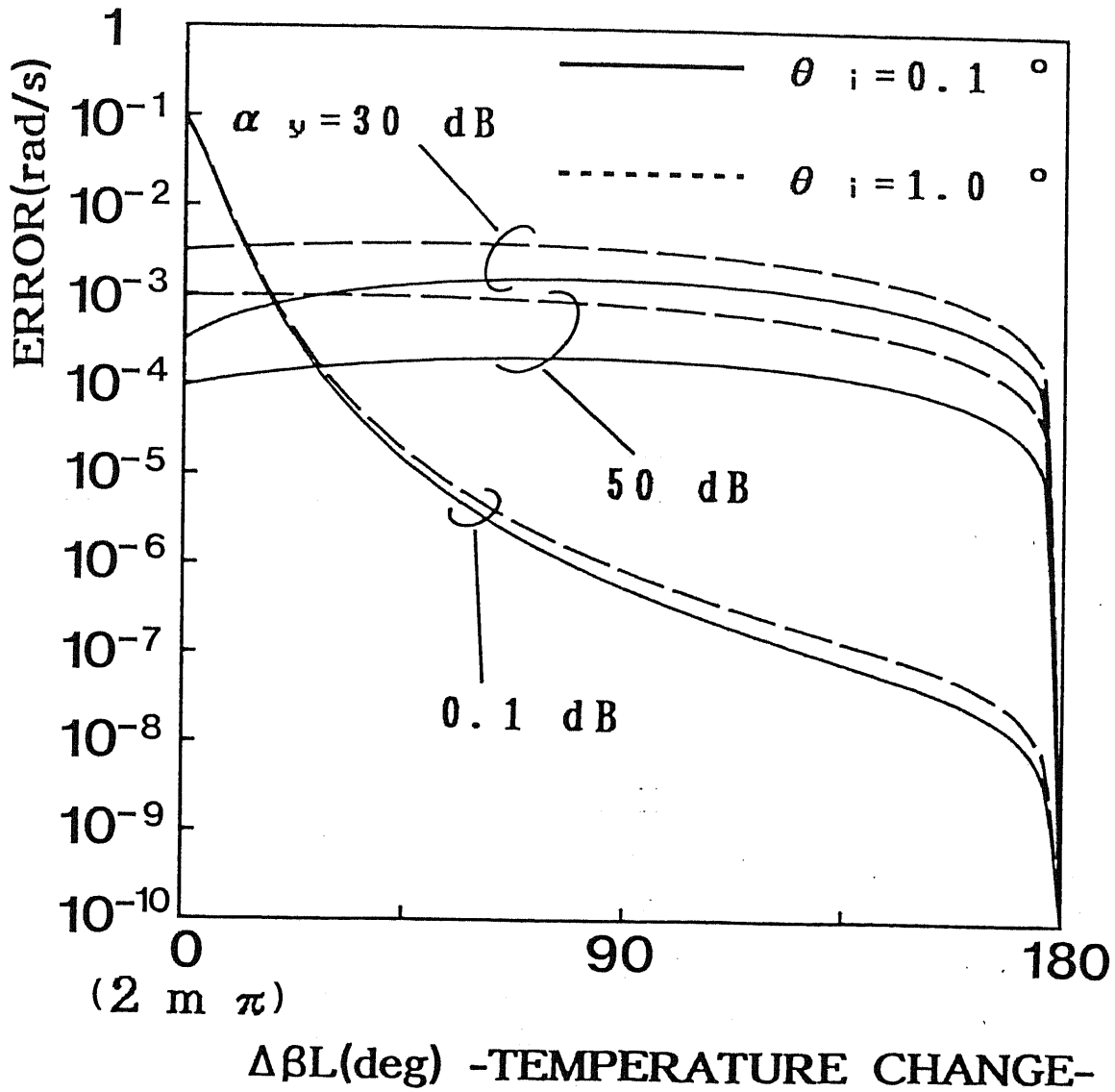


図4・3(b) 出力誤差と温度変動との関係 パラメータ: y偏波の損失 α_y
 ・入射光偏波とx偏波軸との軸ずれ θ_i , m : 整数, $\theta = 5.0^\circ$, $\Delta\beta = 10.000 \text{ rad/m}$,
 $r = 0.025 \text{ m}$, $L = 10 \text{ m}$, $\lambda = 1.3 \mu \text{ m}$, $\Delta L = 0$, $\gamma_\theta = 0.1 \text{ dB}$, $\alpha_x = 0.1 \text{ dB}$

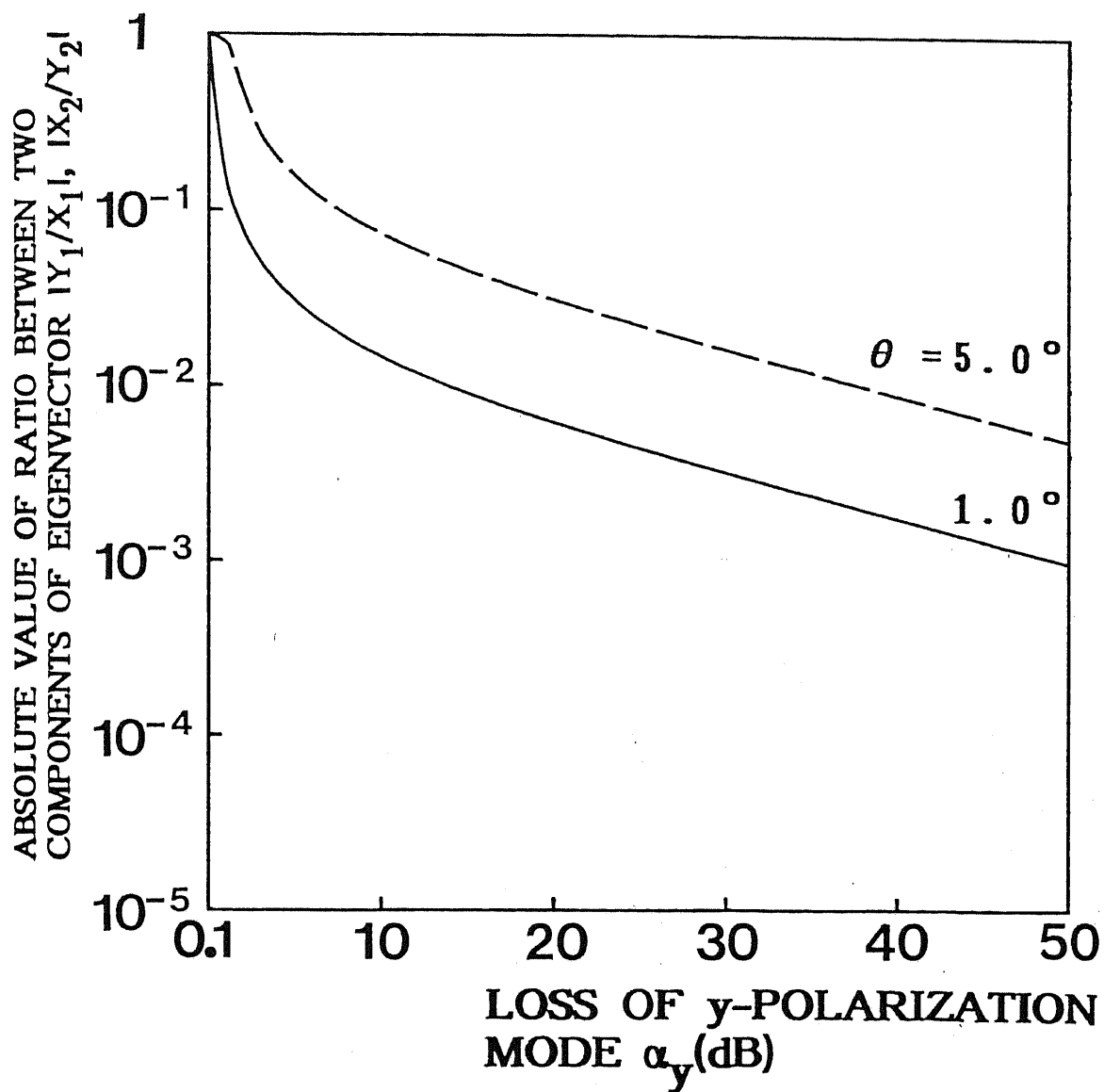


図4・4 固有ベクトルのx、y成分間の大きさの比とy偏波の損失との関係
 パラメータ：融着接続部分の偏波軸ずれ θ ， $\Delta\beta=10,000\text{rad/m}$ ， $r=0.025\text{m}$ ， $L=10\text{m}$ ， $\Delta L=0$ ， $\gamma_\theta=0.1\text{dB}$ ， $\alpha_x=0.1\text{dB}$ ， $\Delta\beta L=0^\circ$

評価した結果である。 $\Delta L=0$ の場合、2つの比 $|Y_1/X_1|$ 、 $|X_2/Y_2|$ は一致する。この図からわかる通り、出力誤差が減少するのは、 α_y が増加すると固有ベクトルが偏波軸に近づき、式(3・4)の第2項で表される不要共振ピークの励振比率が減少するためである。また、これは、固有ベクトルが空間的に直交状態に近づくことも意味しており、式(3・4)の第3項が減少することにもよる。

(3) 融着軸ずれの角度 θ が小さいほど、出力誤差は減少する。これは、図4・5に示した通り、 θ が減少すると、固有ベクトルが偏波軸に近づくためである。

(4) 共振器への入射光偏光とx軸との軸ずれ θ_i が減少すると、出力誤差は減少する。これは、 θ_i が減少すると、不要ピークの励振比率が減少するためである。

図4・6は、出力誤差と融着によって分けられる共振器部分のファイバ長の差 ΔL との関係を示したものである。この図より、融着接続を左右対称な位置で行った場合($\Delta L=0$)に、出力誤差が最小になることがわかる。

ΔL の変化に対する、2つの固有ベクトル間の内積の絶対値の変化を評価した結果を図4・7に示す。この図の縦軸は、2つのベクトルの空間的な直交性の尺度を示しており、0に近づくほどベクトルの直交性がよいことを示している。

この図より、 $|\Delta L|$ が0に近づくほど、2つの固有ベクトル V_1 、 V_2 はそれぞれx、y軸にほぼ一致し、直交していくことがわかる。これに対し、 $|\Delta L|$ が10mに近づくと2つの固有ベクトルは直交状態からずれてくる。これは以下のような事実のためである。軸ずれがカブラの直後に近づく($\Delta L \sim -10m$)ほど、固有ベクトル V_1 はほぼx軸と一致していき、 V_2 はy軸からずれる。逆に軸ずれがカブラの直前に近づく($\Delta L \sim 10m$)ほど、 V_1 がx軸からずれるのに対し、 V_2 はy軸に近づいていく。

2つの固有ベクトルが直交することは式(3・4)の第3項が小さくなることを示しており、このために、出力誤差が小さくなると考えられる。

4-4. 偏波軸の90°回転接続を用いた除去手法

共振器中の接続部分で偏波維持光ファイバの軸を90°回転して融着を行う(要

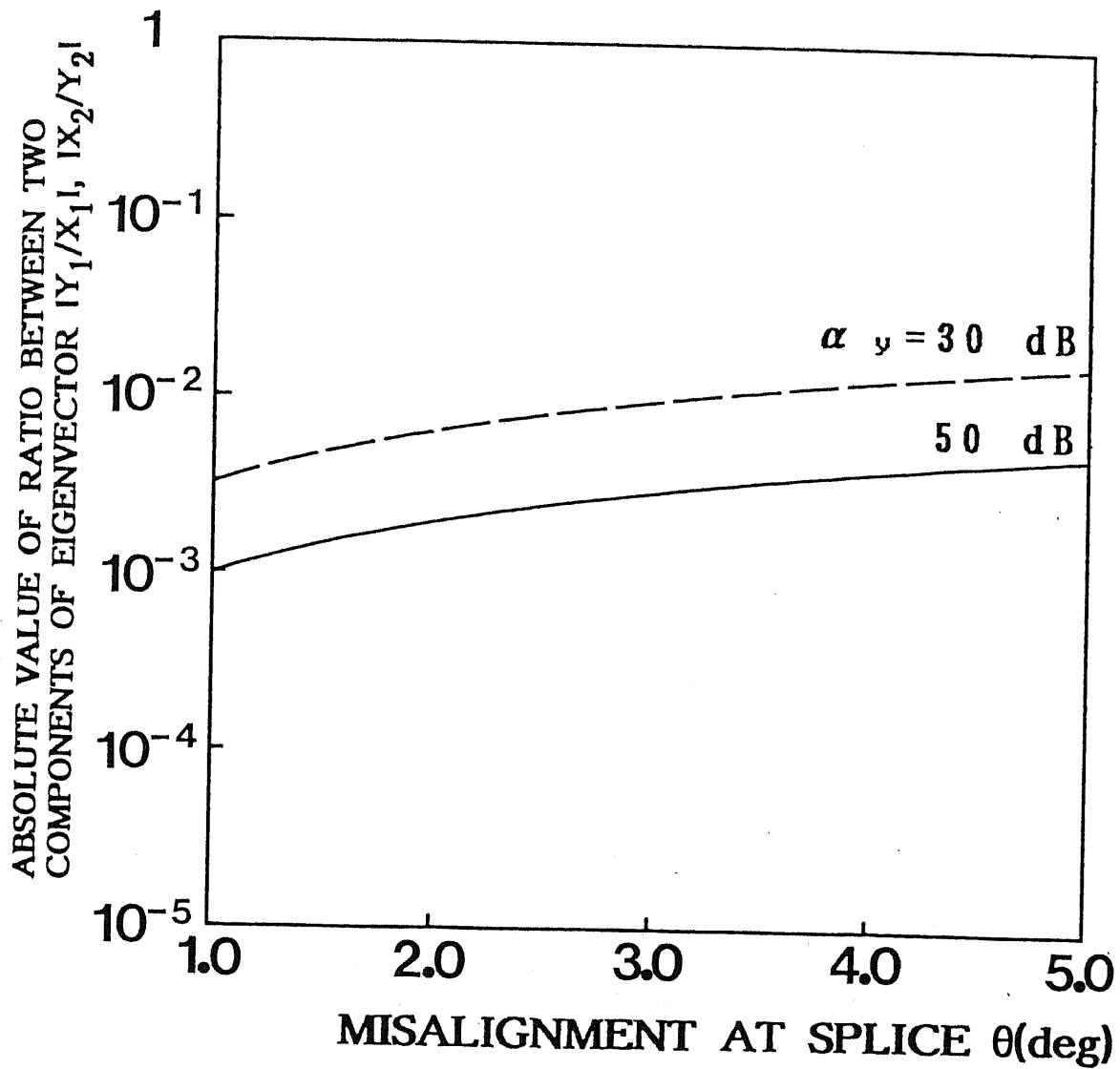


図 4・5 固有ベクトルの x、y 成分間の大きさの比と融着軸ずれとの関係
 パラメータ: y 偏波軸の損失 α_y , $\Delta\beta = 10,000 \text{ rad/m}$, $r = 0.025 \text{ m}$, $L = 10 \text{ m}$, $\Delta L = 0$,
 $\gamma_0 = 0.1 \text{ dB}$, $\alpha_x = 0.1 \text{ dB}$, $\Delta\beta L = 0^\circ$

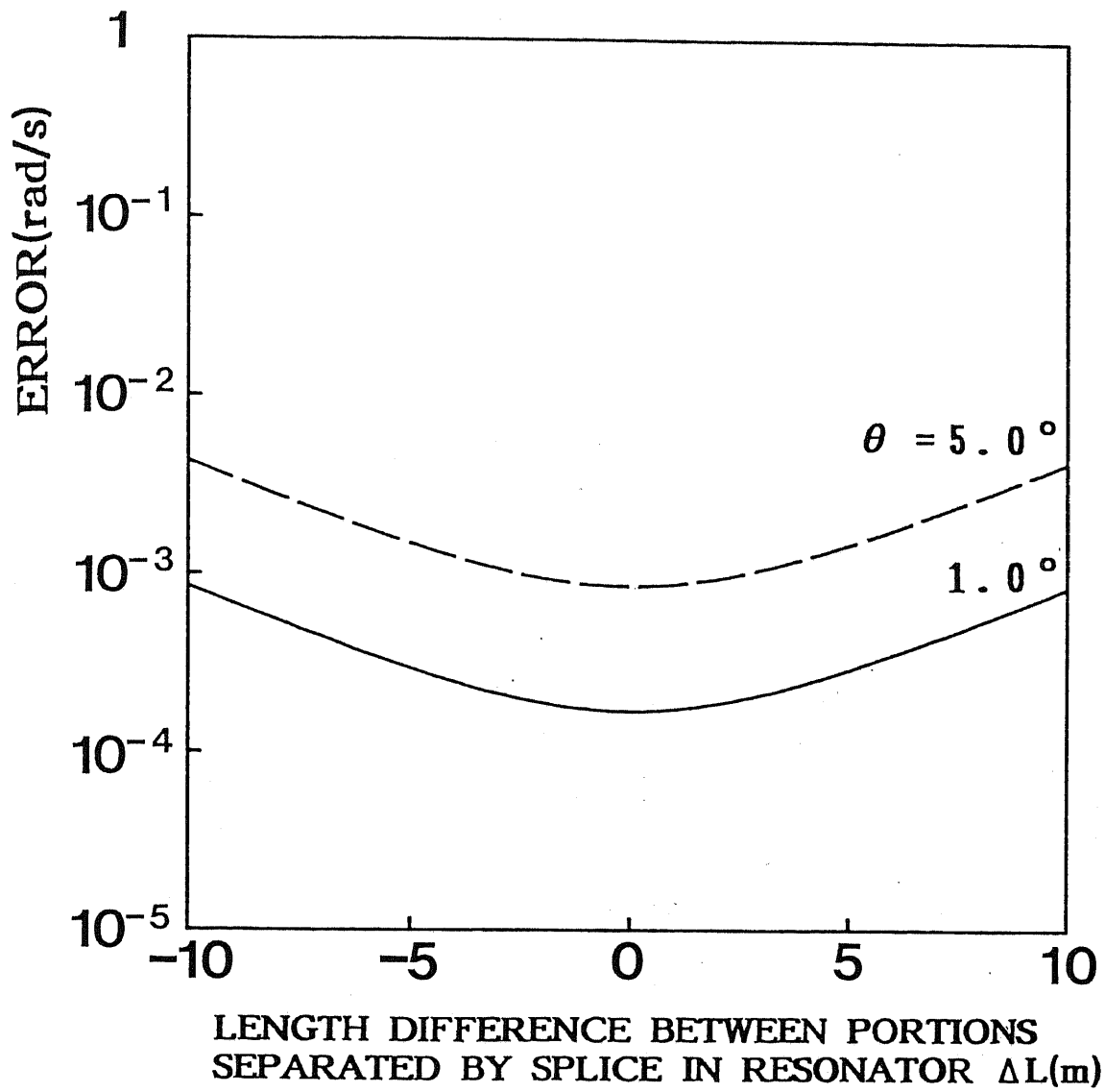


図4・6 出力誤差と融着によって分けられる2つの共振器部分のファイバ長の差との関係
 パラメータ：融着接続部分の偏波軸ずれ θ , $\Delta\beta = 10,000 \text{ rad/m}$,
 $\theta_i = 0.5^\circ$, $r = 0.025 \text{ m}$, $L = 10 \text{ m}$, $\lambda = 1.3 \mu \text{ m}$, $\gamma_\theta = 0.1 \text{ dB}$, $\alpha_x = 0.1 \text{ dB}$, $\alpha_y = 40 \text{ dB}$,
 $\Delta\beta L = 0^\circ$

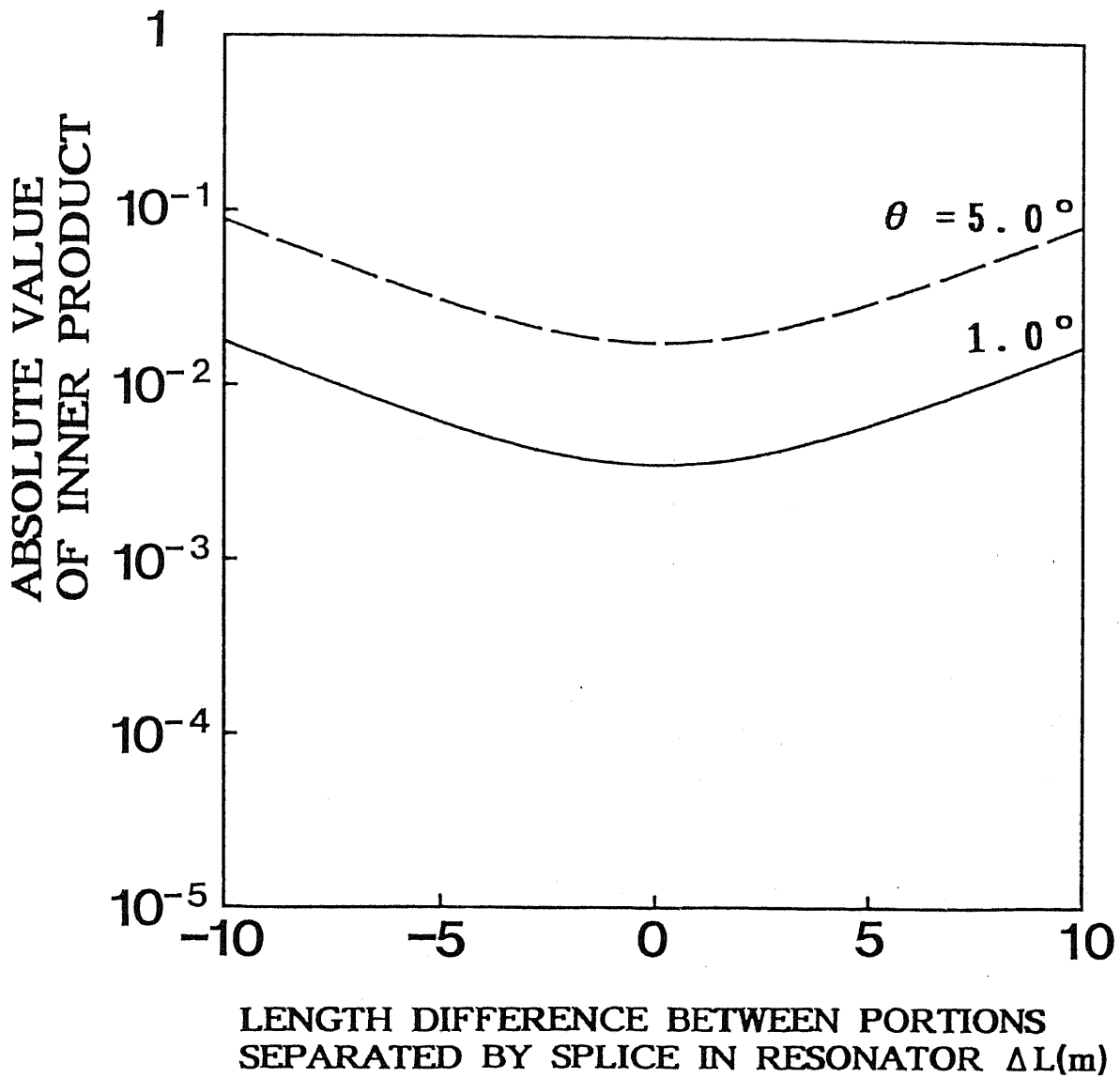


図4・7 2つの固有ベクトル間の内積の絶対値と融着によって分けられる2つの共振器部分のファイバ長の差との関係 パラメータ：融着接続部分の偏波軸ずれ θ , $\Delta\beta = 10,000 \text{ rad/m}$, $r = 0.025 \text{ m}$, $L = 10 \text{ m}$, $\gamma_a = 0.1 \text{ dB}$, $\alpha_x = 0.1 \text{ dB}$, $\alpha_y = 40 \text{ dB}$, $\Delta\beta L = 0^\circ$

するに速軸と遅軸を接続する)と、偏波変動誘起雑音が大幅に低減できる可能性があるとの報告がなされた[8],[9]。これは、この接続を行うと、共振する2つの固有偏波状態間の共振器1周における位相差が、温度変化が生じた場合でもほぼ π に固定され、回転検出を行う共振ピークに不要共振ピークが接近しないためである[8],[9]。そのため偏波変動誘起雑音を大幅に除去できる可能性がある。

しかし実際には、理想的な 90° 接続を行うことは不可能である。文献[8],[9]では、この接続方法によって2つの共振ピークが位相 π だけ離れて近づかないことの簡単な説明と、それを示す簡単な実験結果とが示されているだけで、誤差低減効果がどれほどあるか等の定量的な議論は全くなされていない。そのため、融着接続部分での 90° 接続の軸ずれ許容度を含めた共振器のパラメータ値の許容度を、正確に評価する必要がある。

本節では、第3章で開発した偏波変動誘起雑音の評価手法を用いて、出力誤差の低減効果と共振器のパラメータ値の許容度の評価を行う。

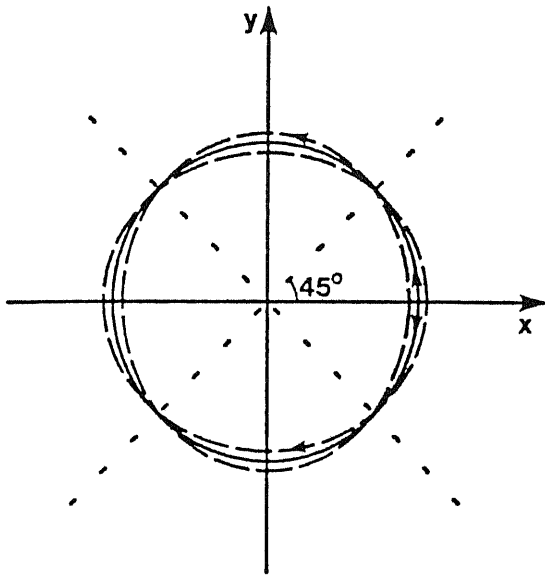
4-4-1. 固有偏波状態の評価結果[22],[23]

出力誤差を評価する前に、固有偏波状態と、共振器1周での2つの固有偏波状態間の位相差の評価を行った。

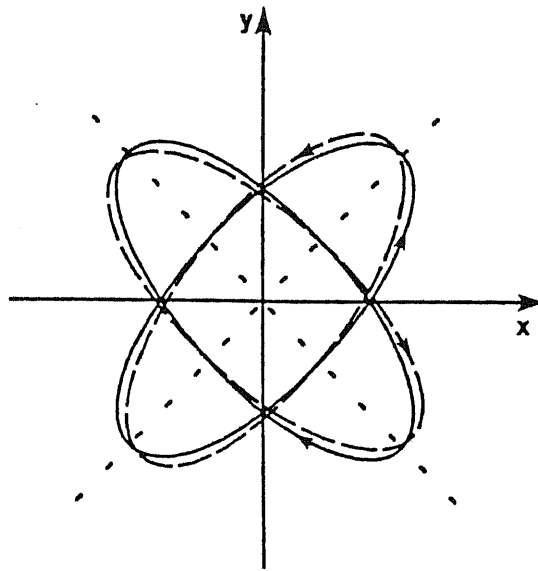
図4・8では、固有偏波状態の例をいくつか示している。 $\Delta\beta L$ (共振器1周での偏波維持光ファイバの縦・横偏波間の位相差) $=90^\circ$ の場合の固有偏波状態を、パラメータの1つである $\Delta\beta\Delta L$ を変化させて表示している。実線は理想的な接続(融着接続部分の偏波軸回転角度 $\theta=90^\circ$)が行われた場合の固有偏波状態を表し、破線は理想的な接続から 10° ずれた接続($\theta=80^\circ$)が行われた場合の固有偏波状態を表している。

図から明らかなように、 $\theta=90^\circ$ の場合、共振する偏波状態である固有偏波状態は円偏波、 45° 傾いた楕円・直線偏波のいずれかになっている。共振器への入射偏光がファイバの偏波軸に一致していると仮定すると、このことは2つの共振ピーク間の励振比率が正確に1となることを意味している。

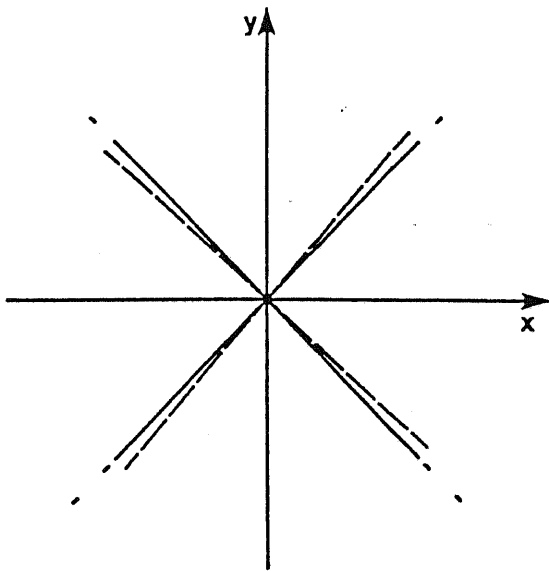
ところが $\theta=80^\circ$ になり理想的な接続からずれると固有偏波状態は、円偏波が楕円偏波になり、 45° 傾いた楕円・直線偏波は傾きが 45° からずれてきている。これは不要共振ピークの励振比率が増加することを意味しているが、共振ピーク間



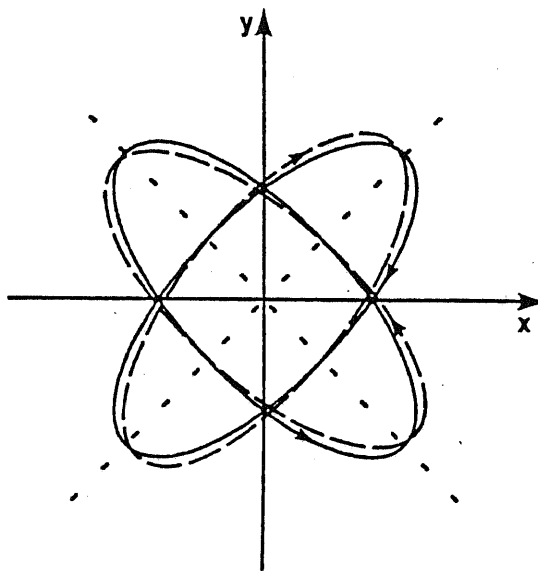
(a) $\Delta\beta\Delta L=0^\circ$



(b) $\Delta\beta\Delta L=45^\circ$

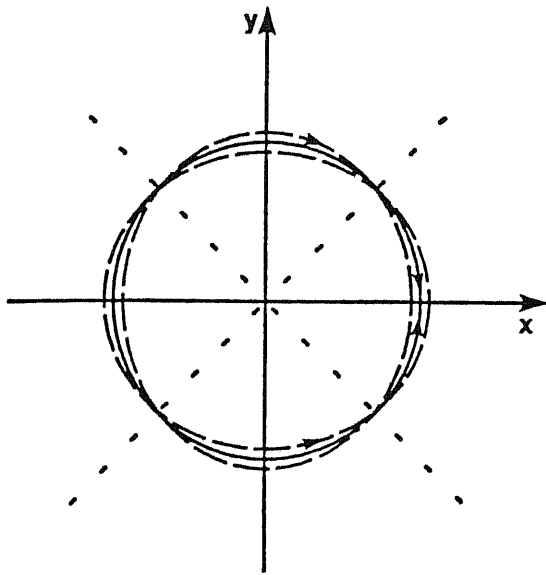


(c) $\Delta\beta\Delta L=90^\circ$

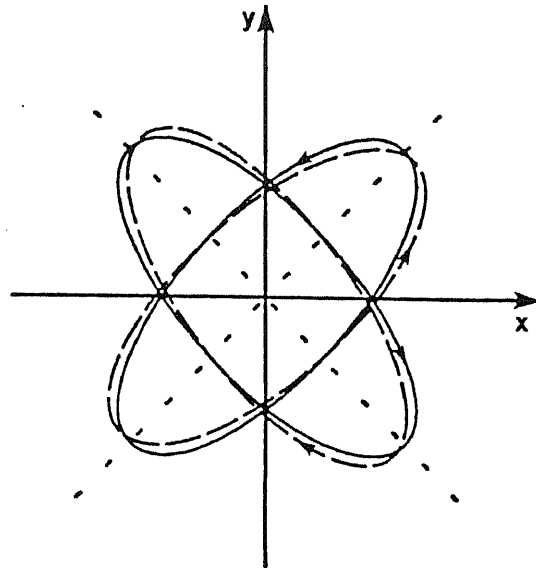


(d) $\Delta\beta\Delta L=135^\circ$

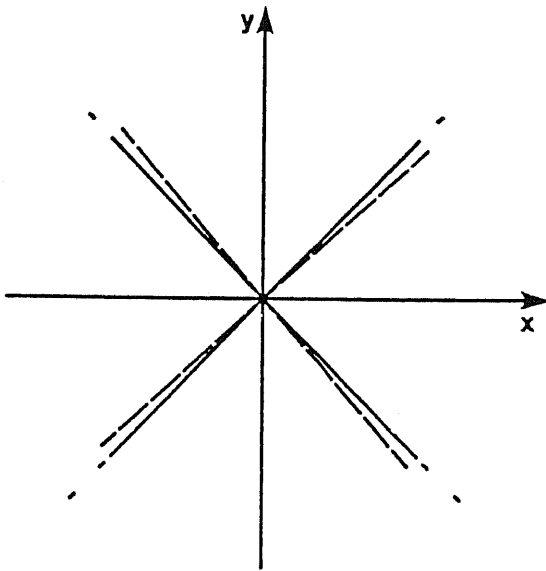
図4・8 固有偏波状態の例 パラメータ： $\Delta\beta\Delta L$ ($\Delta\beta$ ：ファイバの複屈折， ΔL ：融着によって分けられる共振器の長さの差)，共振器1周でのファイバの偏波軸間の位相差： $\Delta\beta\Delta L=90^\circ$ ，—：偏波軸回転 $\theta=90^\circ$ の時の固有偏波状態，---： $\theta=80^\circ$ の時の固有偏波状態，x：ファイバの横軸，y：ファイバの縦軸



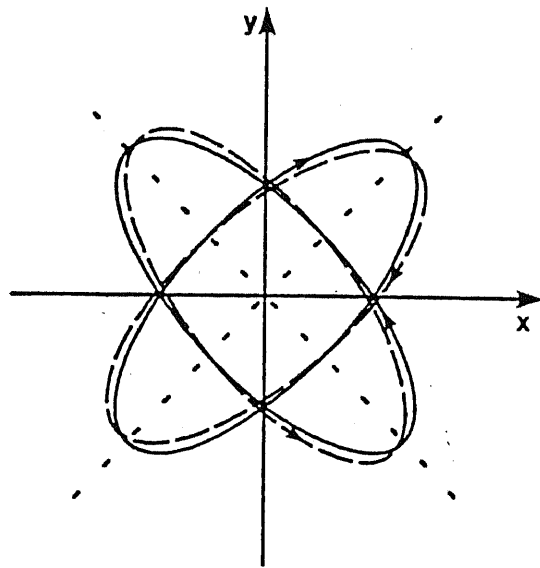
(e) $\Delta\beta\Delta L=180^\circ$



(f) $\Delta\beta\Delta L=225^\circ$



(g) $\Delta\beta\Delta L=270^\circ$



(h) $\Delta\beta\Delta L=315^\circ$

図4・8 固有偏波状態の例 パラメータ： $\Delta\beta\Delta L$, $\Delta\beta\Delta L=90^\circ$, — : $\theta=90^\circ$ の時の固有偏波状態, -- : $\theta=80^\circ$ の時の固有偏波状態, x: ファイバの横軸, y: ファイバの縦軸

の励振比率はまだほとんど1であると考えられる。

偏波軸の回転角度 $\theta \sim 90^\circ$ の場合、 $\Delta\beta L$ (温度変動) に対する、共振器1周での2つの固有偏波状態の位相差 $\Delta\beta'L$ の変動の様子を図4・9に示した。パラメータとして θ を取り、 85° から 95° の間について考えている。

図から明らかなように $\Delta\beta'L$ は、 θ が 90° からずれるにつれて 180° (2つの共振ピークが最も離れた状態) からずれてきている。このずれの量は、 $\Delta\beta L=180^\circ$ では常に0である。また $\Delta\beta L=0^\circ$ で最大となり、その値は 90° からの軸ずれ誤差の高々2倍程度である。つまりこのことは、 θ が 90° から数度ずれても2つの共振ピークはそれほど近づかないことを意味している。

4-4-2. 出力誤差の評価結果[22]-[27]

右回り光の共振点の理想値からのずれ(出力誤差)を温度変動 $\Delta\beta L$ に対して評価した結果を図4・10に示す。

この図では共振器のフィネス F をパラメータに取っている。入射光偏光の偏波維持光ファイバの偏波軸に対する軸ずれ θ_i は 0° であるとした。これは最も安定な入射方法である。パラメータ値のひとつである $\Delta\beta\Delta L$ によって固有偏波状態が大きく変化することは4-4-1節で示したが、この値は出力誤差が最悪となるように選んである。このことにより、典型的な誤差を求めていることになる。

図4・10より、以下のようなことがわかる。

(1) 偏波軸回転角 θ が 90° からずれるにつれて、出力誤差が増加している。4-4-1節での検討により、 θ が 90° からずれると、不要共振ピークの励振比率が増加するが、その増加量はさほど大きくないことが明らかとなった。また、2つの共振ピーク間の位相差は π からずれてくるが、そのずれの量は接続軸ずれ誤差の高々2倍程度であることがわかった。そのため、出力誤差の増加量はさほど大きくはなっていない。

(2) $\Delta\beta L$ が 180° に近づくとつれ、 θ の値に関わらず出力誤差は大幅に低下している。これは図4・9より明らかなように、この場合、2つの共振ピーク間の位相差が π 離れた理想状態に近づいたためである。

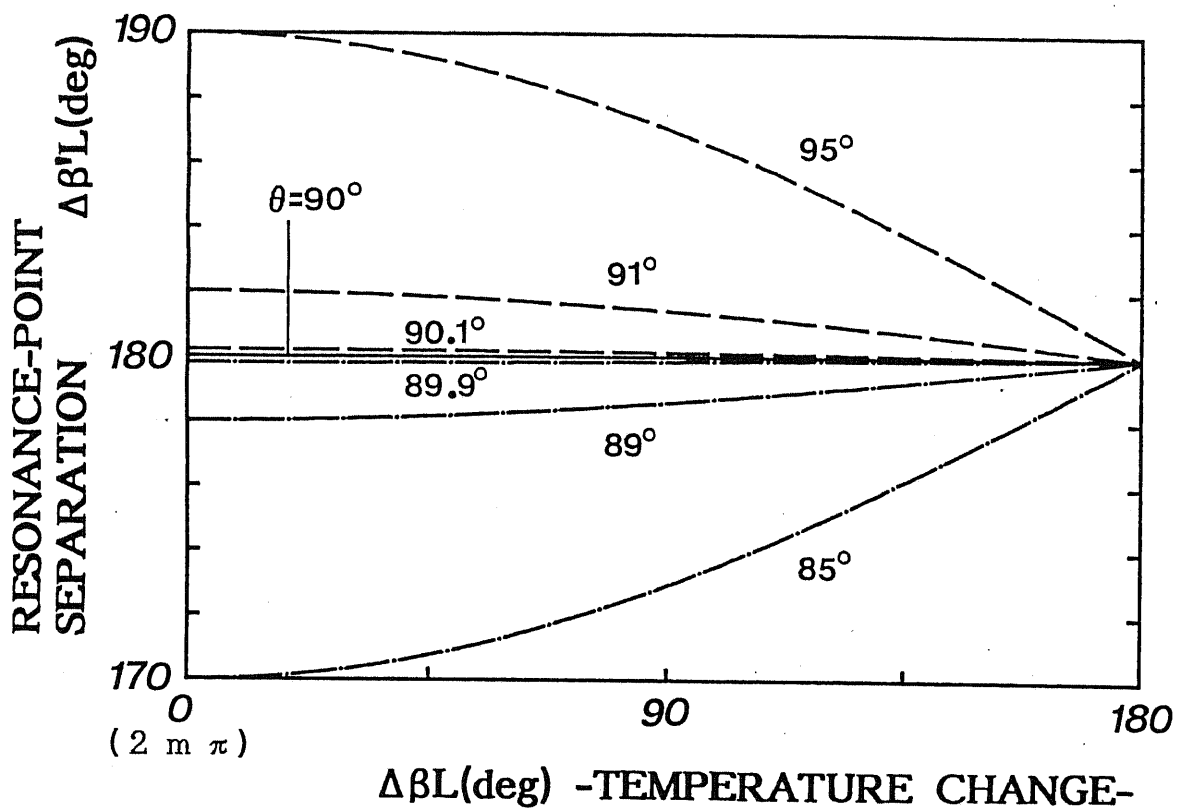


図4・9 2つの共振ピークの位相差 共振器のフィネス: $F=100$

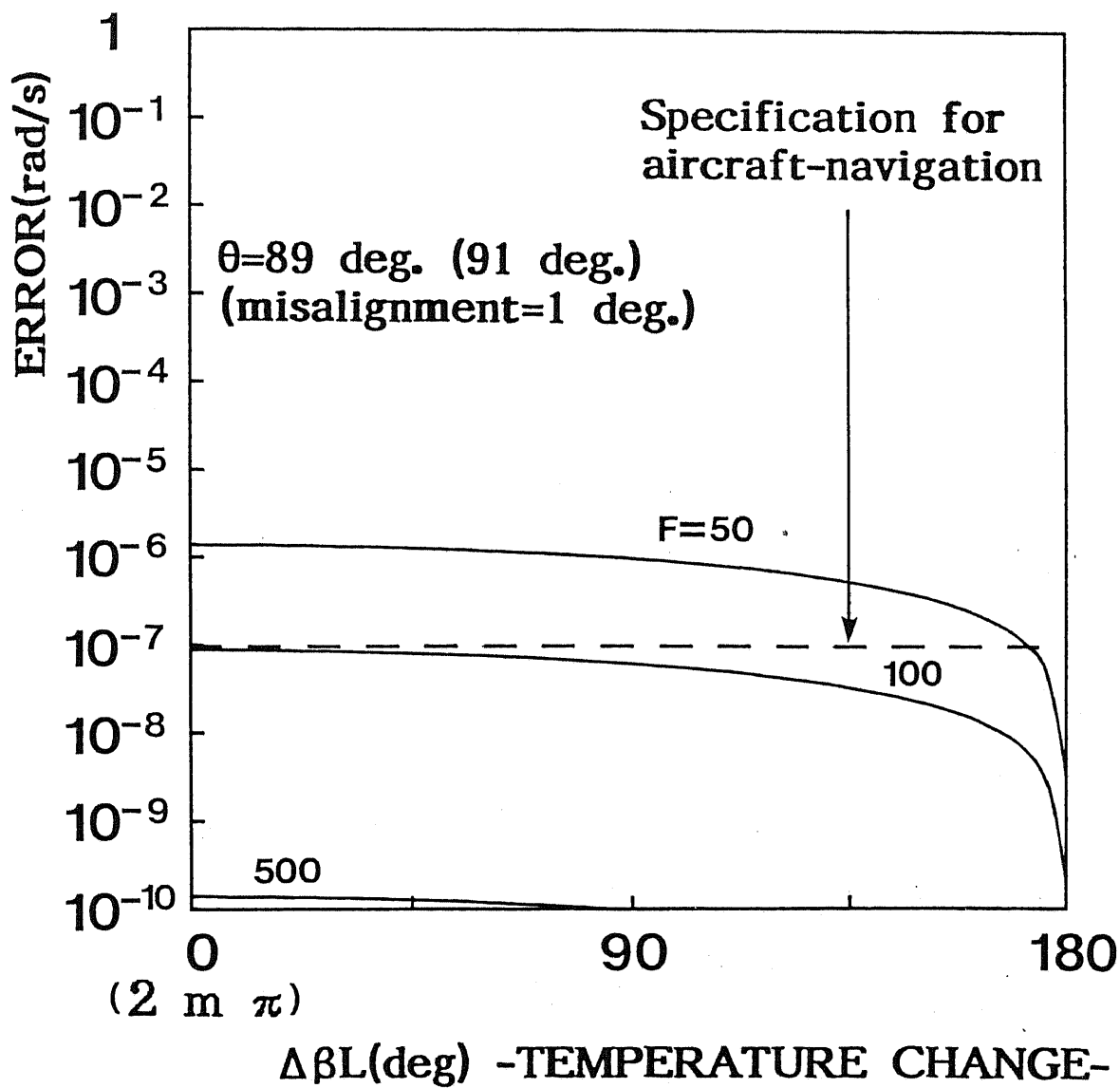


図4・10(a) 出力誤差と温度変動との関係 パラメータ：共振器のフィネスF, m: 整数, 入射光とファイバ偏波軸との軸ずれ: $\theta_i=0^\circ$, ファイバの複屈折: $\Delta\beta=5,000\text{rad/m}$, ファイバ長: $L=15\text{m}$, 波長: $\lambda=1.3\mu\text{m}$, 共振器半径: $r=0.05\text{m}$

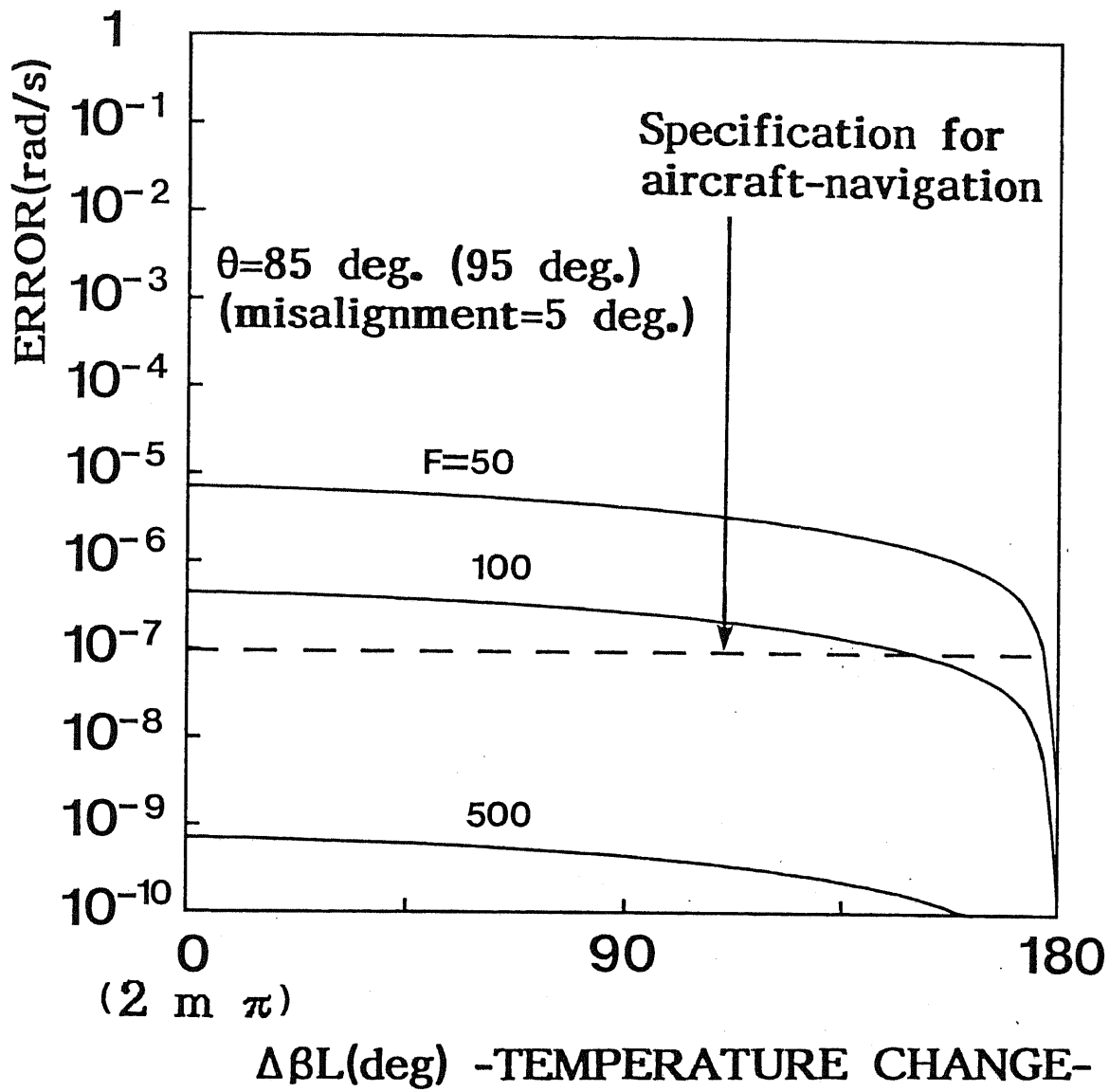


図4・10(b) 出力誤差と温度変動との関係 パラメータ：共振器のフィ
ネスF, m: 整数, $\theta_i=0^\circ$, $\Delta\beta=5,000\text{rad/m}$, $L=15\text{m}$, $\lambda=1.3\mu\text{m}$, $r=0.05\text{m}$

(3) 共振器のフィネスを増すことは、出力誤差低減に非常に有効である。これは、2つの共振ピークの間隔が充分離れているため、フィネスを増す、つまり共振ピークが鋭くなることにより、急激に他の共振点付近への影響が低減するためである。

(4) 偏波維持光ファイバの融着軸ずれ誤差は、平均 1° である[10],[11]。また偏波維持光ファイバで構成した共振器で、40から120程度のフィネスが典型的な値として達成されている[7],[28],[29]。さらに、フィネス1,000の偏波維持光ファイバ共振器の構成例もある[30]。そのため、慣性航法用に必要な性能($\sim 10^{-7}$ rad/s)が現存の共振器のパラメータ値に対し十分な許容度を持って達成できることがわかる。

実用的な見地から、所望の零点安定性を得るために必要なパラメータ値を把握することは重要である。そこで、所望の性能を得るために必要な共振器のフィネスと融着部分での軸ずれ角度との関係を図4・11のように求めた。パラメータ値は、図4・10と同じである。またこの図では、 $\Delta\beta L=0^\circ$ での最悪値を用いている。この図を用いれば、必要な性能を得るための共振器パラメータの許容度を簡単に評価することができる。さらに、他のパラメータ(波長 λ' 、共振器長 L' 、共振器半径 r')に対する性能(零点安定性 Ω')も、図4・10と以下の式を用いると簡単に得られる。

$$\Omega' = \left(\frac{\lambda'}{L' r'} \right) \left(\frac{L r}{\lambda} \right) \Omega = \left(\frac{\lambda'}{L' r'} \right) \left(\frac{0.75 \text{ m}^2}{1.3 \mu\text{m}} \right) \Omega. \quad (4 \cdot 1)$$

ただし、 Ω 、 λ 、 L 、 r はそれぞれ図4・10における零点安定性、波長、共振器長、共振器半径である。偏波維持光ファイバの場合、ファイバの複屈折は十分に大きいので、式(4・1)には影響を与えない。

最後に、左右両回り光の共振特性を共に考慮した厳密なモデルを用いて、左右両回り光間の差動出力の評価を行った。図4・12に出力バイアスの評価結果を

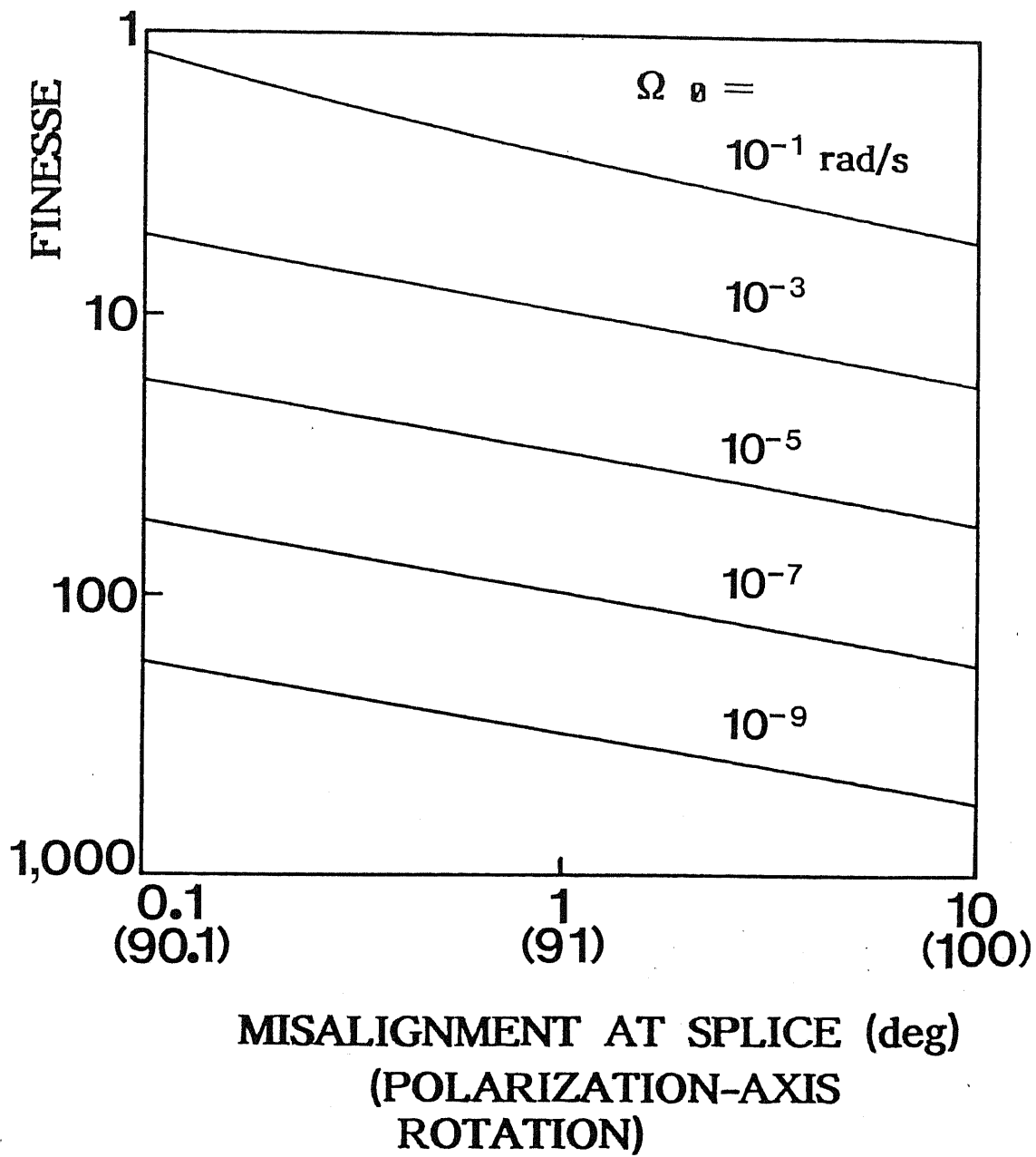


図4・11 所望のジャイロ零点安定性を得るためのフィネスと軸ずれ角度との関係 $\theta_i = 0^\circ$, $\Delta\beta = 5,000 \text{ rad/m}$, $L = 15 \text{ m}$, $\lambda = 1.3 \mu \text{ m}$, $r = 0.05 \text{ m}$

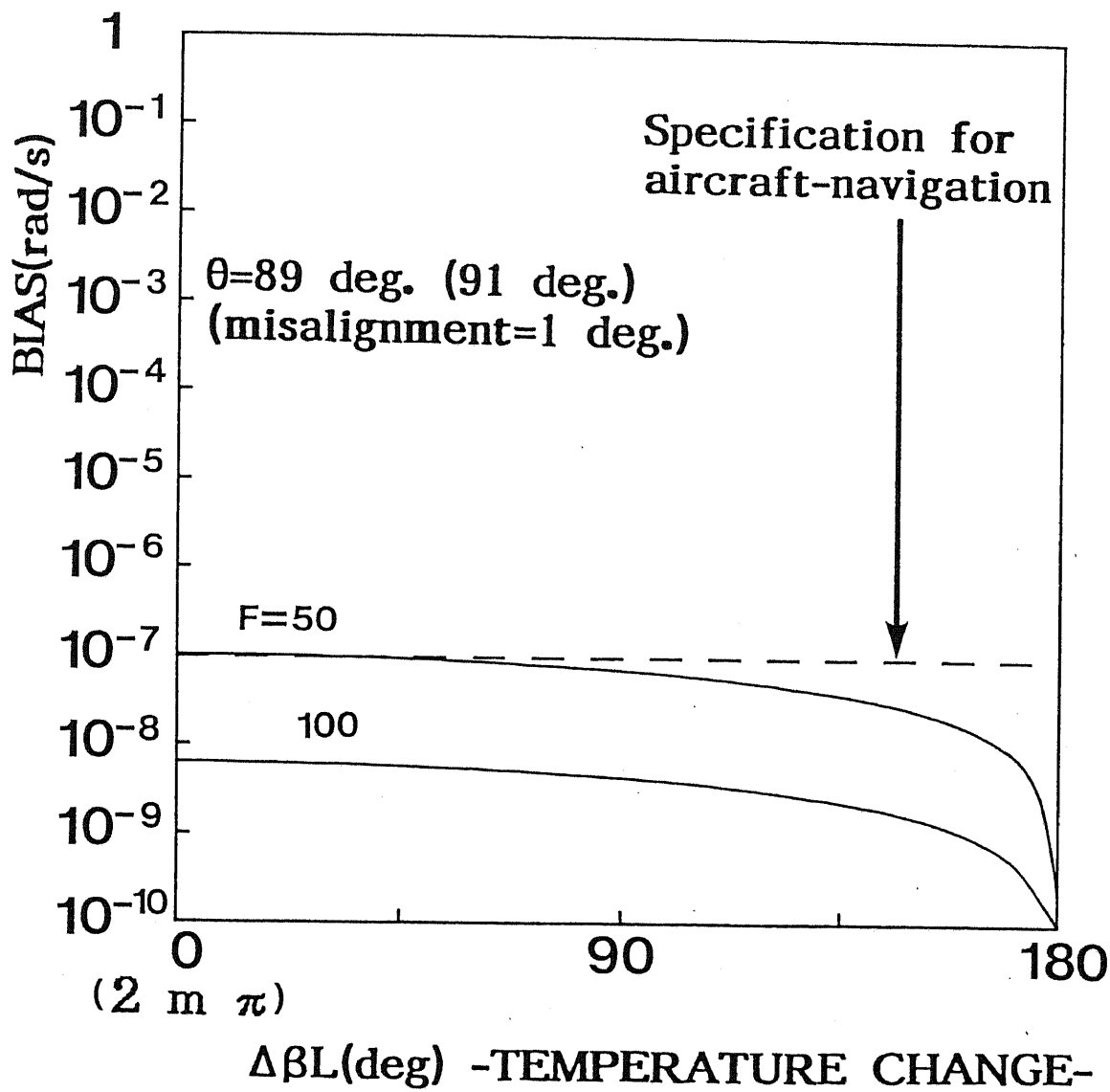


図4・12(a) 出力バイアスと温度変動との関係 パラメータ：共振器の
 フィネス F , m : 整数, 右回り入射光とファイバとの軸ずれ: $\theta_{icw}=0^\circ$, 左回り入
 射光とファイバとの軸ずれ: $\theta_{icw}=1^\circ$ $\Delta\beta=5,000\text{rad/m}$, $\lambda=1.3\mu\text{m}$, $L=15\text{m}$, r
 $=0.05\text{m}$

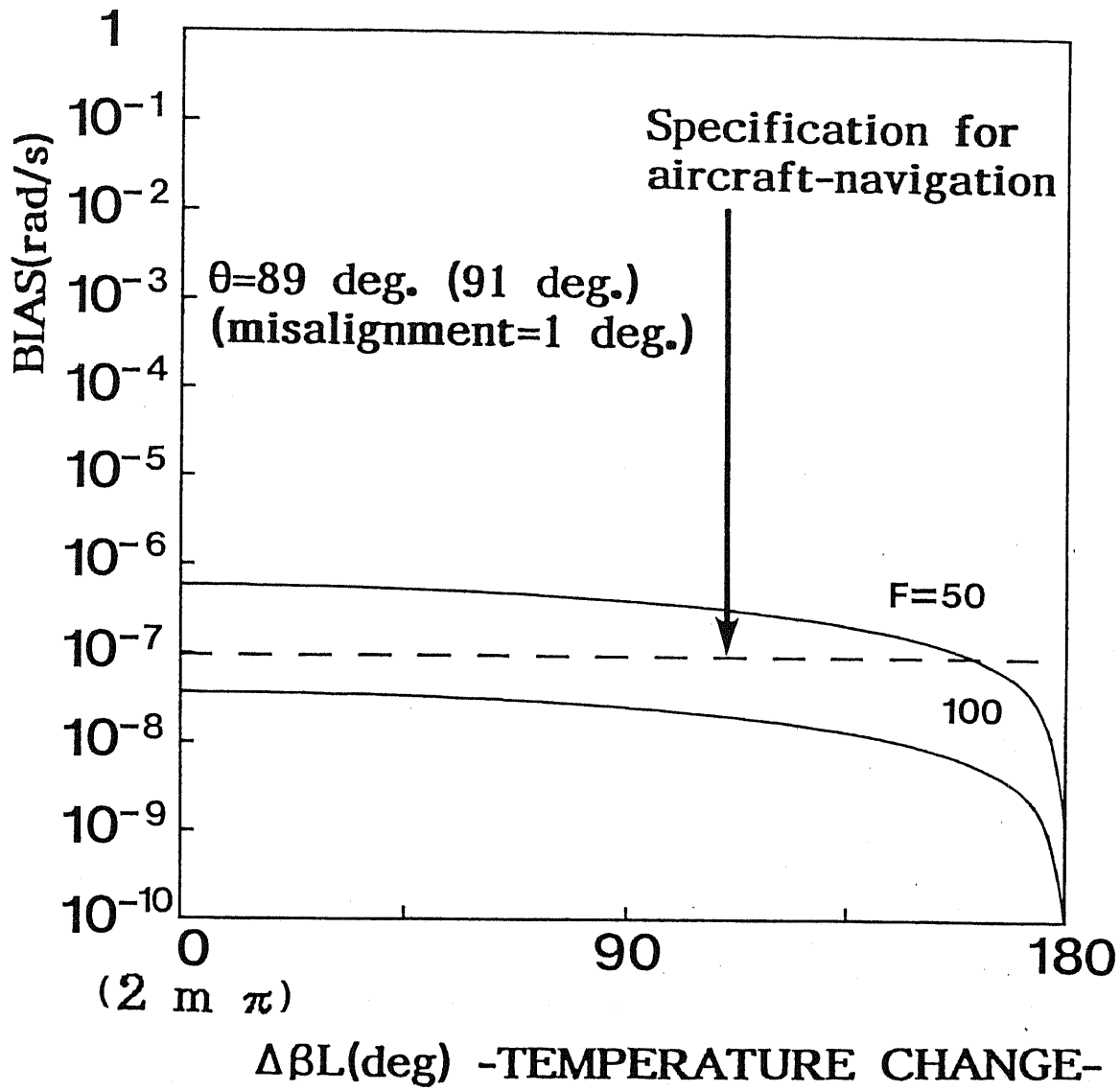


図4・12(b) 出力バイアスと温度変動との関係 パラメータ：共振器の
 フィネスF, m : 整数, $\theta_{icw}=0^\circ$, $\theta_{icw}=5^\circ$, $\Delta\beta=5,000\text{rad/m}$, $\lambda=1.3\mu\text{m}$, L
 $=15\text{m}$, $r=0.05\text{m}$

示す。

図4・12(b)より、両回り光間の入射光偏波軸ずれの差が5度と非常に大きな場合でも、典型的な共振器のパラメータ値で慣性航法に必要な性能が得られることがわかる。2つの共振ピークの間隔がほぼ π であるため、片回り光の入射光軸ずれが非常に大きく不要共振ピークの励振比率が大きくなっても、両回り光間の動作点のずれは小さくなる。そのため差動をとる実際のジャイロ系では、出力バイアスが小さくなるためである。

4-5. まとめ

偏波維持光ファイバで構成されたリング共振器中での、偏波軸ずれによって生ずる偏波変動の除去手法を3つ検討した。

光ファイバ偏光子を共振器の入射端に設けた場合、左右両回り光の与える出力を差動的に得ることで、偏波変動誘起雑音をある程度除去可能なことを確認した。しかし高精度のジャイロ性能を得るためには、偏光子の消光比に対する要求がかなり厳しいこともわかり、この手法は中精度ジャイロの実現に適することが明らかになった。

リング共振器を単一偏波光ファイバあるいは光ファイバ偏光子で構成した場合、典型的な共振器のパラメータ値に対して、中程度のジャイロ性能が実現可能なことがわかった。また、融着接続を左右対称な位置で行った場合には、そのほかのどんな位置で融着接続を行う場合よりも、出力誤差は小さくなることがわかった。

共振器中で偏波維持光ファイバの偏波軸を 90° 回転接続した場合、軸ずれ角度、フィネス、温度変動等の共振器のパラメータ値に対し十分な許容度をもって、慣性航法用に必要な高精度のジャイロ性能内に雑音を抑えることができることがわかった。

参考文献

- [1] 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.*, vol. 25, no. 15, pp. 2606-2612, Aug. 1986.
- [2] 保立, 瀧口, 村上, "偏波維持光ファイバで構成した共振器中での偏波軸ずれによる受動型リング共振方式光ジャイロの出力変動," 電子情報通信学会, 光・量子エレクトロニクス研究会, paper OQE89-9, pp. 1-6, 仙台, 1989年5月.
- [3] K. Hotate, K. 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," in *Proc. OFS '89*, paper Mo-4-2, pp. 94-100, Paris, France, Sept. 1989.
- [4] 瀧口, 保立, "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," 電子情報通信学会, 光・量子エレクトロニクス研究会, paper OQE89-79, pp. 1-6, 東京, 1989年11月.
- [5] K. Takiguchi and K. Hotate, "Manner to reduce the bias of optical passive ring-resonator gyro caused by the misalignment of the polarization-axis in the resonator," in *Proc. OFSET '90*, paper 12B3-2, pp. 109-118, Fukuoka, Japan, Oct. 1990.
- [6] K. Takiguchi and K. Hotate, "Bias of an optical passive ring-resonator gyro caused by the misalignment of the polarization-axis in the polarization-maintaining fiber resonator," to be published in *J. Lightwave Technol.*
- [7] Z. K. Ioannidis, R. Kadiwar, and I. P. Giles, "Polarization effects in highly birefringent fibre ring resonator," in *Proc. OFS '89*, paper Mo-4-5, pp. 115-121, Paris, France, Sept. 1989.
- [8] G. A. Sanders, R. B. Smith, and G. F. Rouse, "Novel polarization-rotating fiber resonator for rotation sensing applications," in

- Proc. SPIE OE/FIBERS '89, paper 1169-74, pp. 373-381, Boston, U.S.A., Sept. 1989.
- [9] P. Mouroulis, "Polarization fading effects in polarization-preserving fiber ring resonators," in Proc. SPIE OE/FIBERS '89, paper 1169-46, pp. 400-412, Boston, U.S.A., Sept. 1989.
- [10] Y. Kikuchi, K. Himeno, N. Kawakami, and R. Yamauchi, "Splicing characteristics of polarization maintaining optical fibers," in Proc. IOOC '89, paper 19B3-12, pp. 68-69, Kobe, Japan, July 1989.
- [11] T. Watanabe, K. Osaka, E. Sasaoka, S. Tanaka, and Y. Asano, "Splicing of polarization-maintaining fibers," in Proc. OFS '89, paper Tu-7-8, pp. 346-352, Paris, France, Sept. 1989.
- [12] Y. Sasaki, T. Hosaka, and J. Noda, "Low crosstalk polarization-maintaining fiber with an 11 km length," Electron. Lett., vol. 20, no. 19, pp. 784-785, Sept. 1984.
- [13] 岡本, "光ファイバの新動向," 光情報材料, 第2章, 神谷編, 丸善, pp. 5-47, 1988年12月.
- [14] M. P. Varnham, D. N. Payne, A. J. Barlow, and E. J. Tarbox, "Coiled-birefringent-fiber polarizer," Opt. Lett., vol. 9, no. 7, pp. 306-308, July 1984.
- [15] R. A. Bergh, H. C. Lefevre, and H. J. Shaw, "An overview of fiber-optic gyroscopes," J. Lightwave Technol., vol. LT-2, no. 2, pp. 91-107, Apr. 1984, Invited.
- [16] 瀧口, 保立, "受動型リング共振方式光ジャイロにおける偏波変動誘起雑音の単一偏波光ファイバによる低減," 電子情報通信学会, 光・量子エレクトロニクス研究会, paper OQE91-39, pp. 43-48, 東京, 1991年6月.
- [17] 瀧口, 保立, "受動型リング共振方式光ジャイロにおける偏波変動誘起雑音の単一偏波光ファイバによる低減," 電子情報通信学会, 秋季大会, paper C-282, p. 4-312, 東京, 1991年9月.
- [18] K. Takiguchi and K. Hotate, "Reduction of a polarization-fluctuation induced error in an optical passive ring-resonator gyro by

- using a single-polarization optical fiber," in Proc. MOC '91, paper L25, pp. 250-253, Yokohama, Japan, Oct. 1991.
- [19] K. Takiguchi and K. Hotate, "Reduction of a polarization-fluctuation induced error in an optical passive ring-resonator gyro by using a single-polarization optical fiber," submitted to J. Light-wave Technol.
- [20] K. Himeno, Y. Kikuchi, N. Kawakami, O. Fukuda, and K. Inada, "A high-extinction-ratio and low-loss single-mode single-polarization optical fiber," in Proc. OFS '88, paper FEE2, pp. 472-475, New Orleans, U.S.A., Jan. 1988.
- [21] T. Hosaka, Y. Sasaki, and K. Okamoto, "3 km-long single-polarization single-mode fiber," Electron. Lett., vol. 21, no. 22, pp. 1023-1024, Oct. 1985.
- [22] 瀧口, 保立, "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)," 電子情報通信学会, 光・量子エレクトロニクス研究会, paper OQE89-137, pp. 19-24, 東京, 1990年3月.
- [23] K. Takiguchi and K. Hotate, "Evaluation of the output error in an optical passive ring-resonator gyro with a 90-deg. polarization axis rotation in the polarization-maintaining fiber-resonator," in Proc. OEC '90, paper 13C2-2, pp. 264-265, Chiba, Japan, July 1990.
- [24] 瀧口, 保立, "偏波軸を90度回転接続した共振器を持つ受動型リング共振方式光ジャイロの出力誤差評価," 電子情報通信学会, 秋季全国大会, paper C-297, p. 4-339, 広島, 1990年10月.
- [25] K. Takiguchi and K. Hotate, "Evaluation of the output error in an optical passive ring-resonator gyro with a 90° polarization-axis rotation in the polarization-maintaining fiber resonator," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 3, no. 1, pp. 88-90, Jan. 1991.
- [26] 瀧口, 保立, "偏波軸を90度回転接続した共振器を持つ受動型リング共振方式光ジャイロの出力誤差評価(II)," 電子情報通信学会, 春季全国大会, paper C-407, p. 4-424, 徳島, 1991年3月.

- [27] 瀧口, 保立, “複数の雑音除去手法を取り入れた受動型リング共振方式光ジャイロ,” 電子情報通信学会, 光・量子エレクトロニクス研究会, paper OQE91-79, pp. 13-18, 北九州, 1991年9月.
- [28] 高橋, 田井, 久間, “リング共振形光ファイバジャイロにおける偏波結合の影響,” 電子情報通信学会論文誌, vol. J72-C-1, no. 10, pp. 610-618, 1989年10月.
- [29] 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,” *Photon. Technol. Lett.*, vol. 2, no. 1, pp. 75-77, Jan. 1990.
- [30] R. P. Dahlgren and O. M. Laznicka, “Ultra-high finesse polarization-maintaining fiber resonator,” in *Proc. SPIE OE/FIBERS '89*, paper 1169-44, pp. 382-387, Boston, U.S.A., Sept. 1989.

第5章 2値位相変調法を用いた 後方散乱誘起雑音の無調整除去手法

5-1. はじめに

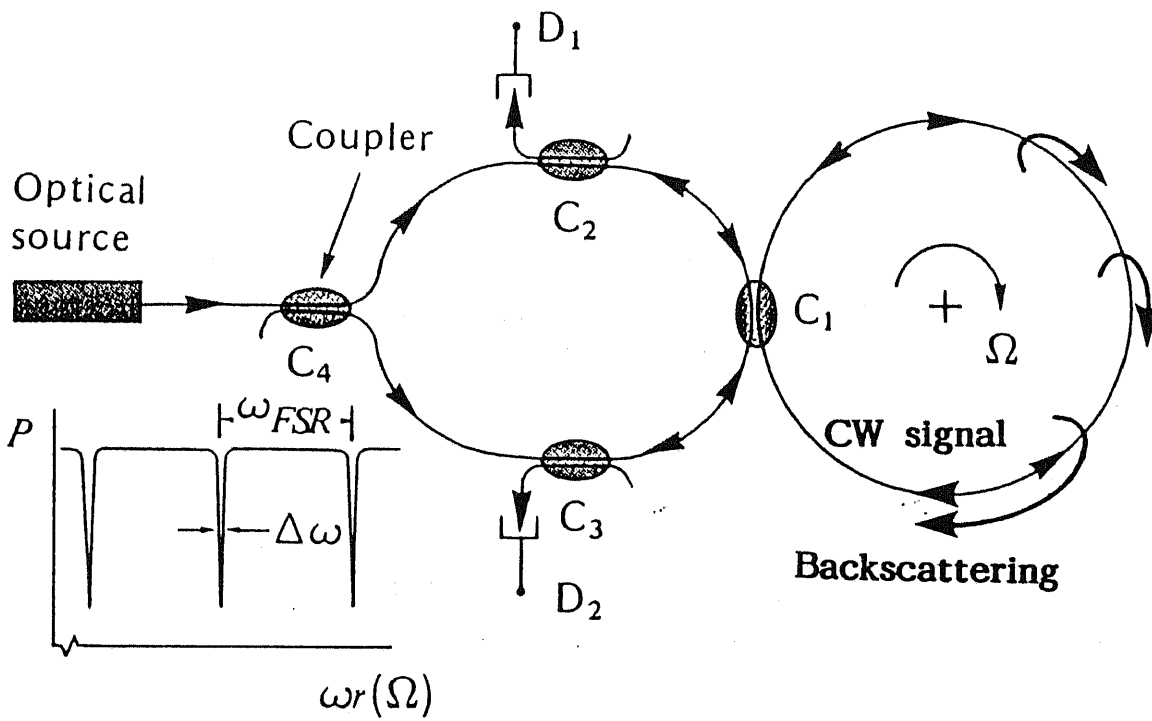
受動型リング共振方式光ジャイロの最も大きな雑音要因の1つとして、後方散乱光による影響が存在する。これは、散乱光の強度自身による影響[1]-[3]と、散乱光とそれを生み出した信号光とは逆回りに伝搬する信号光との干渉成分の影響[1], [4]-[6]に分けられる。この様子を図5・1に示す。

前者は、回転入力時に双峰特性を示し、ジャイロ出力の直線性の劣化をもたらす。この影響は、両回り光に別々の周波数で位相あるいは周波数変調をかけて共振点検出を行うことで除去できる[1]-[3]。

後者の影響については、ジャイロを開ループで構成した場合には、両回り光間の差周波数で変化する干渉が起こり、出力が大きく変化する[1], [4], [5]。閉ループで構成した場合には、低回転角速度時に引き込み現象が起こり回転検出が不可能になって、出力に非線形性が現れる（リングレーザジャイロにおけるロックイン現象[7]と同様）[6]。この影響の除去手法としては、リング共振器に入射する前の一方の光に搬送周波数成分を抑圧するように正弦波で位相あるいは周波数変調をかけ、干渉成分を信号帯域外に出す方法が従来よく用いられてきた[5], [6], [8], [9]。しかし、この方法は、搬送波成分を零とするための変調パラメータの調整に精度と安定度が要求されるためにより抑圧比をとることができず、航空機用等、高い性能が要求されるジャイロに用いることは不適當であると考えられる。

本章では、光波に、2値位相変調(Binary Phase Shift Keying: B-PSK)を施すだけで、無調整、かつ精度よくこの雑音成分をなくす方式を新しく提案する。2値位相変調された光波は本質的に搬送波が除去されており、音響光学変調器とダブルバランストミキサ(Double Balanced Mixer: DBM)とを用いて簡単に行える。

実際に実験系を構成して、この手法の有効性を示すことにも成功したので、その結果についても述べる。



***Degradation of the linearity**

***Degradation of the resolution / Lock-in phenomena**

图 5 · 1 後方散乱誘起雜音

5 - 2. 無調整除去手法の原理 [10]-[13]

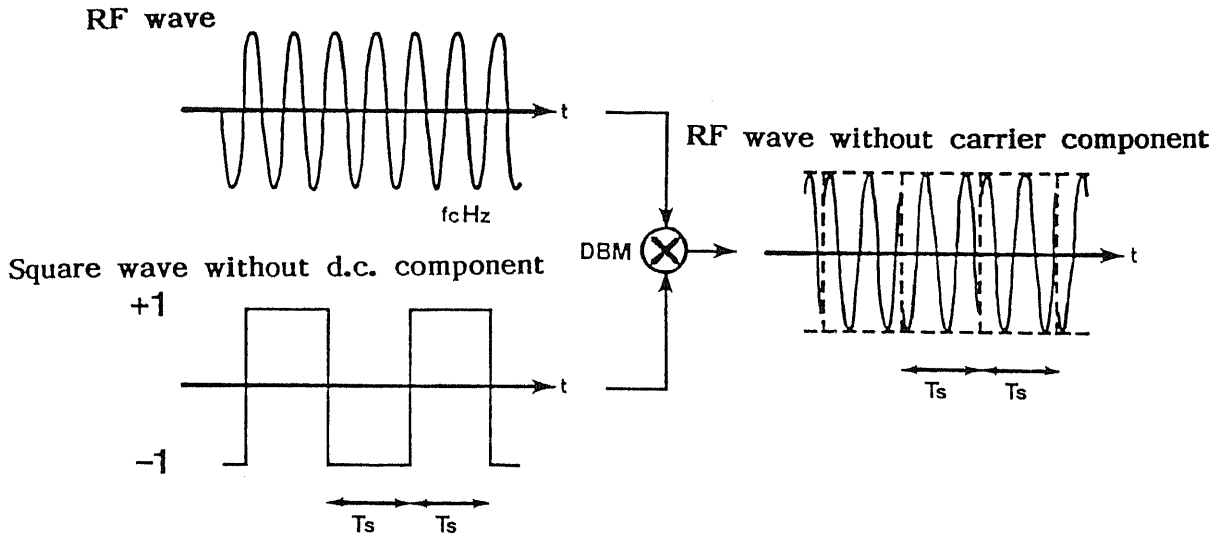
5 - 2 - 1. 2 値位相変調法による搬送波の抑圧

受動型リング共振方式光ジャイロにおいては、散乱光と、それを生み出した信号光とは逆回りに伝搬する信号光との干渉成分の影響 [1], [4]-[6] により、性能が大きく劣化する。この影響の除去手法としては、リング共振器に入射する前の一方の光に搬送波成分を抑圧するように正弦波で位相あるいは周波数変調をかけ、干渉成分を信号帯域外に出す方法が従来よく用いられてきた [5], [6], [8], [9]。

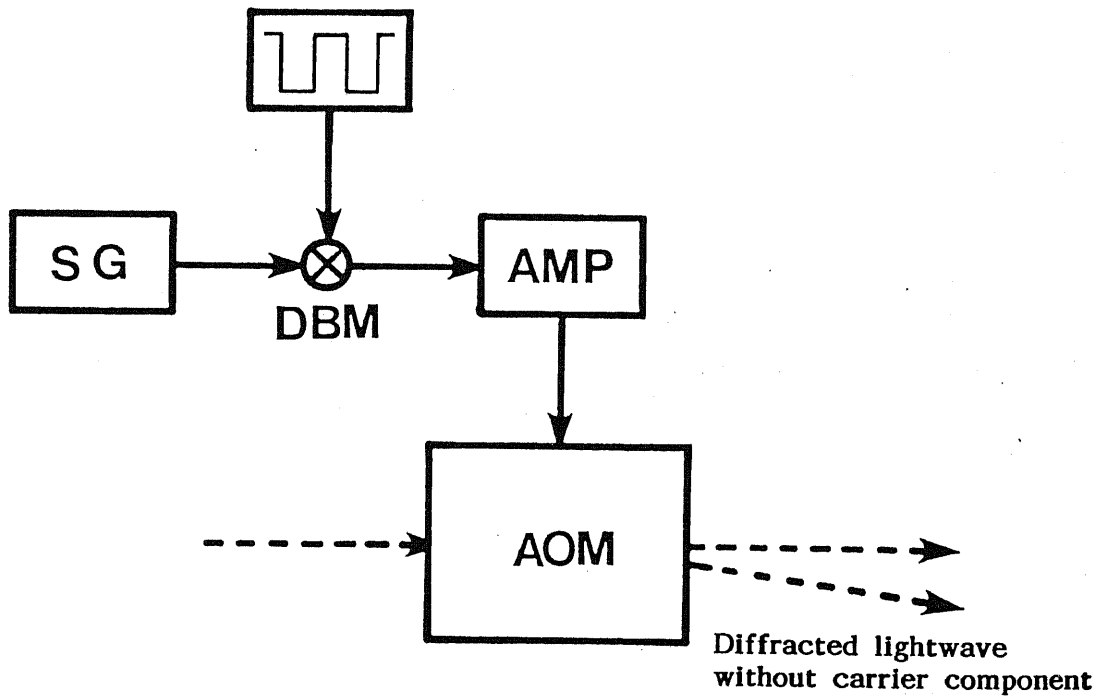
しかし位相変調器を用いる場合、変調効率の温度ドリフトが大きいため、適切な値に変調指数を調節し安定化させておくことは非常に困難である。さらに 10^{-6} rad/s の回転検出を行うためには、変調指数を 5×10^{-6} の精度で調節することが必要である [8], [9]。AOM を用い周波数変調により搬送波を抑圧することは、位相変調を用いる場合ほど困難ではないが、別の問題が生じる。本方式のジャイロにおいて広ダイナミックレンジを達成するためには、系を閉ループとし左右両回り光の周波数が共振周波数に追従する構成にすることが必須である。この場合ジャイロ出力は、左右両回り光の搬送波周波数の差として得られる。しかし一方の搬送波が抑圧された場合、ジャイロ出力を得るためには搬送波を再生することが必要である。上記のような理由のため、有効で実用的な干渉成分の除去手法を実現することが望まれていた。

B-PSK は光通信の分野で用いられている変調方法で、搬送波の位相を 0 あるいは π と変調するものである。このとき位相を、 $0, \pi, 0, \pi, \dots$ と周期的に変調した場合には以下に示すように原理的に搬送波成分が零となる。この B-PSK を電氣的に施すことは簡単で、図 5・2 に示すように、DBM を用いて直流分のないデューティ 50% の方形波をかけ算すればよい。ジャイロ出力信号の帯域は例えば 1Hz と非常に狭いので、側帯波が AOM の帯域内にすべて入るように、変調周波数を低く設定することができる。駆動波形の強度は常に一定であるので、AOM の回折効率の非線形性は変調に影響を及ぼさない。この電氣的に変調された波形により AOM を駆動すれば、回折光を通して簡単に光波に B-PSK が施される。B-PSK では、変調周波数に対する制限は全くない。

図 5・2 のモデルを考えた場合、変調後の AOM 駆動波形のスペクトル $F(f)$ は、以



Binary PSK onto RF wave



Binary PSK onto lightwave

图 5 · 2 B-PSK法

下のようになる。

$$\begin{aligned}
 F(f) &= (2T_s)^{-1} \left\{ \int_0^{T_s} \exp(j2\pi f_c t) \exp(-j2\pi f t) dt \right. \\
 &\quad \left. - \int_{T_s}^{2T_s} \exp(j2\pi f_c t) \exp(-j2\pi f t) dt \right\} \\
 &= - \frac{[\exp\{j2\pi(f_c - f)T_s\} - 1]^2}{j4\pi(f_c - f)T_s} \quad (5 \cdot 1)
 \end{aligned}$$

ただし、 f_c ：搬送波の周波数、である。

式(5・1)は、 $f \rightarrow f_c$ の極限をとると $F(f_c) = 0$ となり、 f_c 、 T_s がいかなる値にあっても搬送波成分を消せることがわかる。この式では、 $2T_s$ という1周期のフーリエ積分を考察したが、5-2-2節で確認されるように、充分長い時間について観察しても同様である。

この方法によれば、ベッセル関数の零点を見つけ出すという困難な作業を必要とする従来の位相・周波数変調法の欠点をすべて解決し、無調整でかつ精度よく搬送波成分を抑圧して、後方散乱光と信号光との干渉成分が除去されることが期待できる。

5-2-2. 変調波形の種類と搬送波抑圧効果

変調波形が図5・2のモデル以外である場合も含めて搬送波の抑圧効果を、AOMを例に考察する。

AOMによる回折光の振幅 $E_d(t)$ は以下のように表現される。

$$E_d(t) = (\varepsilon I_i)^{1/2} \sin\{(\omega + \omega_c)t + \phi(t) + \phi_0\}. \quad (5 \cdot 2)$$

ただし、 ε ：回折効率、 I_i ：入射光強度、 ω ：入射光の角周波数、 ω_c ：AOM駆動搬送波の角周波数、 $\phi(t)$ 、 ϕ_0 (定数)：位相である。また、 ε [14]、 $\phi(t)$ はそれぞれ以下のように表される。

$$\varepsilon = \sin^2\{K(I_a)^{1/2}\} \approx K^2 I_a = K^2 E_a^2, \quad (5 \cdot 3)$$

$$\phi(t)=0 \text{ (変調波が正)}, \pi \text{ (変調波が負)}. \quad (5 \cdot 4)$$

ただし、 K : 定数、 I_a : 音響波強度、 E_a : 音響波振幅、である。

つまり、AOM駆動信号へ施す変調波を $A(t)$ とすると、

$$E_d(t)=CA(t)\sin\{(\omega+\omega_c)t+\phi\}, \quad (5 \cdot 5)$$

となる。ただし、 C : 定数、である。

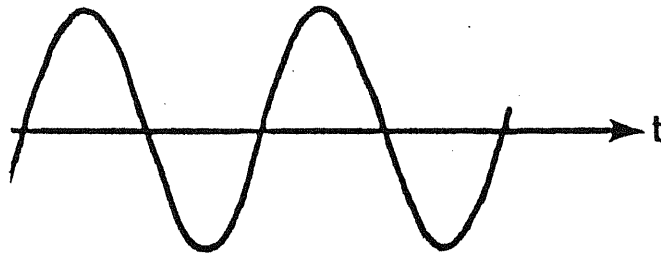
これよりわかるように、一般的に、変調波形 $A(t)$ が直流分を持たなければ、回折光は搬送波成分を持たない。例えば、図5・3に示すいずれの波形で変調してもよいことになる。しかし、図5・3に示した波形はいずれも、同一振幅のとき、図5・2のモデルで考えた方形波よりも高調波成分を多くは持たない。そのため、回折光がすべてファイバに入射すると仮定すると、直流分が若干入ったときの搬送波成分の抑圧比は、図5・3のどの波形よりも図5・2の方形波の方がよいことになる。また、式(5・3)が厳密には非線形であることを考えると、図5・3(c)のような波形は好ましくない。

そのため、以下の実験でもデューティ50%の方形波を変調波形として用いることにする。

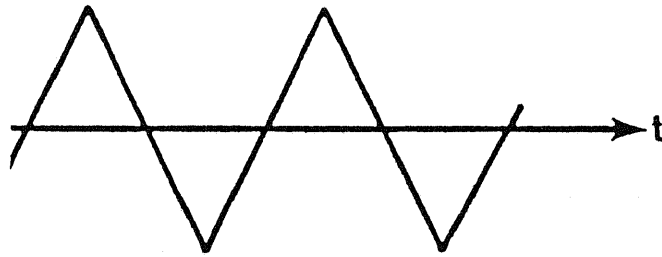
5-3. 実験系の構成[10]-[13]

5-2節の考察に基づき構成した実験系が図5・4である。また、図5・5は実際の系の写真を示している。光源としては半導体レーザ励起YAGレーザ(波長 $1.3\mu\text{m}$)を用いた。線幅は瞬時に10kHz以下であり、ジッターも含めると約300kHzである[15]。リング共振器は偏波維持光ファイバで構成し、長さ直径はそれぞれ、18m、0.1mである。またそのフィネスは約40である。ジャイロ性能に影響を及ぼすフレネル反射を除去するために、光ファイバの端面はすべて斜めに研磨されている。系の構成に必要な偏波維持光ファイバ、定偏波光ファイバカップラ、光ファイバ偏光子の諸元を表5・1-5・4に示す。また、共振器の共振特性を図5・6に示す。

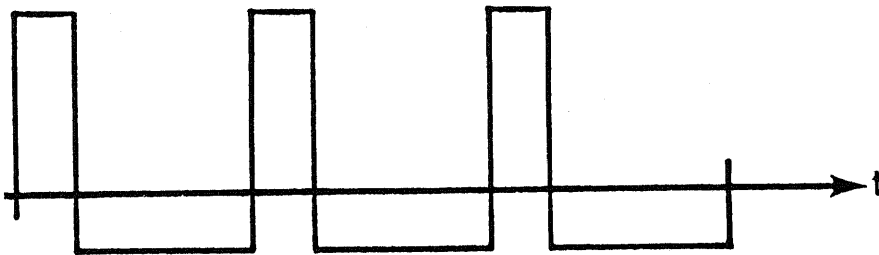
PZTは5kHzの正弦波で変調されている。このため光波に位相変調がかかり、ロックインアンプを用いた同期検波によって共振点検出を行う仕組みとなっている。



(a) 正弦波



(b) 三角波



(c) 正と負の部分の面積が等しい周期的方形波

図 5 - 3 直流分を持たない周期波形の例

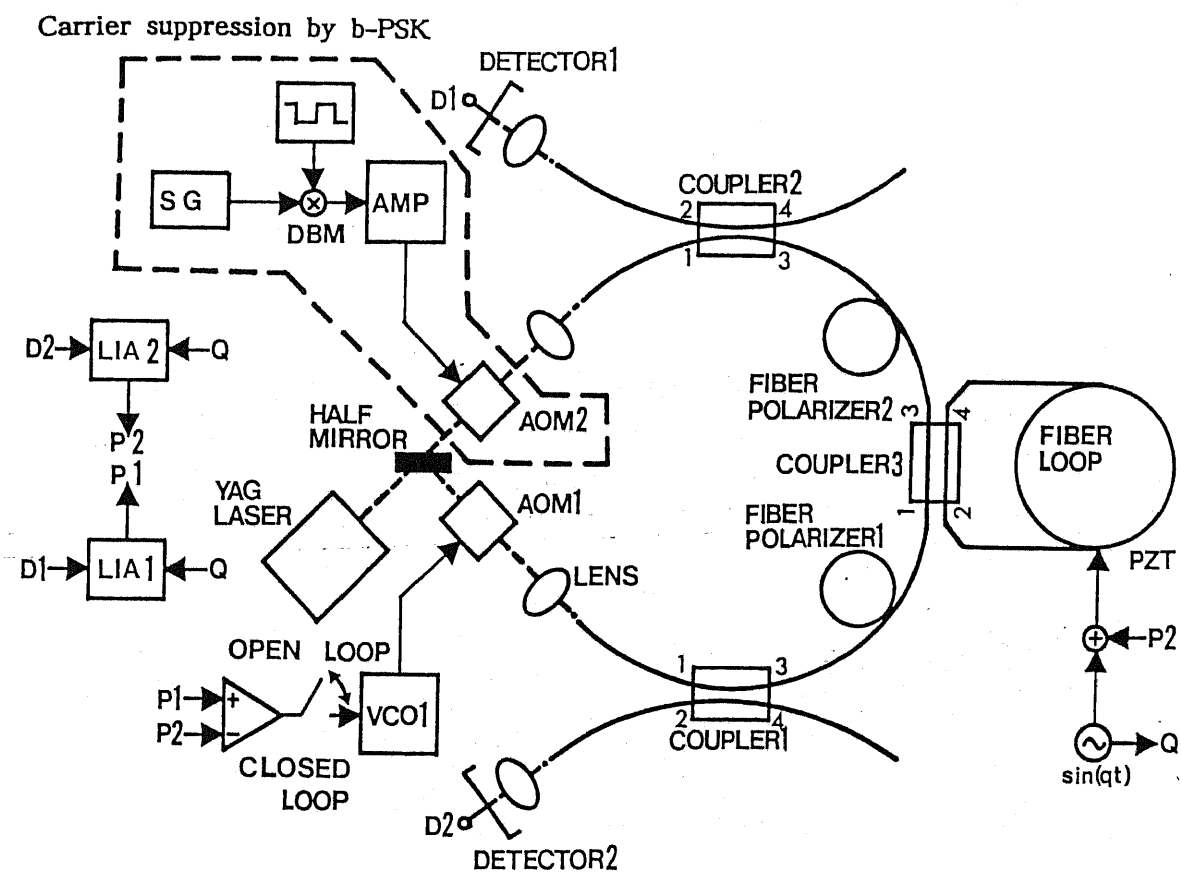
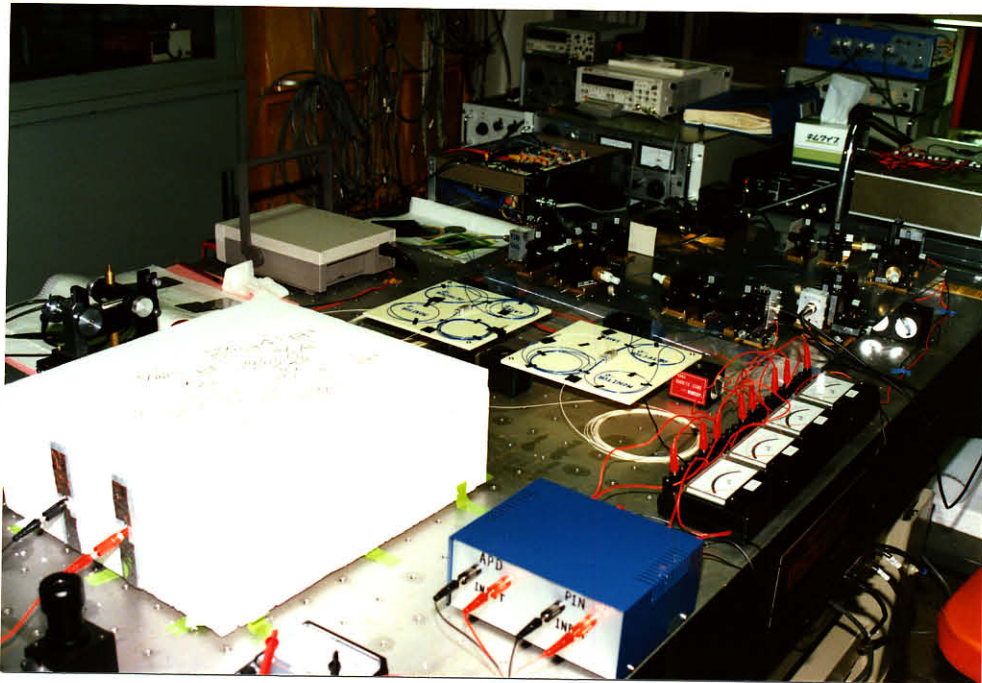
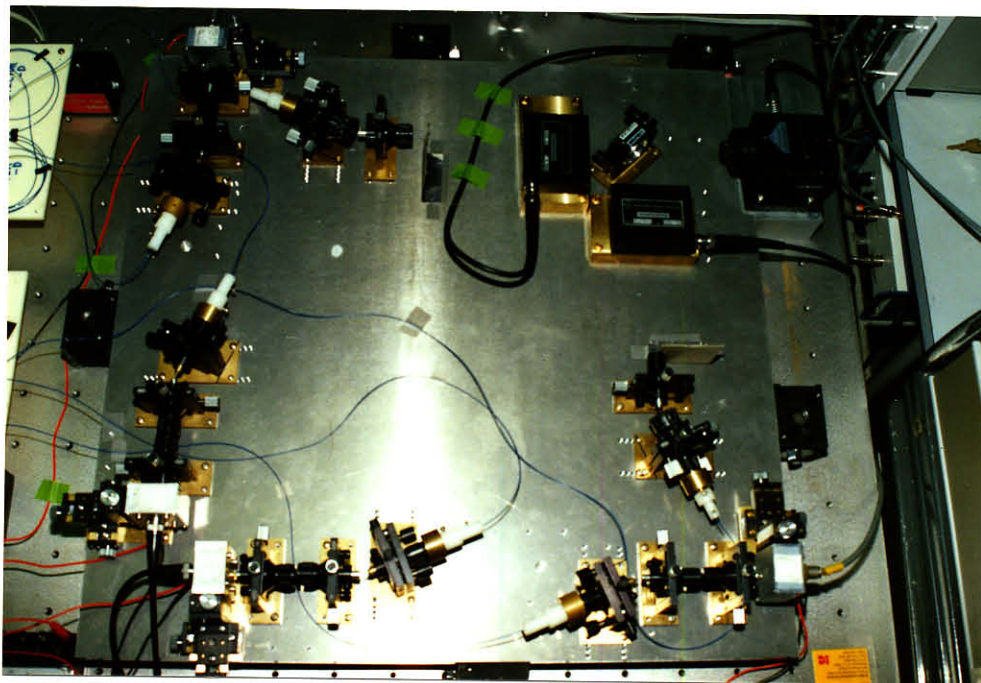


図 5・4 B-PSKを含むジャイロの実験系

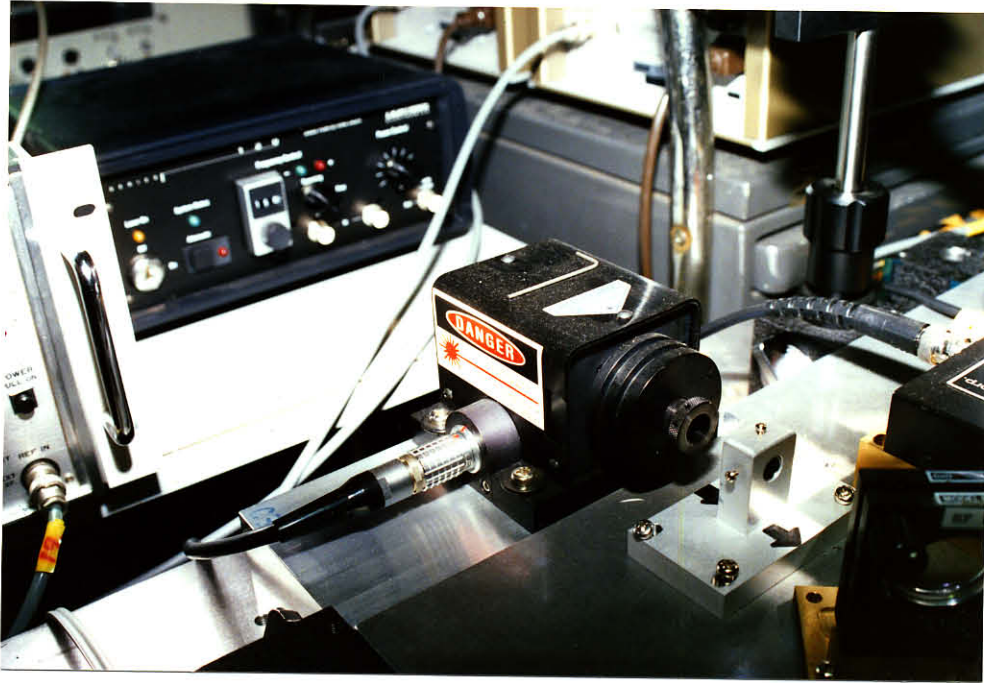


(a) 全景

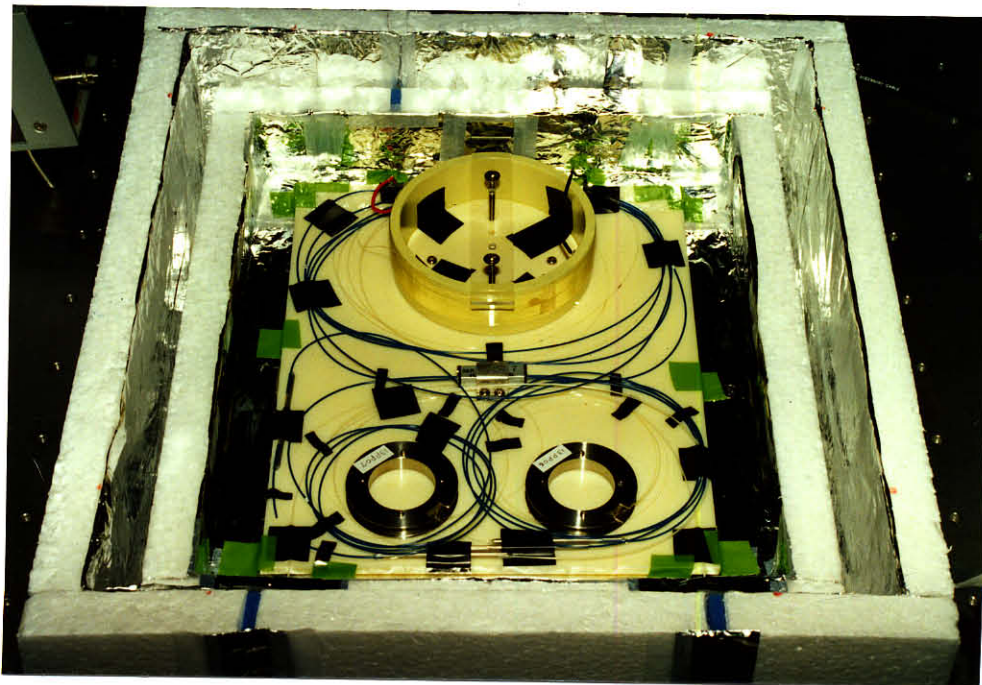


(b) 光回路部分

図 5 ・ 5 実際の系の写真



(c) 半導体レーザー励起YAGレーザー



(d) リング共振器

図 5・5 実際の系の写真

表 5・1 偏波維持光ファイバ（PANDAファイバ）の諸元

波長（ μm ）	1.3
コア径（ μm ）	7
クラッド径（ μm ）	123
クロストーク（dB/35m）	-40
損失（dB/km）	< 1

表 5 - 2 定偏波光ファイバカプラの諸元

No.		カプラ 1		カプラ 2	
項目	入射 / 偏波	x	y	x	y
過剰損失 (dB)	1 入射	0. 3	0. 3	0. 3	0. 2
	2 入射	0. 2	0. 3	0. 3	0. 3
分岐比 (%)	1 入射	4 9	5 8	5 1	6 1
	2 入射	4 9	5 9	5 1	6 1
クロストーク (dB)	1 → 3	- 2 8	- 3 2	- 2 4	- 2 8
	1 → 4	- 2 1	- 1 9	- 2 3	- 2 0
	2 → 3	- 2 6	- 2 7	- 2 7	- 3 0
	2 → 4	- 2 5	- 2 6	- 3 3	- 3 5
方向性 (dB)	1 → 2	- 4 5		- 4 5	

表 5 - 3 定偏波光ファイバカプラの諸元

No.		カプラ 3	
項目	入射 / 偏波	x	y
過剰損失 (dB)	1 入射	0. 3	0. 4
	2 入射	0. 5	0. 4
分岐比 (%)	1 入射	9 6	9 7
	2 入射	9 6	9 7
クロストーク (dB)	1 → 3	- 3 2	- 3 2
	1 → 4	- 3 1	- 3 0
	2 → 3	- 3 1	- 3 0
	2 → 4	- 3 5	- 3 5
方向性 (dB)	1 → 2	- 5 0	

表 5・4 光ファイバ偏光子の諸元

No.	F P 1	F P 2
波長 (μm)	1. 3	
消光比 (dB)	4 0	4 0
損失* (dB)	0. 6	0. 7
クラッド径 (μm)	1 2 5	
被覆径 (μm)	2 5 0	
被覆材料	紫外線硬化形樹脂	

* HE_{11} モードに対する損失

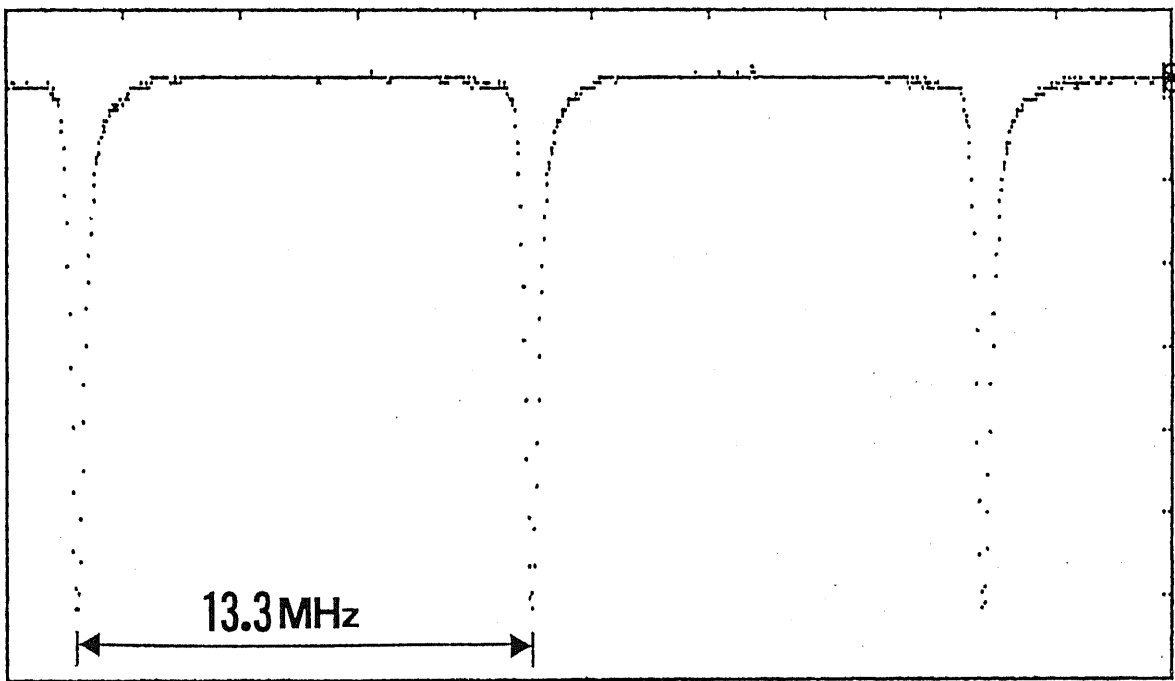


図5・6 リング共振器の共振特性

今回は、後方散乱光の強度自身の影響[1]-[3]を除去することは目的とはしないので、両回り光に別々の周波数で位相あるいは周波数変調をかけて共振点を検出する方法[1]-[3]は行わない。受光器2の出力D2は、温度変動あるいは機械的変動等の外乱による共振点の変動を補正するために、LIA2を通してPZTに負帰還されている。今回は簡単のために系を開ループ構成とした。そのためジャイロ出力は、LIA1の出力電圧として測定されることになる。

後方散乱光と信号光との干渉成分を除去するために、図5・2で説明した方形波でAOM2を駆動し左回り光の搬送波を抑圧する構成になっている。

5-4. 実験結果[10]-[12]

まず、B-PSKを施したときのAOM駆動波形とそのスペクトルを観測した。搬送波周波数は40MHzで、方形波の周波数は150kHzとした。なお、DBMは商業上手に入るものを用いた(R&K社、モデルM1)。

B-PSKを施したAOM駆動波形を、オシロスコープで観察した結果を図5・7に示す。また、その駆動波形の周波数成分を、スペクトルアナライザで測定した結果を図5・8に示す。図5・8より、搬送波成分は第1側帯波の成分より約80dB抑圧されていることがわかる。このことにより、B-PSKを用いて、無調整でかつ精度よく搬送波成分を抑圧できることが実験的に検証された。

図5・4に示す実際のジャイロ系にB-PSKを取り入れて、ジャイロ出力の測定を行った。図5・9は、B-PSKを施さない場合と施した場合の共振点でのロック波形(受光器出力)をオシロスコープで測定した結果である。変調をかけない場合には、後方散乱光と信号光との干渉成分の影響で波形が乱れているが、変調をかけると干渉成分が除去され、波形の乱れがまったくなくなることがわかる。ここで、左回り光は無変調時でも波形の乱れが右回り光と比較して少ない。これは、左回り光の出力は外乱の影響を補償するためPZTへ負帰還されており、干渉成分による変動もPZTが幾分補償するためと考えられる。

図5・10は、変調を施さない場合と施した場合のジャイロ出力である。測定の時定数は0.1秒である。変調をかけない場合、AOM1とAOM2との駆動周波数差を周波数成分として持つ干渉成分によりジャイロ出力が変動しているが、変調をかけた場合、干渉成分が除去されていることがわかる。なお、干渉成分の周波数と振

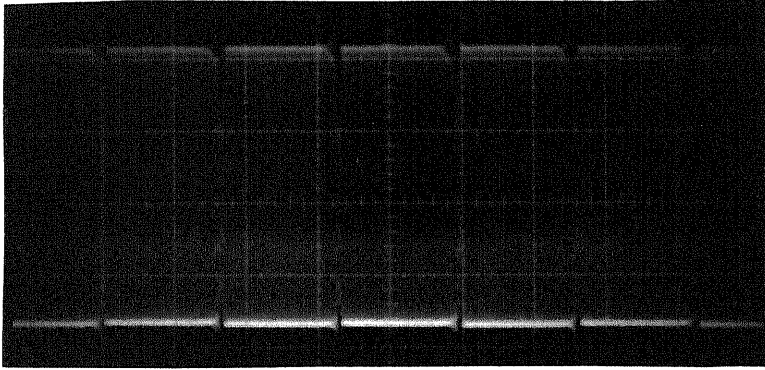


図 5 - 7 B-PSKを施したAOM駆動波形 縦：1V/div, 横：2 μ sec/div, 搬送波
周波数： $f_c=40\text{MHz}$, 方形波周波数： $f_s=150\text{kHz}$

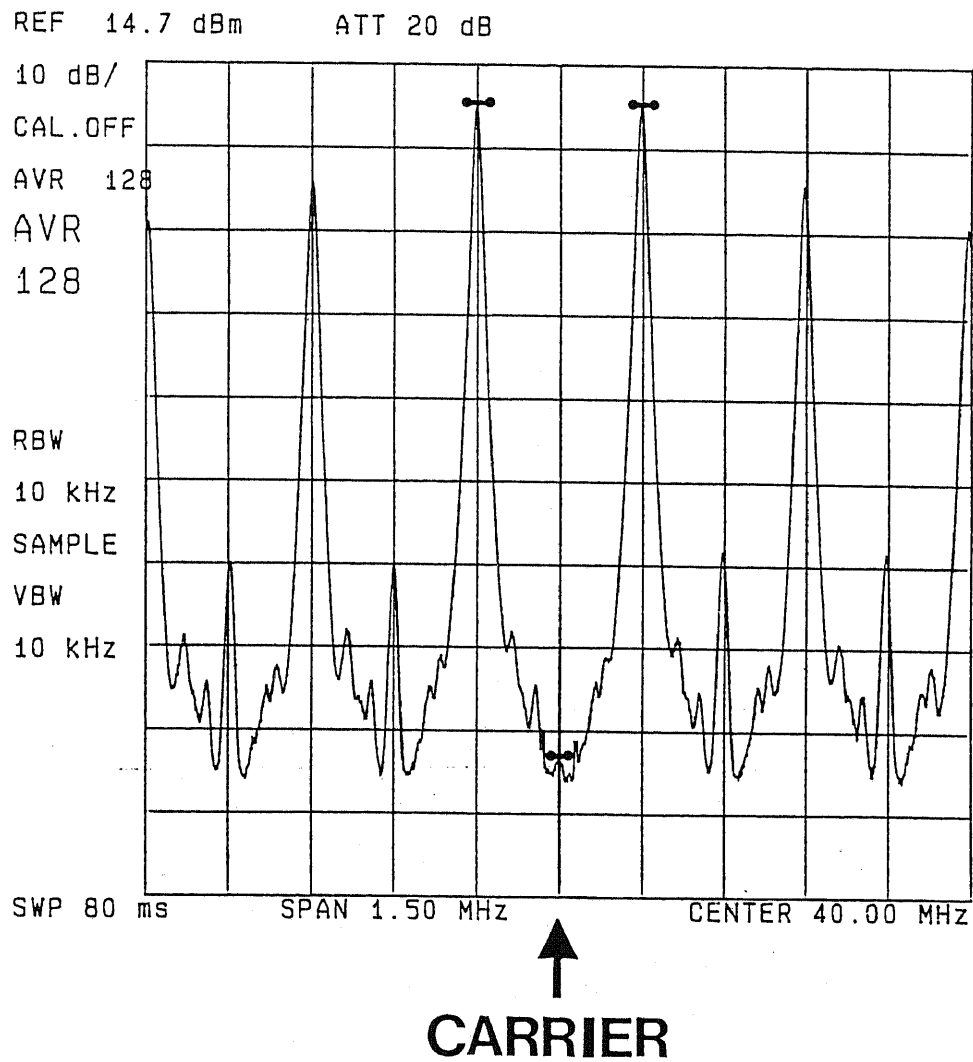
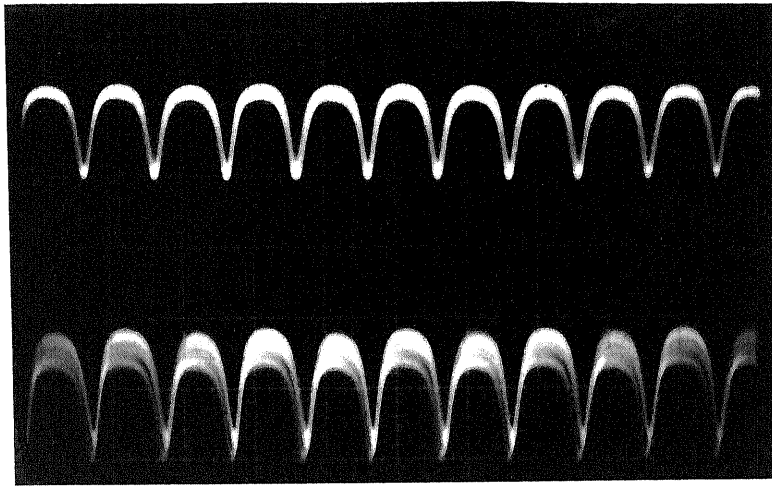
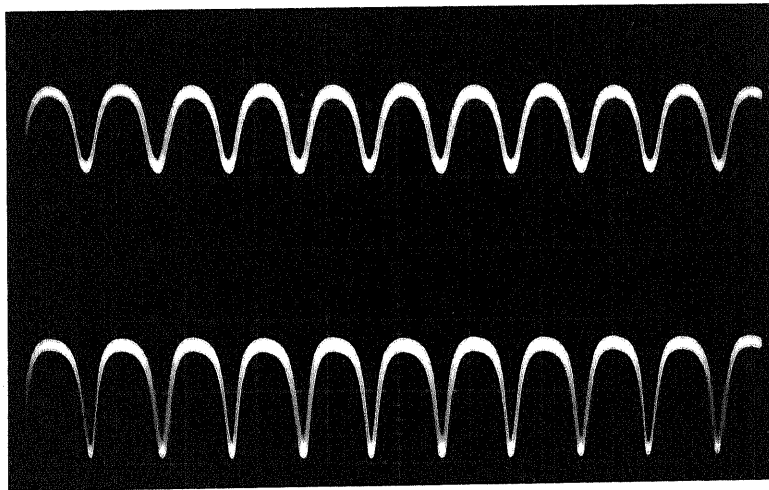


図 5 - 8 B-PSKを施したAOM駆動波形中の搬送波成分の抑圧 $f_c=40\text{MHz}$, $f_s=150\text{kHz}$

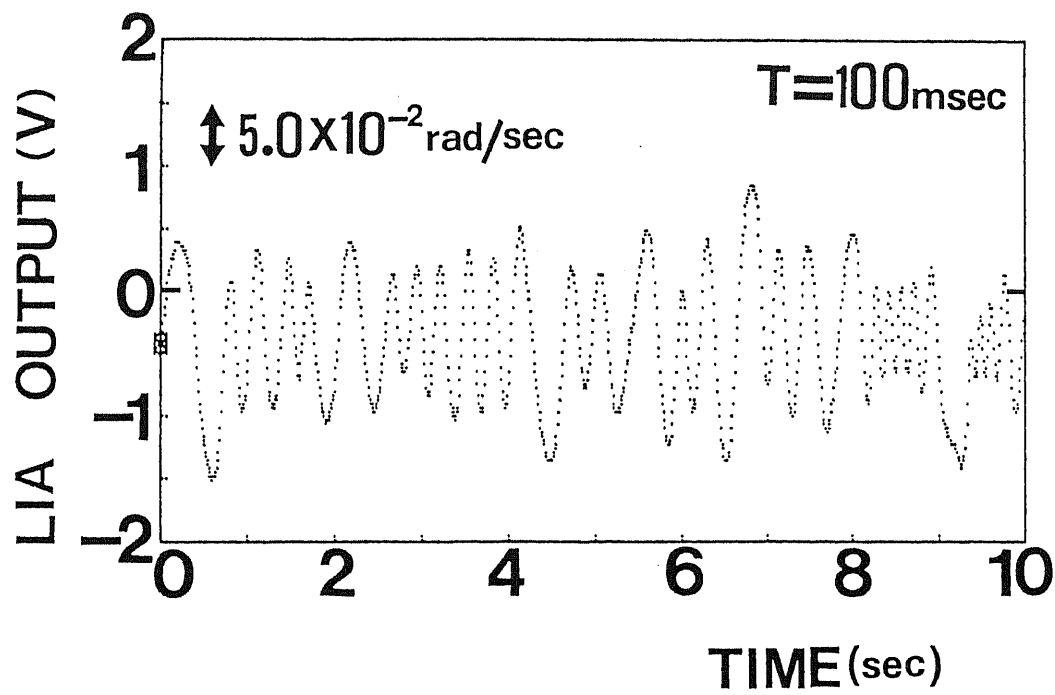


(a) 無変調時

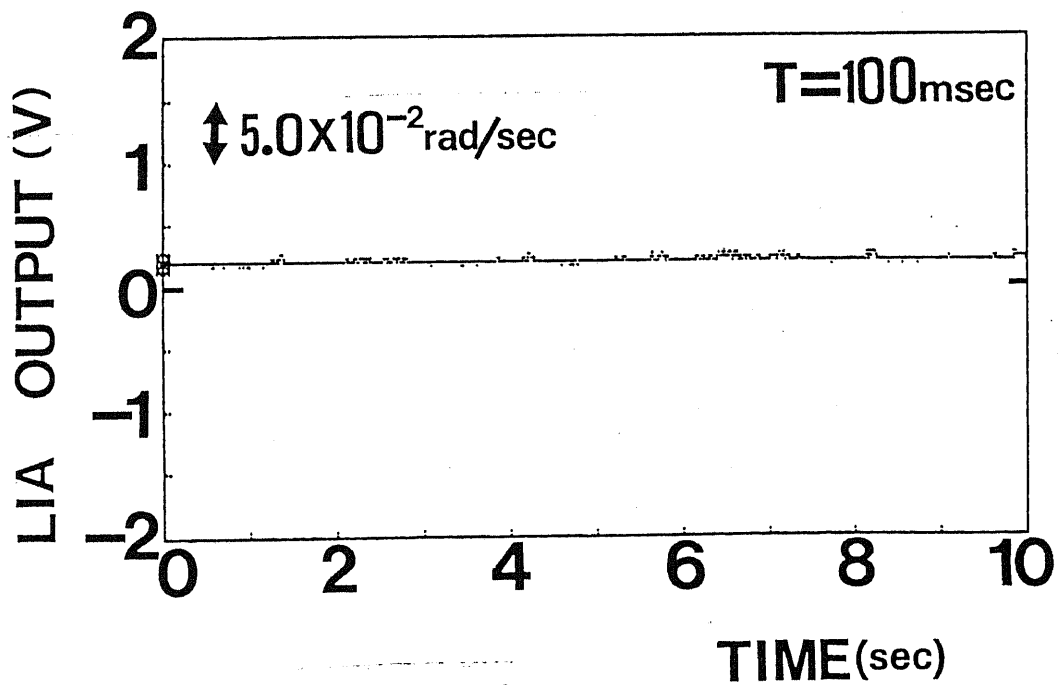


(b) 変調時

図 5 ・ 9 B-PSKの有無による受光器の出力波形 上側：左回り光（受光器D2），
 下側：右回り光（受光器D1），縦：20mV/div，横：0.1msec/div， $f_c=40\text{MHz}$ ， $f_s=$
 150kHz ，共振点検出位相変調周波数： $f_w=5\text{kHz}$



(a) 無変調時



(b) 変調時

図 5・10 B-PSKの有無によるジャイロ出力の変化 測定の時定数: $T_c=0.1$ 秒

幅は観測時間にわたって一定ではない。これは、発振器の周波数が完全に安定ではなく数Hz程度（ゲート時間1秒）で変動していることと、ロックインアンプの設定時定数で決まるフィルタリングの作用によるためである。

次に、B-PSKを含んだジャイロ系に関して、回転検出の原理的な確認と、零点安定性の測定とを行った。

図5・11は、回転検出結果である。測定の時定数は、1秒である。実際に、センシング部分であるリング共振器を時計回りと反時計回りに回転させて測定を行った。時計回りの回転の前後で出力レベルが異なっている。これは、共振点にロックさせた直後の測定のため、系が完全に安定な状態にはなかったためである。

図5・12は、ジャイロの零点安定性の測定結果である。時定数は、10秒である。約15分間にわたり 2×10^{-4} rad/sの範囲にドリフトがおさまっていることがわかる。地球自転（ 0.73×10^{-4} rad/s）程度の検出感度を得られたことになる。この実験では、実効的な後方レーリ散乱の反射係数は0.005程度と計算される[1]。80 dBの搬送波抑圧比が得られていることを考慮すると、後方散乱誘起雑音は、文献[8],[9]の解析によって、 10^{-6} rad/sのオーダーになっている。そのため残余のドリフトは、光カー効果[16]と偏波状態変動[17]-[25]によるものと考えられる。さらに、AOM駆動発振器の周波数が数Hz程度（ゲート時間1秒）で変動していることも、 10^{-4} rad/sオーダーのドリフトを生み出す一因となっている。

6-5. まとめ

受動型リング共振方式光ジャイロにおいて、後方散乱光とそれを生み出した信号光とは逆回りに伝搬する信号光との干渉成分による雑音を除去するための新しい方式を提案した。これは2値位相変調法により一方の信号光の搬送波を抑圧する手法である。この手法は、AOMとDBMとを用いて、変調パラメータを特別に調整すること無しに簡単に行うことができる。

この手法を用いて、80dBという従来手法では考えられなかった高い搬送波抑圧比が安定に得られ、干渉成分の除去実験に成功した。この抑圧比は 10^{-6} rad/s程度まで後方散乱誘起雑音を除去できることを意味している。零点安定性の測定の結果、他の雑音による値以下に、後方散乱誘起雑音を除去することに成功した。

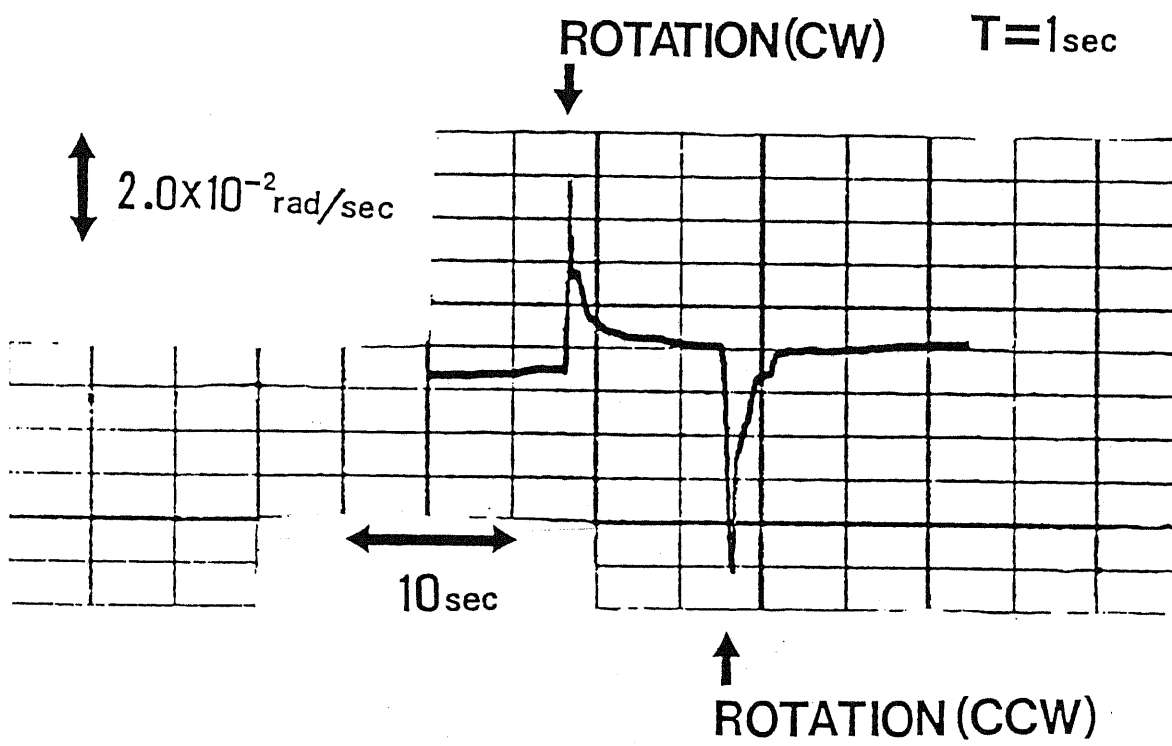


図 5 ・ 1 1 ジャイロによる回転検出 $T_c=1 \text{ 秒}$

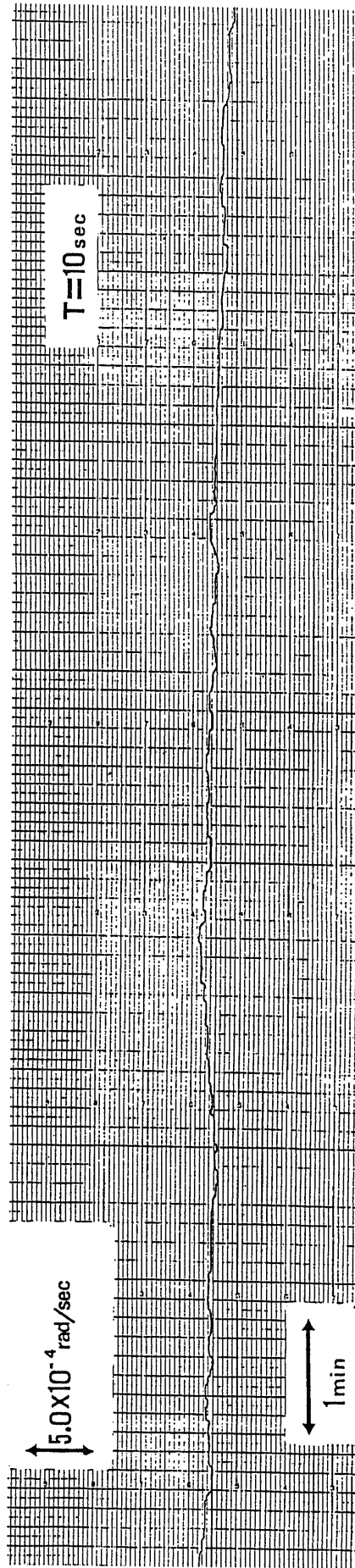


図5・12 ジャイロの零点安定性 $T_c = 10 \text{ 秒}$

参考文献

- [1] K. Iwatsuki, K. Hotate, and M. Higashiguchi, "Effect of Rayleigh backscattering in an optical passive ring-resonator gyro," Appl. Opt., vol. 23, no. 21, pp. 3916-3924, Nov. 1984.
- [2] K. Iwatsuki, K. Hotate, and M. Higashiguchi, "Resonance characteristics of backscattering in optical passive ring-resonator gyro," Electron. Lett., vol. 22, no. 3, pp. 135-137, Jan. 1986.
- [3] K. Iwatsuki, K. Hotate, and M. Higashiguchi, "Backscattering in an optical passive ring-resonator gyro: Experiment," Appl. Opt., vol. 25, no. 23, pp. 4448-4451, Dec. 1986.
- [4] G. A. Sanders, M. G. Prentiss, and S. Ezekiel, "Passive ring resonator for sensitive inertial rotation measurements in geophysics and relativity," Opt. Lett., vol. 6, no. 11, pp. 569-571, Nov. 1981.
- [5] R. E. Meyer, S. Ezekiel, D. W. Stowe, and V. J. Tekippe, "Passive fiber-optic ring-resonator for rotation sensing," Opt. Lett., vol. 8, no. 12, pp. 644-646, Dec. 1983.
- [6] F. Zarinetchi and S. Ezekiel, "Observation of lock-in behavior in a passive resonator gyroscope," Opt. Lett., vol. 11, no. 6, pp. 401-403, June 1986.
- [7] F. Aronowitz, "The laser gyro," Laser Applications, M. Ross, Ed., Academic, pp. 133-200, 1971.
- [8] 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., vol. 13, no. 5, pp. 413-415, May 1988.
- [9] M. Takahashi, S. Tai, and K. Kyuma, "Effect of reflections on the drift characteristics of a fiber-optic passive ring-resonator gyroscope," J. Lightwave Technol. vol. 8, no. 5, pp. 811-816, May 1990.
- [10] 保立, 瀧口, 廣瀬, "受動型リング共振方式光ジャイロにおける後方散乱による雑音の無調整除去手法," 電子情報通信学会, 光・量子エレクトロニクス研究会, paper OQE89-8, pp. 43-48, 東京, 1989年4月.

- [11] 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," in Proc. IOOC '89, paper 20D3-2, pp. 194-195, Kobe, Japan, July 1989.
- [12] 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," Photon. Technol. Lett., vol. 2, no. 1, pp. 75-77, Jan. 1990.
- [13] 瀧口, 保立, "複数の雑音除去手法を取り入れた受動型リング共振方式光ジャイロ," 電子情報通信学会, 光・量子エレクトロニクス研究会, paper OQE91-79, pp. 13-18, 北九州, 1991年9月.
- [14] A. Yariv, "Quantum electronics," 3rd. Ed., Chap. 14, John Wiley & Sons, Inc., pp. 298-341, 1988.
- [15] "User manual of diode pumped ring laser," Lightwave Electronics Co., U.S.A., Apr. 1988.
- [16] K. Iwatsuki, K. Hotate, and M. Higashiguchi, "Kerr Effect in an optical passive ring-resonator gyro," J. Lightwave Technol., vol. LT-4, no. 6, pp. 645-651, June 1986.
- [17] 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., vol. 25, no. 15, pp. 2606-2612, Aug. 1986.
- [18] 保立, 瀧口, 村上, "偏波維持光ファイバで構成した共振器中での偏波軸ずれによる受動型リング共振方式光ジャイロの出力変動," 電子情報通信学会, 光・量子エレクトロニクス研究会, paper OQE89-9, pp. 1-6, 仙台, 1989年5月.
- [19] Z. K. Ioannidis, R. Kadiwar, and I. P. Giles, "Polarization mode coupling in highly birefringent optical-fiber ring resonators," Opt. Lett., vol. 14, no. 10, pp. 520-522, May 1989.
- [20] G. A. Sanders, R. B. Smith, and G. F. Rouse, "Novel polarization-

rotating fiber resonator for rotation sensing applications," in Proc. SPIE OE/FIBERS '89, paper 1169-74, pp. 373-381, Boston, U.S.A., Sept. 1989.

- [21] K. Hotate, K. 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," in Proc. OFS '89, paper Mo-4-2, pp. 94-100, Paris, France, Sept. 1989.
- [22] 高橋, 田井, 久間, "リング共振形光ファイバジャイロにおける偏波結合の影響," 電子情報通信学会論文誌, vol. J72-C-I, no. 10, pp. 610-618, 1989年10月.
- [23] 瀧口, 保立, "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," 電子情報通信学会, 光・量子エレクトロニクス研究会, paper OQE89-79, pp. 1-6, 東京, 1989年11月.
- [24] K. Takiguchi and K. Hotate, "Manner to reduce the bias of optical passive ring-resonator gyro caused by the misalignment of the polarization-axis in the resonator," in Proc. OFSET '90, paper 12B3-2, pp. 109-118, Fukuoka, Japan, Oct. 1990.
- [25] K. Takiguchi and K. Hotate, "Bias of an optical passive ring-resonator gyro caused by the misalignment of the polarization-axis in the polarization-maintaining fiber resonator," to be published in J. Lightwave Technol.

第6章 部分的デジタル制御系による 外乱除去制御系の高性能化

6-1. はじめに

受動型リング共振方式光ジャイロのセンシング部分であるリング共振器中では、左右両回りの光を伝搬させる。一方の光の共振特性を利用して、温度変動や機械的変動等の外乱による共振点の変化を検出し、その影響を補正する。また、他方の光の共振特性を利用して、Sagnac効果によって生ずる共振周波数の変化を検出し回転角速度の測定を行う。

外乱の影響を補正するためには、PZTへアナログ電圧の負帰還を施して、ファイバ共振器長を変化させる方法が通常用いられる[1]-[6]。しかし、外乱はステップ性のみならず、ランプ（ドリフト）性の場合もあり、アナログ負帰還によってその除去を完全に行うことは、非常に困難である。ランプ性外乱を除去するためには、制御系を2次積分系、または少なくとも積分+1次遅れ系で構成しなければならない。この点に関しては、受動型リング共振方式光ジャイロについての検討も報告されている[7],[8]。しかし、実際には低域での積分器の利得が有限であるため、これらの系を完全に構成することは不可能である。

そこで本章では、ジャイロの零点安定性を向上させるために、部分的デジタル制御系を提案する。この方法は、従来のアナログ制御の他に、デジタル的に制御する系を付加するものである。本研究ではこれにより、光源の周波数を制御する。この構成は、低域でのアナログ制御系の能力の限界を補完する目的で用いられる。この構成を用いた結果、零点安定性を大幅に向上させることに成功したので、その結果についても述べる。

6-2. 部分的デジタル制御系の構成[9]-[12]

図6・1、6・2はそれぞれ、部分的デジタル制御系を含むジャイロ実験系の構成と、実際の系の写真を示している。

光源としては、半導体レーザー励起YAGレーザー（波長 $1.3\mu\text{m}$ 、ジッターも含めた線

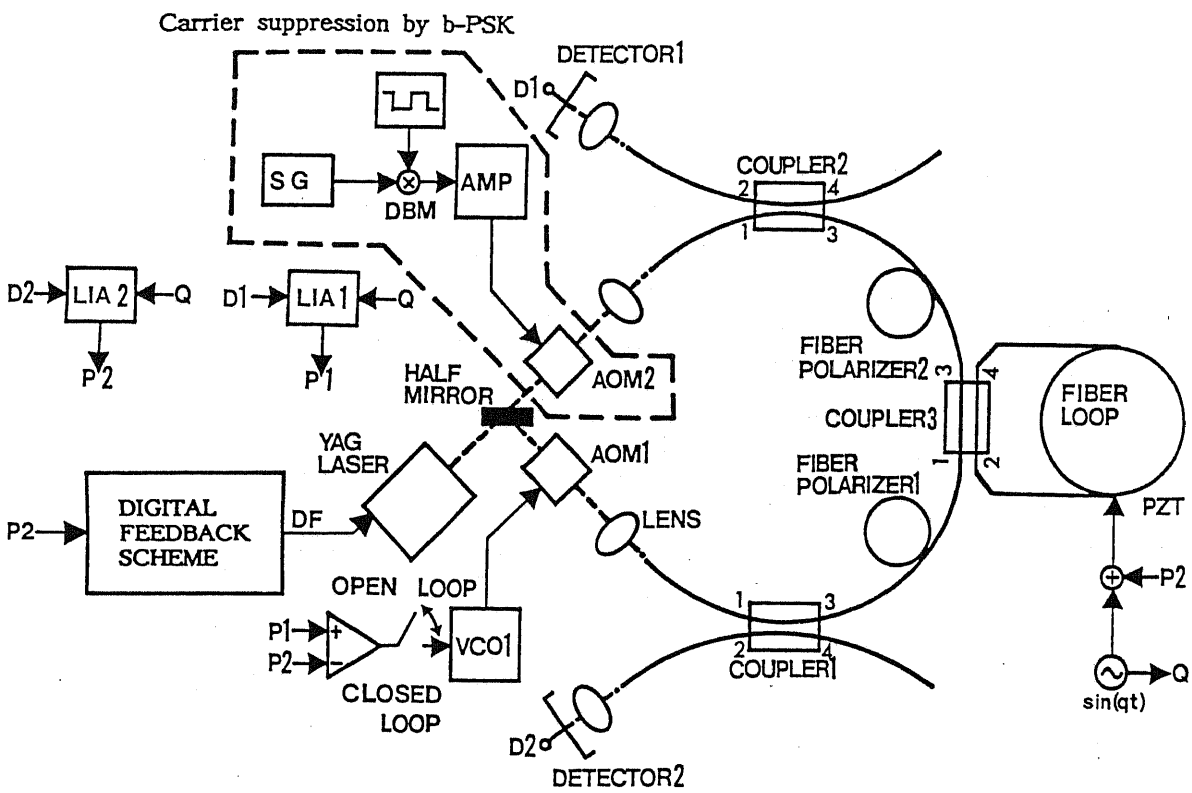


図 6・1 部分的デジタル制御系を含むジャイロの実験系



図 6 ・ 2 実際の系の写真

幅約300kHz) [13]を用いた。共振器は偏波維持光ファイバ (PANDAファイバ) で構成され、その長さと直径は、それぞれ18m、0.1mである。またそのフィネスは約40である。これは第5章で用いた共振器と同一のものである。

ロックインアンプによる共振点検出を行うために、ファイバ共振器長は、PZTにより9kHzの正弦波で変調される。光検出器2の出力D2は、ロックインアンプLIA2による同期検波の後、信号P2として、外乱除去のためにこのPZTに負帰還される。また以下で説明するように、誤差信号P2中の低周波数成分は部分的にデジタル制御系に負帰還される。

この系では、簡単のために開ループ動作が用いられている。そのため、回転検出信号はロックインアンプLIA1の出力として得られる。さらに、共振器中での後方散乱光と、それを生み出した信号光とは逆回りに伝搬する信号光との間の干渉による雑音を除去するために、第5章で説明したように、左回り光に2値位相変調を施して搬送波成分を除去している[4]-[6]。

ところで外乱がランプ性の場合でも、PZTへの帰還ループを理想的な2次積分系で構成すれば外乱の影響は完全に除去できる。また、積分+1次遅れ系で構成すれば、定常偏差は残るものの、制御系の利得を大きくすることによってその定常偏差を充分小さくすることが可能である。しかし、このような理想的な制御系を構成することは、特に低周波数領域において不可能である。これは、積分器の利得が低域では飽和するためである。

この問題を解決するために本稿で提案するのが、図6・1中、および図6・3 (詳細図) に示す部分的デジタル制御系である。まずLIA2からPZTへのアナログ誤差信号P2の低域成分をローパスフィルタ (Low-Pass Filter: LPF) を通して得る。その低域成分が、参照電圧REF+より増加したり、あるいはREF-より減少すると、クロック周波数に応じて、比較器がアップダウンカウンタをそれぞれダウン、あるいはアップさせるように動作する。このときD/Aコンバータは、誤差信号の総計に対応したアナログ電圧DFを出す。ところで、光源であるLD励起YAGレーザは、1秒以下の応答速度で、数10GHzにわたり周波数を変化できる機能を持つ[13]。従って、D/Aコンバータの出力DFをこの周波数に負帰還することにより、低周波数領域での比較的振幅の大きい外乱を補償することが可能になる。これが部分的デジタル制御系の構成と動作原理である。

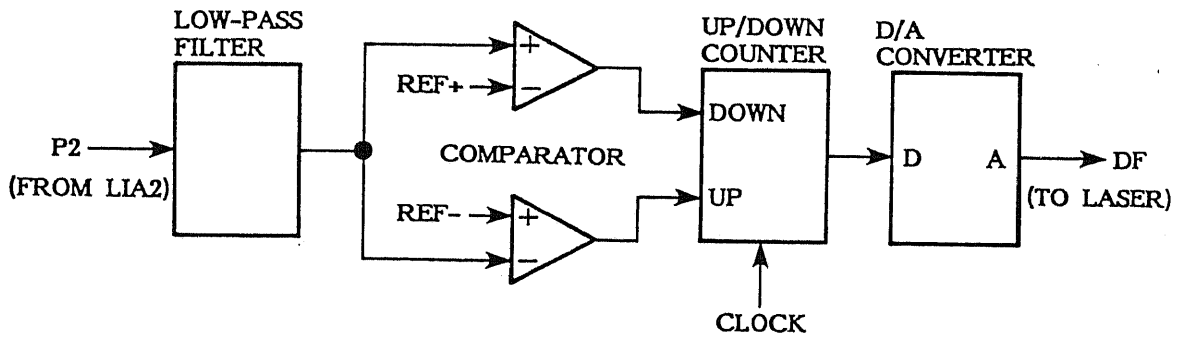


図 6・3 デジタル制御系のブロック図

この構成において、PZTに負帰還をかけるアナログ制御系は、外乱の比較的高い周波数成分に応答する。これに対してデジタル制御系は、上記のように、アナログ制御系が補償できなかった外乱の低周波数成分を補償する。つまり、両者は相補的に動作し、ランプ性外乱の除去をも可能にする仕組みとなっている。10ppm程度のスケールファクタの変動が許容されると考えた場合、デジタル制御系により数GHzの周波数可変が可能である。これは、本系におけるフリースペクトルレンジの数百倍に相当する。

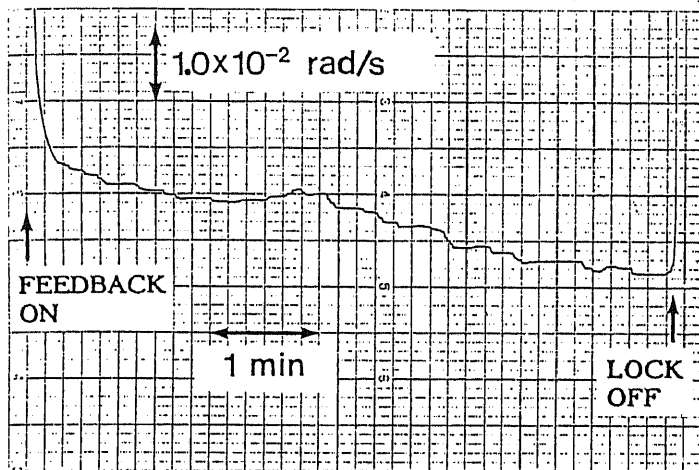
6-3. 実験結果[9]-[11]

図6・4は、温度変動がランプ性で大きい場合のジャイロ出力を示している。図6・4(a)、(b)はそれぞれ、デジタル制御系がない場合とある場合の出力である。この測定では、ロックインアンプLIA1の時定数は3秒に設定されている。図6・4(b)では参照電圧、D/Aコンバータの1ビットあたりの出力電圧変化、クロック周波数等、デジタル制御系のパラメータは、部分的デジタル制御の基本動作を見るために、意図的に大きくかつ荒く設定されている。

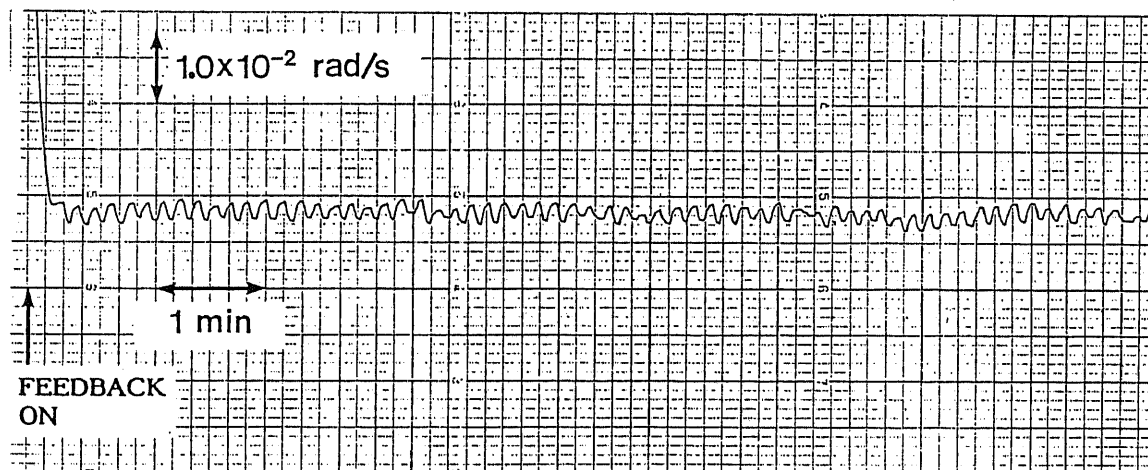
図6・4(a)からわかる通り、デジタル制御がない場合、ジャイロ出力は温度変動によって大きくドリフトする。つまり、LIA2は共振点を完全には捕捉することができず、誤差が増大し、やがては出力が飽和して、Lock-offにいたることがわかる。これに対して図6・4(b)から、部分的デジタル制御によって、出力をある範囲内に長時間にわたり抑圧することが可能であることがわかる。図6・4(b)のジグザグ形の雑音はパラメータを意図的に荒く設定したことによって生じたものであり、部分的デジタル制御系が正確に作動していることを示している。この雑音は、パラメータ値を適切に設定することにより除去できるものである。

適切なパラメータ設定を行った後、部分的デジタル制御系を含む本光ジャイロ系の零点安定性を測定した。その結果を図6・5に示す。この測定では、LIA1の時定数は、30秒に設定した。

図6・5では 5×10^{-4} rad/s内におさまる零点安定性が約30分にわたって得られている。残余のドリフトはリング共振器中での光カー効果[14]、また偏波状態変動[15]-[23]のためである。この零点安定性は第5章で得られた値[4]-[6]とほぼ



(a) デジタル制御がない場合



(b) デジタル制御がある場合

図 6 ・ 4 部分的デジタル制御系の基本動作 測定の時定数： $T_0=3$ 秒

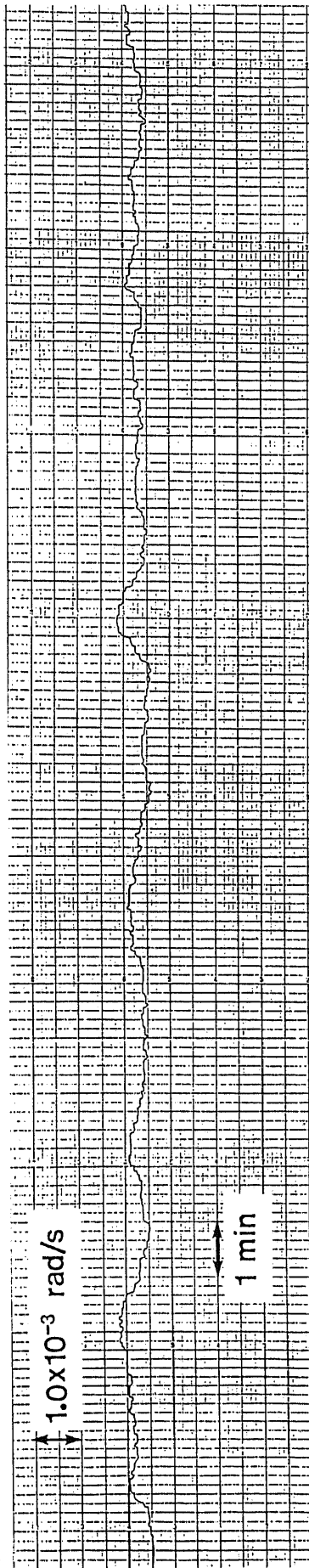


図 6・5 ジャイロの零点安定性 $T_c=30$ 秒

同程度であるが、その持続時間は約2倍となり、部分的デジタル制御の効果が十分に現れていると結論できる。また、Lock-offも、1、2時間程度の実験中には生じなかった。

6-4. まとめ

受動型リング共振方式光ジャイロにおいて、ランプ性外乱を除去する手法として新しく部分的デジタル制御系を提案した。

実験を行った結果、実際に部分的デジタル制御系が実際に零点安定性の向上に役立つことを検証した。

参考文献

- [1] R. E. Meyer, S. Ezekiel, D. W. Stowe, and V. J. Tekippe, "Passive fiber-optic ring-resonator for rotation sensing," *Opt. Lett.*, vol. 8, no. 12, pp. 644-646, Dec. 1983.
- [2] G. A. Sanders, N. Demma, G. F. Rouse, and R. B. Smith, "Evaluation of polarization maintaining fiber resonator for rotation sensing applications," in *Proc. OFS '88*, paper FBB7, pp. 409-412, New Orleans, U.S.A., Jan. 1988.
- [3] M. Takahashi, S. Tai, K. Kyuma, and K. Hamanaka, "Fiber-optic passive ring-resonator gyroscope using an external-cavity laser diode," *Opt. Lett.*, vol. 13, no. 3, pp. 236-238, Mar. 1988.
- [4] 保立, 瀧口, 廣瀬, "受動型リング共振方式光ジャイロにおける後方散乱による雑音の無調整除去手法," 電子情報通信学会, 光・量子エレクトロニクス研究会, paper OQE89-8, pp. 43-48, 東京, 1989年4月.
- [5] 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," in *Proc. IOOC '89*, paper 20D3-2, pp. 194-195, Kobe, Japan, July 1989.
- [6] 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," *Photon. Technol. Lett.*, vol. 2, no. 1, pp. 75-77, Jan. 1990.
- [7] 岩月, "受動型リング共振方式光ジャイロにおける温度・機械変動などの外乱の影響に関する考察," 電子情報通信学会, 光・量子エレクトロニクス研究会, paper OQE86-140, pp. 59-65, 1986年12月.
- [8] 田井, 高橋, 久間, 浜中, "リング共振型光ファイバジャイロスコープ," 応用物理学会, 第5回光ファイバセンサワークショップ, paper W0FS5-8, pp. 55-62, 1987年6月.
- [9] 瀧口, 保立, "受動型リング共振方式光ジャイロにおける部分的デジタル制御の適用と光カー効果誘起雑音の評価," 電子情報通信学会, 光・量子エ

- クトロニクス研究会, paper OQE90-94, pp. 1-6, 仙台, 1990年11月.
- [10] K. Takiguchi and K. Hotate, "Partially digital-feedback scheme and evaluation of optical Kerr-effect induced bias in optical passive ring-resonator gyro," in Proc. OFS '90, paper TU01.3, pp. 23-26, Sydney, Australia, Dec. 1990.
- [11] K. Takiguchi and K. Hotate, "Partially digital-feedback scheme and evaluation of optical Kerr-effect induced bias in optical passive ring-resonator gyro," Photon. Technol. Lett., vol. 3, no. 7, pp. 679-681, July 1991.
- [12] 瀧口, 保立, "複数の雑音除去手法を取り入れた受動型リング共振方式光ジャイロ," 電子情報通信学会, 光・量子エレクトロニクス研究会, paper OQE91-79, pp. 13-18, 北九州, 1991年9月.
- [13] "User manual of diode pumped ring laser," Lightwave Electronics Co., U.S.A., Apr. 1988.
- [14] K. Iwatsuki, K. Hotate, and M. Higashiguchi, "Kerr Effect in an optical passive ring-resonator gyro," J. Lightwave Technol., vol. LT-4, no. 6, pp. 645-651, June 1986.
- [15] 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., vol. 25, no. 15, pp. 2606-2612, Aug. 1986.
- [16] 保立, 瀧口, 村上, "偏波維持光ファイバで構成した共振器中での偏波軸ずれによる受動型リング共振方式光ジャイロの出力変動," 電子情報通信学会, 光・量子エレクトロニクス研究会, paper OQE89-9, pp. 1-6, 仙台, 1989年5月.
- [17] Z. K. Ioannidis, R. Kadiwar, and I. P. Giles, "Polarization mode coupling in highly birefringent optical-fiber ring resonators," Opt. Lett., vol. 14, no. 10, pp. 520-522, May 1989.
- [18] G. A. Sanders, R. B. Smith, and G. F. Rouse, "Novel polarization-rotating fiber resonator for rotation sensing applications," in

Proc. SPIE OE/FIBERS '89, paper 1169-74, pp. 373-381, Boston,
U. S. A., Sept. 1989.

- [19] K. Hotate, K. 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," in Proc. OFS '89, paper Mo-4-2, pp. 94-100, Paris, France, Sept. 1989.
- [20] 高橋, 田井, 久間, "リング共振形光ファイバジャイロにおける偏波結合の影響," 電子情報通信学会論文誌, vol. J72-C-1, no. 10, pp. 610-618, 1989年10月.
- [21] 瀧口, 保立, "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," 電子情報通信学会, 光・量子エレクトロニクス研究会, paper OQE89-79, pp. 1-6, 東京, 1989年11月.
- [22] K. Takiguchi and K. Hotate, "Manner to reduce the bias of optical passive ring-resonator gyro caused by the misalignment of the polarization-axis in the resonator," in Proc. OFSET '90, paper 12B3-2, pp. 109-118, Fukuoka, Japan, Oct. 1990.
- [23] K. Takiguchi and K. Hotate, "Bias of an optical passive ring-resonator gyro caused by the misalignment of the polarization-axis in the polarization-maintaining fiber resonator," to be published in J. Lightwave Technol.

第7章 光カー効果誘起雑音の評価と その除去手法

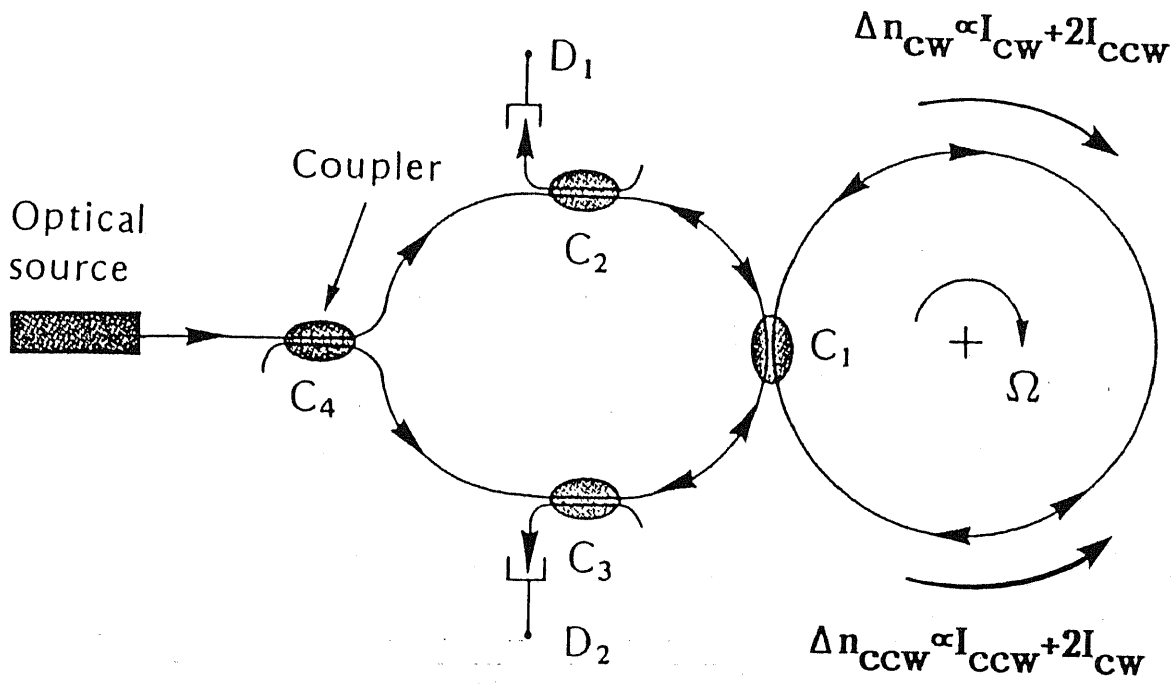
7-1. はじめに

受動型リング共振方式光ジャイロにおいて、光カー効果誘起雑音は主要な雑音要因の1つである[1]。この光カー効果誘起雑音は、図7・1に示すように、共振器中を一方に伝搬する光が感じる屈折率変化がそれ自身とそれとは逆回りに伝搬する光強度に対して1:2と非相反になるために生じる。この結果、左右両回り光間の強度差に比例するバイアスが誘起される。高精度ジャイロの場合、左右両回り光の強度差がわずか0.01%異なった時でも、ショット雑音によって決まる回転検出限界の2桁上の雑音が生じることが計算により求められている[1]。

本方式光ジャイロにおいて、光カー効果誘起雑音の評価に初めて成功したので、まずその結果について説明する。

光カー効果誘起雑音の除去手法として、我々の研究グループでは、共振器に入射する光強度を共振器のフリースペクトルレンジの整数倍の周波数を持つ方形波で強度変調する方法を提案した。この場合、屈折率変化に対する両回り光の強度の寄与が等価的に1:1となるので、雑音の除去効果がある[1]。共振器長が10mの場合、フリースペクトルレンジは20MHzとなる。しかしこの手法では、高精度ジャイロ実現のための強度変調器の帯域(数GHz以上)、消光比(40dB以上)に対する要求が厳しく、その実行は非常に困難であった[1]。

本章では、光カー効果誘起雑音を簡単に除去する手法を新しく提案する。まず、共振点検出に用いる変調周波数より非常に低い周波数で共振器に入射する光強度を変調し、両回り光間の強度差を検出する。次に、この差成分を用いて一方の光強度に負帰還をかけ、両回り光間の強度差を零にする手法である。この手法の有効性を確認する基礎実験に成功したので、その結果についても述べる。



$$\Delta \Omega \propto (I_{cw} + 2I_{ccw}) - (I_{ccw} + 2I_{cw})$$

$$= I_{ccw} - I_{cw}$$

图 7 · 1 光力 - 效果诱起雜音

7-2. 光カー効果誘起雑音の実験的評価[2]-[5]

図7・2に示すジャイロ系を用いて、光カー効果誘起雑音の系統的評価を行った。光源としては、半導体レーザ励起YAGレーザ（波長 $1.3\mu\text{m}$ 、ジッターも含めた線幅約 300kHz ）[6]を用いた。共振器は偏波維持光ファイバ（PANDAファイバ）で構成され、その長さ、直径は、それぞれ 18m 、 0.1m である。また、そのフィネスは約40である。これらは、第5、6章のものと同一である。

ロックインアンプによる共振点検出を行うために、ファイバ共振器長は、PZTにより 9kHz の正弦波で変調される。光検出器2の出力D2は、ロックインアンプLIA2による同期検波の後、信号P2として、外乱除去のためにこのPZTに負帰還される。ところでこのようなアナログ負帰還では、増幅器の低域での利得が飽和するために、ランダム外乱による共振点変化は補償不可能である。このアナログ制御の欠点を補正するために、第6章で説明したように、同時にYAGレーザの周波数をデジタル的に制御している（部分的デジタル制御系）[3]-[5], [7]。この系では、簡単のために開ループ動作が用いられている。そのため、回転検出信号はロックインアンプLIA1の出力として得られる。

さらに、共振器中での後方散乱光と、それを生み出した信号光とは逆回りに伝搬する信号光との間の干渉による雑音を除去するために、第5章で説明したように、左回り光に2値位相変調を施すことにより搬送波成分を除去している[7]-[10]。

この図7・2に示すように、右回り光の強度を可変アッテネータで積極的に変えることによってバイアス変化の評価を行った。なお右回り光用の検出器D1の出力をモニター出力D1'で割った値を、ロックインアンプLIA1への入力信号として用いた。これは光強度自身の変化によって、LIA1の出力、つまりジャイロ出力が変化することを補償するためである。

図7・3は、光カー効果誘起バイアスと右回り光の強度変化との関係の評価結果を示している。この図より、光強度の変化に比例してバイアスが変化していることがわかる。

図7・3において零点における光強度 I_0 は、約 1mW と測定された。文献[1]を用いて計算を行った結果、右回り光の強度変化 0.1mW に対してバイアスの変化量は約 $5 \times 10^{-3}\text{rad/sec}$ との値を得た。この値は図7・2における測定値とオーダー的に

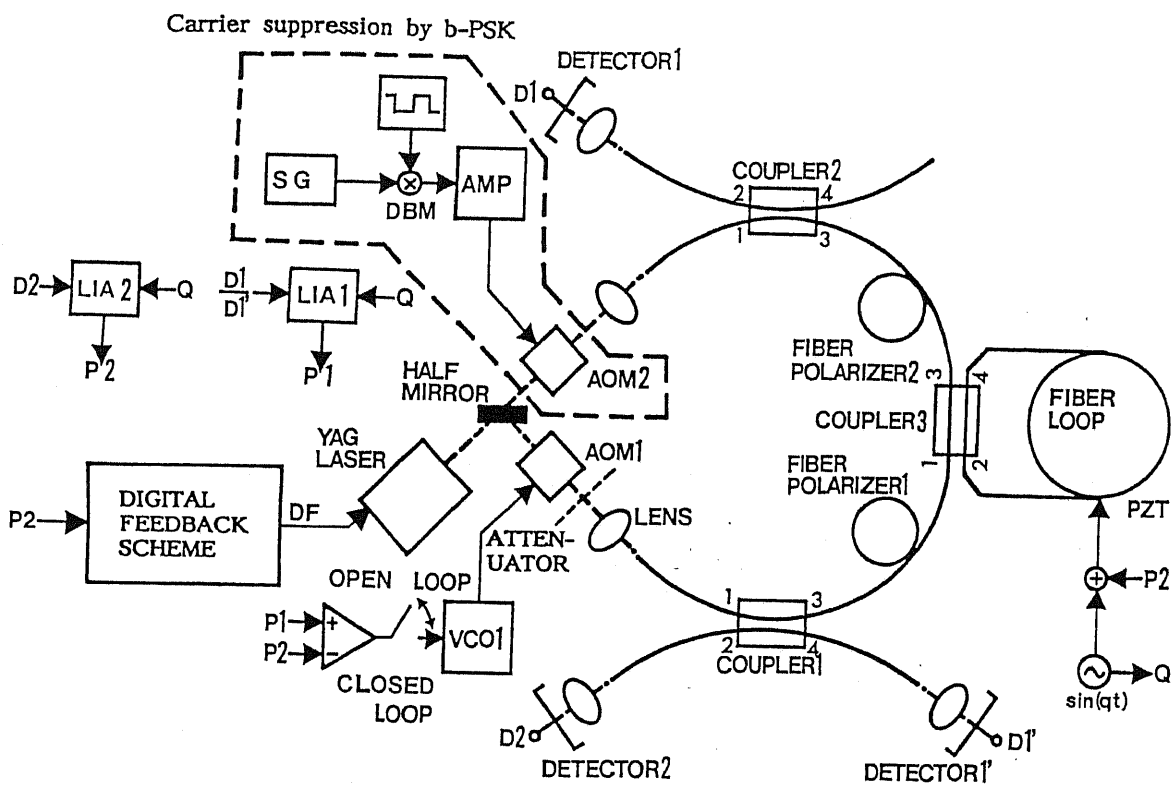


図 7・2 光カー効果誘起雑音を評価するためのジャイロ系

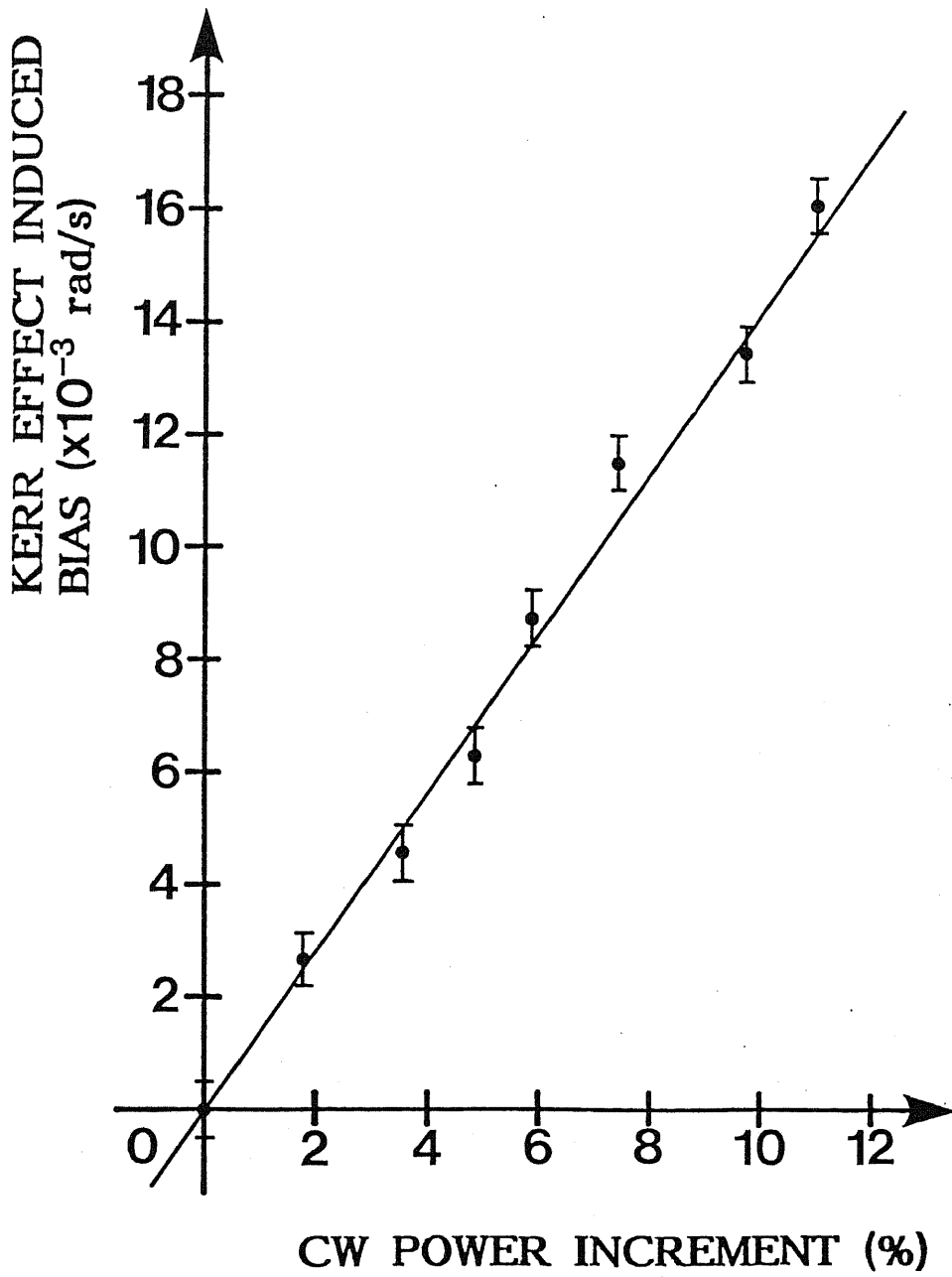


図 7・3 光カー効果誘起雑音と右回り光の強度変化との関係 零点における
光強度: $I_0=1\text{mW}$

一致している。

7-3. 光カー効果誘起雑音の除去手法の原理[11]-[13]

図7・4は光カー効果誘起雑音の除去手法を含んだ受動型リング共振方式光ジャイロの実験系である。また図7・5はその写真である。光源としては半導体レーザー励起YAGレーザー[6]を用いている。リング共振器は偏波維持光ファイバ・カップラによって構成され、共振器長、共振器直径は、それぞれ12m、0.1mである。またそのフィネスは約100である。定偏波光ファイバカップラの諸元を表7・1、7・2に示す。

第3、4章で検討した偏波変動の影響を除去するために、偏波軸を90°回転して融着接続を行った共振器を構成した[7],[14]-[20]。この共振器の共振特性を図7・6に示す。

PZTを7kHzの正弦波で駆動し光波に位相変調をかけることによって、共振点検出を行っている。受光器D2の出力はロックインアンプLIA2で同期検波された後、PZTに負帰還され、外乱による共振点変化の補償に用いられる。また第6章で説明したように、ランプ性外乱をも除去可能なように、部分的デジタル制御系を組み入れている[3]-[5],[7]。

またスケール・ファクタの変動による影響をなくすために、制御系はすべて閉ループとした。このためジャイロ出力は、音響光学変調器AOM1とAOM2との駆動周波数差として測定される[7]。

共振器中の信号光と散乱光との干渉による雑音は、第5章で説明したように、左回り光に2値位相変調をかけ、搬送波成分を安定に消すことによって除去している[7]-[10]。

次に、光カー効果誘起雑音の除去手法を説明する。まず、共振器に入射する光強度を強度変調器IM1を用いて正弦波で変調する。この強度変調周波数（角周波数： k ）は、共振点検出のための位相変調周波数（角周波数： q ）よりもかなり低く設定する。このとき、右回り光の平均強度 \bar{I}_{cw} と左回り光の平均強度 \bar{I}_{ccw} が異なる場合には、ロックインアンプLIA1、LIA2間の差動出力P3中には光カー効果によって誘起された角周波数 k の成分が現れる。しかし \bar{I}_{cw} と \bar{I}_{ccw} が等しい場合には、こ

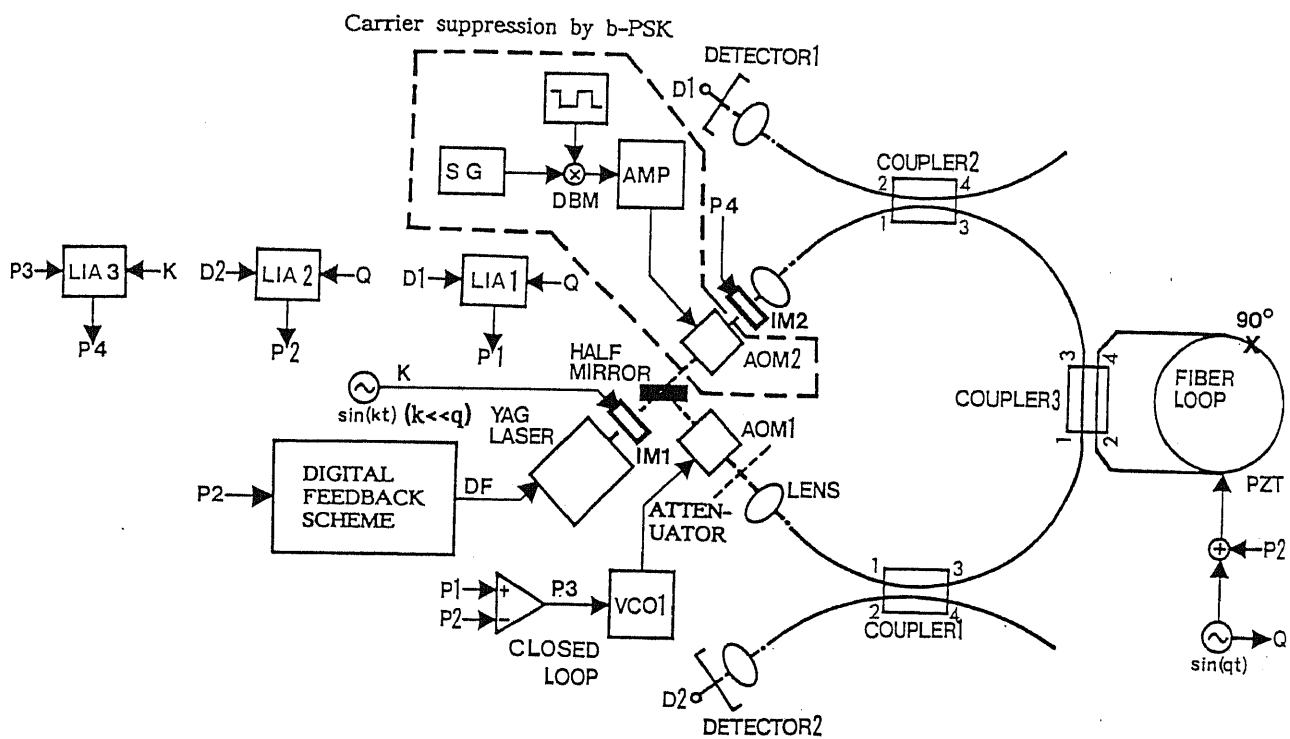
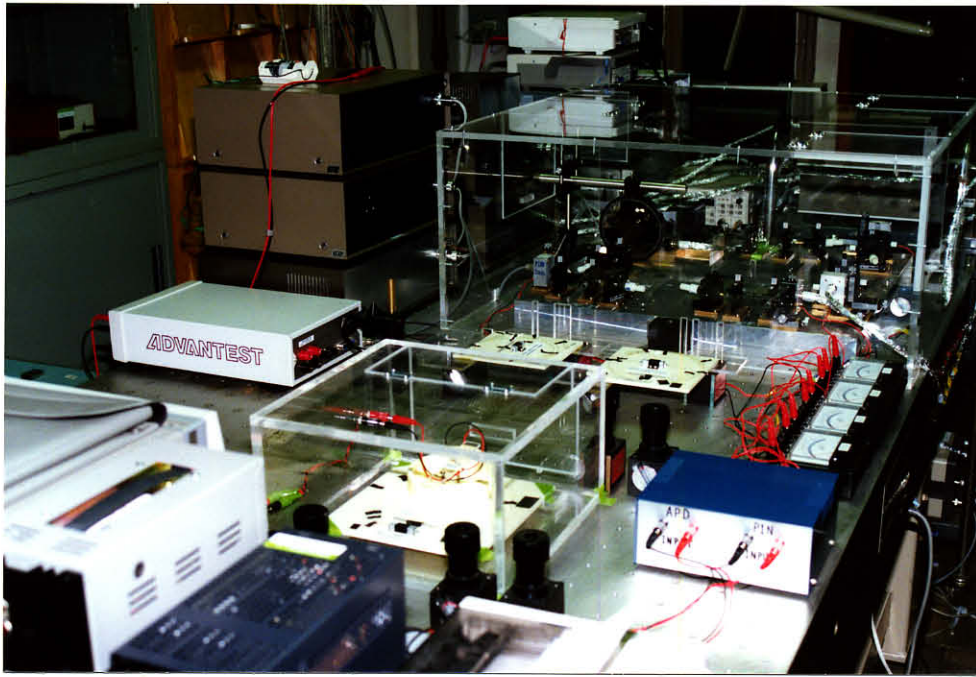
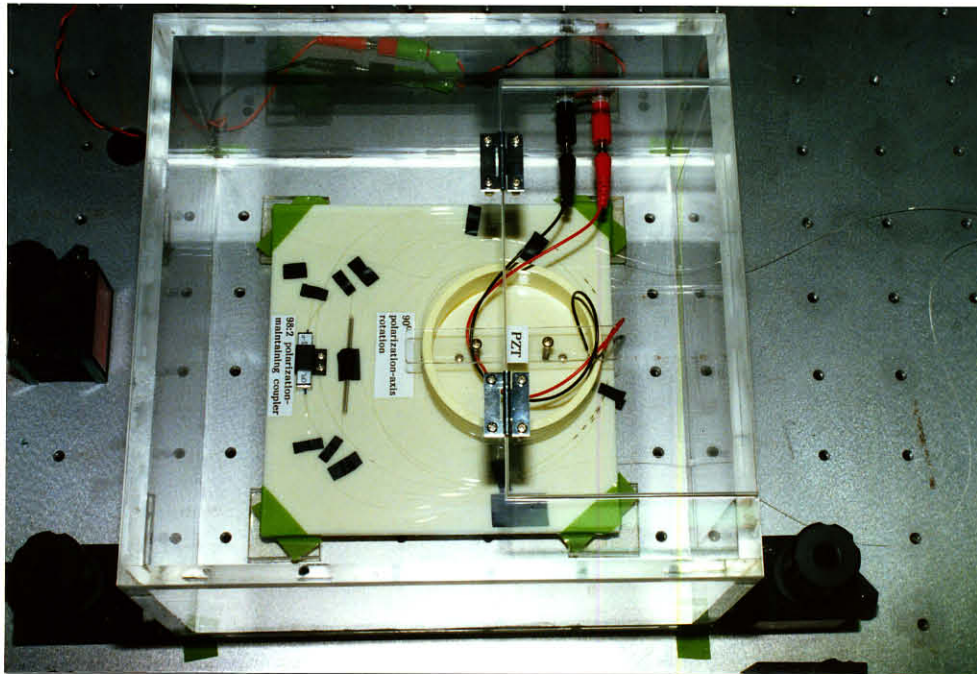


図 7・4 光カー効果誘起雑音の除去手法を含んだジャイロの実験系



(a) 全景



(b) リング共振器

図 7 ・ 5 実際の系の写真

表 7・1 定偏波光ファイバカプラの諸元

No.		カプラ 1		カプラ 2	
項目	入射 / 偏波	x	y	x	y
過剰損失 (dB)	1 入射	0.6	0.6	0.2	0.1
	2 入射	0.3	0.6	0.3	0.4
分岐比 (%)	1 入射	51	57	51	59
	2 入射	55	59	51	60
クロストーク (dB)	1 → 3	-33	-33	-22	-22
	1 → 4	-23	-24	-27	-27
	2 → 3	-27	-27	-24	-23
	2 → 4	-27	-26	-31	-30
方向性 (dB)	1 → 2	-67		-66	

表 7・2 定偏波光ファイバカプラの諸元

No.		カプラ 3	
項目	入射 / 偏波	x	y
過剰損失 (dB)	1 入射	0. 1	0. 3
	2 入射	0. 1	0. 1
分岐比 (%)	1 入射	9 8	9 8
	2 入射	9 8	9 8
クロストーク (dB)	1 → 3	- 3 7	- 3 6
	1 → 4	- 2 8	- 3 3
	2 → 3	- 3 4	- 3 0
	2 → 4	- 3 3	- 3 2
方向性 (dB)	1 → 2	- 7 4	

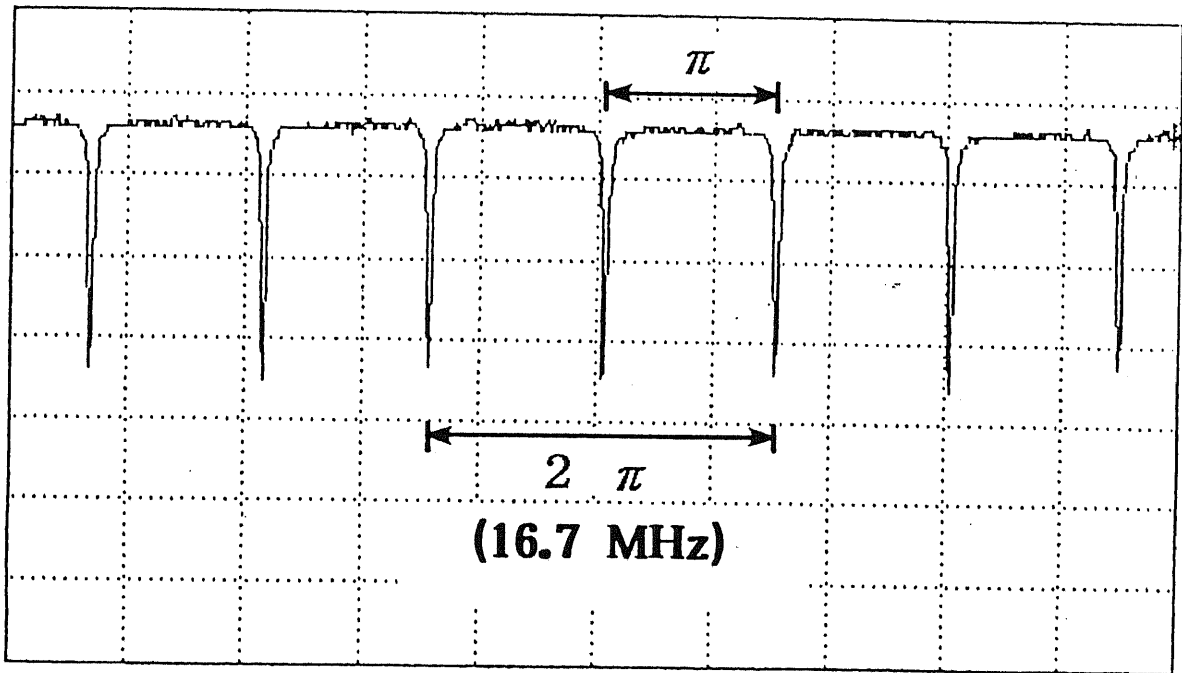


図 7・6 偏波軸を 90° 回転接続したリング共振器の共振特性

の成分は現れない。この様子を図7・7で模式的に説明した。従って $(\bar{I}_{cw} - \bar{I}_{ccw})$ に比例する光カー効果誘起雑音成分が、ロックインアンプLIA3の同期検波出力として得られることになる。

最後に、LIA3の出力P4を強度変調器IM2に負帰還することにより、両回り光間の強度差 $(\bar{I}_{cw} - \bar{I}_{ccw})$ を零にし、光カー効果誘起雑音の影響を除去する仕組みになっている。

しかしこの除去手法に関して、以下のような2つの疑問が生ずる。

(1) 変調器IM1による強度変調自身の影響により、光カー効果とは関係のない角周波数 k の成分がP3中に生じ、光カー効果の検出に悪影響を及ぼすのではないか。

(2) 左右両回り光の制御系の利得を厳密に等しくすることは不可能である。その場合でも両回り光間の強度差に比例した光カー効果誘起雑音の成分を、P3中から正確に検出することは可能であるのか。

そこで巻末の付録7Aにおいて、強度変調自身が光カー効果検出に及ぼす影響についての検討を行った。また付録7Bでは、信号P3中の光カー効果誘起雑音成分が、制御系の利得に対してどのように依存するかについての検討を行った。その結果、両回り光に関する2つの制御系をすべて閉ループとする図7・4の構成をとった場合、上記の疑問点は解決されることがわかった。

7-4. 光カー効果誘起雑音の除去実験[11]-[13]

7-3節で説明した光カー効果誘起雑音の除去手法に関して、その有効性を検証する基礎実験を行った。

ここで使用するYAGレーザーには、強度変調機能が付加されている[6]。実際には、強度変調器IM1の代わりにこの変調機能を用いて、光カー効果検出のための強度変調を行った。また、強度変調器IM2の代わりにAOM2を用い、回折効率を変化させることによって両回り光間の強度差を補正する系を構成した。

共振点検出と光カー効果検出の変調周波数は、それぞれ7kHz、200Hzとした。ま

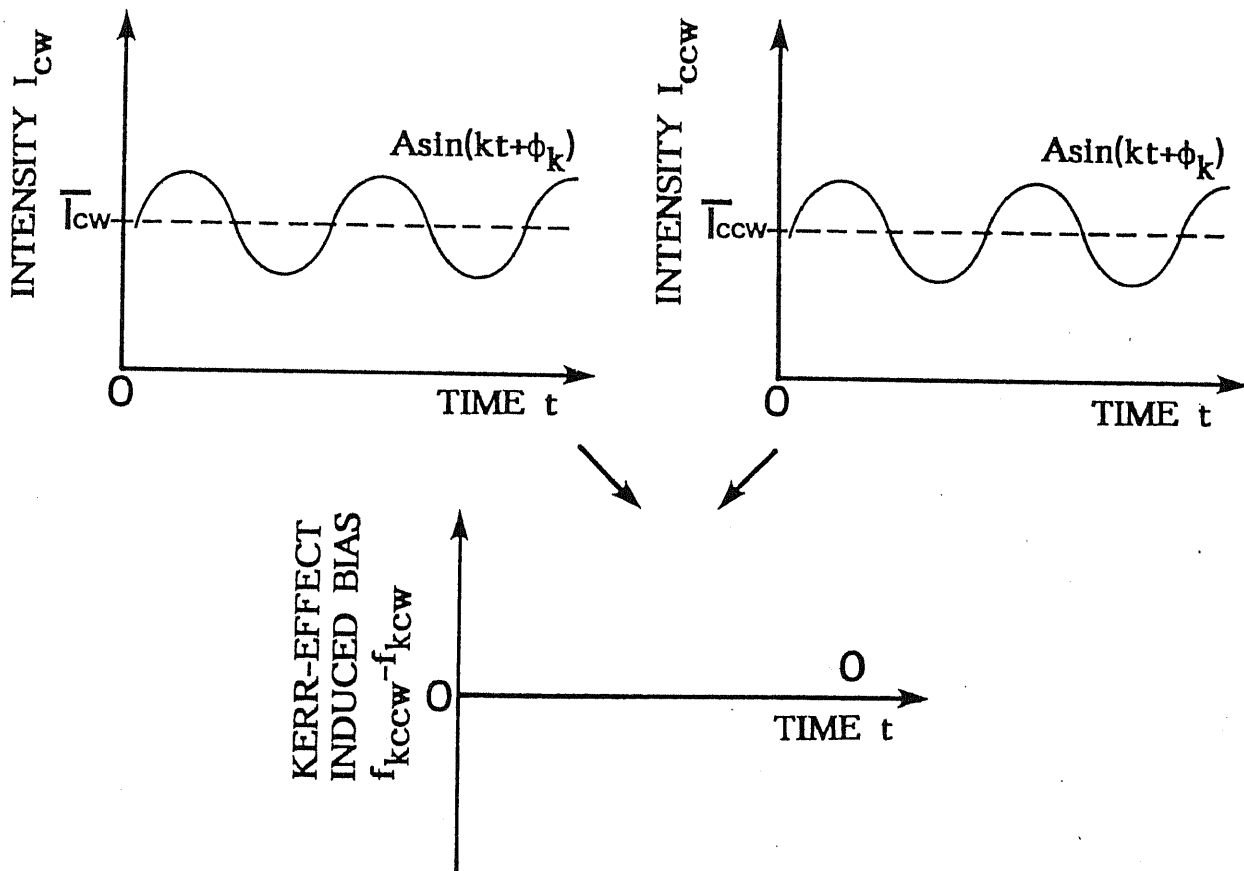


図7・7(a) 信号P3中の光カー効果誘起雑音 $\bar{I}_{cw} - \bar{I}_{ccw} = 0$ の時, P3中のk成分は0になる

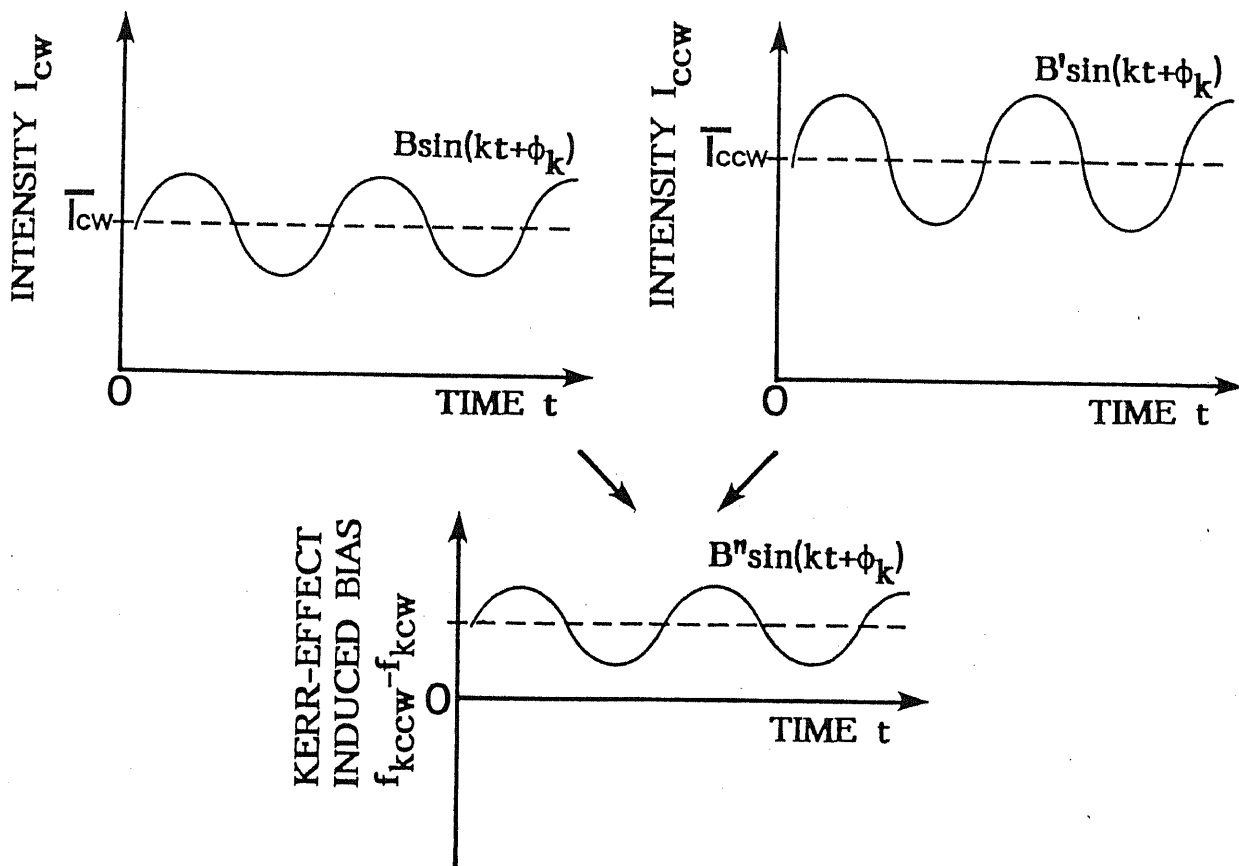


図7・7 (b) 信号P3中の光カー効果誘起雑音 $\bar{I}_{cw} - \bar{I}_{ccw} \neq 0$ の時, P3中のk成分は0にならない

た光カー効果検出のための強度変調指数は、3.2%に設定した。受光器D1、D2の出力は、YAGレーザの強度モニター出力[6]で割り算をした。これは、強度変調自身が光カー効果検出に及ぼす悪影響（付録7A、式(7A・3)の第4項)の除去にも有効である。

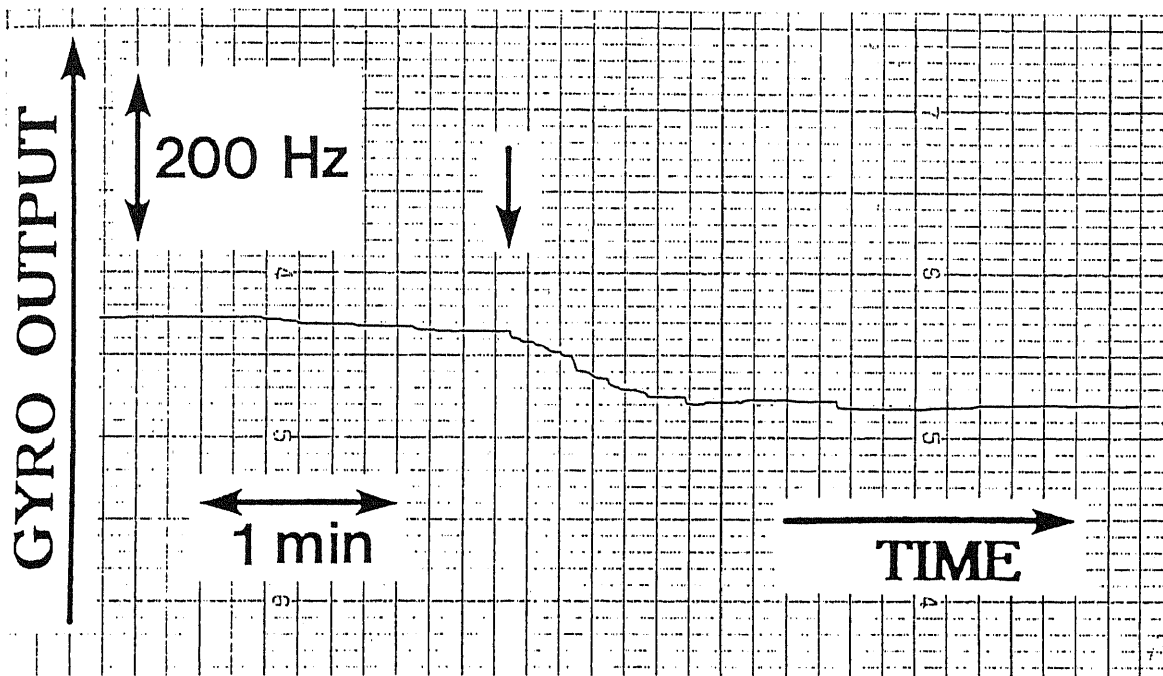
右回り光の強度を可変アッテネータで積極的に変化させることにより実験を行った。その結果を図7・8に示す。ジャイロ出力の時定数 T_0 は、30秒とした。図7・8の(a)、(b)はそれぞれ、光カー効果誘起雑音の除去手法が取り込まれていない場合、取り込まれている場合のジャイロ出力を示している。矢印↓で示された点で、右回り光の強度を $55\mu\text{W}$ から $13\mu\text{W}$ ほど減少させている。

図7・8(a)からわかるように、光カー効果の除去手法が取り込まれていない場合、ジャイロ出力は90Hz変動している。この値は、文献[1]を用いて計算した理論計算値(50Hz)とオーダ的に一致している。ところが図7・8(b)は、この除去手法により光強度変化による光カー効果誘起雑音が補償され、出力が変動しないことを明確に示している。

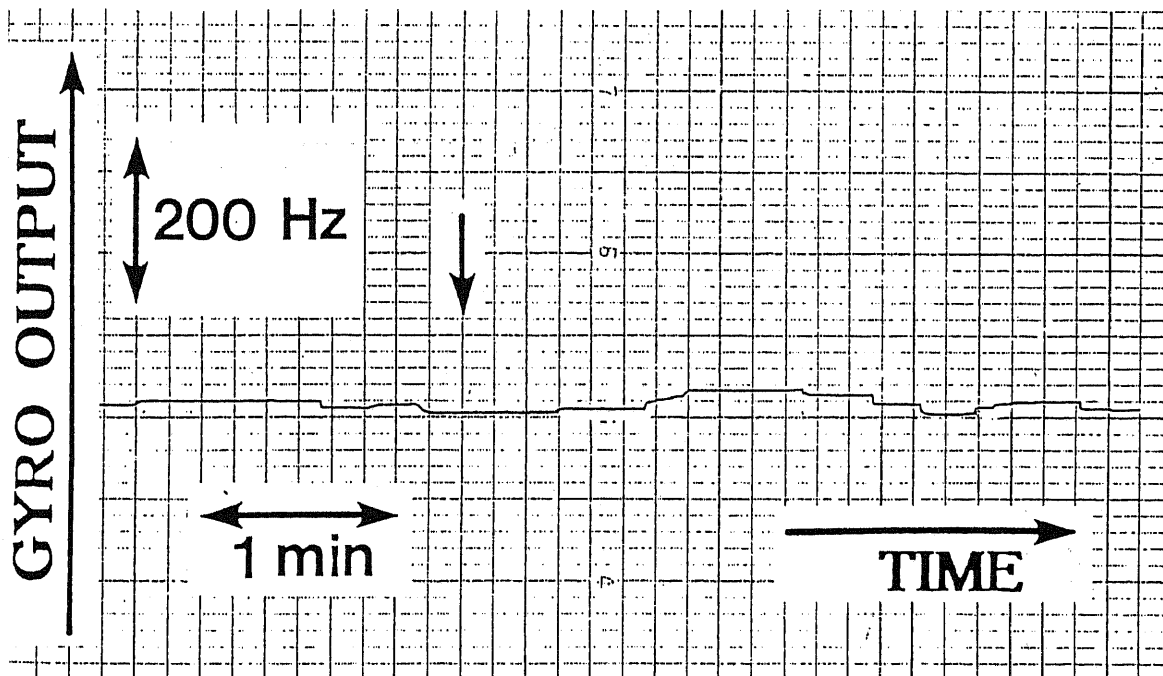
7-5. まとめ

受動型リング共振方式光ジャイロにおいて、光カー効果誘起雑音を有効に除去する手法を新しく提案した。この手法ではまず、共振点検出に用いる位相変調周波数より非常に低い周波数で共振器に入射する光強度を変調し、両回り光間の強度差を検出する。その後、この差成分を用いて一方の光強度に負帰還をかけ、強度差を零にする。

この手法の有効性を検証する基礎実験を行い、提案どおりに光カー効果誘起雑音の除去が可能であることを示した。



(a) 除去手法がない場合



(b) 除去手法がある場合

図 7・8 光カー効果誘起雑音除去手法の基本動作 測定の時定数: $T_c=30$ 秒,

$100\text{Hz}=2 \times 10^{-3}\text{rad/s}$

付録 7 A —— 強度変調が光カー効果誘起雑音検出に与える影響の検討 ——

受動型リング共振方式光ジャイロにおいて、リング共振器の共振特性 $g(t)$ は以下の式で表わされる。

$$g(t) = C_1 \{1 + C_2 \sin(kt + \phi_k)\} \left[1 - \frac{C_3}{1 + C_4 (f - f_0)^2} \right], \quad (7 A \cdot 1)$$

$$f = f_0 + f_w \sin(qt) + f_k \{1 + C_2 \sin(kt + \phi_k)\} + f_n. \quad (7 A \cdot 2)$$

ただし、 $C_i (i=1-4)$: 定数、 f_0 : 共振周波数、 f_w : 共振点検出のための周波数変調の周波数変位、 f_k : 光カー効果誘起雑音、 f_n : 共振点からのオフセット、 ϕ_k : 光カー効果検出のための強度変調の位相項、である。式 (7 A · 1) の $C_2 \sin(kt + \phi_k)$ は強度変調を表す項、式 (7 A · 2) の $f_k \sin(kt + \phi_k)$ は光カー効果によって誘起されるバイアス成分を表している。

角周波数 q による同期検波出力 $h(t)$ は、式 (7 A · 1) を f で微分した式で与えられ、以下のように表現される。

$$\begin{aligned} h(t) &= 2C_1 C_3 C_4 \{1 + C_2 \sin(kt + \phi_k)\} [f_n + f_k \{1 + C_2 \sin(kt + \phi_k)\}] \\ &= 2C_1 C_3 C_4 \{f_n + f_k + f_k C_2^2 / 2 + f_n C_2 \sin(kt + \phi_k) + 2f_k C_2 \sin(kt + \phi_k) \\ &\quad - f_k C_2^2 \cos(2kt + 2\phi_k) / 2\}. \end{aligned} \quad (7 A \cdot 3)$$

式 (7 A · 3) においてオフセット成分 f_n は、両回り光の制御系とも閉ループとなっているために十分小さい。これは、強度変調自身が誘起する成分 (式 (7 A · 3) の第 4 項) が、光カー効果が誘起する成分 (式 (7 A · 3) の第 5 項) に対して無視できることを意味している。そのため、ロックインアンプ LIA3 では、光カー効果に関係した角周波数 k の成分のみを検出できることになる。

付録 7 B —— 信号 P3 中の光カー効果誘起雑音成分の制御系利得に対する依存性の検討 ——

7 B - 1. 左回り光側の制御系に関する検討

$m_2(t)$ を LIA2 中の積分器のインパルス応答とすると、LIA2 の出力 $p_2(t)$ は、文献 [21], [22] と同様に、以下のように表せる。

$$p_2(t) = \int_0^t m_2(t-t_0) h_2 \{ f_0 + K_p w(t_0) - f_s(t_0) - f_d(t_0) - f_{k_2}(t_0) \} dt_0. \quad (7 B \cdot 1)$$

ただし、

$$h_2(f) = b_2(f - f_0), \quad (7 B \cdot 2)$$

$h_2(f)$: LIA2 の同期検波出力、 f_0 : 共振周波数、 $w(t)$: PZT への負帰還信号、 K_p : PZT の利得、 $f_s(t)$: Sagnac 効果による周波数変化、 $f_d(t)$: 外乱による周波数変化、 $f_{k_2}(t)$: 光カー効果による周波数変化、 b_2 : 定数、である。以下では一般的に、 $a(t)$ のラプラス変換を $A(s)$ と表現することにする。 $p_2(t)$ のラプラス変換 $P_2(s)$ は、以下のように表される。

$$P_2(s) = b_2 M_2(s) \{ K_p W(s) - F_s(s) - F_d(s) - F_{k_2}(s) \}. \quad (7 B \cdot 3)$$

ただし、

$$M_2(s) = K_2 / (1 + sT_2), \quad (7 B \cdot 4)$$

$M_2(s)$: LIA2 中の積分器の伝達関数、 K_2 、 T_2 : 定数、である。実際には $p_2(t)$ の後段には積分器が入っており、その伝達関数は式 (7 B · 4) と同様な形になる。しかし図 7 · 4 の実験系の場合、部分的デジタル制御系が取り入れられており、ランプ性の外乱も除去可能となっている。そのため、理想的な積分器の伝達関数

を持っていると仮定する。すなわち、

$$W(s) = -\{A_2/(sT)\}P_2(s), \quad (7B \cdot 5)$$

となる。ただし、 A_2 、 T ：定数、である。式(7B・3)、(7B・5)より $P_2(s)$ は以下のように表される。

$$P_2(s) = -\frac{b_2 M_2(s) \{F_s(s) + F_d(s) + F_{k_2}(s)\}}{1 + \{b_2 A_2 K_p / (sT)\} M_2(s)} \quad (7B \cdot 6)$$

回転と光カー効果による周波数変化はステップ的、外乱による変化はランプ的であると仮定すると、

$$F_s(s) = F_s/s, \quad F_{k_2}(s) = F_{k_2}/s, \quad F_d(s) = F_d/s^2, \quad (7B \cdot 7)$$

と表すことができる。ただし、 F_s 、 F_{k_2} 、 F_d ：定数である。式(7B・4)、(7B・6)、(7B・7)より、

$$P_2(s) = -\frac{b_2 K_2 \{s(F_s + F_{k_2}) + F_d\}}{s^2(1 + sT_2) + s(b_2 A_2 K_p K_2 / T)} \quad (7B \cdot 8)$$

$$\therefore p_2(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} s P_2(s) = -F_d T / (A_2 K_p). \quad (7B \cdot 9)$$

7B-2. 右回り光側の制御系に関する検討

ロックインアンプLIA1とLIA2の差動出力 $p_3(t)$ は、以下のように表される。

$$p_3(t) = \int_0^t m_1(t-t_0) h_1 \{f_0 - K_a v(t_0) + K_p w(t_0) + f_s(t_0) - f_d(t_0) - f_{k_1}(t_0)\} dt_0 \\ - \int_0^t m_2(t-t_0) h_2 \{f_0 + K_p w(t_0) - f_s(t_0) - f_d(t_0) - f_{k_2}(t_0)\} dt_0. \quad (7B \cdot 10)$$

ただし、

$$h_1(f) = b_1(f - f_0), \quad (7B \cdot 11)$$

$m_1(t)$: LIA1中の積分器のインパルス応答、 $h_1(f)$: LIA1の同期検波出力、 $v(t)$: AOM1への負帰還信号、 K_a : AOM1の利得、 $f_{k1}(t)$: 光カー効果による周波数変化、 b_1 : 定数、である。式(7B・10)のラプラス変換 $P_3(s)$ を求めると、

$$P_3(s) = -b_1 K_a M_1(s) V(s) + K_p \{b_1 M_1(s) - b_2 M_2(s)\} W(s) + \{b_1 M_1(s) + b_2 M_2(s)\} F_s(s) \\ - \{b_1 M_1(s) - b_2 M_2(s)\} F_d(s) - b_1 M_1(s) F_{k1}(s) + b_2 M_2(s) F_{k2}(s), \quad (7B \cdot 12)$$

ただし、

$$M_1(s) = K_1 / (1 + sT_1), \quad (7B \cdot 13)$$

$$F_{k1}(s) = F_{k1} / s, \quad (7B \cdot 14)$$

$M_1(s)$: LIA1中の積分器の伝達関数、 K_1 、 T_1 、 F_{k1} : 定数である。また、 $V(s)$ と $P_3(s)$ との間には以下の関係がある。

$$V(s) = -A_1 P_3(s). \quad (7B \cdot 15)$$

ただし、 A_1 : 定数、である。式(7B・12)、(7B・15)より、

$$P_3(s) = [1 / \{1 - b_1 A_1 K_a M_1(s)\}] \\ \cdot [\{b_1 M_1(s) - b_2 M_2(s)\} \{K_p W(s) - F_d(s)\} + \{b_1 M_1(s) + b_2 M_2(s)\} F_s(s) \\ - b_1 M_1(s) F_{k1}(s) + b_2 M_2(s) F_{k2}(s)]. \quad (7B \cdot 16)$$

式(7B・4)、(7B・7)、(7B・13)、(7B・14)、(7B・1

6) を用いることによって、

$$\begin{aligned} p_3(\infty) &= \lim_{s \rightarrow 0} s P_3(s) \\ &= \{1 / (1 - b_1 A_1 K_a K_1)\} \\ &\quad \cdot [-\{F_d T / (b_2 A_2 K_p K_2)\} (b_1 K_1 - b_2 K_2) + 2b_1 K_1 F_s + b_1 K_1 (F_{k2} - F_{k1})], \end{aligned} \tag{7 B \cdot 17}$$

となる。

ただし、7 B - 1 の検討より、

$$\lim_{s \rightarrow 0} s \{K_p W(s) - F_d(s)\} = F_s + F_{k2} - F_d T / (A_2 B_2 K_p K_2), \tag{7 B \cdot 18}$$

となることを用いた。式(7 B \cdot 17)の第3項より、ロックインアンプLIA1とLIA2間の差動出力 $p_3(t)$ を用いて、左右両回り光間の利得差に関係なく光カー効果誘起雑音 $(F_{k2} - F_{k1})$ を検出可能であることがわかる。

参考文献

- [1] K. Iwatsuki, K. Hotate, and M. Higashiguchi, "Kerr Effect in an optical passive ring-resonator gyro," J. Lightwave Technol., vol. LT-4, no. 6, pp. 645-651, June 1986.
- [2] 瀧口, 保立, "受動型リング共振方式光ジャイロにおける光カー効果の観測," 電子情報通信学会, 秋季全国大会, paper C-335, p. 4-275, 横浜, 1989年9月.
- [3] 瀧口, 保立, "受動型リング共振方式光ジャイロにおける部分的デジタル制御の適用と光カー効果誘起雑音の評価," 電子情報通信学会, 光・量子エレクトロニクス研究会, paper OQE90-94, pp. 1-6, 仙台, 1990年11月.
- [4] K. Takiguchi and K. Hotate, "Partially digital-feedback scheme and evaluation of optical Kerr-effect induced bias in optical passive ring-resonator gyro," in Proc. OFS '90, paper TU01.3, pp. 23-26, Sydney, Australia, Dec. 1990.
- [5] K. Takiguchi and K. Hotate, "Partially digital-feedback scheme and evaluation of optical Kerr-effect induced bias in optical passive ring-resonator gyro," Photon. Technol. Lett., vol. 3, no. 7, pp. 679-681, July 1991.
- [6] "User manual of diode pumped ring laser," Lightwave Electronics Co., U.S.A., Apr. 1988.
- [7] 瀧口, 保立, "複数の雑音除去手法を取り入れた受動型リング共振方式光ジャイロ," 電子情報通信学会, 光・量子エレクトロニクス研究会, paper OQE91-79, pp. 13-18, 北九州, 1991年9月.
- [8] 保立, 瀧口, 廣瀬, "受動型リング共振方式光ジャイロにおける後方散乱による雑音の無調整除去手法," 電子情報通信学会, 光・量子エレクトロニクス研究会, paper OQE89-8, pp. 43-48, 東京, 1989年4月.
- [9] 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," in Proc. IOOC '89, paper 20D3-2, pp. 194-195, Kobe, Japan, July 1989.

- [10] 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," *Photon. Technol. Lett.*, vol. 2, no. 1, pp. 75-77, Jan. 1990.
- [11] 瀧口, 保立, "受動型リング共振方式光ジャイロにおける光カー効果誘起雑音の除去手法," 応用物理学会, 第8回光波センシング技術研究会, paper LST8-18, pp. 123-130, 東京, 1991年12月.
- [12] K. Takiguchi and K. Hotate, "Method to reduce the optical Kerr-effect induced bias in an optical passive ring-resonator gyro," to be presented at OFS '92, paper W2.3, Monterey, U.S.A., Jan. 1992.
- [13] K. Takiguchi and K. Hotate, "Method to reduce the optical Kerr-effect induced bias in an optical passive ring-resonator gyro," to be published in *Photon. Technol. Lett.*, vol. 4, no. 2, Feb. 1992.
- [14] G. A. Sanders, R. B. Smith, and G. F. Rouse, "Novel polarization-rotating fiber resonator for rotation sensing applications," in *Proc. SPIE OE/FIBERS '89*, paper 1169-74, pp. 373-381, Boston, U.S.A., Sept. 1989.
- [15] P. Mouroulis, "Polarization fading effects in polarization-preserving fiber ring resonators," in *Proc. SPIE OE/FIBERS '89*, paper 1169-46, pp. 400-412, Boston, U.S.A., Sept. 1989.
- [16] 瀧口, 保立, "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)," 電子情報通信学会, 光・量子エレクトロニクス研究会, paper OQE89-137, pp. 19-24, 東京, 1990年3月.
- [17] K. Takiguchi and K. Hotate, "Evaluation of the output error in an optical passive ring-resonator gyro with a 90-deg. polarization axis rotation in the polarization-maintaining fiber-resonator," in *Proc. OEC '90*, paper 13C2-2, pp. 264-265, Chiba, Japan, July 1990.
- [18] 瀧口, 保立, "偏波軸を90度回転接続した共振器を持つ受動型リング共振方式光ジャイロの出力誤差評価," 電子情報通信学会, 秋季全国大会, paper C-297, p. 4-339, 広島, 1990年10月.

- [19] K. Takiguchi and K. Hotate, "Evaluation of the output error in an optical passive ring-resonator gyro with a 90° polarization-axis rotation in the polarization-maintaining fiber resonator," *Photon. Technol. Lett.*, vol. 3, no. 1, pp. 88-90, Jan. 1991.
- [20] 瀧口, 保立, "偏波軸を90度回転接続した共振器を持つ受動型リング共振方式光ジャイロの出力誤差評価(II)," 電子情報通信学会, 春季全国大会, paper C-407, p. 4-424, 徳島, 1991年3月.
- [21] 岩月, "受動型リング共振方式光ジャイロにおける温度・機械変動などの外乱の影響に関する考察," 電子情報通信学会, 光・量子エレクトロニクス研究会, paper OQE86-140, pp. 59-65, 1986年12月.
- [22] 田井, 高橋, 久間, 浜中, "リング共振型光ファイバジャイロスコープ," 応用物理学会, 第5回光ファイバセンサワークショップ, paper WOF5-8, pp. 55-62, 1987年6月.

第8章 光ファイバ共振器中の光カー効果を用いたロックイン現象の解除

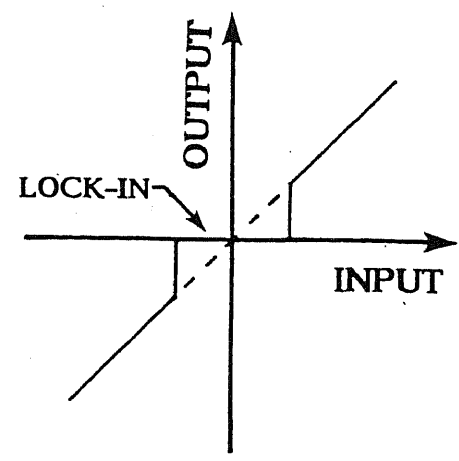
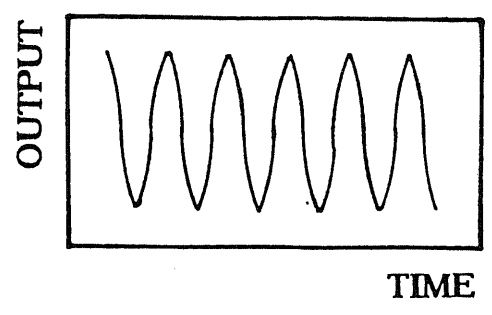
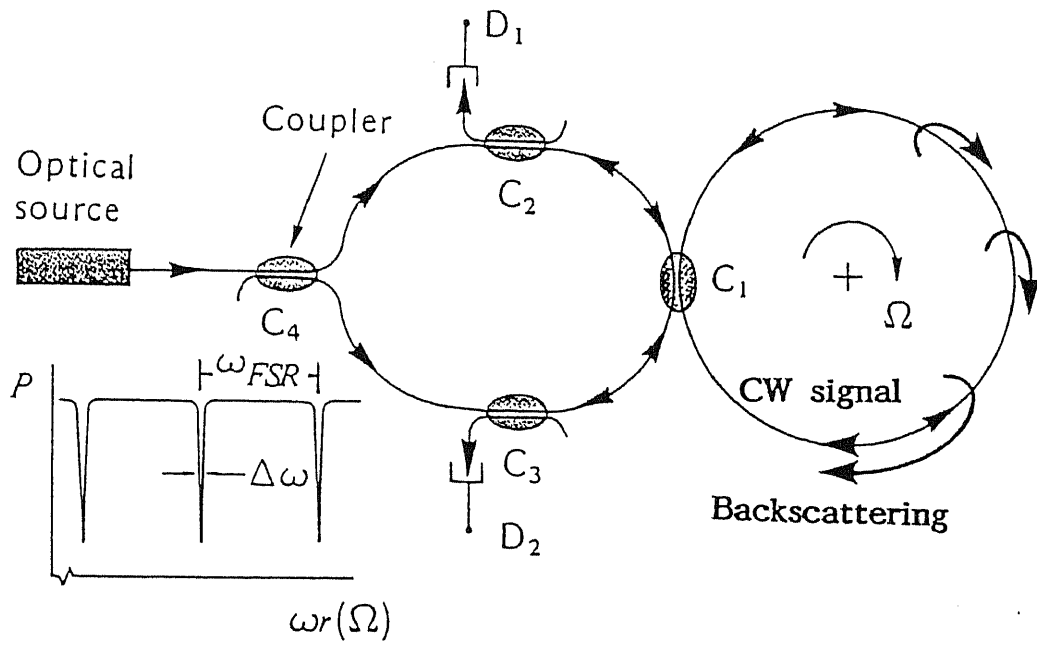
8-1. はじめに

第5章でも述べた通り、受動型リング共振方式光ジャイロの主要な雑音要因の1つとして、後方散乱光による影響が存在する。中でも、散乱光とそれを生み出した信号光とは逆回りに伝搬する信号光との干渉成分の影響は非常に大きな性能劣化要因になっている。この干渉成分の影響により、ジャイロを開ループで構成した場合には両回り光間の差周波数で変化する干渉が起こり、出力が大きく変化する[1]-[3]。閉ループで構成した場合には、低回転角速度時に引き込み現象が起こり回転検出が不可能になり、出力に非線形性が現れる(ロックイン現象)[4]。この様子を図8・1に示す。

この干渉成分の除去手法としては、リング共振器に入射する前の一方の光に搬送波周波数成分を抑圧するように変調をかけ、干渉成分を信号帯域外に出す方法がよく用いられてきた[3]-[8]。搬送波成分の抑圧手法としては、正弦波で位相あるいは周波数変調をかける方法[3]-[5]、第5章で説明した2値位相変調をかける方法[6]-[8]等がある。またリングレーザジャイロと同様に、機械的ディザ法[9]-[11]により出力バイアスを変調して、ロックインを解除することも可能である。

本章では、光ファイバ共振器中で生じる光カー効果を用いてロックイン現象を解除する手法を新しく提案する。第7章で説明したように、共振器中の光強度変化により、光カー効果を通じてジャイロの出力バイアスも変化する。この現象を用いて出力バイアスを変調し、機械的ディザ法と同様にして、ロックイン現象を解除する手法である。本手法は、機械的可動部を必要とせず、光ファイバ共振器自体の性質を用いてロックインが解除可能という大きな利点を持つ。この手法の実験的検証に成功したので、その結果についても述べる。

本手法は受動型リング共振方式光ジャイロのみならず、最近提案された能動型の光ファイバブリルアンリングレーザジャイロ[12], [13]にも適用可能であると考えられる。



Degradation of resolution in open loop operation

Lock-in phenomenon in closed loop operation

図 8 ・ 1 信号光と後方散乱光との干渉による雑音

8-2. ロックイン現象の解除手法の原理[14], [15]

低回転角速度時に発生するロックイン現象の解除法の1つとして、ジャイロの出力バイアスを変調する手法が考えられる。リングレーザジャイロにおける機械的ディザ法[9]-[11]は代表的なロックイン解除法である。

共振器中で後方散乱が生じている場合、受動型リング共振方式光ジャイロにおける両回り光間の瞬時の共振位相差を ϕ と定義する。ロックイン現象解除のため、出力バイアスの変調が行われている場合を考えると、両回り光間の共振角周波数差 $d\phi/dt$ は、機械的ディザ法の場合と同様にして、以下のように表される[9]-[11]。

$$d\phi/dt = \Omega + \Omega_L \sin\phi + \Omega_d \cos\omega_d t. \quad (8 \cdot 1)$$

ただし、

$$\Omega_L = r_2 (E_2/E_1) (C/L), \quad (8 \cdot 2)$$

で、 $|2\Omega_L|$ は変調を行っていない場合のロックインレンジである。また、 Ω : 回転角速度、 Ω_d : バイアス変調の角周波数変位、 ω_d : バイアス変調の角周波数、 $E_i (i=1, 2)$: 信号光の電界の振幅、 r_2 : 信号光2が後方散乱によって信号光1に結合する割合を表す係数、 C : 共振器中の光速、 L : 共振器長、である。なお式(8・1)では、信号光1が生み出す後方散乱光の信号光2に対する結合は、簡単のために無視している。

式(8・1)の解は、 $\Omega_d \gg \Omega_L$ を仮定すると、以下のように表現される[10], [11]。

$$\begin{aligned} \phi = & \Omega t + M \sin\omega_d t \\ & + \Omega_L [J_0(M) \cos(\Omega t) / \Omega \\ & + J_1(M) \{ \cos(\Omega + \omega_d)t / (\Omega + \omega_d) - \cos(\Omega - \omega_d)t / (\Omega - \omega_d) \} \\ & + J_2(M) \{ \cos(\Omega + 2\omega_d)t / (\Omega + 2\omega_d) + \cos(\Omega - 2\omega_d)t / (\Omega - 2\omega_d) \} \\ & + \dots]. \end{aligned} \quad (8 \cdot 3)$$

ただし、

$$M = \Omega_d / \omega_d, \quad (8 \cdot 4)$$

$J_n (n=0, 1, 2, \dots)$: 第一種 n 次 Bessel 関数、である。

$\omega = \pm n \omega_d (n=0, 1, 2, \dots)$ が満たされる場合、式 (8・3) の第 3 項は非常に大きな値になり、ロックイン現象が発生することになる。 $\omega = \pm n \omega_d$ に対するロックインレンジ R は、式 (8・3) より以下のように表される [10], [11]。

$$R = | 2 \Omega_L J_n(M) |. \quad (8 \cdot 5)$$

従って式 (8・5) より、 $J_0(M)=0$ となるように M を設定する ($M=2.40, 5.52, 8.65, \dots$) と、低回転角速度時に発生するロックイン現象は解除される。この場合においても、 $\omega = \pm n \omega_d (n=1, 2, 3, \dots)$ で発生するロックインは解除されない。この様子を図 8・2 に示す。しかし、 J_0 の零点の中で十分に大きなものを M として選ぶと、 $J_n (n=1, 2, 3, \dots)$ の値が小さくなるので、 $\omega = \pm n \omega_d (n=1, 2, 3, \dots)$ での非線形性を小さくすることが可能である。

図 8・3 は、光ファイバ共振器中の光カー効果によるロックイン現象の解除手法を含む受動型リング共振方式光ジャイロの実験系である。光源としては半導体レーザ励起 YAG レーザ (波長: $1.3 \mu\text{m}$ 、ジッターも含めた線幅: 300kHz) [16] を用いている。リング共振器は偏波維持光ファイバ・カプラによって構成され、共振器長、共振器直径は、それぞれ 12m 、 0.1m である。またそのフィネスは約 100 である。共振器中での偏波変動の影響を除去するために、偏波軸を 90° 回転して接続を行い共振器を構成した [17]-[24]。このリング共振器は、第 7 章 (7-3、4 節) で用いたものと同一である。

PZT を 3kHz の正弦波で駆動し光波に位相変調をかけることによって、共振点検出を行っている。受光器 D2 の出力はロックインアンプ LIA2 で同期検波された後、PZT に負帰還され、外乱による共振点変化の補償に用いられる。また第 6 章で説明したように、ランプ性外乱を除去するために、同時に YAG レーザの周波数をデジタル

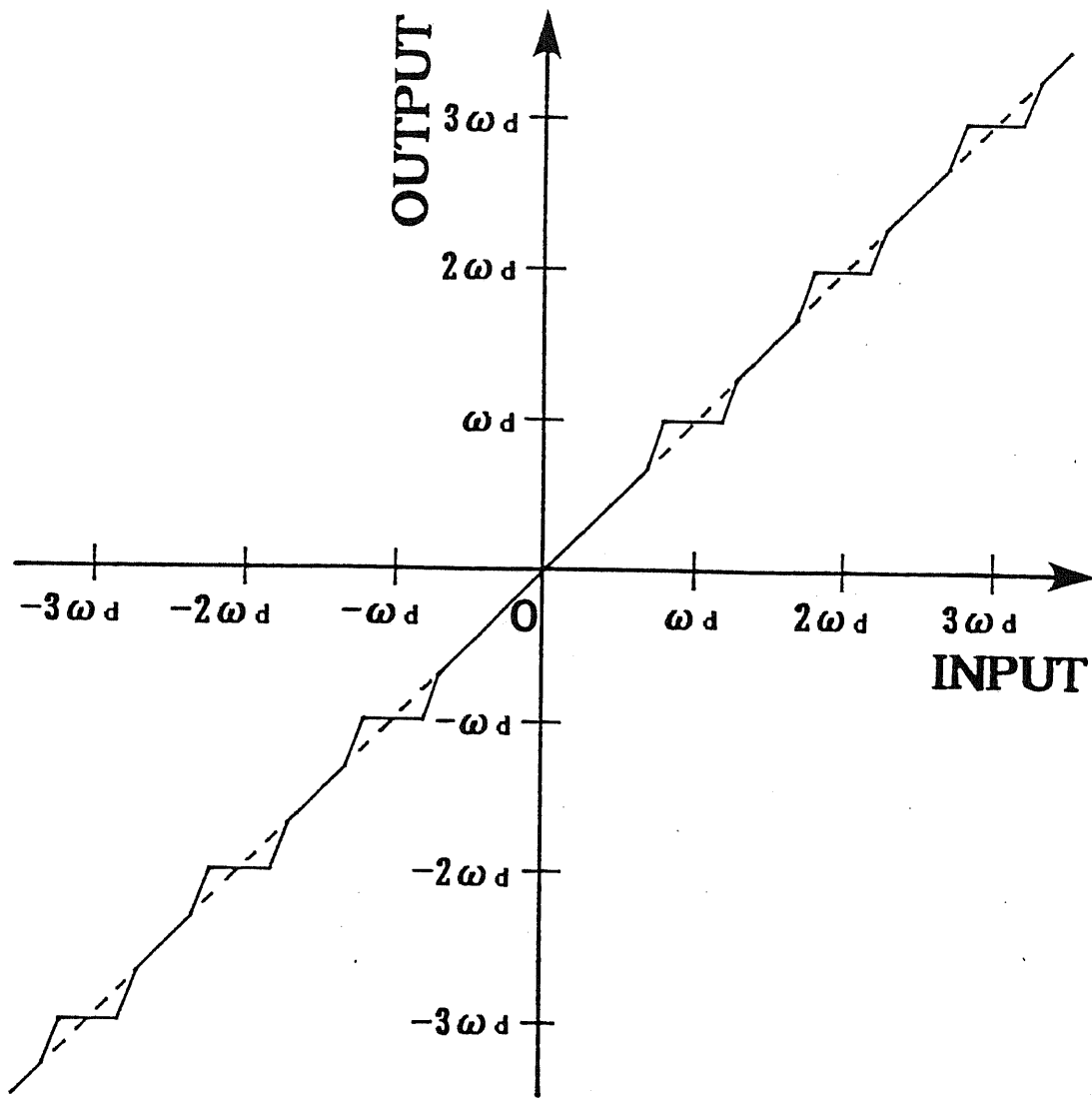


図 8・2 バイアス変調を行った場合のジャイロの入出力特性

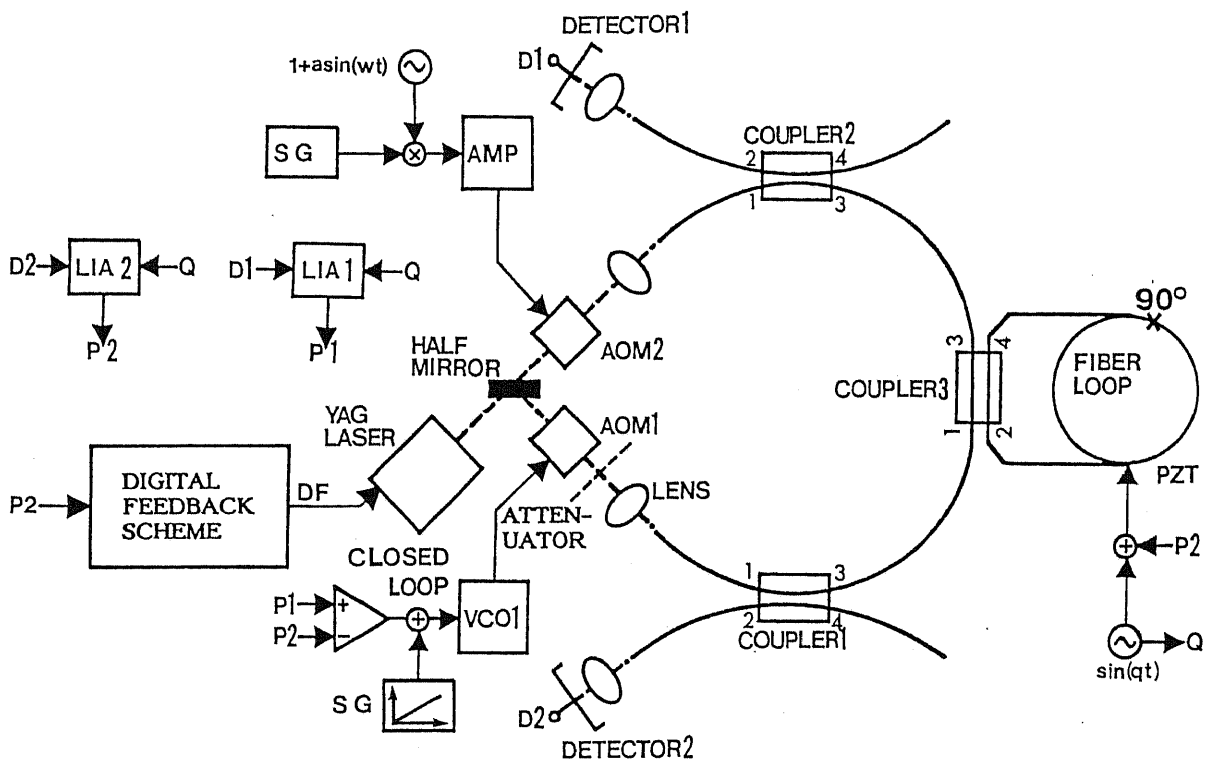


図 8 - 3 ロックイン現象の解除手法を含んだジャイロの実験系

的に制御している（部分的デジタル制御系）[24]-[27]。

この実験系では、スケール・ファクタの変動による影響をなくするために系を閉ループ構成としたため、AOM1とAOM2との駆動周波数差がジャイロ出力に相当する[24]。

第7章で説明したように、共振型光ジャイロにおいては、光ファイバ共振器中の光カー効果により、両回り光間の平均強度差 ΔI に比例する出力バイアスが生じる[28]-[32]。またやはり第7章において、その除去手法を提案・実証した[33]-[35]。その手法等により ΔI を0とした場合、共振器中の一方の光強度を正弦波で変調すると、やはり光カー効果を通じて、ジャイロ出力も同じ周波数の正弦波で変調される。図8・3ではAOM2を用いて、角周波数 ω で強度変調を行っている。この場合LIA1の時定数を $(\omega/2\pi)^{-1}$ より十分小さく設定すると、閉ループ構成であるため、電圧制御発振器（Voltage Controlled Oscillator: VCO）を通じてジャイロ出力はAOM1により周波数変調を受けることになる。この様子を図8・4に示す。式（8・5）より、リングレーザジャイロにおける機械的ディザ法[9]-[11]と同様にして、AOM1による変調の角周波数変位 A と角周波数 ω とが、 $J_0(A/\omega)=0$ を満たす場合、ロックイン現象が解除できる。

8-3. ロックイン現象の解除手法の実験的検討[14],[15]

図8・5は、ロックイン現象の解除結果である。図（a）がAOM2による強度変調がない場合、（b）がある場合のジャイロ出力を示している。出力測定の時定数 T_0 は、1秒である。

図8・3に示したように、実際に回転を与える代わりに、VCO1の周波数を電氣的に掃引することにより等価的に回転を与え測定を行った[4]。左右両回り光の平均強度は等しくなるように、右回り光の光路中に設置した可変アッテネータを用いて調整してある。AOM2による強度変調周波数は100Hzに設定した。LIA1の時定数は0.1msecに設定した。この値は強度変調周波数の逆数（10msec）より十分に小さな値となっている。なお本実験では、 J_0 が最初に零になる点に A/ω を設定し（ $A/\omega=2.40$ ）、ロックイン解除の原理確認を行った。

図8・5（a）、（b）より、光ファイバ共振器中での光カー効果を用いたジャイロ出力バイアスの変調によって、ロックイン現象が解除可能なことが原理的

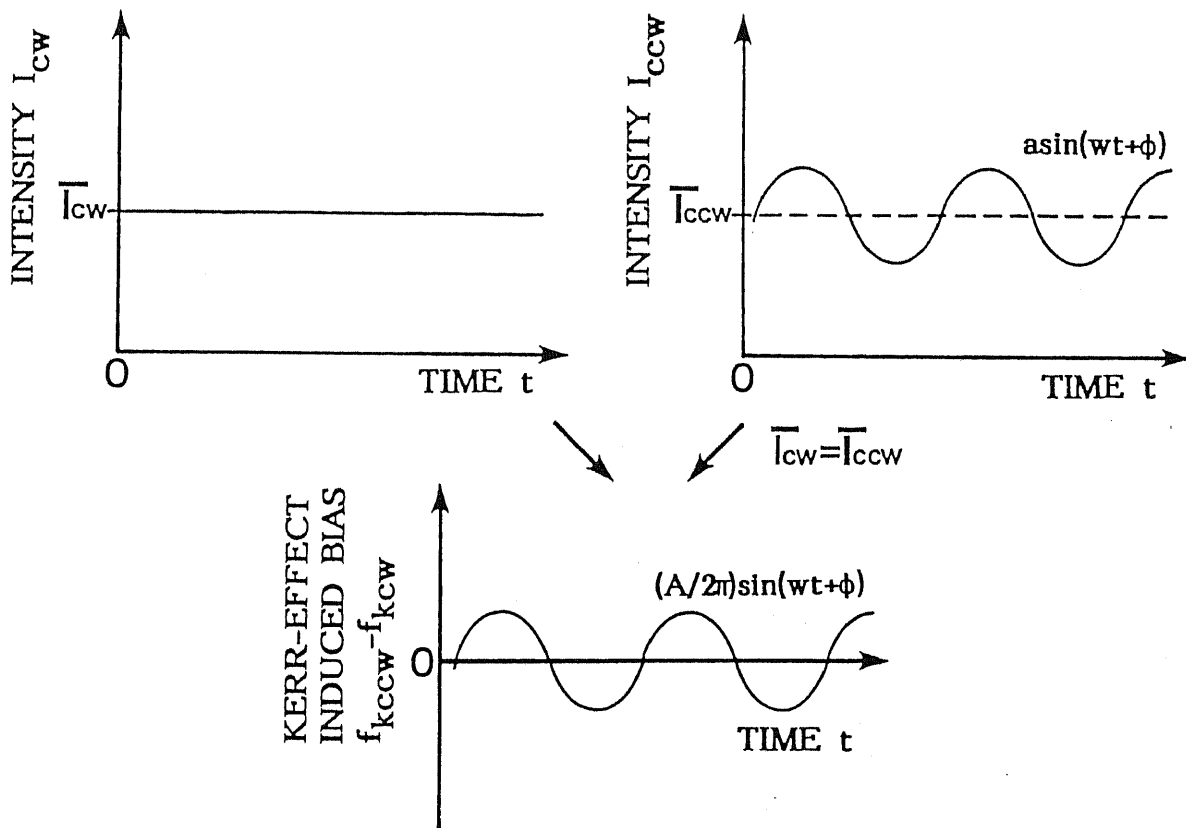
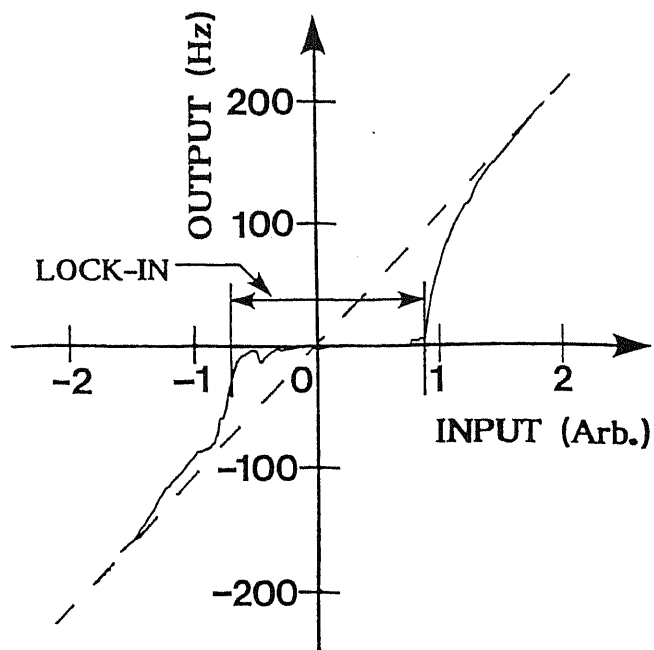
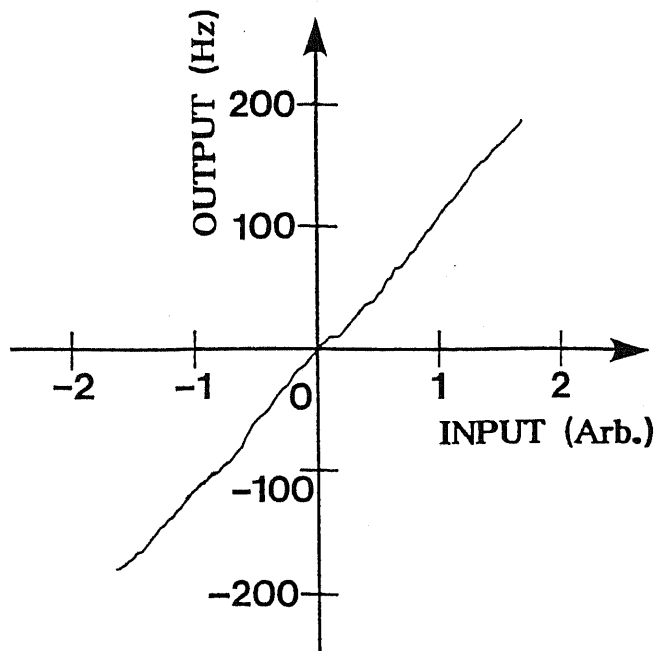


図 8・4 光ファイバ共振器中の光カー効果を用いたロックイン現象の解除
 $J_0(A/W)=0$ のとき, ロックインが解除される.



(a) 強度変調がない場合



(b) 強度変調がある場合

図 8 ・ 5 光カー効果によるロックイン現象の解除 測定の時定数： $T_c=1$ 秒，
 $100\text{Hz}=2 \times 10^{-3}\text{rad/s}$

に確認された。図8・6にVC01の出力(A0M1の駆動波形に対応)をスペクトルアナライザで測定した結果を示す。図8・6(b)より、強度変調をかけた場合、A0M1による周波数変調により搬送波成分がなくなっていることがわかる。このため右回り光の搬送波成分がなくなり、信号光と散乱光との干渉成分が信号帯域外に出るために、ロックイン現象が解除されると考えられる。

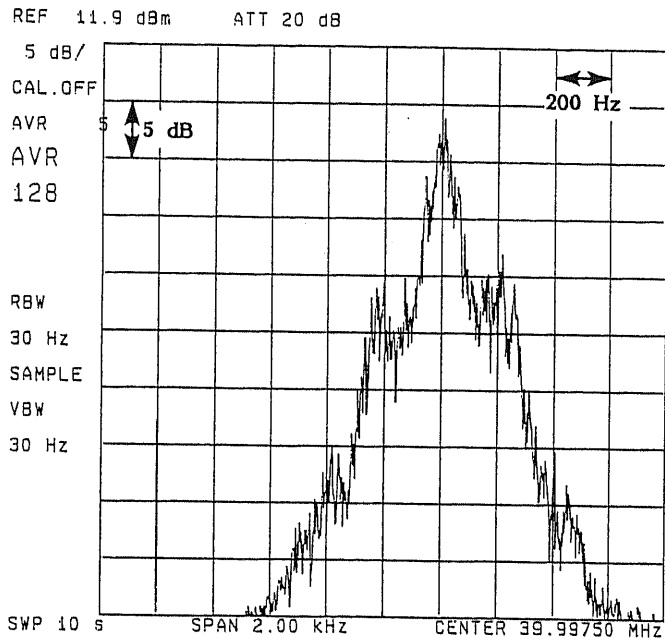
図8・5におけるロックイン以外の入出力の非線形性は、VC0の非線形性、ジャイロの出力ドリフトによるものと考えられる。また、周波数 $f=\pm 100\text{Hz}$ でのロックイン現象は図8・5(b)では観測されていない。図8・6(b)に示すように、強度変調がある場合、VC01のスペクトルはなだらかに広がっている。そのため、雑音が入力された状態に近くなり、リングレーザジャイロの機械的ディザ法における雑音注入[10],[11]と同様に、信号光と散乱光との干渉成分の帯域が広がり、干渉の効果が弱くなるためであると考えられる。

この手法を厳密に行うためには、左右両回り光間の平均強度差を正確に零にする必要がある。この条件は、すでに第7章で提案した光カー効果誘起バイアスの除去手法[33]-[35]により達成可能である。

8-4. まとめ

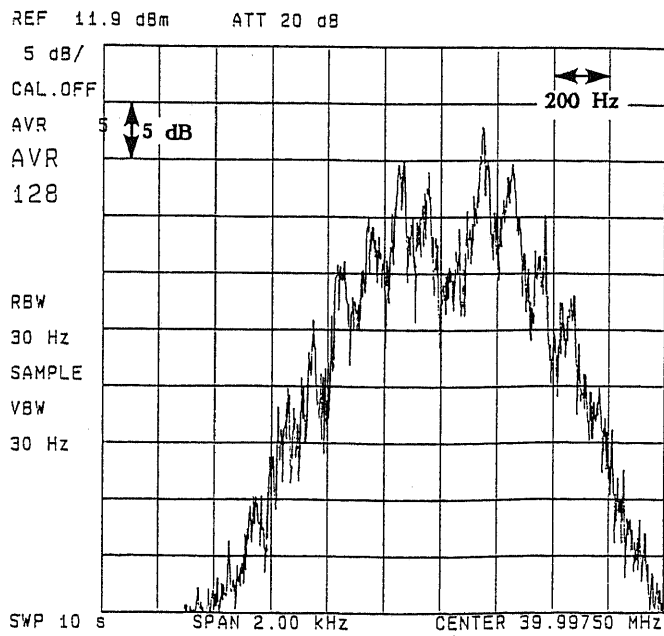
受動型リング共振方式光ジャイロにおけるロックイン現象を、光ファイバ中の光カー効果による出力バイアスの変調によって解除する手法を提案し、その原理確認に成功した。この手法は従来の機械的ディザ法と異なり、可動部分が不要であるという利点を持つ。また、光ファイバ共振器自体の物理的性質を用いるだけで達成可能であるという大きな利点を持つ。

最近提案された光ファイバブリルアンリングレーザジャイロにおいても、ロックイン現象が最大の問題である[12],[13]。しかし、その有効な解除法は、機械的ディザ法しか確立されていない[12],[13]。この方式では、出力は左右両回りに発振するレーザ光の周波数差であり、この周波数差は光ファイバ中の光カー効果により直接変化させうる。従って、共振型光ジャイロで実証したこの手法は、光ファイバブリルアンリングレーザジャイロのロックイン解除法として、より有効であると言える。



CARRIER

(a) 強度変調がない場合



CARRIER

(b) 強度変調がある場合

図 8 - 6 A0M1駆動波形中の搬送波成分 強度変調周波数: $f=100\text{Hz}$

参考文献

- [1] G. A. Sanders, M. G. Prentiss, and S. Ezekiel, "Passive ring resonator for sensitive inertial rotation measurements in geophysics and relativity," *Opt. Lett.*, vol. 6, no. 11, pp. 569-571, Nov. 1981.
- [2] K. Iwatsuki, K. Hotate, and M. Higashiguchi, "Effect of Rayleigh backscattering in an optical passive ring-resonator gyro," *Appl. Opt.*, vol. 23, no. 21, pp. 3916-3924, Nov. 1984.
- [3] R. E. Meyer, S. Ezekiel, D. W. Stowe, and V. J. Tekippe, "Passive fiber-optic ring-resonator for rotation sensing," *Opt. Lett.*, vol. 8, no. 12, pp. 644-646, Dec. 1983.
- [4] F. Zarinetchi and S. Ezekiel, "Observation of lock-in behavior in a passive resonator gyroscope," *Opt. Lett.*, vol. 11, no. 6, pp. 401-403, June 1986.
- [5] M. Takahashi, S. Tai, and K. Kyuma, "Effect of reflections on the drift characteristics of a fiber-optic passive ring-resonator gyroscope," *J. Lightwave Technol.* vol. 8, no. 5, pp. 811-816, May 1990.
- [6] 保立, 瀧口, 廣瀬, "受動型リング共振方式光ジャイロにおける後方散乱による雑音の無調整除去手法," 電子情報通信学会, 光・量子エレクトロニクス研究会, paper OQE89-8, pp. 43-48, 東京, 1989年4月.
- [7] 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," in *Proc. IOOC '89*, paper 20D3-2, pp. 194-195, Kobe, Japan, July 1989.
- [8] 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," *Photon. Technol. Lett.*, vol. 2, no. 1, pp. 75-77, Jan. 1990.
- [9] F. Aronowitz, "The laser gyro," *Laser Applications*, M. Ross, Ed., Academic, pp. 133-200, 1971.
- [10] T. J. Hutchings and D. C. Stjern, "Scale factor non-linearity of a

- body dither laser gyro," in Proc. IEEE Nat. Aerospace and Electron. Conf., pp. 549-555, 1978.
- [11] W. W. Chow, J. B. Hambenne, T. J. Hutchings, V. E. Sanders, M. Sargent III, and M. O. Scully, "Multioscillator laser gyros," J. Quantum Electron., vol. QE-16, no. 9, pp. 918-936, Sept. 1980, Invited.
- [12] F. Zarinetchi, S. P. Smith, and S. Ezekiel, "New developments in fiberoptic gyroscopes," in Proc. SPIE OE/FIBERS '89, paper 1169-36, pp. 300-303, Boston, U.S.A., Sept. 1989, Invited.
- [13] F. Zarinetchi, S. P. Smith, and S. Ezekiel, "Stimulated Brillouin fiber-optic laser gyroscope," Opt. Lett., vol. 16, no. 4, pp. 229-231, Feb. 1991.
- [14] 瀧口, 保立, "光ファイバ共振器中の光カー効果を用いた受動型リング共振方式光ジャイロのロックイン現象の解除," 電子情報通信学会, 春季大会発表予定, 野田, 1992年3月.
- [15] K. Takiguchi and K. Hotate, "Removal of lock-in phenomenon in optical passive ring-resonator gyro by using optical Kerr-effect in fiber resonator," submitted to Postdeadline Session in OFS '92, Monterey, U.S.A., Jan. 1992.
- [16] "User manual of diode pumped ring laser," Lightwave Electronics Co., U.S.A., Apr. 1988.
- [17] G. A. Sanders, R. B. Smith, and G. F. Rouse, "Novel polarization-rotating fiber resonator for rotation sensing applications," in Proc. SPIE OE/FIBERS '89, paper 1169-74, pp. 373-381, Boston, U.S.A., Sept. 1989.
- [18] P. Mouroulis, "Polarization fading effects in polarization-preserving fiber ring resonators," in Proc. SPIE OE/FIBERS '89, paper 1169-46, pp. 400-412, Boston, U.S.A., Sept. 1989.
- [19] 瀧口, 保立, "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)," 電子情報通信学会, 光・量子

- エレクトロニクス研究会, paper OQE89-137, pp. 19-24, 東京, 1990年3月.
- [20] K. Takiguchi and K. Hotate, "Evaluation of the output error in an optical passive ring-resonator gyro with a 90-deg. polarization axis rotation in the polarization-maintaining fiber-resonator," in Proc. OEC '90, paper 13C2-2, pp. 264-265, Chiba, Japan, July 1990.
- [21] 瀧口, 保立, "偏波軸を90度回転接続した共振器を持つ受動型リング共振方式光ジャイロの出力誤差評価," 電子情報通信学会, 秋季全国大会, paper C-297, p. 4-339, 広島, 1990年10月.
- [22] K. Takiguchi and K. Hotate, "Evaluation of the output error in an optical passive ring-resonator gyro with a 90° polarization-axis rotation in the polarization-maintaining fiber resonator," Photon. Technol. Lett., vol. 3, no. 1, pp. 88-90, Jan. 1991.
- [23] 瀧口, 保立, "偏波軸を90度回転接続した共振器を持つ受動型リング共振方式光ジャイロの出力誤差評価(II)," 電子情報通信学会, 春季全国大会, paper C-407, p. 4-424, 徳島, 1991年3月.
- [24] 瀧口, 保立, "複数の雑音除去手法を取り入れた受動型リング共振方式光ジャイロ," 電子情報通信学会, 光・量子エレクトロニクス研究会, paper OQE91-79, pp. 13-18, 北九州, 1991年9月.
- [25] 瀧口, 保立, "受動型リング共振方式光ジャイロにおける部分的デジタル制御の適用と光カー効果誘起雑音の評価," 電子情報通信学会, 光・量子エレクトロニクス研究会, paper OQE90-94, pp. 1-6, 仙台, 1990年11月.
- [26] K. Takiguchi and K. Hotate, "Partially digital-feedback scheme and evaluation of optical Kerr-effect induced bias in optical passive ring-resonator gyro," in Proc. OFS '90, paper TU01.3, pp. 23-26, Sydney, Australia, Dec. 1990.
- [27] K. Takiguchi and K. Hotate, "Partially digital-feedback scheme and evaluation of optical Kerr-effect induced bias in optical passive ring-resonator gyro," Photon. Technol. Lett., vol. 3, no. 7, pp. 679-681, July 1991.
- [28] K. Iwatsuki, K. Hotate, and M. Higashiguchi, "Kerr Effect in an op-

- tical passive ring-resonator gyro." J. Lightwave Technol., vol. LT-4, no. 6, pp. 645-651, June 1986.
- [29] 瀧口, 保立, "受動型リング共振方式光ジャイロにおける光カー効果の観測," 電子情報通信学会, 秋季全国大会, paper C-335, p. 4-275, 横浜, 1989年9月.
- [30] 瀧口, 保立, "受動型リング共振方式光ジャイロにおける部分的デジタル制御の適用と光カー効果誘起雑音の評価," 電子情報通信学会, 光・量子エレクトロニクス研究会, paper OQE90-94, pp. 1-6, 仙台, 1990年11月.
- [31] K. Takiguchi and K. Hotate, "Partially digital-feedback scheme and evaluation of optical Kerr-effect induced bias in optical passive ring-resonator gyro," in Proc. OFS '90, paper TU01.3, pp. 23-26, Sydney, Australia, Dec. 1990.
- [32] K. Takiguchi and K. Hotate, "Partially digital-feedback scheme and evaluation of optical Kerr-effect induced bias in optical passive ring-resonator gyro," Photon. Technol. Lett., vol. 3, no. 7, pp. 679-681, July 1991.
- [33] 瀧口, 保立, "受動型リング共振方式光ジャイロにおける光カー効果誘起雑音の除去手法," 応用物理学会, 第8回光波センシング技術研究会, paper LST8-18, pp. 123-130, 東京, 1991年12月.
- [34] K. Takiguchi and K. Hotate, "Method to reduce the optical Kerr-effect induced bias in an optical passive ring-resonator gyro," to be presented at OFS '92, paper W2.3, Monterey, U.S.A., Jan. 1992.
- [35] K. Takiguchi and K. Hotate, "Method to reduce the optical Kerr-effect induced bias in an optical passive ring-resonator gyro," to be published in Photon. Technol. Lett., vol. 4, no. 2, Feb. 1992.

第9章 総合的な雑音除去手法を取り入れた受動型リング共振方式光ジャイロ

9-1. はじめに

本論文では第3章から第8章までにおいて、受動型リング共振方式光ジャイロの雑音除去手法に関して、理論・実験両面から検討を行ってきた。

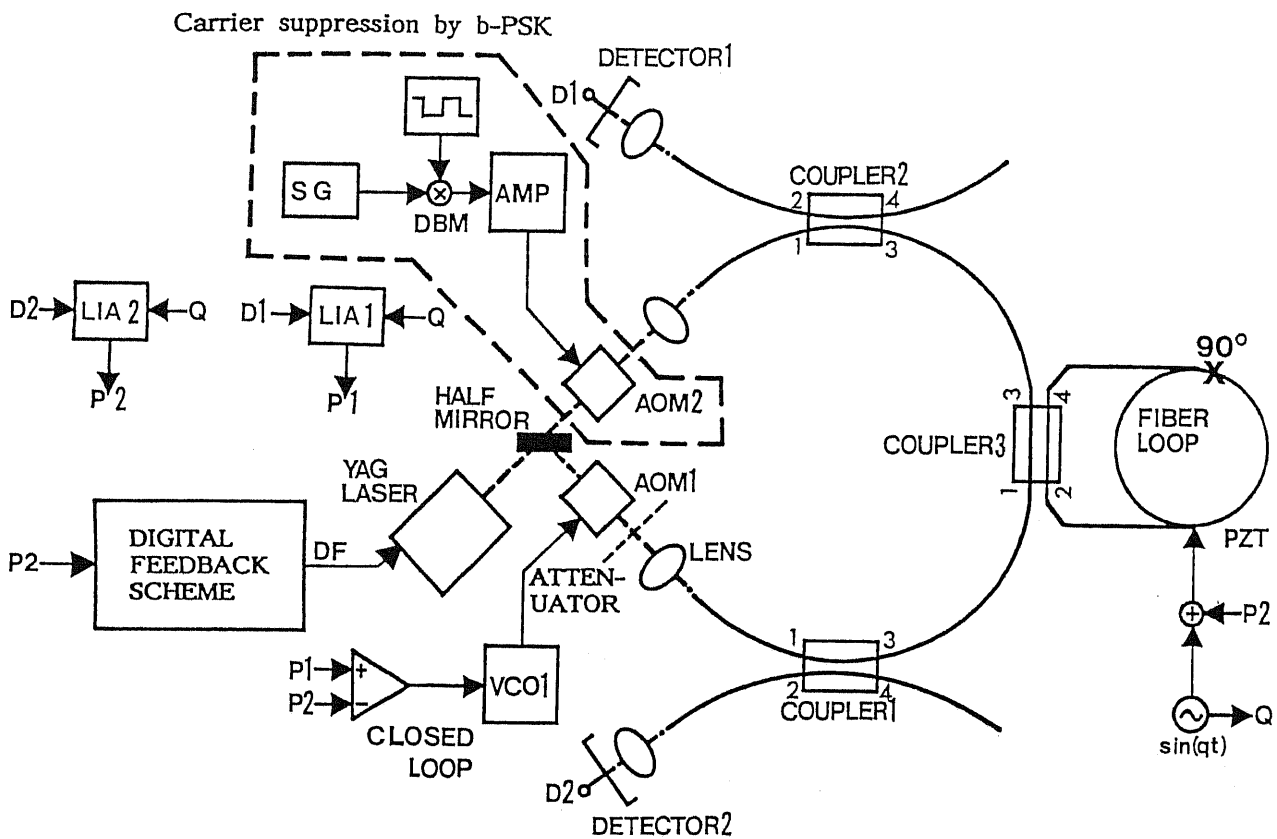
本章ではこれらの検討を基に、偏波変動誘起雑音、後方散乱誘起雑音、温度変動による大きなドリフトに対する対策と、我々の研究室でこれまでに得られた知見とを総合的に取り入れた系を構成した。偏波変動誘起雑音の除去手法としては、第4章で説明した偏波軸の 90° 回転接続を用いる方法[1]-[7]を実験系に取り入れた。後方散乱誘起雑音の除去手法としては、第5章で検討した2値位相変調法[8]-[10]を用いた。また温度変動の対策としては、第6章で述べた部分的デジタル制御系[11]-[13]を用いた。さらにジャイロの制御系をすべて閉ループにし、スケール・ファクタの変動にも強いものとした。

実験を行った結果、 10^{-5} rad/sという受動型リング共振方式光ジャイロとしては世界最高レベルの零点安定性を得ることができた。本章では、この実験結果について説明する。

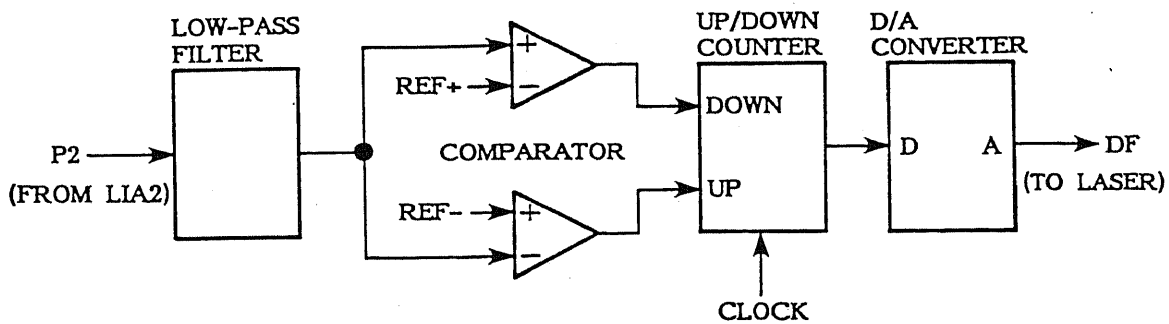
9-2. 実験系の構成[14],[15]

図9・1は、総合的に雑音除去手法を取り入れた、受動型リング共振方式光ジャイロの実験系の構成を示している。光源としては、半導体レーザ励起YAGレーザ（波長： $1.3\mu\text{m}$ 、ジッターも含めた線幅： 300kHz ）[16]を用いた。ファイバ共振器の長さ、直径は、それぞれ、 12m 、 0.1m である。またフィネスは約100である。このリング共振器は、第7章（7-3、4節）、第8章で用いたものと同一である。

ロックインアンプによる共振点検出を行うために、ファイバ共振器長はPZTにより 1kHz の正弦波で変調される。この構成では、左回り光の共振特性を用いPZTへ負帰還をかけることによって、外乱の影響を除去している。また、回転検出に用い



(a) 全体の実験系



(b) 部分的デジタル制御系

図9・1 総合的な雑音除去手法を取り入れたジャイロの実験系

る右回り光の制御系も閉ループとし、スケールファクタの変動に強い系とした。この結果ジャイロ出力は、2つの音響光学変調器(AOM1とAOM2)の駆動周波数差として測定される。

この系では、受動型リング共振方式光ジャイロの主要な雑音要因である偏波変動誘起雑音、後方散乱誘起雑音、温度変動による大きなドリフトの対策が組み込まれている。以下にまとめとして、その概略についてもう一度説明する。

9-2-1. 偏波変動誘起雑音の除去手法

— 偏波軸 90° 回転接続共振器 — [1]-[7]

受動型リング共振方式光ジャイロにおいては、偏波変動を抑制するために、共振器を偏波維持光ファイバで構成することが必須である[17]。この共振器中では、融着接続等により偏波軸ずれが生ずることは不可避な問題となる。このため、第3章で説明したように、不要共振ピークも比較的大きく励振され、温度変動によって回転検出に用いる主共振ピークに接近し非常に大きな出力誤差が生じる[18]-[24]。

ファイバの偏波軸を 90° 回転させて融着を行い共振器を構成する手法がこの雑音除去に非常に有効であることを、第4章で示した。これは、主共振ピークと不要共振ピークの励振比率がほぼ1:1となるものの、共振ピークの間隔が、温度変動にかかわらず、ほぼ π に固定されるためである。そのためこの手法では、現存の共振器のパラメータ値(融着角度の誤差、共振器のフィネス)で慣性航法に必要な性能($\sim 10^{-7}$ rad/s)が十分に達成できることがわかった。

このように、偏波軸を 90° 回転接続する手法は、共振器のパラメータ値に対する許容度が最も高い偏波変動誘起雑音の除去手法である。そのため図9・1(a)に示したように、この手法を実験で用いることとした。

9-2-2. 後方散乱誘起雑音の除去手法 — 2値位相変調法 — [8]-[10]

受動型リング共振方式光ジャイロの大きな雑音要因の1つとして、後方散乱光とそれを生み出した信号光とは逆回りに伝搬する信号光との干渉成分による影響が存在する。これにより、ジャイロ系を開ループで構成した場合には、両回り光間の差周波数で変化する干渉が起こり出力が大きく変化する[25]-[27]。閉ループ

で構成した場合には、低回転角速度時に引き込み現象が起こり回転検出が不可能になって、出力に非線形性が現れる（ロックイン現象）[28]。

この影響の除去手法としては、リング共振器に入射する前の一方の光に搬送周波数成分を抑圧するように、正弦波で周波数あるいは位相変調をかけ、干渉成分を信号帯域外に出す方法が従来よく用いられてきた[27],[28]。しかしこの方法では、搬送波成分を零とするための変調パラメータの調整に精度と安定度が要求されるために、高抑圧比を安定に得ることは困難であった。

そこで本章の実験では、第5章で提案した2値位相変調（Binary Phase Shift Keying: BPSK）法を光波に施して、無調整、かつ精度よくこの雑音成分をなくす除去手法を用いた。図9・1（a）のAOM2を用いて左回り光に2値位相変調（方形波の周波数：2kHz）がかけられ、80dB程度の搬送波抑圧比が安定に得られた。

9-2-3. ランプ性ドリフトの除去手法

— 部分的デジタル制御系 — [11]-[13]

受動型リング共振方式光ジャイロでは、リング共振器中を伝搬する左右両回り光の一方の共振特性を利用して、温度変動や機械的振動等の外乱による共振点の変化を検出し、その影響を補正する。外乱の影響を補正するためには、PZTへアナログ電圧の負帰還を施して、ファイバ共振器長を変化させる方法が通常用いられる。しかし、外乱はステップ性のみならず、ランプ（ドリフト）性の場合もあり、アナログ負帰還によってその除去を完全に行うことは困難である。ランプ性外乱を除去するためには、制御系を2次積分系、または少なくとも積分+1次遅れ系で構成しなければならない。しかし、実際には低域での積分器の利得が有限であるため、これらの系を完全に構成することは不可能である。

そこで本章の実験では、ジャイロの零点安定性を向上させるために、第6章で提案した部分的デジタル制御系を取り入れた。この方法は、従来のアナログ制御の他に、デジタル的に制御する系を付加するものである。図9・1（b）に示したように、まずロックインアンプLIA2からPZTへのアナログ誤差信号P2の低域成分をローパスフィルタを通して得て、比較器に通す。この低域成分が参照電圧REF+より増加したり、あるいはREF-より減少すると比較器が動作し、次段につながれたアップダウンカウンタが、クロック周波数に応じて、それぞれダウン、あるい

はアップする。その後のD/Aコンバータは、誤差信号の総計に対応したアナログ電圧を出す。ところで、光源である半導体レーザ励起YAGレーザは、1秒程度の応答速度で、数10GHzにわたり周波数を変化できる機能を持つ[16]。従って、D/Aコンバータの出力DFをこの周波数に負帰還することにより、低周波数領域での比較的振幅の大きい外乱を補償することが可能になる。これが部分的デジタル制御系の構成と動作原理である。

この構成において、PZTに負帰還をかけるアナログ制御系は、外乱の比較的高い周波数成分に应答する。これに対してデジタル制御系は、上記のように、アナログ制御系が補償できなかった外乱の低周波数成分を補償する。つまり、両者は相補的に動作し、ランダム外乱の除去をも可能にする仕組みとなっている。10ppm程度のスケールファクタの変動が許容されると考えた場合、デジタル制御系により数GHzの周波数可変が可能である。これは、本系におけるフリースペクトルレンジの数百倍に相当する。

9-3. 実験結果[14],[15]

図9・1の実験系で得られた共振型光ジャイロの零点安定性の測定結果を図9・2に示す。

2つの音響光学変調器の駆動周波数の差を周波数カウンタで測定することによって、ジャイロ出力の測定を行った。測定の時定数 T_0 は30秒とした。

約1時間にわたって約 1.0×10^{-4} rad/s内に、また約30分間にわたって約 5×10^{-5} rad/s内におさまるドリフト特性が得られていることがわかる。これらの性能は零点の安定性、分解能等共振型光ジャイロの性能としては世界最高レベルである。残余のドリフトは光カー効果誘起雑音[11]-[13],[29],[30]であることを実験的に検証した。

9-4. まとめ

偏波変動誘起雑音、後方散乱誘起雑音、温度変動による大きなドリフトに対する対策をすべて取り入れた受動型リング共振方式光ジャイロの実験系を構成した。また制御系をすべて閉ループとし、スケール・ファクタの変動にも強いものとした。

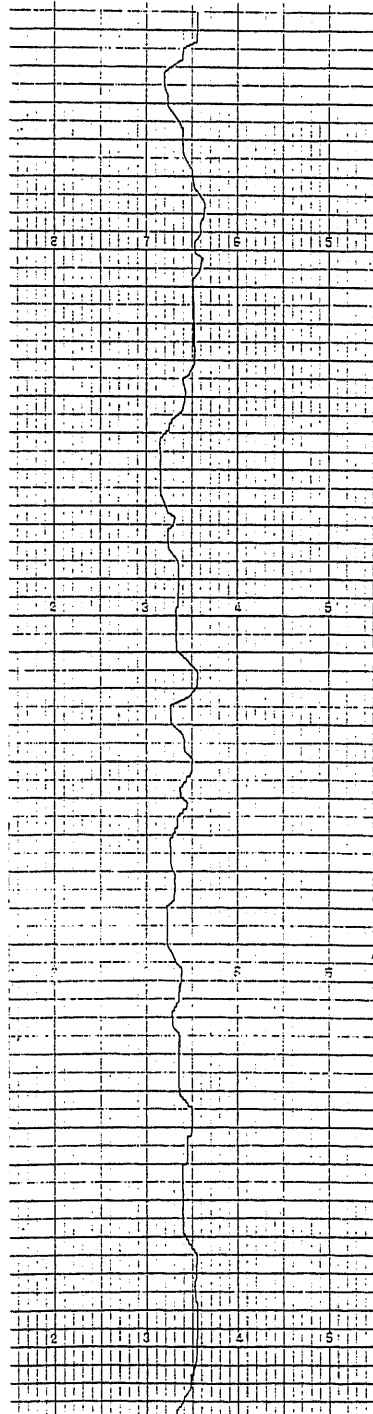
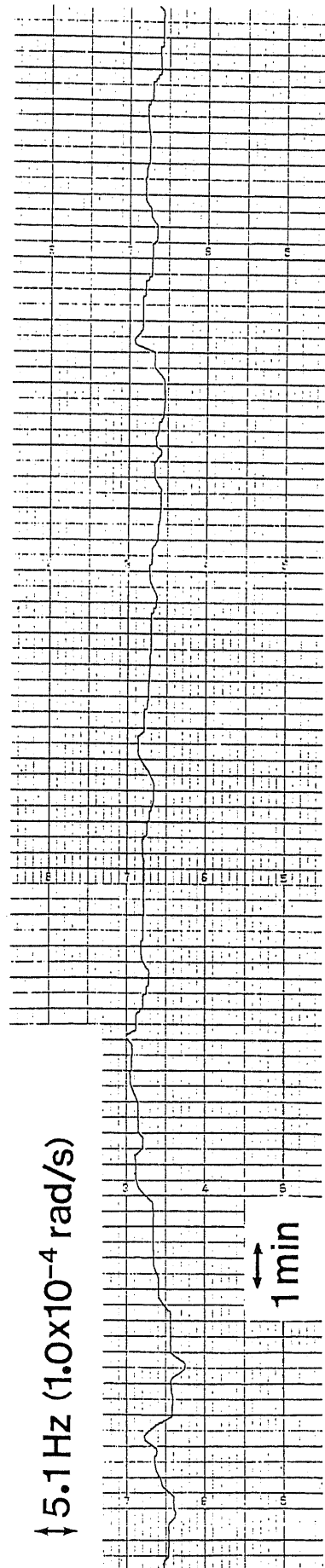


図 9・2 ジャイロの零点安定性 測定の時定数: $T_c = 30$ 秒

ジャイロ出力の測定の結果、約1時間にわたって約 1.0×10^{-4} rad/s内に、また約30分間にわたって約 5×10^{-5} rad/s内におさまる、共振型としては世界最高レベルのドリフト特性を得ることができた。残余のドリフトは光カー効果誘起雑音であることを実験的に検証した。

参考文献

- [1] G. A. Sanders, R. B. Smith, and G. F. Rouse, "Novel polarization-rotating fiber resonator for rotation sensing applications," in Proc. SPIE OE/FIBERS '89, paper 1169-74, pp. 373-381, Boston, U.S.A., Sept. 1989.
- [2] P. Mouroulis, "Polarization fading effects in polarization-preserving fiber ring resonators," in Proc. SPIE OE/FIBERS '89, paper 1169-46, pp. 400-412, Boston, U.S.A., Sept. 1989.
- [3] 瀧口, 保立, "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)," 電子情報通信学会, 光・量子エレクトロニクス研究会, paper OQE89-137, pp. 19-24, 東京, 1990年3月.
- [4] K. Takiguchi and K. Hotate, "Evaluation of the output error in an optical passive ring-resonator gyro with a 90-deg. polarization axis rotation in the polarization-maintaining fiber-resonator," in Proc. OEC '90, paper 13C2-2, pp. 264-265, Chiba, Japan, July 1990.
- [5] 瀧口, 保立, "偏波軸を90度回転接続した共振器を持つ受動型リング共振方式光ジャイロの出力誤差評価," 電子情報通信学会, 秋季全国大会, paper C-297, p. 4-339, 広島, 1990年10月.
- [6] K. Takiguchi and K. Hotate, "Evaluation of the output error in an optical passive ring-resonator gyro with a 90° polarization-axis rotation in the polarization-maintaining fiber resonator," Photon. Technol. Lett., vol. 3, no. 1, pp. 88-90, Jan. 1991.
- [7] 瀧口, 保立, "偏波軸を90度回転接続した共振器を持つ受動型リング共振方式光ジャイロの出力誤差評価(II)," 電子情報通信学会, 春季全国大会, paper C-407, p. 4-424, 徳島, 1991年3月.
- [8] 保立, 瀧口, 廣瀬, "受動型リング共振方式光ジャイロにおける後方散乱による雑音の無調整除去手法," 電子情報通信学会, 光・量子エレクトロニクス研究会, paper OQE89-8, pp. 43-48, 東京, 1989年4月.
- [9] 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," in Proc. IOOC '89, paper 20D3-2, pp. 194-195, Kobe, Japan, July 1989.
- [10] 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," Photon. Technol. Lett., vol. 2, no. 1, pp. 75-77, Jan. 1990.
- [11] 瀧口, 保立, "受動型リング共振方式光ジャイロにおける部分的デジタル制御の適用と光カー効果誘起雑音の評価," 電子情報通信学会, 光・量子エレクトロニクス研究会, paper OQE90-94, pp. 1-6, 仙台, 1990年11月.
- [12] K. Takiguchi and K. Hotate, "Partially digital-feedback scheme and evaluation of optical Kerr-effect induced bias in optical passive ring-resonator gyro," in Proc. OFS '90, paper TU01.3, pp. 23-26, Sydney, Australia, Dec. 1990.
- [13] K. Takiguchi and K. Hotate, "Partially digital-feedback scheme and evaluation of optical Kerr-effect induced bias in optical passive ring-resonator gyro," Photon. Technol. Lett., vol. 3, no. 7, pp. 679-681, July 1991.
- [14] K. Hotate and K. Takiguchi, "Drift reduction in an optical passive ring-resonator gyro," Fiber Optic Gyros: 15th Anniv. Conf., paper 1585-14, Boston, U.S.A., Sept. 1991, Invited.
- [15] 瀧口, 保立, "複数の雑音除去手法を取り入れた受動型リング共振方式光ジャイロ," 電子情報通信学会, 光・量子エレクトロニクス研究会, paper OQE91-79, pp. 13-18, 北九州, 1991年9月.
- [16] "User manual of diode pumped ring laser," Lightwave Electronics Co., U.S.A., Apr. 1988.
- [17] 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., vol. 25, no. 15, pp. 2606-2612, Aug. 1986.
- [18] 保立, 瀧口, 村上, "偏波維持光ファイバで構成した共振器中での偏波軸ず

れによる受動型リング共振方式光ジャイロの出力変動, ” 電子情報通信学会, 光・量子エレクトロニクス研究会, paper OQE89-9, pp. 1-6, 仙台, 1989年5月.

- [19] K. Hotate, K. 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,” in Proc. OFS '89, paper Mo-4-2, pp. 94-100, Paris, France, Sept. 1989.
- [20] Z. K. Ioannidis, R. Kadiwar, and I. P. Giles, “Polarization effects in highly birefringent fibre ring resonator,” in Proc. OFS '89, paper Mo-4-5, pp. 115-121, Paris, France, Sept. 1989.
- [21] 高橋, 田井, 久間, “リング共振形光ファイバジャイロにおける偏波結合の影響,” 電子情報通信学会論文誌, vol. J72-C-1, no. 10, pp. 610-618, 1989年10月.
- [22] 瀧口, 保立, “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,” 電子情報通信学会, 光・量子エレクトロニクス研究会, paper OQE89-79, pp. 1-6, 東京, 1989年11月.
- [23] K. Takiguchi and K. Hotate, “Manner to reduce the bias of optical passive ring-resonator gyro caused by the misalignment of the polarization-axis in the resonator,” in Proc. OFSET '90, paper 12B3-2, pp. 109-118, Fukuoka, Japan, Oct. 1990.
- [24] K. Takiguchi and K. Hotate, “Bias of an optical passive ring-resonator gyro caused by the misalignment of the polarization-axis in the polarization-maintaining fiber resonator,” to be published in J. Lightwave Technol.
- [25] G. A. Sanders, M. G. Prentiss, and S. Ezekiel, “Passive ring resonator for sensitive inertial rotation measurements in geophysics and relativity,” Opt. Lett., vol. 6, no. 11, pp. 569-571, Nov. 1981.
- [26] K. Iwatsuki, K. Hotate, and M. Higashiguchi, “Effect of Rayleigh backscattering in an optical passive ring-resonator gyro,” Appl.

Opt., vol. 23, no. 21, pp. 3916-3924, Nov. 1984.

- [27] R. E. Meyer, S. Ezekiel, D. W. Stowe, and V. J. Tekippe, "Passive fiber-optic ring-resonator for rotation sensing," Opt. Lett., vol. 8, no. 12, pp. 644-646, Dec. 1983.
- [28] F. Zarinetchi and S. Ezekiel, "Observation of lock-in behavior in a passive resonator gyroscope," Opt. Lett., vol. 11, no. 6, pp. 401-403, June 1986.
- [29] K. Iwatsuki, K. Hotate, and M. Higashiguchi, "Kerr Effect in an optical passive ring-resonator gyro," J. Lightwave Technol., vol. LT-4, no. 6, pp. 645-651, June 1986.
- [30] 瀧口, 保立, "受動型リング共振方式光ジャイロにおける光カー効果の観測," 電子情報通信学会, 秋季全国大会, paper C-335, p. 4-275, 横浜, 1989年9月.

第 10 章 結論

本論文では、第 1 章で本研究の背景を述べた。また第 2 章で、光ジャイロの原理と構成、受動型リング共振方式光ジャイロの雑音要因について概観した。

第 1、2 章で説明したように、光ファイバリング共振器の共振現象を利用して回転角速度を測定する受動型リング共振方式光ジャイロは、光ファイバ長を短尺化できコスト・サイズの面で有利であること、性能的に安定な高コヒーレンス光源を使用可能であること、等の利点を有している。しかし、理論的な雑音除去手法に関する研究はいくつか行われてきたが、実験的には後方散乱誘起雑音に対する対策のみを含んだ系が報告されていたのみであった。そのため短期的な分解能は達成されたものの、全ての雑音要因に対する対策を含んで長期的な零点安定性を達成した例は報告されてはいなかった。

本研究では、受動型リング共振方式光ジャイロにおいて挙動把握が不完全であった雑音要因（偏波変動誘起雑音）や対策の確立が不十分であった雑音要因（後方散乱誘起雑音、光カー効果誘起雑音、温度変動）に関する検討を、理論・実験両面から行うことを目標とした。さらに、すでに本研究室で解析されている雑音要因の除去手法をも含めて実際の系を作成し、受動型リング共振方式光ジャイロの高性能化への指針を探ることを最終目標とした。

上記の目標を達成するために、第 3 章から第 9 章までにおいて、具体的な研究を行った。

第 3 章では、受動型リング共振方式光ジャイロにおいて主要な雑音要因の 1 つである、偏波変動誘起雑音の挙動把握を行った。センシング部分であるリング共振器は偏波変動を除去するために、偏波維持光ファイバで構成することが必要である。しかしその作成の際に、融着、あるいはカプラ部分での偏波軸ずれが生ずることは不可避である。本章では、偏波軸ずれにより生ずるジャイロの出力誤差を精密に定式化し評価した。その結果、ファイバ偏光軸間の共振器 1 周の位相差が 2π の整数倍付近では、非常に大きな出力誤差が生じることが明らかとなった。また同時に、従来偏波変動の除去に有効であるとされてきた光ファイバ偏光子は、

この雑音の除去に余り役立たないことも明らかとなった。

第4章では、第3章で挙動が明らかとなった偏波変動誘起雑音の除去手法として、3つの方法を検討した。まず光ファイバ偏光子を共振器の入出射端に設けた場合の検討を行った。この場合、左右両回り光の与える出力を差動的に得ることで、出力誤差をある程度除去できることが明らかとなった。しかし、現状の共振器のパラメータ値では、慣性航法に適合する高精度のジャイロ性能内に偏波変動誘起雑音を抑制することは非常に困難であることもわかった。次に、単一偏波光ファイバあるいは光ファイバ偏光子でリング共振器を構成する方法について検討を行った。その結果この手法では、典型的な共振器のパラメータ値において、中精度のジャイロに適用可能な値にまで、偏波変動誘起雑音を低減することが可能であることが明らかとなった。最後に、共振器中で偏波維持光ファイバの軸を90°回転接続した場合について、検討を行った。その結果、現存の共振器のパラメータ値に対して十分な許容度を持って、高精度のジャイロを構成できることが明らかとなった。

第5章では、受動型リング共振方式光ジャイロの最も大きな雑音要因の1つである後方散乱誘起雑音（散乱光とそれを生み出した信号光とは逆回りに伝搬する信号光との干渉成分）について検討を行った。この影響の除去手法としては、リング共振器に入射する前の一方の光に搬送周波数成分を抑圧するように正弦波で位相あるいは周波数変調をかけ、干渉成分を信号帯域外に出す方法が従来よく用いられてきた。しかし、この方法は、搬送波成分を零とするための変調パラメータの調整に精度と安定度が要求されるためにより抑圧比をとることができず、航空機用等、高い性能が要求されるジャイロに用いることは不適當であった。本章では、光波に2値位相変調を施すだけで、無調整、かつ精度よくこの雑音成分をなくす方式を新しく提案した。実際に実験系を構成した結果、本方式が干渉成分の除去に非常に有効であることが検証された。

第6章では、受動型リング共振方式光ジャイロにおけるランプ性外乱の除去手法として、新しく部分的デジタル制御系を提案した。外乱がランプ性の場合、アナログ負帰還によってその除去を行うことは不可能であり、その除去手法の確立が望まれていた。そこで従来のアナログ制御の他に、デジタル的に制御する系を付加することによって、低域でのアナログ制御系の能力の限界を補完する系を構

成した。この構成を用いた結果、ランプ性外乱を除去することに初めて成功し、零点安定性を大幅に向上させることができた。

第7章では、受動型リング共振方式光ジャイロにおいて有効な除去手法が確立されていなかった、光カー効果誘起雑音について検討を行った。共振器中では光カー効果により、左右両回り光間の強度差に比例するバイアスが誘起される。高精度ジャイロの場合、左右両回り光の強度差がわずか0.01%異なった時でも、ショット雑音によって決まる回転検出限界の2桁上の雑音が生じる。本章では、本方式光ジャイロにおいて、光カー効果誘起雑音の評価に初めて成功した。光カー効果誘起雑音の除去手法として、我々の研究グループでは、共振器に入射する光強度を共振器のフリースペクトルレンジの整数倍の周波数を持つ方形波で強度変調する方法を以前に提案した。しかしこの手法では、高精度ジャイロ実現のためには、強度変調器の帯域と消光比に対する要求が厳しく、その実行は非常に困難であった。そこで本章では、光カー効果誘起雑音を簡単、有効に除去する手法を新しく提案した。まず、共振点検出に用いる変調周波数より非常に低い周波数で共振器に入射する光強度を変調し、両回り光間の強度差を検出する。次に、この差成分を用いて一方の光強度に負帰還をかけ、両回り光間の強度差を零にする手法である。この手法の有効性を確認する基礎実験に成功し、本方式ジャイロにおいて初めて光カー効果誘起雑音の除去に成功した。

第8章では、光ファイバ共振器中での光カー効果を用いたロックイン現象の解除手法について提案した。両回り光間の平均強度差を0とした場合、共振器を伝搬する光のうち一方の光強度を、正弦波で変調する。すると光カー効果を通じて、ジャイロの出力バイアスも変調され、リングレーザジャイロの機械的ディザ法と同様にして、ロックインが除去されることになる。本章では、この手法の有効性を確認する基礎実験に成功した。本手法は、機械的可動部分を使わずに、光ファイバ共振器自体が持つ物理的性質のみを用いてロックイン解除が可能であるという大きな利点を有する。そのためこの解除手法は、光強度の変化が直接発振周波数の変化となって現れる、光ファイバブリルアンリングレーザジャイロのロックイン現象の解除に、より有効であると言える。

第9章では、本研究で得られた雑音除去手法と、我々の研究室でこれまでに得られた知見とを総合的に取り入れた受動型リング共振方式光ジャイロの系を構成

した。実験を行った結果、 10^{-5} rad/sという受動型リング共振方式光ジャイロとしては世界最高レベルのの零点安定性、分解能を得ることができた。

表10・1は、本研究終了後の受動型リング共振方式光ジャイロにおける雑音要因とその対策を示している。下線を付した箇所が本研究の成果である。第2章の表2・1と比較すると、本研究により共振型光ジャイロの高性能化への指針がより完全になったといえることができる。

また、本ジャイロ系と構成が似ている、光ファイバブリルアンリングレーザジャイロに関して、大きな性能劣化要因であるロックイン現象の解除についての指針も与えることができた。

今後はさらなる性能向上を目指した、より実用に近いレベルの研究が重要になるであろう。

導波路型位相変調器を2つ用いて、左右両回り光に関して別々の周波数で共振点検出を行い、強度変調の影響がなく、広ダイナミックレンジな系の構成が必須になるであろう。また音響光学変調器を用いずに、セロダイン変調法によって共振周波数の追従を行うことも必要になるに違いない。

また慣性航法に必要な性能より高い性能を達成するためには、誘導ブリルアン散乱の除去手法を開発していくことも必要である。

表 10・1 受動型リング共振方式光ジャイロにおける雑音要因とその対策

Noise Sources	Descriptions	Countermeasures
Coherence of light source	* To obtain sharp resonance characteristics, a light source with a narrow spectrum linewidth is required (100 kHz for aircraft navigation) [1].	* Narrowing of the LD's spectrum linewidth is important [1]. (About 50 kHz linewidth LD has been reported [2].)
Thermal fluctuation in fiber resonator	* When the temperature of optical fiber fluctuates unevenly in the longitudinal direction, the output varies (after Shupe [3]).	* Optical fiber is wound so that thermal distribution becomes symmetric with the fiber center along its length [3]. Since the fiber length is shorter than IFOG, the influence is relatively small [3].
	* <u>When the thermal fluctuation is ramped, to suppress it by analogue feedback is impossible because of the limited low-frequency gain in the integrator [4], [5].</u>	* <u>Control the laser frequency digitally combined with the normal analogue feedback (partially digital-feedback scheme) [4], [5].</u>
Optical Kerr effect in fiber resonator	* Optical Kerr effect induces the bias proportional to the power imbalance between CW and CCW propagating waves [6]. * Variation in the coupling ratio of fiber coupler, and/or that in the modulation index of FM or PM for catching the resonance peak causes the drift [6]. * <u>This effect has been evaluated experimentally [4], [5].</u>	* Modulate the light source intensity using a square wave having a duty factor of 50 %. Modulation frequency becomes as high as 100 MHz [6]. * <u>Monitor the bias by modulating the light source intensity, and feed back it into one's lightwave intensity traveling in the resonator to make it zero [7], [8].</u>
Faraday effect due to the earth's magnetism	* The optical fiber functions as a Faraday element due to the earth's magnetism, which generates bias in combination with the retarding effect of the fiber [9]-[11].	* High birefringence of polarization-maintaining fiber can reduce the drift [9]-[11]. * Removal of special twist component is effective [9]-[11].
Polarization coupling in fiber resonator	* The resonance characteristics are given by the special state of polarization, named Eigen-State of Polarization (ESOP), in the fiber resonator. There are two independent ESOP's [12]. * When one ESOP resonance dip is approached by the other ESOP resonance dip, a large drift takes place [12]. * <u>Even a small polarization coupling in the resonator changes ESOP's drastically [13]-[19]. To excite only one ESOP is quite difficult, which induces a drift [13]-[19].</u>	* Resonator having the splice with 90° polarization-axis rotation is useful (after Sanders et al. [13] and Mouroulis [14]). <u>Specification for aircraft navigation can be achieved with enough tolerance for the resonator parameters [20], [21].</u> * <u>To use fiber polarizers at the lead of the resonator can reduce the drift [15], [18], [19].</u> * <u>To use single-polarization fiber in the resonator can reduce the drift [22], [23].</u>
Rayleigh backscattering in fiber resonator	* Backscattering generated in the resonator forms two components with resonance characteristics [1]: Backscattered intensity itself [1] and interference between backscattering and the signal wave (after Sanders et al. [24]).	* Apply PM or FM at different frequencies to CW and CCW waves, and synchronously detect to reject the noise component [1], [25], [26]. * Apply PM or FM to CW or CCW wave to suppress its carrier frequency [27], [28]. Requirement for the suppression ratio is rather severe. * <u>Use of Binary Phase Shift Keying is effective to reduce this noise [29], [30].</u> * <u>Use of optical Kerr-effect in the fiber resonator can remove lock-in phenomenon [31].</u>
	* The former shows twin peaks in the resonance under the rotation, which induces gyro nonlinearity [1], [25], [26]. * The latter induces an output fluctuation in open loop operation [1], [24], and lock-in effect in closed loop operation (after Zarinetchi et al. [27]).	

参考文献

- [1] K. Iwatsuki, K. Hotate, and M. Higashiguchi, "Effect of Rayleigh backscattering in an optical passive ring-resonator gyro," *Appl. Opt.*, vol. 23, no. 21, pp. 3916-3924, Nov. 1984.
- [2] "コヒーレント光通信用狭スペクトル半導体レーザを開発," *電子情報通信学会誌*, vol. 74, no. 7, p. 782, 1991年7月.
- [3] D. M. Shupe, "Fiber resonator gyroscope: Sensitivity and thermal nonreciprocity," *Appl. Opt.*, vol. 20, no. 2, pp. 286-289, Jan. 1981.
- [4] K. Takiguchi and K. Hotate, "Partially digital-feedback scheme and evaluation of optical Kerr-effect induced bias in optical passive ring-resonator gyro," in *Proc. OFS '90*, paper TU01.3, pp. 23-26, Sydney, Australia, Dec. 1990.
- [5] K. Takiguchi and K. Hotate, "Partially digital-feedback scheme and evaluation of optical Kerr-effect induced bias in optical passive ring-resonator gyro," *Photon. Technol. Lett.*, vol. 3, no. 7, pp. 679-681, July 1991.
- [6] K. Iwatsuki, K. Hotate, and M. Higashiguchi, "Kerr Effect in an optical passive ring-resonator gyro," *J. Lightwave Technol.*, vol. LT-4, no. 6, pp. 645-651, June 1986.
- [7] K. Takiguchi and K. Hotate, "Method to reduce the optical Kerr-effect induced bias in an optical passive ring-resonator gyro," to be presented at *OFS '92*, paper W2.3, Monterey, U.S.A., Jan. 1992.
- [8] K. Takiguchi and K. Hotate, "Method to reduce the optical Kerr-effect induced bias in an optical passive ring-resonator gyro," to be published in *Photon. Technol. Lett.*, vol. 4, no. 2, Feb. 1992.
- [9] 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.*, vol. 25, no. 7, pp. 1086-1092, Apr. 1986.
- [10] K. Hotate and K. Tabe, "Drift of an optical fiber gyroscope caused by the Faraday effect: Experiment," *J. Lightwave Technol.*, vol. LT-

- 5, no. 7, pp. 997-1001, July 1987.
- [11] K. Hotate and M. Murakami, "Drift of an optical passive ring-resonator gyro caused by the Faraday effect," in Proc. OFS '88, paper FBB6, pp. 405-408, New Orleans, U.S.A., Jan. 1988.
- [12] 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., vol. 25, no. 15, pp. 2606-2612, Aug. 1986.
- [13] G. A. Sanders, R. B. Smith, and G. F. Rouse, "Novel polarization-rotating fiber resonator for rotation sensing applications," in Proc. SPIE OE/FIBERS '89, paper 1169-74, pp. 373-381, Boston, U.S.A., Sept. 1989.
- [14] P. Mouroulis, "Polarization fading effects in polarization-preserving fiber ring resonators," in Proc. SPIE OE/FIBERS '89, paper 1169-46, pp. 400-412, Boston, U.S.A., Sept. 1989.
- [15] K. Hotate, K. 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," in Proc. OFS '89, paper Mo-4-2, pp. 94-100, Paris, France, Sept. 1989.
- [16] 高橋, 田井, 久間, "リング共振形光ファイバジャイロにおける偏波結合の影響," 電子情報通信学会論文誌, vol. J72-C-1, no. 10, pp. 610-618, 1989年10月.
- [17] Z. K. Ioannidis, R. Kadiwar, and I. P. Giles, "Polarization effects in highly birefringent fibre ring resonator," in Proc. OFS '89, paper Mo-4-5, pp. 115-121, Paris, France, Sept. 1989.
- [18] K. Takiguchi and K. Hotate, "Manner to reduce the bias of optical passive ring-resonator gyro caused by the misalignment of the polarization-axis in the resonator," in Proc. OFSET '90, paper 12B3-2, pp. 109-118, Fukuoka, Japan, Oct. 1990.

- [19] K. Takiguchi and K. Hotate, "Bias of an optical passive ring-resonator gyro caused by the misalignment of the polarization-axis in the polarization-maintaining fiber resonator," to be published in J. Lightwave Technol.
- [20] K. Takiguchi and K. Hotate, "Evaluation of the output error in an optical passive ring-resonator gyro with a 90-deg. polarization axis rotation in the polarization-maintaining fiber-resonator," in Proc. OEC '90, paper 13C2-2, pp. 264-265, Chiba, Japan, July 1990.
- [21] K. Takiguchi and K. Hotate, "Evaluation of the output error in an optical passive ring-resonator gyro with a 90° polarization-axis rotation in the polarization-maintaining fiber resonator," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 3, no. 1, pp. 88-90, Jan. 1991.
- [22] K. Takiguchi and K. Hotate, "Reduction of a polarization-fluctuation induced error in an optical passive ring-resonator gyro by using a single-polarization optical fiber," in Proc. MOC '91, paper L25, pp. 250-253, Yokohama, Japan, Oct. 1991.
- [23] K. Takiguchi and K. Hotate, "Reduction of a polarization-fluctuation induced error in an optical passive ring-resonator gyro by using a single-polarization optical fiber," submitted to J. Lightwave Technol.
- [24] G. A. Sanders, M. G. Prentiss, and S. Ezekiel, "Passive ring resonator for sensitive inertial rotation measurements in geophysics and relativity," Opt. Lett., vol. 6, no. 11, pp. 569-571, Nov. 1981.
- [25] K. Iwatsuki, K. Hotate, and M. Higashiguchi, "Resonance characteristics of backscattering in optical passive ring-resonator gyro," Electron. Lett., vol. 22, no. 3, pp. 135-137, Jan. 1986.
- [26] K. Iwatsuki, K. Hotate, and M. Higashiguchi, "Backscattering in an optical passive ring-resonator gyro: Experiment," Appl. Opt., vol. 25, no. 23, pp. 4448-4451, Dec. 1986.
- [27] F. Zarinetchi and S. Ezekiel, "Observation of lock-in behavior in a

- passive resonator gyroscope," *Opt. Lett.*, vol. 11, no. 6, pp. 401-403, June 1986.
- [28] R. E. Meyer, S. Ezekiel, D. W. Stowe, and V. J. Tekippe, "Passive fiber-optic ring-resonator for rotation sensing," *Opt. Lett.*, vol. 8, no. 12, pp. 644-646, Dec. 1983.
- [29] 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," in *Proc. IOOC '89*, paper 20D3-2, pp. 194-195, Kobe, Japan, July 1989.
- [30] 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," *Photon. Technol. Lett.*, vol. 2, no. 1, pp. 75-77, Jan. 1990.
- [31] K. Takiguchi and K. Hotate, "Removal of lock-in phenomenon in optical passive ring-resonator gyro by using optical Kerr-effect in fiber resonator," submitted to Postdeadline Session in OFS '92, Monterey, U.S.A., Jan. 1992.

謝辞

本研究を行うに当たり、懇切に御指導下さった指導教官の保立和夫助教授に深く感謝申し上げます。

また、様々な御助言を賜った大越孝敬教授に感謝申し上げます。

偏波維持光ファイバで構成したリング共振器の構成に力をお貸しいただいた藤倉電線株式会社・光エレクトロニクス研究所の鈴木文生氏、山崎成史氏に感謝申し上げます。

工作工場の中川廣氏、進藤昭郎氏、櫻井彌壽雄氏には、実験に必要な工作物を作成していただき、非常に感謝しています。

最後になりましたが、大越・保立研究室の皆様には、様々な面で御協力をいただき感謝の念に耐えません。

本研究に関する発表文献

1. 学会誌論文

- [1] 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 Photonics Technology Letters, vol. 2, no. 1, pp. 75-77, Jan. 1990.
- [2] K. Takiguchi and K. Hotate, "Evaluation of the output error in an optical passive ring-resonator gyro with a 90° polarization-axis rotation in the polarization-maintaining fiber resonator," IEEE Photonics Technology Letters, vol. 3, no. 1, pp. 88-90, Jan. 1991.
- [3] K. Takiguchi and K. Hotate, "Partially digital-feedback scheme and evaluation of optical Kerr-effect induced bias in optical passive ring-resonator gyro," IEEE Photonics Technology Letters, vol. 3, no. 7, pp. 679-681, July 1991.
- [4] K. Takiguchi and K. Hotate, "Method to reduce the optical Kerr-effect induced bias in an optical passive ring-resonator gyro," IEEE Photonics Technology Letters, vol. 4, no. 2, Feb. 1992.
- [5] K. Takiguchi and K. Hotate, "Bias of an optical passive ring-resonator gyro caused by the misalignment of the polarization axis in the polarization-maintaining fiber resonator," IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, vol. 10, no. 4, Apr. 1992.
- [6] K. Takiguchi and K. Hotate, "Reduction of a polarization-fluctuation induced error in an optical passive ring-resonator gyro by using a single-polarization optical fiber," submitted to IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology.
- [7] K. Takiguchi and K. Hotate, "Removal of lock-in phenomenon in optical passive ring-resonator gyro by using optical Kerr-effect in fiber resonator," submitted to IEEE Photonics Technology Letters.

2. 国際会議

- [8] 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," 7th Intern. Conf. on Integrated Optics and Optical Fiber Communication (IOOC '89), paper 20D3-2, pp. 194-195, Kobe, Japan, July 1989.
- [9] K. Hotate, K. 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," 6th Intern. Conf. on Optical Fiber Sensors (OFS '89), paper Mo-4-2, pp. 94-100, Paris, France, Sept. 1989.
- [10] K. Takiguchi and K. Hotate, "Evaluation of the output error in an optical passive ring-resonator gyro with a 90-deg. polarization axis rotation in the polarization-maintaining fiber-resonator," 3rd Optoelectronics Conf. (OEC '90), paper 13C2-2, pp. 264-265, Chiba, Japan, July 1990.
- [11] K. Takiguchi and K. Hotate, "Manner to reduce the bias of optical passive ring-resonator gyro caused by the misalignment of the polarization-axis in the resonator," 3rd Japan-China Joint Meeting on Optical Fiber Science and Electromagnetic Theory (OFSET '90), paper 12B3-2, pp. 109-118, Fukuoka, Japan, Oct. 1990.
- [12] K. Takiguchi and K. Hotate, "Partially digital-feedback scheme and evaluation of optical Kerr-effect induced bias in optical passive ring-resonator gyro," 7th Intern. Conf. on Optical Fiber Sensors (OFS '90), paper TU01.3, pp. 23-26, Sydney, Australia, Dec. 1990.
- [13] K. Hotate and K. Takiguchi, "Drift reduction in an optical passive ring-resonator gyro," Fiber Optic Gyros: 15th Anniv. Conf., paper 1585-14, pp. 116-127, Boston, U.S.A., Sept. 1991, Invited.
- [14] K. Takiguchi and K. Hotate, "Reduction of a polarization-fluctuation induced error in an optical passive ring-resonator gyro by

using a single-polarization optical fiber," 3rd Microoptics Conf. (MOC '91), paper L25, pp. 250-253, Yokohama, Japan, Oct. 1991.

- [15] K. Takiguchi and K. Hotate, "Method to reduce the optical Kerr-effect induced bias in an optical passive ring-resonator gyro," 8th Intern. Conf. on Optical Fiber Sensors (OFS '92), paper W2.3, pp. 34-37, Monterey, U.S.A., Jan. 1992.
- [16] K. Takiguchi and K. Hotate, "Removal of lock-in phenomenon in optical passive ring-resonator gyro by using optical Kerr-effect in fiber resonator," 8th Intern. Conf. on Optical Fiber Sensors (OFS '92), paper PD5 (Post Deadline Paper), pp. 19-22, Monterey, U.S.A., Jan. 1992.

3. 学会研究会

- [17] 保立, 瀧口, 廣瀬, "受動型リング共振方式光ジャイロにおける後方散乱による雑音の無調整除去手法," 電子情報通信学会, 光・量子エレクトロニクス研究会, paper OQE89-8, pp. 43-48, 東京, 1989年4月.
- [18] 保立, 瀧口, 村上, "偏波維持光ファイバで構成した共振器中での偏波軸ずれによる受動型リング共振方式光ジャイロの出力変動," 電子情報通信学会, 光・量子エレクトロニクス研究会, paper OQE89-9, pp. 1-6, 仙台, 1989年5月.
- [19] 瀧口, 保立, "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," 電子情報通信学会, 光・量子エレクトロニクス研究会, paper OQE89-79, pp. 1-6, 東京, 1989年11月.
- [20] 瀧口, 保立, "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)," 電子情報通信学会, 光・量子エレクトロニクス研究会, paper OQE89-137, pp. 19-24, 東京, 1990年3月.
- [21] 瀧口, 保立, "受動型リング共振方式光ジャイロにおける部分的デジタル制御の適用と光カー効果誘起雑音の評価," 電子情報通信学会, 光・量子エレクトロニクス研究会, paper OQE90-94, pp. 1-6, 仙台, 1990年11月.
- [22] 瀧口, 保立, "受動型リング共振方式光ジャイロにおける偏波変動誘起雑音

の単一偏波光ファイバによる低減，”電子情報通信学会，光・量子エレクトロニクス研究会，paper OQE91-39，pp. 43-48，東京，1991年6月。

[23] 瀧口，保立，“複数の雑音除去手法を取り入れた受動型リング共振方式光ジャイロ，”電子情報通信学会，光・量子エレクトロニクス研究会，paper OQE91-79，pp. 13-18，北九州，1991年9月。

[24] 瀧口，保立，“受動型リング共振方式光ジャイロにおける光カー効果誘起雑音の除去手法，”応用物理学会，第8回光波センシング技術研究会，paper LST 8-18，pp. 123-130，東京，1991年12月。

[25] 瀧口，保立，“光ファイバ共振器中の光カー効果を用いた受動型リング共振方式光ジャイロのロックイン現象の解除，”電子情報通信学会，光・量子エレクトロニクス研究会，豊橋，1992年4月。

4. 学会大会

[26] 瀧口，保立，“受動型リング共振方式光ジャイロの共振器構成のためのパラメータ値設計，”電子情報通信学会，秋季全国大会，paper C-314，p. C-1-196，船橋，1988年9月。

[27] 瀧口，保立，“受動型リング共振方式光ジャイロの試作系の動作特性（I），”電子情報通信学会，春季全国大会，paper C-647，p. 4-436，東大阪，1989年3月。

[28] 瀧口，保立，“受動型リング共振方式光ジャイロにおける光カー効果の観測，”電子情報通信学会，秋季全国大会，paper C-335，p. 4-275，横浜，1989年9月。

[29] 瀧口，保立，“偏波軸を90度回転接続した共振器を持つ受動型リング共振方式光ジャイロの出力誤差評価，”電子情報通信学会，秋季全国大会，paper C-297，p. 4-339，広島，1990年10月。

[30] 瀧口，保立，“偏波軸を90度回転接続した共振器を持つ受動型リング共振方式光ジャイロの出力誤差評価（II），”電子情報通信学会，春季全国大会，paper C-407，p. 4-424，徳島，1991年3月。

[31] 瀧口，保立，“受動型リング共振方式光ジャイロにおける偏波変動誘起雑音の単一偏波光ファイバによる低減，”電子情報通信学会，秋季大会，paper

C-282, p. 4-312, 東京, 1991年9月.

- [32] 瀧口, 保立, “光ファイバ共振器中の光カー効果を用いた受動型リング共振方式光ジャイロのロックイン現象の解除,” 電子情報通信学会, 春季大会, paper C-376, 野田, 1992年3月.

5. その他

- [33] “第3の光ジャイロにメド — 東大が共振型で新技術 —,” 日本工業新聞, 17面, 1989年7月3日.
- [34] 保立, 瀧口, “受動型リング共振方式光ジャイロ,” 横河 Renta Station, Angle 欄, vol. 3, no. 4, p. 1, 1990年7月.
- [35] 保立, 瀧口, “高性能の回転センサ「光ジャイロ」,” 横河 Renta Station, Walking Spot 欄, vol. 3, no. 4, p. 8, 1990年7月.
- [36] 瀧口, 保立, “受動型リング共振方式光ジャイロの総合的な雑音除去手法に関する研究,” 東京大学固体エレクトロニクス・オプトエレクトロニクス研究会, 研究発表会, 東京, 1992年3月.