

宇宙航空研究開発機構研究開発報告

JAXA Research and Development Report

飛行制御システムに用いる
光励起固体リングレーザージャイロの基礎研究

滝沢 実

2007年12月

宇宙航空研究開発機構
Japan Aerospace Exploration Agency

目 次

概要	1
1. まえがき	2
2. リングレーザージャイロ (RLG) の動作原理	2
2. 1 従来のリングレーザージャイロの動作原理と問題点	2
2. 2 光励起固体リングレーザージャイロ (ORLG) の基本構成と動作原理	3
2. 3 RLG のロックイン問題	5
3. ORLG の設計検討	5
3. 1 入出力及び出力誤差の検討	5
3. 2 光干渉縞情報から角速度の大きさと極性を求める方式の検討	7
3. 3 リング共振器の設計検討	8
3. 4 励起光源の設計検討	9
4. 光励起固体リングレーザの試作・実験	10
4. 1 試作・実験の目的	10
4. 2 光励起固体リングレーザ実験装置の試作	10
4. 3 特性実験と実験結果および考察	12
4. 4 光励起固体リングレーザ試作・実験のまとめ	13
5. ORLG の試作・実験	14
5. 1 試作・実験の目的	14
5. 2 ORLG 基礎実験装置の試作	14
5. 3 特性実験と実験結果および考察	17
5. 4 ORLG 試作・実験のまとめ	19
6. あとがき	20
参考文献	20

飛行制御システムに用いる 光励起固体リングレーザージャイロの基礎研究^{*}

滝沢 実^{*1}

Fundamental Study of an Optical Pumping Solid Ring Laser Gyro for Flight Control System

Minoru TAKIZAWA^{*1}

ABSTRACT

Fundamental study of an optical pumping solid ring laser gyro (ORLG) for flight control system of an aircraft and for guidance control system of a spacecraft has been performed at JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency). In this report, a principle of the ORLG, numerical discussion on the input-output and qualitative discussion on the output errors of the ORLG, and then design discussion on the components of the ORLG are described. Furthermore, experimental studies of an optical pumping ring laser using solid laser material and of an ORLG's model are described. In the results of the experimental study of the ORLG's model, the principle of the ORLG was qualitatively verified.

Keywords : Fundamental Study, Ring Laser Gyro, Solid Ring Laser, Optical Pumping

概 要

宇宙航空研究開発機構において、航空機の飛行制御システムや宇宙機の誘導制御システムに用いる光励起固体リングレーザージャイロ (ORLG) の基礎研究が行われた。本報告では、ORLG の動作原理、ORLG の入出力の数値検討と出力誤差の定性的検討および ORLG 構成要素の設計検討が記述される。さらに光励起固体リングレーザーおよび ORLG の実験研究が記述される。ORLG 実験研究の結果、ORLG の動作原理が定性的に実証された。

* 平成 19 年 9 月 25 日 受付 (Received 25 September, 2007)

*1 航空プログラムグループ 超音速機チーム (Supersonic Transport Team, Aviation Program Group)

1. まえがき

航空機の飛行制御システムやロケット等の宇宙機の誘導制御システムには機体の角速度や姿勢角を計測するためにジャイロが使用される。従来、電気式ジャイロローターを駆動する機械・電気式ジャイロが使用されていたが、近年、ジャイロの高性能・高信頼性等の要求に対して、光のサニャック効果を利用したリングレーザージャイロ (RLG) や光ファイバージャイロ (FOG) 等が開発され、航空機や宇宙機に搭載される慣性航法装置等に使用される傾向にある。

本研究の目的は、現状の He-Ne ガス等を使用したリングレーザージャイロに替わる新型ジャイロとして、小型・高性能・高信頼性・長寿命・低コスト性等が期待される固体式 RLG を開発するために、新方式の光励起固体リングレーザージャイロを考案し、その基礎研究を行ない、動作原理の実証と設計技術に関する課題を明らかにすることである。

本報告では光励起固体リングレーザージャイロ (ORLG : Optical Pumping Solid Ring Laser Gyro) の構成と動作原理、入出力の数値検討と出力誤差の定性的検討、ORLG 構成要素の設計検討および光励起固体リングレーザージャイロと ORLG の試作・実験研究について述べる⁽¹⁾。

[主な略語]

- CW 光 : Crock Wise (時計方向周り) 光
- CCW 光 : Counter Crock Wise (反時計方向周り) 光
- CRLG : Current Ring Laser Gyro
- BF : Base Frame
- FL : Focusing Lens
- FOG : Fiber Optics Gyro
- LD : Laser Diode
- LP1 : 直線偏光器 ($\lambda/2$ 器) 1
- LP2 : 直線偏光器 ($\lambda/2$ 器) 2
- Nd:YVO4 : ネオジウムドープ・バナジウム酸イットリウム
- Nd:YAG : ネオジウムドープ・イットリウム・アルミニウム・ガーネット
- NPBS : 非偏光光線分岐器
- ORL : Optical Pumping Solid Ring Laser
- ORLG : Optical Pumping Solid Ring Laser Gyro
- ORR : Optical Ring Resonator
- PBO1 : 偏光光線出力器 ($\lambda/4$ 器) 1
- PBO2 : 偏光光線出力器 ($\lambda/4$ 器) 2
- PBC : 偏光光線結合器
- RLG : Ring Laser Gyro

2. リングレーザージャイロ (RLG) の動作原理

2.1 従来のリングレーザージャイロの動作原理と問題点

(1) 従来のリングレーザージャイロの基本構成と動作原理

従来の代表的なリングレーザージャイロはヘリウム (He) とネオン (Ne) の混合ガスを使用してリングレーザージャイロを共振させ、He-Ne ガスリングレーザージャイロ (CRLG : Current Ring Laser Gyro と略す) を構成するもので、その基本構成及び動作原理図を図 1 に示す。CRLG は 1 個の一部透過ミラー : M1 (出力ミラー) と 2 個以上の全反射ミラー : M2、M3 (図 1 では 2 個) で構成するリング共振器とレーザ媒質 (He-Ne 混合ガス) を封入したレーザ発振管 (He-Ne LT) とでリングレーザ一部 (角速度検出部) を構成し、リングレーザ一部から出力される光信号を処理し、角速度情報を造る出力読出部及びリングレーザ駆動電源と出力読出部から出力される光信号を処理し、角速度・姿勢角計測を出力する電源・信号処理部から基本的に構成される。リングレーザ一部、出力読出部及び電源・信号処理部は一つの基盤 (BF) 上で組立てられ、一体構造となっている。

上記したリングレーザ一部はレーザ発振管内の陰極と陽極間に電源・信号処理部から供給する直流高電圧を印加することにより放電電流を流し、放電電流によって Ne 原子を励起し、励起された Ne が基底状態になるときに生じる光 (代表的な光は波長 $0.63 \mu\text{m}$) がリング共振器内で誘導放射され、レーザ発振光を創出する。リング共振器内を双方向に伝播するレーザ光 : CW 光 (時計方向周り光) 及び CCW 光 (反時計方向周り光) は M1 から一部透過し、出力読出部に出力される。出力読出部は全反射ミラー : M4、M5 及び半透過ミラー : BS から構成され、リングレーザ部からの出力 : CW 光及び CCW 光を同一方向進行光線として統合干渉させ、

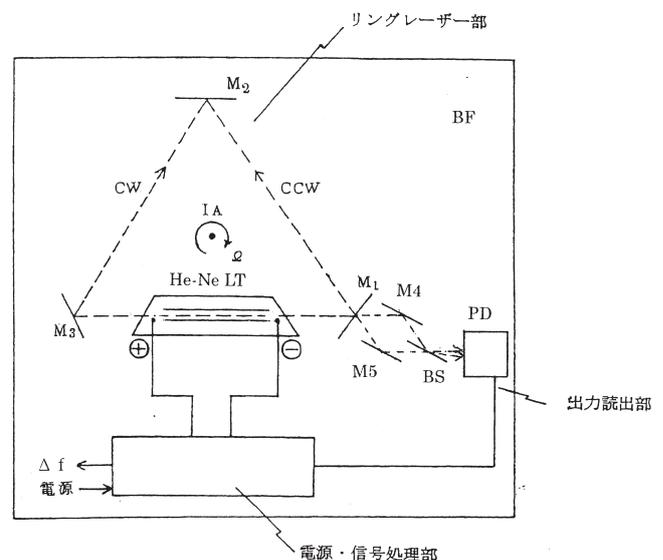


図 1 従来の He-Ne ガスリングレーザージャイロの構成・動作原理図

光干渉信号を出力する機能を備えている。この時、二つの光線にわずかな鋭角をつけると、光の干渉縞を作ることができる。PDは光信号検出器であり、光信号を電気信号に変換する。

リングレーザ一部により創出されるCW光及びCCW光はリングレーザ一部全体が3個のミラーで構成するリング光路面の垂直軸（入力軸：IA）周りにある角速度 Ω で回転すると、光のサニャック効果により、回転の向きが時計周りのとき、CW光の周波数は角速度の大きさに比例して減少し、一方、CCW光の周波数は角速度の大きさに比例して増大する。この時、CW光とCCW光の周波数差： Δf は出力読出部で創出された光干渉縞の単位時間の移動数に相当する。したがって、リングレーザージャイロは Δf と干渉縞の移動方向を計測することにより、入力角速度の大きさと極性を検出することができる。 Δf は一般に次式で与えられる^{(3)、(4)}。

$$\Delta f = \frac{4A}{L\lambda} \Omega \quad (1)$$

ここに、A：図1におけるM1、M2及びM3によるリング光路が囲む面積（ m^2 ）

L：リング光路長（m）

λ ：リングレーザ発振波長（ $\Omega = 0$ 時）（m）

Ω ：A面の垂直軸周りの入力角速度（rad/s）

入力軸まわりに角度 ϕ だけ回転する間に発生するビートの総数をNとすれば、(1)式を時間積分して次式で与えられる。

$$N = \frac{4A\phi}{L\lambda} \quad (\text{パルス})$$

したがって、1ビート（フリンジの1周期）に相当する角度 $\Delta\phi$ は次式で与えられる。

$$\Delta\phi = \frac{\phi}{N} \quad (\text{rad/パルス})$$

(2) CRLGの問題点

航空機搭載用慣性航法装置等に使用されるリングレーザージャイロは一般に小型、軽量、長寿命、低価格等の特徴に加え、耐環境性に優れ、高信頼性、高性能なものが要求される。現状のHe-Neガスリングレーザージャイロについて検討すると、以下のような問題点が考えられる。

- ① CRLGはレーザー媒質としてHe-Neの混合ガスを使用するため、誘導放射利得が小さく、必要なリングレーザ出力を得るためには装置が大型になり、小型化・軽量化に不利である。
- ② CRLGはHe-Ne混合ガスを真空管内に封入するため、高度な真空技術が必要であり、また工程が複雑になるため、コスト低減に不利である。

- ③ CRLGはHe-Ne混合ガスを真空管内で励起させるために直流高電圧を真空管内の陰極と陽極間に印加し、放電電流を発生させる必要があるため、消費電力が高く、小消費電力化に不利である。またCRLGを宇宙空間等の真空環境で使用する場合には真空管外の陰極と陽極間のグロー放電による電圧低下を防止する処置が必要である。
- ④ CRLGはHe-Ne混合ガスを封入した真空管内の陰極と陽極間に放電電流を流すため、真空管内にガス流が生じ、この流れにより、入力角速度が0の場合でも、CW光とCCW光の間に周波数差が生じ、ジャイロ出力の不安定化の原因となる（Langmuir効果）⁽⁴⁾。この原因を解消するためには放電電流による出力不安定化を無くす複雑な制御が必要であり、コスト低減や高性能化に不利である。

2.2 光励起固体リングレーザージャイロ（ORLG）の基本構成と動作原理

(1) ORLGの基本構成と機能

本光励起固体リングレーザージャイロ：ORLGは上記した従来の問題点を解消するために考案された固体リングレーザージャイロに属するものである⁽²⁾。ORLGの基本構成・動作原理図を図2に示す。ORLGはレーザー媒質として誘導放射利得の高い固体レーザー素子を使用する。ORLGの基本構成は純光学式角速度検出部（リングレーザ一部／出力読出し部）、励起光源／信号処理部及び光励起エネルギー／光信号伝送部から成っている。

リングレーザ一部は1個の一部透過ミラー（出力ミラー）：M1と2個の高反射率ミラー：M2、M3でリング共振器を構成し、M3をレーザー固体素子で作成することによりミラーとレーザー媒質の機能を兼用させるものである。またリングレーザ一部はレーザー固体素子を励起し、リングレーザを発振させるために、外部からの励起光を固体レーザー素子内で集光させるための励起光集光レンズ系を備えている。リング共振器のミラーM1及びM2の内面（リング光路を発生させる面）はリングレーザ光（固体レーザー素子の放出光）を高反射率で反射させる誘電体多層膜でコーティング（鏡面形成）されている。またミラーM3の内面はリングレーザ光を高透過率で透過させる誘電体多層膜がコーティングされ、その外面はリングレーザ光を高反射率で反射させる誘電体多層膜と励起光を高透過率で透過させる誘電体多層膜がコーティングされている。

出力読出し部は全反射ミラー：M4、M5及び半透過ミラー：BSから構成され、リングレーザ一部からの出力：CW光及びCCW光を同一方向進行光線として統合干渉させ、光干渉信号を出力する機能を備えている。

〔光励起エネルギー／光信号伝送部〕

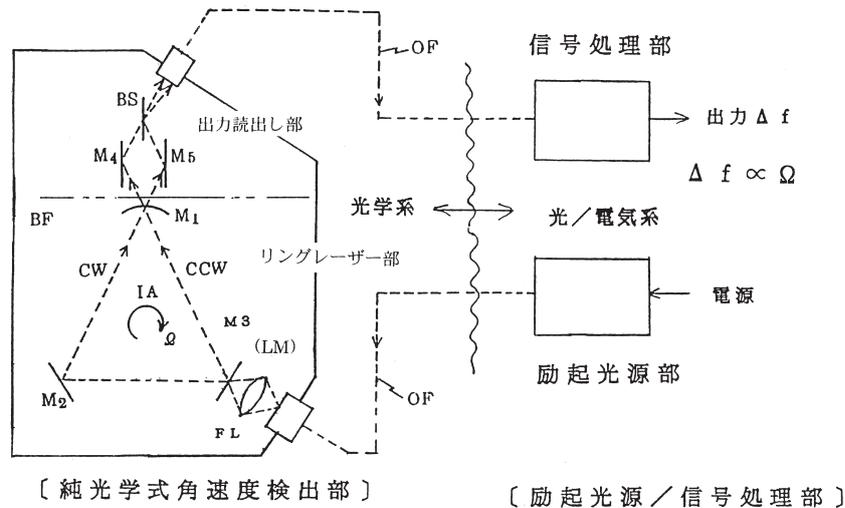


図2 光励起リングレーザージャイロの構成・動作原理図

励起光源／信号処理部はリングレーザー部の固体レーザー素子励起光を発生させる半導体レーザー光源と出力読出し部から出力される光干渉信号を処理し、角速度及び姿勢角情報を出力する機能を備えている。

光信号・光エネルギー伝送部は光コネクタと光ファイバ：OFから構成され、出力読出し部から出力される光信号を信号処理部に伝送し、また励起光源部から出力される励起光をリングレーザー部の励起光集光レンズ系に伝送する機能を備えている。

リングレーザー部と出力読出し部は同一基盤：BF上で組立てられ、耐電磁干渉性に優れた純光学式角速度検出部を形成する。

(2) ORLGの動作原理

図2において、ORLGの動作原理は、He-Neガスを封入した真空管に代わって、固体レーザー素子を光励起してリングレーザーを発振させる以外は、CRLGと基本的に同様の原理に基づくものである。

励起光源・信号処理部から出力された励起光は光励起エネルギー／光信号伝送部の光ファイバを通してリングレーザー部の励起光集光レンズ系に送られる。励起光は固体レーザー素子の吸収光波長を有するもので、励起光集光レンズ系によりリング共振器を形成する一つのミラー：M3兼固体レーザー素子：LMの中心部に集光される。固体レーザー素子はレンズ系により集光された光エネルギーを吸収し、同時に固体レーザー素子固有の波長を持つ光を放出する。固体レーザー素子から放出された光はリング共振器内に設定されたリング光路を双方向に伝播する。伝播した放出光は再び固体レーザー素子内の光放出口に戻り、そこを繰り返し通過することにより誘導放射

を発生させ、リングレーザーの発振を形成する。リング共振器内を双方向に伝播するCW光及びCCW光の一部は出力ミラー：M1を介して外部に取り出され、出力読出し部に入力される。

出力読出し部はCW光とCCW光をM4、M5を介して光干渉ミラー：BSの一点にわずかな鋭角を持って交叉するように導き、交叉部にCW光、CCW光の干渉縞を形成させる。

光信号・光エネルギー伝送部は出力読出し部で形成された光干渉縞（光信号）を、光ファイバ：OFを介して励起光源・信号処理部に伝送する。

励起光源・信号処理部は伝送された光干渉縞情報を処理し、入力角速度の大きさとその極性を算出する。ここで、本光干渉縞情報： Δf は従来のリングレーザージャイロ（CRLG）と同様に次式で与えられる。

$$\Delta f = f_{cw} - f_{ccw} = \frac{4A}{L\lambda} \Omega$$

ここに、 Δf ：CW光とCCW光の周波数差（ビート周波数：光干渉縞情報）

f_{cw} ：CW光の周波数

f_{ccw} ：CCW光の周波数

A：リング共振器のリング光路が囲む面積

L：リング光路長

λ ：リングレーザーの波長（ $\Omega = 0$ 時）

Ω ：Aに垂直な入力軸まわりの角速度

(3) ORLGの特徴

- ① リングレーザーを誘導放射効率の高い固体レーザー素子をレーザー媒質として使用し、発振させるため、リングレーザージャイロを小型・軽量にす

ることができる。

- ② 固体レーザー素子自身にリング共振器のミラー機能を持たせているため、従来のものに比べリング共振器ミラーを一枚減らすことができ、材料のコストを減らすことができる。
- ③ ORLG は角速度検出部を光学分品で構成することにより非電磁干渉性にすることができるため、厳しい電磁干渉環境下で使用しても電磁干渉を受けないことなく角速度を検出することができる。また角速度検出部の耐電磁干渉処置が不要のため、設計製作費の低減や小型・軽量化に有利である。
- ④ ORLG は角速度検出部をソリッド・ステートに製作でき、真空技術が不要のため、高信頼性化に有利である。
- ⑤ ORLG のリング共振器のリング光路内には CRLG のリング共振器内に挿入された He-Ne 真空管等の挿入物が無く、リング光路内のレーザー光のバックスキッターリング（リング光路中の物体からの反射光がリングレーザージャイロの性能に影響を与える：ロックイン現象）を微小にすることができるため、高性能化に有利である。

2.3 RLG のロックイン問題

一般にリングレーザージャイロ：RLG は入力角速度が微小な領域でロックインを引き起こすことが知られている。ロックイン状態になると、RLG 出力（ビート周波数）は入力角速度に対する比例関係を失い、ゼロに

なる。ロックインはリング共振器内で双方向に伝播する光波の相互作用のために起こるものとされている。その原因はそれぞれの光波が相互に反対方向に進行するとき、一方の光波の共振器ミラー等によるバックスキッターリング（散乱反射）成分が他方の光波の誘導放射に作用し、双方のレーザー発振周波数が接近する微小入力角速度領域では、発振周波数の引き込み現象が生じて、それぞれの発振周波数が等しくなることによるものと理解されている。ロックインは文献 (6) によれば、入力角速度が数度/秒以下で生じることが示されている⁽³⁾。

ロックインは RLG 開発の最大の問題点であるが、これを克服し、微小入力角速度領域でも RLG のジャイロ機能を保障するために、RLG の出力に人工的な既知の一定バイアスピート周波数を与え（磁気ミラー方式）、あるいは RLG の入力軸周りに正弦波状振動を与えて（メカニカルディザイナ方式）、RLG をロックイン領域の外で作動させ、微小入力角速度領域でも RLG のジャイロ機能を確保する方式が開発され、実用化されている⁽⁶⁾。

3. ORLG の設計検討

3.1 入出力及び出力誤差の検討

(1) 入出力の数値検討

ORLG の入出力に関して、リング共振器の大きさと入力角速度によって出力 Δf がどのようなになるかを定量的に検討する。 Δf はすでに述べたように次式で与えられる。

$$\Delta f = \left(\frac{4A}{L\lambda} \cos\theta \right) \Omega \quad (2)$$

ここで、ORLG のリング共振器の大きさを次のように設定する。

A : 一辺の長さを a とする正三角形リング光路が囲む面積 (m²)

θ : A の垂直軸と角速度入力軸との成す角度 (deg)

L : リング共振器の閉光路長 (m)

λ : リングレーザー発振波長 (m)

Ω : 入力角速度 (rad/s)

したがって、

$$A = \frac{\sqrt{3}}{4} a^2 \quad (3)$$

$$L = 3a \quad (4)$$

Δf は (3)、(4) 式を (2) 式に代入して、次式となる。

$$\begin{aligned} \Delta f &= \left(\frac{\sqrt{3}}{3\lambda} a \cos\theta \right) \Omega \\ &= K\Omega \end{aligned} \quad (5)$$

ここに、K は Δf の入力角速度に対するスケールファクタで、次式で定義する。

$$K = \frac{4A}{L\lambda} \cos\theta = \frac{\sqrt{3}}{3\lambda} a \cos\theta \quad (6)$$

そこで、 $\theta = 0$ として、 a と λ を次のように設定すれば、 K は次式で与えられる。

$$a = 50 \text{ (mm)} = 5 \times 10^{-2} \text{ (m)}$$

$$\lambda = 1.06 \text{ (}\mu\text{ m)} = 1.06 \times 10^{-6} \text{ (m)}$$

したがって、

$$K = \frac{\sqrt{3} \times 5 \times 10^{-2}}{3 \times 1.06 \times 10^{-6}} = 2.72 \times 10^4 \quad (7)$$

そこで、 Ω をパラメータとして設定し、 Δf を求める。

① $\Omega = 15 \text{ deg} / \text{時間}$ (地球自転角速度)の時の Δf

$$\begin{aligned} \Omega &= \frac{15 \text{ deg}}{3600 \text{ s}} = \frac{15}{57.32 \times 3600} = 7.27 \times 10^{-5} \text{ (rad/s)} \\ \Delta f &= K\Omega = 2.72 \times 10^4 \times 7.27 \times 10^{-5} = 1.98 \text{ (rad/s)} \\ &= \frac{1.98}{2\pi} = 0.32 \text{ (Hz)} \end{aligned} \quad (8)$$

② $\Omega = 100 \text{ deg} / \text{sec}$ の時の Δf

$$\begin{aligned} \Delta f &= K\Omega = 2.72 \times 10^4 \times 100 \text{ (deg/sec)} \\ &= 2.72 \times 10^4 \times 1.74 \text{ (rad/s)} \\ &= 4.74 \times 10^4 \text{ (rad/s)} = \frac{47.4}{2\pi} = 7.55 \text{ (kHz)} \end{aligned} \quad (9)$$

(2) 出力誤差の定性的検討

スケールファクタ： K の誤差による Δf の誤差について検討する。

上記の(6)式より、

$$K = \frac{4A}{L\lambda} \cos\theta = \frac{\sqrt{3}}{3\lambda} a \cos\theta \quad (10)$$

K の誤差： dK は誤差の伝播法則から次式で与えられる。

$$dK = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial K}{\partial A} dA\right)^2 + \left(\frac{\partial K}{\partial L} dL\right)^2 + \left(\frac{\partial K}{\partial \lambda} d\lambda\right)^2 + \left(\frac{\partial K}{\partial \theta} d\theta\right)^2} \quad (11)$$

ここに、 dA 、 dL 、 $d\lambda$ 及び $d\theta$ はそれぞれ、 A 、 L 、 λ 及び θ の誤差とする。また

$\partial K / \partial A$ 、 $\partial K / \partial L$ 、 $\partial K / \partial \lambda$ 、 $\partial K / \partial \theta$ はそれぞれ、 K の A 、 L 、 λ 及び θ の偏微分成分であり、次のように与えられる。

$$\frac{\partial K}{\partial A} = \frac{4}{L\lambda} \cos\theta \quad (12)$$

$$\frac{\partial K}{\partial L} = -\frac{4A}{\lambda L^2} \cos\theta \quad (13)$$

$$\frac{\partial K}{\partial \lambda} = -\frac{4A}{L\lambda^2} \cos\theta \quad (14)$$

$$\frac{\partial K}{\partial \theta} = -\frac{4A}{L\lambda} \sin\theta \quad (15)$$

そこで、 $dK1 \sim dK4$ を次のように定義する。

$$dK1 = \pm \left(\frac{4}{L\lambda} \cos\theta\right) dA \quad (16)$$

$$dK2 = \mp \left(\frac{4A}{\lambda L^2} \cos \theta \right) dL \quad (17)$$

$$dK3 = \mp \left(\frac{4A}{L\lambda^2} \cos \theta \right) d\lambda \quad (18)$$

$$dK4 = \mp \left(\frac{4A}{L\lambda} \sin \theta \right) d\theta \quad (19)$$

dKは(16)式～(19)式を(11)式に代入すれば、次式で与えられる。

$$dK = \pm \sqrt{(dK1)^2 + (dK2)^2 + (dK3)^2 + (dK4)^2} \quad (20)$$

Δf の誤差を $d\Delta f$ とすれば、

$$\begin{aligned} \Delta f + d\Delta f &= (K + dK)\Omega = K\Omega + dK\Omega \\ d\Delta f &= K\Omega + dK\Omega - \Delta f = dK\Omega \\ &= (\pm \sqrt{(dK1)^2 + (dK2)^2 + (dK3)^2 + (dK4)^2})\Omega \end{aligned} \quad (21)$$

また、 $d\Delta f$ の相対誤差： $d\Delta f / \Delta f$ は次式で与えられる。

$$\frac{d\Delta f}{\Delta f} = \frac{dK\Omega}{K\Omega} = \frac{dK}{K} = \pm \sqrt{\left(\frac{dK1}{K}\right)^2 + \left(\frac{dK2}{K}\right)^2 + \left(\frac{dK3}{K}\right)^2 + \left(\frac{dK4}{K}\right)^2} \quad (22)$$

ここで、

$$\frac{dK1}{K} = \pm \left(\frac{4}{L\lambda} \cos \theta \right) dA \times \frac{L\lambda}{4A \cos \theta} = \pm \frac{dA}{A} \quad (23)$$

$$\frac{dK2}{K} = \mp \left(\frac{4A}{\lambda L^2} \cos \theta \right) dL \times \frac{L\lambda}{4A \cos \theta} = \mp \frac{dL}{L} \quad (24)$$

$$\frac{dK3}{K} = \mp \left(\frac{4A}{L\lambda^2} \cos \theta \right) d\lambda \times \frac{L\lambda}{4A \cos \theta} = \mp \frac{d\lambda}{\lambda} \quad (25)$$

$$\frac{dK4}{K} = \mp \left(\frac{4A}{L\lambda} \sin \theta \right) d\theta \times \frac{L\lambda}{4A \cos \theta} = \mp \frac{\sin \theta}{\cos \theta} d\theta \quad (26)$$

したがって、(23)～(26)式を(22)式に代入すれば、 $d\Delta f / \Delta f$ は次式となる。

$$\frac{d\Delta f}{\Delta f} = \pm \sqrt{\left(\pm \frac{dA}{A}\right)^2 + \left(\mp \frac{dL}{L}\right)^2 + \left(\mp \frac{d\lambda}{\lambda}\right)^2 + \left(\mp \frac{\sin \theta}{\cos \theta} d\theta\right)^2} \quad (27)$$

$d\Delta f / \Delta f$ について考察すれば、次のように記述できる。

- ① $d\Delta f / \Delta f$ はA、Lに反比例するので、誤差を小さくするためにはサイズが大きい方が有利であるが、小型化するためにはより精密な製作が必要である。
- ② $d\Delta f / \Delta f$ は λ に反比例するため、小さくするためには λ は大きい方が良いといえるが、 Δf は λ に反比例するため、 Δf を大きくするためには λ は小さくする必要がある。
- ③ θ は $d\Delta f / \Delta f$ を小さくするために、できるだけ0に近づける必要がある。

3.2 光干渉縞情報から角速度の大きさと極性を求める方式の検討

(1) 角速度の大きさを求める方式

ORLGの出力読出し部から出力された光干渉縞情報

(フリンジパターン) から角速度の大きさを求める方式は、後述の図13に示すように、フリンジパターンの干渉縞間隔より小さいピンホールまたは干渉縞間隔より狭いスリットをフリンジパターンの後方に置き、その背後

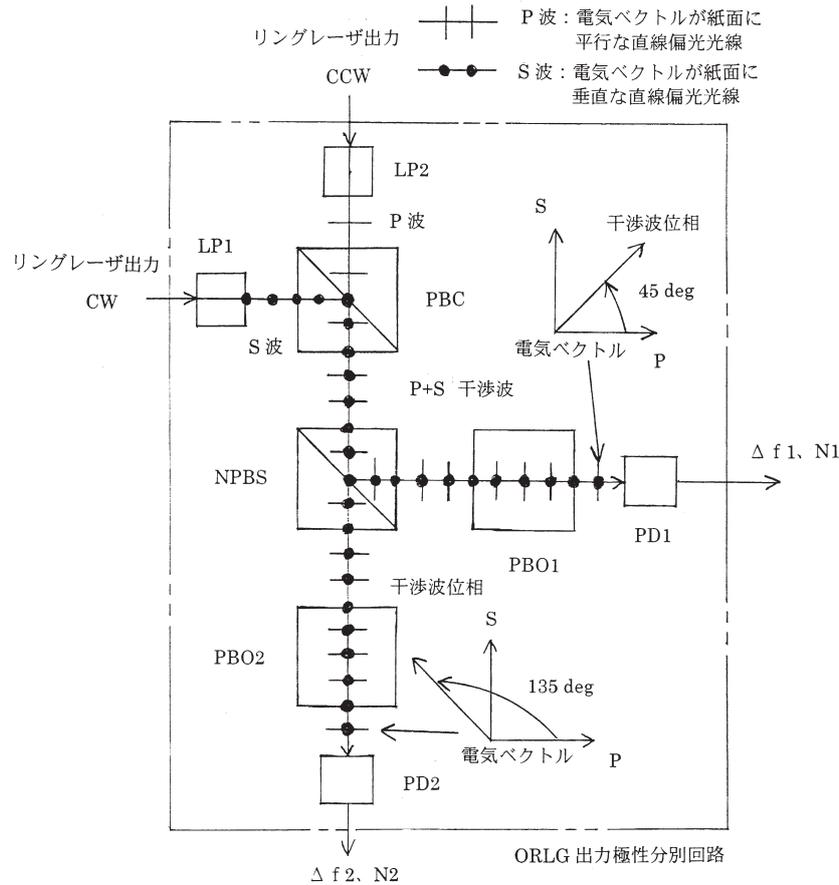


図3 リングレーザージャイロ出力の極性分別方式

に光／電気変換器を置いて、光信号を電気信号に変換し、光／電気変換器の出力（電気パルス信号）を周波数カウンタで計測することにより、入力角速度によって変化する干渉縞の単位時間あたりの移動量を知ることができ、この移動量から角速度の大きさを求めることができる。

(2) 角速度の極性を求める方式

ORLG の出力読み出し部から出力された光干渉縞情報から入力角速度の極性を求める方式は入力角速度の極性に対応した光干渉縞の移動方向を分別することで知ることができる。光干渉縞の移動方向を分別する方式は幾つか考えられるが、一例として図3に示す分別方式について記述する⁽²⁾。

この方式による出力読み出し部は、2個の直線偏光器（ $\lambda/2$ 器：LP1、LP2）、偏光光線結合器（PBC）、非偏光光線分岐器（NPBS）、2個の偏光光線出力器（ $\lambda/4$ 器：PBO1、PBO2）、2個の光信号検出器：PD1、PD2から構成される。

動作原理は次のように記述できる。リングレーザー部からの出力：CW光、CCW光はそれぞれLP1及びLP2に投入され、CW光線は紙面に垂直な電気ベクトルを持つ直線偏光光線：S波にされ、CCW光線は紙面に水平

な電気ベクトルを持つ直線偏光光線：P波にされる。S波とP波はPBCに投入され、S波とP波の混合光線（CW光とCCW光の干渉光線）として出力される。出力されたS波とP波の混合光線はNPBSに投入され、二分されて、出力される。二分された一方のS波とP波の混合光線はPBO1に投入され、電気ベクトルの位相がP波の位相から45度の位置で切り出され、出力される。この光パルス信号を Δf_1 とする。他方のS波とP波の混合光線はPBO2に投入され、その電気ベクトルの位相がP波の位相に対して135度の位置で切り出され、出力される。この光パルス信号を Δf_2 とする。 Δf_1 と Δf_2 は図に示すように、90度の位相差を備えている。 Δf_1 と Δf_2 は信号処理器を用いて電気信号に変換され、それぞれは周波数カウンタでN1、N2として計測される。したがって、角速度の大きさ（CW光とCCW光の周波数差）はN1またはN2から求めることができる。また角速度の極性は（N1 - N2）から求めることができる。

3.3 リング共振器の設計検討

(1) リング共振器及び固体レーザー媒質

ORLGのリング共振器設計にあたり、次のような機能

要求を設定した。

- ① リング共振器のミラー構成はシンプルかつ光軸アライメントが容易なこと。
- ② 発振レーザー光の安定した単一横モード (TEM00) が安定かつ容易に得られること。
- ③ なるべく小型であること。
- ④ ORLG の耐電磁干渉性を高めるため、リング共振器を構成する系から電気系を排除すること。
- ⑤ 固体レーザー媒質の選定にあたっては励起光源の入手が容易かつ安価なこと。また光学特性として、物理的及び化学的に安定したものであること。
- ⑥ 上記の機能要求を考慮して、リング共振器のミラー構成は光励起固体リングレーザー構成図 (図 4) に示すように、光軸アライメントが容易で、安定した TEM00 モードが容易に得られる共焦点型共振特性を備えた正三角形型とし、リング光路長と同じ長さの曲率半径を持つ球面ミラー : M2 と二枚の平面ミラー : M1, M3 で構成することとし、二枚の平面ミラーの内、M3 は固体レーザー媒質機能を備えたミラーとすることとした。
- ⑦ リング共振器の小型化を考慮して、三角形光路の一边が 50mm 程度にすることとした。
- ⑧ 固体レーザー媒質は⑤を考慮して、入手が容易かつ安価で、物理的及び化学的特性が安定している Nd-YAG または Nd-YVO4 を使用することとした。

(2) 励起光集光レンズ系

励起光集光レンズ系は、上記機能要求の③及び④を考慮して、励起光源から出力され、光信号・光エネルギー伝送部 (光ファイバー) を経由して伝送された励起光を一旦並行光線にし、それを固体レーザー媒質で造られた共振器ミラー内で集光し、固体レーザー媒質を励起する

機能が要求される。それゆえ、励起光集光レンズ系は図 4 に示すように、凸レンズ二枚とレンズホルダーにより構成される。この形態は集光レンズ系と共振器ミラーを一体構造に造ることにより、集光レンズ系による励起光の光軸と固体レーザー媒質ミラー内に生じるリングレーザー光の光軸関係を固定できるため、共振器のアライメントが容易にできる。またこの形態は、励起光の光軸が固体レーザー媒質のミラー面に垂直に入射されるため、リングレーザー光線軸に対して二等分線の位置にあり、CW 光及び CCW 光を同程度の強度で励起し、発振させることができる。さらに、光励起を効率よく行うためには励起光の集光立体角を正三角形リング共振器の内角 60 度より大きくする必要がある。

3.4 励起光源の設計検討

(1) 要求機能・性能

励起光源はリング共振器に使用する固体レーザー媒質の励起に必要な光強度と吸収光の波長を備えた光エネルギーを発生させる機能が要求される。リング共振器の検討において設定した固体レーザー媒質は Nd-YAG であり、その光エネルギー吸収光の中心波長は 809nm である。また固体レーザー媒質を励起し、レーザー発振させるために必要な励起光の強度は本研究の一環として行った光励起固体リングレーザーの試作実験結果 (後述) から 1 kW 程度と考えられる。

(2) 励起光源の選定

ORLG の励起光源は航空機等の搭載性を考慮すると、小型・軽量で、耐環境性にも優れたものが必要であり、また上記の要求機能・性能を備えたものが必要である。これらのことを考慮して、励起光源は発光波長約 809nm で、発光強度 1 kW 以上の半導体レーザー素子

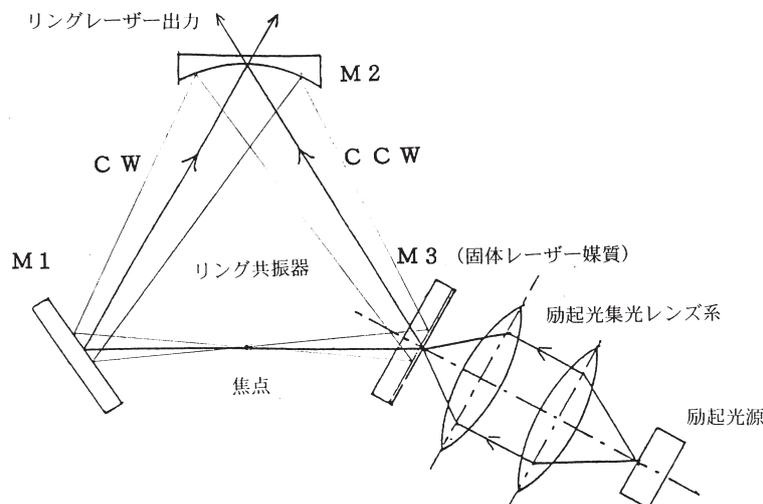


図 4 光励起固体リングレーザー構成図

(LD) を使用することとした。

(3) 励起光源の構成

励起光源は、図 5 に示すように、LD とその駆動電源／温度制御回路部及び LD 出力光を光ファイバーに投入する LD 出力集光部から構成するものとした。

4. 光励起固体リングレーザーの試作・実験⁽⁵⁾

4.1 試作・実験の目的

本試作・実験の目的は ORLG の核心となる光励起固体リングレーザー実験装置 (ORL : Optical-pumping Solid Ring Laser) の試作・実験を行い、光励起固体リングレーザー発振技術の確立を図ることである。

4.2 光励起固体リングレーザー実験装置の試作

試作した ORL の構成模式図を図 6 に示す。ORL はリング共振器 (ORR : Optical Ring Resonator)、励起光集光系 (FL : Focusing Lens) 及び励起光源 (LD : Laser Diode) から構成される。

(1) ORR はミラー M1、M2 及び M3 を頂点としたほぼ正三角形光路を形成するように構成し、その一辺の長さは 50mm の共焦点型リング共振器である。M1 ~ M3 の仕様は次の通りである。

M1 : 曲率半径 ; ∞ mm (平面鏡)

内面 ; 反射率 95% 以上 (波長 ; 1064nm) の誘電体多層膜コーティング*

外面 ; 反射防止 (波長 ; 1064 nm) の誘電体多層膜コーティング

半径×厚さ ; 15mm ϕ × 1 mm

材質 ; BK1

* : 波長 1064nm は本試作実験で使用する固体レーザー媒質 Nd-YVO₄ の放出波長であり、励起リングレーザーの発振波長である。

M2 : 曲率半径 ; 150mm (凹面鏡)

内面 ; 反射率 92% (波長 ; 1064nm) の誘電体多層膜コーティングした一部透過ミラー

外面 ; 反射防止 (波長 ; 1064nm) の誘電体多層膜コーティング

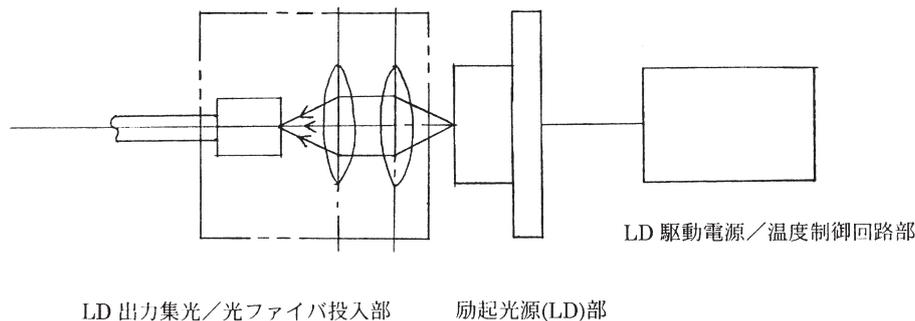


図 5 励起光源の構成図

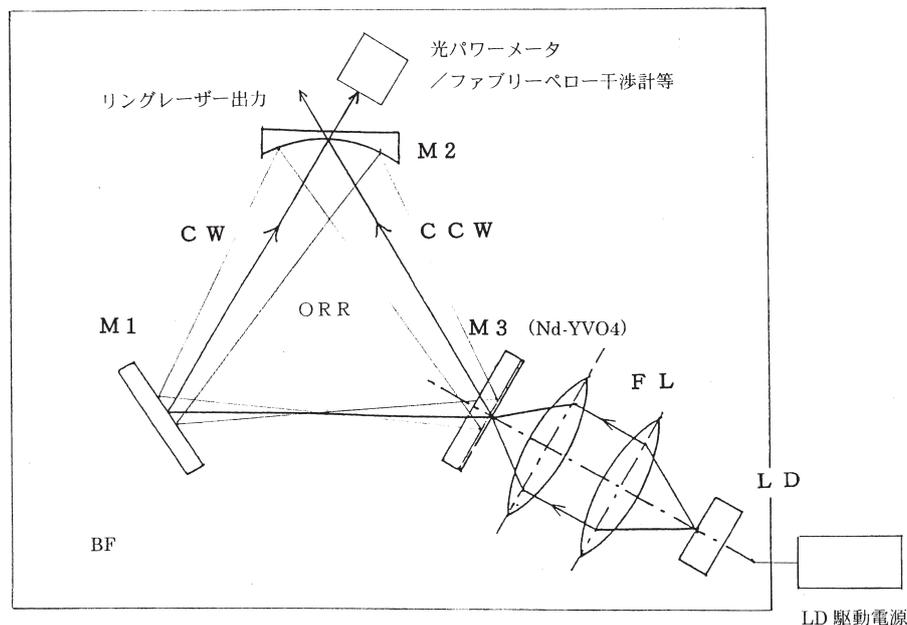


図 6 光励起固体リングレーザー実験装置構成図

半径×厚さ；15mm φ×1 mm

材質；BK1

M3：曲率半径；∞ mm（平面鏡）

内面；反射防止（波長；1064nm）の誘電体多層膜コーティング

外面；反射率95%以上（波長；1064nm）の誘電体多層膜コーティング、反射防止（波長810nm）の誘電体多層膜コーティング

材質；Nd:YVO4（固体レーザー素子：ネオジウムドープバナジウム酸イットリウム結晶、Nd1 at.% ドープ、a-cut）

半径×厚さ；15mm φ×1 mm

ここに、固体レーザー媒質としてNd:YVO4を選定した理由は次の通りである。

- ① Nd:YVO4は、一軸性結晶であり、結晶軸の方向により分光特性（光吸収特性）が異なり、結晶のC軸と励起光の電気ベクトルが平行になる場合、高効率で励起光を吸収する。
- ② Nd³⁺イオンを約1 at.%ドープしたNd:YVO4結

晶の誘導放出断面積は約 $3 \times 10^{-18} \text{cm}^3$ 、上準位寿命は約 $90 \mu \text{s}$ である。

- ③ Nd:YVO4結晶はレーザー遷移元素がNd:YAG結晶と同じNd³⁺イオンであり、放出光波長（レーザー発振波長）は1064nmであり、また吸収光波長帯域が809nmを中心にNd:YAG結晶より広いため、励起させることが容易である。
- ④ Nd:YVO4の吸収波長帯域の出力特性を持つ市販の高出力LDが容易に入手できる。
- ⑤ リング共振器のアライメント（リング光路を正確に閉光路とする）するために、He-Neレーザー等の可視光レーザーを使用するが、固体レーザー媒質によっては可視光が透過しにくいものがある。Nd:YVO4結晶はHe-Neレーザーを透過させるので、リング共振器のアライメントが行ない易い。

(2) 励起光集光レンズ系（FL）及び励起光源（LD）

FLは、NA = 0.55の組みレンズでLD出力光をコリメートし、その後F = 4.5mmの非球面レンズで、固体

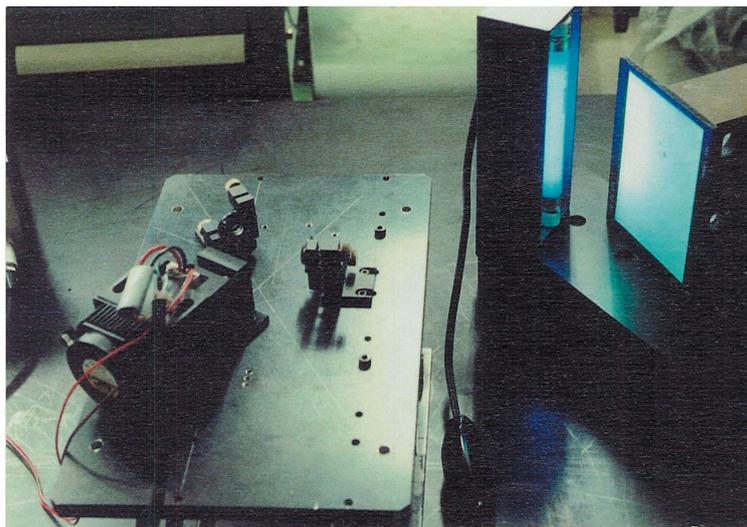


図7 光励起固体リングレーザー実験装置の写真

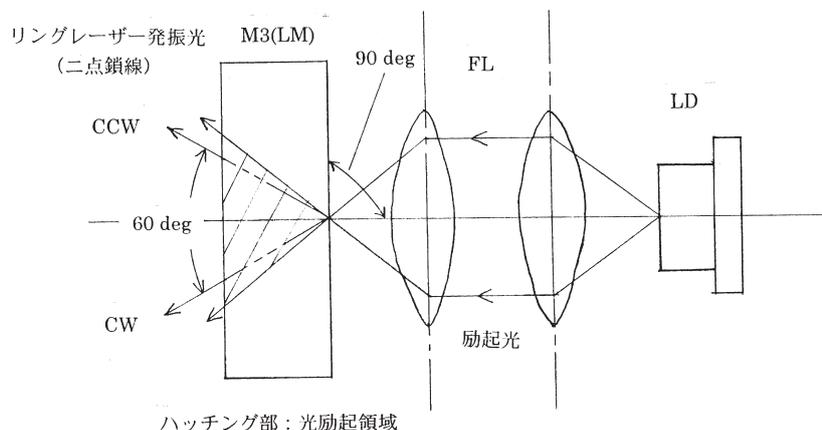


図8 固体レーザー媒質結晶内の励起領域

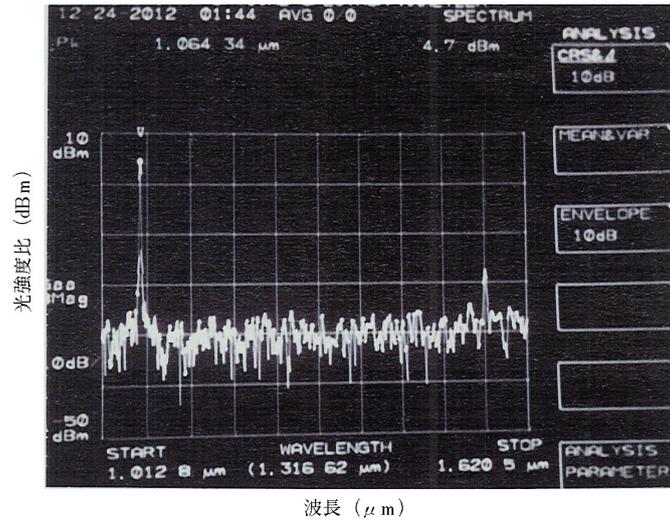


図9 光励起固体リングレーザー出力光の波長測定結果

レーザー媒質ミラー M3 外面上、垂直方向に集光する系になっている。励起光源は出力波長：810nm の市販の高出力（最大出力 1kW）LD を使用した。

4.3 特性実験と実験結果および考察

(1) ORL 実験装置のセットアップとリングレーザー発振実験

ORR、FL 及び LD を一つの基盤 BF 上に配置し、ORL をセットアップした後、ORR の M2 の外面から He-Ne レーザーを入射させ、リング共振器が共振条件（三角形光路が閉光路を形成）になるように各ミラーの調整を行った。その後、LD の出力光を FL を介して固体レーザー媒質ミラー M3 の外面上に集光、入射させ、再度リング共振器の各ミラーを調整し、リングレーザーの発振を確認した。図 7 に実験セットアップの写真を示す。発振レーザーは右側の長方形白紙上に黒点として観察することが出来る。この白紙はその左側に設置した近赤外光を可視化する特殊なランプからの照射を受け、赤外光が当たるとその部分を黒色に表示する機能を備えている。

Nd-YVO4 結晶を効率良く励起するためには LD の出力波長を Nd-YVO4 結晶の吸収ピーク波長に一致させる必要がある。LD の出力波長を変化させ、Nd-YVO4 結晶の吸収ピーク波長に合致させる方法は幾つか考えられるが、ここでは LD の出力波長が温度変化により変わる特性を利用して、LD の温度を制御して、その出力波長が Nd-YVO4 結晶の吸収ピーク波長に合致させる方法を採用した。また LD の駆動に関しては定電流駆動を採用し、出力光の強度を一定に保持することを行った。

リング共振器を構成する固体レーザー媒質ミラー M3 の外面に対して、その面の垂直軸方向から励起光を入射させ、集光させると結晶内の励起領域は図 8 に示すよ

うに入射軸を中心にした円錐状に広がる領域を形成する。励起効率は励起光のエネルギー密度に比例するので、この領域内の励起効率は円錐軸を中心にして対称性を持つことになる。レーザー媒質の Nd-YVO4 結晶は励起領域の Nd³⁺ イオンが励起されると瞬時に波長 1064nm の光を放出することになる。Nd-YVO4 結晶から放出された光はリング共振器内の三角形光路に沿って、双方向に伝播し、誘導放射を形成して、リングレーザーを発振させるものと考えられる。このとき、双方向に伝播する発振レーザー光は結晶内の円錐状励起領域内を垂直軸に対称に伝播するため、同様な誘導放射を受け、同様の光強度を有するものと考えられる。

(2) リングレーザーの特性実験

(イ) 発振レーザーの波長

レーザー発振後、光スペクトルアナライザー（アドバンテスト社製：TQ8347）を使用して、発振波長を測定した。測定結果を図 9 に示す。これにより、測定したレーザー発振波長は 1064nm であることがわかり、Nd-YVO4 結晶によるものであることが確認された。

(ロ) 発振レーザーの縦／横モード

発振レーザーの縦モード及び横モードをファブリーペロー干渉計（㈱ネオアーク製、FSR=500GHz、フィネス=約 100）を使用して観測した。観測結果を図 10 に示す。この観測結果から、リングレーザーは単一縦モードで発振していることが確認された。また横モードについては、励起光源出力が 400mW までは単一横モードが目視で確認され、それ以上ではマルチモードで発振することが目視確認された。

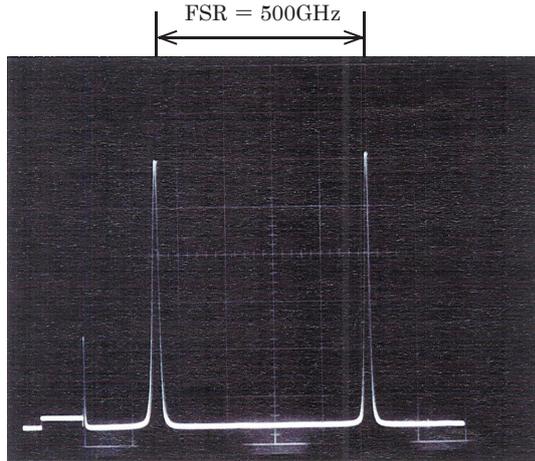


図 10 光励起固体リングレーザー出力光の縦モード測定結果

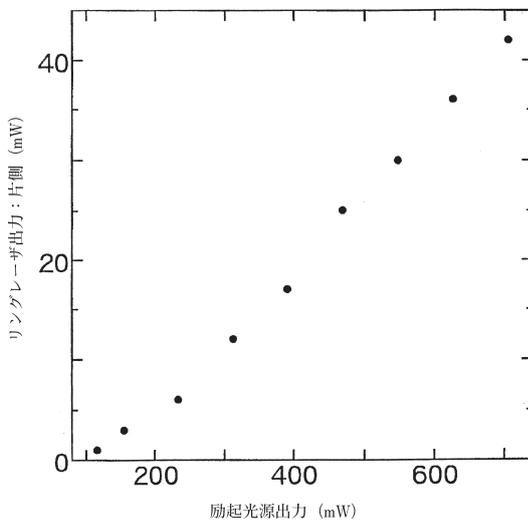


図 11 光励起固体リングレーザー出力光の強度測定結果

(ハ) 発振レーザー出力特性

パワーメーターを使用して、発振レーザーの出力特性を測定した。リングレーザーの発振は励起光源出力が約 100mW から開始し、励起光源の出力を徐々に上昇させると出力はそれに対応して増加するが、励起光源出力を上げてても増加せず、低下する減少が生じた。これは励起光の熱により、Nd-YVO4 結晶が膨張し、リング共振器の共振状態が劣化して、レーザー出力が低下したものと考えられた。そこで、励起光源の出力強度ごとに発振レーザーの出力が最大になるよう共振器のミラーを調整し、発振レーザーの出力強度を測定した。

励起光の強度に対する CW 方向のレーザー出力強度測定結果を図 11 に示す。CCW 方向のレーザー出力は共振器のミラーホルダーにより遮蔽され、測定することができなかった。

(ニ) 励起光源の出力特性

図 12 に励起光源の駆動特性（入力電流に対する励起

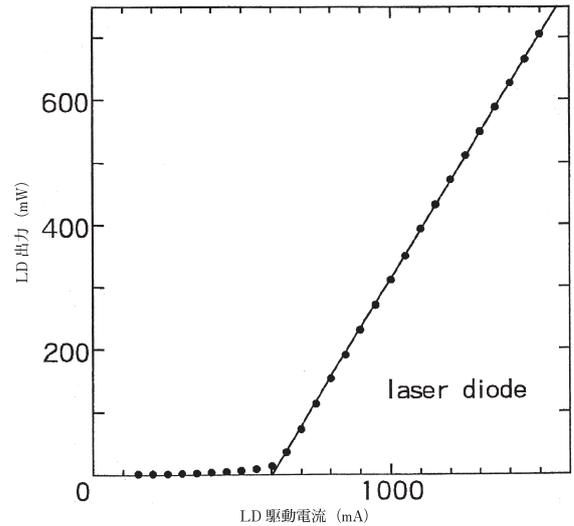


図 12 励起光源の駆動特性

光出力強度) を示す。本励起光源は LD 出力の閾値が約 600mA であることがわかる。また閾値以後の出力強度は駆動電流の増加に比例して、直線的に増加することがわかる。

4.4 光励起固体リングレーザー試作・実験のまとめ

- (1) 固体レーザー媒質として Nd-YVO4 結晶を使用して、LD 励起 Nd-YVO4 リングレーザー実験装置をセットアップし、光励起固体リングレーザーの発振に成功した。この結果、Nd-YVO4 結晶は Nd-YAG 結晶と同様な光学特性を有するため、今後、Nd-YAG 結晶を使用した光励起固体リングレーザー発振実現の見通しが得られた。
- (2) 光励起固体リングレーザー実験装置のレーザー出力は励起光源出力強度が 100mW 位に発振閾値があり、励起光源出力強度が 700mW では 42mW 程度（片側出力）得られることが確認された。しかし、励起光源出力強度を上昇させると、リング共振器のアライメントを再調整しない場合、リングレーザーの発振が不安定になり、出力強度の低下と横モードが単一からマルチモードに変化することが確認された。リング共振器のアライメント再調整無しで、リングレーザーの安定発振（必要な出力強度と単一縦／横モード）を得るためには励起光源の出力を必要最小限にする必要があることが判った。
- (3) 励起光源の出力波長を Nd-YVO4 結晶の吸収ピーク波長に合致させるために、励起光源の LD を温度制御し、その出力波長を吸収ピーク波長に合致させることができることを確認した。
- (4) リング共振器のアライメントは He-Ne レーザーを

使用することにより容易に行うことができることを確認した。

- (5) 今回の試作実験では固体レーザー媒質の光励起方式を励起光源からの出力光を直接励起光集光レンズ系に入射し、固体レーザー媒質で作製したミラーの端面に、その面の法線方向から集光する方式を採用したが、ORLGを作成するためには励起光源出力を光ファイバーを介して励起光集光レンズ系に入射させる必要がある。この課題については ORLG 基礎実験装置の試作実験のなかで試行し、解決する必要がある。

5. ORLG の試作・実験 (1)

5.1 試作・実験の目的

本試作・実験の目的は ORLG の基礎実験装置を試作し、

ORLG の動作原理を実証するとともに、ORLG の性能向上に必要な設計技術資料を得ることである。

5.2 ORLG 基礎実験装置の試作

(1) ORLG 基礎実験装置及び ORLG 基礎実験全体構成

試作した ORLG 基礎実験装置の構成図を図 13 に、実験装置の写真を図 14 に示す。本実験装置はリング共振器部、出力読出し部、励起光源部、光信号検出部、励起光伝送・集光部から構成される。また ORLG 基礎実験全体構成図を図 15 に、その写真を図 16 に示す。ORLG 基礎実験装置の基盤は剛性を確保するために、厚さ 20mm、縦 400mm、横 200mm の鉄板を使用している。またそれぞれの構成品はマグネットスタンドを使用して固定している。それぞれの高さは約 250mm である。リング共振器部及び出力読出し部のスタンドには油

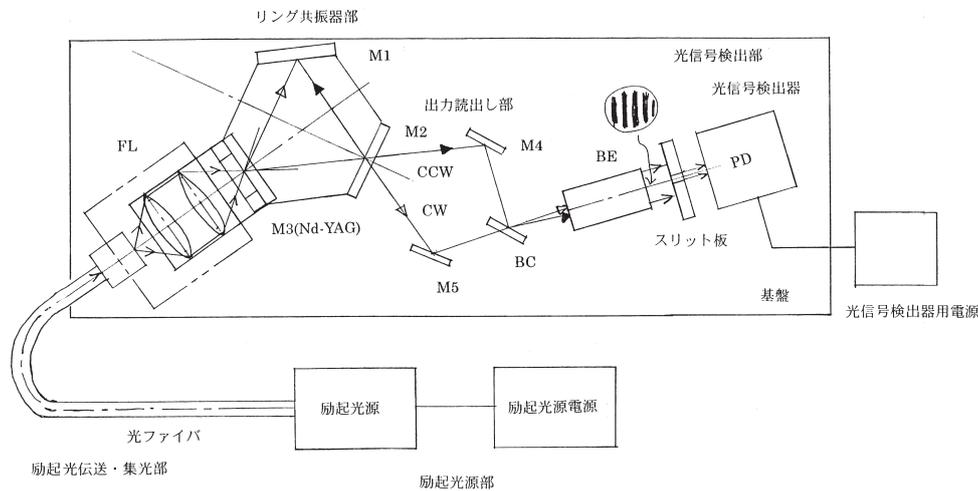


図 13 ORLG 基礎実験装置の構成図

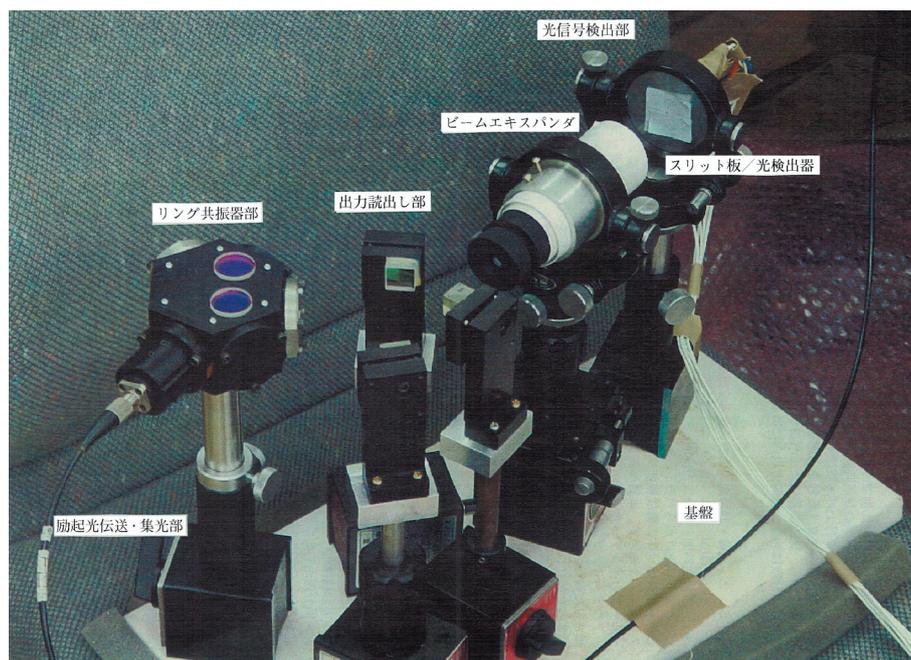


図 14 ORLG 基礎実験装置の写真

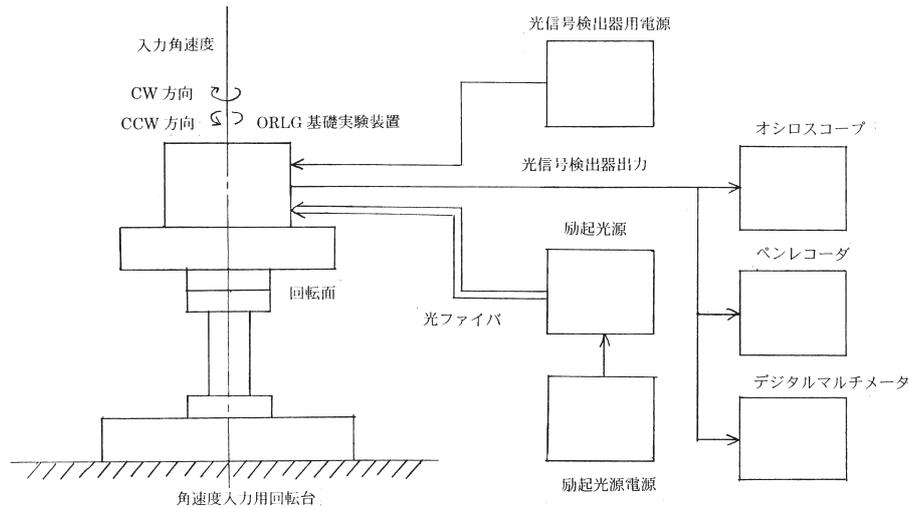


図 15 ORLG 基礎実験系全体構成図

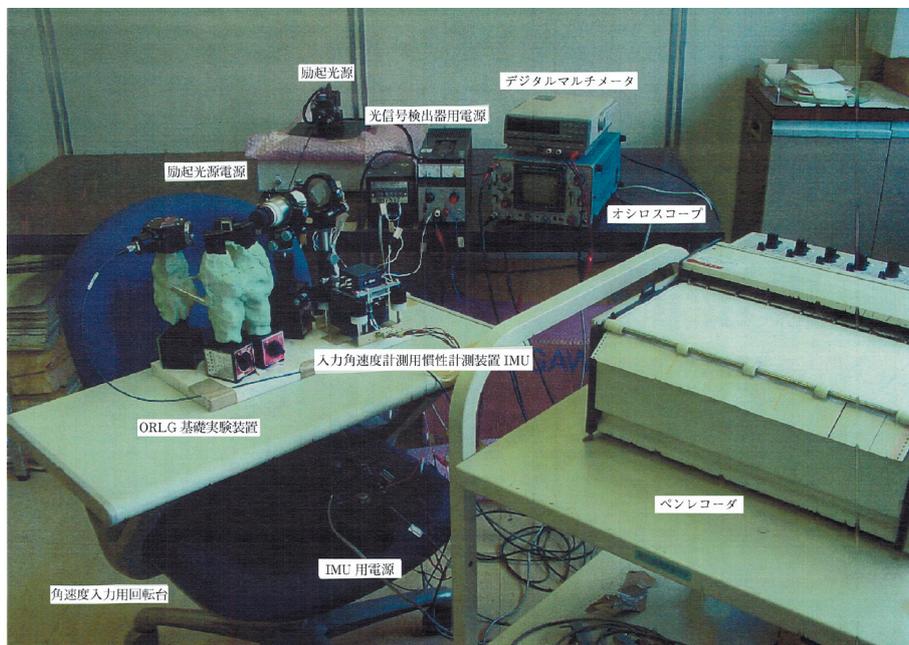


図 16 ORLG 基礎実験系の写真

粘土を付着させて微振動を防止し、振動による干涉縞模様の変動を抑制している（図 17 参照）。ORLG 基礎実験装置は図 16 に示すように、回転台上に設置され、角速度入力に対する ORLG 出力（干涉縞模様）の挙動が観測できるようにしている。ORLG と回転台の間には緩衝材を挿入し、回転台から発生する微振動が ORLG に伝達しないよう工夫している。測定機器としてはオシロスコープ（日立電子㈱製、型式：V-053C、5MHz、2 現象）、ペンレコーダ（GRAPHTEC ㈱製：リニアコーダマーク VII、型式：WR3101）及びデジタルマルチメータ（岩通電気㈱製、型式：VOAC7412）および入力角速度計測用慣性計測装置：IMU（トキメック㈱製、型式：TMOS1000 センサユニット、使用ジャイロ：TFG-160、測定レンジ $\pm 200 \text{ deg/s}$ 、スケールファクタ $50 \text{ mV}/(\text{deg}/$

s)、出力精度 $\pm 0.1\% \text{ FS}$ 以下、分解能 $\pm 0.005 \text{ deg/s}$ 、周波数応答 50 Hz) 等を使用した。IMU は ORLG 基礎実験装置の基盤上に、Z 軸ジャイロの入力軸を垂直方向に向け、ORLG 基礎実験装置の角速度入力軸と一致させるように取り付けた。

以下に ORLG 基礎実験装置の各部について記述する。

(2) リング共振器部

リング共振器部の構成は図 13 に示すように、一辺の光路長が 55 mm の正三角形になるように共振器ミラーが配置されている。M1 は内側面をリングレーザー発振波長 1064 nm を全反射誘電体多層膜でコーティングした平面ミラー（材質：BK1）であり、反射率は 99.2% である。M2 は出力ミラーでリングレーザーを一部透過させるミ

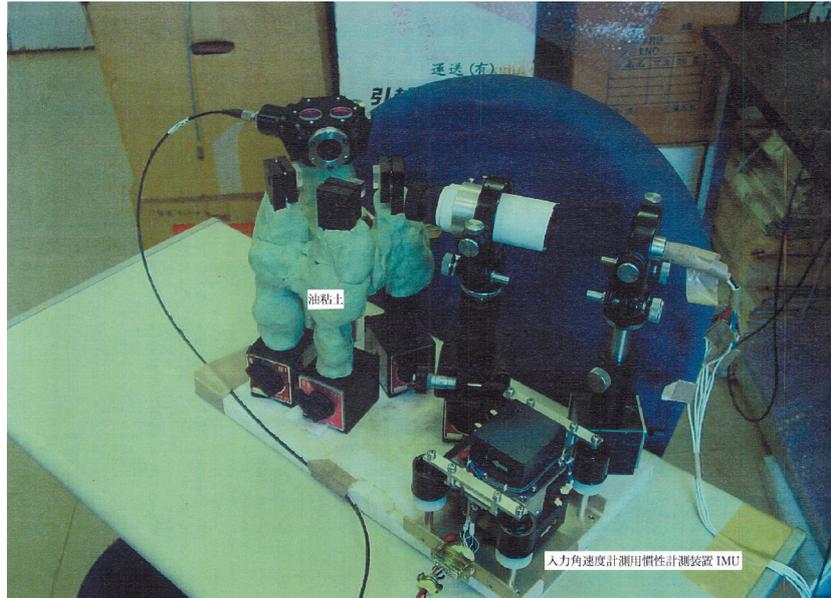


図 17 油粘土で防振処置をした ORLG 基礎実験装置の写真

ラーであり、曲率半径が 165mm の誘電体多層膜凹面ミラー（材質：BK1）で、波長 1064nm に対して反射率は 95% である。M3 はレーザー媒質（Nd-YAG 結晶）で造られた平面ミラーであり、内面側はリングレーザー波長 1064nm の反射防止誘電体多層膜コーティング、外側面は波長 810nm の励起光反射防止誘電体多層膜コーティング及びリングレーザー波長 1064nm の 99.2% 反射誘電体多層膜コーティングを施している。これら 3 枚の共振器ミラーは図 14 に示すように堅牢な共振器ケース（アルミニウム製）に取り付け、ミラーアライメントの安定化を図っている。またミラー取り付け部は 2 軸のあおり調整機能を付加し、アライメントが容易にできるようにしている。

(3) 出力読出し部

出力読出し部は図 13、図 14 に示すように、リングレーザー波長 1064nm の全反射平面ミラー 2 枚（M4、M5）と波長 1064 の半透過平面ミラー（光干渉器：BC）で構成され、リング共振器部から出力された CW 光と CCW 光を M4、M5 を介して BC 面の一点に導き、BC 面の角度を調整して、CW 光と CCW 光を干渉させ、干渉縞模様を形成させる機能を備えている。M4 及び M5 は一辺が 10mm、厚さ 5mm の正方形平面ミラーで、波長 1064nm 光を全反射させる誘電体多層膜がコーティングされている。BC は 2 個のプリズムを合体させた一辺が 10mm の立方体で、合体面に波長 1064nm 光を 50% 透過する誘電体多層膜がコーティングされている。

(4) 光信号検出部

光信号検出部は図 13、図 14 に示すように、出力読出

し部で創出された干渉縞模様を拡大するためのビームエキスパンダー（BE）とスリット板（0.5 × 1.5mm、スリットの長手方向は干渉縞に平行、幅は干渉縞の幅より狭くすること）及び光信号検出器から構成される。スリット板は BE と光信号検出器の間に配置し、干渉縞が造る光の明暗を判別するために使用される。光信号検出器は光信号を電気信号に変換し、出力するもので、アンプ付きホットデテクター：PD（CENTRONIC 社製、型式：HN OSI-1K-HAS、出力感度：0.93V/mW、最大出力：4.7V、応答周波数：2MHz 以上）と光信号検出器用電源装置（±6 VDC 及び +30VDC 定電圧電源装置）から構成される。光信号検出器の出力はデジタルマルチメータ（電圧計測）、オシロスコープ及びペンレコーダに並列に接続される。デジタルマルチメータは光干渉信号、すなわち光信号検出器で光／電気変換された ORLG 基礎実験装置出力：CW 光と CCW 光のビート信号の電圧を計測するために使用される。オシロスコープはビート信号の波形観測に使用される。またペンレコーダはビート信号の波形記録に使用される。

(5) 励起光源部

励起光源部は図 16 に示すように、励起光源：LD と励起光源駆動電源から構成される。LD は駆動電源により出力波長が 809nm（Nd-YAG 結晶の吸収波長）になるように温度制御され、1kW 以上の出力ができるものである。また LD は出力を励起光伝送・集光部に入射できる励起光の光ファイバ投入器に接続している。励起光源の写真を図 18 に示す。

(6) 励起光伝送・集光部

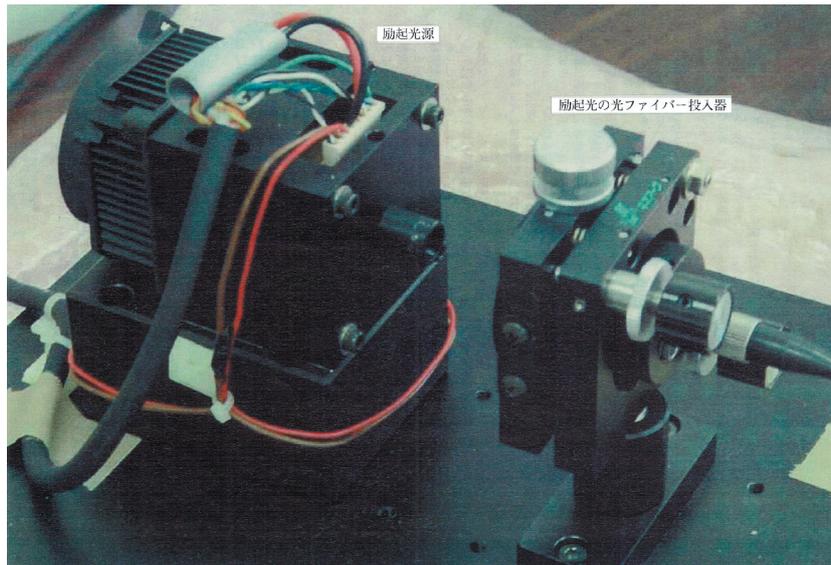


図 18 励起光源の写真

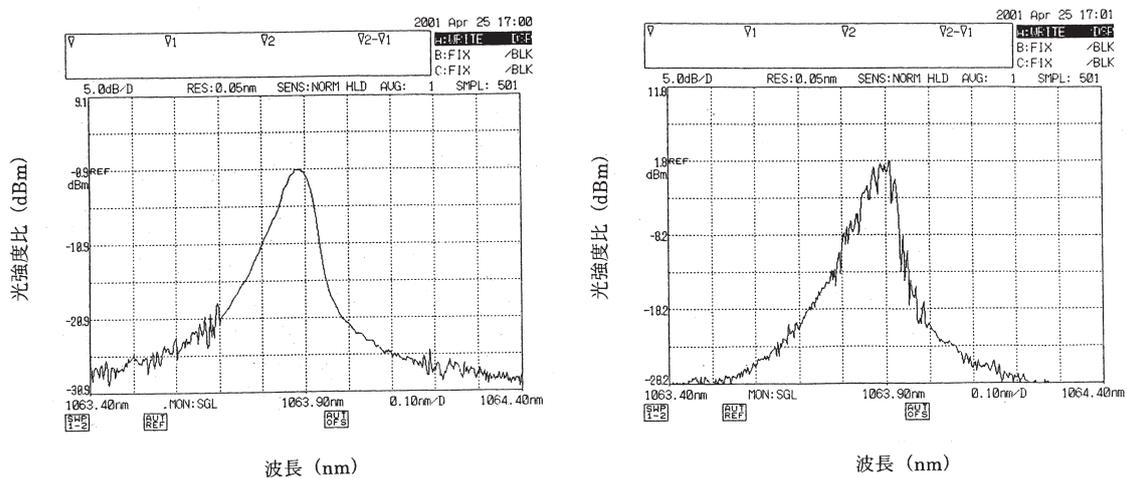


図 19 ORLG 出力スペクトルの測定結果

励起光伝送・集光部は励起光の光ファイバ投入器、光ファイバー：OF及び励起光集光レンズ系：FLから構成され、励起光源部から出力された励起光を光ファイバーを介して励起光集光レンズ系に伝送・入射する。励起光の光ファイバ投入器における光ファイバカップリング効率は70%であった。励起光集光レンズ系は励起光をリング共振器部のレーザー媒質ミラーの外面上に集光し、レーザー媒質を励起させるものである。レーザー媒質を確実に励起するためには集光によってレーザー媒質内に形成される円錐状励起領域の立体角（集光点から円錐状に広がる光束の内角と定義する）を正三角形リング光路を作る内角（60deg）以上にする必要がある（図8参照）。

5.3 特性実験と実験結果および考察

(1) リングレーザー発振の確認と出力光の波長測定

図16に示すORLG基礎実験全体系において、励起光

源を動作させ、光励起固体リングレーザーの発振を確認した。リング共振器部のM2から出力されたCW光及びCCW光の強度は同程度であることが目視で確認された。目視確認はCW光及びCCW光をそれぞれ白紙上に照射し、赤外線スコープにより、それらの光点を確認した。またCW光及びCCW光のスペクトルをファブリペロー干渉計を用いて測定した結果を図19に示す。同図の横軸は波長(nm)で、分解能0.05nmであり、縦軸は光強度比(dBm)を示す。測定結果から、それぞれのピーク波長は1063.90nmにあることが確認された。これにより、リング共振器部の出力光がLDによって励起されたNd-YAG結晶のリングレーザー発振光であることが確認された。

(2) リングレーザー出力強度の測定

リングレーザー出力CW光及びCCW光の強度をパワーメータで測定し、それぞれ5mWであり、安定している

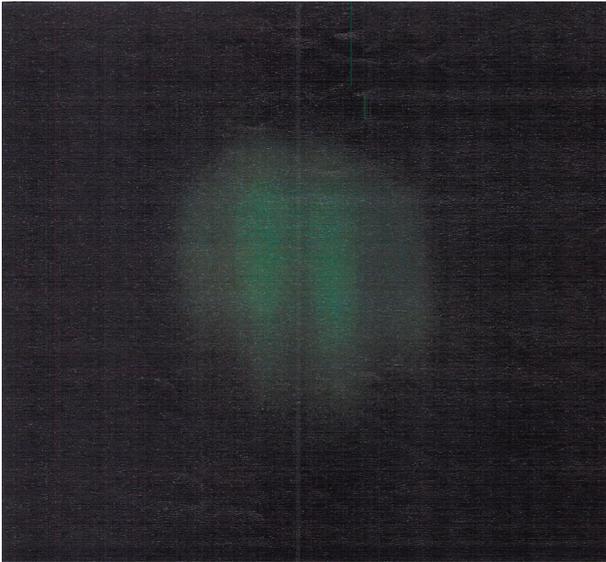


図 20 ORLG 出力光干渉縞の観測結果（静止時）

ことを確認した。

(3) 静止時の ORLG 出力干渉縞模様の観測

ORLG を静止した状態で、ORLG 出力の干渉縞模様を観測した。その観測結果を図 20 に示す。CW 光と CCW 光の鉞角が図 20 の場合より大きい時は干渉縞数が増加し、反対に鉞角を小さくすると、干渉縞数は減少することを確認した。

(4) 干渉縞模様の移動の観測

干渉縞模様の移動現象を電気信号に変換するとどのように観測できるかを確認するため、ORLG を静止状態にし、出力読出し部のミラー M5 を光路に対して垂直方向に手で微小変動させると、CW 光の光路長が CCW 光の光路長より微小に伸縮し、双方の光路長差が変化し、それにもなって干渉縞模様が移動する現象を創出し、その現象を電気信号として観測した。観測結果を図 21

に示す。(a) は入力角速度計測用 IMU の出力を示し、(b) は光信号検出器の出力を示す。横軸は時間（紙送り速度：10mm/秒）であり、縦軸は電圧である。(b) により、光信号検出部のスリット上を干渉縞模様が移動すると、スリットを通過した時に生じる光の強弱が電気信号の強弱信号（パルス状信号：干渉縞の暗い部分がスリットを通過すると光信号検出器の出力が低下する。）として観測できることが確認された。また (a) により、IMU 出力（4 度/秒/cm）は変化無しを示しており、静止状態にあることが確認できる。

(5) 回転時の干渉縞模様の観測

図 16 に示す ORLG 基礎実験全体構成において、ORLG の入出力特性を定性的に確認するため、ORLG を設置した回転台を回転させ、ORLG 出力、すなわち干渉縞模様の挙動を観測した。干渉縞模様の挙動は光検出器部の電気信号出力と入力角速度を示す慣性計測装置 (IMU) 出力をペンレコーダで記録した。その結果を図 22 および図 23 に示す。図 22 の (b) は入力角速度が最大で 1 度/秒程度に対する ORLG 出力、すなわち干渉縞模様（光信号検出器の出力）の観測結果を示す。また図 22 の (a) は IMU の出力を示す。横軸は時間（紙送り速度：5 mm/秒）を、縦軸はそれぞれ電圧を示す。図 22 から、ORLG が静止または入力角速度が 1 度/秒程度では干渉縞模様が移動したときに生じるパルス状の電気信号は観測されないことが確認できる。この現象は 2.3 項で述べた RLG 特有のロックインの出現によるものと考えられる。

図 23 の (b) は入力角速度を最大で 20 度/秒程度与えた場合の ORLG 出力（光信号検出器出力：AC 成分、500mV/cm）の観測結果を示す。また図 23 の (a) はその時の IMU 出力（500mV/cm：10 度/秒/cm 相当）を示す。横軸は時間（紙送り速度：10mm/秒）を、縦軸はそれ

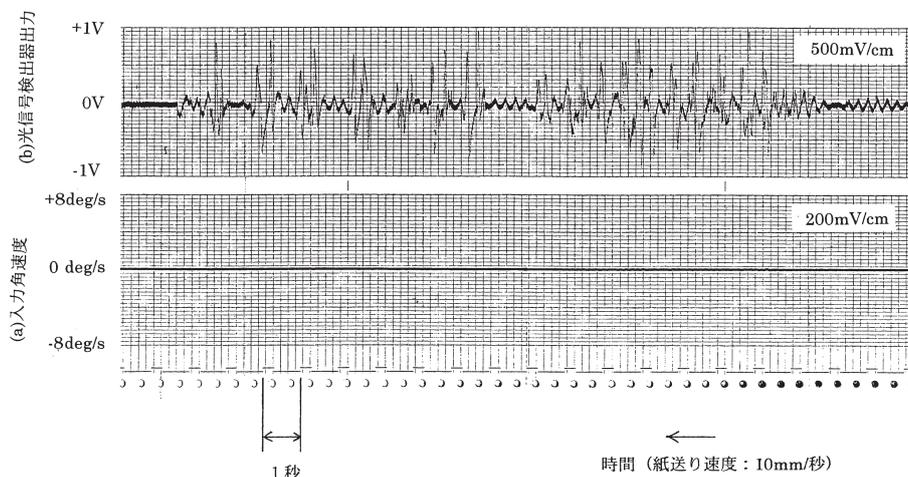


図 21 干渉縞移動による光信号の電気信号化

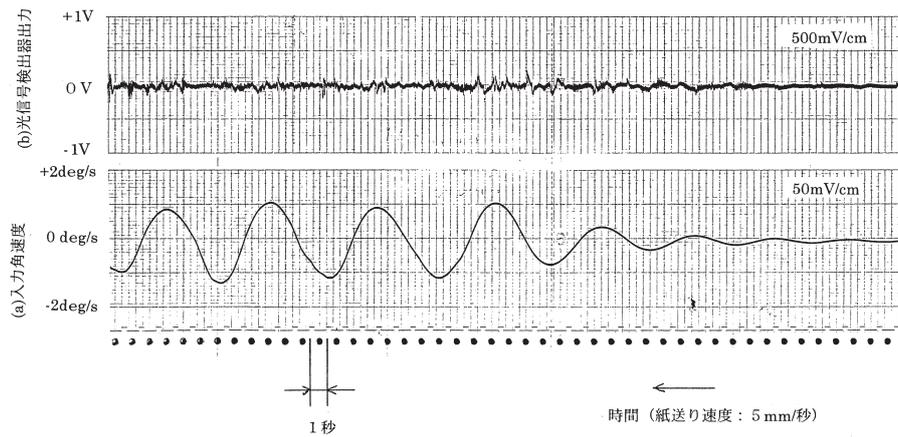


図 22 ORLG 出力干渉縞の観測結果 (微小角速度入力時)

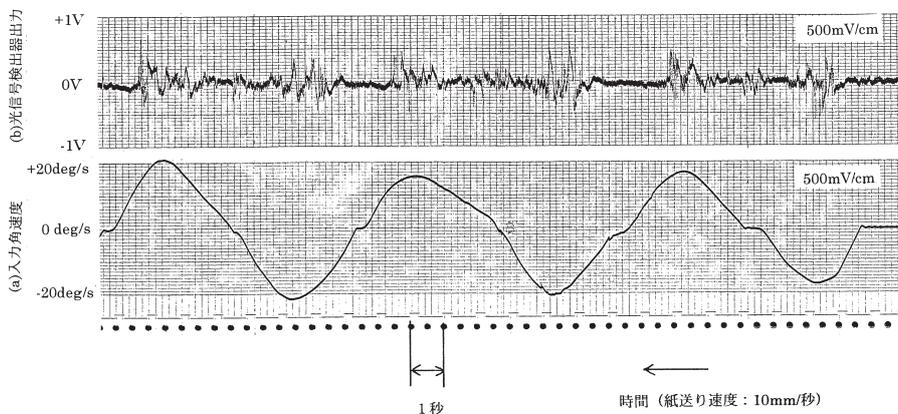


図 23 ORLG 出力干渉縞の観測結果 (最大 20 度/秒角速度入力時)

ぞれ電圧を示す。図 23 より、ORLG は入力角速度が 10 度/秒を越え、10 数度/秒の最大部分で干渉縞の移動による電気信号状の信号を出力していることが認められる。しかし、ORLG は静止状態から入力角速度が 10 数度/秒以下の範囲では干渉縞の移動による電気信号状の信号を出力していないことが確認できる。この現象は入力角速度が 10 数度/秒以下ではロックインが生じ、それ以上ではロックインが解除され、入力角速度に対応して干渉縞の移動が生じたものと考えられる。

ORLG は、第 2 章：動作原理で記述したように、リング共振器部の三角形閉光路が造る面に垂直な軸：入力軸 (図 16 に示す回転台の回転軸：ほぼ垂直軸と一致) まわりに回転すると、その回転に比例して CW 光と CCW 光に周波数差が生じる。この周波数差は CW 光と CCW 光の干渉によって生じる干渉縞模様の移動の速さとして観測される。したがって、図 23 に示した観測結果から、ORLG の動作原理は定性的に実証されたものと考えられる。

5.4 ORLG 試作・実験のまとめ

- (1) 固体レーザー媒質として Nd-YAG 結晶を使用した ORLG 基礎実験装置を試作し、LD 励起による光励
- (2) 発振したリングレーザーのスペクトルを観測し、そのピーク波長が 1063.9nm であることがわかり、Nd-YAG 結晶の放光 (波長 1064nm) によるレーザー発振であることが確認された。
- (3) 三角形リング共振器部を構成するミラーの一つを固体レーザー媒質で製作し、その外側面に垂直に励起光を照射する光励起方式はリング共振器内を双方向に伝播するレーザーの強度を同程度にできることが確認され、リング共振器部から出力されるそれぞれの光を干渉させるために有利であることが確認された。
- (4) ORLG を静止した状態で、出力読出し部の全反射ミラー M4 または M5 を CW または CCW 光の光路に対して垂直方向に手動させると双方の光路長差に変化が生じて、光干渉縞が移動し、角速度が入力されたような状態になることが確認された。この現象は、出力読出し部の CW と CCW 光の光路長差が機械的、熱的影響により変化した場合、ジャイロ出力誤差として現れることが判明した。
- (5) ORLG の角速度検出軸まわりの回転に対する CW 光と CCW 光の周波数差、すなわち ORLG 出力 (干

渉縞模様)の挙動観測の結果、入力角速度の大きさが10数度/秒以下ではロックインが生じて出力が得られず、それ以上ではロックインが解除され、入力角速度に対応して干渉縞の移動が確認され、ORLGの動作原理が定性的に実証された。

- (6) 本試作実験において試作したORLG実験装置は予算の関係上、十分な剛性を備えることができず、基盤に微振動が生じると、干渉縞が変動したため、入力角速度に対する干渉縞の挙動を十分正確に観測できない問題があった。したがって、今後、ORLGの動作原理や性能特性を定量的に評価するためには、ORLG出力、すなわち干渉縞がORLG構成要素間の変動やゆがみ等により変化しないように、リング共振器部と出力読み出し部を堅固な一体構成とした実験モデルを試作し、既知の入力角速度に対するORLG出力を定量的に測定し、評価・確認する必要がある。

6. あとがき

航空機の飛行制御システムやロケット等の宇宙機の誘導制御システムに使用する慣性航法装置等への適用をめざして、現状のHe-Neガス等を使用したリングレーザージャイロに替わる新型ジャイロとして、小型・高性能・高信頼性・低コスト性等が期待される光励起固体リングレーザージャイロ(ORLG)を考案し、その基礎研究を行った。基礎研究では、ORLGの動作原理を解明し、入出力式による伝播誤差の検討やORLG構成系の設計検討を行った。また光励起固体リングレーザーの試作・実験を行い、その結果に基づいてORLGの試作・実験を行い、試作したORLG基礎実験装置を使用した特性検証実験により、ORLGの動作原理を定性的に実証することができた。今後はORLGのより堅固で小型・精密な基礎実験モデルを試作し、入出力特性を定量的に検証・評価し、高性能化に関する課題を抽出するための基礎研究をさらに継続する必要がある。

最後に、光励起固体リングレーザー実験装置およびORLG基礎実験装置の試作にご協力いただいたネオアーク株式会社の小西泰司氏ならびに畠山重雄氏に対して深く感謝する次第である。

参考文献

- (1) 滝沢 実：飛行制御システムに用いる純光学式ジャイロの研究(その1)構成と原理、レーザー学会学術講演会第18回年次大会講演集(P.213)、1998.1.22-23.
- (2) 滝沢 実：光励起リングレーザージャイロ、特許公報(特許番号；特許第3041425号)、平成12年

5月15日発行.

- (3) 滝沢 実：一方向進行波リングレーザージャイロの研究(1)動作原理の提案と要素技術の研究、航空宇宙技術研究所報告TR-933、1987年5月.
- (4) 稲場文男、他編集：レーザーハンドブック、PP.579-581、朝倉書店、1973年2月.
- (5) 滝沢 実、小西泰司、畠山重雄：半導体レーザー励起Nd:YVO₄リングレーザーの実験的研究、レーザー学会学術講演会第18回年次大会講演集(P.44)、1998.1.22-23.
- (6) Anthony Lawrence：Modern Inertial Technology, Navigation, Guidance, and Control, Springer-Verlag(New York, Berlin, Tokyo, etc)、PP.199-215、1993.

宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA-RR-07-004

発行 平成 19年 12月 28日

編集・発行 宇宙航空研究開発機構

〒182-8522 東京都調布市深大寺東町 7-44-1

URL: <http://www.jaxa.jp/>

印刷・製本 弘久写真工業(株)

本書及び内容についてのお問い合わせは、下記にお願いいたします。

宇宙航空研究開発機構 情報システム部 研究開発情報センター

〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1

TEL: 029-868-2079 FAX: 029-868-2956

© 2007 宇宙航空研究開発機構

※ 本書の一部または全部を無断複写・転載・電子媒体等に加工することを禁じます。

