

平成18年度  
研究開発成果報告書

シームレスな位置情報検出を実現する  
高精度角速度センサチップの研究開発

委託先： (株)国際電気通信基礎技術研究所

平成19年4月

情報通信研究機構

# 平成18年度 研究開発成果報告書 (一般型)

「シームレスな位置情報検出を実現する高精度角速度センサチップの研究開発」

## 目 次

1	研究開発課題の背景	3
2	研究開発の全体計画	
2-1	研究開発課題の概要	4
2-2	研究開発目標	5
2-2-1	最終目標	5
2-2-2	中間目標	6
2-3	研究開発の年度別計画	8
3	研究開発体制	9
3-1	研究開発実施体制	9
4	研究開発実施状況	
4-1	角速度センサチップ最適設計理論の研究	10
4-1-1	序論	10
4-1-1-1	位置付け	10
4-1-1-2	研究方針	10
4-1-2	実施状況	10
4-1-3	達成状況	12
4-1-4	今後の課題	15
4-2	角速度センサチップ作製技術の研究開発	16
4-2-1	序論	16
4-2-1-1	位置付け	16
4-2-1-2	研究方針	16
4-2-2	実施状況	16
4-2-3	達成状況	17
4-2-4	今後の課題	20
4-3	角速度センサチップ制御技術の研究開発	21
4-3-1	序論	21
4-3-1-1	位置付け	21
4-3-1-2	研究方針	21
4-3-2	実施状況	21
4-3-3	達成状況	22
4-3-4	今後の課題	23
4-4	回転角速度検出技術の研究開発	23
4-4-1	序論	23

4-4-1-1	位置付け	23
4-4-1-2	研究方針	24
4-4-2	実施状況	24
4-4-3	達成状況	24
4-4-4	今後の課題	31
4-5	無線と慣性センサによるハイブリッド位置計測技術の研究開発	31
4-5-1	序論	31
4-5-1-1	位置付け	31
4-5-1-2	研究方針	31
4-5-2	実施状況	31
4-5-3	達成状況	32
4-5-4	今後の課題	33
4-6	総括	34

## 5 参考資料・参考文献

### 5-1 研究発表・講演等一覧

## 1 研究開発課題の背景

ユビキタスネットワーク社会を実現する上で、無線通信システムの重要性は今後ますます増大するものと考えられる。携帯電話、無線 LAN 等が広く普及し、その利便性が定着している現在、単に伝送速度を増大するだけではなく、利用者やアプリケーション側の視点に立ち、使い方が容易で柔軟性のある便利なサービスを付加することが無線システムに要求される次の機能として重要であることが指摘されている。このような観点から最も関心を集めているものの1つが位置情報である。位置情報の応用例として既に位置情報サービス(LBS: Location Based Service)がある。1990年代初頭のカーナビゲーションから始まった位置情報サービスは、携帯電話の普及とともに、天気予報、レストラン情報、交通情報、追跡等、その利用分野を急速に拡大している。

位置情報は、このように情報通信分野の新規事業を創出するばかりでなく、センサネットワーク、ユビキタスコンピューティング、コンテキストウェア情報サービスなど新たな研究領域を生み出すことも期待されている。たとえば、モバイル端末の現在位置を知ること、より動的に状況に応じたアプリケーションを構築することが可能となる。また、データの送信元や着信先の位置、あるいは伝播パスの情報は、情報通信のセキュリティを高める上で極めて重要である。さらに、分散制御を特徴とする無線アドホックネットワークにおいて、通信ルートの決定に位置情報は強力な手段となる。

現在、GPS など外部からの信号を利用して位置情報を得る方法があるが、この場合、電波を受信できないビル街、建物内、地下街等に入ると信号は遮断され位置情報が失われてしまう。したがって、このような状況下でいかにシームレスに位置情報を獲得するかが重要かつ急がれる技術課題となっている。すなわち、モバイル端末機器が外部信号に頼らず自律的に自らの位置を特定できるということが重要な課題である。

このような自律的位置情報検出は慣性センサと総称される加速度センサと回転角速度センサとを組み合わせることにより実現できることが知られている。加速度を2回積分することで位置が得られるが、加速度計の出力は重力加速度を含んでおり、角速度センサを使って水平基準を作り出し重力加速度成分を差し引くことで水平方向の加速度を得ている。また、方位を求めるためにも角速度センサが必要である。このように角速度センサでの誤差は加速度計の出力と合わせて2回積分されることで増幅されるので位置の誤差に重大な影響を及ぼす。このため、自律的位置情報検出のためには非常に高精度の角速度センサが必要である。そのような要求を満足する傑出した高精度の角速度センサとしては光ジャイロの1種である He-Ne レーザを用いたリングレーザジャイロが実用化されている。実際、現在の旅客航空機には位置特定のために He-Ne リングレーザジャイロが標準的に搭載されている。また、H2A ロケットや深海探査艇「うらしま」も He-Ne リングレーザジャイロによって自律的に得た位置情報に従って運行している。この他、船舶、潜水艦、戦闘機にも搭載されている。

このように He-Ne リングレーザジャイロは優れた性能を持つが、He-Ne 放電管に用いる特殊なガラスの加工や He-Ne リングレーザの制御が難しいため非常に高価であり、また最も小さなものでも3cm角の大きさであり、しかも大きな電源が必要であるので、PDA、携帯電話、ノート PC などのモバイル端末に組み込むことは不可能である。さらに消費電力が非常に高く、使用時のコストも非常に大きい。一方、マイクロマシニング技術などを用いた超小型の角速度センサも開発されているが、それらはリングレーザジャイロではなく機械振動式ジャイロであるため精度が低く、カメラの手振れ防止や姿勢制御程度の目的での使用が限界であり、携帯ナビとして機能するほど正確な位置情報検出に用いることは原理的に不可能である。したがって、He-Ne レーザ以外のレーザを用いた超小型でかつ高精度なリングレーザジャイロ方式の角速度センサチップの研究開発は、モバイル端末に搭載で

きる実用的な自律的位置情報検出デバイスを実現するために必要不可欠で、時宜を得ている。

ところで、たとえ He-Ne レーザのリングレーザジャイロを用いても長時間の使用で誤差が蓄積するので、自律的位置情報検出だけでは高い精度の位置情報を長時間に渡り提供することは不可能であることには注意が必要である。このため、GPS のような無線システムを用いる位置情報検出と慣性センサを用いる自律的位置情報検出とを組み合わせたハイブリッドの方法が必要不可欠である。これによって正確な位置情報がシームレスに獲得できるようになり、無線システムの占める割合がこれまで以上に大きくなるユビキタスネットワーク社会に極めて大きな影響を与える。また、地下街、地下鉄、トンネル及び地中工事現場等での災害救助、火災消火活動等の支援情報システムにも非常に有効であり、国民生活の安全確保に与える波及効果も極めて大きい。

また、携帯電話による緊急通報では位置情報検出が特に重要視されるようになりつつある。本研究開発成果は位置情報取得を可能にするほど高精度であるため、携帯電話による緊急通報に役立つことが期待される。実際、総務省は事業用電気通信設備規則を 2006 年 1 月に改正・公布し 2007 年 4 月に施行する。改正の大きな柱の一つが、携帯電話からの緊急通報機能を充実させることである。施行後に発売される 3G 端末は、原則として GPS モジュールの内蔵が義務付けられる。対応端末から 110 番/118 番/119 番へ緊急通報した際に、通報者の位置情報を GPS で測位し、警察・消防・海上保安本部に自動通知する仕組みを構築する予定である。しかし、通報者が十分な数の衛星を獲得できない場合 GPS での測位は不可能となるため、基地局位置程度の精度しか得られなくなる。このことは、上記規則の改正を検討した総務省の情報通信審議会情報通信技術分科会緊急通報機能等高度化委員会の「携帯電話からの緊急通報における発信者位置情報通知機能に係る技術的条件」についての報告書第 5 章「今後の課題」として大きく取り上げられている。したがって、GPS を補完する位置情報検出システムには大きな社会的ニーズがあり、高精度角速度センサチップがこのような役割を担うことが期待される。

## 2 研究開発の全体計画

### 2-1 研究開発課題の概要

GPS と異なり外部信号に頼らない自律的位置情報検出はデータの瞬断がなく安全を最重要視する航空機では標準的に用いられている方法である。これは加速度センサと高精度光ジャイロ角速度センサとを組み合わせることで実用化されている。しかし、モバイル端末に搭載できる超小型の高精度角速度センサは実現されていない。本研究開発は、モバイル端末でも航空機のように自律的位置情報検出が行えるようにするために、光ジャイロの原理を用いて超小型・高精度・安価な角速度センサチップを実現するものである。

リングレーザジャイロは、光速度不変の原理に基づくサニャック効果を応用したデバイスである。サニャック効果とは、閉じた光導波路が回転するとき時計回りの光と反時計回りの光では導波路を一周する時間が異なるというものである。つまり、時計・反時計回りの 2 つの光にとって導波路の実質的な長さが異なるということである。これは、たとえ動くものの上に置かれても、光の速度は変化しないからである。リングレーザジャイロは、この光路差をレーザ発振周波数の差として検出するものである。すなわち、閉じた光導波路にレーザ媒質が存在すれば、時計・反時計回りの 2 つの回転波モードでレーザ発振が起きるので、導波路が回転していると、サニャック効果により 2 つの発振モードの周波数が異なり差を生じることになる。この周波数差は上述の光路差と比例しているが、比例係数

にレーザ発振周波数が含まれており、この値は著しく大きいため、位相差を計測する比較的高精度なファイバオプティックジャイロに比べても圧倒的に高精度な測定が可能となる。

本研究開発では、従来1次元であった半導体レーザの形状を2次元的にすることによって、半導体レーザキャビティ内部にリング形状発振モードを形成する方法を用いる。この2次元レーザでは従来の1次元的なキャビティを用いたレーザと異なり、側面もミラーとなっており、He-Neリングレーザの場合と同様の方法でリングモードが形成される。このため、時計・反時計回りの光はよくコリメートされたビームとなる。

このように本研究開発で用いる半導体リングレーザは2次元形状のレーザキャビティ端面すべてがミラーの役割をするので、He-Neレーザのリングレーザと同じ原理でリングモードが形成され、2つの回転波の干渉縞を得ることができる。したがって、従来のHe-Neリングレーザジャイロと全く同じ原理により、超小型かつ高性能で、しかも安価な角速度センサを実現することができるのである。これを半導体マイクロマシニング技術等により小型・高性能化された加速度計と組み合わせることで、モバイル端末機器等の正確な自律的位置情報検出が可能となる。

ところで、この自律的位置情報検出だけでは誤差が蓄積するので、最終的には、無線システムを用いた位置情報検出と組み合わせたハイブリッドの方法によって、正確な位置情報をシームレスに提供する技術を研究開発しなければならないことには注意が必要である。このハイブリッドの方法は、モバイル端末への搭載ということまで問わなければ、本研究開発による超小型角速度センサチップの研究開発を待たずとも、自律的位置情報検出には既に実用化されている高精度の光ジャイロ等を用いることで、高精度な位置情報を与えるRTK-GPSによる方法と組み合わせたシームレスな位置情報検出技術として別途に研究開発することが可能である。

そこで、以下のように設定したサブテーマに沿って研究開発を進める。

- (1) 角速度センサチップ最適設計理論の研究
- (2) 角速度センサチップ作製技術の研究開発
- (3) 角速度センサチップ制御技術の研究開発
- (4) 回転角速度検出技術の研究開発
- (5) 無線と慣性センサによるハイブリッド位置計測技術の研究開発

## 2-2 研究開発目標

### 2-2-1 最終目標（平成21年3月末）

#### 2-2-1-1 角速度センサチップ最適設計理論の研究

- (1) 端面の2次元形状によりリングレーザを形成する半導体レーザを設計する。このレーザにおいて時計・反時計回りの2つの回転波モードが励起されていることが確認でき、しかもレーザ端面付近で干渉パターンを形成できるために、遠視野像において広がり幅 $10^{\circ}$ 以内のビームを実現する。
- (2) 分解能 $0.001^{\circ}$  /秒までの計測を可能とするために、時計・反時計回りの周波数差10Hzまで2つの回転波モード間の相互作用による引き込み現象を回避する技術を確立する。

#### 2-2-1-2 角速度センサチップ作製技術の研究開発

- (1) 波長 $860\mu\text{m}$ 、実効屈折率3.3のGaAs/AlGaAsを用いるので、端面の形状効果を完全に反映するように少なくともその3分の1以下の $85\text{nm}$ の精度で滑らかな2次元形状のキャビティを実現する。
- (2) 全端面がミラーとなるために、下部クラッド層の位置 $3\mu\text{m}$ よりも深い $4\mu\text{m}$ の垂直端面を有する単一量子井戸レーザを実現する。

#### 2-2-1-3 角速度センサチップ制御技術の研究開発

- (1) サニャック効果を実現するために、時計・反時計回り回転波モードのレーザ発振を実現する。モバイル端末に搭載可能な電源で動作するため、閾値電流密度 $140\text{A}/\text{cm}^2$ を実現する。
- (2) 室温連続発振の条件下でピンフォトダイオードを用いて干渉縞の変化の観測を可能とするため、 $1\mu\text{m}$ 間隔の規則正しい干渉縞の形成を実現する。

#### 2-2-1-4 回転角速度検出技術の研究開発

- (1) 素子の回転角速度に比例する干渉縞の移動によって回転角速度を検出する。従来のCD、DVD、レーザプリンタ用の半導体レーザチップパッケージと全く同様に小型で扱いやすいものとするために、半導体レーザと受光素子を高さ $2\text{mm}$ 、直径 $5.6\text{mm}$ のCANパッケージ内に収めた光ジャイロ角速度センサを実現する。
- (2) 自律的位置検出に十分な精度の角速度計測を実現する。位置精度誤差 $1\text{mm}/\text{秒}$ のためにバイアス安定性 $0.0001^\circ/\text{秒}$ を実現する。
- (3) CANパッケージ内に収めるために、半導体レーザの長さを $600\mu\text{m}$ 程度にする。

#### 2-2-1-5 無線と慣性センサによるハイブリッド位置計測技術の研究開発

無線としてRTK-GPS、慣性センサとしてHe-Neリングレーザジャイロを用いる条件下で、データ更新時間 $10\text{ms}$ 、位置精度 $2.5\text{cm}$ を実現する。

### 2-2-2 中間目標（平成19年1月末）

#### 2-2-2-1 角速度センサチップ最適設計理論の研究

- (1) 端面の2次元形状によりリングレーザを形成する半導体レーザを設計する。このレーザにおいて時計・反時計回りの2つの回転波モードが励起されていることを確認でき、しかもレーザ端面付近で干渉パターンをある程度形成できるために、遠視野像においてビーム広がり幅 $15^\circ$ 以内のビームクオリティを実現する。
- (2) 角速度分解能 $1^\circ/\text{秒}$ までの計測を可能とするために、時計・反時計回りの周波数差 $100\text{Hz}$ まで2つの回転波モード間の相互作用による引き込み現象を回避する技術を開発する。

#### 2-2-2-2 角速度センサチップ作製技術の研究開発

- (1) 波長 $860\mu\text{m}$ 、実効屈折率3.3のGaAs/AlGaAsを用いるので、端面の形状効果を反映するように少なくともその3分の1に近い $100\text{nm}$ の精度で滑らかな2次元形状のキャビティを実現する。
- (2) 全端面をミラーとすることを可能とするために活性層よりも深い $2.5\mu\text{m}$ の垂直端

面を有する単一量子井戸レーザを実現する。

#### 2-2-2-3 角速度センサチップ制御技術の研究開発

- (1) 室温連続発振を可能とするレーザ発振の閾値電流密度  $200\text{A}/\text{cm}^2$  を実現する。
- (2) マイクロレンズを通してピンフォトダイオードで干渉縞の変化の観測を可能とするため  $1\sim 2\ \mu\text{m}$  間隔の規則正しい干渉縞の形成を実現する。

#### 2-2-2-4 回転角速度検出技術の研究開発

- (1) レーザの回転角速度に比例する干渉縞の移動によって回転角速度を検出する。半導体レーザ、マイクロレンズ、2チャンネル光検出器を組み合わせた光ジャイロ角速度センサを実現する。
- (2) 位置精度誤差  $5\text{cm}/\text{秒}$  のために、バイアス安定性  $0.1^\circ/\text{秒}$  を実現する。

#### 2-2-2-5 無線と慣性センサによるハイブリッド位置計測技術の研究開発

無線としてRTK-GPS、慣性センサとしてファイバオプティックジャイロを用いる条件下で、データ更新時間 $15\text{ms}$ 、位置精度 $4\text{cm}$ を実現する。

## 2-3 研究開発の年度別計画

金額は非公表

研究開発項目	16年度	17年度	18年度	19年度	20年度	計	備考
シームレスな位置情報検出を実現する高精度角速度センサチップの研究開発							
(1) 角速度センサチップ最適設計理論の研究	—	—	—	—	—	—	
(2) 角速度センサチップ作製技術の研究開発	—	—	—	—	—	—	
(3) 角速度センサチップ制御技術の研究開発	—	—	—	—	—	—	
(4) 回転角速度検出技術の研究開発	—	—	—	—	—	—	
(5) 無線と慣性センサによるハイブリッド位置計測技術の研究開発	—	—	—	—	—	—	
間接経費	—	—	—	—	—	—	
合計	—	—	—	—	—	—	

注) 1 経費は研究開発項目毎に消費税を含めた額で計上。また、間接経費は直接経費の30%を上限として計上(消費税を含む)。

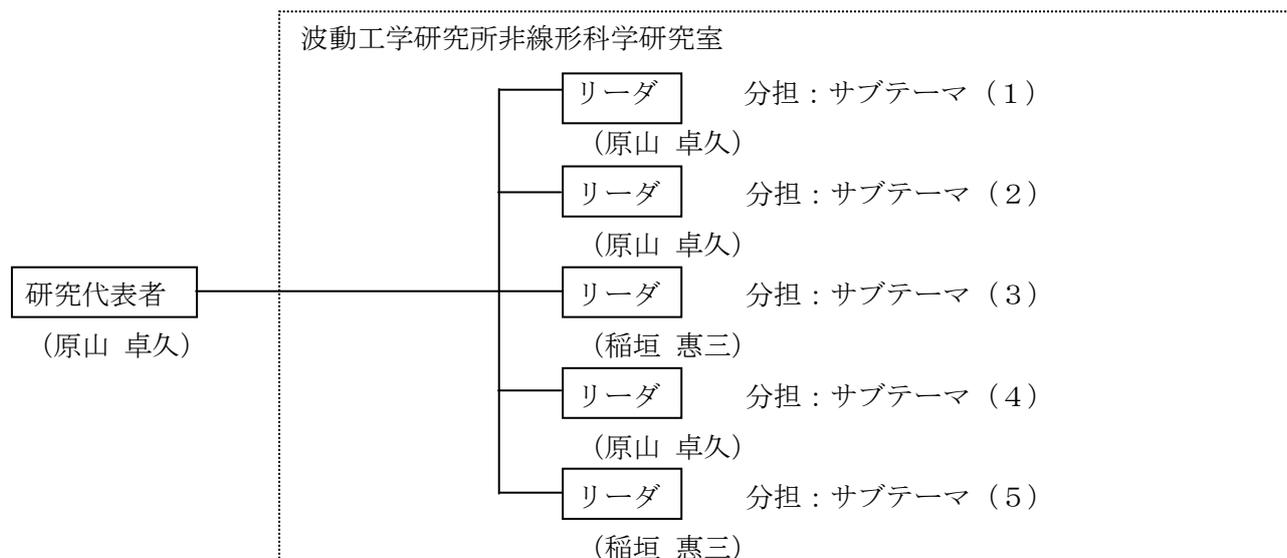
2 備考欄に再委託先機関名を記載

3 年度の欄は研究開発期間の当初年度から記載。

### 3 研究開発体制

#### 3-1 研究開発実施体制

(研究分担者の体制)



- 注) サブテーマ (1) 角速度センサチップ最適設計理論の研究  
サブテーマ (2) 角速度センサチップ作製技術の研究開発  
サブテーマ (3) 角速度センサチップ制御技術の研究開発  
サブテーマ (4) 回転角速度検出技術の研究開発  
サブテーマ (5) 無線と慣性センサによるハイブリッド位置計測技術の研究開発

## 4 研究開発実施状況

現在 He-Ne レーザを用いて実用化されている光ジャイロは正確な自律的位置情報検出に必要な回転角速度計測を十分な精度で達成できる唯一の角速度センサである。これはリングレーザジャイロの原理を用いており、他の方法を用いた角速度センサでこのような高い性能を得ることは原理的に不可能である。本研究開発は、He-Ne レーザを用いたリングレーザジャイロと全く同じ原理を用いて、モバイル端末に搭載可能なほど超小型で高性能かつ安価な角速度センサチップを実現するものである。

以下のようにサブテーマを設定しており、実施内容をサブテーマ毎に説明する。

### サブテーマ

- (1) 角速度センサチップ最適設計理論の研究
- (2) 角速度センサチップ作製技術の研究開発
- (3) 角速度センサチップ制御技術の研究開発
- (4) 回転角速度検出技術の研究開発
- (5) 無線と慣性センサによるハイブリッド位置計測技術の研究開発

### 4-1 角速度センサチップ最適設計理論の研究

#### 4-1-1 序論

##### 4-1-1-1 位置付け

本研究開発では、従来1次元であるレーザキャビティの形状を2次元にすることで自由空間に出てもビームが広がらないようなリングレーザを形成するので、新しい2次元レーザに関する基礎理論が必要である。また、角速度センサとしての性能向上のためには、2つの回転波モードの引き込みによるロックイン現象の回避など、光と物質の相互作用を取り入れた2次元レーザの非線形動力学理論の構築も重要である。これらの設計理論が本研究開発の角速度センサチップに関する理論的基盤を与える。

##### 4-1-1-2 研究方針

キャビティの2次元形状を適切に設計することが最も重要である。キャビティ内部でリング状の発振モードを実現し自由空間でも広がらない高いビームクオリティが得られるようなキャビティを目指す。これにより、時計回りと反時計回りの2つの回転波モードがレーザキャビティから2つのビームとして出射し明確な干渉縞を形成できる。

ところで、2つの回転波モードはレーザ媒質を介して非線形に相互作用を及ぼし、ロックイン現象を生じることがあることが知られている。このロックインが起きると2つのモードの周波数差が失われ、角速度センサの分解能が低下する。したがってこのロックイン現象を出来る限り抑制することが重要である。

#### 4-1-2 実施状況

従来1次元であった半導体レーザのキャビティ形状を2次元にすることによって、光

軸合わせ等の困難な作業なしに2次元レーザ内部に自動的にリングレーザが形成できることが本研究開発の重要なポイントである。また時計回りのビームと反時計回りのビームがレーザキャビティから自由空間に出射したときに大きく広がることなく規則正しい干渉パターンを作ることも重要である。しかし、2次元形状を有するレーザキャビティは、これまでこのような観点からは研究されていないため、新しい2次元レーザに関する基礎理論が必要である。16年度、17年度でこれらの基礎理論が確立できたので、18年度はこれらを応用しリングレーザジャイロの解析に進展させることを目指した。

また、光と物質の相互作用を取り入れた2次元レーザの非線形動力学基礎理論を17年度に構築できたので、18年度はこれを回転する系に応用した。

我々は、1次元的なレーザキャビティ解析の最も実用的な方法の1つとして知られているFox-Liの方法を2次元的なレーザキャビティに拡張する方法を確立し、平成16年度にはその数値解析プログラムを作成した。17年度では、これを用いて2次元的なキャビティモードを解析し、ビームクオリティの高い回転波をキャビティ内部に発生するようにキャビティ形状を設計した。ここで、この拡張Fox-Liモード解析法は、キャビティが細長く、波長に比べて素子サイズが十分大きいとき有効となる近似を用いていることには注意を要する。このような近似が成り立ち、キャビティ内部に自然とリングレーザが形成されるようなキャビティ形状を高い精度で設計できるようになった。さらに、18年度では、そのような近似が成り立たない場合に関してもキャビティモードを解析できるようにするため、安定な周期軌道に関連するガウシアンビームよりキャビティモードを構成する計算方法を確立した。特に、時計・反時計回りのビート信号を出力しないデッドバンドの領域を狭くし、ジャイロ機能を向上させるためには、キャビティ形状の対称性がキーポイントになることが17年度に得られたキャビティサニャック効果理論の成果として明らかになっているため、18年度重点的に調べるべきキャビティ形状がFox-Liのモード解析法で扱えないものも多く、新しい解析方法の確立が重要となりつつある。

また、従来は閉じたキャビティに用いられる境界要素法を、屈折率変化により光を閉じ込めるタイプの開いたキャビティに拡張することで、任意の2次元形状キャビティの共鳴モードを求めることもできる。17年度、この解析プログラムを作成したので、18年度はこれを用いてFox-Liのモード解析法で扱えないものを解析することも計画している。この方法は全く近似を用いないため非常に精度は高いが、波長に比べて素子が大きい場合には計算に膨大な時間を必要とする。電流注入素子では、電極を波長オーダー（キャビティ内部での波長約 $0.25\mu\text{m}$ の数倍）のサイズまで小さくすることが困難であるため、素子サイズは波長の数百倍になってしまい、拡張された境界要素法によるモード解析には適していない。一方、モードの詳細な振る舞いを調べる際には、この境界要素法による正確なモード解析は必須である。したがって、小さなサイズの素子に関して境界要素法により詳しく解析し、実際のデバイス設計には新しい解析法を用いるのが適切であると考えられる。

また、ロックイン現象について解析するため、キャビティモード間相互作用による非線形動力学理論を回転するレーザキャビティに適用することが重要となる。平成17年度に複雑なモード間相互作用は、線形モードによる展開を用いないMaxwell-Bloch方程式によるモードダイナミクス解析プログラムを作成し、モード展開だけでは説明できない複雑な相互作用を明らかにした。さらに、光の非常に速いキャリア振動までシミュレーションを行うと正確ではあるが膨大な時間を要するため、速い振動成分を取り除く近似を用いて、Maxwell方程式をSchroedinger方程式のタイプのものに変形することでより高速なシミュレーションを行えるようになったので、18年度はこれらの方法を回転するレーザキャビティに適用した。

ところで、平成17年度に構築した回転する系に一般相対論的效果を取り入れた理論により、2次元キャビティにおけるサニャック効果ではレーザ媒質による非線形効果なしで

もロックインが生じることが明らかになった。そこで、キャビティ形状を特別なものに工夫する必要が生じてきた。このように、線形理論の範囲においてジャイロ性能を最大にする最適な形状を明らかにした。

### 4-1-3 達成状況

リングレーザを回転してもサニャック効果の起きない低角速度領域が存在することは知られており、この領域とそのような現象はそれぞれデッドバンド、ロックインと呼ばれ、ジャイロ性能を決定する最も重要な要因と考えられている。しかし、従来、ロックインの原因は、レーザ媒質を介した時計・反時計回りのモードの非線形相互作用による周波数ロックであると考えられてきた。この新しい理論的な結果により、レーザ媒質の存在しないような空のキャビティ、つまり線形理論の範囲においても、ロックインが生じることが明らかになった。そして、デッドバンドを低減するためには、近縮退をなるべく縮退に近づけるようにキャビティ形状を工夫する必要があることがわかった。これは、2次元マイクロキャビティを用いたリングレーザジャイロチップの設計の重要な指針となる。

具体的なチップ形状設計方法として、 $C_{nv}$  ( $n > 2$ ) の対称性を持つキャビティでは必ず縮退した共鳴モードが存在することを群の表現論により導いた。もちろん、円のように連続的な対称性を持つ場合には明らかに縮退した共鳴モードが存在するが、方向性結合器など信号を取り出すための何らかの素子が配置され、このような素子は少なくとも光場の境界条件に影響を及ぼすため、測定まで含めて考えた場合には、キャビティが連続的な対称性を持つことはできない。したがって、離散的な対称性を持ち、しかも、縮退した共鳴モードを持つという点で、 $C_{nv}$  の対称性が最も有効な形状である。

例えば、 $C_{3v}$  の対称性を持つ図4-1のようなキャビティについて考える。

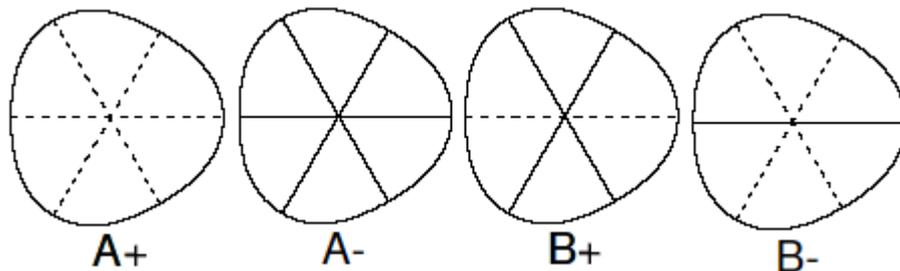


図4-1.  $C_{3v}$  の対称性を持つキャビティと固有関数の対称性

対称性により固有関数は図4-1に示すような4つの種類に分類される。ここで固有関数は、点線に関して偶関数であり、実線に関して奇関数である。このとき、B+とB-に属する共鳴モードは縮退し、図4-2(a)と(b)のようになる。

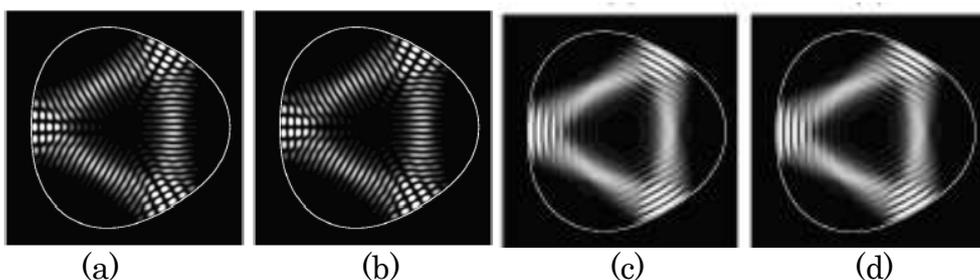


図4-2. 縮退した共鳴モード。それぞれ (a) B+(b)B-に属する。

キャビティが回転すると (c) CW (d) CCW モードに分裂する。

このとき、このキャビティを回転すると、図4-3に示すように、 $C_{2v}$  の Quadrupole キャビティの場合と異なり、すぐに Sagnac 効果が現れ、固有関数も図4-2(c)と(d)のように回転波に変化する。つまり、ロックインの領域は全く存在しない。

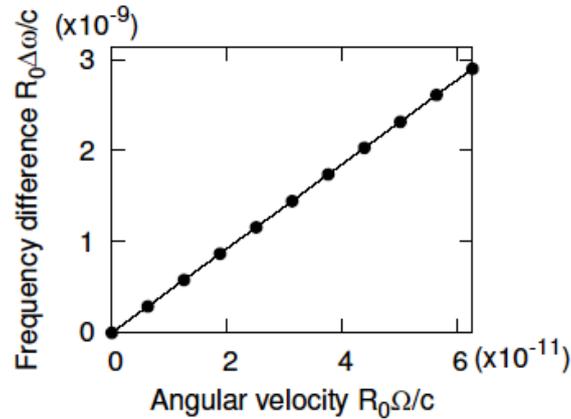


図4-3. ロックインの全くないレーザジャイロ動作。

$C_{4v}$  の対称性を持つ場合でも図4-4(a)と(b)に示すような縮退した2つの共鳴モードが存在する。このキャビティを少しでも回転したときには、これら2つの共鳴モードは図4-5のような回転波モードとなり、図4-6に示すようにロックイン領域なしで Sagnac 効果が現れる。

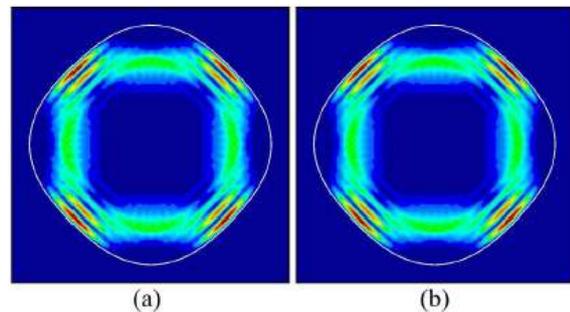
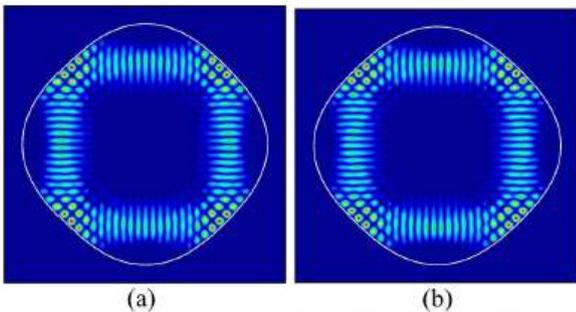


図4-4.  $C_{4v}$  キャビティの縮退モード

図4-5. キャビティ回転時における共鳴モード (a) CW (b) CCW

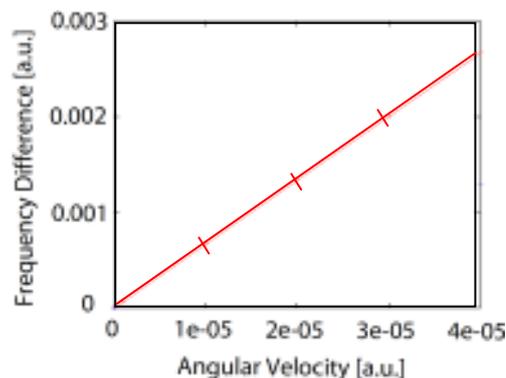


図4-6.  $C_{4v}$  の対称性を持つキャビティを用いたロックインなしのジャイロ動作。

次に、光と物質の相互作用を回転するリングレーザに取り入れた理論と数値計算及び対応する実験について報告する。

回転するリング形状の光共振器に一般相対性理論を適用して以下の非慣性系におけるマクスウェル方程式を得る。

$$\left( \frac{\partial^2}{\partial s^2} - \frac{n(s)^2}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) E(s) + 2 \frac{R\Omega}{c} \frac{\partial^2}{\partial t \partial s} E(s) = 2\beta(s) \frac{\partial}{\partial t} E(s) + 4\pi N(s) \kappa \hbar \frac{\partial^2}{\partial t^2} \rho(s), \quad (1)$$

ここで、光はリングの導波路に沿って1次元的に伝搬するものと仮定し、光導波路上の変位  $s$  での電場を  $E(s)$  とする。また、 $n(s)$ 、 $R$ 、 $\Omega$  はそれぞれ導波路の屈折率、リングの半径、回転角速度を表す。また、あらゆる吸収を  $\beta(s)$  で表す。右辺第2項は、分極を表し、この項を通して電場がレーザ媒質と相互作用する。ここで、 $N(s)$ 、 $\kappa$ 、 $\rho(s)$  はそれぞれ原子数密度、相互作用強度、ミクロの分極を表す。

レーザ媒質は2準位系から成ると仮定すると、そのダイナミクスは以下の光学ブロッホ方程式により記述される。

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho(s) = -i\omega_0 \rho(s) - i\kappa W(s) E(s) - \gamma_{\perp} \rho(s), \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} W(s) = -2i\kappa E(s) (\rho(s) - \rho(s)^*) - \gamma_{\parallel} (W(s) - W_{\infty}), \quad (3)$$

ここで、 $W$  は反転分布を表し、2つの緩和パラメータ  $\gamma_{\perp}$  と  $\gamma_{\parallel}$  はそれぞれ横緩和、縦緩和を表す。

従来のリングレーザジャイロ理論ではアクティブなレーザ媒質はキャビティ全体に存在していることを仮定している。このような設定の下では、モード競合によって時計・反時計回りのどちらか一方の回転波しか存在できないことが、モード展開と摂動論によって示すことができる。しかし、半導体光増幅器と光ファイバを組み合わせたリングレーザを用いるS-FOGでは、レーザ媒質部分と光導波路部分は一貫していない。そして、S-FOGがジャイロとして機能していることは、時計・反時計回りの両方向回転波が共存できていることを示している。このことから、レーザ媒質がキャビティ全体に存在していないことが時計・反時計回りの両方向回転波が共存できる理由であると推測される。また、反転分布の空間分布は流れ込む電子による揺らぎの影響を受け、このような揺らぎの効果も時計・反時計回りの両方向回転波の共存を可能にすると考えられる。

これらの効果を考慮して、式(1)~(3)に従う電場の時間発展の数値計算結果を図4-7に示す。図4-7より時計・反時計回りの両方向回転波が共存できることがわかる。レーザ媒質部分を全導波路と一致させたり、反転分布から揺らぎの効果を取り除いたりすると、このような両方向回転波は共存できないことを確認している。

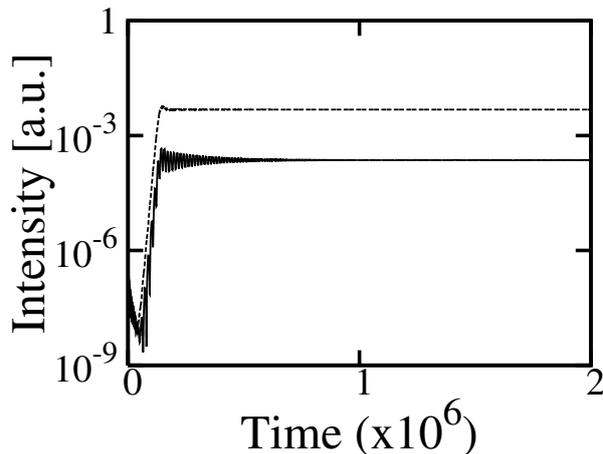


図4-7. リングレーザの動力学。破線の反時計回りモードは実線の時計回りモードよりも強度が大きい。両者は共存して安定発振状態となっている。

図4-7における安定発振状態における時計回りモードのみの時間発展から得られたパワースペクトルを図4-8に示す。ピークは回転角速度に比例するサニャックビート周波数の理論値に一致する。ここで、このパワースペクトルが時計・反時計回りの2つの回転波を合波したものではなく、片方回転の光だけから得られていることは大変重要である。これは、位相情報に現れるサニャック効果がレーザ媒質による非線形効果によって振幅情報に変換されていることを示している。このように、合波しなくともサニャック効果が得られることを実験的に確かめているが、これについては4-4で詳述する。

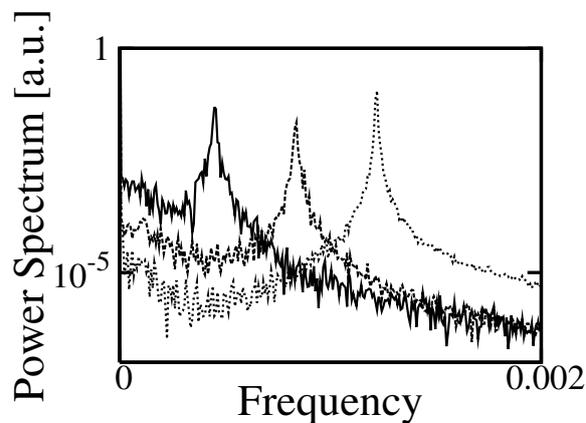


図4-8. 時計回りモードのみの時間発展から得られたパワースペクトル。片方回転波の振幅の変化にサニャックビートが現れている。  
 $\Omega = 2$  (実線),  $4$  (破線),  $6$  (点線)

達成度：100%

#### 4-1-4 今後の課題

マイクロキャビティにおけるサニャック効果理論により最適な形状の設計指針が得られた。また、半導体をレーザ媒質として用いてもリングレーザジャイロが機能することが理論的にも明らかになった。さらに、安定な光線軌道を用いて共鳴波動関数を解析することも可能になったので、今後はこれらの理論的な結果を統合し、チップを用いてレーザジャイロを実現するための設計理論を構築することが最も重要である。

## 4-2 角速度センサチップ作製技術の研究開発

### 4-2-1 序論

#### 4-2-1-1 位置付け

2次元形状のレーザキャビティを半導体単一量子井戸構造により微小素子として作製する技術を確立する。

#### 4-2-1-2 研究方針

エピウエハ作製からレーザ作製プロセスまでを行い、評価結果を設計や作製プロセスにフィードバックするということを繰り返し、よりよい光ジャイロとする。安価となるように大量生産を念頭に置いた作製工程を考えることが重要である。また安価な実装技術を開発することも大切である。

### 4-2-2 実施状況

2次元形状のレーザキャビティを安定に作製する技術を確立する。MBE装置により作製したGaAs/AlGaAsダブルヘテロ接合型単一量子井戸レーザエピウエハに対してRIE装置を用いてドライエッチングすることによって任意の2次元形状のレーザキャビティに加工する。2次元形状パターンの描画は電子線露光装置を用いる。電極やコンタクトのパターン描画も同様である。これらのパターンは、最終的な実用化段階においてはステップによる描画を用いるべきである。しかし、レーザジャイロとして最適なキャビティ形状が確定していない段階では様々な形状のキャビティを作製して評価するというフィードバックが必要であり、ステップを用いる場合レチクル作製に時間を要しそのようなフィードバックを加速することができない。つまり、作製された素子の性能を評価し、その結果を設計と作製へ素早くフィードバックするという観点からは電子線描画も重要であると考えられる。平成16年度に立ち上げた技術を発展させ、様々な構造のエピウエハに対して、ドライエッチングした端面の垂直性と滑らかさを両立できるようなガス組成や温度等の条件が17年度にかなり解明された。そこで、18年度は、これらの条件をさらに詳しく追求し、任意の形状に関してより垂直で滑らかな端面を実現できるように詳細に研究した。

また、リングレーザモードを発振させるためには、このモードのみを励起するように電流を注入する必要がある。しかし、電極形状をこのようなモードパターンにすると後のワイヤボンディング等のプロセスが困難になるため、電極はキャビティ形状と同じ形にする方がよい。そこで、まずエピウエハ表面にSiO<sub>2</sub>の絶縁膜を形成し、次にドライエッチングによってSiO<sub>2</sub>の絶縁膜に所望の2次元モードパターンのコンタクト窓を開け、コンタクト窓の開いたSiO<sub>2</sub>の絶縁膜の上に電極パターンを蒸着する。ここで、レーザキャビティの形状をドライエッチングで切り出す際には、SiO<sub>2</sub>膜をドライエッチングでキャビティ形状に切り出したものをマスクパターンとする方がよいと考えられる。このように、ドライエッチングはエピウエハだけでなくSiO<sub>2</sub>膜にも行う必要があり2つの異なる材料に対するドライエッチング技術の確立が必要である。これらの技術は17年度にほぼ確立されたが、コンタクト層における電流広がりにより、完全に所望のモードだけを励起することは容易でないことがわかったので、コンタクトの窓形状と大きさを様々に振ったり、さらにはコンタクト層も2次元モードパターンとしたりといった工夫により、より正確にターゲットモードのみをレーザ発振できることを目指した。

また安価となるように大量生産を念頭に置いた作製工程を検討することも重要である。特にステップを用いてパターンをエピウエハ上に転写する場合には、レーザパターン、コンタクトパターン、電極パターンなど、複数のパターンを位置がずれることなく転写できる方法を確立することが重要である。これらの技術も17年度ほぼ確立されたが、さらに

上述の電子線露光の場合と同様に、18年度は、コンタクト窓形状、窓サイズ、コンタクト層除去プロセスの確立を目指した。

#### 4-2-3 達成状況

ドライエッチングに用いるガス組成及びエッチング圧力を工夫することで、電子線露光装置とステッパの2つの方法のどちらの場合にも全作製プロセス終了後で100nm以下の滑らかさで垂直なエッチング端面を形成することに成功した。作製した2次元レーザの典型的な例として、擬似スタジアム型レーザに関する端面の電子顕微鏡写真を図4-9に示す。P電極中心付近の窪んでいる部分は絶縁膜を除去した部分に相当し、この部分のみから電流が注入される。長軸方向の両端面は、平坦ではなく、曲面となっている。さらに、短軸方向には平坦な端面が形成されている。これらドライエッチングにより作製された4

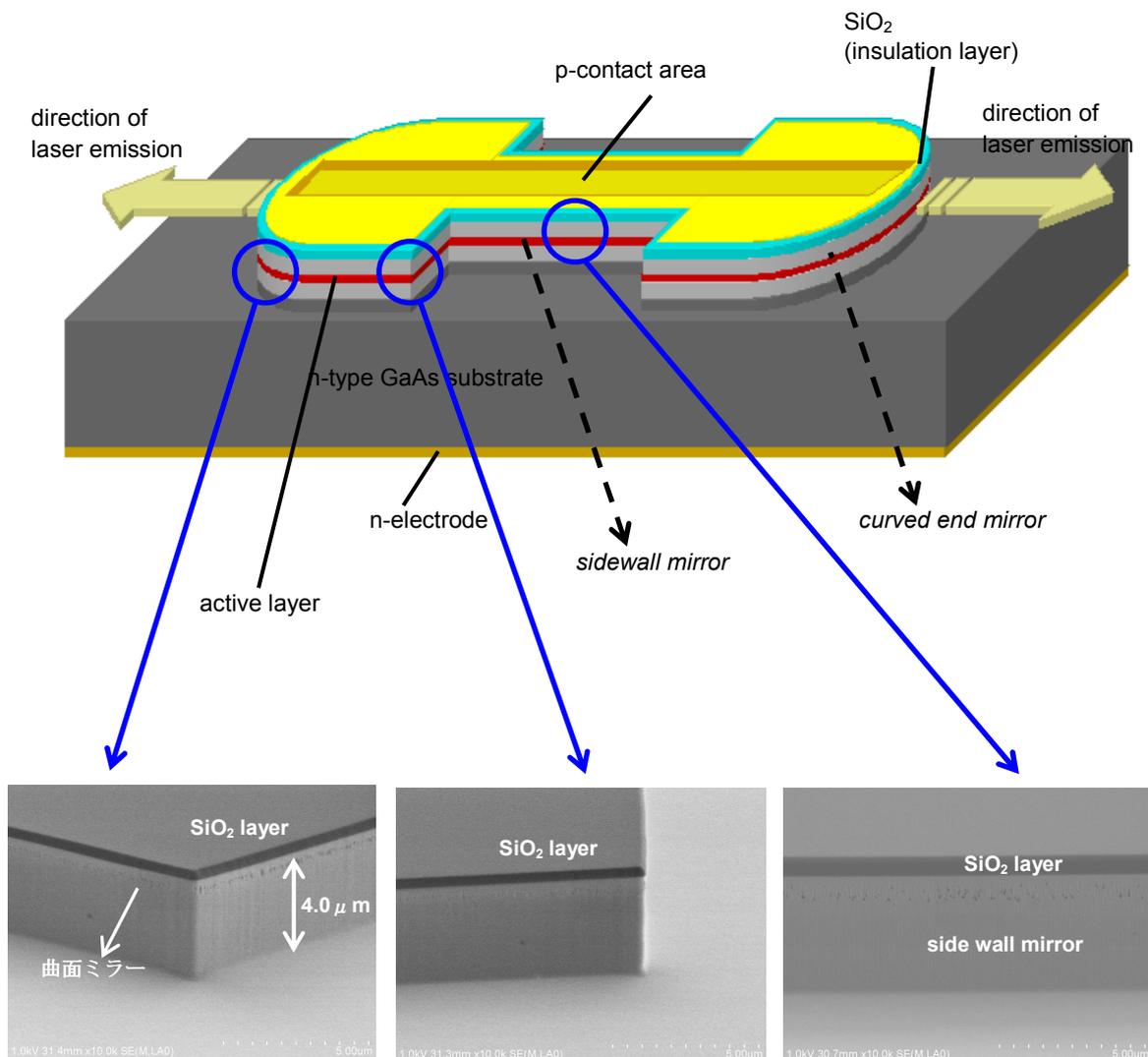


図4-9 擬似スタジアムレーザの端面電子顕微鏡写真

つの端面をミラーとして利用することで、2次元的な広がりを持つレーザ発振パターンが可能となる。

また、エッチング端面の評価として、へき開によって形成されるミラーとドライエッチングによって形成されるミラーのレーザ発振閾値を比較した。同じ組成のエピウエハを用いて作製した共振器長500μm幅5μmのストライプレーザでは、へき開とドライエッチ

ングによる素子は共に閾値が 152mA であり、両者に遜色がないことが確認できた。

さらに、 $\text{SiO}_2$  の絶縁膜にドライエッチングによりコンタクト窓を開けることで、所望のモードパターンだけを励起することに成功した。レーザパターン、コンタクトパターン、電極パターンの位置ずれは、電子線直接描画、ステッパのいずれを用いる場合でも  $3\mu\text{m}$  以下に抑えることができた。1 次元的なレーザキャビティ解析の最も実用的な方法の一つとして知られている Fox-Li の方法を 2 次元的なレーザキャビティに拡張する方法を確立し、その数値解析プログラムを作成した。これを用いて 2 次元的なキャビティモードを解析し、図 4-10 に示すようにビームクオリティの高い回転波のリングレーザがキャビティ内部に自然と形成されるようなキャビティ形状が設計できる。

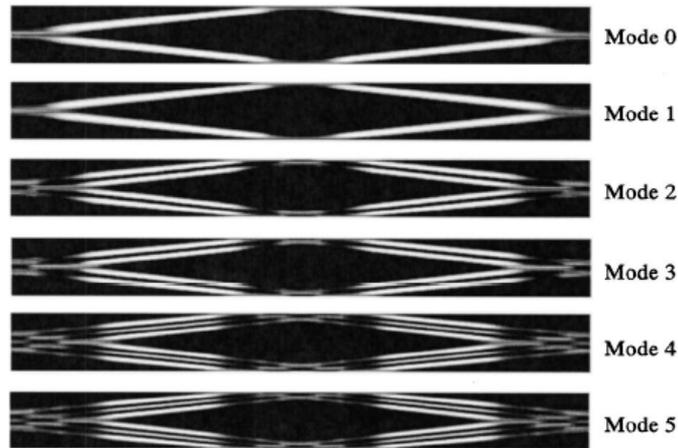


図 4-10. リング軌道モード

図 4-10 におけるモードに付与された番号は、キャビティ端における損失の大きさを表している。すなわち、Mode0 が最も損失が低く、番号が大きくなるに従い、損失が大きくなる。Mode0 はガウシアンビームがリングの周期軌道上に局在しており、キャビティ外部に出射してもやはりガウシアンビームのままであるため、ビームクオリティが非常によく、図 4-11 に示すように遠視野像における光強度のピークの半値幅は  $2.9^\circ$  であり、全広がり幅でも  $10^\circ$  となっている。

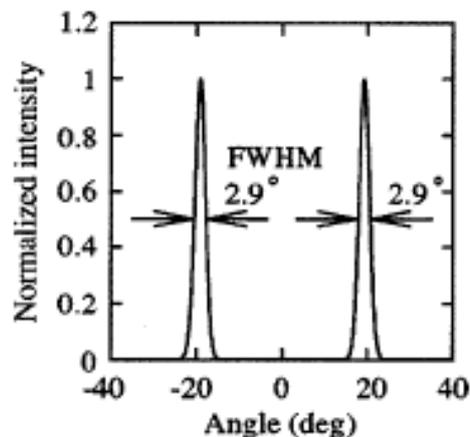
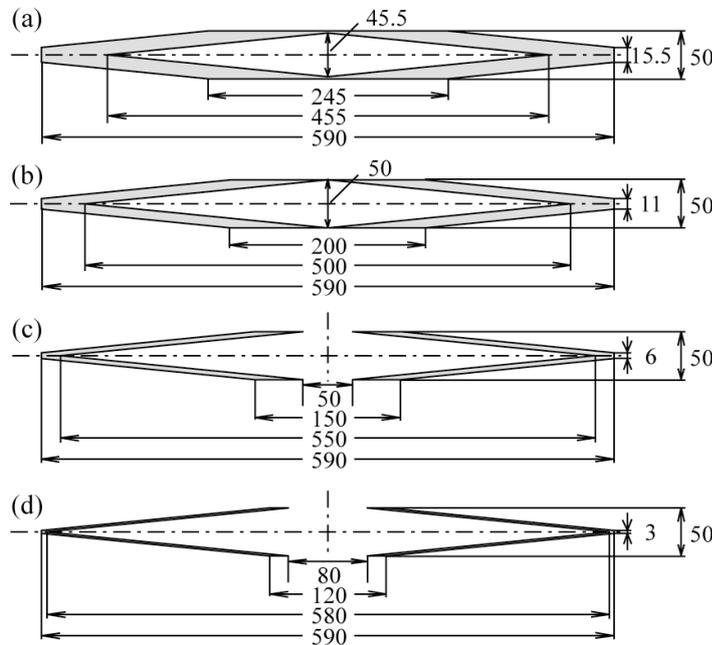


図 4-11. Mode0 の遠視野像

ビームクオリティのよいリング軌道モードのレーザ発振特性を活かすためには、Mode0 以外のリング軌道モードや長軸方向に局在する軸モードをレーザ発振させることなく、Mode0 のみをレーザ発振させる必要がある。軸モードはリング軌道モードよりも損失が低く、また、リング軌道モードの高次モードはモードボリュームが大きく利得を得やすい。

このため、このキャビティに一様な電流注入を行うと、Mode0 以外のモードもレーザ発振してしまう。そこで、Mode0 が十分な利得を確保でき、しかも他のモードには利得が行き渡らないようなコンタクト窓構造を設計した。P 電極より下のコンタクト層やクラッド層における電流広がり理論的に正確に解析するのは困難なため、図 4-12 に示すようなコンタクト窓幅の異なる素子を作製し、レーザ発振したときの遠視野像を測定することによって、最適なコンタクト窓構造を最終的に決定することができた。



Unit:  $\mu\text{m}$

図 4-12 コンタクト窓形状 それぞれ Shape (a)A (b)B(c)C(d)D とよぶ。

図 4-12 の各コンタクト窓構造に対する遠視野像測定結果を図 4-13 に示す。Shape A では幅が広いためリング軌道モードの高次モードと軸モードの高次モードが励起されてしまう。Shape A より幅の狭い Shape B では、これらの高次モードは抑制されるが、注入電流が増加すると電流広がりも大きくなり、やはり高次モードが励起され始める。反対に Shape D では幅が狭すぎるため、最低次モード全体に利得が行き渡らず、キャビティモードそのものを励起することができず、やや細いビームとなってしまふ。この考察から、コンタクト窓パターンは Shape C の構造を用いるのが最適であると結論できる。

実際、理論と実験を比較すると、図 4-14 に示すように、Shape C の場合には、Mode0 の遠視野像と非常によく一致しており、高いビームクオリティが実現できていることがわかる。

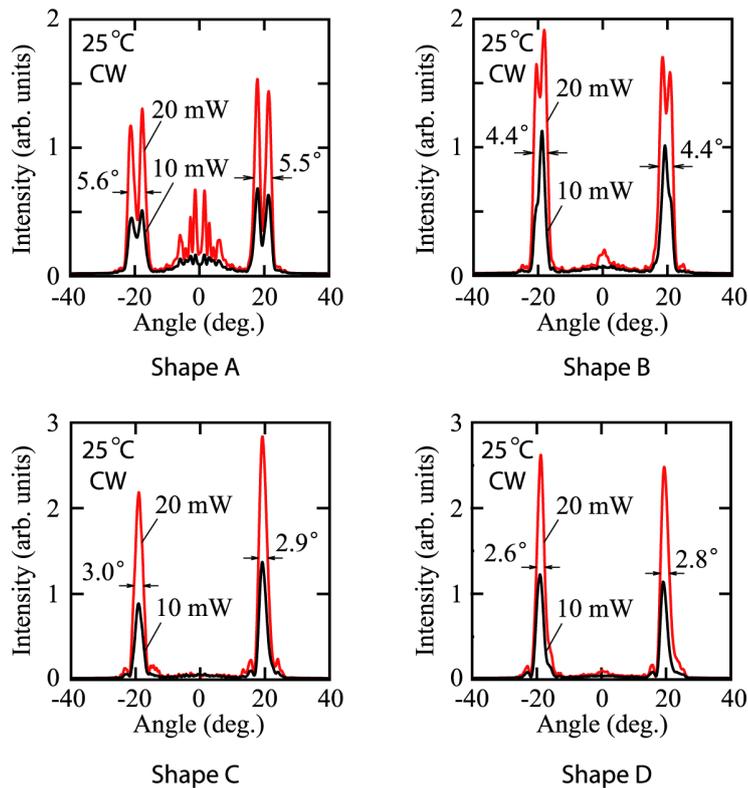


図 4 - 1 3. 異なる電極構造に対する遠視野像の実験結果  
光強度は 10mw(黒) と 20mW(赤)である。

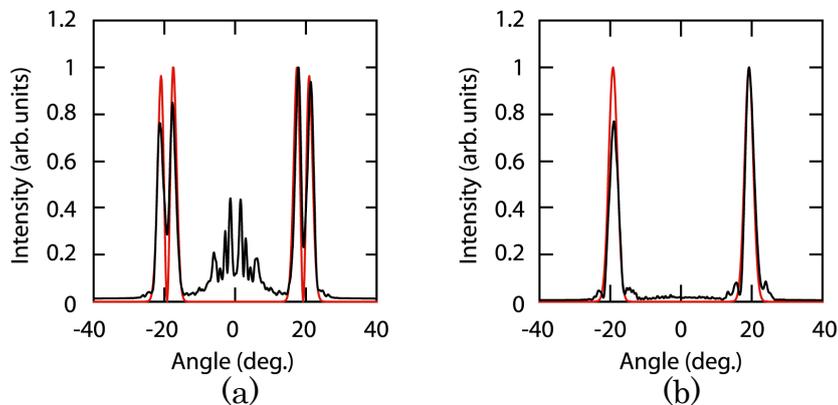


図 4 - 1 4. 理論(赤)と実験 (黒) の比較 (a)Shape A(b)Shape C

達成度：100%

#### 4-2-4 今後の課題

2次元マイクロキャビティレーザの基本的な作製技術は確立できた。また、所望のキャビティモードを選択的に励起するような構造の作製も確立した。今後はドライエッチングによる端面ミラー形成をさらに平滑化できるようエッチング条件を極めることが重要である。また、よりレーザ発振閾値の低いことができる構造のエピウエハやレーザ発振線幅の狭くなることが予想されるような構造のエピウエハによる2次元マイクロキャビティレーザの作製も検討することが重要である。

## 4-3 角速度センサチップ制御技術の研究開発

### 4-3-1 序論

#### 4-3-1-1 位置付け

作製された2次元マイクロキャビティレーザの発振特性を評価し、制御技術を確立する。

#### 4-3-1-2 研究方針

本研究開発の角速度センサチップに用いる半導体レーザは、従来の1次元的なキャビティを用いるものとは異なり、2次元形状を有する新しいタイプのレーザであるので、発振特性を詳しく評価し、制御技術を確立することが重要である。そして、最終的に角速度センサとして機能するために、狭いスペクトルピーク幅でコヒーレンスがよく、時計回りと反時計回りの発振モードが近視野像に正確な干渉縞を形成することを観測できることが重要である。一方、2つの異なる方向の回転波が発生していることは、遠視野像に2つのピークが現れることで確認できる。また、単一量子井戸半導体レーザであるので、発振の閾値は非常に低くできると期待される。

### 4-3-2 実施状況

本研究開発の角速度センサチップに用いる半導体レーザは、従来の1次元的なキャビティを用いるものとは異なり、2次元形状を有する新しいタイプのレーザであるため、2次元レーザ特有の発振特性を詳しく評価し、制御技術を確立することが重要である。そして、角速度センサとして機能するために、狭いスペクトルピーク幅でコヒーレンスがよく、時計回りと反時計回りの発振モードが近視野像に正確な干渉縞を形成することを観測できることが重要である。

2次元レーザは特にエピウエハを限定しないが、なるべく発振の閾値は低い方がよいので、エピウエハの性能をブロードレーザによって評価しておくことが重要である。このため、18年度に様々なパラメータのブロードレーザを作製し、閾値電流密度特性を調べた。

また、2つの異なる方向の回転波が発生していることを遠視野像に2つのピークが現れることで確認しているため、18年度は、端面での近視野像を1~2 $\mu\text{m}$ 間隔の規則正しい干渉縞として捉えることを目指した。

2次元マイクロキャビティレーザの基本的な特性評価項目は、電流-光出力特性、発振スペクトル、近視野像、遠視野像等である。2次元レーザは出力光が2次元的な広がりを持つため遠視野像やスペクトル等の計測には時間を要する。また、レーザキャビティの2次元形状やエピウエハ構造などもパラメータと考えられ、レーザジャイロとして最適なパラメータをサーチするためにはレーザ発振特性の評価結果を設計・作製へ出来る限り早くフィードバックする必要がある。そこで、17年度はレーザ発振特性を効率的に短時間で評価できるように専用の特別な特性評価装置を設計・導入した。18年度はこれらを用いて、サブテーマ(2)で作製される素子を実験・評価し、回転実験・素子設計・作製に評価結果を効率的にフィードバックすることを目指した。

最終的に実用化すべき半導体レーザジャイロは2次元マイクロキャビティレーザを用いたものであるが、ジャイロ性能と2次元レーザの持つパラメータとの関係はまだ解明されていない。このようなパラメータ依存性を作製プロセスも研究段階にある2次元マイクロキャビティレーザで調べることは容易ではない。そのため、並行して、より扱いやすい半導体リングレーザとして、半導体光増幅器と光ファイバを組み合わせたリングレーザを用いて、ジャイロ性能を向上させる方法を調べ、17年度には、このシステムがジャイロとして機能することを示した。したがって、このシステムは、半導体をレーザ媒質に用いたり

ングレーザジャイロの設計指針を与えるものとして、非常に重要性が増したため、18年度は発振特性等をより詳しく評価した。

### 4-3-3 達成状況

最終的には室温連続発振した状態でジャイロとして用いることを想定している。室温連続発進の目安としてパルス動作でレーザ発振の閾値電流密度  $200\text{A/cm}^2$  程度と考えられる。主に用いているエピウエハは図4-15に示すような GRIN-SCH-SQW 構造である。

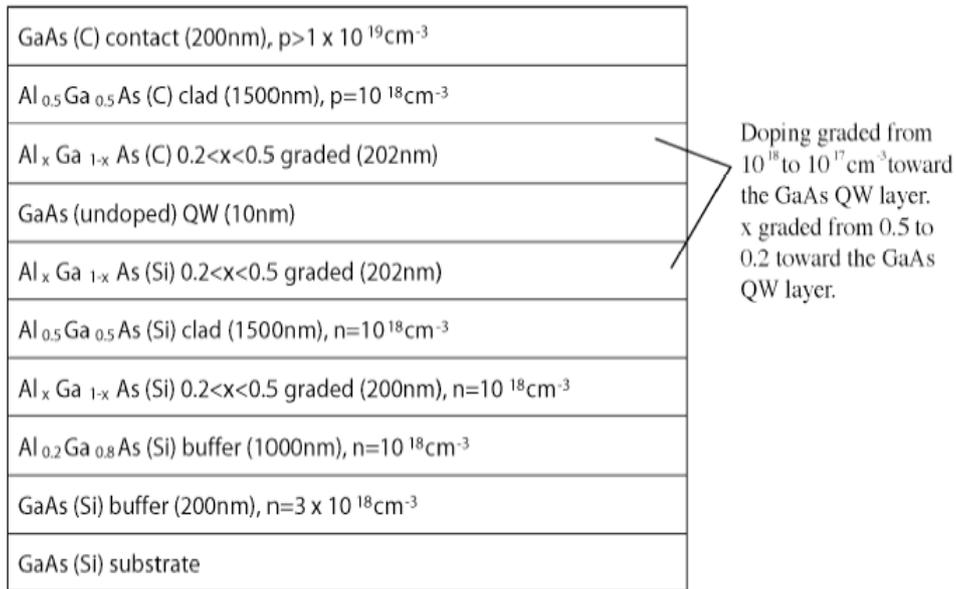


図4-15. エピウエハの構造

この構造を用いてブロードレーザを作製し、図4-16に示すような閾値電流密度特性を得た。

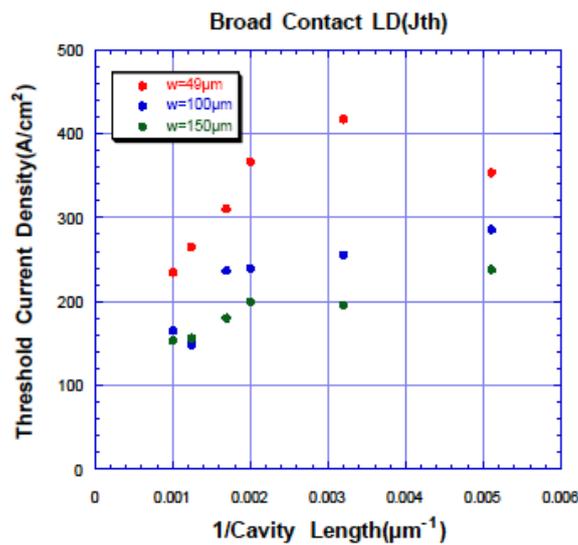


図4-16. ブロードレーザによる閾値電流密度の評価結果

ブロードレーザによる評価は、パルス幅  $1\mu\text{s}$ 、繰り返し周波数  $1\text{kHz}$  のパルス電流により閾値電流密度を評価することにより行った。共振器長  $1000\mu\text{m}$  (図4-16で横軸 0.001

に対応)では、 $150\sim 170\text{A}/\text{cm}^2$ という低い閾値電流密度が得られた。

次に近視野像を観測し、規則正しい干渉縞が観測できたことについて説明する。図4-10のリング軌道モード0を共鳴モードとして持つような設計のレーザ共振器に、電極タイプとして図4-12のCを用いると、遠視野像にはリング軌道と対応したピークが得られるので、レーザキャビティ内部にリング軌道に対応する共鳴モードが励起されていることがわかる。この2次元レーザについて端面における近視野像を観測し、図4-17の結果を得た。図4-17で横全体が幅 $60\mu\text{m}$ のレーザ端面(曲面ミラー部分)である。縦方向にも干渉縞が形成されているのは、基板からの反射光と直接伝搬した光の干渉によるものである。つまり、一番上の明るい干渉縞が本当の干渉縞で、それ以外は反射による虚像である。これより $1\sim 2\mu\text{m}$ 間隔の規則正しい干渉縞が形成されていることがわかる。

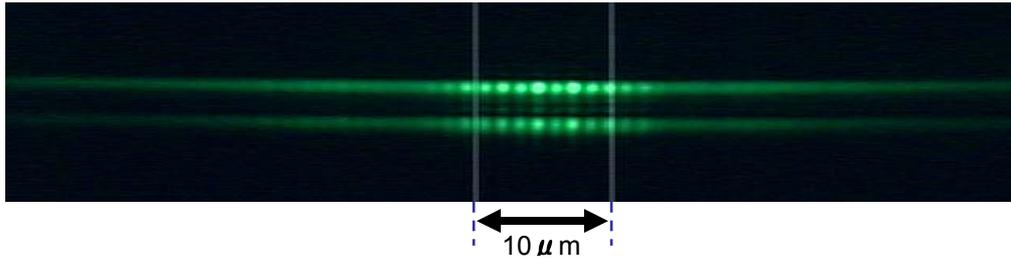


図4-17. 近視野像に現れる2つの回転波による干渉縞

遠視野像では2方向に伝搬するガウシアンビームとなっていることから、この干渉縞は時計・反時計回りの2つの回転波によるものであることがわかる。

達成度：100%

#### 4-3-4 今後の課題

2次元マイクロキャビティレーザの基本的な特性評価方法は確立できた。これまで調べてきた2次元マイクロキャビティレーザは、従来の1次元的なレーザキャビティに側壁を設けたような細長いタイプのものを中心としていた。これは、特性評価方法の確立においては従来レーザと極端には異ならない発振特性を持つ2次元レーザが適切であったことと、レーザジャイロに最適なキャビティ形状が明らかではなかったことによる。しかし、理論的な結果を考慮すると、細長いタイプの2次元マイクロキャビティレーザはロックイン領域が大きくなる可能性が高い。今後は、より高い対称性を持つ2次元キャビティの制御技術を検討する必要がある。

### 4-4 回転角速度検出技術の研究開発

#### 4-4-1 序論

##### 4-4-1-1 位置付け

素子を回転したとき、時計回りと反時計回りの回転波モードの周波数にはレーザの回転角速度に比例した違いが生じ、この周波数差に比例して時計回りと反時計回りのレーザ発振モードによる干渉縞が平行移動する。これを検出することで、回転角速度が特定でき、角速度センサとして機能することを示す。

#### 4-4-1-2 研究方針

回転角速度が遅い場合には2つの回転波モードの周波数差が消失するロックイン現象が起きる場合があるので、これを避けるためにHe-Neリングレーザジャイロで用いられている方法などを参考にして、遅い角速度も正確に計測できるようにする。ここで得られる結果を上記サブテーマにフィードバックし、精度を上げて行くことが大切である。

#### 4-4-2 実施状況

素子を回転したとき、時計回りと反時計回りの回転波モードの周波数にレーザの回転角速度に比例した差を生じるため、この周波数差に比例した速度で時計回りと反時計回りの回転波モードの形成する干渉縞が平行移動する。最終的には、これを検出することで、回転角速度を特定し角速度センサとして機能させることになる。18年度は、半導体光増幅器と光ファイバを組み合わせたリングレーザジャイロに関してレートテーブルによるジャイロ性能評価を詳しく行うことを重点化した。アクティブなレーザ媒質である半導体光増幅器の長さに対するパッシブな光導波路である光ファイバの長さの比率や光ファイバからの光の損失など、様々なパラメータを容易に変化させることができるという点がこのリングレーザの特徴である。このようにして半導体リングレーザを用いたジャイロの性能の典型的なパラメータ依存性を研究することが可能となる。ここで得られる知見をジャイロ用2次元レーザの設計に活用する。

#### 4-4-3 達成状況

S-FOG 実験系を図4-18に示す。SOA 両端の光ファイバピグテールを分岐比 99:1 のカプラで接続し、リングレーザを構成する。カプラによりリング外に取り出した時計回り光と反時計回り光を 50:50 カプラで合波した後フォトダイオード (PD) で 2 乗検波し、両光波のビート信号を得る。実験系全体を回転テーブル上に設置し、角速度を変化させてビート信号を測定した。図4-19に実際の実験系のリングレーザ部分の例を示す。

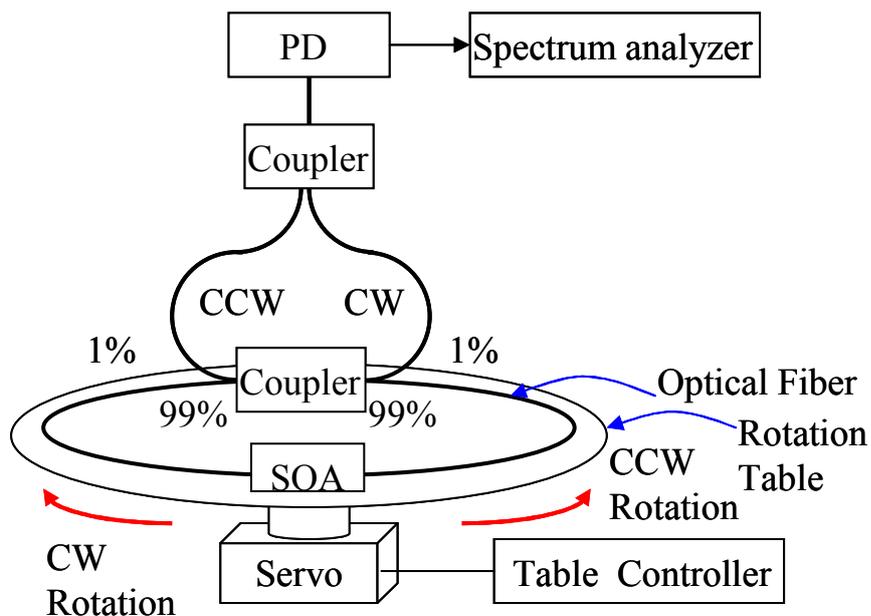


図4-18. S-FOG 実験系の構成

以上のように、従来非常に難しいと考えられていた半導体をレーザ媒質に用いたリングレーザジャイロが実現できることを、世界で初めて示したことは17年度の非常に大きな成果であった。実際、18年度では、2006年10月にメキシコで開催された国際会議

第18回 Optical Fiber Sensors におけるファイバジャイロ30周年記念シンポジウムにおいて本研究開発の S-FOG に関する発表を行い、大変好評であった。

S-FOG では比較的自由に様々なパラメータを変化することができるという大きな特長がある。18年度はこのようなパラメータ依存性を詳しく調べた。まず、S-FOG の理論的なパラメータ依存性を簡単に説明する。

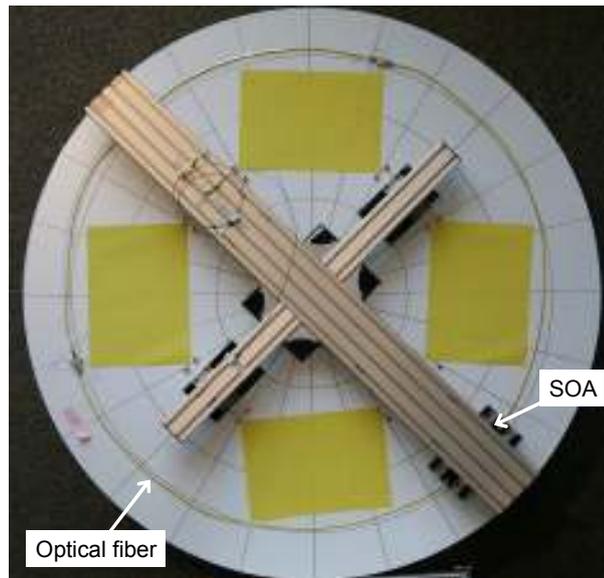


図4-19. 実際のリングレーザ部分

サニャックビート周波数 $\Delta f$ と回転角速度 $\Omega$ とは、以下の式(4)で関係付けられる。

$$\Delta f = \frac{4A}{n\lambda P} \Omega \quad (4)$$

ここで、 $A$ はリングキャビティが囲む面積、 $n$ はキャビティ媒質の屈折率、 $\lambda$ は停止状態でのリングレーザの発振波長、 $P$ はリングキャビティの経路長である。式(4)の比例係数にあたる部分がスケールファクタと呼ばれる値で、この値を  $SF$  とすると、以下のように表わすことができる。

$$SF = \frac{4A}{n\lambda P} \quad (5)$$

$SF$ が大きいほど検出感度が大きい。以下では、 $n$ 及び $\lambda$ をほぼ一定として、 $A$ と $P$ の値を変化させて実験を行い、実験で得られる値と式(4)、(5)より得られる値とを比較検討した。

光ファイバの長さを変化させることでリングキャビティの $P$ を、光ファイバの配置の仕方を変化させることでリングキャビティの囲む面積 $A$ を変化させた場合の実験結果を4つの場合に分けて比較検討する。

#### (a) 光ファイバを1周で交差せずに配置した場合

これは最も単純な場合で、実際に真円に近く配置した場合が図4-19である。 $P$ を一定の値に固定すると、最も $A$ が大きくなるのが1周の真円で、この時最も $SF$ が大きくなる。真円の半径を $r$ と仮定すると、 $P$ が $r$ に比例して、 $A$ が $r^2$ に比例する。従って、 $A/P$ は $r$ に比例するので、単純に円のサイズが大きくなると $SF$ もそれにつれて大きくなるのが明らかである。光ファイバの配置が真円よりずれると、ずれが大きくなるにつれて $A$ が

小さくなるので  $SF$  も小さくなる。

$P=3.05[m]$  で光ファイバを真円に配置した S-FOG-1 では、実験により  $SF=6.86[kHz/(deg/s)]$  が得られた。また、 $P=3.02[m]$  と S-FOG-1 とほぼ等しく、しかし光ファイバを真円よりずらして配置した S-FOG-2 については、 $SF=3.99[kHz/(deg/s)]$  が得られた。両者の  $A/P$  の値は、S-FOG-1 が 0.227, S-FOG-2 が 0.132 で、その比は 1:0.58 である。 $SF$  の実験値の比も 1:0.58 で理論値とよく一致した。

**(b) 光ファイバを  $n$  周の円状に配置した場合**

1 周の円状の場合に  $P$  を  $P_1$ ,  $A$  を  $A_1$  とそれぞれ置くと  $A/P=A_1/P_1$  となる。 $n$  周の円状の場合は  $A=n \times A_1$ ,  $P=n \times P_1$  であるので  $A/P=A_1/P_1$  となり 1 周の場合と等しくなる。同一円周で光ファイバを何周巻いたとしても  $SF$  は一定である。

図 4-20 に、上述の S-FOG-1 と S-FOG-3 ( $A/P=0.251$ , 1 周の  $SF=7.65[kHz/(deg/s)]$ ) について横軸に光ファイバの周回数, 縦軸に  $SF$  値をプロットして、周回数と  $SF$  の関係を示した。周回数にかかわらず  $SF$  値がほぼ一定となっていることが分かる。

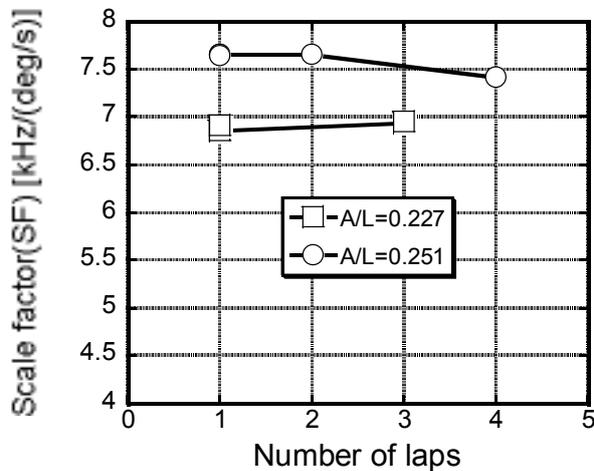


図 4-20. S-FOG の光ファイバの周回数と  $SF$  との関係

**(c) 光ファイバを  $P$  一定で  $n$  周の円状に配置した場合**

1 周の円状の場合は  $P$  を  $P_1$ ,  $A$  を  $A_1$  とそれぞれ置くと  $A/P=A_1/P_1$  と (b) の場合と同一である。 $n$  周の場合は (b) の場合と異なり,  $P=n \times (P_1/n)$  であり,  $A=n \times (A_1/n^2)$  であるので  $A/P=(A_1/P_1)/n$  となる。従って, 光ファイバ長を変えずに  $n$  周となるよう配置すると  $SF$  が  $1/n$  となる。

S-FOG-3 を 2 周巻きに配置を変更して S-FOG-4 とした。実験で得られた  $SF$  は  $3.80[kHz/(deg/s)]$  であり、理論で予測される様に S-FOG-3 の結果のほぼ  $1/2$  が得られた。

**(d) 2 つのループを形成して配置した場合**

図 4-21 に光ファイバを 2 つのループを形成して配置することによって作製されたループを 2 つ持つ S-FOG の形状の概略図を示す。2 つのループをループ 1 (L1) とループ 2 (L2) とし、ループのサイズは L1 の方が大きいとする。図 8.(a) は L1 の CW 光と CCW 光がそれぞれ L2 でも CW 光と CCW 光になる場合である。図 8.(b) は光ファイバにひねりを加えて配置し、L1 の CW 光が L2 では CCW 光に、L1 の CCW 光が L2 では CW 光になる場合である。図 4-21.(a) においては,  $P=P_1+P_2$ ,  $A=A_1+A_2$  であり、L1 と L2 が同じ円であれば (b) の場合と同一の結果が得られる。

図 4-21 (b) においては  $P=P_1+P_2$  であるが  $A=A_1-A_2$  となる。L1 と L2 のサイズが等し

くなればなるほど  $SF$  が小さくなり、実質的に小さなリングの模擬実験を行うことが可能である。

図4-22は図4-21.(b)で示した S-FOG を実際に形成したものである。実験より  $SF$  は  $5.23[\text{kHz}/(\text{deg}/\text{s})]$  が得られた。各ループの  $A$  及び  $P$  はそれぞれ  $A_1=0.647[\text{m}^2]$ ,  $A_2=0.028[\text{m}^2]$ ,  $P_1=3.047[\text{m}]$ ,  $P_2=0.569[\text{m}]$  であるので、 $SF$  の理論値は  $5.25[\text{kHz}/(\text{deg}/\text{s})]$  となり、実験値と理論値がよく一致していることがわかる。もし  $A=A_1+A_2$  を用いて理論値を求めると  $5.72[\text{kHz}/(\text{deg}/\text{s})]$  となり実験値とは大きく乖離する。

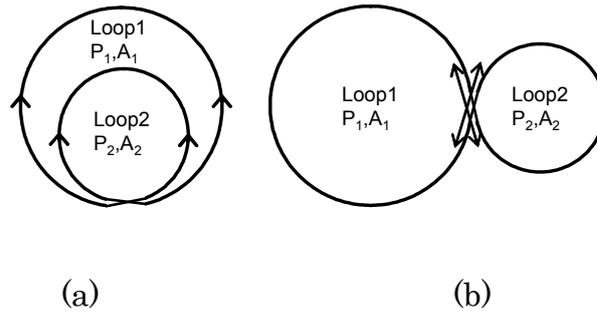


図4-21. 2つのループを持つ S-FOG の概略図

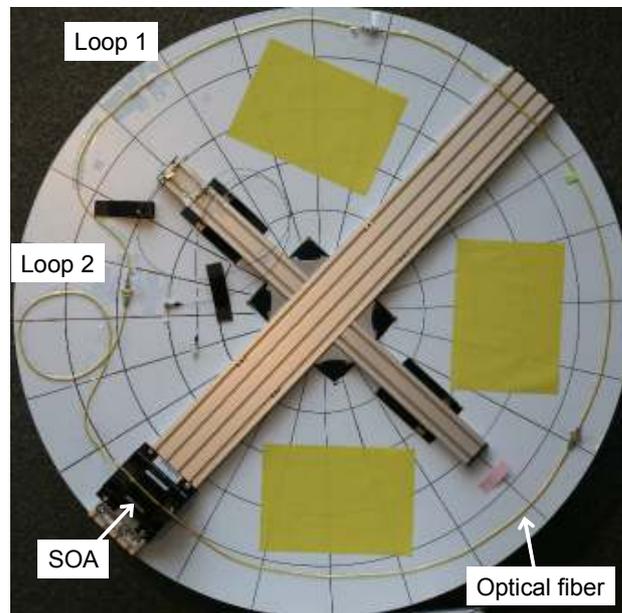


図4-22. 図4-21.(b)に示す S-FOG の実際の配置例

### $SF$ と $A/P$ との関係

図4-23に、横軸を  $A/P$ 、縦軸を  $SF$  の値として全ての実験結果をプロットした。各測

定点が原点を通る一直線上にきれいに並んでおり、 $SF$ が $A/P$ に比例することが明らかである。最小二乗法で直線近似すると、 $y$ 切片が0.0018、相関係数が0.9997、傾きが30.41である。これらの値からも十分比例関係が成立していることが分かる。式(5)より求められる傾きの理論値 $4/n\lambda$ は30.74であり、これも実験値とよく一致している。

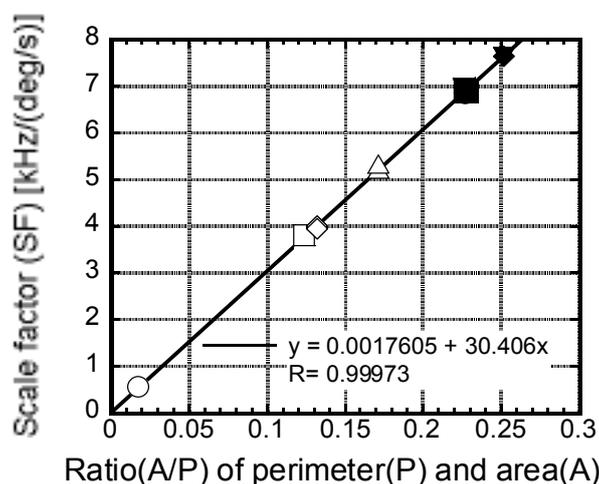


図4-23  $SF$ と $A/P$ との関係

これまで波長を一定として他のパラメータを変化させた場合について議論した。次に、S-FOGのキャビティ内に可変波長フィルタを挿入して、キャビティ形状を変えること無く波長を制御した状態で回転実験を行った。この場合 $A/P$ は一定となる。また、波長が変化すると、光ファイバの屈折率も変化するので $n\lambda$ が変数となる。そこで式(5)を以下の様に変形すると波長及び屈折率の効果を理解し易い。

$$\frac{1}{SF} = \frac{1}{4} \frac{P}{A} n\lambda \quad (6)$$

式(6)より $n\lambda$ と $1/SF$ が比例関係にあることが分かる。

図4-24では横軸に $n\lambda$ 、縦軸に $1/SF$ をプロットした。測定点である黒丸(●)がほぼ一直線上に並んでおり、 $n\lambda$ と $1/SF$ が比例関係にあることが明らかである。得られたデータを直線近似した傾きと、式(6)より計算される $P/4A$ の値とはほぼ一致した。また $A/P$ が等しくなるようにキャビティ形状を変化させた場合についての結果を□でプロットすると、ほぼ同一直線上にプロットされた。これらの結果より、波長を変化させた場合においても実験値が理論値と非常によく一致することが確認できた。

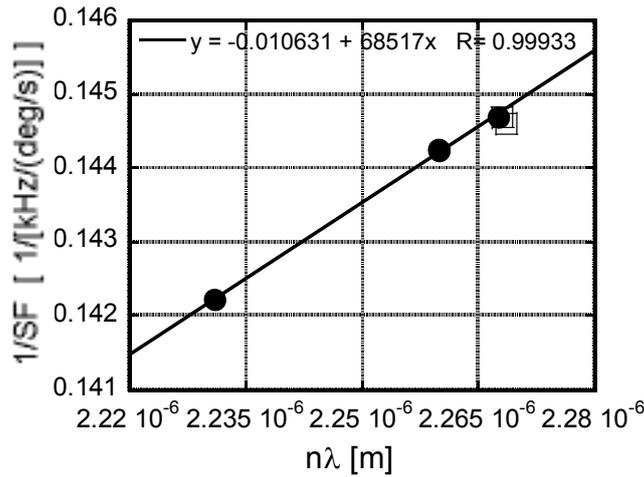


図 4-24 SFの発振波長依存性

次にバイアス安定性について報告する。バイアス安定性とは Sagnac ビートスペクトルのピークの時間的な安定性である。一定の角速度で回転している場合にこのピーク位置が変動すると、その変動分だけ角速度誤差が生じてしまう。そのため、この変動を小さく抑えることが重要となる。そこで S-FOG を用いてバイアス安定性を評価した。S-FOG におけるサニャックビートスペクトルのピークの時間的な安定性の典型的な例を図 4-25 に示す。

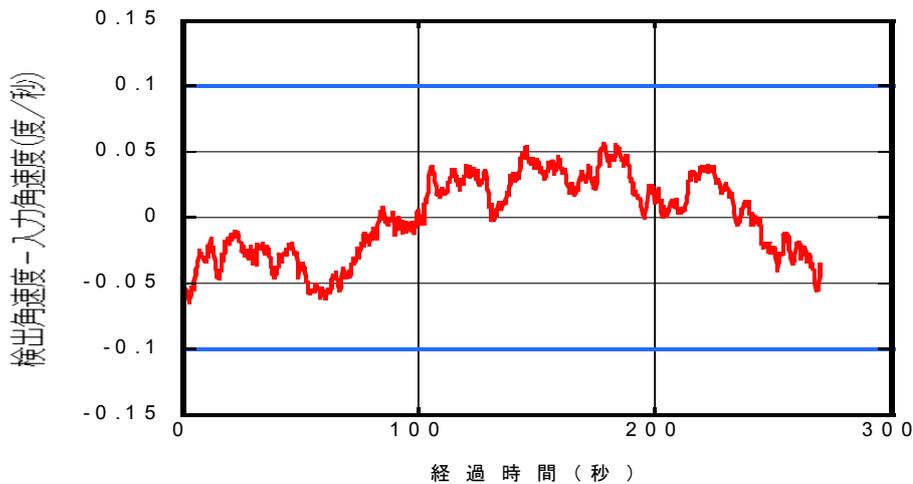


図 4-25. バイアス安定性

約 5 分間の回転実験において、ビートスペクトルピーク位置の変動は、 $\pm 0.1^\circ$  /秒以内に留まっていることがわかる。この図よりバイアス安定性  $0.1^\circ$  /秒が実現できていることがわかる。

S-FOG に関する実験結果の報告の最後に、4-1 の理論的な結果に対応する実験について報告する。実験系がこの章でこれまで議論したものと異なる点は、図 4-26 に示すように時計・反時計回りの光を合波しないことである。このような一方向のみの回転波モードでもレーザ媒質の非線形効果により位相情報が振幅情報に変換されることを 4-1 で説明した。

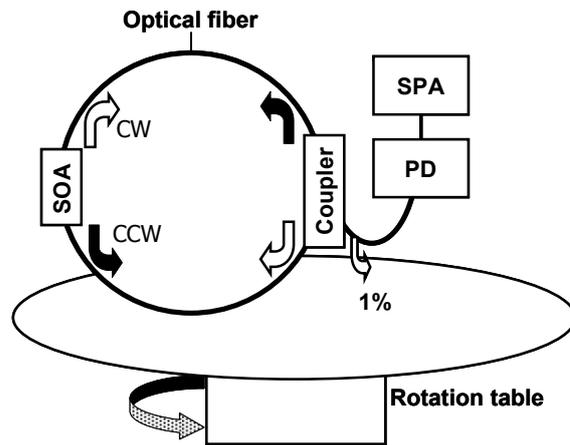


図4-26. CW光のみによるサニャック効果の観測

図4-27に、時計回りの光のみによって実験で得られたフォトダイオードの信号のスペクトル解析の結果を示す。理論的予測の通りサニャックビート周波数に対応する周波数でピークが得られた。図4-28に示すように、このピーク位置は回転角速度に比例し、スケールファクタも理論とよく一致する。これによって、時計・反時計回りの光の片方だけでも強度変化にサニャック効果が現れることが実証された。

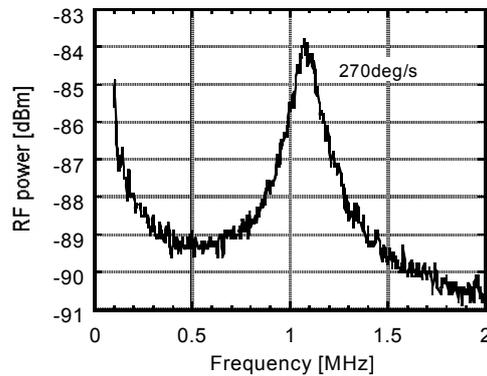


図4-27. CW光のみの強度変化のRFスペクトル

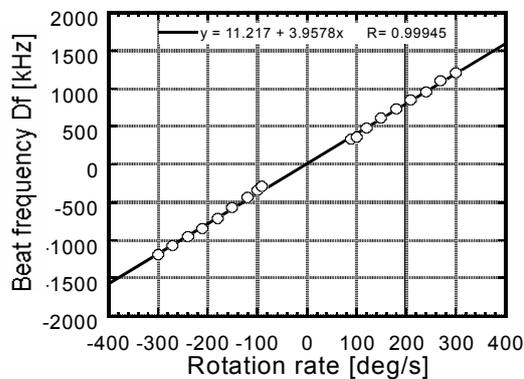


図4-28. CW光のみによるサニャックビート周波数と回転角速度の関係

達成度：100%

#### 4-4-4 今後の課題

S-FOG のパラメータ依存性が明らかになり、バイアス安定性が高いことも示すことができた。今後は、さらにパラメータと性能の関係を詳しく調べ、小型化のための設計指針を明らかにすることが重要である。

### 4-5 無線と慣性センサによるハイブリッド位置計測技術の研究開発

#### 4-5-1 序論

##### 4-5-1-2 位置付け

無線システムによる位置情報検出と慣性センサによる位置情報検出とを組み合わせた位置計測装置を研究開発し、正確な位置情報をシームレスに獲得する技術を実現する。この技術は、本研究開発による超小型角速度センサが実用化されたとき、モバイル端末等に応用することが可能である。

##### 4-5-1-2 研究方針

装置の大きさを問わなければ、自律的位置情報検出技術は航空機やロケット等に利用されていることからわかるように非常に成熟した技術である。GPS による位置情報検出技術も同様に成熟している。これらを組み合わせることで高精度な位置情報をシームレスに獲得できることを示す。

#### 4-5-2 実施状況

自律的位置情報検出に用いることが可能な角速度センサとしては、本研究開発で目標としているほど小型で高性能なものは現存しないため、大きさや性能を犠牲にしても様々なものを試用して、無線と慣性センサを相補的に使用することでジャイロ性能を補完する方法を模索しておくことが重要である。このような研究を並行して進めることで、本研究開発による高精度角速度センサチップが実現できたときに、無線による位置検出システムと組み合わせた効果的な使用方法が明らかになる。角速度センサの性能としては、機械振動式ジャイロ、ファイバオプティックジャイロ、リングレーザジャイロの順に精度は高くなるが、同じ順で大きさとコストも高くなる。まず実際にこれらを用いて位置計測装置を作製することで、この自律的位置情報検出の精度と無線システム位置検出の精度との補完関係を明らかにする。無線システムは非常に高精度な RTK-GPS を用いるのがよいと考えられる。慣性センサとしては本研究開発で実現される角速度センサチップを想定するのがよく、それに匹敵する性能を持つものとしては、高精度のファイバオプティックジャイロと He-Ne のリングレーザジャイロがある。そこで、当初、ファイバオプティックジャイロと無線位置検出システムの組み合わせを中間目標に、He-Ne リングレーザジャイロと無線とのハイブリッドシステムを最終目標に掲げていた。しかし、最終目標の性能を満足するためには、初めから He-Ne リングレーザジャイロを用いた研究開発に着手しなければ間に合わないことが判明したため、ファイバオプティックジャイロを用いるシステムは扱わないこととした。

He-Ne リングレーザジャイロでは、ロックイン現象を避けるため、常にジャイロに激しい振動的回転を与えており、これをディザとよんでいる。ディザによって非常に小さな回

転角速度まで安定に測定できるようになっているが、このような人工的な振動的回転は角速度の入力がないときでも出力が生じ、それがランダムウォーク的な誤差を導くことになる。ジャイロのみを用いた位置情報検出ではこのような誤差が蓄積され続ける。このようなジャイロの誤差は、GPSを使用できるような環境のときに得られる位置情報を用いて補正する必要がある。また、このような誤差には様々な要因が複雑に絡んではいるが、正確に誤差解析を行えばジャイロ性能をより向上させることができる。つまり、RTK-GPSの与える非常に高精度の位置情報とジャイロによる位置情報とを詳しく比較することで、ジャイロの持つ誤差の特徴を抽出し、それを利用して常にジャイロの誤差を補正し、ジャイロのみを用いて検出する位置情報の誤差をより小さくすることが可能となると期待される。

17年度、GPSと慣性計測部をハイブリッドする方式として、推定した各誤差を慣性航法演算にフィードバックし、逐次補正を行うため、各誤差は常に最小に抑えられ、各誤差伝播は線形近似できるクローズドループ方式を用いるのが最適であることが明らかになった。18年度はこれらを実装したハイブリッドシステムを試作した。

### 4-5-3 達成状況

全体のシステムを図4-29に示す。

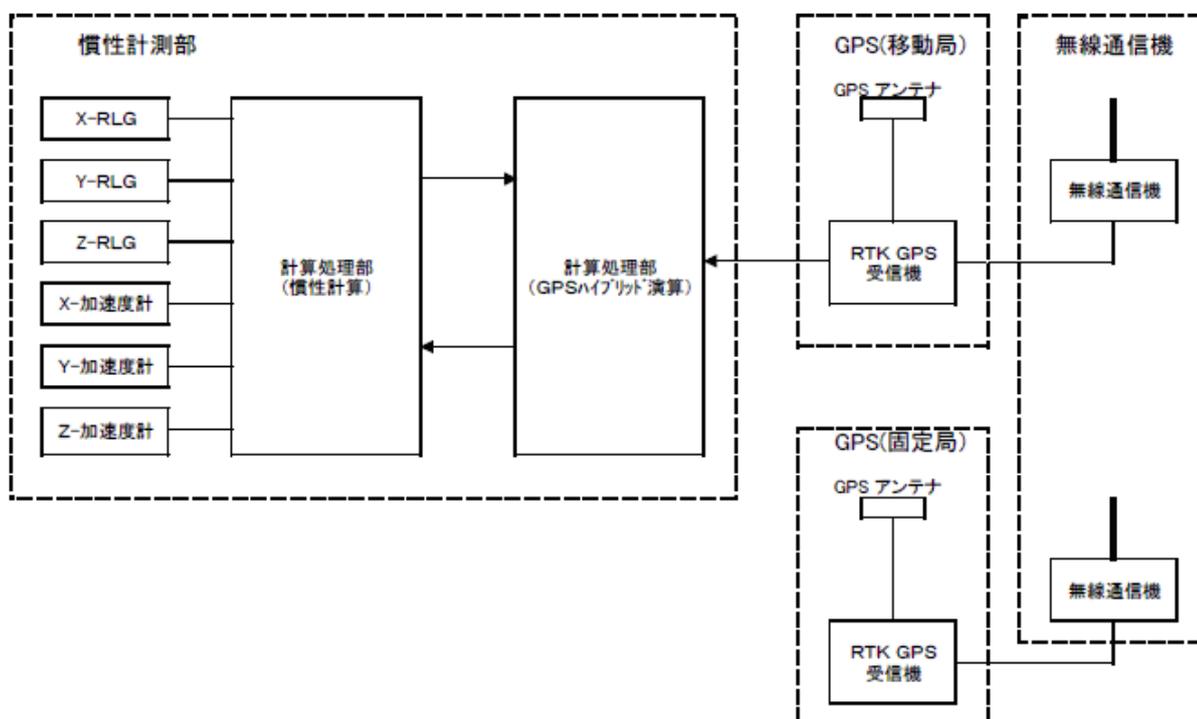


図4-29 ハイブリッド位置計測システム

慣性位置計測システムのデータ更新時間は15msである。RTK-GPSによる誤差補正がない場合には、図4-30に示すように誤差が累積してしまう。

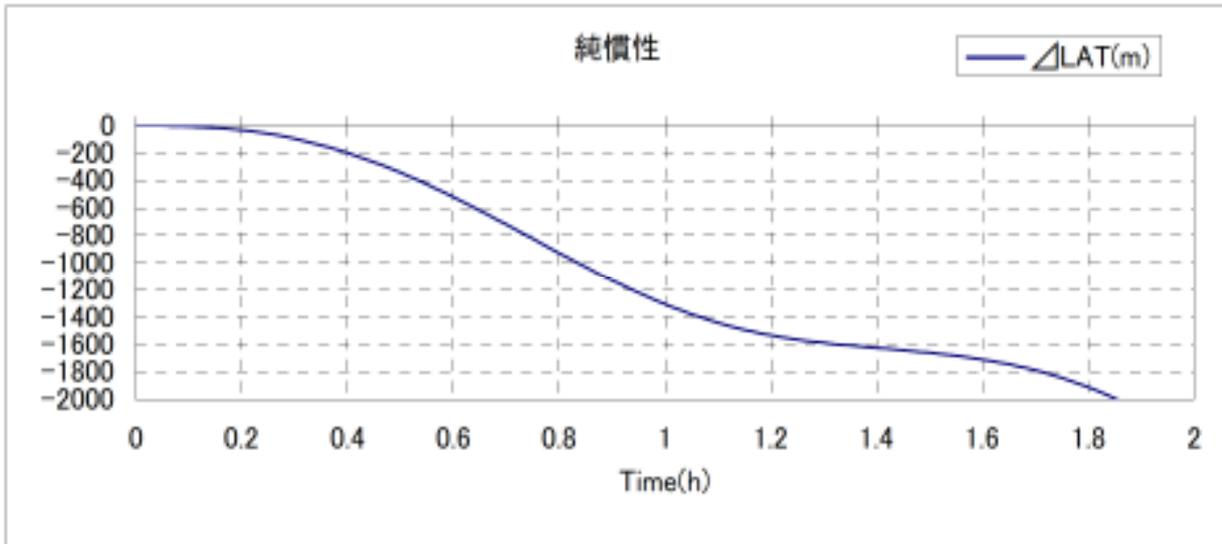


図 4-30 慣性位置計測システムのみを用いた場合の緯度誤差

これに対して、RTK-GPS により 1 秒間隔で誤差補正を行うことで図 4-31 のように誤差を常に ±4 cm 以内とすることができた。また、この慣性航法演算部ではカルマンフィルタを用いた RTK-GPS との誤差のフィードバック補正も行っており、RTK-GPS からのデータが途絶えた場合でも図 4-30 に比べて誤差を小さく抑えることができる。

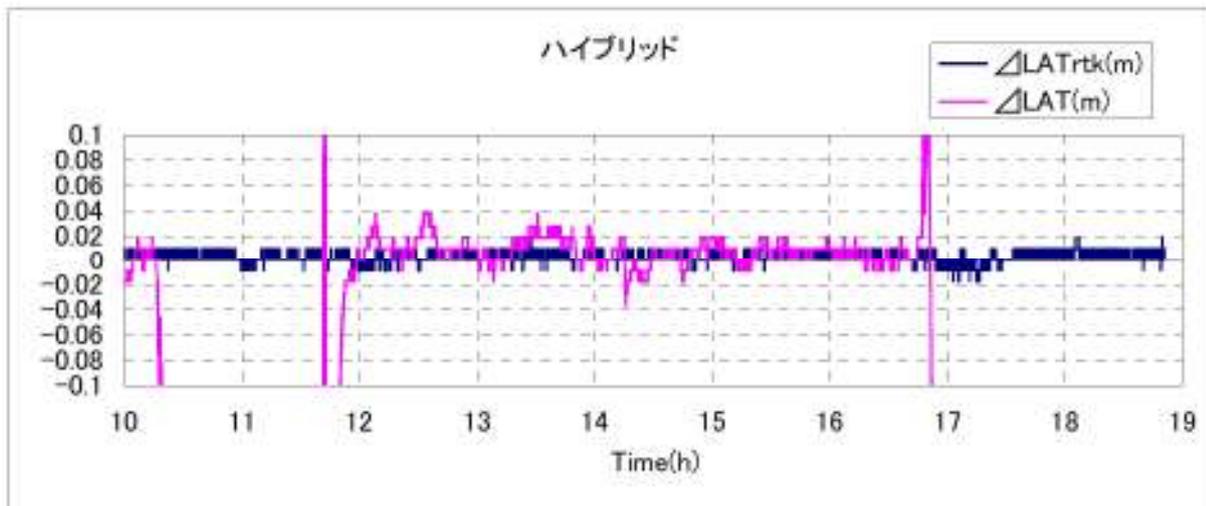


図 4-31 ハイブリッド位置計測データ。時間軸 11.6~16.8 においてハイブリッド演算をしている。

達成度：100%

#### 4-5-4 今後の課題

慣性センサと無線システムとを補間する方法を確立することができた。今後はより精度を上げる技術の向上とハイブリッドシステム移動時におけるデータの詳細な解析が重要である。

#### 4-6 総括

本年度は各サブテーマでバランスよく重要な成果が得られた。その中でも特に重要な成果は、ロックイン領域を原理的には消滅できるような2次元レーザキャビティ形状が明らかになったことである。実際のデバイス動作を検討すれば、キャビティ形状理論からの予測では原理的に0となったロックイン閾値も有限の値となると考えられるが、その値を最小とするキャビティ形状の持つ条件が明らかになったことは大変重要である。

また、S-FOGの様々なパラメータ依存性が明らかになったことの意義も大きい。特に、時計・反時計両方向の回転波を合波しなくともサニャックビート信号が検出できるという全く新しい結果が理論的に予想され実験によって実証された。従来、後方散乱と合わせてロックインの主要因となるレーザ媒質による非線形効果は、リングレーザジャイロでは出来る限り避けることが望ましいとされてきた。しかし、非線形効果を上手く利用し光の位相情報を強度情報に変換することで新しい方法によりジャイロ機能を抽出できることが明らかになった。これは方向性結合器を減らすことができるなど実用上有用となることが期待できる。

今後は理論研究とS-FOGの実験研究をさらに進め、チップのレーザジャイロを実現するための設計指針をより明確にすることが重要である。また、このようにして今後明らかになると考えられる詳細な設計要求に応えられるように、2次元マイクロキャビティレーザ作製技術精度及びレーザ発振特性制御技術精度の更なる向上を並行して追求することも重要である。

## 5 参考資料・参考文献

### 5-1 研究発表・講演等一覧

決裁番号	発表方法	雑誌名・国際会議名	発表者	タイトル	発表(予定)日	査読	状況
2005 波-発 029	誌上	Japanese Journal of Applied Physics	Shanmugam Saravanan, Hitoshi Shimizu, Pablo Vaccaro	Strain Reduction and Long Wavelength Emission from InAs/GaAs QDs by using Growth Interruption in MBE	2006. 4. 7	有	掲載済
2005 波-発 037	誌上	Physical Review E	Satoshi Sunada, Takahisa Harayama	Sagnac effect in resonant Microcavities	2006. 8. 10	有	掲載済
2005 波-発 072	国際会議	2006 IEEE 18th International Conference on Indium Phosphide & Related Materials (IPRM2006)	Hitoshi Shimizu, Shanmugam Saravanan	Comparison of Buffer Material for InAs Quantum Dots on GaAs Substrate	2006. 6. 1	有	掲載済
2005 波-発 077	誌上	Applied Physics Letters	Hitoshi Shimizu, Shanmugam Saravanan, Junji Yoshida, Sayoko Ibe (Furukawa Elec.), Noriyuki Yokouchi (Furukawa Elec.)	Comparison between Multilayered InAs Quantum Dot Lasers with Different Dot Density	2006. 6. 1	有	掲載済
2005 波-発 078	国際会議	2006 IEEE 18th International Conference on Indium Phosphide & Related Materials (IPRM2006)	Hitoshi Shimizu, Shanmugam Saravanan, Junji Yoshida, Sayoko Ibe (Furukawa Elec.), Noriyuki Yokouchi (Furukawa Elec.)	Multilayered InAs Quantum Dot Lasers with Different Dot Density	2006. 5. 7 ~ 2006. 5. 11	有	発表済
2005 波-発 084	誌上	Japanese Journal of Applied physics	Hitoshi Simizu, Shanmugam Saravanan, Junji Yoshida, Sayoko Ibe, Noriyuki Yokouchi	Long-Wavelength Multilayered InAs Quantum Dot Lasers	2007. 2. 8	有	掲載済
2005 波-発 089	国際会議	The 2006 IEEE 18th Conference on Indium Phosphide and Related Materials (IPRM2006)	Shanmugam Saravanan, Hitoshi Shimizu	Stacking of InAs/GaAs QDs with Less Strain by using Growth Interruption	2006. 5. 7 ~ 2006. 5. 11	有	発表済

決裁番号	発表方法	雑誌名・国際会議名	発表者	タイトル	発表(予定)日	査読	状況
2005 波-発 131	誌上	Applied Physics Letters	Muhan Choi, Tomoko Tanaka, Takehiro Fukushima (ATR/Okayama Pref. Univ.), Takahisa Harayama	Control of Directional Emission in Quasistadium Microcavity Laser Diodes with Two-Electrodes	2006. 5. 24	有	発表済
2005 波-発 132	国際会議	Conference on Laser and Electro-Optics/ Quantum Electronics Laser Conference 2006 (CLEO/QELS' 06)	Takehiro Fukushima (ATR/Okayama Pref. Univ.), Takahisa Harayama	Mode Switching by Optical Injection in Tandem Quasi-Stadium Laser Diodes	2006. 5. 21 ~ 2006. 5. 26	有	発表済
2006 波-発 002	国内大会	2006 年電子情報通信学会総合大会	福嶋 丈浩 (ATR/岡山県立大), 原山 卓久	擬似スタジアム型半導体レーザーの光注入によるモードスイッチング	2006. 3. 24 ~ 2006. 3. 27	有	発表済
2006 波-発 003	国際会議	International Conference on the Frontiers of Nonlinear and Complex Systems	Takahisa Harayama	Theory and Application of 2D Microcavity Lasers	2006. 5. 24 ~ 2006. 5. 26	有	発表済
2006 波-発 009	国際会議	18th International Conference on Optical Fiber Sensors (OFS-18)	Keizo Inagaki, Shuichi Tamura, Hiroyuki Noto, Takahisa Harayama	Sagnac Beat Signals Observed in Semiconductor Fiber-Optic Ring Laser Gyroscope	2006. 10. 23 ~ 2006. 10. 27	有	発表済
2006 波-発 010	国際会議	8th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON2006)	Muhan Choi, Tomoko Tanaka, Takehiro Fukushima (ATR/Okayama Pre. Univ.), Takahisa Harayama	Control of Directional Emission in Two-dimensional Quasi-Stadium Micro-Cavity Laser Diodes with Two-Electrodes	2006. 6. 18 ~ 2006. 6. 22	有	発表済
2006 波-発 011	誌上	Physical Review A	Susumu Shinohara, Takahisa Harayama, Hakan E. Tureci (Yale Univ.), Douglas A. Stone (Yale Univ.)	Ray-wave Correspondence in Stadium-cavity Lasers		有	掲載済
2006 波-発 012	国際会議	8th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON2006)	Susumu Shinohara, Takahisa Harayama, Hakan E. Tureci (Yale Univ.), Douglas A. Stone (Yale Univ.)	Highly Directional Emission in Stadium-Cavity Lasers	2006. 6. 18 ~ 2006. 6. 22	有	発表済

決裁番号	発表方法	雑誌名・国際会議名	発表者	タイトル	発表(予定)日	査読	状況
2006 波-発 013	国際会議	Dynamics Days Asia Pacific 4 (DDAP4)	Susumu Shinohara, Takahisa Harayama, Hakan E. Tureci (Yale Univ.), Douglas A. Stone (Yale Univ.)	Highly Directional Emission in Stadium-Cavity Lasers	2006. 7. 12 ~ 2006. 7. 14	有	発表済
2006 波-発 014	国際会議	8th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON2006)	Yutaka Nakae, Takehiro Fukushima (ATR/Okayama Pre. Univ.), Tomoko Tanaka, Takahisa Harayama	Ring and Axis Mode Switching in Quasi-stadium Laser Diodes with Multi-electrodes	2006. 6. 18 ~ 2006. 6. 22	有	発表済
2006 波-発 015	国際会議	8th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON2006)	Satoshi Sunada, Takahisa Harayama	Sagnac Effect in Resonant Microcavities	2006. 6. 18 ~ 2006. 6. 22	有	発表済
2006 波-発 016	国際会議	18th International Conference on Optical Fiber Sensors (OFS-18)	Satoshi Sunada, Takahisa Harayama	Sagnac Effect in Resonant Microcavities	2006. 10. 23 ~ 2006. 10. 27	有	発表済
2006 波-発 018	国際会議	8th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON2006)	Takahiko Sasaki, Takehiro Fukushima (ATR/Okayama Pre. Univ.), Tomoko Tanaka, Takahisa Harayama	Locking of Two Modes and Unidirectional Beam Emission in Quasi-stadium Laser Diodes	2006. 6. 18 ~ 2006. 6. 22	有	発表済
2006 波-発 019	誌上	Physica B	Norihiko Kamata (Saitama Univ.), Shanmugam Saravanan, J. M. Zanardi Ocampo, Pablo Vaccaro, Yasuhiko Arakawa (Univ. of Tokyo)	Nonradiative Centers in InAs Quantum Dots Revealed by Two-wavelength Excited Photoluminescence	2006. 4. 1	有	掲載済
2006 波-発 022	国際会議	Dynamics Days Asia Pacific 4 (DDAP4)	Takahisa Harayama	Nonlinear Dynamics and Optical Sensing Application of 2D Microcavity Lasers	2006. 7. 12 ~ 2006. 7. 14	有	発表済
2006 波-発 023	国際会議	Dynamics Days Asia Pacific 4 (DDAP4)	Muhan Choi, Tomoko Tanaka, Takehiro Fukushima, Takahisa Harayama	Control of Emission light in Quasi-Stadium Micro-Cavity Laser Diodes	2006. 7. 12 ~ 2006. 7. 14	有	発表済

決裁番号	発表方法	雑誌名・国際会議名	発表者	タイトル	発表(予定)日	査読	状況
2006 波-発 030	国際会議	8th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON2006)	Tomoko Tanaka, Martina Hentschel (Regensburg Univ.), Takehiro Fukushima (ATR/Okayama Pre. Univ.), Takahisa Harayama	Directional Emission Patterns from the Oval-Billiard Microcavity Laser Diodes	2006. 6. 18 ~ 2006. 6. 22	有	発表済
2006 波-発 031	国際会議	Dynamics Days Asia Pasific 4 (DDAP4)	Tomoko Tanaka, Martina Hentschel (Regensburg Univ.), Takehiro Fukushima (ATR/Okayama Pre. Univ.), Takahisa Harayama	Shape Parameter Dependence of Emission Patterns from the Oval-Billiard Microcavity Laser Diodes	2006. 7. 12 ~ 2006. 7. 14	有	発表済
2006 波-発 035	国内研究会	電子情報通信学会、光エレクトロニクス研究会 (OPE)	砂田 哲, 原山 卓久	微小共振器における Sagnac 効果	2006. 7. 27 ~ 2006. 7. 28	有	発表済
2006 波-発 036	国際会議	International Conference on Quantum Mechanics and Chaos (QMC2006)	Susumu Shinohara, Takahisa Harayama, Hakan E. Tureci (Yale Univ.), Douglas A. Stone (Yale Univ.)	Directional Lasing Emission from Stadium-shaped Microcavities	2006. 9. 19 ~ 2006. 9. 21	有	発表済
2006 波-発 048	国内大会	2006 年電子情報通信学会ソサイエティ大会	田村 修一, 稲垣 恵三, 野戸 広之, 原山 卓久	半導体ファイバオプティックジャイロ (S-FOG) のスケールファクタの波長依存性に関する実験	2006. 9. 19 ~ 2006. 9. 22	有	発表済
2006 波-発 049	国内研究会	電子情報通信学会、電磁界理論/マイクロ波/光エレクトロニクス研究会	田村 修一, 稲垣 恵三, 野戸 広之, 原山 卓久	半導体ファイバオプティックジャイロ (S-FOG) による回転角速度検出及びスケールファクタの実験的検討	2006. 7. 27 ~ 2006. 7. 28	有	発表済
2006 波-発 050	国内大会	2006 年電子情報通信学会ソサイエティ大会	野戸 広之, 福嶋 丈浩 (ATR/岡山県立大), 原山 卓久	ジャイロセンサ用半導体リングレーザの設計とその基本特性の測定	2006. 9. 19 ~ 2006. 9. 22	有	発表済
2006 波-発 051	国際会議	International Conference on Quantum Mechanics and Chaos (QMC2006)	Muhan Choi, Tomoko Tanaka, Takehiro Fukushima (ATR/Okayama Pre. Univ.), Takahisa Harayama	Control and Switching of Light Emission in Quasistadium Microcavity Laser Diodes by using Two Electrodes	2006. 9. 19 ~ 2006. 9. 21	有	発表済

決裁番号	発表方法	雑誌名・国際会議名	発表者	タイトル	発表(予定)日	査読	状況
2006 波-発 052	国際会議	International Conference on Quantum Mechanics and Chaos (QMC2006)	Yutaka Nakae, Takehiro Fukushima (ATR/Okayama Pre. Univ.), Tomoko Tanaka, Takahisa Harayama	Mode Switching by Multi-electrodes and Tandem Quasi-stadium Laser Diodes	2006. 9. 19 ~ 2006. 9. 21	有	発表済
2006 波-発 056	国際会議	International Conference on Quantum Mechanics and Chaos (QMC2006)	Satoshi Sunada, Takahisa Harayama	Sagnac Effect in Rotating Resonant Microcavities	2006. 9. 19 ~ 2006. 9. 21	有	発表済
2006 波-発 058	国際会議	Dynamical Chaos and Non-equilibrium Statistical Mechanics: From Rigorous Results to Applications in Nano-systems	Takahisa Harayama	Complexity of 2D Microcavity Lasers	2006. 8. 1 ~ 2006. 9. 30	有	発表済
2006 波-発 059	国際会議	International Conference on Quantum Mechanics and Chaos (QMC2006)	Takahisa Harayama	Theory, Experiments, and Applications of 2D Microcavity Lasers	2006. 9. 19 ~ 2006. 9. 21	有	発表済
2006 波-発 061	国際会議	International Conference on Quantum Mechanics and Chaos (QMC2006)	Takahiko Sasaki, Takehiro Fukushima (ATR/Okayama Pre. Univ.), Tomoko Tanaka, Takahisa Harayama	Locking of Two Modes in InGaAsP Multiple-quantum-well Quasi-stadium Laser Resonators	2006. 9. 19 ~ 2006. 9. 21	有	発表済
2006 波-発 067	誌上	共立出版、複雑系叢書、第5分冊”複雑さと法則”、前田恵一編集 第7章	原山 卓久	量子カオスの根本問題と実験による新展開	2006. 11	有	掲載済
2006 波-発 070	国際会議	The 19th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society (LEOS' 06)	Takehiro Fukushima (ATR/Okayama Pref. Univ.), Takahisa Harayama	Lowest Order Ring Mode Lasing in Confocal Quasi-Stadium Laser Diodes	2006. 10. 29 ~ 2006. 11. 2	有	発表済
2006 波-発 075	国際会議	Materials Science and Materials Mechanics at the Nanoscale (NANOMECC 06)	Takahisa Harayama	Two-dimensional Microcavity Lasers	2006. 11. 19 ~ 2006. 11. 23	有	発表済

決裁番号	発表方法	雑誌名・国際会議名	発表者	タイトル	発表(予定)日	査読	状況
2006 波-発 078	国際会議	Novacella Autumn Conference 2006 Chaos and Complex Systems	Takahisa Harayama	Theory and Applications of 2D Microcavity Lasers	2006. 10. 9 ~ 2006. 10. 12	有	発表済
2006 波-発 079	国際会議	the 19th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society (LEOS' 06)	Tomoko Tanaka, Martina Hentschel (Regensburg Univ.), Takehiro Fukushima (ATR/Okayama Pref. Univ.), Takahisa Harayama	Morphological Dependence of Emission Patterns from Oval-Billiard Microcavity Laser Diodes	2006. 10. 29 ~ 2006. 11. 2	有	発表済
2006 波-発 092	国際会議	International Conference on Quantum Mechanics and Chaos (QMC2006)	Tomoko Tanaka, Martina Hentschel (Regensburg Univ.), Takehiro Fukushima (ATR/Okayama Pre. Univ.), Takahisa Harayama	Far Field Emission Patterns from Oval-Billiard Microcavity laser Diodes	2006. 9. 19 ~ 2006. 9. 21	有	発表済
2006 波-発 213061211001	誌上	Physical Review E	篠原 晋, 原山 卓久	Signature of ray chaos in quasi-bound wavefunctions for a stadium-shaped dielectric cavities		有	査読中
2006 波-発 213061211001	国内研究会	電子情報通信学会 レーザ・量子エレクトロニクス研究会	田村 修一, 稲垣 恵三, 野戸 広之, 原山 卓久	SOA を用いた半導体ファイバオプティックリングレザージャイロ (S-FOG) の回転実験による検討	2006. 12. 8	有	発表済
2006 波-発 213070105001	国際会議	Conference on Lasers and Electro Optics/International Quantum Electronics Conference	Shanmugam Saravanan, Takahisa Harayama	Effect of growth interruption during the growth of InAs/GaAs QDs	2007. 6. 17 ~ 2007. 6. 22	有	発表予定
2006 波-発 213070122001	国内大会	2007 年電子情報通信学会 総合大会	野戸 広之, 稲垣 恵三, 田村 修一, 原山 卓久	半導体光ファイバジャイロ (S-FOG) の低回転時の強度変化範囲の測定	2007. 3. 20 ~ 2007. 3. 23	有	発表済
2006 波-発 213070112004	国内大会	2007 年電子情報通信学会 総合大会	大平 孝, 荒木 純道	発振回路の NIMO/NISO モデル	2007. 3. 20 ~ 2007. 3. 23	有	発表済

決裁番号	発表方法	雑誌名・国際会議名	発表者	タイトル	発表(予定)日	査読	状況
2006 波-発 213070118006	国内大会	2007 年電子情報通信学会 総合大会	田村 修一, 砂田 哲, 稲垣 惠三, 原山 卓久	半導体ファイバオプティックジ ャイロ(S-FOG)の Sagnac ビート スペクトルの検出に関する検討	2007. 3. 20 ~ 2007. 3. 23	有	発表済
2006 波-発 213070123001	その他	応用光学懇談会講演会と 日本光学会関西講演会の 合同講演会	原山 卓久	2次元マイクロキャビティレー ザ: 波動カオスと半導体レーザ ジャイロ	2007. 1. 30	有	発表済
2006 波-発 213070123002	国内大会	第 8 回MEMS 技術研究 会	原山 卓久	半導体を用いたリングレザージ ャイロ	2007. 2. 20	有	発表済
2006 波-発 213070123003	国内研究 会	情報機構セミナー	原山 卓久	光ジャイロの半導体レーザへの 新展開	2007. 2. 28	有	発表済
2006 波-発 213070123004	国内大会	日本物理学会 2007 年春季 大会	篠原 晋, 原山 卓久	スタジアム型共振器における光 線・波動対応	2007. 3. 18 ~ 2007. 3. 21	有	発表済
2006 波-発 213070314001	国内大会	2007 年 春季 第 54 回応 用物理学関係連合講演会	竹花 広輝, 佐々木 敬彦, 中榮 穰, 福嶋 丈浩, 原山 卓久, 杉村 陽	擬似スタジアム型半導体レーザ ー内部の発振モードの観察	2007. 3. 27 ~ 2007. 3. 30	有	発表済
2006 波-発 213070328001	国際会議	The 7th Pacific Rim Conference on Laser and Electro-Optics (CLEO/Pacific Rim)	Muhan Choi , Takehiro Fukushima(ATR/Okayama.Pre .Univ) Takahisa Harayama	Alternate oscillations with phi-phase difference in Quasi-Stadium Laser Diode	2007. 8. 26 ~ 2007. 8. 31	有	発表予定
2006 波-発 213070312001	誌上	Physical Review Letters	Tomoko Tanaka, Mertina Hentschel, Takehiro Fukushima, Takahisa Harayama	Classical Phase Space Revealed by Coherent Light	2007. 1. 19	有	
2006 波-発 213070328002	国際会議	The 7th Pacific Rim Conference on Laser and Electro-Optics (CLEO/Pacific Rim)	Takahisa Harayama , Satoshi Sunada	Rotating optical microcavities	2007. 8. 26 ~ 2007. 8. 31	有	発表予定
2006 波-発 213070328003	誌上	Progress of Theoretical Physics Supplement	原山 卓久, 福嶋 丈浩 砂田 哲, 池田 研介(立 命館大理工学部)	Chaos and multi-attractors in fully chaotic 2D microcavity lasers		有	査読中

決裁番号	発表方法	雑誌名・国際会議名	発表者	タイトル	発表(予定)日	査読	状況
2006波-発 213070328005	国際会議	SPIE Optics East	Shuichi Tamura , Keizo Inagaki , Hiroyuki Noto , Takahisa Harayama	Experimental Investigation of Sagnac Beat Signals using Semiconductor Optical Amplifier (SOA)	2007.9.9 ~ 2007.9.12	有	発表予定
2006波-発 213070330001	誌上	Physical Review Letters	崔 武漢 , 福嶋 文浩 , 原山 卓久	Alternate oscillations in Multi-mode Lasing of Quasi-Stadium Laser Diode		有	査読中
2006波-発 213070330002	誌上	Physical Review E	原山 卓久 , 砂田 哲 , 宮坂 朋宏	Wavechaos in rotating optical cavities		有	査読中
2006波-発 213070330003	誌上	High quality lowest loss mode lasing in GaAs unstable resonator quasi-stadium laser diodes	Takehiro Fukushima , Tomoko Tanaka , Takahisa Harayama	Optics Letters		有	査読中