

キーワード：広帯域制御，フォトメカニカルアクチュエータ，電磁アクチュエータ，
干渉計位相制御，共振器長制御

1. 背景

光学の分野において，ミラーなどの光学素子の位置を正確かつ広帯域に制御する必要のある応用が多く存在する．共振器長制御や干渉計の位相制御などが，その一例である．これらの制御には，光の信号を機械的な応答へと変換させるものが必要となってくる．その役割を果たすのが，フォトメカニカルアクチュエータであり，広帯域制御のためには，高速に駆動出来なければならない．

高速に駆動するフォトメカニカルアクチュエータの例として， piezoelectric アクチュエータが挙げられる．しかし，広帯域制御に用いられる piezoelectric アクチュエータでも，40 kHz 以上のところに多くの共振が存在し，制御帯域は 10 kHz 以下に限られてしまう[1]．そこで，高調波発生のための共振器長制御に用いるフォトメカニカルアクチュエータとして，特別なボイスコイルモータが開発されている．このボイスコイルモータを使用した実験で，50 kHz の制御帯域を達成した例も存在する[2]．しかし，このボイスコイルモータは，とても複雑な構造をしていて製作するのは容易ではなく，利用することも難しい．

以上のことから，本研究では，容易に利用出来るシンプルな構造をしている広帯域制御のためのフォトメカニカルアクチュエータの作製を試みた．また，作製したアクチュエータを利用して，干渉計の位相制御と共振器長制御を行った．

2. 実験

(A) アクチュエータの作製・特性の評価

図 1 で示されているような構成をしている可動磁石型の電磁アクチュエータを作製した．コイルボビンとして，樹脂の棒を用いた．コイルを巻きやすくするためと磁石の位置での磁場を強めるために棒を 3 mm 程削り取ってある．また，コイルのインダクタンスとコイルを流れる電流によって生まれる磁場の大きさの関係を考慮して，40 kHz 付近で一番磁場が強くなるように，コイルの巻き数を決定した．フェライトコアは，磁場を強めるために挿入してある．ミラーの付いた磁石がエラストマーに接着されており，この磁石がコイルを流れる電流によって生まれる磁場の強さに比例して動くことになる．

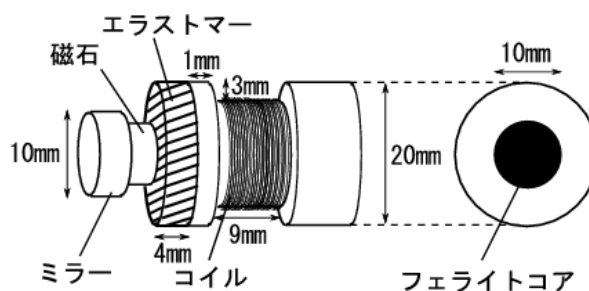


図 1：電磁アクチュエータ

次に，アクチュエータの特性の評価を行った．高周波数帯域(10 kHz-100 kHz)に共振が存在するかどうかを調べるために，作製したアクチュエータを用いてマイケルソン干渉計をミッドフリンジにロックし，周波数応答関数を測定した．その結果を図 2 に示す．この測定によって，100 kHz 以下に高い Q 値を持つ共振は存在しないことが分かった．

このアクチュエータを利用することで，どれほどの制御帯域が達成されるかを確かめるために，測

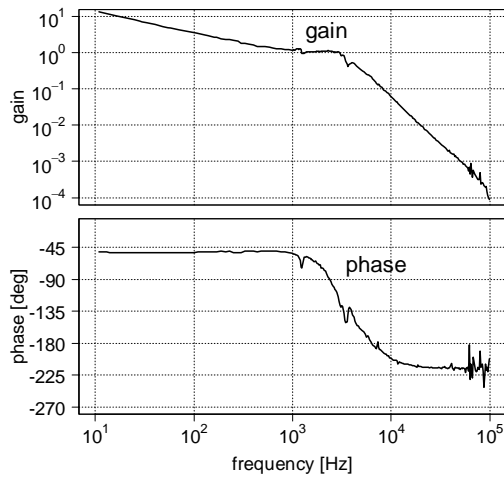


図 2：周波数応答関数

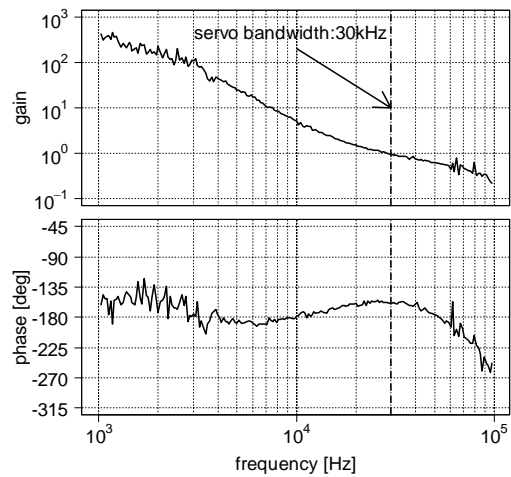


図 3：オープンループ伝達関数

定された周波数応答関数を参考にして、回路を作製した。全体のシステムのオープンループ伝達関数を図 3 に示す。コイルのインダクタンスの影響で高周波では、制御帯域が限られているが、30 kHz もの広い制御帯域を得ることが出来た。

アクチュエータの安定性を評価するために、ミラーの角度揺れと長期安定度を測定した。多少の角度揺れは存在したが、干渉計を制御するためには影響を及ぼさない程度であった。長期安定度の測定として 4 日間干渉計をミッドFRINGE にロックし続けた。温度変化によるミラーの位置のドリフトが少し見られたが、安定に長期駆動出来ることを確認した。加えて、長期駆動による干渉計のビジビリティの悪化も見られなかった。これらのことから、作製したアクチュエータは、安定性も備えていることが分かった。

(B) アクチュエータの応用 –干渉計位相制御–

マイケルソン干渉計の位相制御を応用することによって、作製したアクチュエータを用いて、レーザ増幅器が生み出す位相雑音の補償を行った。位相雑音は広帯域に渡って生まれており、この位相雑音を補償するためには、高速に駆動出来るアクチュエータが必要となる。

マイケルソン干渉計の片腕に増幅器を入れて、その腕のエンドミラーをアクチュエータとする。増幅器の無い方の腕を基準としてアクチュエータを動かす、生まれる位相雑音を補償するというシステムとなっている。制御信号を取得するために、電気光学変調器を用いている。制御した結果を図 4 に示す。このシステムによる位相雑音補償では、基準となっている腕自体が揺らいでいたり、位相雑音を測定するための光学系にも揺らぎが存在したりするために、大きな位相雑音補償を確認することは出来ていない。しかし、このシステムで位相雑音を低減出来るということを示すことが出来、このシステムに作製したアクチュエータが利用可能である。

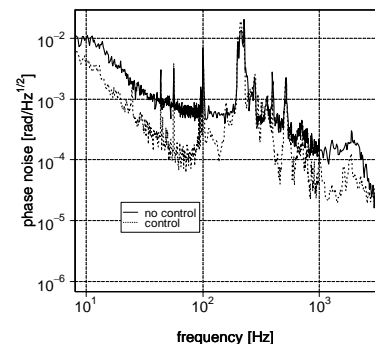


図 4：位相雑音補償の結果

(C) アクチュエータの応用 –共振器長制御–

広帯域制御が必要である応用として共振器長制御が挙げられるので、実際に広帯域に共振器長が制

御出来るかを試みた。共振器として、図5で表されるようなモードクリーナー用のリング型共振器を作製した。モードクリーナーとは、モード整形のために使われるもので、高次モードを除去し基本モードのみを透過させる共振器である。

アクチュエータを動かすことによって共振器長を変化させることが出来るが、その際にアクチュエータにヒステリシスが存在することが分かった。共振器長をリニアに動かして、リング共振器からの透過光を見るが、アクチュエータの伸張量は、ヒステリシスを考慮しなければならない。

共振器に入射するレーザーのビーム径を測定して、モードマッチングを行った。リング共振器からの反射光の位相がS偏光とP偏光で異なることを利用して、作製したアクチュエータで、基本モードの透過が最大になる点にロックすることを試みた。このシステムのオープンループ伝達関数を図6に示す。10 kHzを超える広い制御帯域を得ることが出来、共振器長制御にも作製したアクチュエータは有用であると言える。

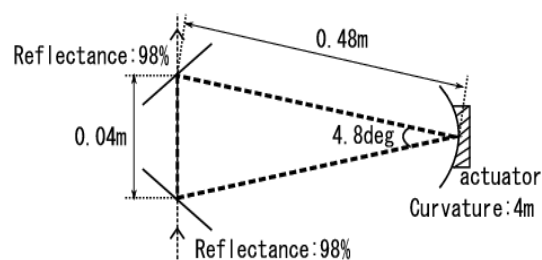


図5：リング型共振器

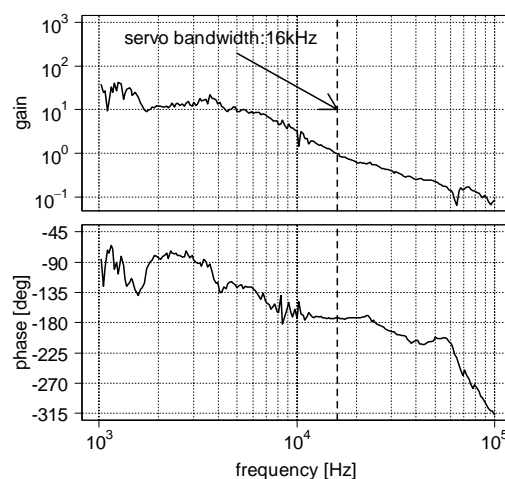


図6：共振器長制御のオープンループ伝達関数

3. 結論

広帯域制御のために、新しく高速に駆動出来るフォトメカニカルアクチュエータを作製した。制御帯域 30 kHz の広帯域な制御を達成出来たことに加えて、安定に動作されることも確認出来た。実際の応用として、干渉計の位相制御や共振器長制御に有用であることが分かった。このように、作製した電磁アクチュエータは、広帯域制御に広く利用出来ると言える。

4. 参考文献

- [1] K. Takeno et al., Opt. Lett., **30**, 2110 (2005).
- [2] M. Oka et al., IEEE J. Sel. Top. In Quantum Electron., **1**, 859 (1995).

5. 論文・学会発表

- 1. K. Machida, S. Moriwaki, and N. Mio, "High-Speed Mechanical Actuator for Precision Optical Path Length Control", Jpn. J. Appl. Phys., **48**, 010212 (2009).
- 2. 第 68 回応用物理学会学術講演会「LD 励起 Nd:YAG ロッドを用いた増幅器の位相補償」
- 3. 第 55 回応用物理学関係連合講演会「LD 励起 Nd:YAG ロッドを用いた増幅器の位相雑音補償」(ポスター発表)
- 4. 第 69 回応用物理学会学術講演会「広帯域制御のためのフォトメカニカルアクチュエータ」