

光ディスク装置の対物レンズアクチュエータ
における駆動系の高精度化

2015 年度

木村 勝彦

学位論文 博士（工学）

光ディスク装置の対物レンズアクチュエータ
における駆動系の高精度化

2015 年度

慶應義塾大学大学院理工学研究科

木村 勝彦

目 次

1. 緒 論	8
1.1 研究の背景	8
1.1.1 光ディスクの概要と特徴	8
1.1.2 光ディスク装置の基本構成	9
1.1.3 光ディスク装置の記録容量と転送速度の推移	11
1.1.4 光ディスク装置の機構系における技術課題	13
1.2 従来の研究	16
1.2.1 小型・薄型化	16
1.2.2 駆動感度	17
1.2.3 振動特性	18
1.2.4 対物レンズ光軸精度	21
1.3 本研究の目的および概要	22
2. 対物レンズアクチュエータの構造と課題	24
2.1 光ディスク装置の構成と概要	24
2.2 対物レンズアクチュエータの構造	26
2.3 対物レンズアクチュエータに求められる特性	29
2.3.1 光ディスクの高速回転に対応する加速度感度	29
2.3.2 制御帯域拡大を可能とする振動特性	36
2.3.3 高密度化に対応する対物レンズ傾きの抑制	42
2.4 結言	44
3. 電力加速度感度を用いた駆動感度の最適化	46
3.1 緒言	46
3.2 電流加速度感度と電圧加速度感度	46
3.3 電力加速度感度の定義と最適化	49
3.4 電力加速度感度によるコイル最適化の適用例	53
3.4.1 ハーフハイト型におけるコイルのパラメータ検討	53
3.4.2 加速度感度の測定結果	61
3.5 結言	64
4. 粘弾性体のシリコンゲルを含む主共振特性の解析	66
4.1 緒言	66
4.2 粘弾性減衰材を含む主共振特性の定式化	66
4.2.1 シリコンゲルの複素弾性率の周波数特性	66
4.2.2 サスペンションワイヤ支持系の振動解析モデル	69
4.2.3 サスペンションワイヤ支持系の周波数応答特性の導出	72
4.3 計算結果と測定結果の比較	74
4.4 シリコンゲルの複素弾性率と取り付け構造による主共振特性への影響	76
4.5 結言	80

5. 高次共振モードと振幅抑制	82
5.1 緒言	82
5.2 高次共振モード	82
5.3 振動モードと駆動力分布を考慮した高次共振振幅の抑制手法	85
5.4 適用結果	93
5.4.1 DVD用ウルTRASリム型対物レンズアクチュエータ	93
5.4.2 DVD用ハーフハイト型対物レンズアクチュエータ	103
5.4.3 BD用スリム型対物レンズアクチュエータ	105
5.4.4 BD用ハーフハイト型対物レンズアクチュエータ	110
5.5 結言	114
6. 並進動作時の対物レンズ傾きの低減	116
6.1 緒言	116
6.2 コイルで発生するローリングモーメント	116
6.2.1 対物レンズ傾きの定式化	116
6.2.2 磁束密度分布とローリングモーメント	118
6.3 マグネットとコイルの配置によるローリングモーメント低減構造	122
6.3.1 従来構造	122
6.3.2 トラッキングコイルのクロス配置	123
6.3.3 インナーマグネット配置	130
6.4 適用結果	133
6.4.1 静的傾きの低減	133
6.4.2 ローリング共振時の動的傾きの低減	136
6.5 結言	141
7. 結 論	143
7.1 結果の要約	143
7.2 総括	146
参考文献	147
著者論文目録	153
謝 辞	155

記号

記号は各章ごとに規定する.

第1章

- d : 光スポットの直径
- λ : レーザ光源の波長
- NA : 対物レンズの開口数 (Numerical Aperture)
- Δz : 理想像点からフォーカシング方向に沿った像点の移動量
- W_f : デフォーカス収差
- θ : 光ディスクの傾き
- W_c : コマ収差
- t_d : 光ディスクの透過層の厚さ
- n : 光ディスクの屈折率

第2章

- $I_{(DC)}$: 直流通電電流
- $V_{(DC)}$: 直流印加電圧
- d : 可動部の変位
- $S_{I(DC)}$: 電流静的感度
- $S_{V(DC)}$: 電圧静的感度
- $I_{(AC)}$: 交流電電流
- $V_{(AC)}$: 交流印加電圧
- α : 可動部の加速度
- $S_{I(AC)}$: 電流加速度感度
- $S_{V(AC)}$: 電圧加速度感度
- R : コイルの抵抗
- Z : コイルのインピーダンス
- f_0 : 主共振周波数
- $\alpha_{(DC)}$: 変位 d を加速度に換算した値
- f_d : 光ディスクの回転周波数
- a : 光ディスクの面振れ量あるいはトラック位置変動量
- $\alpha_{(AC)}$: 面振れ量あるいはトラック位置変動量と光ディスクの回転による加速度
- $\alpha_{(DC)0}$: 対物レンズのオフセット量に相当する静的領域における必要加速度
- $\alpha_{(AC)0}$: 面振れ量とトラック位置変動量にマージンを加味した加速度領域における必要加速度
- α_0 : 静的領域と加速度領域を合わせた全体の必要加速度
- S_W : 電力加速度感度

- S_{W0} : 電力加速度感度の目標値
- W_0 : 許容消費電力
- L_c : コイルのインダクタンス
- S_{I0} : 電流加速度感度の目標値
- S_{V0} : 電圧加速度感度の目標値
- f_c : 対物レンズの位置決め制御系のゲインクロス周波数
- f_a : 対物レンズの位置決め制御系におけるアクチュエータ特性でゲインが 0 dB となる周波数
- e : 許容追従誤差

第3章

- S_I : 電流加速度感度
- S_V : 電圧加速度感度
- I : コイルへの通電電流
- V : コイルへの印加電圧
- $|Z|$: コイルのインピーダンスの大きさ
- R : コイルの抵抗
- F : コイルで発生する力
- $B(l)$: コイルに作用する磁束密度
- dl : コイルの微小部分
- L : コイルの全長
- \bar{B} : コイルに作用する磁束密度の平均値
- m : 可動部の質量
- m_c : コイルの質量
- m_0 : コイル以外の質量
- ρ : コイル材質の密度
- ϕ : コイルの線径
- r : コイル材質の比抵抗
- S_W : 電力加速度感度
- m_c^* : $m_c / m_0 = 1$ となるコイル質量
- m_0^* : $m_c / m_0 = 1$ となるコイル以外の質量
- S_{WFO} : フォーカシング方向の電力加速度感度
- S_{WTR} : トラッキング方向の電力加速度感度
- m_{cFO} : フォーカシングコイルの質量
- m_{cTR} : トラッキングコイルの質量
- \bar{B}_{FO} : フォーカシングコイルに作用する磁束密度の平均値
- \bar{B}_{TR} : トラッキングコイルに作用する磁束密度の平均値

k_1 : S_{WTR} と S_{WFO} の比

k_2 : \bar{B}_{TR} と \bar{B}_{FO} の比

第4章

G : シリコーンゲルの複素弾性率

G' : シリコーンゲルの貯蔵弾性率

G'' : シリコーンゲルの損失弾性率

f : 周波数

a : 貯蔵弾性率の係数

G_0 : 静的貯蔵弾性率

b : 損失弾性率の係数

q : 損失弾性率の乗数

k_w : サスペンションワイヤ全体の等価ばね定数

c : 粘性減衰係数

m : 可動部の質量

L : サスペンションワイヤの全長

k_g : サスペンションワイヤに付加されるシリコーンゲル全体の等価ばね定数

x_g : サスペンションワイヤ固定端からシリコーンゲルの取り付け位置までの距離

z : 可動部の変位

F_s : 可動部に作用する静的荷重

E : サスペンションワイヤの弾性率

I : サスペンションワイヤの断面二次モーメント

z_g : シリコーンゲル取り付け位置におけるサスペンションワイヤの変位

z_s : 可動部（サスペンションワイヤ先端）の変位

k_{w1} : サスペンションワイヤ1本当たりのばね定数

ϕ : サスペンションワイヤの直径

n : サスペンションワイヤの本数

w : サスペンションワイヤの軸方向におけるシリコーンゲルの付加長さ

h : サスペンションワイヤの中心から減衰材保持部の壁までの距離

k_{g1} : サスペンションワイヤ1本当たりのシリコーンゲルのばね定数

k'_g : サスペンションワイヤ全体の等価ばね定数の実数項

k''_g : サスペンションワイヤ全体の等価ばね定数の虚数項

d_1 : サスペンションワイヤの全長に対するシリコーンゲルの取り付け位置までの距離の比

- d_2 : 可動部の変位に対するシリコーンゲルの取り付け位置での変位の比
- A : サスペンションワイヤ支持系の周波数応答特性における振幅
- θ : サスペンションワイヤ支持系の周波数応答特性における位相
- u : シリコーンゲルの取り付け構造に関する係数
- f_0 : シリコーンゲルの影響を含む主共振周波数
- f_n : サスペンションワイヤ単独の場合の固有振動数
- Q_0 : 共振係数

第5章

- m : 質点の質量
- k : ばねの剛性
- c : 粘性減衰係数
- ζ : 減衰比
- f_n : 固有振動数
- F : 駆動力
- Z : 変位応答
- j : 多自由度系の振動モードの次数
- a : 駆動力の作用点 ($a = a_1, a_2, \dots, a_n$)
- F_a : 駆動点 a に作用する駆動力
- b : 応答点
- Z_{jb} : j 次振動モードの点 b の変位応答
- ϕ_{ja} : 駆動点 a の j 次振動モード成分
- ϕ_{jb} : 応答点 b の j 次振動モード成分
- k_j : j 次モード剛性
- f_j : j 次固有振動数
- ζ_j : j 次モード減衰比
- $F_a \phi_{ja}$: 駆動点 a における駆動力成分
- Z_b : N 次までの振動モードを含めた点 b の周波数応答
- DF : フォーカシング駆動力が作用する駆動点の間隔

第6章

- M : ローリングモーメント
- θ_s : 対物レンズの静的傾き

- L_w : サスペンションワイヤの固定位置から支持中心までの距離
 k_{wl} : サスペンションワイヤ1本当たりのばね定数
 n : サスペンションワイヤの本数
 f : 周波数
 f_r : ローリングモードの固有振動数
 ζ : 減衰比
 Θ_D : 対物レンズの動的傾き振幅
 B_x : x 方向の磁束密度
 B_y : y 方向の磁束密度
 F : 駆動力
 I : 電流
 t : コイル線分の変位量
 Δz : フォーカシング方向への可動部の変位量
 Δy : トラッキング方向への可動部の変位量
 s : トラッキングコイルとマグネットが対向して重なる部分の長さ
 w_M : インナーマグネットの幅
 M_{0TR} : トラッキング方向の単位駆動力当たりのローリングモーメント
 M_{0FO} : フォーカシング方向の単位駆動力当たりのローリングモーメント
 M_0 : 単位駆動力当たりのローリングモーメント
 F_{TR} : トラッキング方向の駆動力
 F_{FO} : フォーカシング方向の駆動力
 θ_{STR} : トラッキング駆動力による対物レンズの静的傾き
 θ_{SFO} : フォーカシング駆動力による対物レンズの静的傾き
 M_{0TRG} : トラッキング方向の単位駆動力に対する重心回りのローリングモーメント
 Y : トラッキング方向の変位振幅
 f_0 : 主共振周波数
 $H(f)$: 対物レンズの動的傾き振幅の周波数依存成分

1. 緒 論

1.1 研究の背景

1.1.1 光ディスクの概要と特徴

レーザ光を用いて媒体に情報の記録再生を行う光ディスクは、1970年代から研究開発が進められ、1982年に音楽用のコンパクトディスク（CD：Compact Disc）が登場して普及が始まった[1][2]。その後、コンピュータ用のCD-ROM（Compact Disc Read Only Memory）が1986年に、1回だけ記録可能なCD-R（Compact Disc Recordable）が1989年に、書き換え可能なCD-RW（Compact Disc Rewritable）が1996年に発売され、光ディスク装置がコンピュータの外部記録装置として広く使用されるようになった。CDの記録容量650 MB（B：Byte）に対して、記録容量を4.7 GBに高めたDVD（Digital Versatile Disc）が1996年に製品化され[3][4]、さらに記録容量を25 GBに高めたBD（Blu-ray Disc）が2002年に規格化、2006年に製品化された[5][6]。2010年にはBDの記録層を増やしたBDXLが規格化され、現在では1枚当たり3層で100 GB、4層で128 GBのディスクが実用化されている[7][8]。

情報の記録再生装置としては、光ディスク装置の他に、半導体メモリ、磁気ディスク装置、磁気テープ装置などがあり、複数の装置が組み合わされて情報ストレージシステムとして使用されている[9][10]。それぞれの特徴を表1.1および以下に記す。

半導体メモリは、上記デバイスの中で転送速度が最も速く、コンピュータの一次メモリとして使用されている。また、小型であることからデータの受け渡しにも使用されている。価格が高いことと記録容量が小さいことが課題であったが、半導体製造技術の進展により、低価格化と大容量化が進んでいる。

磁気ディスク装置は、大容量で転送速度が速いことから、パーソナルコンピュータから大型計算機や長期保存用のデータアーカイブ装置まで、多くの情報ストレージシステムの中心的なデバイスとして使用されている。ただし、磁気ディスク装置では、ディスクが回転軸に固定されていることと、ディスクと記録生素子の動作距離が数ナノメートルと狭いことから、ディスクを装置から取り出して交換することができない。したがって、記録容量当たりの価格として見ると、情報が記録されているディスクだけではなく、磁気ディスク装置全体が含まれるため、媒体交換が可能な磁気テープや光ディスクに比べると価格が高くなる。

磁気テープ装置は、媒体交換が可能で記録容量当たりの価格が低いことから、データアーカイブ装置の中心として使われている。テープ形状のため、任意の位置にアクセスするのに時間がかかることと、重なっているテープの固着を防止するために、記録再生を行わないときでも定期的に巻き取り動作を行わなければならないことが短所である。

光ディスクの特徴は、媒体をプレス加工で容易に複製できるので低価格で大量配布が可能なこと、非接触で記録再生を行うため傷や塵埃に強く、媒体交換が可能なこと、再生専用・1回記録用・書き換え用の3種類の形態があること、が挙げられる。

これらの中で、非接触記録再生による媒体交換が可能なことが、光ディスクの最も大きな特徴である。レーザ光を集束する対物レンズと光ディスクが1 mm程度離れていることにより、対物レンズや光ディスクの表面上の傷や塵埃の影響を受けにくく、開放空間中での光ディスクの交換を可能にしている。磁気テープと同様に媒体交換が可能であるため、1台の装置で扱う光ディスクの枚数が増えるほど、記録容量当たりのコストを下げることができる。

また、非接触であることから摩擦、摩耗の影響が無く、磁気記録と異なり外部磁場に影響されないため、情報の長期保存性に優れ、今後はデータアーカイブ用としての拡大が期待されている。さらに、1回だけ記録できるという点を、書き換えができないという利点と捉えて、公文書等の記録媒体として用いられている。

このように光ディスク装置は、民生用途としては媒体の配布性と可換性を生かして普及し、データアーカイブ用途としては低価格と長期保存性により、磁気テープ装置と磁気ディスク装置の中間的役割を担うデバイスとして期待されている。

表 1.1 各種ストレージの比較

	半導体メモリ	磁気ディスク	磁気テープ	光ディスク
記録容量	小～中	大	大	中
転送速度	速	速	速	遅
アクセス時間	速	速	遅	中
記録容量当たりの価格	高	高	安	安
媒体交換	可・不可	不可	可	可
長期保存性	低	低	低	高

1.1.2 光ディスク装置の基本構成

光ディスク装置の基本構成を図 1.1 に示す。光ディスク装置は、光ディスクをスピンドルモータで回転させながら、送りモータで光ピックアップを光ディスクの半径方向に移動させ、光ディスク上にレーザ光を集束して情報の記録や再生を行う[11]。光ピックアップは、半導体レーザからの光を対物レンズによって光ディスクに集束し、光ディスクからの反射光を検出する光検出器に導く光学系と、対物レンズをその光軸方向であるフォーカシング方向と光ディスクの半径方向であるトラッキング方向の2方向に駆動する対物レンズアクチュエータで構成される。

光ディスクを交換できることが光ディスク装置の特徴である。しかし、これはスピンドルモータへの光ディスクの取り付けにばらつきを生じさせる要因でもある。媒体が固定された磁気ディスク装置と比べると、スピンドルモータへの光ディスクの取り付けばらつきは、より大きな値を考慮しなければならない。図 1.2 に示すように、スピンドルモータへの光ディスクの取り付け角度ずれによって、光ディスクの回転時に面振れが生じ、図 1.3 に示すように、スピンドルモータの回転中心と光ディスクの記録トラック中心とのずれである偏心によって、光ディスクの回転時にトラック位置変動が生じる。対物レンズアクチュエータは、光ディスクの面振れとトラック位置変動に対物レンズを追従させるフォーカシング動作とトラッキング動作を行う。対物レンズの動作範囲は、フォーカシング方向に±1 mm 程度、トラッキング方向に±0.5 mm 程度が必要であり、この動作範囲を実現するため、マグネットとコイルによる電磁駆動方式が用いられている。

光ディスク上の目標トラックと光スポットの相対位置ずれは、光ピックアップの光学系と光検出器でフォーカシングエラー信号とトラッキングエラー信号として検出される。これらの制御信号に基づいて対物レンズアクチュエータによって対物レンズを駆動することで、光スポットの位置決め制御が行われる。

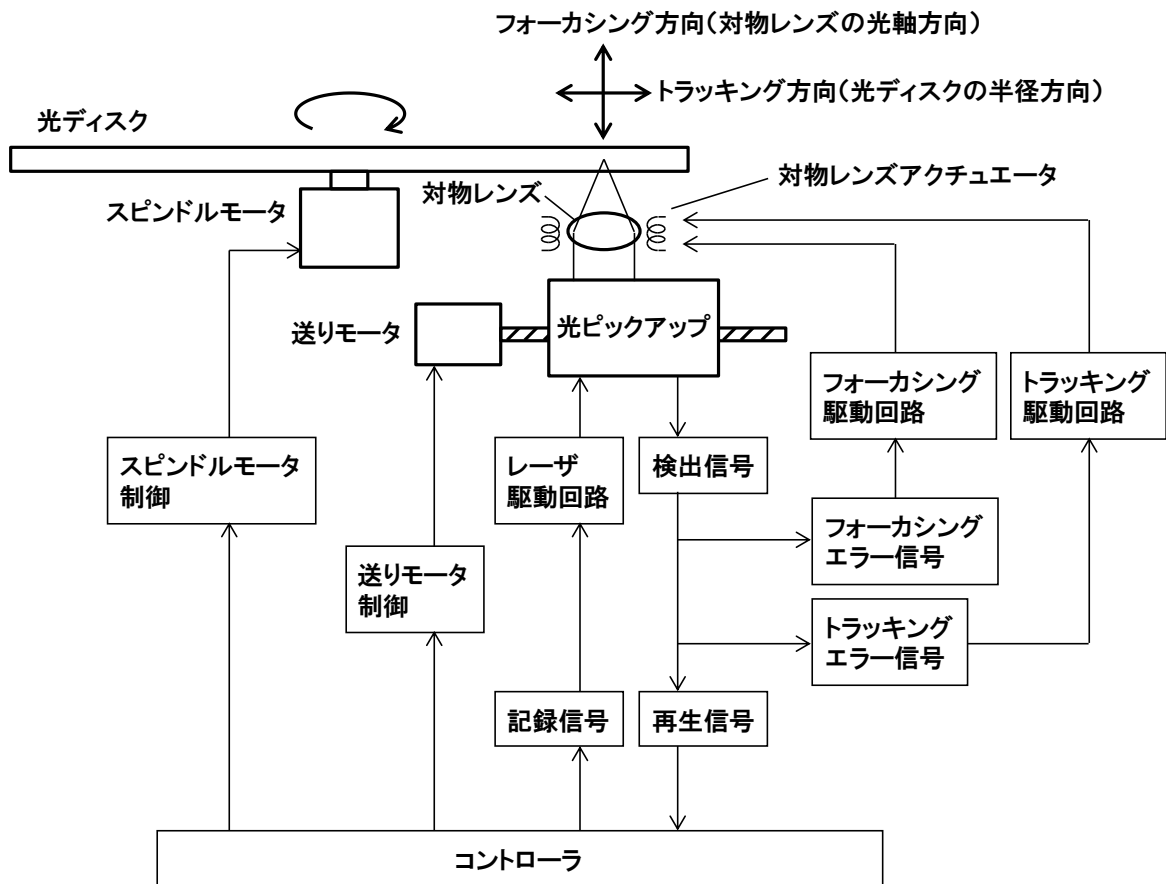


図 1.1 光ディスク装置の基本構成

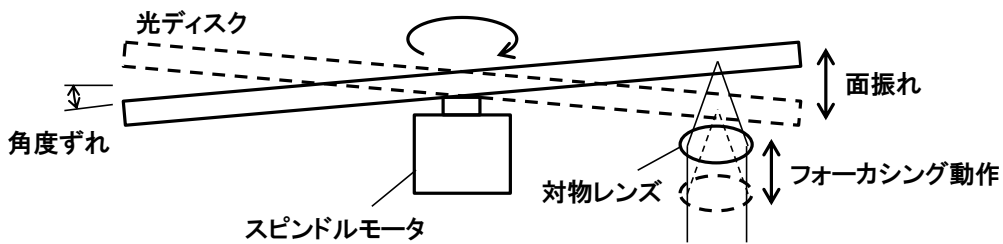


図 1.2 光ディスクの面振れと対物レンズアクチュエータのフォーカシング動作

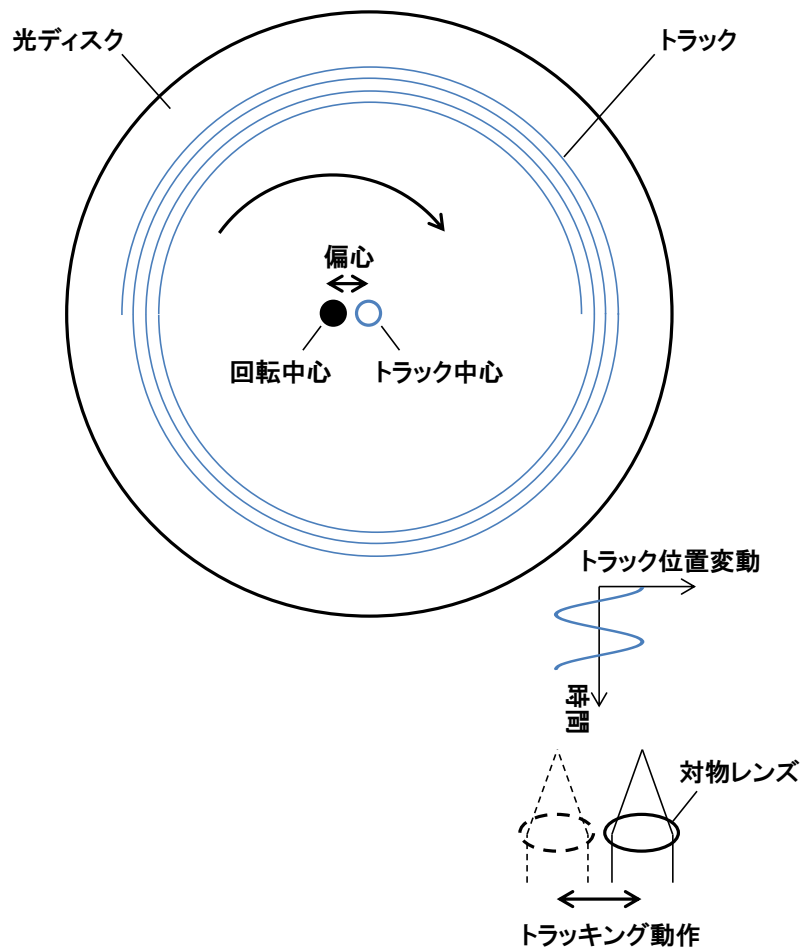


図 1.3 光ディスクのトラック位置変動と対物レンズアクチュエータのトラッキング動作

1.1.3 光ディスク装置の記録容量と転送速度の推移

光ディスク装置の重要な性能指標は、記録容量と転送速度である[7][8][12]-[15]。記録容量の向上は、光ディスク上に集束される光スポットの直径を小さくすることが基本である。光スポットの直径 d は、レーザ光源の波長 λ と、対物レンズの開口数 NA (Numerical Aperture) を用いて、

$$d = 1.22 \frac{\lambda}{NA} \quad (1.1)$$

と表される (図 1.4) [16]。この式は、光スポットの直径を小さくするためには、レーザ光源の波長を短く、対物レンズの開口数を大きくすれば良いことを示している。

CDでは半導体レーザの波長 780 nm, 対物レンズの NA 0.45として、光スポットの直径 d は $2.1 \mu\text{m}$ となる。同様に DVD では波長 650 nm, NA 0.6として d は $1.3 \mu\text{m}$, BD では波長 405 nm, NA 0.85として d は $0.58 \mu\text{m}$ と微小化されてきた。このような光スポットの微小化と、データ変調方式の効率化および多層化によって、光ディスクの記録容量は前記のように、CD の 650 MB から BDXL4 層タイプの 128 GB まで高められている。さらに記録層を 16 層に増やした光ディスク[17]-[19]や、ホログラム技術を使った体積型の記録方式[20]-[25]の研究開発が進められており、今後も記録容量の向上は続く見込みである。

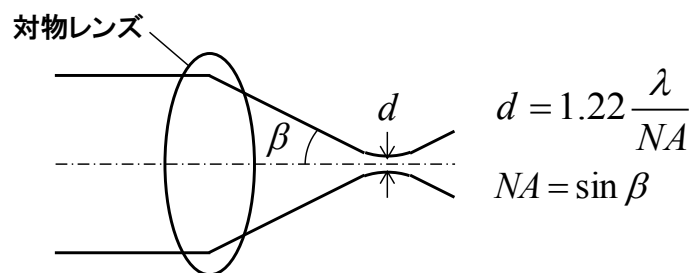


図 1.4 対物レンズで集光される光スポットの直径と開口数・波長の関係

表 1.2 に CD, DVD, BD における記録容量に関わる諸元と転送速度を, 図 1.5, 図 1.6 に記録容量と転送速度の推移を示す. 転送速度は, 回転する光ディスクに情報を記録する, あるいは読み取る速度であり, 基本的には光ディスクの回転数に依存する. CD の標準速 (1 倍速) における光ディスクの回転数は 3.8 Hz であり, デスクトップ用のパーソナルコンピュータに搭載されるハーフハイト型と呼ばれる光ディスク装置では, 光ディスクの回転数は 200 Hz 以上に達する. これにより CD の転送速度は, 1 倍速の 0.15 MB/s から 52 倍速の 7.8 MB/s に向上している. DVD, さらに BD では回転方向に沿った記録密度が上がっていることから, 同じ回転数でも転送速度はより速くなる. DVD では 1 倍速の 1.4 MB/s から 24 倍速の 33 MB/s に, BD では 1 倍速の 4.5 MB/s から 16 倍速の 72 MB/s まで高められている.

表 1.2 CD, DVD, BD の記録容量に関わる諸元と転送速度

		CD	DVD	BD
レーザ光源の波長	nm	780	650	405
対物レンズの NA		0.45	0.6	0.85
光スポット径	μm	2.1	1.3	0.58
記録容量	GB	0.65	4.7 (1 層) 8.5 (2 層)	25 (1 層) 50 (2 層) 100 (3 層) 128 (4 層)
トラックピッチ	μm	1.6	0.74	0.32
最短マーク長	μm	0.8	0.4	0.15
光透過層の厚さ	mm	1.2	0.6	0.1
光ディスク回転数	Hz	3.8 (1 倍速) 200 (52 倍速)	9.6 (1 倍速) 230 (24 倍速)	13.5 (1 倍速) 216 (16 倍速)
転送速度	MB/s	0.15 (1 倍速) 7.8 (52 倍速)	1.4 (1 倍速) 33 (24 倍速)	4.5 (1 倍速) 72 (16 倍速)

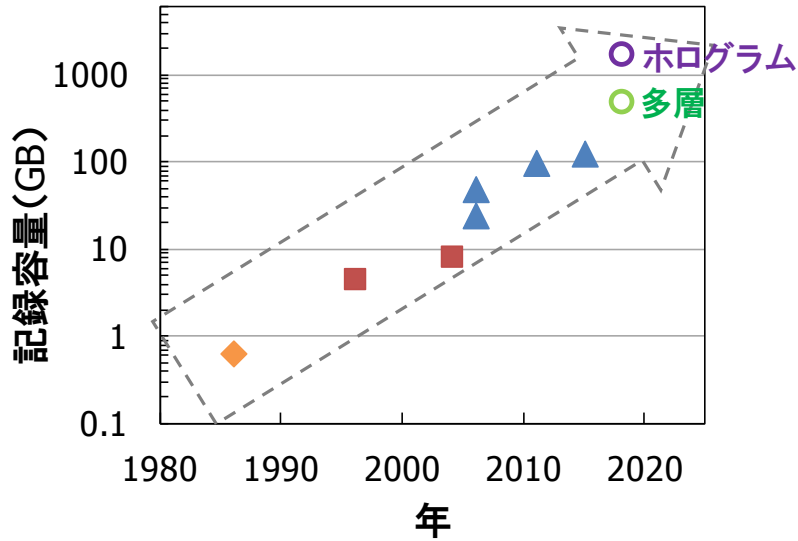


図 1.5 光ディスク装置の記録容量の推移

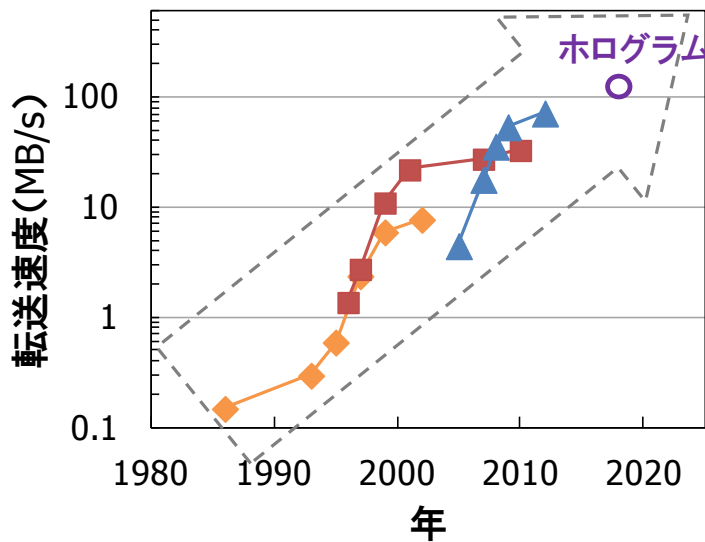


図 1.6 光ディスク装置の転送速度の推移

1.1.4 光ディスク装置の機構系における技術課題

光ディスクの記録密度を高めるために、式 (1.1) で示される光スポットの微小化が進められてきた。一方で、対物レンズの開口数 NA が大きくなると、光学系の収差（理想像点からのずれ）の影響[26]-[28]が顕著になり、機構系としては光スポットの位置決め精度を向上する必要がある。

光ディスク面内であるトラッキング方向については、トラックピッチの微小化に比例して位置決め精度を高める必要がある。

フォーカシング方向について、理想像点からフォーカシング方向に沿った像点の移動量 Δz に対するデフォーカス収差 W_f は、

$$W_f = \frac{\Delta z (NA)^2}{2\lambda} \quad (1.2)$$

と表され[28][29], NA の2乗に比例して増加する. 同じ焦点ずれ量 Δz に対するデフォーカス収差は, DVDではCDの約2倍, BDではCDの約7倍増加しやすい. その分だけ焦点ずれ量を抑制する必要がある.

また, 光ディスクの傾き θ によって生じるコマ収差 W_c は, 光ディスクの透過層の厚さを t_d , 光ディスクの屈折率を n として,

$$W_c = \frac{t_d(n^2 - 1)n^2 \sin \theta \cos \theta}{2(n^2 - \sin^2 \theta)^{5/2} \lambda} (NA)^3 \propto \frac{t_d \theta (NA)^3}{\lambda} \quad (1.3)$$

と表され[28][29], NA の3乗に比例して増加する. 光透過層の厚さ t_d を一定とした場合, 光ディスクの傾き θ に対するコマ収差は, DVDではCDの約3倍, BDではCDの約13倍となり, 光ディスクの傾きに対する影響が著しく増加する. この影響を低減するため, 光透過層の厚さ t_d をCDの1.2 mmからDVDでは0.6 mm, BDでは0.1 mmとしている. それでもDVDのコマ収差はCDの1.4倍, BDでは1.1倍となり, 良好な記録再生を行うためには光ディスクと対物レンズの相対傾きを許容値以下に抑制することが必要である.

次に, 転送速度の向上に関する技術課題を記す. 転送速度は, 光ディスクの円周方向の記録密度と光ディスクの回転数で決まる. したがって, 転送速度の向上は機構面では, 光ディスク回転数の高速化によってなされる. 回転する光ディスクの面振れとトラック位置変動に追従するために対物レンズアクチュエータで発生しなければならない加速度は, 光ディスクの回転数の2乗と, 面振れ量あるいはトラック位置変動量の積に比例する. したがって, 高倍速になるほど対物レンズアクチュエータで発生可能な加速度を大きくする必要がある[30]-[32]. 対物レンズアクチュエータの加速度の指標は, 駆動コイルへの通電電流あるいは印加電圧に対する加速度の大きさを示す加速度感度が用いられる[33]. 加速度感度の向上は転送速度の向上に直接関連しており, 特に重要な課題である. 加速度感度を向上するには, 駆動コイルで生じる駆動力を大きくすること, 磁気回路の効率を高めること, アクチュエータの可動部の軽量化が必要である.

また, 光ディスクの回転数の高速化にともなって, 位置決め制御系の帯域を拡大する必要がある[34]-[39]. DVDやBDの高倍速装置における制御系のゲインクロス周波数は, 装置によって違いはあるものの7~13 kHzとされる. このような制御系を実現するためには, 対物レンズアクチュエータの周波数応答特性において, 可動部のねじれモードや曲げモードとして生じる高次共振の周波数をゲインクロス周波数の数倍以上に高めることと, その共振振幅を低減することが求められる.

さらに, 光ディスク装置の薄型化の要求について記す. 装置高さは開発当初のフルハイトと呼ばれる81 mmであったものが, デスクトップ用パーソナルコンピュータに搭載されるハーフハイト型の41 mm, ラップトップ用パーソナルコンピュータに搭載されるスリム型の12.7 mmとウルトラスリム型の9.5 mmに薄型化されてきた[40]-[42]. さらに薄型の5 mm厚の装置も発表されている[43]-[46]. 図1.7にハーフハイト型, スリム型, ウルトラスリム型の光ディスク装置の外観を示す.

装置が薄くなると, 構造の剛性低下により振動が生じやすくなり, 駆動機構の寸法制約により駆

動力が確保しづらくなる。しかし、薄型装置であっても記録密度の向上と転送速度の向上は求められる。したがって、薄型の光ディスク装置であっても、光ディスクの高密度化に対応するために、光スポットの位置決め精度を向上し、対物レンズの光軸精度を高めること、転送速度の向上を可能とするために、光ディスク回転数の高速化とそれに追従する対物レンズアクチュエータの高駆動感度化、および広帯域な制御系を実現する振動特性が求められる。



(a) ハーフハイト型 (装置高さ 41 mm)



(b) スリム型 (装置高さ 12.7 mm)



(c) ウルトラスリム型 (装置高さ 9.5 mm)

図 1.7 ハーフハイト型・スリム型・ウルトラスリム型光ディスク装置の外観

1.2 従来の研究

前節で示した光ディスク装置の対物レンズアクチュエータに関する課題をまとめると、構造の小型・薄型化、光ディスクの高速回転に対応した高駆動感度化と 10 kHz 以上の帯域にわたって安定した振動特性、光ディスクの高密度化に対応した光ディスクと対物レンズの相対傾きの低減である。これらの課題に対する従来の研究状況を以下に記す。

1.2.1 小型・薄型化

光ディスク装置の高さ方向の概略構成の例としてウルTRASリム型の高さ配分を図 1.8 に示す。光ディスクに対して間隔（ワーキングディスタンス）を取って対物レンズを設定し、対物レンズの下にレーザ光を反射させる立ち上げミラーが配置される。対物レンズと立ち上げミラーは、対物レンズのフォーカシング方向の動作範囲分だけ離れている。半導体レーザや光検出器などの光学部品および信号処理回路などは、光ディスクと立ち上げミラー底部までの間に配置される。

対物レンズによって光ディスク上にレーザ光を集束するという光ディスク装置の基本構成においては、対物レンズに入射する光束径が、小型・薄型化に関わる主要因となる。対物レンズの NA が規格で決められているので、光ディスクと対物レンズのワーキングディスタンスをいくりにするかによって光束径は決まる。

現在市販されている装置で最も薄いウルTRASリム型では、ワーキングディスタンスは 0.5~0.9 mm 程度である。光ディスクの特徴である媒体交換可能なことを生かすためには、ワーキングディスタンスをある程度離しておく必要があり、これまでに製品化された装置においては、基本構成を踏襲しつつハーフハイト型からスリム型、ウルTRASリム型へと小型・薄型化が図られてきた [13][14][36][40]-[42]。

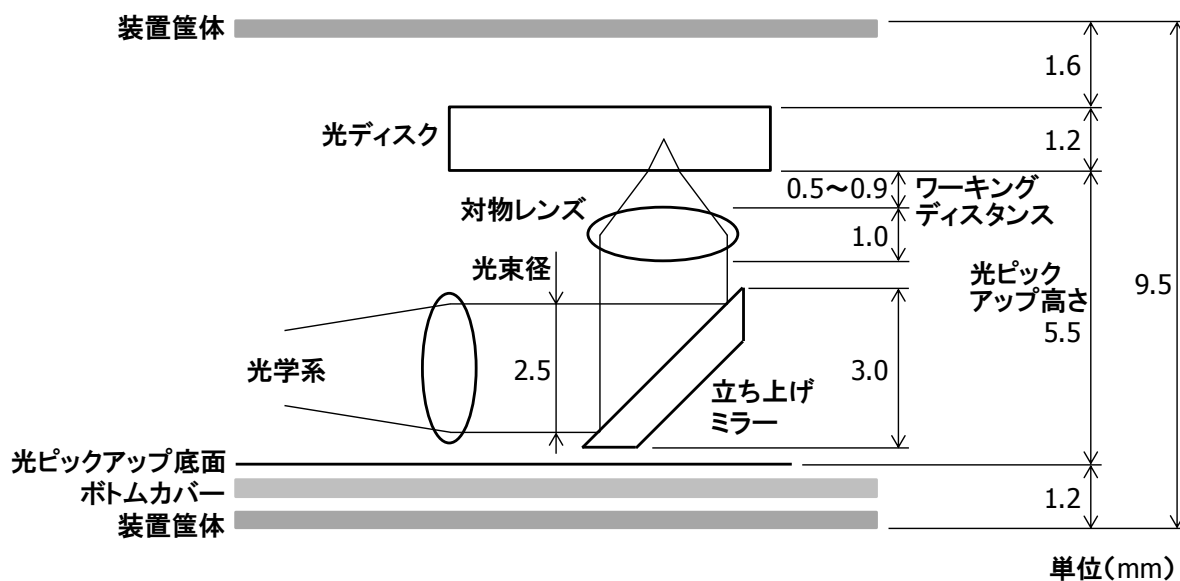


図 1.8 光ディスク装置の高さ方向寸法の例

光ディスク装置の基本構成を変えて、装置の小型・薄型化を図る研究も行われている。その一つは、光学系を半導体基板上の導波路に集積化する方法であり、もう一つは、ワーキングディスタンスをより小さくする方法である。

光学系を半導体基板上の導波路に集積化する集積化光ピックアップは、数 mm の寸法を持つ従来のバルク光学系に対して、厚さ 1 mm 以下の光学系に集約できる可能性がある[47]-[49]。このため、多くの機関で研究がなされ、サーボ信号検出構造やサーボ信号検出の高感度化[50]-[55]、光ディスクからの再生信号の検出[56][57]などが報告されている。しかし、半導体プロセスを用いることにより製造コストが高くなること、製造ばらつきによる光学特性変化が大きいこと、導波路への光の結合効率や導波路内の伝播効率が低いことなどから、導波路を用いた集積化光ピックアップそのものは実用化には至っていない。導波路を用いた集積化光ピックアップの代わりに、主として回折格子を用いた光学系の小型化が進められ、半導体レーザと光検出器を一体化したホログラム素子が製品化されている[58]-[61]。

ワーキングディスタンスを小さく、すなわち光束径を小さくする方法として、小型フォームファクタ光ディスク装置が報告されている[44]-[46]。CD、DVD、BD では光ディスクの直径が 120 mm であるのに対して、小型フォームファクタ光ディスク装置では、光ディスクの直径を 30 mm としている。これにより、装置全体を小さくすることと、光ディスクの反りによる面振れ成分を低減し、対物レンズアクチュエータの動作範囲を ± 0.3 mm 程度に抑えている。ワーキングディスタンスは 0.1 mm 程度、光束径は 1 mm 程度とされている。この小型フォームファクタ光ディスク装置用の対物レンズアクチュエータとして、軸回転方式のスイングアームアクチュエータが提案されており、対物レンズアクチュエータ部分の高さが 2.3 mm の構成や、スイングアーム部を L 字形状にして実装効率をより向上した構成が報告されている[62]-[64]。小型フォームファクタ光ディスク装置では装置厚が 5 mm の構成が報告されており、小型・薄型化のメリットは大きい。しかし、光ディスクの直径を 30 mm に小径化しているため記録容量は 1 GB にとどまり、大容量化に関して十分とは言えず、実用化には至っていない。

光ディスク装置の新しい構成が提案されているものの、光ディスクの特徴である媒体可換性を考えると、当面はスリム型やウルTRASリム型が小型・薄型化の主流である。したがって、スリム型やウルTRASリム型の光ディスク装置において、高速化および高密度化に対応した対物レンズアクチュエータを検討することが重要である。

1.2.2 駆動感度

駆動感度は、加速度感度と静的感度に分けられる。加速度感度は駆動コイルへの通電電流あるいは印加電圧に対して発生する加速度の大きさを表す。加速度は、駆動力の大きさをアクチュエータ可動部の質量で除算したものである。静的感度は、駆動力の大きさをアクチュエータ可動部の支持ばねの剛性で除算したものである。対物レンズアクチュエータの周波数応答特性において、減衰の影響を考えなければ、静的感度は加速度感度を一次の共振角周波数の 2 乗で除算した値として表される。したがって、加速度感度が対物レンズアクチュエータの駆動特性を表す基本的な指標である。

加速度感度は、コイルで生じる駆動力とアクチュエータ可動部の質量で決まるため、磁気回路の効率化と可動部の軽量化という基本的な課題に行きつく。磁気回路の効率化に関しては、コイルの有効領域を無効領域よりも増やすという単純な構成[32]や、コイルに対面するマグネットを多極化してコイルの複数の領域で駆動力を発生させる構成[65][66]、漏洩磁束の少ない磁気回路構造[31]、

マグネットの磁化の向きを傾斜させて磁束密度をコイルに集中させる方法[67]が報告されている。

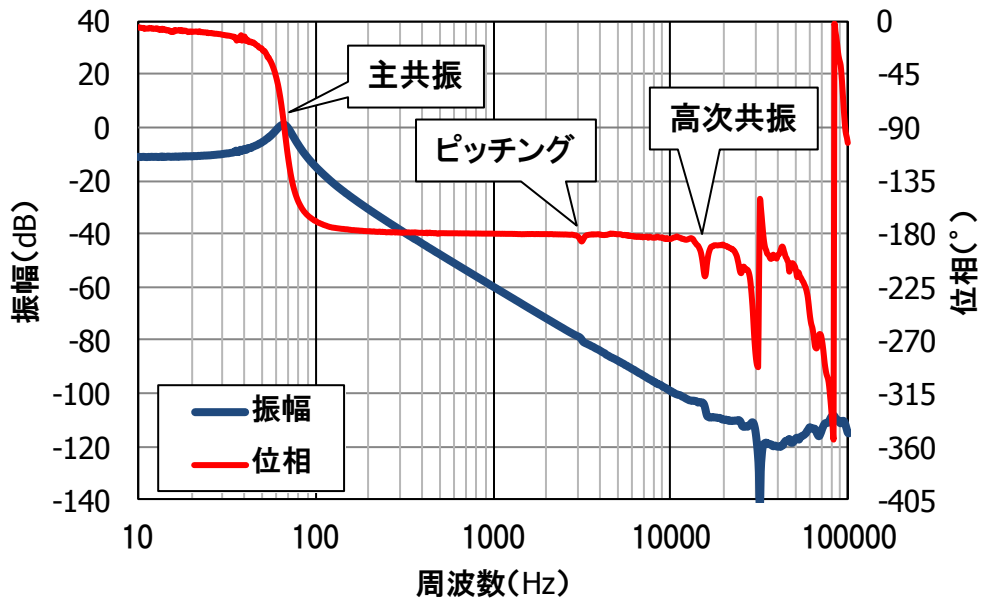
可動部の軽量化に関しては、対物レンズとコイルを保持するホルダを薄肉にすることや、比重の小さい材料にすることが考えられる。これらは一般的にホルダの剛性を低下させやすくなるため、振動特性と合わせて検討されることが多い[68]。また、対物レンズアクチュエータは、フォーカシング方向とトラッキング方向の2方向の駆動を一つの部品で行うことが一般的であるが、フォーカシング方向とトラッキング方向のアクチュエータを分離した構成[69]も報告されている。この構成ではフォーカシング方向とトラッキング方向それぞれに適した設計ができる反面、装置寸法とコスト面での課題がある。

加速度感度は対物レンズアクチュエータの基本的な指標であるものの、これまでは磁気回路の構成に関する検討が主である。本研究では、消費電力を指標として加速度感度を最大化する条件を理論的に検討する。

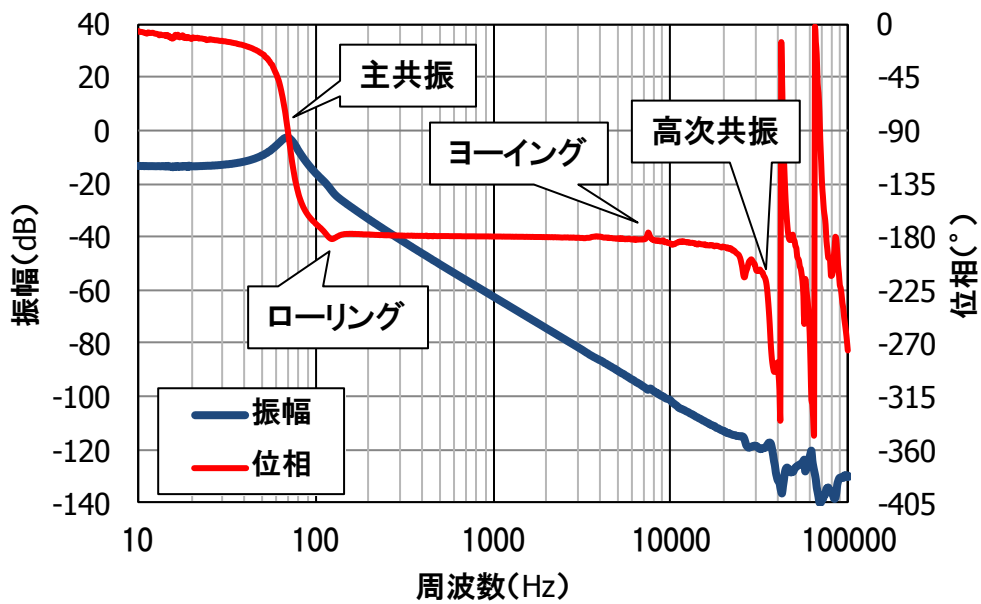
1.2.3 振動特性

一般的な対物レンズアクチュエータは、対物レンズと駆動コイルを取り付けたホルダを可動部として、可動部を金属製のサスペンションワイヤにより固定部に対して変位可能に支持する。駆動コイルの周囲に配置したマグネットからの磁界と、駆動コイルへ通電する電流との電磁作用により対物レンズを駆動する[30]。対物レンズアクチュエータの振動特性は、駆動コイルへの通電電流あるいは印加電圧に対する対物レンズ変位の周波数応答特性で表される[31][36][37][70]。図 1.9 に周波数応答特性の測定結果の例を示す。図 1.9 の (a) , (b) はそれぞれ、フォーカシングコイルおよびトラッキングコイルへの通電電流に対する対物レンズの変位応答である。

対物レンズアクチュエータの振動モードは大きく3種類に分けられる。第一の振動モードは、サスペンションワイヤのばね剛性と可動部の質量で決まる並進モードであり、主共振と呼ぶ。第二の振動モードは、可動部の重心と駆動力の中心とのずれによって生じる可動部の回転モードである。サスペンションワイヤの軸回りをローリング、トラッキング方向の軸回りをピッチング、対物レンズの光軸回りをヨーイングと呼ぶ。第三の振動モードは可動部の弾性変形モードであり、高次共振と呼ぶ。それぞれの振動モードの例を図 1.10 に示す。



(a) フォーカシング方向



(b) トラッキング方向

図 1.9 対物レンズアクチュエータの周波数応答特性の例

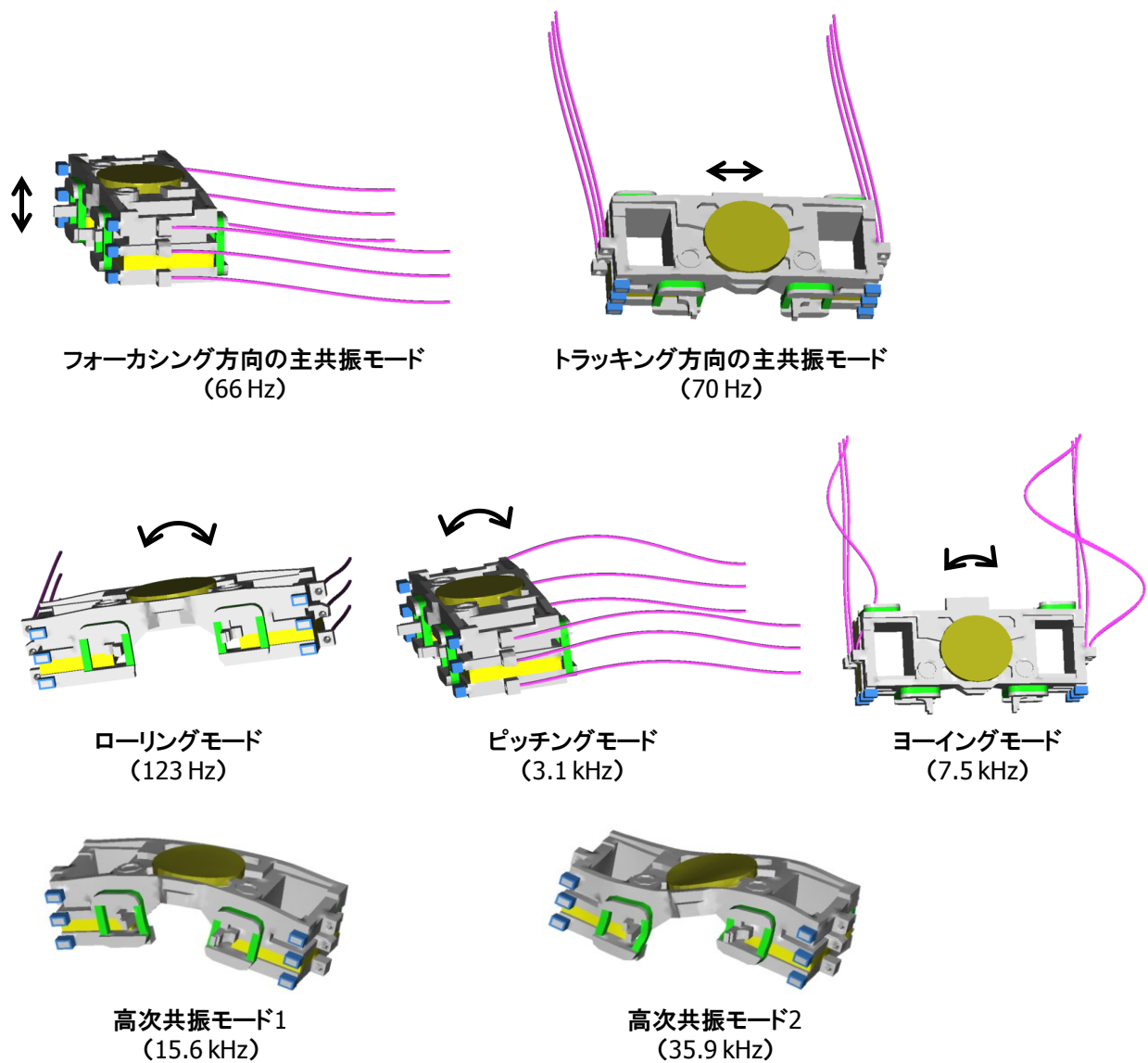


図 1.10 対物レンズアクチュエータの振動モードの例（周波数は図 1.9 の特性における値）

主共振は、対物レンズ位置決め制御系の整定時間や対物レンズアクチュエータの静的感度に影響するため、その周波数と減衰を適切に設計することが必要である[35][37][70]。サスペンションワイヤ支持系の振動モデルは、ばね・質量・ダッシュポット（速度比例粘性減衰）系で表されることが多い。振動減衰材としてシリコーンゲルなどの粘弾性体が付加される場合は、シリコーンゲルの粘弾性の影響で、実際の振動特性は単純なばね・質量・速度比例粘性減衰系とは異なる。シリコーンゲルの取り付け構造の影響についての実験的な検討、粘弾性体の周波数応答特性や、粘弾性体を減衰材として用いた機構の動的性質が報告されている[71]-[76]。これらは対象物の変位に減衰材が連結されたフォークトモデルとして表されており、対物レンズアクチュエータのように変形するサスペンションワイヤの一部に減衰材が付加された構成での周波数応答特性についての検討はなされていない。本論文では、粘弾性減衰材のシリコーンゲルを、周波数特性を持つばねとして扱い、主

共振特性のモデル化を行う。

回転モードのうち、ピッチング共振とヨーイング共振は数 kHz 帯域に生じることが多く、制御系のゲインクロス周波数付近に生じるため、転送速度の高速化が進む以前の対物レンズアクチュエータの重要な課題であった。ピッチング共振とヨーイング共振を引き起こす可動部の重心と駆動力の中心とのずれの許容量についての検討[77]や、可動部の支持ばねを弾性変形させて減衰を付与する構成[35]、磁性流体を用いて減衰を付与する構成[78][79]などが示されている。現在では、磁場解析精度の向上により駆動力の中心ずれを小さくできていることと、回転モードの中心となる可動部の中央に対物レンズを配置する構成の適用[36]により、ピッチング共振とヨーイング共振の影響は十分低減されている。

ピッチング共振とヨーイング共振は、サスペンションワイヤの高次の曲げ変形モードであるのに対して、回転モードの残る一つであるローリング共振は、サスペンションワイヤの一次の曲げ変形モードである[37][80][81]。同じくサスペンションワイヤの一次の曲げ変形モードである主共振との違いは、主共振は複数のサスペンションワイヤの同相モードであり、ローリング共振は左右のサスペンションワイヤの反相モードということである。ローリング共振は対物レンズの傾きとして現れるので、その研究状況は次項に記す。

高次共振はハーフハイト型では 30~40 kHz、スリム型およびウルTRASリム型では 15 kHz 程度に生じることが多い。転送速度の高速化のために制御帯域を拡大するとき、高次共振が制限となる。したがって、高次共振周波数の高域化と共振振幅の低減は、転送速度の高速化のために重要な課題である。

これまでに、可動部の中空部を無くして高剛性を図った構造[31]、可動部側に剛性の高いマグネットを配置して周波数を高める構造[82]、磁場解析と振動解析を統合してコイルとマグネットの寸法最適化によって高次共振振幅のばらつきを低減する方法[68]、制御系の安定性を考慮して構造共振の位相を設定する方法[83]-[85]、振動モードの節を応答点に配置する方法[86]などが報告されている。高剛性化は一般的には可動部の質量が増加する方向であり、加速度感度の低下要因となる。また、コイルとマグネットの寸法最適化は、振幅のばらつき低減には有効であるが、周波数の高域化や振幅低減についての指針は示されていない。制御系と連携した制振方法では、構造の振動はある程度許容されるので、構造系にとっては設計の余裕度が増す。ただし、周波数や振幅のばらつきが生じると制御系の不安定性につながる可能性がある。

加速度感度との両立を考慮すると、高次共振の振幅を低減することが有効である。本論文では、高次共振の振動モードに着目し、その振動モードを打ち消すように駆動力分布を与えることで高次共振の振幅を低減する方法を検討する。

1.2.4 対物レンズ光軸精度

光ディスクと対物レンズの相対傾きを補正するために、補正素子を追加する方法と対物レンズを傾かせる方法がある。補正素子として、光学系に液晶素子を挿入して、分割した領域の液晶に電圧を印加することで屈折率を変化させてコマ収差を与える方法[87]と、光学系に 2 枚の補正レンズを挿入して、それらを光軸に垂直な面内で移動させることでコマ収差を与える方法[88]が報告されている。対物レンズを傾かせる方法としては、対物レンズアクチュエータにおいて、フォーカシング方向とトラッキング方向の並進動作に加えて、傾き方向にも対物レンズを駆動するチルトアクチュエータが報告されている[13][37][89]-[93]。チルトアクチュエータは、液晶素子や補正レンズといっ

た追加部品が不要なため、コスト的に有利であり、実用化された対物レンズ傾き補正方法の主流となっている。

チルトアクチュエータは、光ディスクの半径方向に沿って対物レンズを傾かせる3軸駆動タイプ[13][37][89][92]と、光ディスクの半径方向と接線方向の2方向に対物レンズを傾かせる4軸駆動タイプ[90][91][93]が報告されている。3軸駆動タイプは、サスペンションワイヤ方式の対物レンズアクチュエータからの変更点が少ないため、製品への適用が進んでいる。4軸駆動タイプは、支持ばねの剛性を低減する必要があり、動作ばらつきが生じやすいため、製品化には至っていない。

3軸駆動タイプのチルトアクチュエータを用いる場合でも、傾き補正精度の向上のために、また対物レンズアクチュエータの基本性能としても、フォーカシング方向およびトラッキング方向への並進動作時に傾きが小さいことは重要である[80]。対物レンズアクチュエータ動作時の傾きの低減についての報告はこれまでに少なく、組み立てばらつきに対する対物レンズ傾きのばらつきの解析[94]や、磁束密度分布を平坦に近づけることによる対物レンズ傾きの低減[95]が報告されている程度である。本論文では、対物レンズアクチュエータ動作時の傾きの要因を解析し、対物レンズ傾きを低減する磁気回路構造を検討する。

光ディスクの半径方向への対物レンズ傾きは、サスペンションワイヤの軸回りのローリングモードである。一般にローリング共振周波数は100~200 Hzに生じることが多く、転送速度の高速化にともない光ディスクの回転数がローリング共振周波数と近くなっている。ローリング共振時の対物レンズ傾きは、静的な傾きに対して著しく増加するため[37][81]、記録再生が困難になるほどの劣化を引き起こす。したがって、ローリング共振時の対物レンズ傾きを低減することは、転送速度の高速化時の重要な課題である。

1.3 本研究の目的および概要

光ディスク装置の高速化、大容量化に対応するために、光スポットを位置決め駆動する対物レンズアクチュエータの駆動構造の高精度化が必要である。対物レンズアクチュエータの動作特性は、加速度感度、振動特性、対物レンズ傾きに集約される。本研究は、対物レンズアクチュエータの動作特性を表す解析モデルを構築し、動作特性向上を実現する機構技術を提案し、具現化することを目的とする。

加速度感度の向上は、これまでは駆動力の増加と可動部の軽量化が指針とされているが、加速度感度の最適化については報告されていない。本論文では、加速度感度の新たな指標を定義して、加速度感度を最大化する駆動コイルの条件を示す。

振動特性については、主共振と高次共振を対象とする。主共振は、対物レンズアクチュエータの周波数応答特性において一次の共振でありながら、減衰材として付加される粘弾性体の特性が明確でないため実験的な評価が中心で、解析的な検討は十分には行われていない。本論文では、減衰材として用いるシリコンゲルの周波数特性を数式で表すことで、サスペンションワイヤ支持系の振動モデルを簡便に構築することを目指す。高次共振については、高剛性化による周波数の高域化に加えて、可動部の振動モードと駆動力分布の組み合わせによる振動振幅の低減を図る。

対物レンズ傾きに関しては、駆動コイルに作用する磁束密度分布に起因して対物レンズを傾かせるローリングモーメントが生じることを示し、マグネットとコイルの配置によって、そのローリングモーメントを低減する構造を検討する。

本論文は7章から構成されている。

第1章では、光ディスク装置の主要機構である対物レンズアクチュエータに関する課題と従来技術を説明し、本研究の目的および本論文の構成を示している。

第2章では、一般的な光ディスク装置と対物レンズアクチュエータの構造を説明し、高速高精度な位置決め制御を実現するために対物レンズアクチュエータに求められる特性について示す。

第3章では、対物レンズアクチュエータの高速化に関わる基本的な指標である加速度感度について説明する。加速度感度の指標として従来用いられてきた電流加速度感度と電圧加速度感度の定義を示し、その特性を示す。次に、電流加速度感度と電圧加速度感度の相乗平均を取って、新たな総合的感度の指標として電力加速度感度を定義する。そして、駆動コイルの質量と可動部の質量をパラメータとして電力加速度感度の最大化についての条件を明確にする。

第4章では、主共振特性の振動モデルについて示す。主共振の振動モデルは、ばね・質量・速度比例粘性減衰系で表されることが多いが、振動減衰材として付加されるシリコーンゲルの粘弾性の影響により、実際の主共振特性は単純なばね・質量・速度比例粘性減衰系とは異なる応答を示す。本章では、粘弾性体のシリコーンゲルを、周波数特性を有するばねとして表し、速度比例粘性減衰系としたサスペンションワイヤの一部にシリコーンゲルが付加された振動モデルを用いて、粘弾性減衰材を含む主共振の周波数応答特性を導出する。

第5章では、転送速度の高速化に向けて制御帯域を拡大する上で特に重要となる高次共振振幅の低減について示す。高次共振振幅が、高次共振の振動モードと駆動力分布の組み合わせによって表されることを示し、高次共振を励起しない駆動力分布の条件を明確にする。可動部の高剛性化によらずに高次共振振幅を抑制する本手法を対物レンズアクチュエータに適用し、その有効性を検証する。

第6章では、高密度化を実現するための光スポットの微小化に関わる対物レンズ傾きの低減について示す。対物レンズアクチュエータがフォーカシング方向およびトラッキング方向に動作したときに生じるローリングモーメントを数式で表し、コイルの一方で増加する磁束密度分布とコイルの他方で減少する磁束密度分布を組み合わせることで、ローリングモーメントを低減できることを示す。この考えに基づいて、ローリングモーメントを低減する具体的構造として、ホルダの二つの側面でトラッキングコイルとマグネットの配置を入れ替えた構造と、フォーカシングコイルの内側にインナーマグネットを配置する構造を示す。これらの構造を適用した対物レンズアクチュエータにおいて、静的な対物レンズ傾きと、ローリング共振時の対物レンズ傾きの低減効果を示す。

第7章は本研究の結論であり、本研究で得られた結果を総括する。

2. 対物レンズアクチュエータの構造と課題

2.1 光ディスク装置の構成と概要

光ディスク装置には、音楽映像用の CD プレーヤーや BD レコーダー、コンピュータ用の DVD-ROM などの再生専用装置や DVD-R/RW, BD-R/RE などの記録再生装置があり、装置高さの違いによって、ハーフハイト型、スリム型、ウルTRASリム型に分類される。いずれも基本構成は同じであり、ここでは例として DVD 用ウルTRASリム型の光ディスク装置の構造を図 2.1 に示す。

光ディスク装置は大きく分けると、光ディスクを回転させるスピンドルモータ、光ディスクに情報を記録再生する光ピックアップ、光ピックアップを光ディスクの半径方向に移動させる送り機構、コンピュータ本体とのデータ転送や記録再生信号の生成および光スポットの位置決め制御信号の生成を行う信号処理回路で構成される。

光ピックアップの構造を図 2.2 に示す。光ピックアップは、光ディスクの回転にともなう面振れとトラック位置変動を検出して、その面振れとトラック位置変動に追従するように対物レンズを動かし、常に安定した情報の記録再生を行う部品である。光ディスク面に垂直に対物レンズの光軸方向がフォーカシング方向、光ディスクの半径方向がトラッキング方向、それらに直交する光ディスクの接線方向がタンジエンシャル方向、タンジエンシャル軸回りの回転方向が対物レンズの傾きを示すローリング方向である。

光ピックアップは光学系と対物レンズアクチュエータで構成される。光学系は、半導体レーザからの光を光ディスク上に集束し、光ディスクからの反射光を検出する光学部品群である。半導体レーザから照射された光は、ビームスプリッタで反射して光路を折り曲げ、コリメータレンズで平行光となり、立ち上げミラーで反射して光路をフォーカシング方向に折り曲げ、対物レンズによって光ディスク上に集束する。

再生専用型の光ディスクでは、あらかじめ形成された窪み（ピット）の有無による光ディスクからの反射率の変化を用いてデータの再生を行う。記録型の光ディスクでは、光ディスク上に集束された光スポットの熱エネルギーにより記録膜を局所的に加熱して結晶状態から非晶質状態へと変化させることで、記録マークを形成する。結晶状態と非晶質状態で反射率が異なることを利用して記録マークの再生を行う。

光ディスクからの反射光は、再び対物レンズ、立ち上げミラー、コリメータレンズを通過し、ビームスプリッタを透過して、光検出器に入射する。光検出器で受光した光量から再生信号や、光ディスク上の目標トラックと光スポットの位置ずれを表すフォーカシングエラー信号とトラッキングエラー信号が生成される。

フォーカシングエラー信号とトラッキングエラー信号に基づいて対物レンズを駆動する制御信号が生成され、この信号が対物レンズアクチュエータに入力される。これにより対物レンズがフォーカシング方向とトラッキング方向に駆動され、光スポットが位置決めされる。

対物レンズアクチュエータの構造を次節に記す。

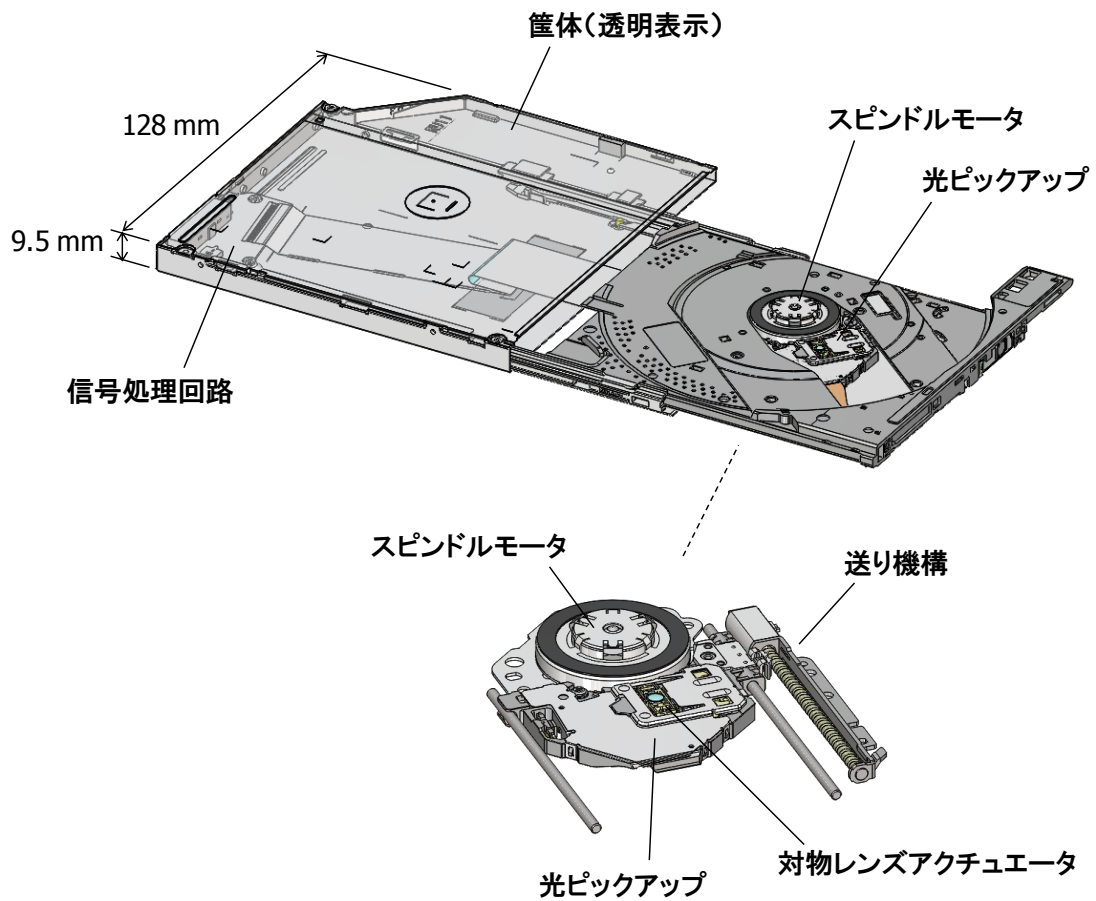


図 2.1 ウルトラスリム型光ディスク装置の構造

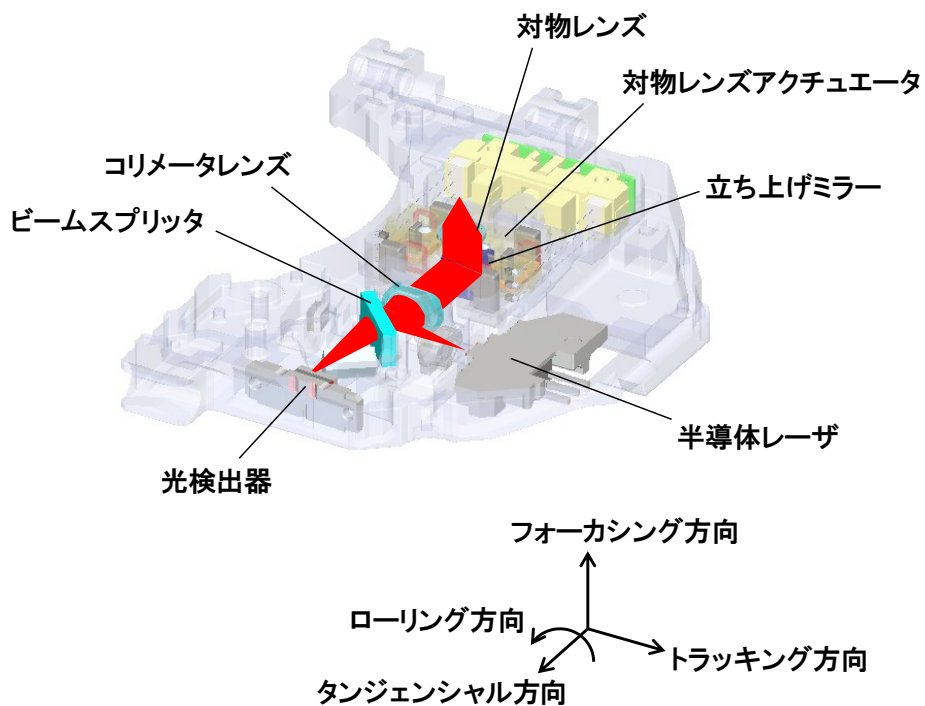


図 2.2 光ディスク装置に搭載される光ピックアップの構造

2.2 対物レンズアクチュエータの構造

対物レンズアクチュエータの例として DVD 用ウルトラスリム型の構造[70]を図 2.3 に示す。

対物レンズをホルダの上面に配置し、フォーカシング方向への駆動力を発生させるフォーカシングコイルをホルダの 2 箇所に分けて配置し、トラッキング方向への駆動力を発生させるトラッキングコイルをホルダの二つの側面に 2 箇所ずつ計 4 箇所に配置する。この可動部を金属製のサスペンションワイヤにより固定部に対して変位可能に支持する。固定部は光ピックアップの筐体に接着剤等で固定される。サスペンションワイヤはコイルへの通電も兼ねており、直径 0.08~0.1 mm 程度の銅合金線が一般に用いられる。丸棒形状の他に、平板状のサスペンションが用いられる例[41][69]もある。固定部にはサスペンションワイヤを囲むように U 字状の減衰材保持部を備え、この減衰材保持部にサスペンションワイヤの振動を減衰させるシリコンゲルを付加する。

ホルダの二つの側面に対向してマグネットを 2 個ずつ計 4 個配置する。ウルトラスリム型とスリム型の対物レンズアクチュエータでは、マグネットは 4 個の場合が多い。図 2.3 では本研究において、対物レンズ傾きの低減のために適用した、フォーカシングコイルの内側の空間にインナーマグネットを配置する構成[80]を示している。さらに図 2.4 の対物レンズアクチュエータ主要部の上面図に示すように、ホルダの一方の側面ではトラッキングコイルをマグネットに対して外寄りに配置し、ホルダのもう一方の側面ではトラッキングコイルをマグネットに対して対物レンズ中心に近い内寄りに配置する構成[80]を適用する。これらのインナーマグネットとトラッキングコイル配置による対物レンズ傾き低減の作用と効果については第 6 章で説明する。

コイルで発生する駆動力の様子を図 2.5 に示す。ここではマグネットの極性はホルダに対向した側を N 極、ヨークに取り付けられる側を S 極とし、インナーマグネットの極性はフォーカシングコイルに対向した側を S 極、ヨークに取り付けられる側を N 極とする。2 個のフォーカシングコイルに図 2.5 (a) に示す向きの電流を通電することでフォーカシング方向の駆動力が発生する。また、トラッキングコイルに図 2.5 (b) に示す電流を通電することでトラッキング方向の駆動力が発生する。

対物レンズアクチュエータの構造は図 2.3 に示したサスペンションワイヤのようなばね支持方式の他に、軸摺動方式と呼ばれる構造[96][97]がある。軸摺動方式は、ホルダの中心を通る軸を備え、ホルダの端部に対物レンズを配置して、フォーカシング方向には可動部を軸に沿って上下動させ、トラッキング方向には軸を中心に可動部を回転させるものである。軸摺動方式は、動作方向が定まっていることや、複数の対物レンズを回転させて切り替えることが可能という長所があり、DVD が製品化された当初は製品適用される例[98]も見られた。しかし、軸と可動部の摩擦による非線形性の問題や、可動部の小型化が困難であることから、現在では軸摺動方式が用いられることは少なく、図 2.3 のようなばね支持方式が主流である。

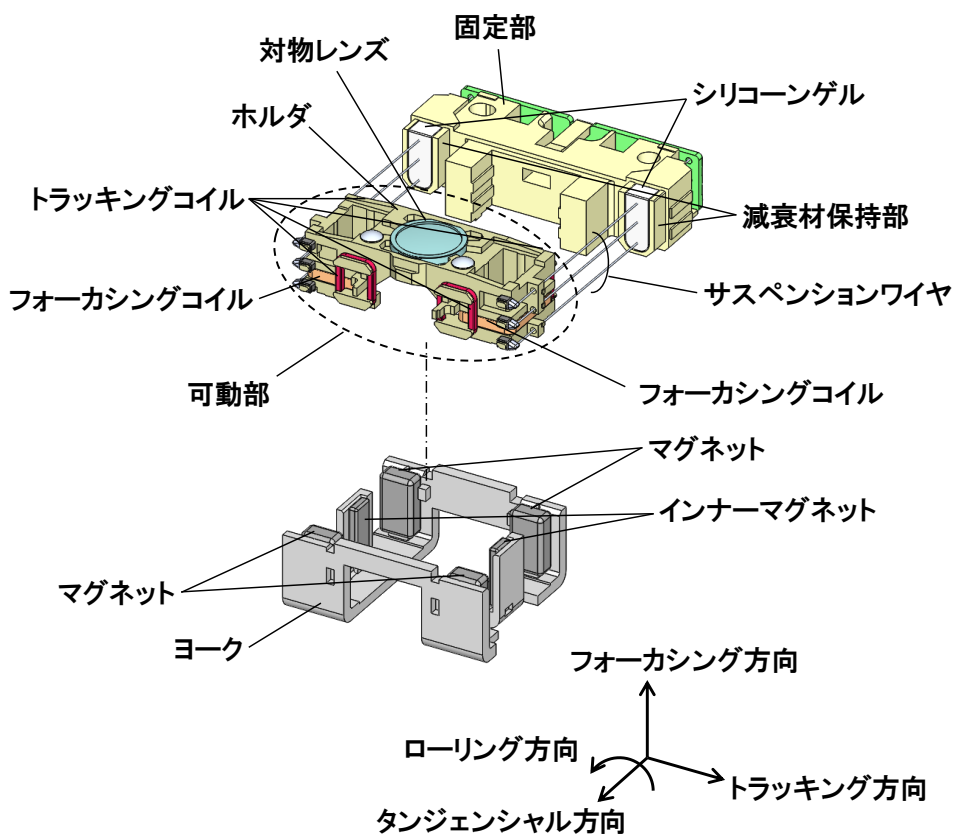


図 2.3 DVD 用ウルトラスリム型対物レンズアクチュエータの構造

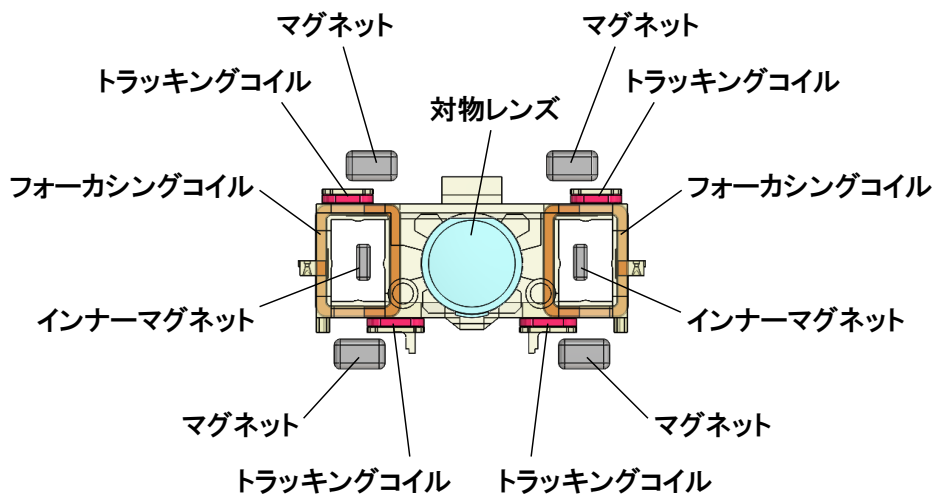
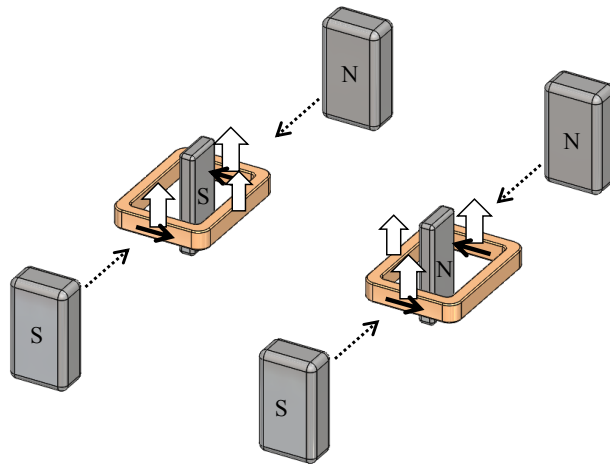
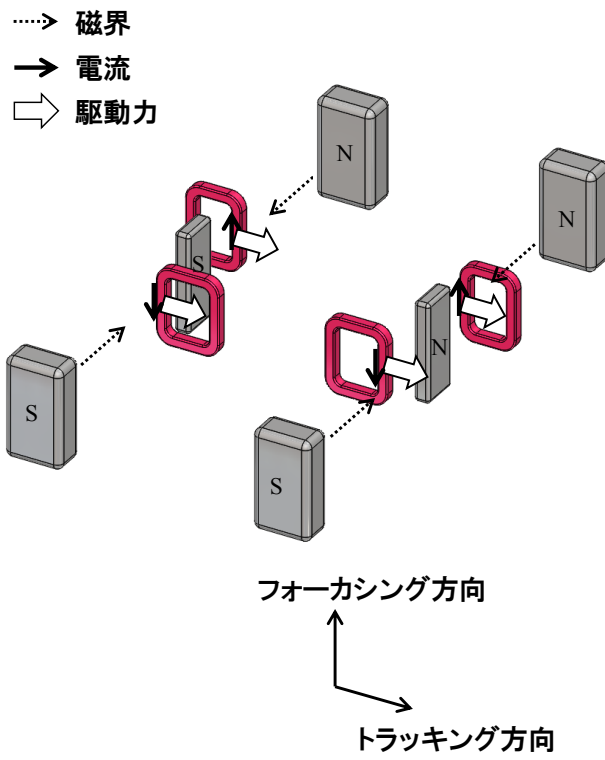


図 2.4 対物レンズアクチュエータ主要部の上面図 (コイルとマグネットの配置)



(a) フォーカシングコイル



(b) トラッキングコイル

図 2.5 対物レンズアクチュエータのコイルで発生する駆動力

2.3 対物レンズアクチュエータに求められる特性

光ディスク装置の高速化，大容量化のために対物レンズアクチュエータに求められる特性は，加速度感度が高いこと，振動特性が良好なこと，動作時の対物レンズ傾きが小さいこと，である．それぞれの内容について以下に記す．

2.3.1 光ディスクの高速回転に対応する加速度感度

高速に回転する光ディスクの面振れとトラック位置変動に追従するためには，駆動感度が高いことが求められる．駆動感度には，静的感度と加速度感度がある．静的感度は，コイルに直流電流あるいは直流電圧を通电・印加したときの可動部の変位の大きさを表し，加速度感度は，コイルに交流電流あるいは交流電圧を通电・印加したときの可動部の加速度の大きさを表す．

図 1.9 に示した周波数応答特性において，変位が一定とみなせる主共振周波数までの領域の駆動感度が静的感度であり，加速度が一定とみなせる主共振周波数以降の領域の駆動感度が加速度感度である．実際の測定では，静的感度は直流電流・直流電圧に対する可動部の変位から，加速度感度は 1 kHz の通電電流・印加電圧に対する可動部の応答振幅から求める．コイルに電流を通电することによって駆動力が発生するので，電流に対する感度が基本となる．ただし，コイルの線径の違いや温度によってコイルの抵抗が変わるので，コイル抵抗の影響を含めるために，電圧に対する感度も用いられている．

直流通電電流 $I_{(DC)}$ に対する変位 d を電流静的感度 $S_{I(DC)}$ ，直流印加電圧 $V_{(DC)}$ に対する変位 d を電圧静的感度 $S_{V(DC)}$ ，交流通電電流 $I_{(AC)}$ に対する加速度 α を電流加速度感度 $S_{I(AC)}$ ，交流印加電圧 $V_{(AC)}$ に対する加速度 α を電圧加速度感度 $S_{V(AC)}$ ，コイルの抵抗を R ，インピーダンスを Z とすると，

$$S_{I(DC)} = \frac{d}{I_{(DC)}} \quad (2.1)$$

$$S_{V(DC)} = \frac{d}{V_{(DC)}} = \frac{S_{I(DC)}}{R} \quad (2.2)$$

$$S_{I(AC)} = \frac{\alpha}{I_{(AC)}} \quad (2.3)$$

$$S_{V(AC)} = \frac{\alpha}{V_{(AC)}} = \frac{S_{I(AC)}}{|Z|} \quad (2.4)$$

である．

粘弾性減衰材のシリコーンゲルの影響を含めた主共振周波数は第 4 章に詳述するが，ここでは簡略化のためにシリコーンゲルの影響を省略して，サスペンションワイヤと可動部をばね・質量系とみなす．主共振周波数を f_0 として，変位 d を加速度 $\alpha_{(DC)}$ に換算すると，

$$\alpha_{(DC)} = d(2\pi f_0)^2 \quad (2.5)$$

である。これから、

$$S_{I(DC)} = \frac{S_{I(AC)}}{(2\pi f_0)^2} \quad (2.6)$$

$$S_{V(DC)} = \frac{S_{V(AC)}}{(2\pi f_0)^2} \quad (2.7)$$

となり、静的感度は加速度感度を用いて表すことができる。

光ディスクの回転周波数を f_d とすると、光ディスクの面振れ量あるいはトラック位置変動量 a による加速度 $\alpha_{(AC)}$ は、

$$\alpha_{(AC)} = a(2\pi f_d)^2 \quad (2.8)$$

である。転送速度の高速化に応じて光ディスク回転周波数が高くなると、光ディスク回転周波数の2乗に比例して必要な加速度は増加する。光ディスクの面振れ量とトラック位置変動量は規格で定められており、表 2.1 に示す通り、面振れ量は CD では ± 0.5 mm、DVD と BD では ± 0.3 mm であり、トラック位置変動量は CD では ± 0.07 mm、DVD と BD では ± 0.035 mm である。

面振れ量については、光ディスクの回転周波数が上昇すると、遠心力により光ディスクの面振れ量を抑制する作用が働くことが知られている[99][100]。山内らの測定結果では、静止状態で 0.5 mm の面振れ量を有する光ディスクを回転させると、100 Hz 程度までは周波数にほぼ比例して面振れ量は低減し、100 Hz では約 0.1 mm となり、100 Hz 以上の周波数では面振れ量は約 0.1 mm でほぼ一定となる[99]。そこで、面振れ量を図 2.6 のように、CD では 0 Hz から 100 Hz において 0.5 mm から 0.1 mm に直線的に減少し、100 Hz 以上は 0.1 mm で一定と想定する。また、DVD と BD では、面振れ量の規格値の比から CD の 0.6 倍と想定する。トラック位置変動量については、面振れのような遠心力による低減の効果は無く、周波数に対して表 2.1 に示した値で一定である。

表 2.1 には代表的な回転周波数も示している。上段はスリム型とウルTRASリム型での最高速度である CD24 倍速、DVD8 倍速、BD6 倍速、下段はハーフハイト型での最高速度である CD52 倍速、DVD24 倍速、BD16 倍速を記載している。

表 2.1 光ディスクの面振れ量，トラック位置変動量，回転周波数

		CD	DVD	BD
面振れ量		± 0.5 mm	± 0.3 mm	± 0.3 mm
トラック位置変動量		± 0.07 mm	± 0.035 mm	± 0.035 mm
回転周波数	スリム・ ウルTRASリム	24 倍速：92 Hz	8 倍速：77 Hz	6 倍速：81 Hz
	ハーフハイト	52 倍速：200 Hz	24 倍速：230 Hz	16 倍速：216 Hz

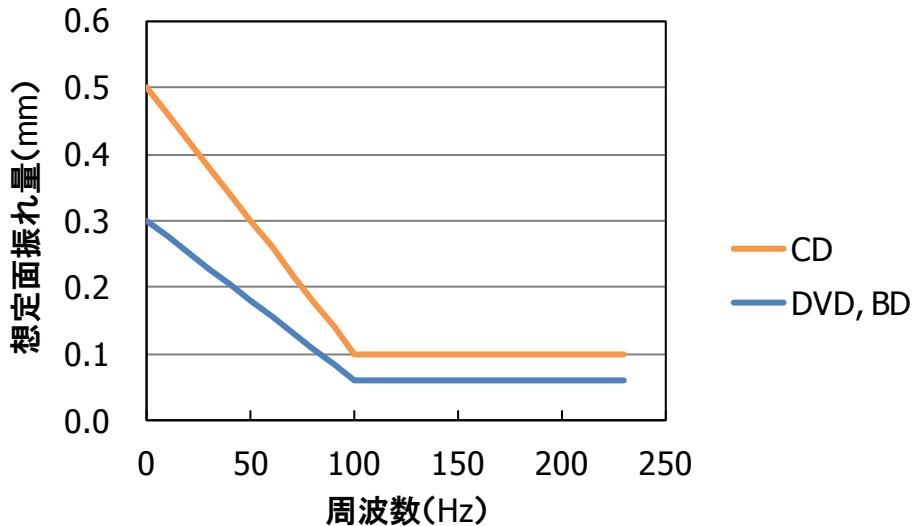


図 2.6 想定する面振れ量の周波数に対する変化

静的領域における対物レンズのオフセット量として、フォーカシング変位量を 0.3 mm，トラッキング変位量を 0.2 mm とすると，主共振周波数 f_0 が 60 Hz の場合，式 (2.5) から加速度に換算すると，上記のオフセット量に相当する必要加速度 $\alpha_{(DC)0}$ は，フォーカシング方向が 43 m/s^2 ，トラッキング方向が 28 m/s^2 となる。

加速度領域については，表 2.1 および図 2.6 に示した面振れ量とトラック位置変動量に，マージンとして 1.5 倍をかけた値を必要加速度 $\alpha_{(AC)0}$ とする。すなわち，

$$\alpha_{(AC)0} = 1.5\alpha_{(AC)} \quad (2.9)$$

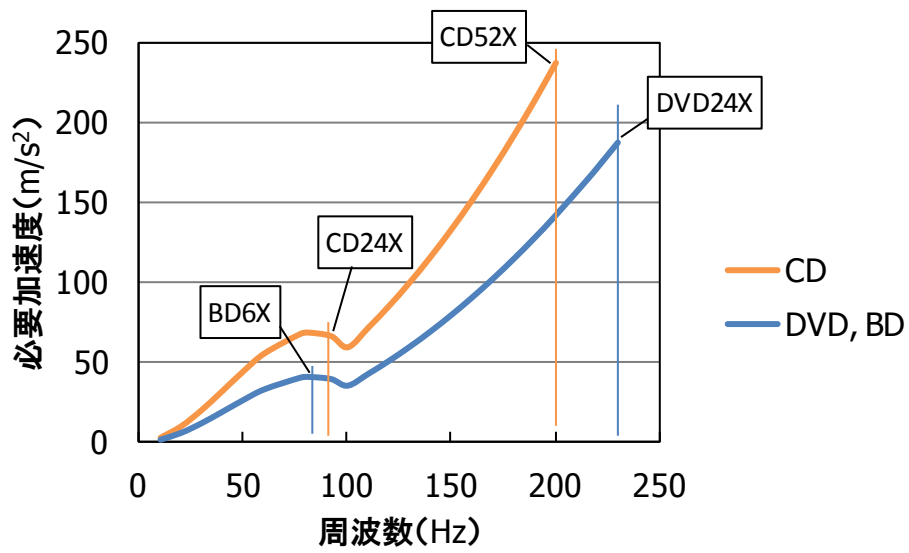
である。この場合，面振れに追従するために必要なフォーカシング方向の加速度と，トラック位置変動に追従するために必要なトラッキング方向の加速度は図 2.7 および表 2.2 に記した値となる。

CD，DVD，BD で比較すると，スリム型とウルTRASリム型では，CD24 倍速時に最大の加速度が必要で，その値は，フォーカシング方向が 66 m/s^2 ，トラッキング方向が 35 m/s^2 となる。ハーフハイト型では，CD52 倍速時に最大の加速度が必要で，フォーカシング方向が 237 m/s^2 ，トラッキング方向が 166 m/s^2 となる。

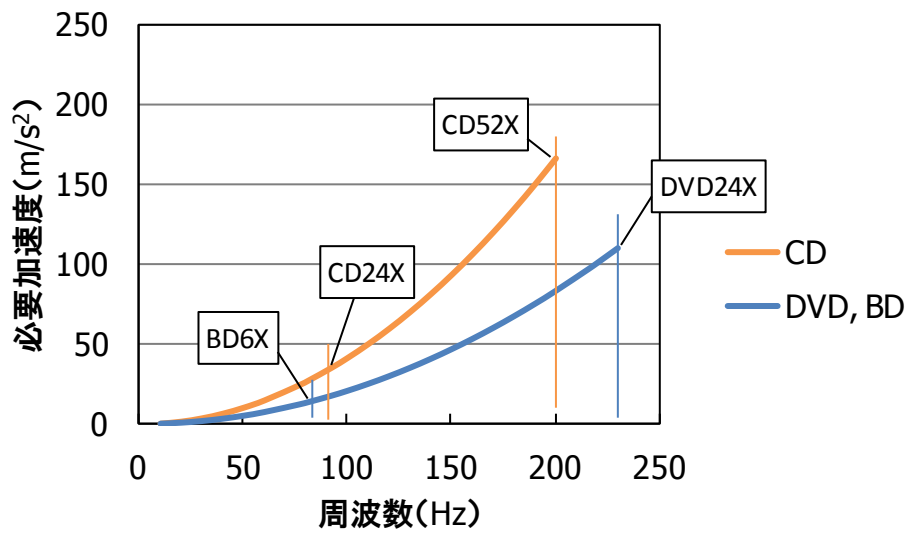
静的領域における必要加速度 $\alpha_{(DC)0}$ は実効値に相当するので，これを正弦波の振幅に置き換えるために $\sqrt{2}$ 倍し，加速度領域の値 $\alpha_{(AC)0}$ と合わせると，全体の必要加速度 α_0 は，

$$\alpha_0 = \sqrt{2(\alpha_{(DC)0})^2 + (\alpha_{(AC)0})^2} \quad (2.10)$$

と表される。これから，全体の必要加速度 α_0 は，スリム型とウルTRASリム型では，フォーカシング方向が 90 m/s^2 ，トラッキング方向が 53 m/s^2 ，ハーフハイト型では，フォーカシング方向が 245 m/s^2 ，トラッキング方向が 171 m/s^2 となる。



(a) フォーカシング方向 (面振れに追従)



(b) トラッキング方向 (トラック位置変動に追従)

図 2.7 面振れおよびトラック位置変動に追従するために必要な加速度

表 2.2 フォーカシング方向およびトラッキング方向の必要加速度

		CD	DVD	BD	
静的領域	フォーカシング変位量	0.3 mm	0.3 mm	0.3 mm	
	トラッキング変位量	0.2 mm	0.2 mm	0.2 mm	
	フォーカシング方向換算加速度	43 m/s ²	43 m/s ²	43 m/s ²	
	トラッキング方向換算加速度	28 m/s ²	28 m/s ²	28 m/s ²	
加速度領域	フォーカシング方向	スリム・ウルTRASリム	66 m/s ²	40 m/s ²	41 m/s ²
		ハーフハイト	237 m/s ²	188 m/s ²	166 m/s ²
	トラッキング方向	スリム・ウルTRASリム	35 m/s ²	12 m/s ²	14 m/s ²
		ハーフハイト	166 m/s ²	110 m/s ²	97 m/s ²
合計	フォーカシング方向	スリム・ウルTRASリム	90 m/s ²		
		ハーフハイト	245 m/s ²		
	トラッキング方向	スリム・ウルTRASリム	53 m/s ²		
		ハーフハイト	171 m/s ²		

この加速度をコイルの発熱によって制限される消費電力以下で発生させることが目標となる。ここで、電流加速度感度と電圧加速度感度の相乗平均を取って、新たな総合的感度の指標として電力加速度感度 S_w を導入する。電力加速度感度 S_w は消費電力に対する加速度感度を表す指標であり、詳細は第3章で記す。

許容消費電力を W_0 とすると、電力加速度感度の目標値 S_{w0} は、

$$S_{w0} = \frac{\alpha_0}{\sqrt{2W_0}} \quad (2.11)$$

と表される。許容消費電力に対応する許容電流と許容電圧は、コイルのインピーダンスに依存する。インピーダンスの大きさ $|Z|$ は、コイルの抵抗 R とインダクタンス L_c により、

$$|Z| = \sqrt{R^2 + (2\pi f L_c)^2} \quad (2.12)$$

と表される。対物レンズアクチュエータに使用される一般的なコイルの抵抗は数 Ω 、インダクタン

スは数～数十 μH であるので、加速度感度を規定する 1 kHz においては、インダクタンスによる成分は無視できるほど小さい。したがって、ここでは、

$$|Z| \approx R \quad (2.13)$$

とする。これにより、電流加速度感度、電圧加速度感度の目標値 S_{I0} 、 S_{V0} はそれぞれ、

$$S_{I0} = \frac{\alpha_0}{\sqrt{\frac{2W_0}{R}}} \quad (2.14)$$

$$S_{V0} = \frac{\alpha_0}{\sqrt{2RW_0}} \quad (2.15)$$

と表される。

加速度感度の目標設定の例を以下に記す。

全体の許容消費電力を 0.4 W として、それをフォーカシングコイルとトラッキングコイルに配分する。配分比は、表 2.2 に示すフォーカシング方向とトラッキング方向の必要加速度感度の比とする。この場合、許容消費電力は、スリム型・ウルTRASリム型ではフォーカシング方向が 0.25 W、トラッキング方向が 0.15 W となり、ハーフハイト型ではフォーカシング方向が 0.24 W、トラッキング方向が 0.16 W となる。

スリム型・ウルTRASリム型のフォーカシング方向で記すと、必要加速度 α_0 は 90 m/s^2 であるから、電力加速度感度の目標値 S_{W0} は $126 \text{ m/s}^2/\text{W}^{0.5}$ 以上となる。電流加速度感度、電圧加速度感度の目標値 S_{I0} 、 S_{V0} はコイル抵抗 R に対して変化する。コイル抵抗 R に対する電流加速度感度、電圧加速度感度、電力加速度感度の目標値 S_{I0} 、 S_{V0} 、 S_{W0} をグラフに示すと図 2.8 となる。電力加速度感度の目標値 S_{W0} はコイル抵抗 R によらず一定である。

コイル抵抗を設定すれば、電流加速度感度、電圧加速度感度、電力加速度感度の目標値を決定することができる。ただし、第 3 章に記すように、加速度感度はコイル質量で最適化が図られるので、初期に設定するコイル抵抗は最適値とは限らないが、通常用いられるコイル抵抗値を想定すれば、加速度感度の目標値の設定としては十分である。実際の対物レンズアクチュエータに用いられるコイル抵抗値は 3～5 Ω 程度が多い。ここではコイル抵抗を 4 Ω とする。この場合、電流加速度感度の目標値 S_{I0} は $253 \text{ m/s}^2/\text{A}$ 以上、電圧加速度感度の目標値 S_{V0} は $63 \text{ m/s}^2/\text{V}$ 以上となる。

同様にして求めた、スリム型・ウルTRASリム型のトラッキング方向およびハーフハイト型での加速度感度の目標値を表 2.3 に示す。

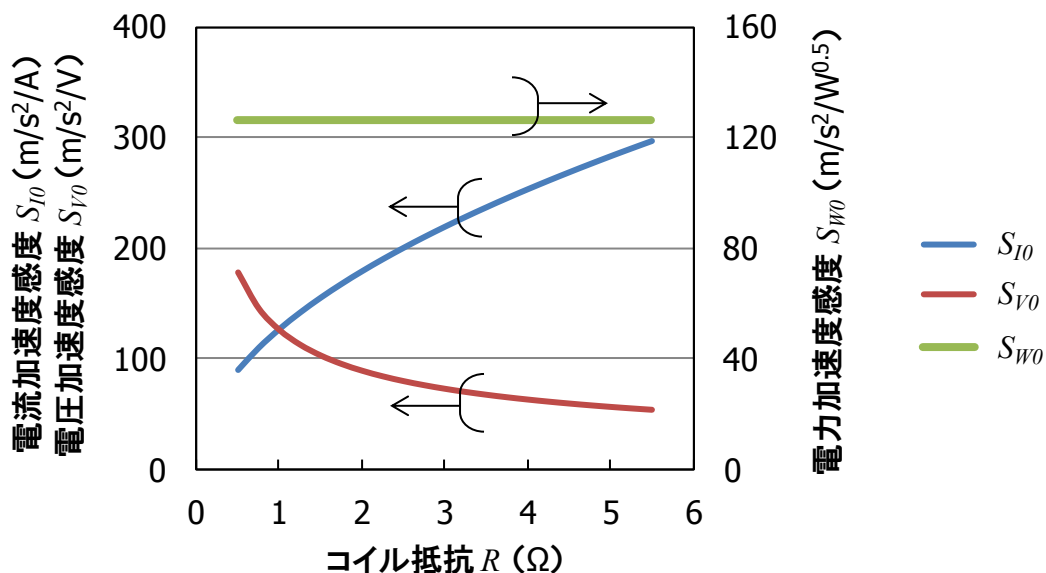


図 2.8 コイル抵抗に対する加速度感度の目標値

表 2.3 コイル抵抗を設定した場合の加速度感度の目標値

		スリム・ ウルTRASリム	ハーフハイト
許容消費電力		0.4 W	0.4 W
配分	フォーカシング方向	0.25 W	0.24 W
	トラッキング方向	0.15 W	0.16 W
コイル抵抗	フォーカシング方向	4 Ω	4 Ω
	トラッキング方向	4 Ω	4 Ω
電流加速度感度	フォーカシング方向	253 m/s²/A 以上	713 m/s²/A 以上
	トラッキング方向	194 m/s²/A 以上	595 m/s²/A 以上
電圧加速度感度	フォーカシング方向	63 m/s²/V 以上	178 m/s²/V 以上
	トラッキング方向	49 m/s²/V 以上	149 m/s²/V 以上
電力加速度感度	フォーカシング方向	126 m/s²/W ^{0.5} 以上	356 m/s²/W ^{0.5} 以上
	トラッキング方向	97 m/s²/W ^{0.5} 以上	298 m/s²/W ^{0.5} 以上

2.3.2 制御帯域拡大を可能とする振動特性

対物レンズの位置決め制御系のゲイン特性の例として、スリム・ウルTRASリム型の DVD と BD のフォーカシング系を図 2.9 に示す。0 dB は制御系の許容追従誤差である。光ディスク回転周波数における面振れ量あるいはトラック位置変動量と許容追従誤差の比が必要ゲインとなる。アクチュエータの特性は、光ディスクの面振れ特性、トラック位置変動特性をカバーする必要がある。面振れ特性、トラック位置変動特性は光ディスクの回転周波数以上の帯域において、周波数の 2 乗に反比例する -40 dB/decade の特性である。また、アクチュエータ特性も主共振周波数以降は高次共振を除けば -40 dB/decade の特性を示す。

このアクチュエータ特性に対して制御系では、低域のゲインを持ち上げる位相遅れ補償と、ゲインが 0 dB となるゲインクロス周波数 f_c 付近の周波数帯域で制御系の安定性を確保する位相進み補償を適用する。位相進み補償を適用することで、0 dB 付近のゲイン特性は緩やかになる。

図 2.9 における面振れ特性およびアクチュエータ特性でゲインが 0 dB となる周波数を f_a とすると、面振れ加速度 $\alpha_{(AC)0}$ と許容追従誤差 e から、

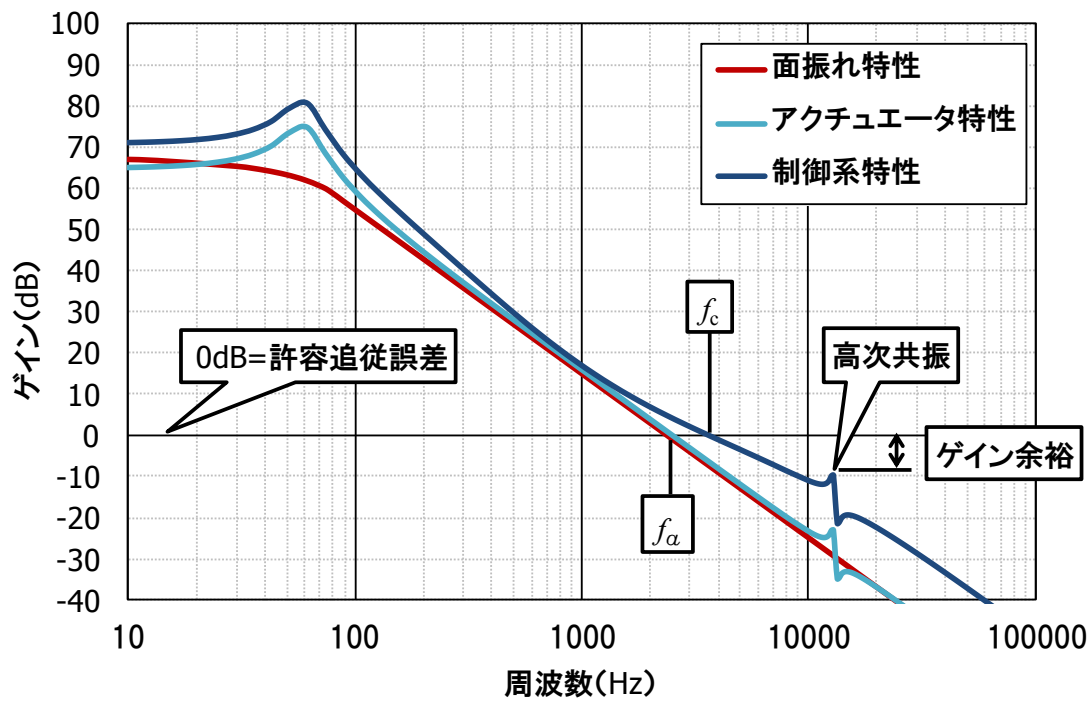
$$f_a = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\alpha_{(AC)0}}{e}} \quad (2.16)$$

と表される。ゲインクロス周波数 f_c は、位相進み補償の程度によって異なるが、光ディスク装置の制御系で用いられる位相進み 40~50° 程度の場合は、 f_a の約 1.5 倍となる。

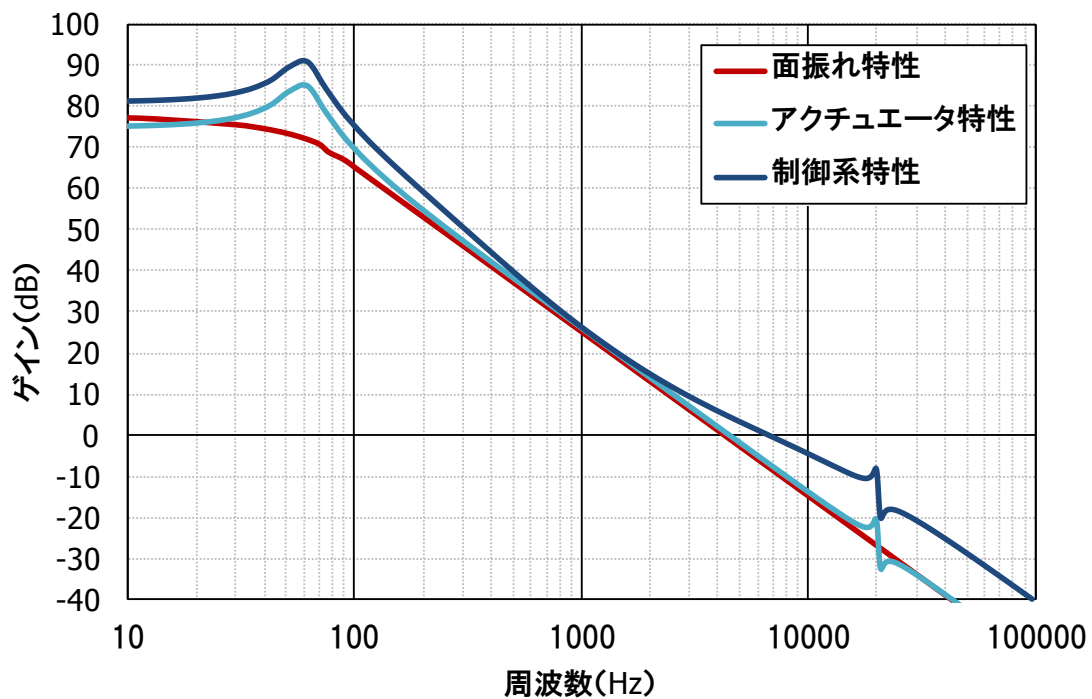
$$f_c \approx 1.5 f_a \quad (2.17)$$

ここで、フォーカシング方向とトラッキング方向の許容追従誤差は、それぞれ焦点深度とトラックピッチの 1/10 とする。焦点深度は $\lambda/(NA)^2$ で表されるので、フォーカシング方向の許容追従誤差は、CD で 0.39 μm 、DVD で 0.18 μm 、BD で 0.056 μm となる。また、トラッキング方向の許容追従誤差は、CD で 0.16 μm 、DVD で 0.074 μm 、BD で 0.032 μm となる。

この許容追従誤差と表 2.2 に示した必要加速度から、式 (2.16)、(2.17) によりゲインクロス周波数 f_c が定められる。その値を表 2.4 および図 2.10 に示す。



(a) DVD フォーカシング方向



(b) BD フォーカシング方向

図 2.9 対物レンズの位置決め制御系のゲイン特性

表 2.4 許容追従誤差から定められるゲインクロス周波数

			CD	DVD	BD
許容追従誤差	フォーカシング方向		0.39 μm	0.18 μm	0.056 μm
	トラッキング方向		0.16 μm	0.074 μm	0.032 μm
ゲインクロス周波数 f_c	フォーカシング方向	スリム・ウルトラ スリム最高倍速	3.1 kHz	3.6 kHz	6.5 kHz
		ハーフハイト 最高倍速	5.9 kHz	7.7 kHz	13.0 kHz
	トラッキング方向	スリム・ウルトラ スリム最高倍速	3.5 kHz	3.1 kHz	4.9 kHz
		ハーフハイト 最高倍速	7.7 kHz	9.2 kHz	13.1 kHz

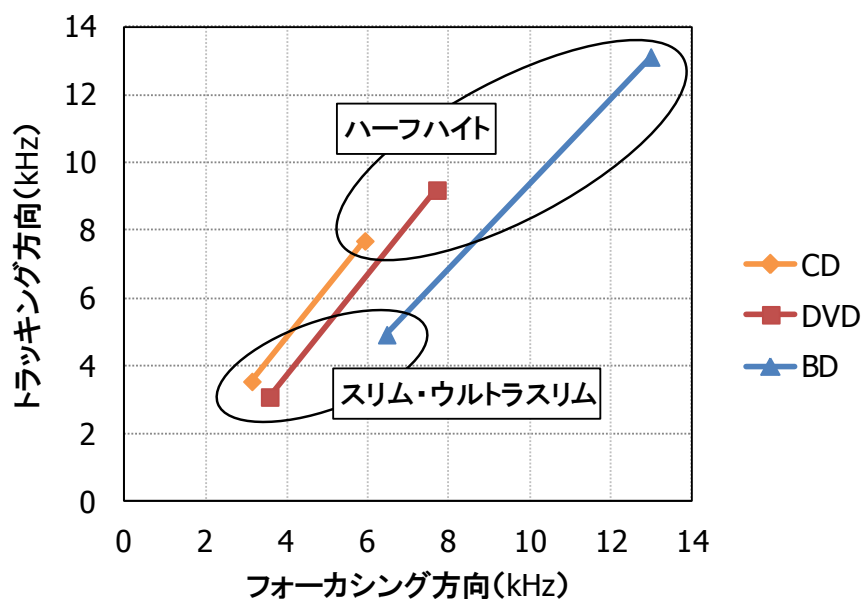


図 2.10 フォーカシング方向とトラッキング方向のゲインクロス周波数のグラフ表示

BD のフォーカシング方向を例にすると、スリム型・ウルTRASリム型の最高倍速である BD6 倍速では、表 2.2 に示した必要加速度 41 m/s^2 と、許容追従誤差 $0.056 \mu\text{m}$ によって、面振れ特性およびアクチュエータ特性でゲインが 0 dB となる周波数 f_a は 4.3 kHz 、ゲインクロス周波数 f_c は 6.5 kHz となる。ハーフハイト型の最高倍速である BD16 倍速では、必要加速度 166 m/s^2 、許容追従誤差 $0.056 \mu\text{m}$ によって、面振れ特性およびアクチュエータ特性でゲインが 0 dB となる周波数 f_a は 8.7 kHz 、ゲインクロス周波数 f_c は 13.0 kHz となる。

CD から DVD、さらに BD になるにつれて、また高倍速になるにつれてゲインクロス周波数の高

域化が必要になることがわかる。スリム型・ウルTRASリム型では、CDとDVDで3~4 kHz、BDで5~7 kHz、ハーフハイト型では、CDとDVDで6~9 kHz、BDで13 kHz程度のゲインクロス周波数が必要である。

ゲインクロス周波数の高域化に対して阻害要因となるのが対物レンズアクチュエータの高次共振である。高次共振に対して制御系の安定性を確保するためには、高次共振周波数はゲインクロス周波数よりも十分に高く、高次共振振幅はできるだけ小さいことが望ましい。

高次共振振幅に対するゲイン余裕を考慮すると、高次共振周波数はゲインクロス周波数の3倍以上が求められる。ゲインクロス周波数付近の制御系のゲイン勾配から、ゲインクロス周波数の3倍の周波数において、ゲインは約14 dB低下する。高次共振に対するゲイン余裕を6 dBと設定すると、高次共振振幅を8 dB以下に抑える必要がある。

実際のアクチュエータ特性測定時には、高次共振振幅を高次共振が無い理想特性からの差で表すのは煩雑であるため、ある特定の周波数におけるゲインと高次共振のピークゲインとの差を目標値とする。ここでは、1 kHzでのゲインとの差で規定し、これを1 kHzゲイン差と表す。

スリム・ウルTRASリム型のDVD系を例として高次共振の目標を図2.11に示す。図2.11では1 kHzにおけるゲインを0 dBとして表示している。必要なゲインクロス周波数がフォーカシング方向3.6 kHz、トラッキング方向3.1 kHzであることから、高次共振周波数はその3倍以上となる11 kHz以上をフォーカシング方向、トラッキング方向共に目標値とする。高次共振が無い場合、11 kHzにおけるゲインは1 kHzでのゲインに対して-42 dBであり、高次共振振幅の許容値を8 dBとすると、高次共振ピークの1 kHzゲイン差の目標値は-34 dB以下となる。

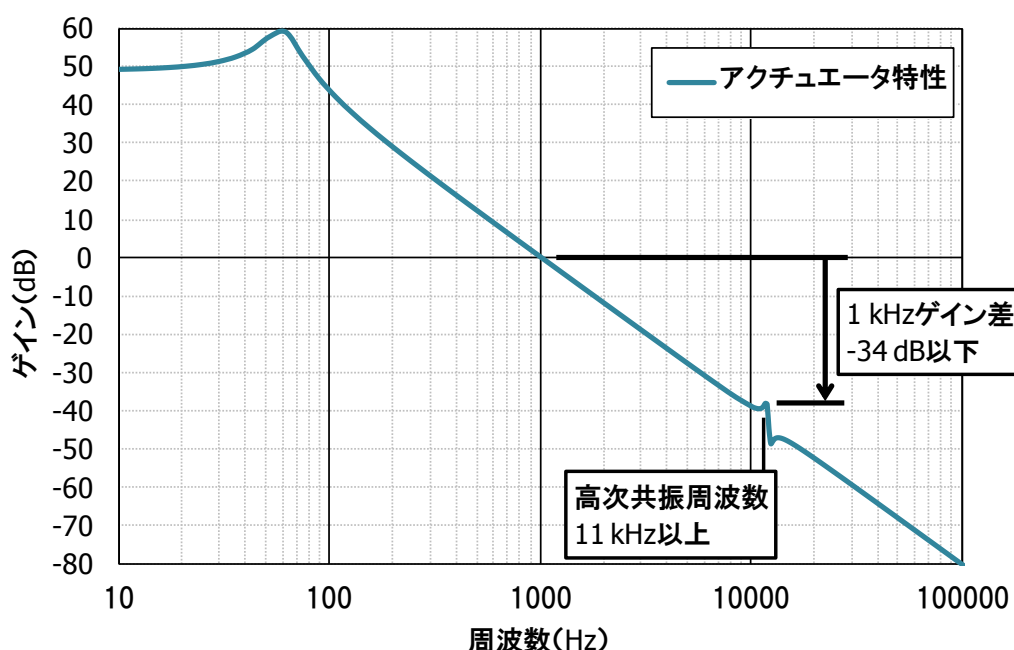
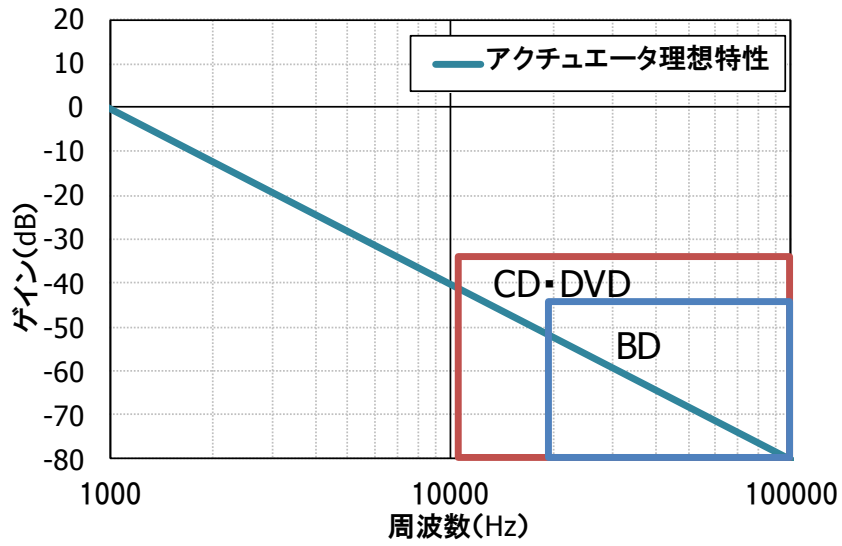


図 2.11 対物レンズアクチュエータの高次共振の目標 (スリム・ウルTRASリム型 DVD 系)

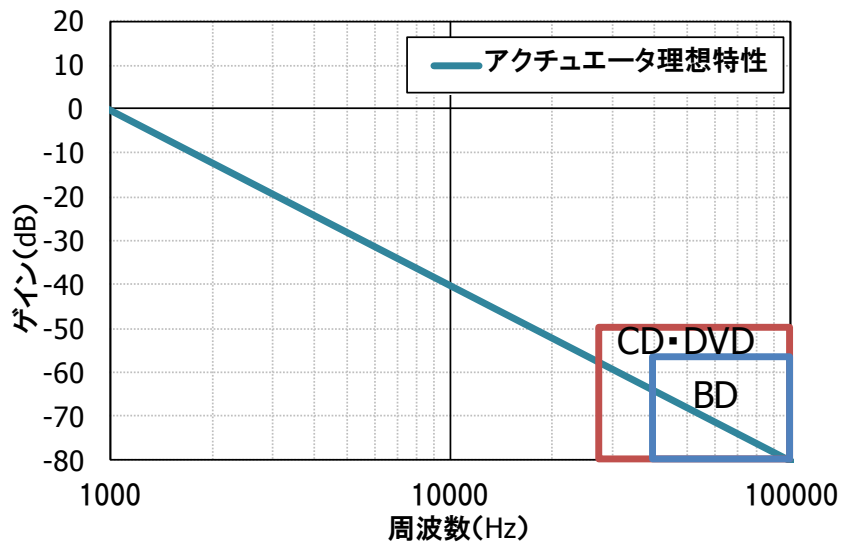
同様にして定めた高次共振周波数と1 kHzゲイン差の目標値を表2.5および図2.12に示す。フォーカシング方向、トラッキング方向共に、高次共振周波数の目標値は、スリム・ウルTRASリム型では、CDとDVDで11 kHz以上、BDで20 kHz以上、ハーフハイト型ではCDとDVDで28 kHz以上、BDで40 kHz以上とする。1 kHzゲイン差の目標値は、スリム・ウルTRASリム型では、CDとDVDで-34 dB以下、BDで-44 dB以下、ハーフハイト型ではCDとDVDで-50 dB以下、BDで-56 dB以下とする。ゲインクロス周波数の高域化に対応して、高次共振周波数の高域化と、高次共振振幅の指標である1 kHzゲイン差の絶対値の拡大が必要となることがわかる。

表 2.5 高次共振周波数と1 kHzゲイン差の目標値

		CD	DVD	BD
高次共振周波数	スリム・ウルTRASリム	11 kHz 以上	11 kHz 以上	20 kHz 以上
	ハーフハイト	28 kHz 以上	28 kHz 以上	40 kHz 以上
1 kHz ゲイン差	スリム・ウルTRASリム	-34 dB 以下	-34 dB 以下	-44 dB 以下
	ハーフハイト	-50 dB 以下	-50 dB 以下	-56 dB 以下



(a) スリム・ウルTRASリム



(b) ハーフハイト

図 2.12 高次共振周波数と 1 kHz ゲイン差の目標範囲

2.3.3 高密度化に対応する対物レンズ傾きの抑制

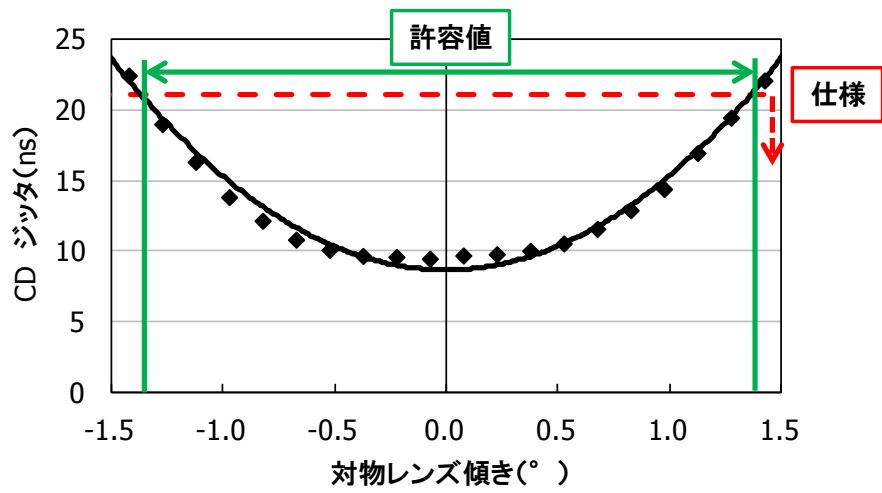
対物レンズと光ディスクの相対傾きがあると、光ディスク上への集束光にコマ収差が発生し集光スポットが広がる。これによって記録再生特性が劣化する。対物レンズと光ディスクの相対傾きは、光ディスクの半径方向に沿った傾き（ローリング）と光ディスクの接線方向に沿った傾きがある。図 2.3 に示した対物レンズアクチュエータの構造において、サスペンションワイヤが平行リンクとなるので、サスペンションワイヤの軸方向である光ディスクの接線方向には傾きにくい。一方、ローリング傾きは左右のサスペンションワイヤが互いにフォーカシング方向の逆側に変形するモードであるので容易に生じる。したがって、ローリング方向の対物レンズ傾きを抑制することが課題となる。

なお、スピンドルモータへの光ディスクの取り付け誤差による初期的な光ディスクと対物レンズの相対傾きについては、チルトアクチュエータによって補正することが可能である[13][37]。そこで、本論文ではローリング方向の対物レンズ傾きを対象とし、対物レンズアクチュエータによってフォーカシング方向とトラッキング方向に対物レンズを並進動作させたときの対物レンズ傾きの抑制について検討する。

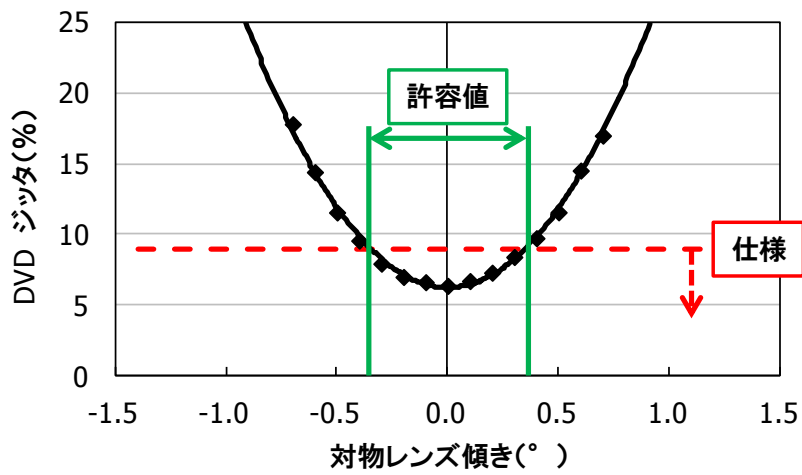
対物レンズ傾きによる特性変化の例として、対物レンズ傾きに対する再生信号のジッタ特性の測定結果を図 2.13 に示す。

ジッタは、再生信号波形の時間軸上でのばらつきの程度を表す指標である。CD のジッタは再生信号の周期変動を時間の単位として表し、DVD と BD では基準周期に対する再生信号の周期変動の割合として表す。いずれも対物レンズ傾きが無い場合にジッタは最良で、対物レンズ傾きが増えるにつれてジッタは増加する。

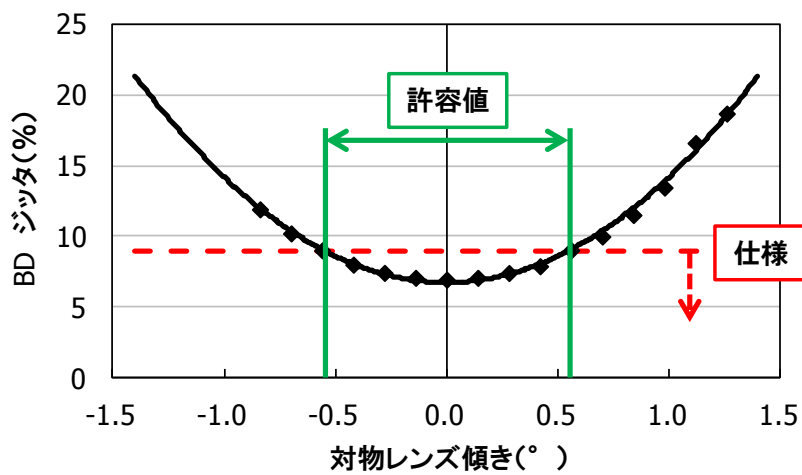
ジッタの仕様値は光ディスク装置によって異なるが、ここでは CD が 21 ns 以下、DVD と BD が 9 % 以下とする。この仕様値と図 2.13 の特性から、対物レンズ傾きの許容値は CD で $\pm 1.35^\circ$ 、DVD で $\pm 0.34^\circ$ 、BD で $\pm 0.55^\circ$ となることがわかる。この中で最も小さい値である DVD の $\pm 0.34^\circ$ から、フォーカシング方向とトラッキング方向の並進動作時の対物レンズ傾きを $\pm 0.3^\circ$ 以内に抑える必要がある。



(a) CD



(b) DVD



(c) BD

図 2.13 対物レンズ傾きに対する再生信号ジッタ特性の測定結果

対物レンズアクチュエータの動作は、フォーカシング方向あるいはトラッキング方向へのオフセットに相当する静的な変位と、光ディスクの面振れやトラック位置変動に追従する動的な変位に分けることができる。対物レンズ傾きについても、それぞれに対応して静的傾きと動的傾きを考慮する。

静的傾きは、コイルに直流電流を印加して、フォーカシング方向あるいはトラッキング方向に静的に変位させたときに付随して生じる対物レンズ傾きを表し、動的傾きは、ある周波数の交流電流をコイルに印加してフォーカシング方向あるいはトラッキング方向に振動させたときに付随して生じる対物レンズ傾きを表す。特に、動的傾きであるローリング共振時の対物レンズ傾きは、静的傾きに対して著しく増加する。静的傾きおよび動的傾きを含めて、並進動作時の対物レンズ傾きの目標を表 2.6 に示す通り、 $\pm 0.3^\circ$ 以内とする。

表 2.6 並進動作時の対物レンズ傾きの目標値

静的傾き	フォーカシング方向および トラッキング方向へのオフセット時	$\pm 0.3^\circ$ 以内
動的傾き	ローリング共振時	

2.4 結言

本章では、光ディスク装置において記録再生を行う主要部品である光ピックアップの構造と、光ピックアップに搭載されて、対物レンズを位置決め駆動する対物レンズアクチュエータの構造を示した。そして、光ディスク装置の高速化、大容量化のために、対物レンズアクチュエータに求められる特性として、加速度感度、振動特性、対物レンズ傾きを採り上げ、それぞれの目標値について示した。

- (1) 光ディスクの面振れ量およびトラック位置変動量の規格と光ディスクの回転周波数から、対物レンズアクチュエータに必要な加速度が算出される。スリム・ウルトラスリム型では CD の最高倍速である 24 倍速時に、ハーフハイト型では CD の最高倍速である 52 倍速時に最大の加速度が必要となることを明らかにした。
- (2) 対物レンズアクチュエータの加速度感度の指標として従来用いられていた電流加速度感度と電圧加速度感度に加えて、それらの相乗平均を取って、新たな総合的感度の指標として電力加速度感度を定義した。必要な最大加速度に対して、許容消費電力を設定することで、電力加速度感度の目標値が規定されることを示した。
- (3) 光ディスクの回転周波数における面振れ量およびトラック位置変動量と、制御系の許容追従誤差から、必要となる制御系のゲインクロス周波数が求められる。CD から DVD、さらに BD と高密度光ディスクになるにつれて、また同じ光ディスクでは高倍速になるにつれて、ゲインクロス周波数の高域化が必要となる。スリム・ウルトラスリム型では、CD と DVD で 3~4 kHz、BD で 5~7 kHz、ハーフハイト型では、CD と DVD で 6~9 kHz、BD で 13 kHz 程度のゲインクロス周波数が必要となることを示した。

- (4) 対物レンズアクチュエータの高次共振周波数に対する制御系のゲイン余裕を 6 dB に設定した場合、高次共振周波数はゲインクロス周波数の 3 倍以上、高次共振振幅は 8 dB 以下が求められることを明らかにした。ゲインクロス周波数の高域化に対応して、高次共振周波数の高域化と、高次共振振幅の指標である 1 kHz ゲイン差の絶対値の拡大が必要となる。高次共振周波数は、スリム・ウルTRASリム型では、CD と DVD で 11 kHz 以上、BD で 20 kHz 以上、ハーフハイト型では CD と DVD で 28 kHz 以上、BD で 40 kHz 以上が必要であり、1 kHz ゲイン差は、スリム・ウルTRASリム型では、CD と DVD で -34 dB 以下、BD で -44 dB 以下、ハーフハイト型では CD と DVD で -50 dB 以下、BD で -56 dB 以下が必要となることを示した。
- (5) サスペンションワイヤ支持方式の対物レンズアクチュエータでは、フォーカシング方向あるいはトラッキング方向の並進動作時に、サスペンションワイヤ軸回りのローリング方向への回転動作も発生し得る。このローリング方向へのアクチュエータ可動部の回転は、対物レンズの傾きとして現れ、光ディスク上への集束光にコマ収差を発生させ、記録再生特性の劣化を引き起こすことを示した。
- (6) 対物レンズ傾きに対する再生信号ジッタ特性の測定結果から、対物レンズ傾きの許容値は、CD で $\pm 1.35^\circ$ 、DVD で $\pm 0.34^\circ$ 、BD で $\pm 0.55^\circ$ となることがわかった。この中で最も小さい値である DVD の $\pm 0.34^\circ$ から、アクチュエータ可動部をフォーカシング方向およびトラッキング方向に並進動作させた時の対物レンズ傾きを $\pm 0.3^\circ$ 以内に抑える必要があることを明らかにした。

3. 電力加速度感度を用いた駆動感度の最適化

3.1 緒言

第2章で記したように、転送速度の高速化に対応するためには対物レンズアクチュエータの駆動感度が高いことが必要である。駆動感度には静的感度と加速度感度があり、静的感度は加速度感度に換算できるので、ここでは加速度感度を高めることを検討する。

加速度感度は高速化に直接関わるため、特に重要な指標である。本章で後述するように、加速度感度はコイルで発生する駆動力と可動部の質量の比で表される。したがって、加速度感度を高めるためには、駆動力を大きくして、可動部の質量を軽くすればよい。

しかし、駆動力の増加と可動部の軽量化の両立は簡単ではない。例えば、コイルの巻数を増やしてコイルの全長を長くすれば、駆動力は増加するものの、コイルの質量も増加する分だけ可動部の質量も増加する。このとき、コイルの巻数をどの程度にすればよいかの指針は、これまで示されていなかった。

従来は、加速度感度の指標として電流加速度感度あるいは電圧加速度感度を用いられてきた。電流加速度感度が基本的な指標であり、コイル抵抗の影響も含めるために電圧加速度感度も用いられている。本章で記すように、これらは一方が増加すれば一方が減少する特性を示す。したがって、電流加速度感度と電圧加速度感度では加速度感度の最適化は表せていなかった。

そこで本章では、新たな総合的感度の指標として、電流加速度感度と電圧加速度感度の相乗平均で表される電力加速度感度を導入し、コイルの質量と可動部の質量による加速度感度の最適化について示す。そして、電力加速度感度による最適化を実際の対物レンズアクチュエータに適用した例を示す。

3.2 電流加速度感度と電圧加速度感度

対物レンズアクチュエータのコイルに通電する電流を I 、印加する電圧を V 、可動部の加速度を α として、電流加速度感度 S_I 、電圧加速度感度 S_V は、

$$S_I = \frac{\alpha}{I} \quad (3.1)$$

$$S_V = \frac{\alpha}{V} = \frac{S_I}{|Z|} \approx \frac{S_I}{R} \quad (3.2)$$

と表される。2.3 節に記したように、加速度感度を規定する 1 kHz においては、コイルのインピーダンスの大きさ $|Z|$ はコイル抵抗 R とみなせる。

磁界中のコイルに電流を通電したときにコイルで発生する力 F は、コイルの微小部分 dl に作用する磁束密度 $B(l)$ のコイル全長にわたる積分と、電流 I によって、

$$F = I \int B(l) dl = I \bar{B} L \quad (3.3)$$

と表される。 \bar{B} はコイル全長 L に対する磁束密度 $B(l)$ の平均値である。

ここで、可動部の質量を m として、これをコイルの質量 m_c とコイル以外の質量 m_0 に分ける。

$$m = m_c + m_0 \quad (3.4)$$

なお、対物レンズアクチュエータのコイルにはフォーカシングコイルとトラッキングコイルの 2 系統があるが、まずは 2 系統のコイルを合わせて 1 つのコイルとして扱う。

加速度 α は、

$$\alpha = \frac{F}{m} = \frac{F}{m_c + m_0} \quad (3.5)$$

であるので、電流加速度感度 S_I 、電圧加速度感度 S_V はそれぞれ、

$$S_I = \frac{F}{I(m_c + m_0)} = \frac{\bar{B}L}{m_c + m_0} \quad (3.6)$$

$$S_V = \frac{F}{RI(m_c + m_0)} = \frac{\bar{B}L}{R(m_c + m_0)} \quad (3.7)$$

と表される。

コイル全長 L は、コイル材質の密度 ρ 、コイル線径 ϕ 、コイル質量 m_c によって、

$$L = \frac{4m_c}{\rho\pi\phi^2} \quad (3.8)$$

と表される。また、コイル抵抗 R は、コイル材質の比抵抗 r により、

$$R = \frac{4rL}{\pi\phi^2} \quad (3.9)$$

と表される。式 (3.6) ~ (3.9) から、

$$S_I = \frac{4\bar{B}m_c}{\rho\pi\phi^2(m_c + m_0)} \quad (3.10)$$

$$S_V = \frac{\pi\phi^2\bar{B}}{4r(m_c + m_0)} \quad (3.11)$$

となる。

磁束密度の平均値 \bar{B} 、コイル材質の密度 ρ 、コイル材質の比抵抗 r 、コイル線径 ϕ 、コイル以外の質量 m_0 を固定値として、 m_c/m_0 に対して電流加速度感度 S_I 、電圧加速度感度 S_V を図示すると図 3.1、図 3.2 となる。図の縦軸は、 $m_c/m_0 = 1$ のときの値を 1 として規格化している。

式 (3.10) , (3.11) および図 3.1, 図 3.2 から以下のことがわかる.

電流加速度感度は, m_c/m_0 に対して単調増加する. すなわち, 可動部の質量に対してコイルの割合を増やすほど, 電流加速度感度は大きくなる. 例えば, コイルの巻数を増やして駆動力を大きくしたほうが良いことを示している. また, 式 (3.10) から, コイル質量 m_c を一定とするとコイル線径 ϕ を細くすることも電流加速度感度の向上に有効である. コイル質量 m_c が一定でコイル線径 ϕ を細くすることは, コイル全長を長くすることに相当する.

電圧加速度感度は, m_c/m_0 に対して単調減少する. すなわち, 可動部の質量に対してコイルの割合を少なくするほど, 電圧加速度感度は大きくなる. 例えば, コイルの巻数を少なくしたほうが良いことを示している. コイルの巻数を少なくすると駆動力は減少するが, 駆動力の減少よりもコイル抵抗の減少の効果が大きいことを示している. また, 式 (3.11) から, コイル質量 m_c を一定とするとコイル線径 ϕ を太くすることも電圧加速度感度の向上に有効である. コイル質量 m_c が一定でコイル線径 ϕ を太くすることは, コイル全長を短くしてコイル抵抗を減らすことに相当する.

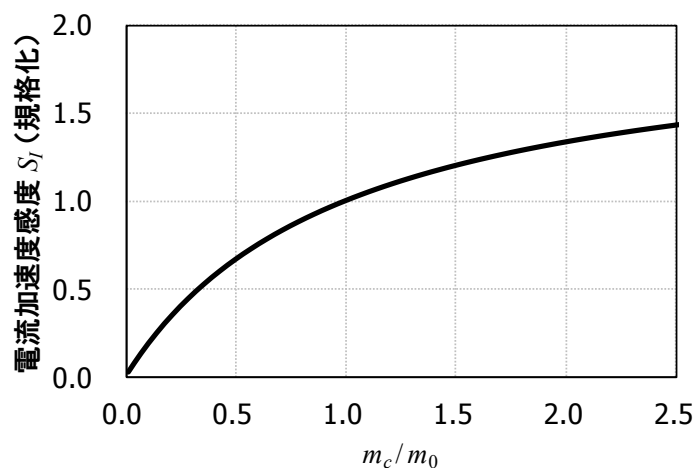


図 3.1 コイル質量の割合に対する電流加速度感度の変化

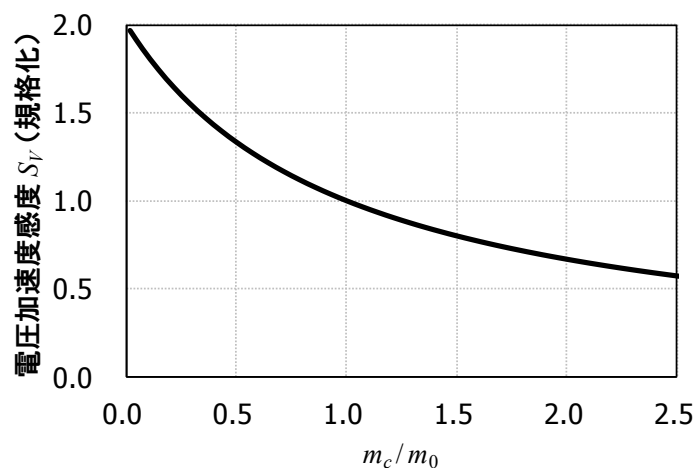


図 3.2 コイル質量の割合に対する電圧加速度感度の変化

3.3 電力加速度感度の定義と最適化

従来は、電流加速度感度と電圧加速度感度を指標としていた。しかし、上述のように電流加速度感度と電圧加速度感度は、コイル質量やコイル線径に対して、一方は増加し、一方は減少する特性を示し、駆動力の最適化を表すには適切ではない。そこで、新たに定義する電力加速度感度 S_W を用いて駆動特性を評価する。

電力加速度感度 S_W を、電流加速度感度と電圧加速度感度の相乗平均として、

$$S_W = \sqrt{S_I S_V} = \frac{\alpha}{\sqrt{W}} = \frac{\bar{B}L}{\sqrt{R(m_c + m_0)}} = \frac{\bar{B}\sqrt{m_c}}{\sqrt{\rho r(m_c + m_0)}} \quad (3.12)$$

と表す。磁束密度の平均値 \bar{B} 、コイル材質の密度 ρ 、コイル材質の比抵抗 r 、コイル以外の質量 m_0 を固定値として、式 (3.12) を m_c で微分すると、

$$\frac{dS_W}{dm_c} = \frac{\bar{B}}{2\sqrt{\rho r}} \cdot \frac{-m_c + m_0}{\sqrt{m_c}(m_c + m_0)^2} \quad (3.13)$$

となる。これから、 $\frac{dS_W}{dm_c} = 0$ となる、

$$m_c = m_0 \quad (3.14)$$

のときに電力加速度感度 S_W は最大値を取る。 m_c/m_0 をパラメータとして、 $m_c/m_0 = 1$ のときの値を 1 に規格化して電力加速度感度 S_W を図示すると図 3.3 となる。これは、コイルの質量とコイル以外の質量が等しい場合に、消費電力に対して発生する加速度が最大となることを示している。したがって、電力加速度感度を用いることで、駆動コイルの最適化が可能となることがわかった。

電力加速度感度を全体的に高めるには、式 (3.12) から磁束密度の平均値 \bar{B} を大きく、コイル材質の密度 ρ と比抵抗 r の積を小さく、コイル以外の質量 m_0 を軽くすることが有効である。磁束密度の平均値 \bar{B} を大きくするには、マグネットそのものの磁束密度を大きくすることは当然として、コイル全長に対して有効な駆動力を発生するコイル長の割合を高める磁気回路形状が求められる。この具体例については 3.4 節で示す。

コイル材質として一般に用いられる銅とアルミニウムの密度 ρ と比抵抗 r を表 3.1 に示す。密度はアルミニウムの方が小さく、比抵抗は銅の方が小さい。そして、密度 ρ と比抵抗 r の積はアルミニウムが銅の約 1/2 である。したがって、アルミニウムは電力加速度感度の向上に有効な材質である。ただし、アルミニウムは半田付け性が良くない、強度が弱い、コストが高いなどのデメリットも有り、対物レンズアクチュエータの場合は、銅線を用いることが多い。

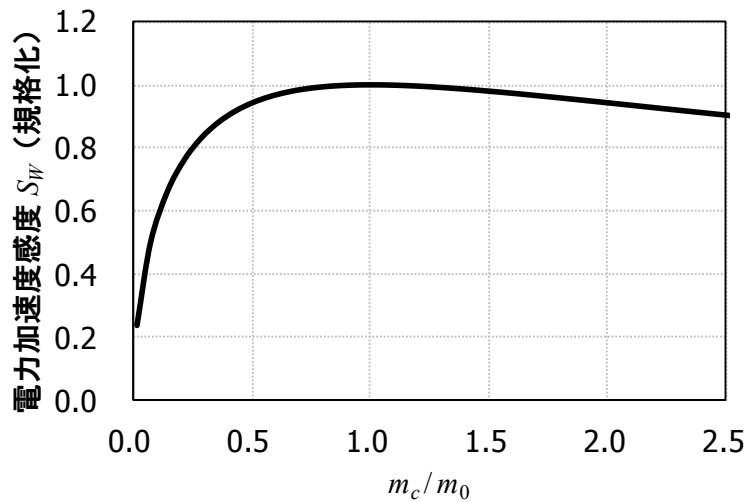


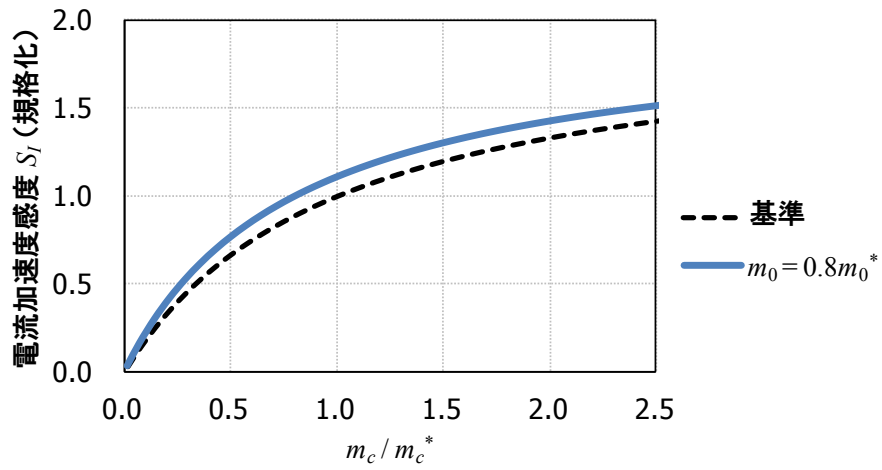
図 3.3 コイル質量の割合に対する電力加速度感度の変化

表 3.1 コイル材質として用いられる銅とアルミニウムの密度と比抵抗

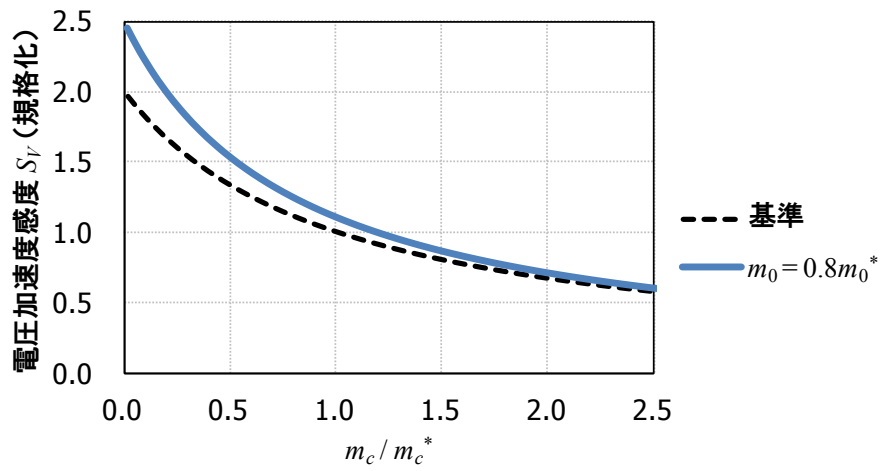
		銅	アルミニウム
密度： ρ	10^3 kg/m^3	8.92	2.70
比抵抗： r	$10^{-8} \text{ } \Omega\text{m}$	1.68	2.65
密度×比抵抗： ρr	$10^{-5} \text{ kg}\Omega/\text{m}^2$	15.0	7.16

コイル以外の質量 m_0 の影響について示す。式 (3.10) ~ (3.12) から、コイル以外の質量 m_0 が軽くなれば、電流加速度感度、電圧加速度感度、電力加速度感度いずれも向上する。例として、コイル以外の質量 m_0 を図 3.1~3.3 の条件の 80 % とした場合を図 3.4 に示す。破線で示した基準は、図 3.1~3.3 の条件の場合である。変更前の条件において $m_c/m_0 = 1$ のときのコイル質量とコイル以外の質量を m_c^* 、 m_0^* とし、図 3.4 の横軸は、 m_c^* に対するコイル質量 m_c の比としている。この場合に、電力加速度感度が最大となるのは、コイル以外の質量の軽量化に応じて、 $m_c/m_0 = 1$ の条件からコイル質量 m_c が $0.8m_c^*$ のときである。

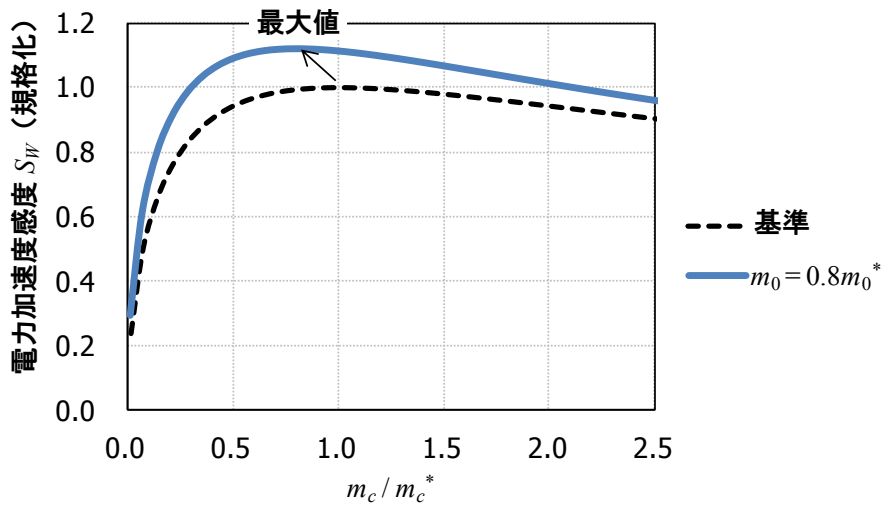
コイル以外の質量 m_0 だけを軽くして、コイル質量 m_c を変えない場合、すなわち図 3.4 で $m_c/m_c^* = 1$ の場合でも、電流加速度感度、電圧加速度感度、電力加速度感度の向上に効果はある。その上で、コイル以外の質量の軽量化に合わせてコイル質量も軽くすることで、電力加速度感度の最大化を図ることができる。



(a) 電流加速度感度



(b) 電圧加速度感度



(c) 電力加速度感度

図 3.4 コイル以外の質量 m_0 を軽くした場合の加速度感度の変化 ($m_0 = 0.8m_0^*$)

ここまではフォーカシングコイルとトラッキングコイルを一つのコイルとして考えてきた。これを分けて考える。フォーカシング方向の電力加速度感度を S_{WFO} ，トラッキング方向の電力加速度感度を S_{WTR} ，フォーカシングコイルの質量を m_{cFO} ，トラッキングコイルの質量を m_{cTR} ，フォーカシングコイルに作用する磁束密度の平均値を \bar{B}_{FO} ，トラッキングコイルに作用する磁束密度の平均値を \bar{B}_{TR} とすると，

$$S_{WFO} = \frac{\bar{B}_{FO} \sqrt{m_{cFO}}}{\sqrt{\rho r (m_{cFO} + m_{cTR} + m_0)}} \quad (3.15)$$

$$S_{WTR} = \frac{\bar{B}_{TR} \sqrt{m_{cTR}}}{\sqrt{\rho r (m_{cFO} + m_{cTR} + m_0)}} \quad (3.16)$$

である。ここで，

$$S_{WTR} = \sqrt{k_1} S_{WFO} \quad (3.17)$$

$$\bar{B}_{TR} = k_2 \bar{B}_{FO} \quad (3.18)$$

と置くと，式 (3.15) ～ (3.18) から，

$$m_{cTR} = \frac{k_1}{k_2^2} m_{cFO} \quad (3.19)$$

である。

フォーカシング方向の電力加速度感度 S_{WFO} とトラッキング方向の電力加速度感度 S_{WTR} の 2 乗平均平方根を指標とすると，

$$\sqrt{\frac{S_{WFO}^2 + S_{WTR}^2}{2}} = \frac{\bar{B}_{FO} \sqrt{(1+k_1)m_{cFO}}}{\sqrt{2\rho r \left[\left(1 + \frac{k_1}{k_2^2}\right) m_{cFO} + m_0 \right]}} \quad (3.20)$$

となる。

$k_2 = 1$ ，すなわちフォーカシングコイルに作用する磁束密度の平均値 \bar{B}_{FO} とトラッキングコイルに作用する磁束密度の平均値 \bar{B}_{TR} が等しいと仮定すると，式 (3.20) は，

$$\sqrt{\frac{S_{WFO}^2 + S_{WTR}^2}{2}} = \frac{\bar{B}_{FO} \sqrt{(1+k_1)m_{cFO}}}{\sqrt{2\rho r [(1+k_1)m_{cFO} + m_0]}} \quad (3.21)$$

となる。これは式 (3.12) と同じ形式なので，

$$\begin{aligned}
m_{cFO} &= \frac{1}{1+k_1} m_0 \\
m_{cTR} &= \frac{k_1}{1+k_1} m_0 \\
m_{cFO} + m_{cTR} &= m_0
\end{aligned}
\tag{3.22}$$

のときに最大となる。具体的には，フォーカシングコイルとトラッキングコイルの質量の和をコイル以外の質量と等しくして，フォーカシングコイルとトラッキングコイルの質量比を電力加速度感度の2乗の比とすることが指針となる。

3.4 電力加速度感度によるコイル最適化の適用例

3.4.1 ハーフハイト型におけるコイルのパラメータ検討

対物レンズアクチュエータのコイル設計への適用例として，対物レンズアクチュエータの中で最も大きな加速度感度が必要なハーフハイト型の場合を以下に記す。

DVD用ハーフハイト型の対物レンズアクチュエータの構造[101]を図3.5に示す。スリム型・ウルTRASリム型よりも装置寸法に余裕があるので，ホルダの側面全体にコイルを平面状に配置する構成として，駆動効率を高めている。ホルダの二つの側面にそれぞれフォーカシングコイルとトラッキングコイルを配置する。このフォーカシングコイルとトラッキングコイルに対向して，磁極が4分割されたマグネットを配置する。図3.6に示すように，フォーカシングコイルは上下の2辺がマグネットの上下の磁極に対向し，トラッキングコイルは左右の2辺がマグネットの左右の磁極に対向する。それぞれ2辺で駆動力が発生するので，有効な駆動力を発生するコイル長の割合を高めることができる。

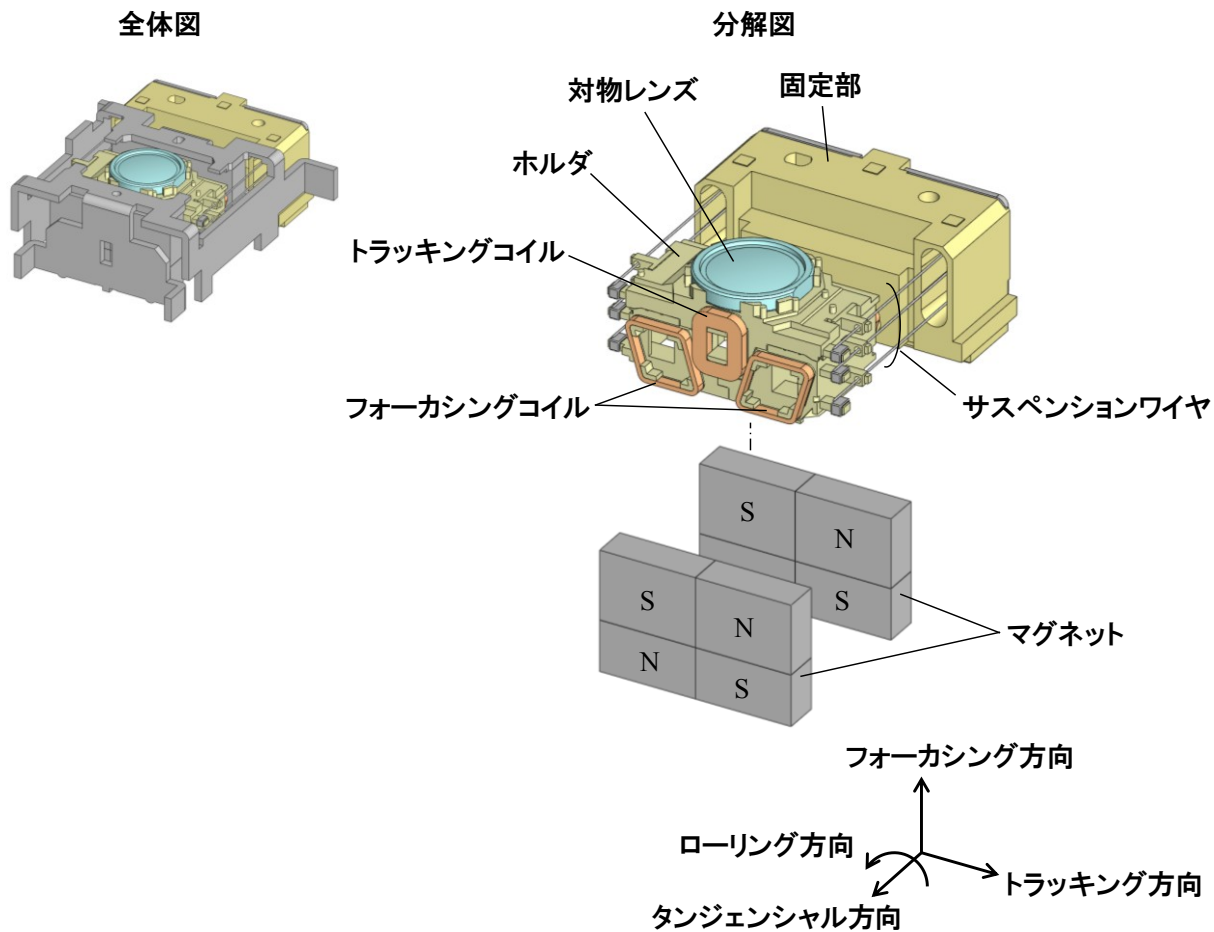


図 3.5 DVD 用ハーフハイト型対物レンズアクチュエータの構造例

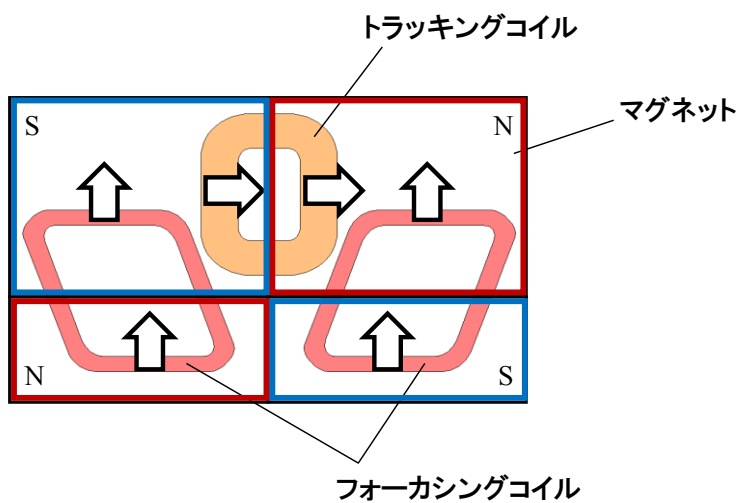


図 3.6 DVD 用ハーフハイト型対物レンズアクチュエータのコイルとマグネットの配置

可動部のコイル以外の質量を表 3.2 の値に固定して、コイルの質量をパラメータとしたときの電流加速度感度、電圧加速度感度、電力加速度感度の計算結果を以下に示す。

まず、コイルの線径を固定して、コイルの巻数を変えることでコイル全長およびコイル質量を変えた場合の結果を示す。この場合のコイルの条件を表 3.3 に示す。コイルの線径を 0.08 mm、コイルの列数（コイル巻回の中心軸に沿った方向のコイルの数）を 5 列に固定して、コイルの層数（コイル列を重ねた数）を変化させてコイルの巻数を変化させた。巻数の増加に応じてコイル質量が増加する。コイル以外の質量に対するフォーカシングコイルとトラッキングコイルの合計の質量の比である m_c/m_0 の値の範囲は 0.26~1.27 である。フォーカシング方向の加速度感度の計算結果を図 3.7 に、トラッキング方向の加速度感度の計算結果を図 3.8 に示す。

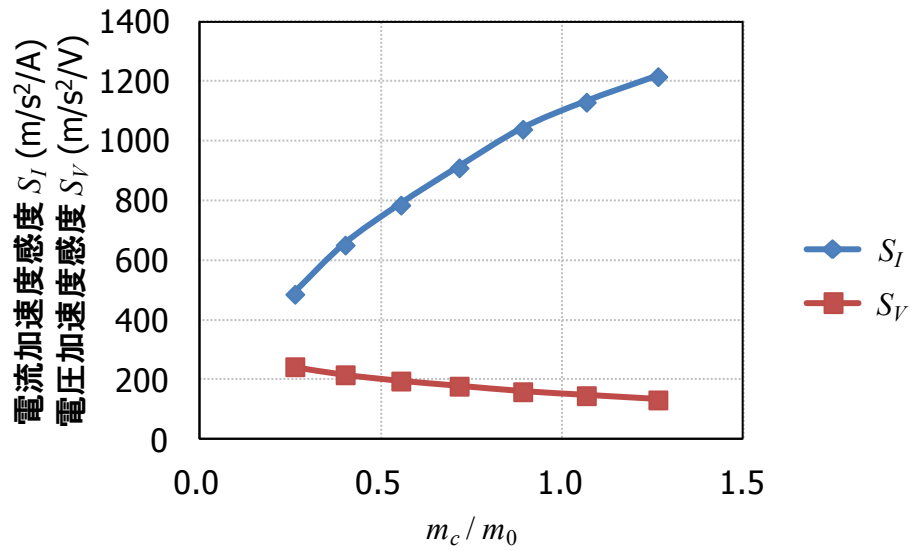
この場合は、コイル質量の増加とコイル全長の増加が対応するので、図 3.1~3.2 と同様に、 m_c/m_0 に対して電流加速度感度は単調増加、電圧加速度感度は単調減少の特性となり、電力加速度感度は図 3.3 と同様に、 $m_c/m_0 = 1$ 付近で最大となることがわかる。

表 3.2 コイル質量のパラメータ検討に用いたコイル以外の質量の値

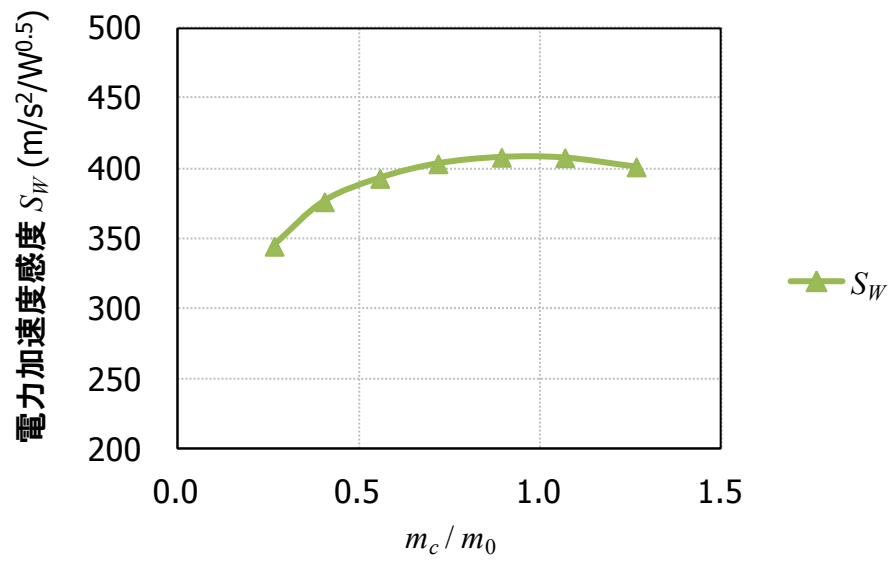
		ホルダ	対物レンズ	接着剤・半田	合計
質量	mg	100	27	10	137

表 3.3 コイル線径を固定してコイル巻数を変えた場合の条件

No.			1	2	3	4	5	6	7
フォーカシングコイル	線径	mm	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
	列数		5	5	5	5	5	5	5
	層数		2	3	4	5	6	7	8
	巻数		9	13	18	22	27	31	36
	抵抗	Ω	2.0	3.0	4.0	5.1	6.5	7.7	9.2
	質量	mg	20	31	41	53	67	79	95
トラッキングコイル	線径	mm	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
	列数		5	5	5	5	5	5	5
	層数		5	7	9	11	13	15	17
	巻数		22	31	40	49	58	67	76
	抵抗	Ω	1.1	1.8	2.5	3.2	3.9	4.7	5.6
	質量	mg	16	25	35	45	55	67	79
コイル合計質量 m_c		mg	36	56	76	98	122	146	174
コイル以外質量 m_0		mg	137	137	137	137	137	137	137
m_c/m_0			0.26	0.41	0.55	0.72	0.89	1.07	1.27

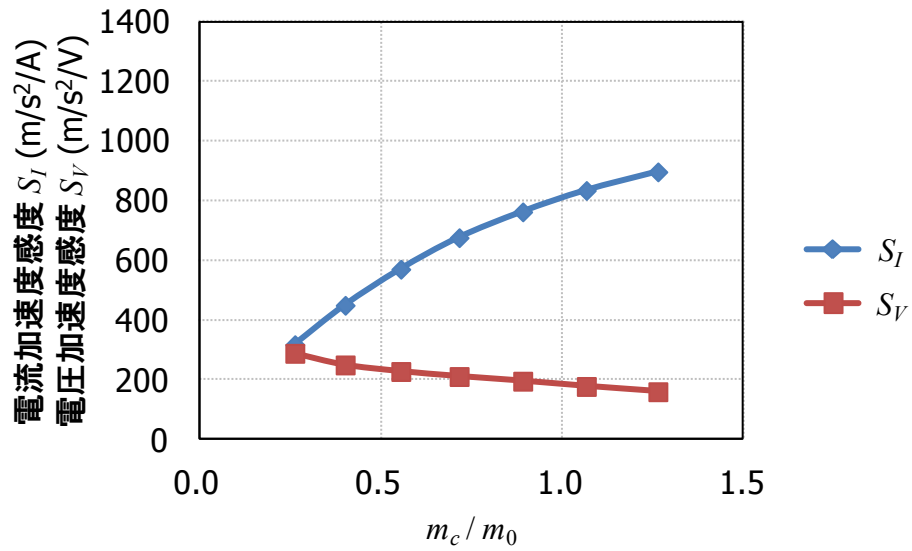


(a) 電流加速度感度, 電圧加速度感度

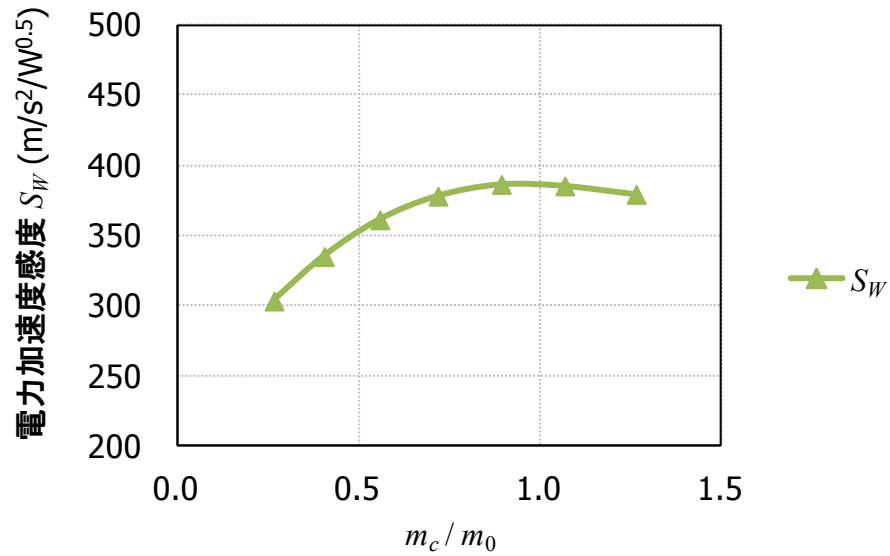


(b) 電力加速度感度

図 3.7 コイル巻数変更時におけるコイル質量の割合に対する加速度感度の計算結果 (フォーカシング方向)



(a) 電流加速度感度, 電圧加速度感度



(b) 電力加速度感度

図 3.8 コイル巻数変更時におけるコイル質量の割合に対する加速度感度の計算結果 (トラッキング方向)

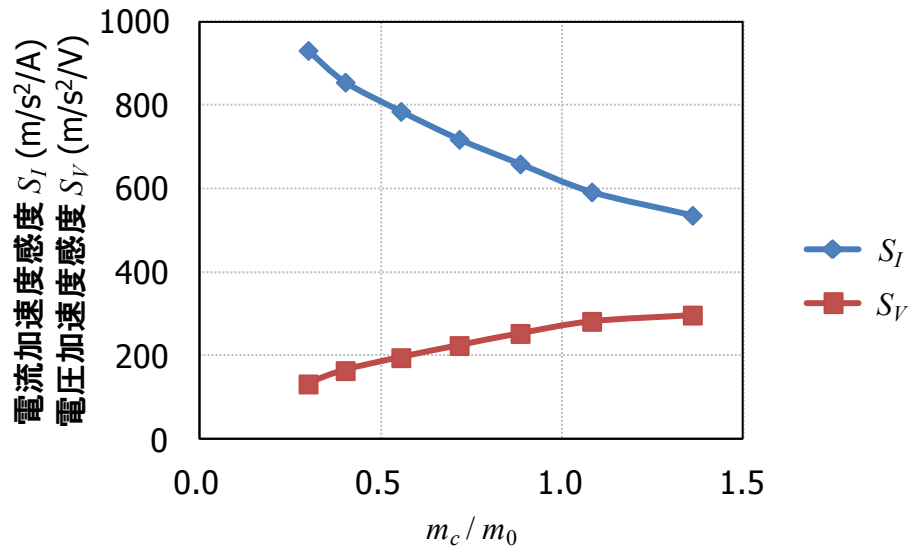
次に、コイルの巻数を固定して、コイルの線径を変えることでコイル質量を変えた場合の結果を示す。この場合のコイルの条件を表 3.4 に示す。コイルの巻数は、表 3.3 の $m_c/m_0 = 0.55$ の場合と同じ値に固定して、コイルの線径を 0.06 から 0.12 mm まで 0.01 mm 刻みとした。フォーカシング方向の加速度感度の計算結果を図 3.9 に、トラッキング方向の加速度感度の計算結果を図 3.10 に示す。

コイル線径の増加に応じて、コイル質量は増加し、コイル抵抗は減少する。コイル全体の大きさは若干変化するものの、コイルの巻数が変わらないので、発生する駆動力はほぼ一定である。したがって、図 3.7 (a) , 図 3.8 (a) と異なり、 m_c/m_0 に対して電流加速度感度は単調減少、電圧加速度感度は単調増加となる。しかし、この場合でも電力加速度感度は図 3.7 (b) , 図 3.8 (b) と同様に、 $m_c/m_0 = 1$ 付近で最大となる特性を示している。

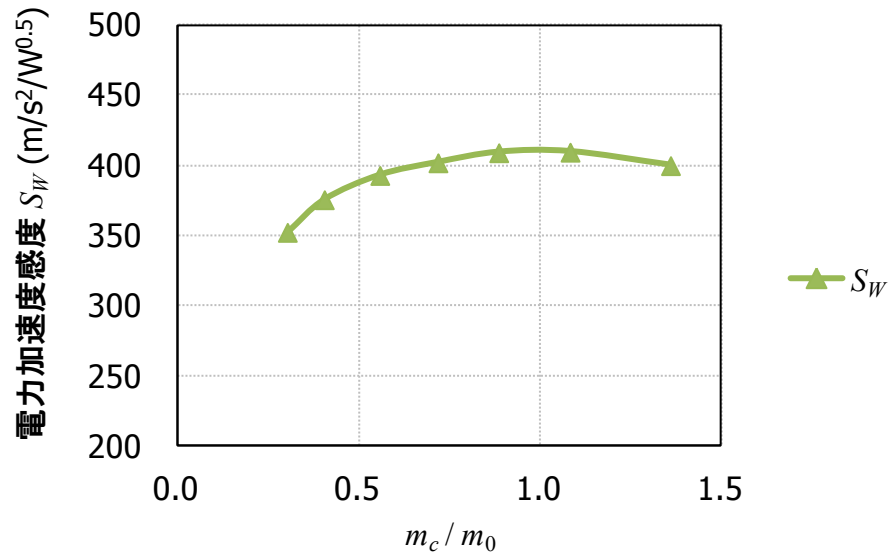
表 2.3 に示したハーフハイト型の電力加速度感度の目標値であるフォーカシング方向 $356 \text{ m/s}^2/\text{W}^{0.5}$, トラッキング方向 $298 \text{ m/s}^2/\text{W}^{0.5}$ は、計算した範囲においては m_c/m_0 が 0.3 よりも大きければ満足する見込みである。実際の対物レンズアクチュエータでは寸法制約上、 $m_c/m_0 = 1$ より大きくコイルの質量を増やすことは難しく、 m_c/m_0 は 0.4~0.8 が目安となる。

表 3.4 コイル巻数を固定してコイル線径を変えた場合の条件

No.		1	2	3	4	5	6	7
フォーカシングコイル	線径 mm	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10	0.11	0.12
	列数	5	5	5	5	5	5	5
	層数	4	4	4	4	4	4	4
	巻数	18	18	18	18	18	18	18
	抵抗 Ω	7.0	5.2	4.0	3.2	2.6	2.1	1.8
	質量 mg	23	30	41	52	65	79	99
トラッキングコイル	線径 mm	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10	0.11	0.12
	列数	5	5	5	5	5	5	5
	層数	9	9	9	9	9	9	9
	巻数	40	40	40	40	40	40	40
	抵抗 Ω	4.2	3.1	2.5	2.0	1.7	1.4	1.2
	質量 mg	18	25	35	45	56	69	87
コイル合計質量 m_c	mg	41	55	76	97	121	148	186
コイル以外質量 m_0	mg	137	137	137	137	137	137	137
m_c/m_0		0.30	0.40	0.55	0.71	0.88	1.08	1.36

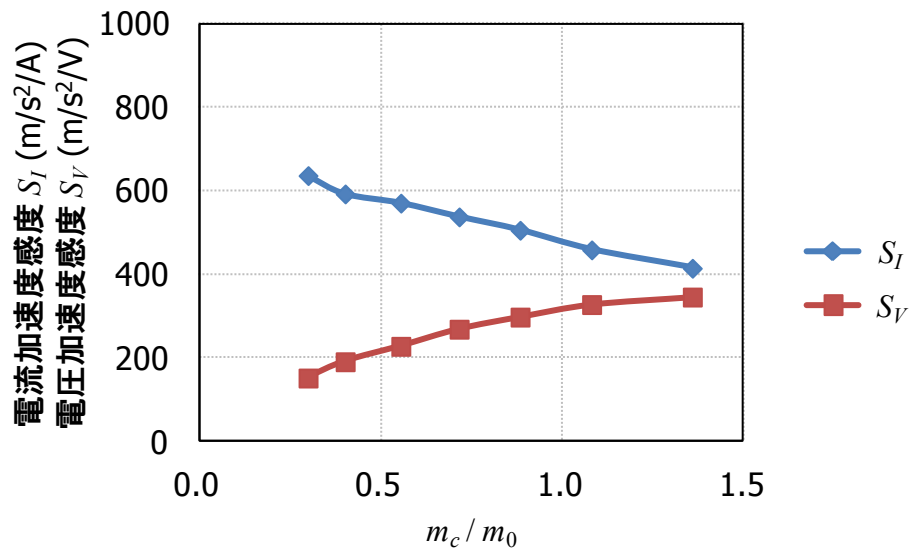


(a) 電流加速度感度, 電圧加速度感度

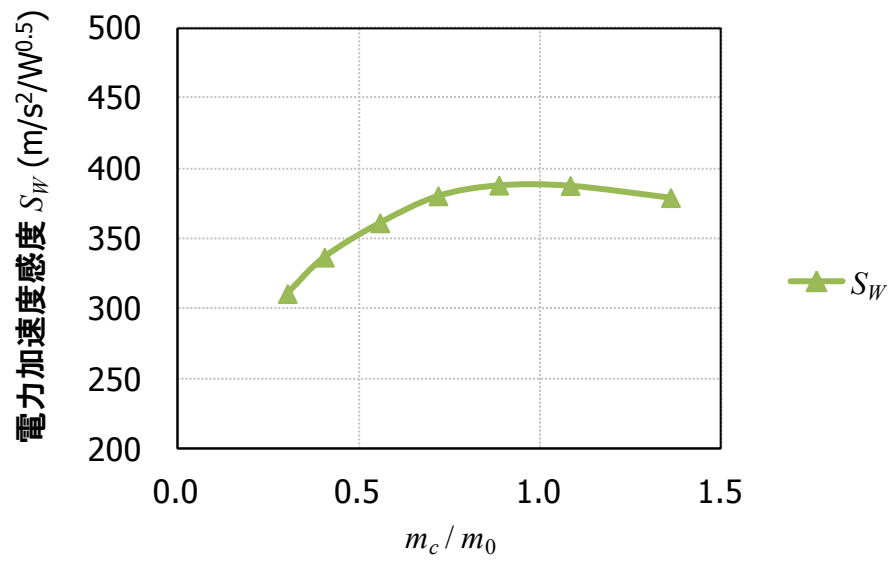


(b) 電力加速度感度

図 3.9 コイル線径変更時におけるコイル質量の割合に対する加速度感度の計算結果 (フォーカシング方向)



(a) 電流加速度感度, 電圧加速度感度



(b) 電力加速度感度

図 3.10 コイル線径変更時におけるコイル質量の割合に対する加速度感度の計算結果 (トラッキング方向)

3.4.2 加速度感度の測定結果

実際の対物レンズアクチュエータへの適用結果を以下に示す。

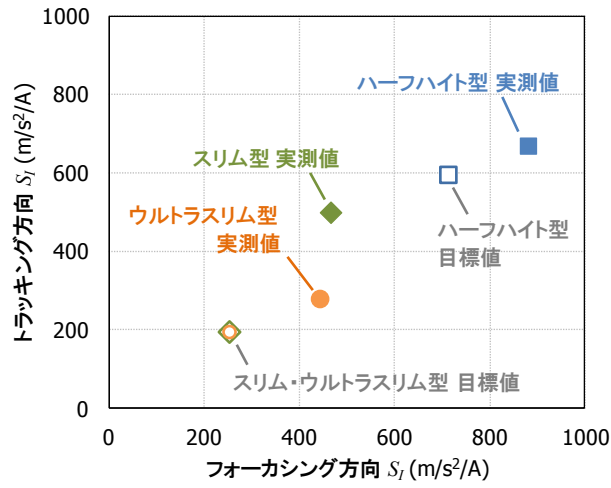
ハーフハイト型では、 m_c/m_0 の値として0.5程度を狙う。表3.3のNo.3が、この条件に近いが、トラッキングコイルの抵抗が2.5 Ω とやや小さい。そこで、トラッキングコイルの線径を0.07 mm、巻数49として、トラッキングコイルの抵抗4.0 Ω 、質量32 mgとする。この場合の m_c/m_0 は0.53である。この条件を適用した対物レンズアクチュエータにおける加速度感度の実測値は、電流加速度感度が、フォーカシング方向880 $\text{m/s}^2/\text{A}$ 、トラッキング方向670 $\text{m/s}^2/\text{A}$ 、電圧加速度感度が、フォーカシング方向200 $\text{m/s}^2/\text{V}$ 、トラッキング方向176 $\text{m/s}^2/\text{V}$ 、電力加速度感度が、フォーカシング方向420 $\text{m/s}^2/\text{W}^{0.5}$ 、トラッキング方向343 $\text{m/s}^2/\text{W}^{0.5}$ であった。これらの値はいずれも、表2.3に示した目標値を上回っている。

ウルトラスリム型とスリム型への適用結果もあわせて表3.5に示す。ウルトラスリム型での m_c/m_0 は0.49、スリム型での m_c/m_0 は0.57である。電力加速度感度の実測値は、ウルトラスリム型ではフォーカシング方向172 $\text{m/s}^2/\text{W}^{0.5}$ 、トラッキング方向137 $\text{m/s}^2/\text{W}^{0.5}$ 、スリム型ではフォーカシング方向210 $\text{m/s}^2/\text{W}^{0.5}$ 、トラッキング方向230 $\text{m/s}^2/\text{W}^{0.5}$ であった。

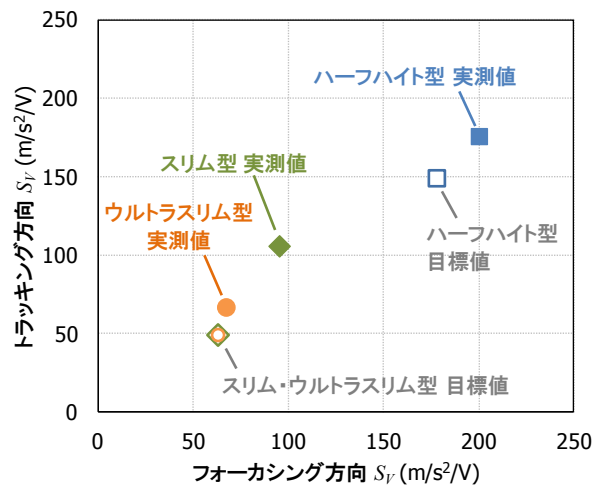
加速度感度の目標値と実測値を図3.11に示す。グラフの横軸はフォーカシング方向の値、縦軸はトラッキング方向の値である。ウルトラスリム型、スリム型、ハーフハイト型の電流加速度感度、電圧加速度感度、電力加速度感度それぞれの目標値を白抜きのプロットで示している。グラフ上で実測値は目標値よりも右上にあり、いずれも高倍速化に対応した目標の加速度感度が得られることを検証した。

表 3.5 対物レンズアクチュエータ実機への適用結果

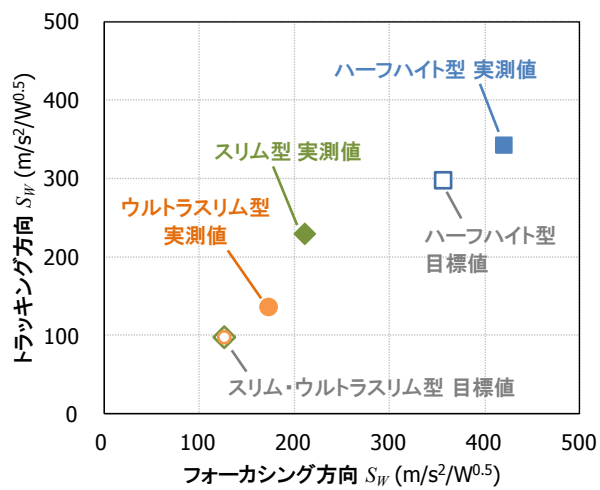
		ウルTRASリム	スリム	ハーフハイト	
フォーカシングコイル	線径 mm	0.06	0.07	0.08	
	列数	7	17	5	
	層数	5	2	4	
	巻数	33	33	18	
	抵抗 Ω	6.6	4.9	4.0	
	質量 mg	21	27	41	
トラッキングコイル	線径 mm	0.06	0.07	0.07	
	列数	4	5	5	
	層数	4	5	11	
	巻数	14	22	49	
	抵抗 Ω	4.2	4.7	4.0	
	質量 mg	13	24	32	
コイル合計質量 m_c		mg	34	51	73
コイル以外質量 m_0		mg	70	89	137
m_c / m_0			0.49	0.57	0.53
電流加速度感度 m/s ² /A	フォーカシング方向	442	465	880	
	トラッキング方向	280	500	670	
電圧加速度感度 m/s ² /V	フォーカシング方向	67	95	200	
	トラッキング方向	67	106	176	
電力加速度感度 m/s ² /W ^{0.5}	フォーカシング方向	172	210	420	
	トラッキング方向	137	230	343	



(a) 電流加速度感度



(b) 電圧加速度感度



(c) 電力加速度感度

図 3.11 加速度感度の目標値と実測値

3.5 結言

本章では、対物レンズアクチュエータの加速度感度について理論的な検討と実機への適用結果を検証した。

対物レンズアクチュエータのコイルに電流を印加したときに発生する駆動力と可動部の質量、およびコイルの抵抗から、電流加速度感度と電圧加速度感度を表した。可動部の質量を、コイルの質量とコイル以外の質量に分け、その比 m_c/m_0 をパラメータとして電流加速度感度と電圧加速度感度の特性を表した。

次に、電流加速度感度と電圧加速度感度の相乗平均とした電力加速度感度を新たな総合的感度の指標として定義し、コイルの質量とコイル以外の質量の比 m_c/m_0 に対して電力加速度感度が最大となる条件を示した。

対物レンズアクチュエータのコイル設計への適用としてハーフハイト型を例に、コイルの巻数およびコイルの線径を変えることでコイルの質量を変化させ、電流加速度感度、電圧加速度感度、電力加速度感度の変化を計算した。その結果から、コイルの質量とコイル以外の質量の比 m_c/m_0 の指針を示した。この指針を元に、ハーフハイト型、スリム型、ウルトラスリム型の対物レンズアクチュエータに適用し、加速度感度の実測値と第2章で定めた目標値との比較を行った。

得られた結果を以下に示す。

- (1) 加速度感度の指標として従来用いられてきた電流加速度感度と電圧加速度感度を、コイルの質量 m_c とコイル以外の質量 m_0 の比 m_c/m_0 で整理した。その結果、電流加速度感度は m_c/m_0 に対して単調増加の特性となり、電圧加速度感度は m_c/m_0 に対して単調減少の特性となることがわかった。すなわち、可動部の質量に対してコイルの割合を増やすほど、電流加速度感度は大きくなり、可動部の質量に対してコイルの割合を少なくするほど、電圧加速度感度は大きくなる。
- (2) 新たな総合的感度の指標として、電流加速度感度と電圧加速度感度の相乗平均で定義した電力加速度感度を導入した。電力加速度感度は、 $m_c/m_0 = 1$ のとき、すなわちコイルの質量 m_c とコイル以外の質量 m_0 が等しいときに最大となることを明らかにした。これにより、電力加速度感度を用いることで、従来用いられてきた電流加速度感度と電圧加速度感度では表せなかった駆動コイルの最適化が可能となる。
- (3) ハーフハイト型の対物レンズアクチュエータとして、ホルダの側面にフォーカシングコイルとトラッキングコイルを平面状に配置し、このコイルに対向して、磁極が4分割されたマグネットを配置する構造を提案した。フォーカシングコイルとトラッキングコイルのそれぞれの2辺がマグネットの磁極に対向するので、有効な駆動力を発生するコイル長の割合を高めることができる。
- (4) コイルの線径を一定としてコイルの巻数を変化させた場合は、コイルの巻数の増加に対して、コイル質量、コイル全長、コイル抵抗が比例するので、電流加速度感度は増加し、電圧加速度感度は減少する特性となる。
- (5) コイルの巻数を一定としてコイルの線径を変化させた場合は、コイルの線径を変えても駆動

力はほぼ一定であり，コイル線径の増加に対してコイル抵抗が減少するため，電流加速度感度は減少し，電圧加速度感度は増加する特性となる．

- (6) 上記 (4) , (5) の場合においても電力加速度感度は， $m_c/m_0 = 1$ のときに最大となることを示した．
- (7) 対物レンズアクチュエータ実機における電力加速度感度の実測値は，ウルトラスリム，スリム，ハーフハイト型のいずれにおいても，高倍速化に対応した加速度感度の目標を満足することを確認した．

4. 粘弾性体のシリコーンゲルを含む主共振特性の解析

4.1 緒言

第3章では、転送速度の高速化に対応するための対物レンズアクチュエータの加速度感度の設計指針について示した。第4章と第5章では、対物レンズの位置決め制御系の高精度化に関わる対物レンズアクチュエータの振動特性について論じる。第4章では、対物レンズアクチュエータの周波数応答特性において第一次の振動モードとして現れる主共振特性の定式化を示し、第5章では、制御帯域の拡大を目的とした高次共振モードの振幅低減手法を示す。

主共振は、対物レンズ位置決め制御系の整定時間や対物レンズアクチュエータの静的感度に影響するため、その周波数と減衰を適切に設計することが必要である[35][37][70]。これまで主共振の振動モデルは、ばね・質量・速度比例粘性減衰系で表されることが多かった。本論文でも第2章では、ばね・質量・速度比例粘性減衰系とみなして静的感度と加速度感度の換算に用いた。

しかし、振動減衰材として付加されるシリコーンゲルの粘弾性の影響によって、実際の主共振特性は単純なばね・質量・速度比例粘性減衰系とは異なる応答を示す。また、シリコーンゲルにも様々な種類があり、使用するシリコーンゲルによって特性が異なるため、これまで主共振特性の検討は実験的な評価が中心であった。

本章では、シリコーンゲルの複素弾性率の周波数依存性を考慮することによって、主共振の振動モデルを精度良く簡便に表せることを示し、シリコーンゲルの複素弾性率と取り付け構造が主共振特性におよぼす影響について検討した結果を示す。

4.2 粘弾性減衰材を含む主共振特性の定式化

4.2.1 シリコーンゲルの複素弾性率の周波数特性

第2章で示したウルTRASリム型対物レンズアクチュエータの構造を図4.1に再掲する。シリコーンゲルは、固定部に設けられたU字状の減衰材保持部に充填され、可動部の動作に伴うサスペンションワイヤの振動を減衰させる作用を有する。粘弾性体の動的特性は複素弾性率を用いて表される[102]。ここでは、シリコーンゲルの複素弾性率を周波数の関数として表すことで、サスペンションワイヤ支持系の周波数応答特性を導出する。

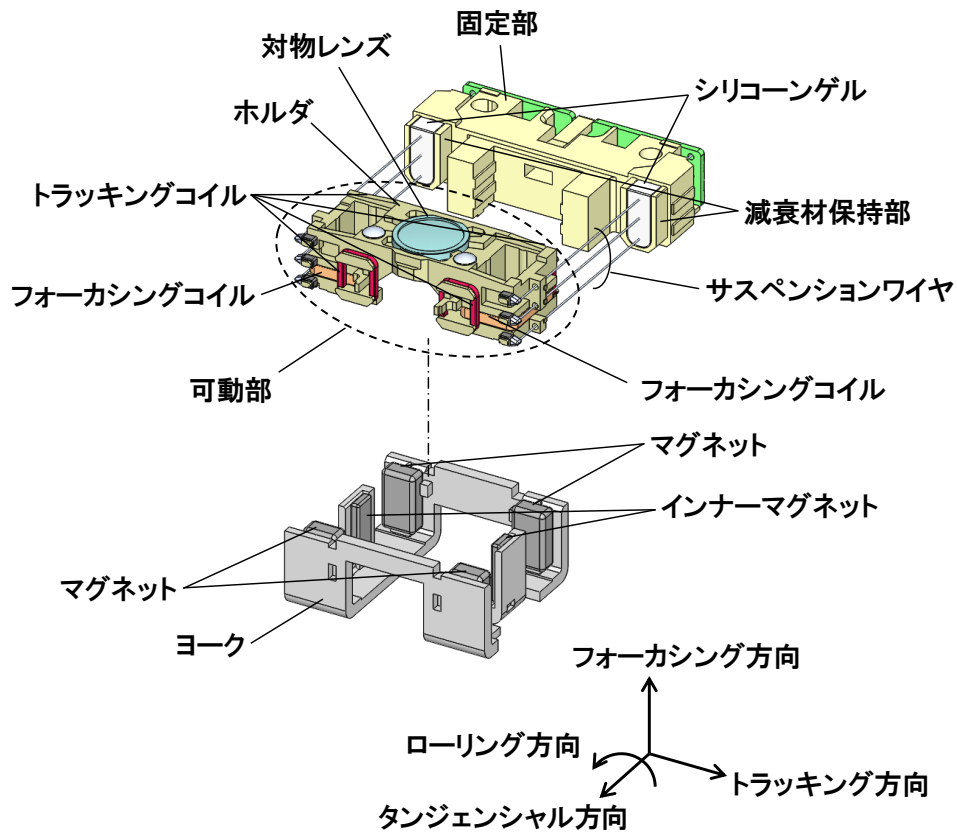


図 4.1 ウルトラスリム型対物レンズアクチュエータの構造

シリコーンゲルの複素弾性率 G は、貯蔵弾性率 G' ，損失弾性率 G'' によって、

$$G = G' + iG'' \quad (4.1)$$

と表される。 i は虚数単位である。

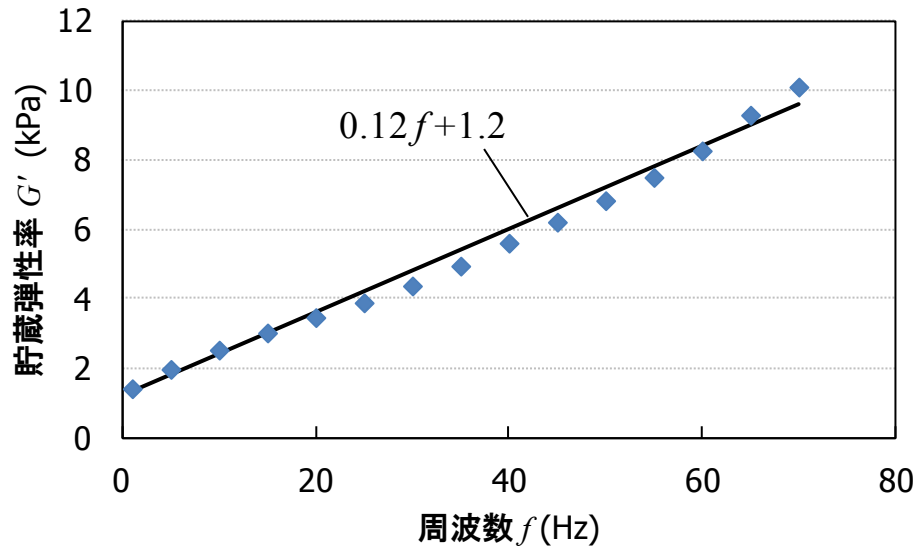
本論文で対象とする対物レンズアクチュエータで使用しているシリコーンゲルの複素弾性率の周波数特性の測定結果を図 4.2 に示す。測定条件は、温度 25 °C，測定に用いたシリコーンゲルの直径 25 mm，ひずみ振幅 0.7 %，周波数 1~70 Hz である。

この測定結果から、貯蔵弾性率 G' を周波数 f の一次式で、損失弾性率 G'' を周波数 f の累乗で近似して、

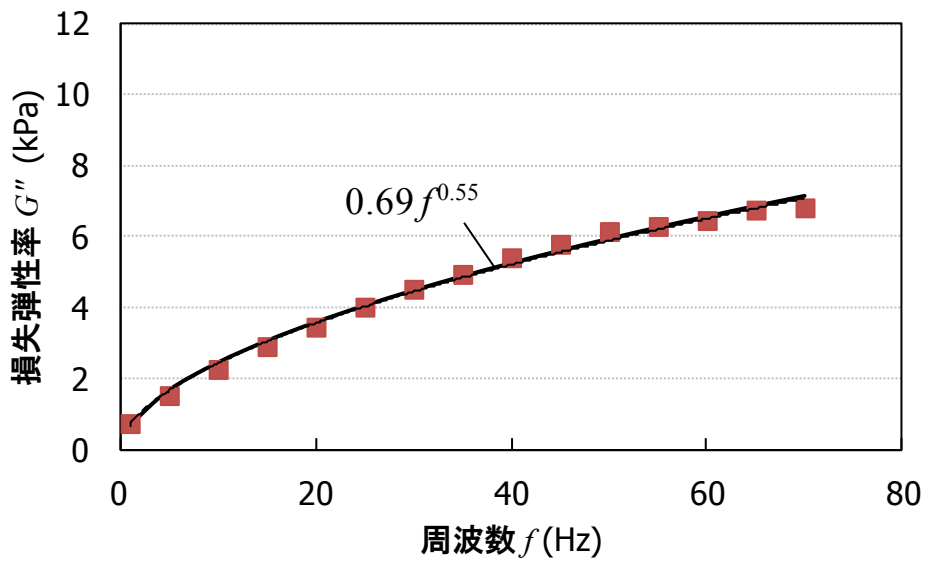
$$G' = af + G_0 \quad (4.2)$$

$$G'' = bf^q \quad (4.3)$$

と表す。 a ， b ， q は係数， G_0 は周波数 $f = 0$ Hz とした場合の静的貯蔵弾性率である。図 4.2 の特性から、それぞれ $a = 0.12$ kPa·s， $b = 0.69$ kPa·s ^{q} ， $q = 0.55$ ， $G_0 = 1.2$ kPa が得られる。



(a) 貯蔵弾性率



(b) 損失弾性率

図 4.2 対物レンズアクチュエータで使用しているシリコンゲルの複素弾性率の周波数特性

4.2.2 サスペンションワイヤ支持系の振動解析モデル

シリコーンゲルが付加されたサスペンションワイヤ支持系の振動解析モデルを図 4.3 に示す。サスペンションワイヤの全 6 本の等価ばね定数を k_w ，粘性減衰係数を c ，可動部の質量を m とする。サスペンションワイヤの全長を L とし、サスペンションワイヤに付加されるシリコーンゲル全 6 箇所の等価ばね定数を k_g ，固定端からシリコーンゲルの取り付け位置までの距離を x_g とする。シリコーンゲルのばね定数 k_g は後述のように複素弾性率 G を用いて周波数の関数として表される。可動部に駆動力 F が作用したときの可動部の変位を z とする。なお，ここではフォーカシング方向の変位を表すが，トラッキング方向でも同様である。

サスペンションワイヤはホルダの片側に 3 本ずつ平行リンク状に配置され，その静的変形形状は図 4.4 に示すような両端固定はりの 1/2 モデルで表される。サスペンションワイヤ 1 本当たりで考えて，可動部に作用する静的荷重を F_s ，サスペンションワイヤの弾性率を E ，断面二次モーメントを I ，シリコーンゲル取り付け位置におけるサスペンションワイヤの変位を z_g ，可動部の静的変位（サスペンションワイヤ先端の変位）を z_s とすると，

$$z_g = \frac{F_s L x_g^2}{6EI} \left(\frac{3}{2} - \frac{x_g}{L} \right) \quad (4.4)$$

$$z_s = \frac{F_s L^3}{12EI} \quad (4.5)$$

である。式 (4.5) から，サスペンションワイヤ 1 本当たりのばね定数 k_{w1} は，

$$k_{w1} = \frac{12EI}{L^3} = \frac{12E}{L^3} \cdot \frac{\pi\phi^4}{64} \quad (4.6)$$

となる。 ϕ はサスペンションワイヤの直径である。

n をサスペンションワイヤの本数（ここでは $n=6$ ）とすると，サスペンションワイヤ全体の等価ばね定数 k_w は，

$$k_w = nk_{w1} \quad (4.7)$$

となる。

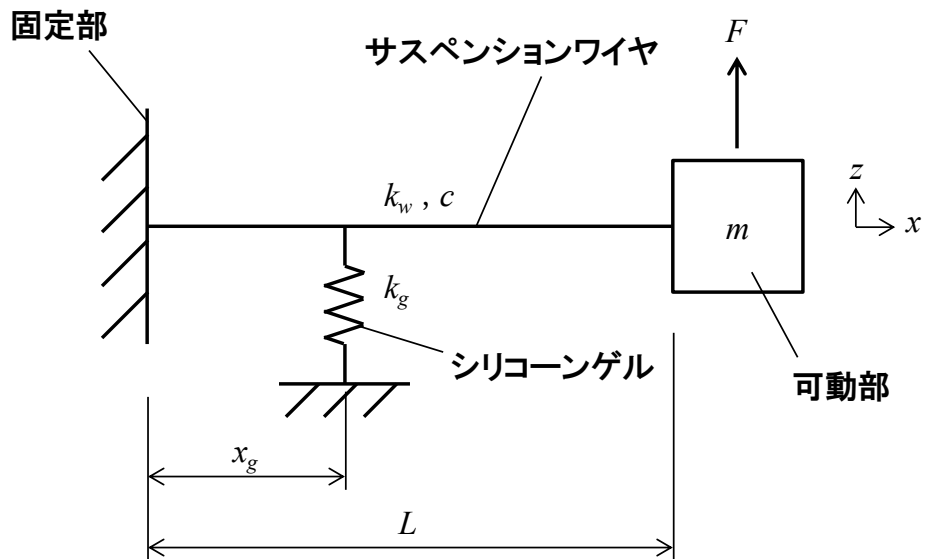


図 4.3 シリコーンゲルが付加されたサスペンションワイヤ支持系の振動解析モデル

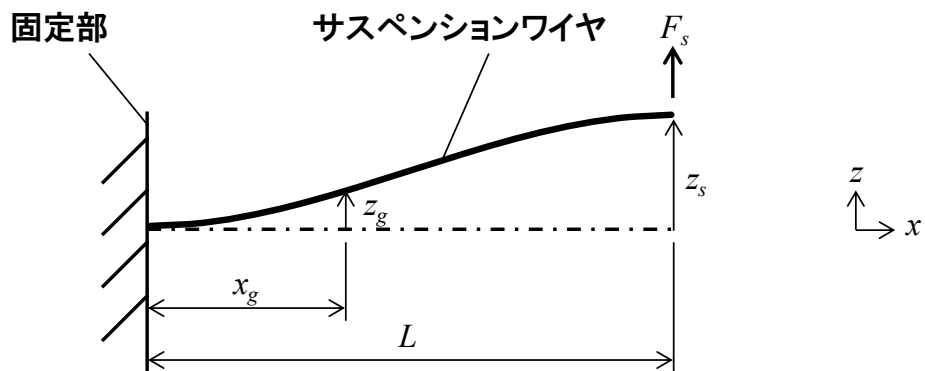


図 4.4 両端固定はりの 1/2 モデルで表されるサスペンションワイヤの変形形状

シリコーンゲルの変形は、その取り付け位置でのサスペンションワイヤの変位 z_g によって、図 4.5 のようにせん断変形すると仮定し、サスペンションワイヤの軸方向（図 4.5 において紙面に垂直方向）におけるシリコーンゲルの付加長さを w 、サスペンションワイヤの中心から減衰材保持部の壁までの距離を h とすると、サスペンションワイヤ 1 本当たりのシリコーンゲルのばね定数 k_{g1} は、

$$k_{g1} = \frac{2\phi w}{h} G \quad (4.8)$$

と表される。式 (4.8) の係数の 2 は、図 4.5 においてサスペンションワイヤの両側にシリコーンゲ

ルが作用することを表している。サスペンションワイヤ全体でのシリコーンゲルの等価ばね定数 k_g は、

$$k_g = nk_{g1} = \frac{2n\phi w}{h}(G' + iG'') = k'_g + ik''_g$$

$$k'_g = \frac{2n\phi w}{h}G' = \frac{2n\phi w}{h}(af + G_0)$$

$$k''_g = \frac{2n\phi w}{h}G'' = \frac{2n\phi w}{h}bf^q \tag{4.9}$$

と表される。

以上によって、周波数特性を有するばねとしてシリコーンゲルを表現できることを示した。

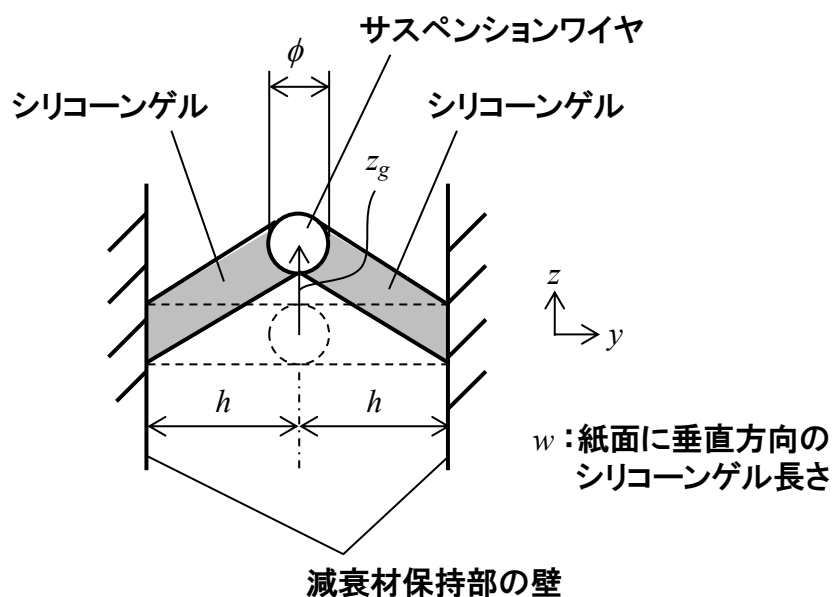


図 4.5 サスペンションワイヤの変位によるシリコーンゲルの変形

4.2.3 サスペンションワイヤ支持系の周波数応答特性の導出

シリコーンゲルが無い場合のサスペンションワイヤ支持系の運動方程式を 1 自由度のばね・質量・速度比例粘性減衰系として、そこにシリコーンゲルが付加されたことによるばね項を加えることで、シリコーンゲルを含むサスペンションワイヤ支持系の運動方程式を、

$$m\ddot{z} + c\dot{z} + k_w z + k_g z_g = F \quad (4.10)$$

と表す。なお、 z_g の評価には静的変形時の z_g を近似的に用いる。式 (4.9) , (4.10) から、

$$m\ddot{z} + c\dot{z} + k_w z + d_2(k'_g + ik''_g)z = F \quad (4.11)$$

となる。ただし、サスペンションワイヤの全長 L に対するシリコーンゲルの取り付け位置までの距離 x_g の比を $d_1 = x_g / L$, 可動部の変位 z に対するシリコーンゲルの取り付け位置での変位 z_g の比を $d_2 = z_g / z$ として、式 (4.4) , (4.5) から、

$$d_2 = d_1^2(3 - 2d_1) \quad (4.12)$$

である。

$F = F_0 e^{i(2\pi f t)}$, $z = Z_0 e^{i(2\pi f t)}$ と置いて整理すると、駆動力に対する変位応答は、

$$\frac{Z_0}{F_0} = \frac{1}{-m(2\pi f)^2 + k_w + d_2 k'_g + i(2\pi f c + d_2 k''_g)} \quad (4.13)$$

となる。

振幅 A と位相 θ はそれぞれ次式で表される。

$$A = \frac{1}{\sqrt{[-m(2\pi f)^2 + k_w + d_2 k'_g]^2 + (2\pi f c + d_2 k''_g)^2}} \quad (4.14)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left[\frac{-(2\pi f c + d_2 k''_g)}{-m(2\pi f)^2 + k_w + d_2 k'_g} \right] \quad (4.15)$$

式 (4.13) ~ (4.15) はシリコーンゲルを含めたサスペンションワイヤ支持系の周波数応答特性を表す。シリコーンゲルが無い場合のばね・質量・速度比例粘性減衰系と比較すると、貯蔵弾性率が関係する $d_2 k'_g$ がばね項として作用し、損失弾性率が関係する $d_2 k''_g$ が減衰項として作用することがわかる。

振幅 A が最大となる周波数は、式 (4.14) の分母が最小となる場合であるが、近似的に式 (4.13) の実部が 0 (位相 θ が -90°) となる周波数を主共振周波数 f_0 とすると、

$$-m(2\pi f_0)^2 + k_w + d_2 k'_g = 0 \quad (4.16)$$

から f_0 が求められる.

シリコーンゲルの取り付け構造に関する係数をまとめて,

$$u = \frac{2n\phi w d_2}{h} = \frac{2n\phi w}{h} \left(\frac{x_g}{L} \right)^2 \left(3 - \frac{2x_g}{L} \right) \quad (4.17)$$

と置いて, 式 (4.9), (4.17) を (4.16) に代入し,

$$-m(2\pi f_0)^2 + k_w + u(af_0 + G_0) = 0 \quad (4.18)$$

から正の値となる周波数を採ると,

$$f_0 = \frac{au + \sqrt{(au)^2 + 16m\pi^2(k_w + uG_0)}}{8m\pi^2} \quad (4.19)$$

となる.

サスペンションワイヤ単独の場合の固有振動数 f_n は,

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_w}{m}} \quad (4.20)$$

と表され, f_n を用いて式 (4.19) を整理すると,

$$f_0 = \frac{f_n^2 au}{2k_w} + f_n \sqrt{1 + \frac{uG_0}{k_w} + \left(\frac{f_n au}{2k_w} \right)^2} \approx f_n \left[1 + \frac{uG_0}{2k_w} + \frac{f_n au}{2k_w} + \frac{1}{8} \left(\frac{f_n au}{k_w} \right)^2 \right] \quad (4.21)$$

となる.

主共振周波数 f_0 での振幅 A を共振ピークに近似して, その値とシリコーンゲル無しの場合の静的変位に対する比を共振係数 Q_0 とすると, $\zeta = c/(2\sqrt{mk_w})$ として,

$$Q_0 = \frac{k_w}{2\pi f_0 c + d_2 k''_g} = \frac{k_w}{2\zeta k_w \frac{f_0}{f_n} + ubf_0^q} \quad (4.22)$$

となる.

4.3 計算結果と測定結果の比較

主共振特性の測定に用いた対物レンズアクチュエータの諸元を表 4.1 に示す。この値を用いて式 (4.14) , (4.15) により計算した周波数応答特性と、実機での測定結果の比較を図 4.6 に示す。また、シリコーンゲルの影響を明確にするために、シリコーンゲル無しの対物レンズアクチュエータを作製し、その周波数応答特性を測定した。その測定結果と、シリコーンゲル無しの場合の計算結果も図 4.6 にあわせて示す。シリコーンゲル無しの場合の計算結果を青色の破線で、測定結果を緑色の実線で示し、シリコーンゲル有りの場合の計算結果を赤色の破線で、測定結果を紫色の実線で示す。

縦軸の振幅は、計算結果では周波数 $f = 0$ Hz でのシリコーンゲル無しの値を 0 dB とし、測定結果では周波数 $f = 1$ Hz でのシリコーンゲル無しの値を 0 dB としている。

主共振周波数と共振係数の計算値と測定値を表 4.2 に示す。計算結果は測定結果を良く再現できている。特に、シリコーンゲルが無いサスペンションワイヤ単独の場合の固有振動数に対して、シリコーンゲルが付加された場合に主共振周波数が増加する現象を良く再現できている。

表 4.1 主共振特性の測定に用いた対物レンズアクチュエータの諸元

				値
サスペンション ワイヤ	直径	ϕ	mm	0.08
	全長	L	mm	12.0
	弾性率	E	GPa	130
	本数	n		6
	減衰比 $\left(= \frac{c}{2\sqrt{mk_w}} \right)$	ζ		0.01
可動部	質量	m	mg	100
シリコーンゲル	貯蔵弾性率係数	a	kPa·s	0.12
	静的貯蔵弾性率	G_0	kPa	1.2
	損失弾性率係数	b	kPa·s ^q	0.69
	損失弾性率乗数	q		0.55
	固定端から取り付け位置 までの距離	x_g	mm	3.0
	付加長さ	w	mm	1.0
	減衰材保持部の壁までの 距離	h	mm	0.65

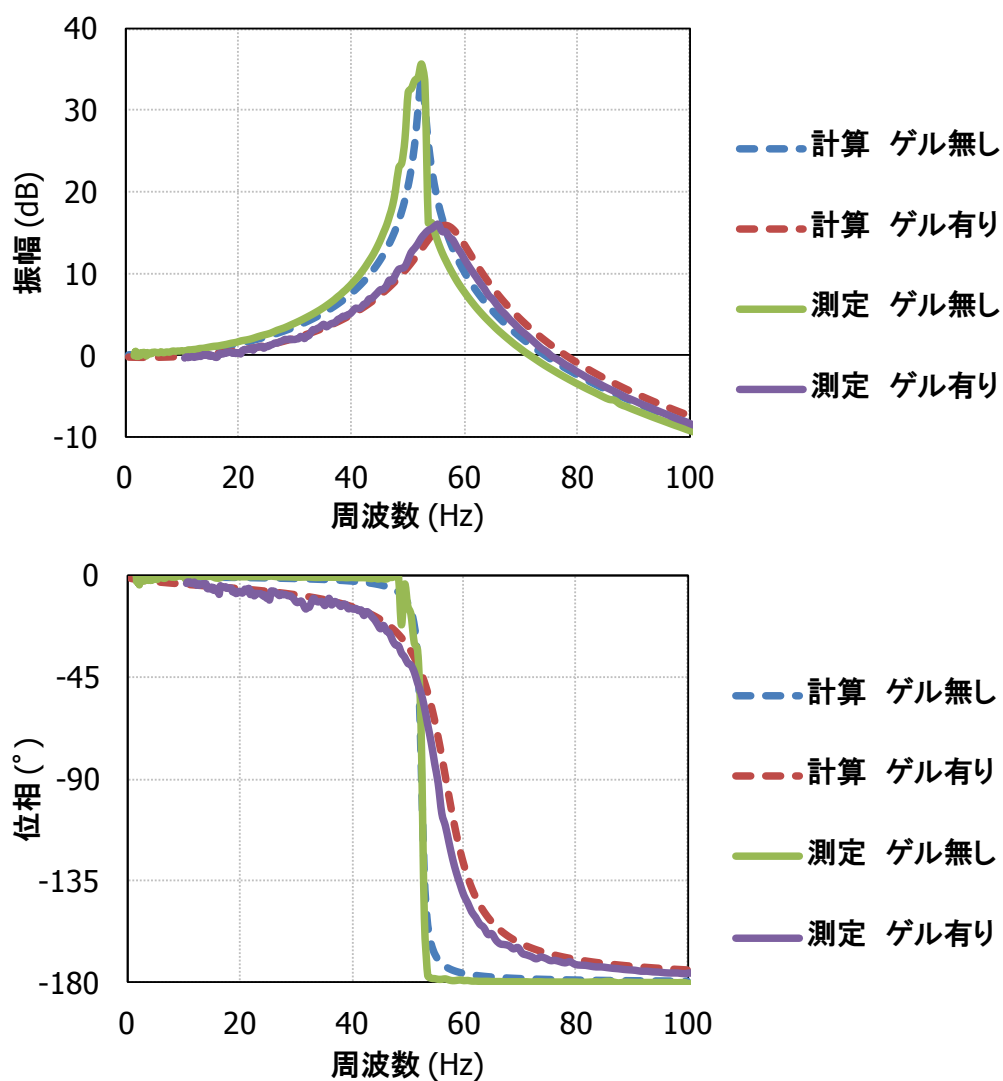


図 4.6 主共振近傍の周波数応答特性の計算結果と測定結果の比較

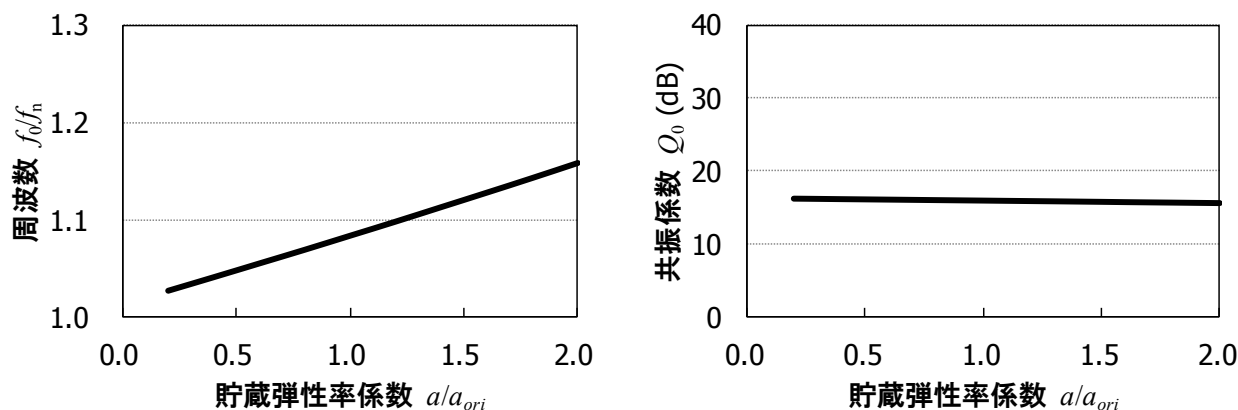
表 4.2 主共振周波数と共振係数の計算値と測定値の比較

			計算値	測定値
シリコーンゲル無し	主共振周波数	Hz	52.5	52.4
	共振係数	dB	34.0	35.8
シリコーンゲル有り	主共振周波数	Hz	56.7	55.4
	共振係数	dB	16.0	16.1

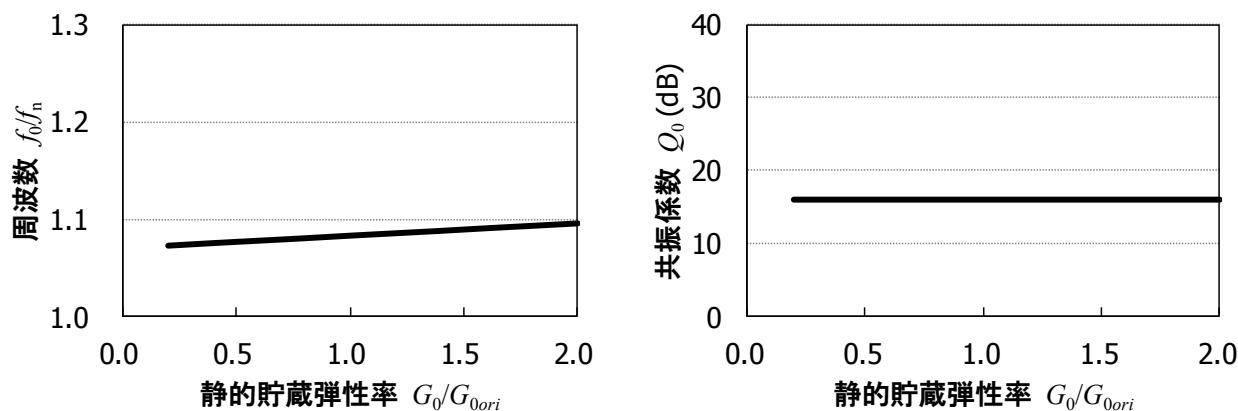
4.4 シリコンゲルの複素弾性率と取り付け構造による主共振特性への影響

式 (4.21) , (4.22) を用いて主共振周波数 f_0 , 共振係数 Q_0 に対するシリコンゲルの複素弾性率と取り付け構造の影響を検討した結果を以下に示す.

シリコンゲルの貯蔵弾性率の係数 a と静的貯蔵弾性率 G_0 について, 表 4.1 に示した値を基準値の a_{ori} , G_{0ori} として, 基準値から増減させた場合の主共振周波数 f_0 と共振係数 Q_0 の変化を計算した結果を図 4.7 (a) , (b) に示す. なお, 主共振周波数 f_0 はサスペンションワイヤ単独の場合の固有振動数 f_n に対する比として示す. 式 (4.21) において, 貯蔵弾性率の係数 a は f_n がかかる項と 2 乗の項を含むが, 図 4.7 に示した計算範囲では, a に対して主共振周波数 f_0 はほぼ比例して変化することがわかる. また, 式 (4.21) からわかるように主共振周波数 f_0 は静的貯蔵弾性率 G_0 に比例して変化する. ただし, 今回の諸元ではサスペンションワイヤのばね定数 k_w に対する uG_0 項の割合が 4%程度と小さいため, その変化の程度は小さい. また, 図 4.7 (a) , (b) いずれにおいても共振係数 Q_0 はほとんど変化しない.



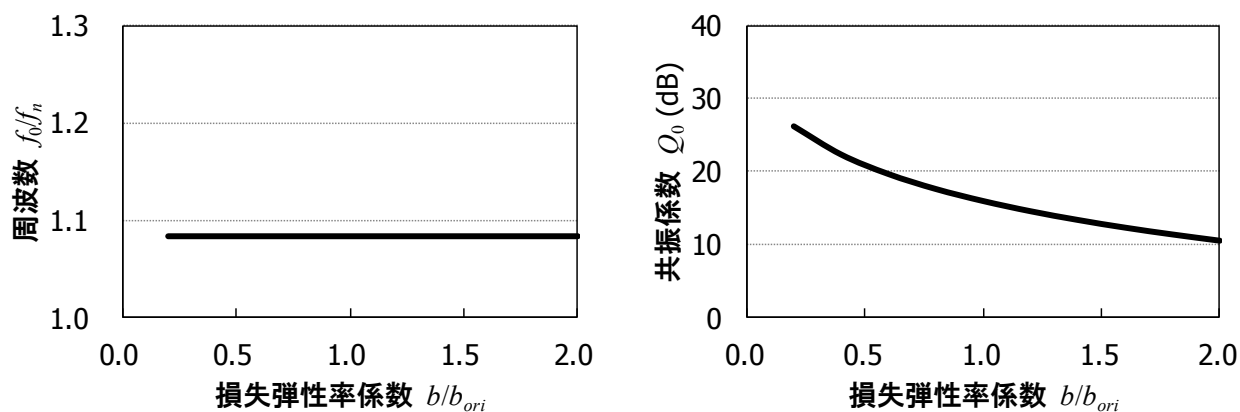
(a) 貯蔵弾性率係数 a



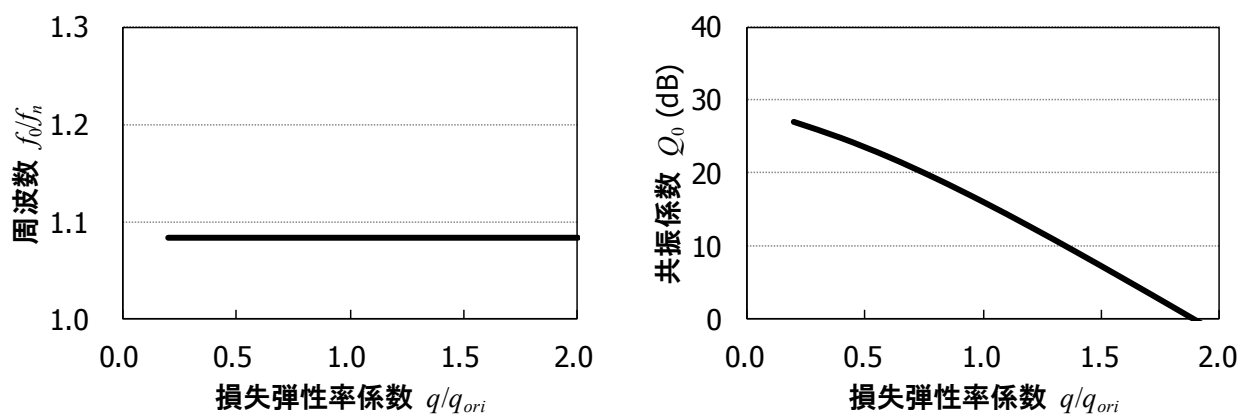
(b) 静的貯蔵弾性率 G_0

図 4.7 貯蔵弾性率係数と静的貯蔵弾性率に対する主共振周波数と共振係数の計算結果

シリコーンゲルの損失弾性率の係数 b , q について、表 4.1 に示した値を基準値の b_{ori} , q_{ori} とし、基準値からの変化に対する主共振周波数 f_0 と共振係数 Q_0 の計算結果を図 4.8 (a) , (b) に示す。主共振周波数の導出時の近似により式 (4.19) , (4.21) には損失弾性率の項が含まれないので、損失弾性率の係数 b , q に対して主共振周波数 f_0 は一定である。損失弾性率の係数 b , q の増加に対して共振係数 Q_0 は減少する特性となる。



(a) 損失弾性率係数 b



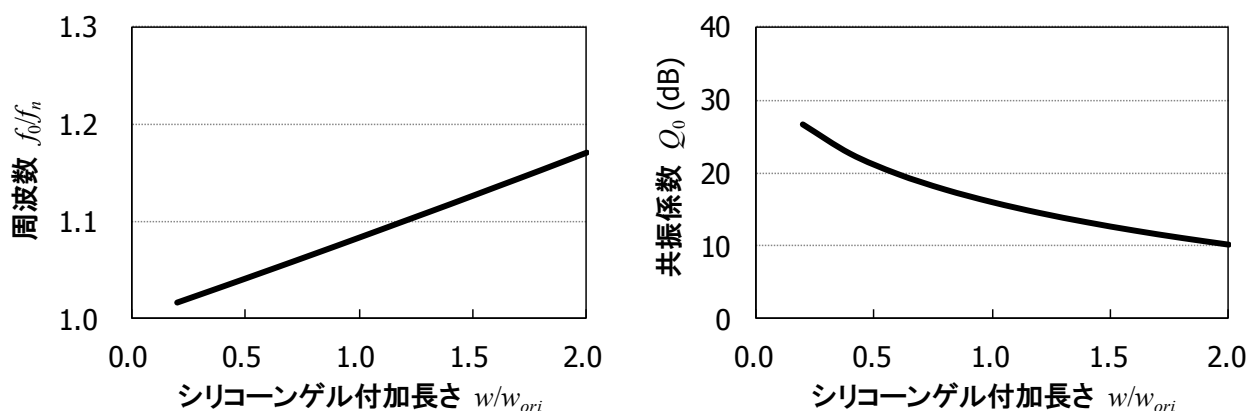
(b) 損失弾性率係数 q

図 4.8 損失弾性率係数に対する主共振周波数と共振係数の計算結果

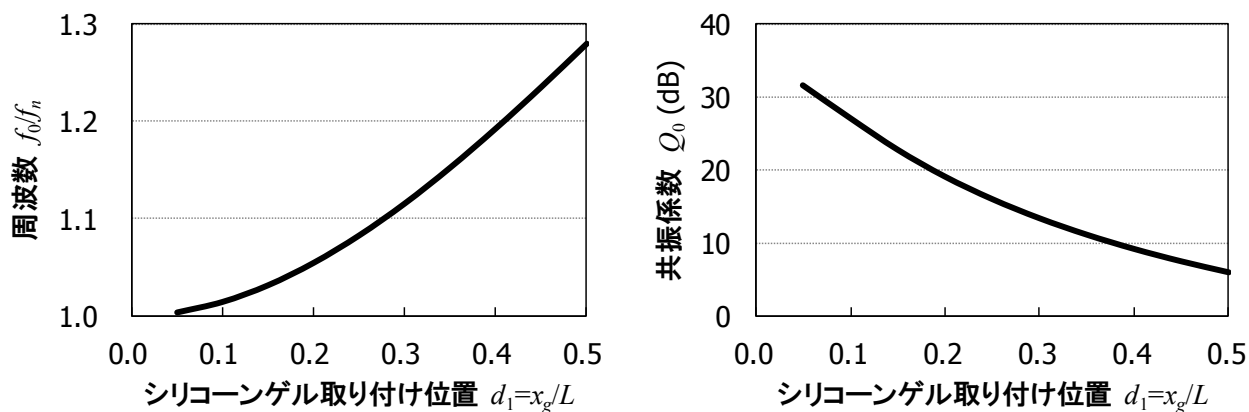
シリコーンゲルの取り付け構造に関する係数である u について検討する。式 (4.17) において、サスペンションワイヤの諸元である n , ϕ , L を一定とし、また対物レンズアクチュエータの動作上、サスペンションワイヤから減衰材保持部の壁までの距離は一定量が必要なため h も一定として、ここではシリコーンゲルの付加長さ w と、サスペンションワイヤ固定端からシリコーンゲル取り付け位置までの距離 x_g を対象とする。

シリコーンゲルの付加長さ w について、表 4.1 に示した値を基準値の w_{ori} として、シリコーンゲルの付加長さ w の変化に対する主共振周波数 f_0 と共振係数 Q_0 の計算結果を図 4.9 (a) に示す。式 (4.17) , (4.21) から、シリコーンゲルの付加長さ w は f_n がかかる項と 2 乗の項を含むが、図 4.9 (a) に示した計算範囲では、 w に対して主共振周波数 f_0 はほぼ比例して変化することがわかる。

サスペンションワイヤ固定端からシリコーンゲル取り付け位置までの距離 x_g の変化に対する主共振周波数 f_0 と共振係数 Q_0 の計算結果を図 4.9 (b) に示す。横軸はサスペンションワイヤの全長 L に対する x_g の比である d_1 を示す。式 (4.17) から、 u はシリコーンゲル取り付け位置までの距離 x_g の 3 次式で表される。式 (4.21) において、 u は f_n がかかる項と 2 乗の項を含むが、図 4.9 (b) に示した計算範囲では、 x_g の 3 乗にほぼ比例して、すなわちシリコーンゲルの取り付け位置が可動部側に近くなるほど主共振周波数 f_0 は増加する。また、 w および x_g の増加に対して共振係数 Q_0 は減少する特性となる。



(a) シリコーンゲル付加長さ w



(b) シリコーンゲル取り付け位置 x_g

図 4.9 シリコーンゲルの取り付け構造に対する主共振周波数と共振係数の計算結果

以上の結果から、シリコーンゲルの貯蔵弾性率と損失弾性率、およびシリコーンゲルのサスペンションワイヤへの取り付け構造が、サスペンションワイヤ支持系の周波数応答特性におよぼす影響が明らかとなった。シリコーンゲルの貯蔵弾性率と損失弾性率は材料特性であり、その値の変更は簡単には適用できないので、ここではシリコーンゲルの取り付け構造の変更により、サスペンションワイヤ支持系の主共振周波数の調整を試みる。

図 4.6 および表 4.2 に示した主共振周波数 f_0 の測定値 55 Hz を 60 Hz に高めることを想定する。主共振周波数を高めるために、シリコーンゲルの付加長さ w を 1.0 mm から 1.5 mm に、サスペンションワイヤ固定端からシリコーンゲル取り付け位置までの距離 x_g を 3.0 mm から 3.5 mm に変更する。この構造変更の適用前後における周波数応答特性の計算結果と、作製した対物レンズアクチュエータにおける測定結果を図 4.10 に示す。変更前の計算結果を赤色の破線で、測定結果を紫色の実線で示し、変更後の計算結果を水色の破線で、測定結果を橙色の実線で示す。この構造変更によって、主共振周波数 f_0 は設定通り 55 Hz から 60 Hz に変化していることを確認した。

実機において設計変更が可能な範囲は、シリコーンゲルの付加長さ w については 1.0~2.0 mm 程度、サスペンションワイヤ固定端からシリコーンゲル取り付け位置までの距離 x_g については 1.0~4.0 mm 程度である。この w と x_g の範囲に対する主共振周波数 f_0 の計算値は式 (4.19) から 53.1~67.6 Hz となり、シリコーンゲルの取り付け構造によって、この対物レンズアクチュエータの場合は 15 Hz 程度の範囲で主共振周波数 f_0 を変更可能である。

以上から、シリコーンゲルの動的特性を複素弾性率で表し、サスペンションワイヤをはりの変形で表した本手法が、対物レンズアクチュエータのサスペンションワイヤ支持系の振動解析モデルに適していることが確認できた。本手法を用いることで、対物レンズアクチュエータの主共振特性を簡便な計算で精度良く設計できることを示した。

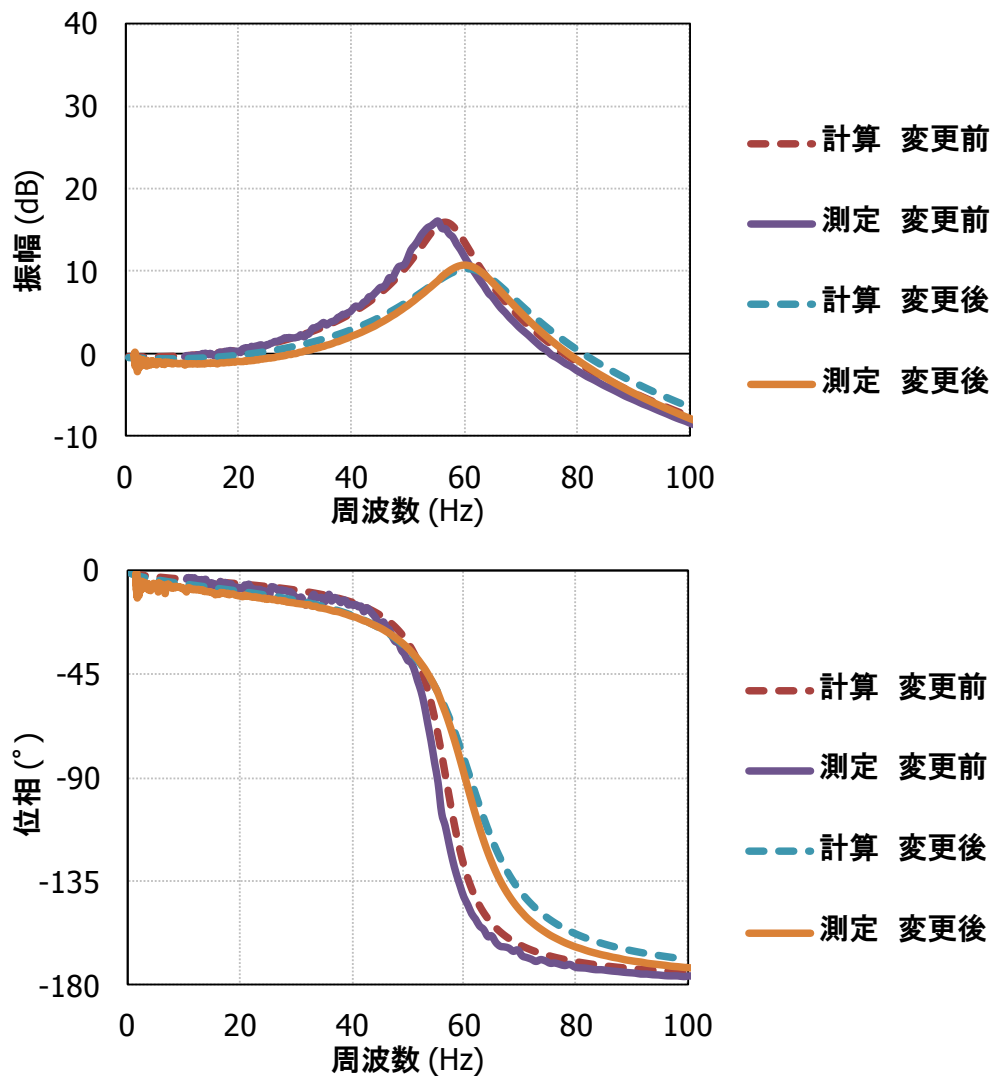


図 4.10 シリコングルの取り付け構造変更前後における主共振近傍の周波数応答特性

4.5 結言

本章では、対物レンズアクチュエータの周波数応答特性において第一次の振動モードとして現れる主共振について、振動解析モデルの構築と周波数応答特性の導出を行った。

サスペンションワイヤの振動減衰材として付加されるシリコングルの動的特性を、複素弾性率を用いて周波数特性として表した。シリコングルを付加しない場合のサスペンションワイヤ支持系を、ばね・質量・速度比例粘性減衰系で表し、そこに周波数特性を有するばねとしてシリコングルを付加することで、粘弾性減衰材を含むサスペンションワイヤ支持系の振動解析モデルを表した。

シリコングルの複素弾性率と取り付け構造をパラメータとして、主共振周波数と共振係数に与える影響を検討した。シリコングル有りとしシリコングル無しの対物レンズアクチュエータを作製し、周波数応答特性の測定結果と解析結果の比較を行い、本モデルの有効性を検証した。

得られた結果を以下に示す。

(1) シリコングルの弾性率の測定結果から、対物レンズアクチュエータに使用しているシリコー

ンゲルはその弾性率が周波数特性を有するばねとして表現できる。

- (2) 速度比例粘性減衰系としたサスペンションワイヤに、周波数特性を有するばねとして表したシリコーンゲルが付加された振動モデルを用いることで、粘弾性体であるシリコーンゲルを含む対物レンズアクチュエータのサスペンションワイヤ支持系の周波数応答特性を表現できる。
- (3) 上記周波数応答特性において、シリコーンゲルの貯蔵弾性率はばね項として作用し、損失弾性率は減衰項として作用することがわかった。導出した周波数応答特性によって、シリコーンゲルが無いサスペンションワイヤ単独の場合の固有振動数に対して、シリコーンゲルが付加された場合に主共振周波数が増加する現象を良く再現できる。
- (4) 貯蔵弾性率の係数および静的貯蔵弾性率に対して主共振周波数はほぼ比例し、損失弾性率の係数の増加に対して共振係数は減少、すなわち減衰が大きくなる。
- (5) シリコーンゲルの付加長さと、固定端からの取り付け位置までの距離は、ばね項および減衰項の両方に作用する。主共振周波数は、シリコーンゲルの付加長さにほぼ比例し、固定端からの取り付け位置までの距離の 3 乗にほぼ比例する。共振係数は、シリコーンゲルの付加長さ、および固定端からの取り付け位置までの距離の増加に対して減少する。
- (6) 本モデルによる主共振周波数と共振係数の解析結果は実測結果と良く一致し、本モデルが対物レンズアクチュエータの主共振特性の解析に有効であることを示した。

5. 高次共振モードと振幅抑制

5.1 緒言

第4章では、対物レンズの周波数応答特性における主共振について、シリコーンゲルの粘弾性特性を含めた振動解析モデルの構築と周波数応答特性の導出を行い、主共振特性の設計精度向上に有効であることを示した。本章では、制御帯域の拡大を目的として、可動部の高剛性化によらずに高次共振振幅を抑制する手法を提案し、解析と実機への適用結果から、その有効性を検証する。

第2章で示した通り、転送速度の高速化に対応して制御系のゲインクロス周波数の高域化が必要である。ゲインクロス周波数は、スリム・ウルTRASリム型では、CDとDVDで3~4 kHz、BDで5~7 kHz、ハーフハイト型では、CDとDVDで6~9 kHz、BDで13 kHzに達する。このゲインクロス周波数を実現するためには、対物レンズアクチュエータの高次共振周波数の高域化と振幅の低減が必須である。

表2.5に示した高次共振の目標を再掲すると、高次共振周波数はゲインクロス周波数の3倍以上を目標として、スリム・ウルTRASリム型では、CDとDVDで11 kHz以上、BDで20 kHz以上、ハーフハイト型ではCDとDVDで28 kHz以上、BDで40 kHz以上が求められる。また、高次共振振幅の許容値を8 dBとして、1 kHzにおけるゲインと高次共振のピークゲインとの差である1 kHzゲイン差は、スリム・ウルTRASリム型では、CDとDVDで-34 dB以下、BDで-44 dB以下、ハーフハイト型ではCDとDVDで-50 dB以下、BDで-56 dB以下が求められる。

従来、高次共振周波数の高域化と高次共振振幅の低減には、アクチュエータ可動部の高剛性化が用いられてきた。しかし、可動部の高剛性化は一般的には可動部の質量が増加する方向であり、加速度感度の観点からはマイナス要因となる。そこで本章では、加速度感度との両立を考慮して可動部の高剛性化によらずに、高次共振モードと駆動力分布の組み合わせによって高次共振振幅を抑制する方法[36][39]を提示し、DVD用とBD用の対物レンズアクチュエータへの適用結果を示す。

5.2 高次共振モード

図2.3および図4.1で示したDVD用ウルTRASリム型の対物レンズアクチュエータの可動部を図5.1に、図3.5で示したDVD用ハーフハイト型の対物レンズアクチュエータの可動部を図5.2に示す。

ウルTRASリム型あるいはスリム型の対物レンズアクチュエータでは、レーザー光がホルダの側方から入射するため、レーザー光が通過する入射開口部をホルダに設ける必要がある。この入射開口部によって剛性が低下するので、入射開口部を起点とした可動部の曲げモードが、制御系で注意すべき高次共振モードとして生じる。

図5.1のウルTRASリム型の対物レンズアクチュエータの可動部において、有限要素法を用いて解析した振動モードを図5.3に示す。図5.3(a)の1次曲げモードは、対物レンズ位置がフォーカシング方向に変位するので、フォーカシング方向の周波数応答特性に影響し、図5.3(b)の2次曲げモードは、対物レンズ位置がトラッキング方向に変位するので、トラッキング方向の周波数応答特性に影響する。

固有振動数の解析値は、図5.3(a)の1次曲げモードが13.8 kHz、図5.3(b)の2次曲げモードが38.7 kHzであった。高次共振周波数の目標値である11 kHzに対して、1次曲げモードの周波数13.8 kHzが近いので、特に1次曲げモードの振幅が検討の対象となる。

ハーフハイト型の対物レンズアクチュエータでは、レーザ光はホルダの下方から入射するため、ウルTRASリム・スリム型のようなホルダ側面の入射開口部は不要である。また、図 5.2 に示すようにホルダの内側に複数の壁を設けることによって高次共振周波数の高域化を図っている。

ハーフハイト型における振動モードの解析結果を図 5.4 に示す。図 5.4 (a) はホルダの下部が拡大・縮小する変形であるが、全体としては1次の曲げモードであり、フォーカシング方向の周波数応答特性に影響する。図 5.4 (b) は2次曲げモードであり、トラッキング方向の周波数応答特性に影響する。

固有振動数の解析値は、図 5.4 (a) の1次曲げモードが 34.7 kHz、図 5.4 (b) の2次曲げモードが 54.4 kHz であった。ハーフハイト型においても、1次曲げモードに注意が必要となる。

なお、BD 用の対物レンズアクチュエータの場合は、高次共振周波数の目標値がスリム・ウルTRASリム型で 20 kHz 以上、ハーフハイト型で 40 kHz 以上となるので、さらに高次共振周波数の高域化と振幅抑制が必要である。

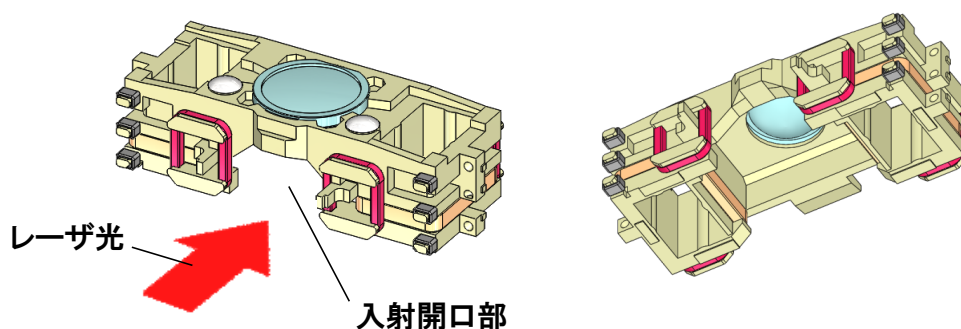


図 5.1 DVD 用ウルTRASリム型対物レンズアクチュエータの可動部

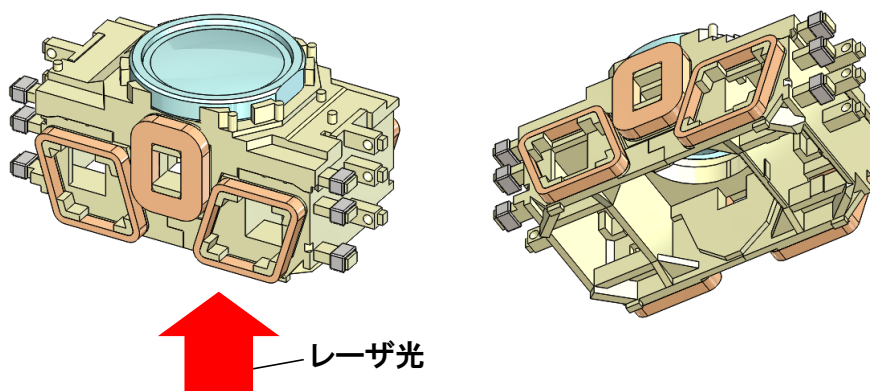
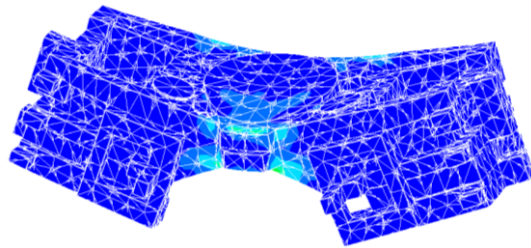
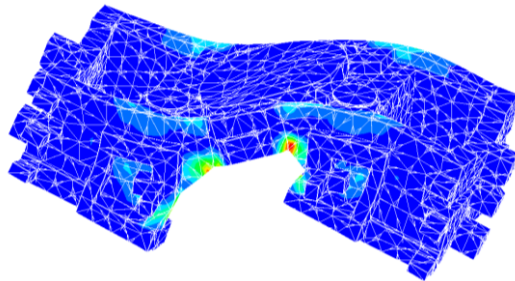


図 5.2 DVD 用ハーフハイト型対物レンズアクチュエータの可動部

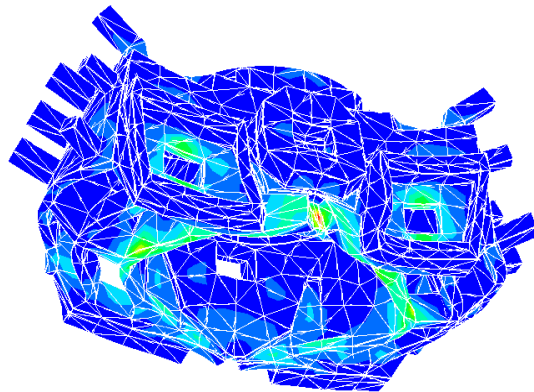


(a) 1次曲げモード (13.8 kHz)

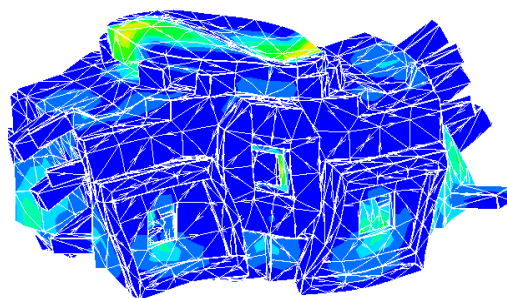


(b) 2次曲げモード (38.7 kHz)

図 5.3 ウルトラスリム型対物レンズアクチュエータにおける高次共振モードの解析結果



(a) 1次曲げモード (34.7 kHz)



(b) 2次曲げモード (54.4 kHz)

図 5.4 ハーフハイト型対物レンズアクチュエータにおける高次共振モードの解析結果

5.3 振動モードと駆動力分布を考慮した高次共振振幅の抑制手法

可動部の剛性によらずに振動振幅を低減するために考案した，高次共振モードと駆動力分布の組み合わせによる高次共振振幅の抑制手法について示す．

まず，1自由度のばね・質量・速度比例粘性減衰系の変位応答を示すと，質点の質量 m ，ばねの剛性 k ，粘性減衰係数 c ，減衰比 ζ ，固有振動数 f_n ，駆動力 F として，変位応答 Z は，

$$Z = \frac{F}{-m(2\pi f)^2 + k + i(2\pi f c)} = \frac{F}{k \left[1 - \left(\frac{f}{f_n} \right)^2 + i \left(2\zeta \frac{f}{f_n} \right) \right]} \quad (5.1)$$

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad \zeta = \frac{c}{2\sqrt{mk}}$$

と表される． i は虚数単位である．

次に，構造体の振動モードを多自由度系と考えて，式(5.1)を多自由度系に拡張する． j 次の振動モードにおいて，構造体の点 $a1$ に駆動力 F_{a1} が作用したときの，点 b の変位応答 Z_{jb} は，

$$Z_{jb} = \frac{F_{a1} \phi_{ja1} \phi_{jb}}{k_j \left[1 - \left(\frac{f}{f_j} \right)^2 + i \left(2\zeta_j \frac{f}{f_j} \right) \right]} \quad (5.2)$$

と表される[103]．ここで， ϕ_{ja1} は駆動点 $a1$ の j 次振動モード成分， ϕ_{jb} は応答点 b の j 次振動モード成分， k_j は j 次モード剛性， f_j は j 次固有振動数， ζ_j は j 次モード減衰比である．

式(5.2)において，分母はモード剛性と減衰成分，および周波数項を表す．従来はモード剛性を高めることで，固有振動数（高次共振周波数）の高域化と，変位応答（高次共振振幅）の低減が考えられてきた．高剛性化は一般的には可動部の質量が増加する方向となり，加速度感度の観点からは望ましくない．そこで，振動モードに着目して，その振動モードを打ち消すように駆動力分布を作用させることで高次共振振幅の低減を図る．

ある振動モードに対する1点駆動時の変位応答の現れ方を模式的に図5.5に示す．駆動力 F_{a1} と駆動点 $a1$ の振動モード成分 ϕ_{ja1} の積 $F_{a1} \phi_{ja1}$ は駆動力成分を表し，この駆動力成分 $F_{a1} \phi_{ja1}$ と応答点 b の振動モード成分 ϕ_{jb} の積が点 b の変位応答 Z_{jb} に寄与する．

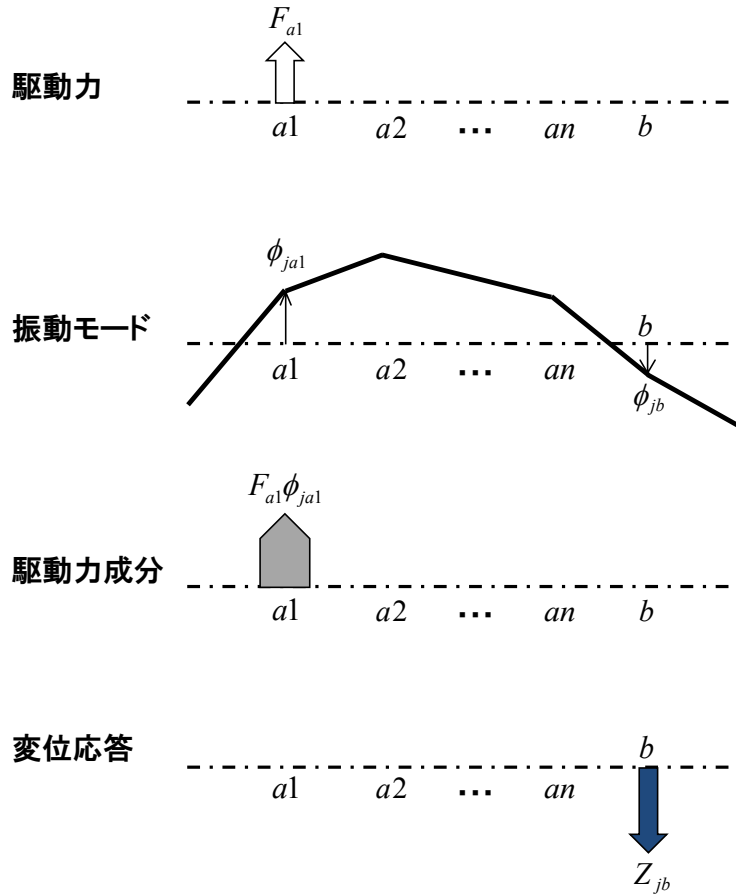


図 5.5 振動モードに対する 1 点駆動時の変位応答の模式図

実際の対物レンズアクチュエータでは、駆動力は 1 点ではなく、ある範囲に分布を持って作用する。そこで、駆動力が作用する範囲を離散化して、点 a_1, a_2, \dots, a_n に駆動力 $F_{a_1}, F_{a_2}, \dots, F_{a_n}$ が作用すると考えると、点 b の変位応答 Z_{jb} は、

$$Z_{jb} = \frac{\sum_{a=a_1}^{a_n} F_a \phi_{ja} \phi_{jb}}{k_j \left[1 - \left(\frac{f}{f_j} \right)^2 + i \left(2\zeta_j \frac{f}{f_j} \right) \right]} \quad (5.3)$$

と表される。振動モードに対する多点駆動時の変位応答の模式図を図 5.6 に示す。

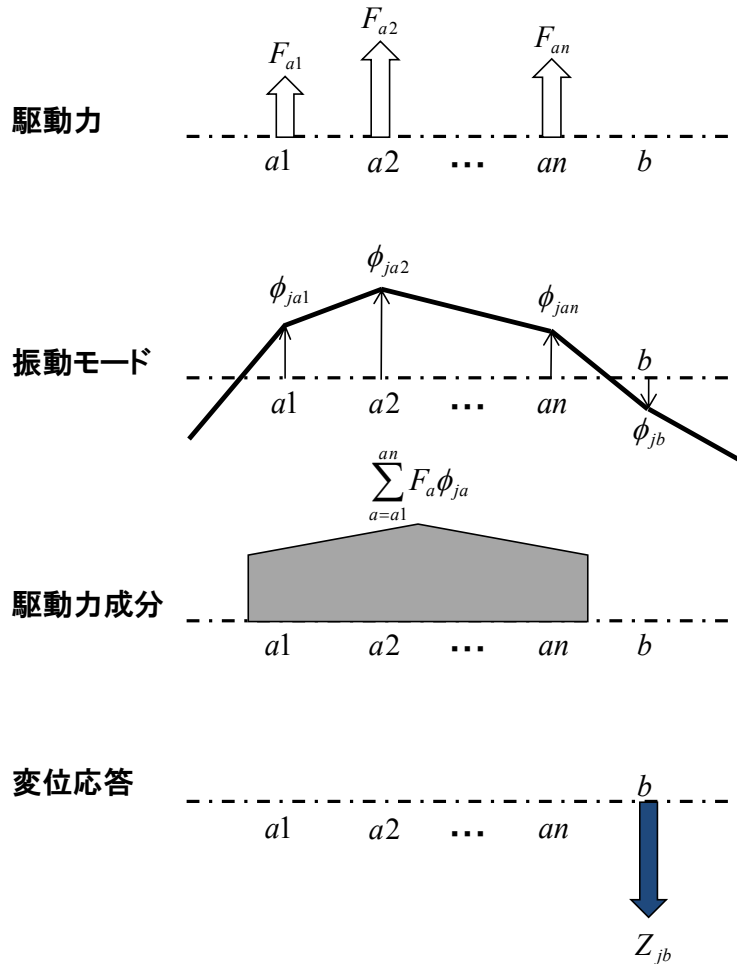


図 5.6 振動モードに対する多点駆動時の変位応答の模式図

なお、式 (5.3) は、ある一つの振動モードを対象とした場合の点 b の応答であり、点 b の周波数応答全体を考える場合は、考慮する振動モードの数について式 (5.3) を加算すれば良い。実機での振動モード数は無限であるが、 N 次までの振動モードを考えるとすると、点 b の周波数応答 Z_b は、

$$Z_b = \sum_{j=1}^N \frac{\sum_{a=1}^{an} F_a \phi_{ja} \phi_{jb}}{k_j \left[1 - \left(\frac{f}{f_j} \right)^2 + i \left(2\zeta_j \frac{f}{f_j} \right) \right]} \quad (5.4)$$

と表される。

対物レンズアクチュエータの場合、第 1 次の振動モードは第 4 章で示した主共振である。第 4 章に記載した通り、主共振は減衰材として付加されるシリコンゲルの粘弾性の影響を受けるので、単純な速度比例粘性減衰系の応答とは異なるが、ここでは高次共振を中心に考えるため、主共振も含めてすべて速度比例粘性減衰系として表す。

j 次振動モードの変位応答 Z_{jb} を低減する条件を以下に記す.

1 点駆動の場合, 式 (5.2) において,

$$\phi_{ja1} = 0 \quad (5.5)$$

のとき, すなわち j 次振動モードの節に駆動点がある場合は, この振動モードを励振しないことになるので, 応答点 b を含めたすべての位置で, この振動モードの変位応答は生じない.

また,

$$\phi_{jb} = 0 \quad (5.6)$$

のとき, すなわち j 次振動モードの節に応答点がある場合は, 応答点 b ではこの振動モードの変位応答は生じない. これらの例を図 5.7~5.9 に示す. ここでは振動モードとして黒実線で示した剛体回転モードを考える.

まず, 図 5.7 に変位応答が生じる場合を示す. 図 5.7 は, 振動モードの節ではない駆動点 $a1$ に駆動力 F_{a1} が作用したときの, 振動モードの節ではない応答点 b の変位応答 Z_{jb} を示したものである. 駆動力 F_{a1} と駆動点 $a1$ の振動モード成分 ϕ_{ja1} の符号が正とすると, 駆動力成分 $F_{a1}\phi_{ja1}$ の符号は正となり, 応答点 b の振動モード成分 ϕ_{jb} の符号が負とすると, 変位応答 Z_{jb} は負 (駆動力に対して位相が反転) として生じる.

図 5.8 は, 振動モードの節に駆動力が作用する式 (5.5) の場合を示したものである. 駆動点 $a1$ の振動モード成分 $\phi_{ja1} = 0$ なので, 駆動力成分 $F_{a1}\phi_{ja1} = 0$ となり, 応答点 b の振動モード成分の値によらず変位応答 $Z_{jb} = 0$ である.

図 5.9 は, 振動モードの節に応答点がある式 (5.6) の場合を示したものである. 駆動点 $a1$ が振動モードの節でない場合は, 駆動力成分 $F_{a1}\phi_{ja1}$ は生じるので構造体の剛体回転振動は生じる. しかし, 応答点 b の振動モード成分 $\phi_{jb} = 0$ なので, 応答点 b の変位応答 $Z_{jb} = 0$ となる.

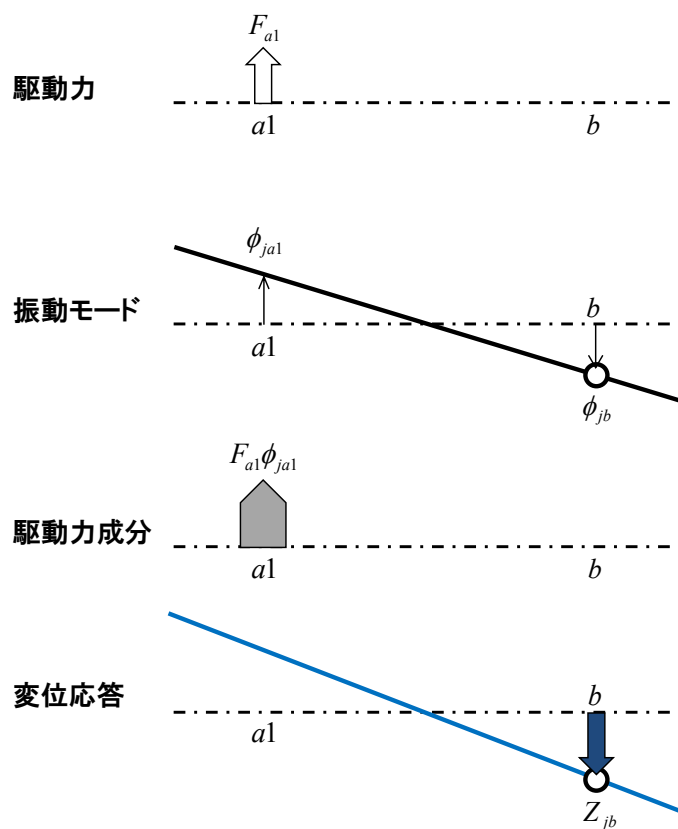


図 5.7 剛体回転モードにおける 1 点駆動時の変位応答の例
(駆動点，応答点がともに振動モードの節ではない場合)

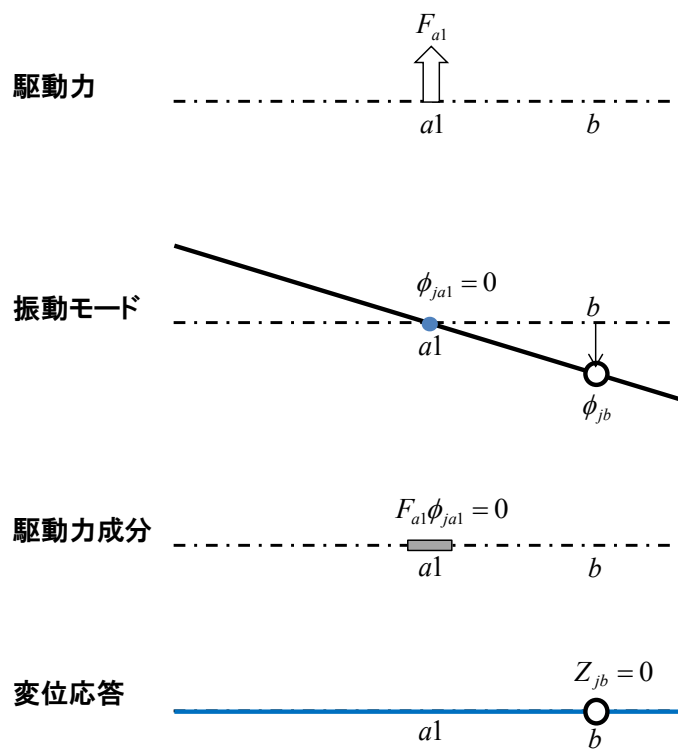


図 5.8 剛体回転モードにおける 1 点駆動時の変位応答の例
(駆動点が振動モードの節にある場合)

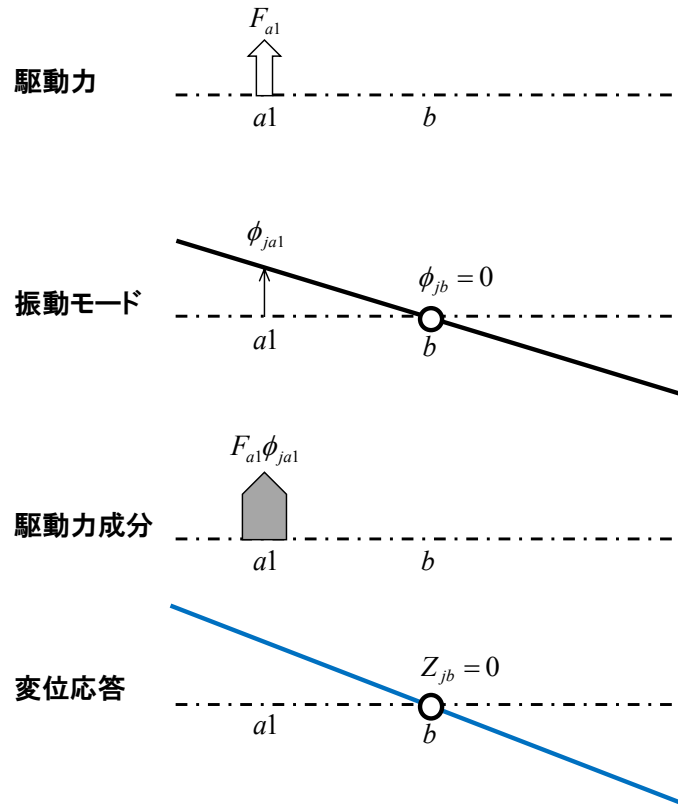


図 5.9 剛体回転モードにおける 1 点駆動時の変位応答の例
(応答点が振動モードの節にある場合)

多点駆動の場合，式 (5.5) に対応する j 次振動モードを励振しない条件は，

$$\sum_{a=a1}^{an} F_a \phi_{ja} = 0 \quad (5.7)$$

となる．すなわち，駆動力と駆動点の振動モード成分の積である駆動力成分の総和をゼロとすることで，振動モードの応答振幅を抑制することが可能となる．この例を図 5.10～5.12 に示す．ここでは振動モードとして黒実線で示した 1 次曲げモードを考える．

まず，図 5.10 に変位応答が生じる場合を示す．図 5.10 は，振動モードの節ではない駆動点 $a1$ ， $a6$ に駆動力 F_{a1} ， F_{a6} が作用したときの，振動モードの節ではない応答点 b の変位応答 Z_{jb} を示したものである．駆動力 F_{a1} ， F_{a6} と振動モード成分 ϕ_{ja1} ， ϕ_{ja6} の符号が正とすると，駆動力成分 $F_{a1}\phi_{ja1}$ ， $F_{a6}\phi_{ja6}$ の符号は正となり，応答点 b の振動モード成分 ϕ_{jb} の符号が負とすると，変位応答 Z_{jb} は負（駆動力に対して位相が反転）として生じる．

図 5.11 は，振動モードの節に駆動力が作用する場合を示したものである．駆動点の振動モード成分 ϕ_{ja2} ， ϕ_{ja5} がいずれもゼロであるので，式 (5.5) の 1 点駆動の場合と同様に，応答点 b の振動モード成分の値によらず変位応答 $Z_{jb} = 0$ である．

図 5.12 は, 駆動力 $F_{a1} \sim F_{a6}$ が点 $a1 \sim a6$ に分布して作用し, 駆動力成分の総和 $\sum_{a=1}^{a6} F_a \phi_{ja} = 0$ となる式 (5.7) の場合を示したものである. 駆動力成分の総和がゼロであるので, 応答点 b の振動モード成分の値によらず, 応答点 b を含めたすべての位置で変位応答 $Z_{jb} = 0$ とすることができる.

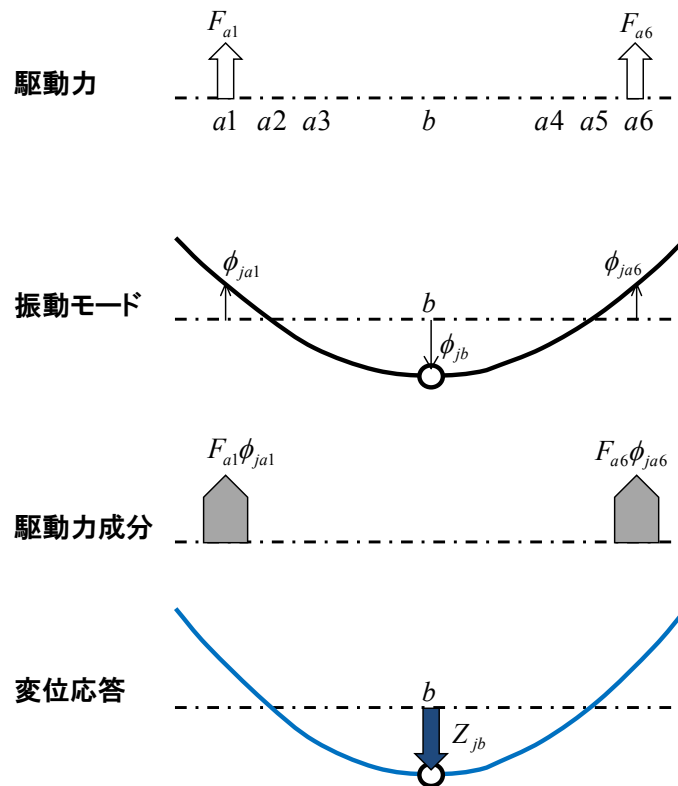


図 5.10 1次曲げモードにおける駆動力分布と変位応答の例
(駆動点, 応答点がともに振動モードの節ではない場合)

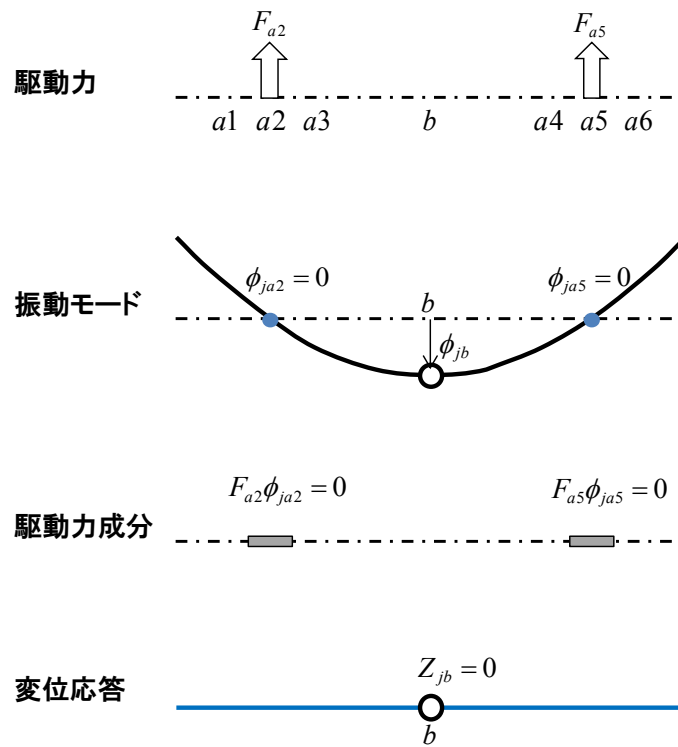


図 5.11 1次曲げモードにおける駆動力分布と変位応答の例
(駆動点が振動モードの節にある場合)

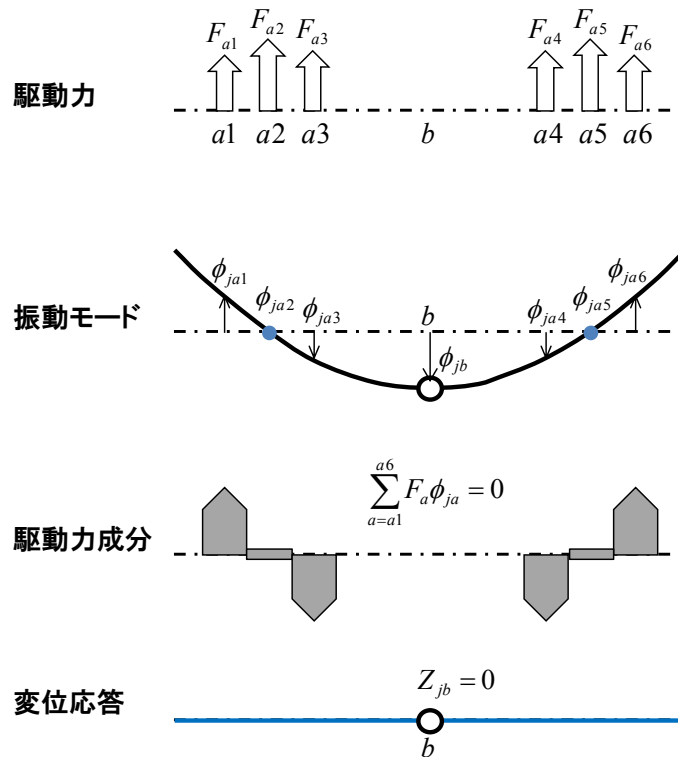


図 5.12 1次曲げモードにおける駆動力分布と変位応答の例
(駆動力成分の総和がゼロの場合)

式 (5.6) , (5.7) および図 5.9, 5.12 の指針を対物レンズアクチュエータに適用する. 式 (5.6) , 図 5.9 に基づいて, 応答点である対物レンズをホルダ上面の中央に配置することで, 可動部のねじれ振動と回転振動に対して対物レンズ位置での応答を抑制することが可能となる. そして, 式(5.7), 図 5.12 に基づいて, 可動部の 1 次曲げモードに対して, 駆動力成分の総和がゼロとなるようにマグネットとコイルの配置を設定することで, 高次共振振幅を抑制することが可能となる.

5.4 適用結果

5.4.1 DVD 用ウルTRASリム型対物レンズアクチュエータ

図 5.1 に示した DVD 用ウルTRASリム型の対物レンズアクチュエータにおける高次共振振幅の抑制について以下に示す.

図 2.4, 図 2.5 で示したコイルとマグネットの配置, およびフォーカシングコイルで発生する駆動力の模式図を図 5.13 に再掲する. 高次共振振幅の抑制と第 6 章で記述する対物レンズ傾き低減のために考案した, フォーカシングコイルの内側の空間にインナーマグネットを配置し, ホルダの二つの側面でトラッキングコイルをマグネットに対して外寄りと内寄りに配置する独自の構造としている. フォーカシングコイルで発生する駆動力は, マグネットに対向する 2 辺と, インナーマグネットに対向する 1 辺で作用する.

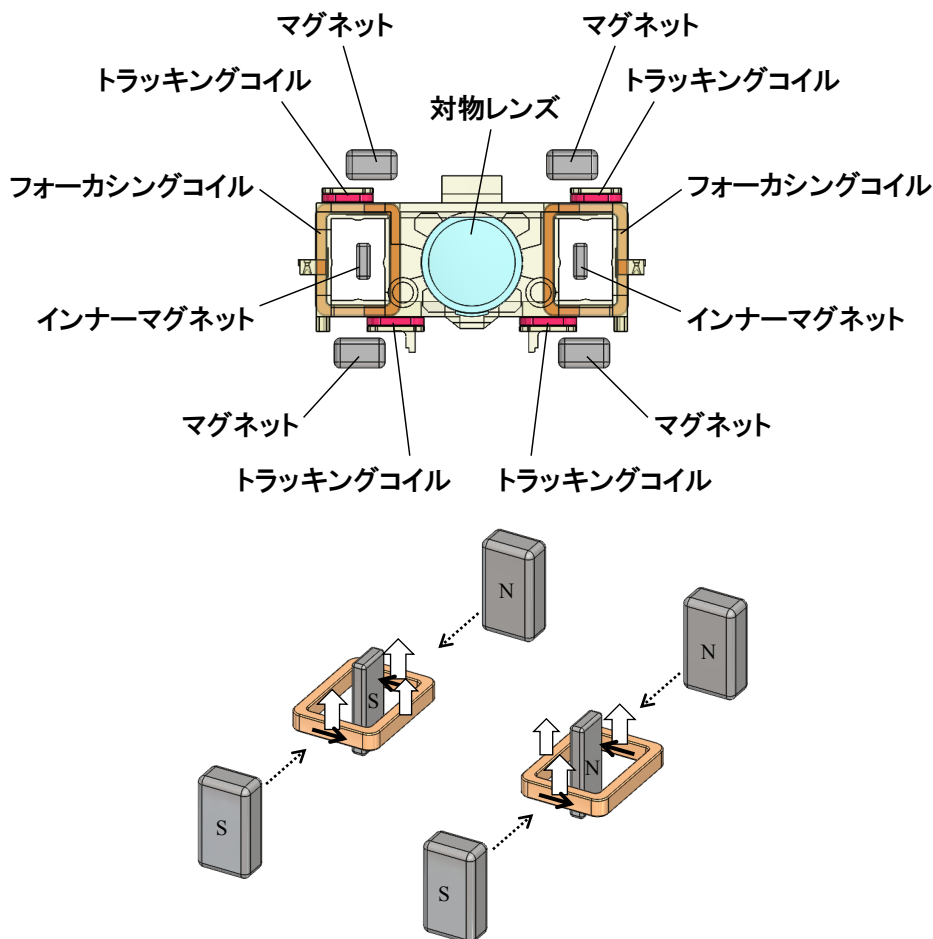


図 5.13 DVD 用ウルTRASリム型対物レンズアクチュエータにおけるコイルとマグネットの配置 およびフォーカシングコイルで発生する駆動力

フォーカシングコイルで発生する駆動力は、コイル全体にわたって分布を有するが、まずは概略計算として、フォーカシングコイルで発生する駆動力を集中荷重とした計算結果について示す。

ホルダの全幅 11.6 mm に対して、駆動点の間隔 DF を 5.2, 6.2, 6.7, 7.2, 8.2 mm と変化させたときの対物レンズ位置での周波数応答特性の計算結果を図 5.14 に示す。13 kHz 付近の高次共振に着目すると、駆動点の間隔 DF が狭いときは位相進み側に振動が生じ、駆動点の間隔 DF が 6.7 mm 付近で高次共振振幅は小さくなり、駆動点の間隔 DF が広くなると位相遅れ側に振動が生じる。この結果から、 DF が 6.7 mm 付近が振動モードの節であり、これよりも内側に駆動力が作用する場合は、駆動力と同じ方向に変位する位相進み側に、振動モードの節よりも外側に駆動力が作用する場合は、駆動力と反対側に変位する位相遅れ側に生じることがわかる。

振動モードの節が間隔 6.7 mm 付近であることがわかったので、初期検討としては、この付近を中心にフォーカシング駆動力が作用するようにマグネットを配置すればよい。ただし、図 5.1, 図 5.13 に示した本アクチュエータの場合は、マグネット配置が対称ではないので、磁場解析により求めた駆動力分布をフォーカシングコイル全体に与える必要がある。

磁場解析の結果を図 5.15 に示す。図 5.15 (a) はフォーカシングコイル付近の磁束密度ベクトルを、図 5.15 (b) はフォーカシングコイルで発生する駆動力を示している。この駆動力分布をフォーカシングコイルに与え、周波数応答特性を計算し、高次共振振幅がほぼゼロとなるようにマグネット、インナーマグネットの寸法と位置を定めた。

その際に、高次共振振幅だけではなく、第 3 章で記した加速度感度、すなわち駆動力の大きさと、第 6 章で記す対物レンズ傾きも考慮する必要がある。駆動力を大きくするには、コイルに対向するマグネットの寸法を大きくすることが有効であり、対物レンズ傾きを低減するには、コイルで生じるローリングモーメントをキャンセルするようにコイル寸法を設定する必要がある。これらのバランスを取って、磁気回路構成を設定した。

設定した磁気回路構成における周波数応答特性の計算結果を図 5.16 に示す。縦軸の振幅は 1 kHz の値を 0 dB として表している。図 5.16 (a) のフォーカシング方向における 13.8 kHz の高次共振は、 -180° からわずかに位相進み側に生じ、1 kHz ゲイン差は -45.0 dB である。図 5.16 (b) のトラッキング方向では、38.5 kHz に高次共振が現れており、1 kHz ゲイン差は -60.8 dB である。いずれも DVD 用ウルトラスリム型における高次共振の目標値である高次共振周波数 11 kHz 以上、1 kHz ゲイン差 -34 dB 以下に対して十分余裕がある。

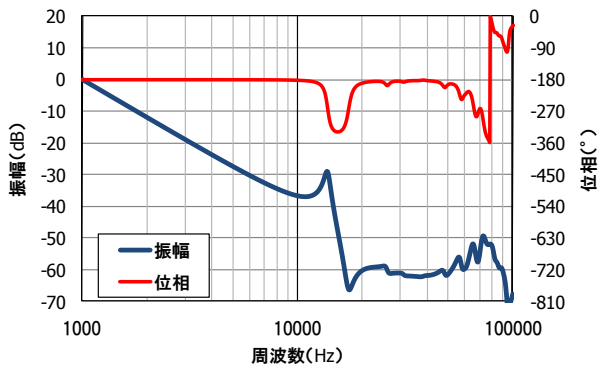
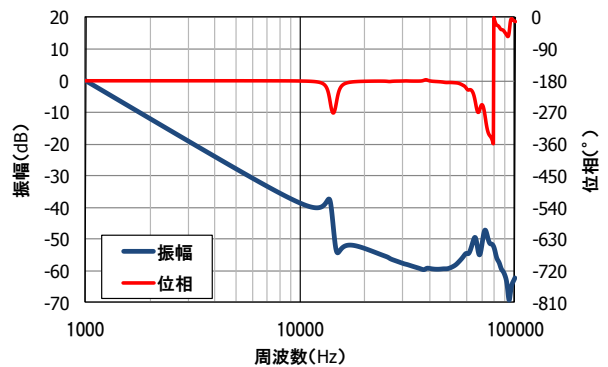
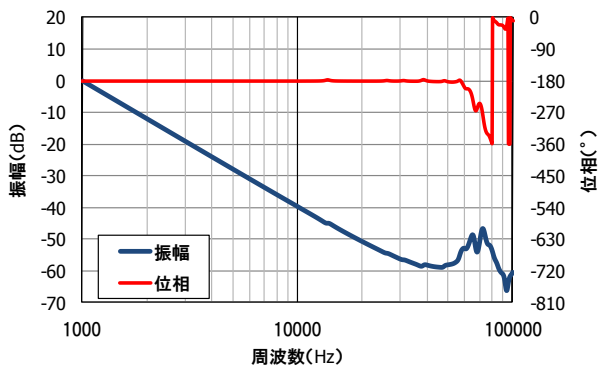
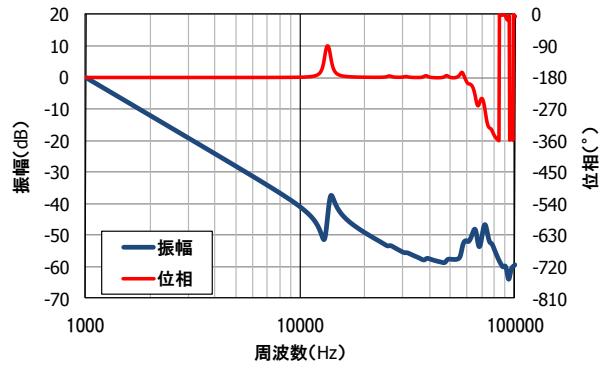
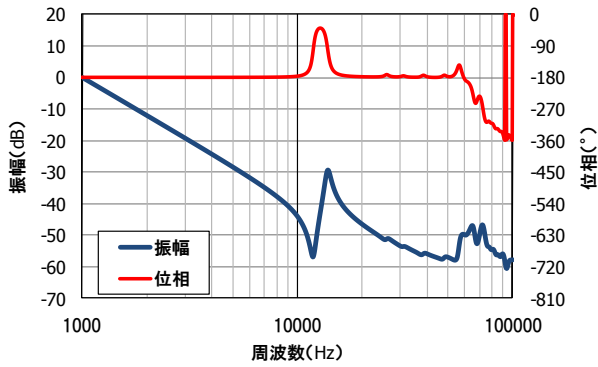
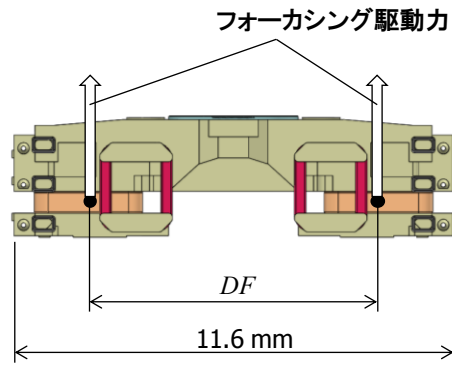
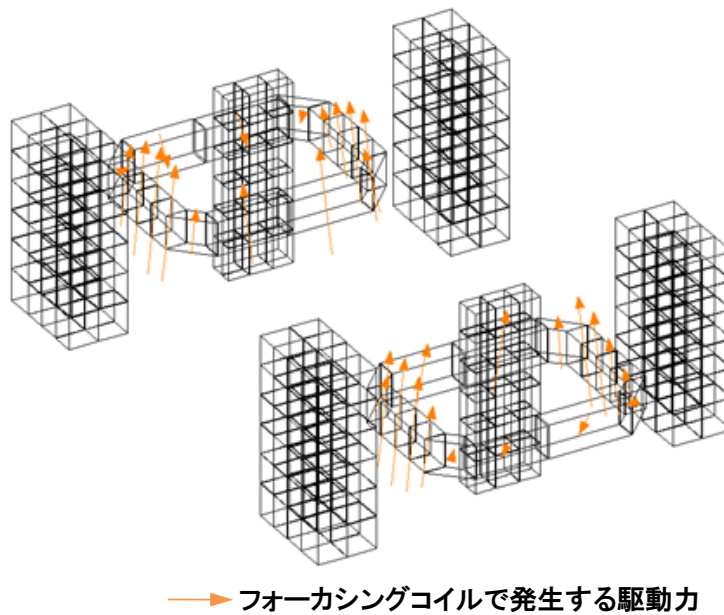
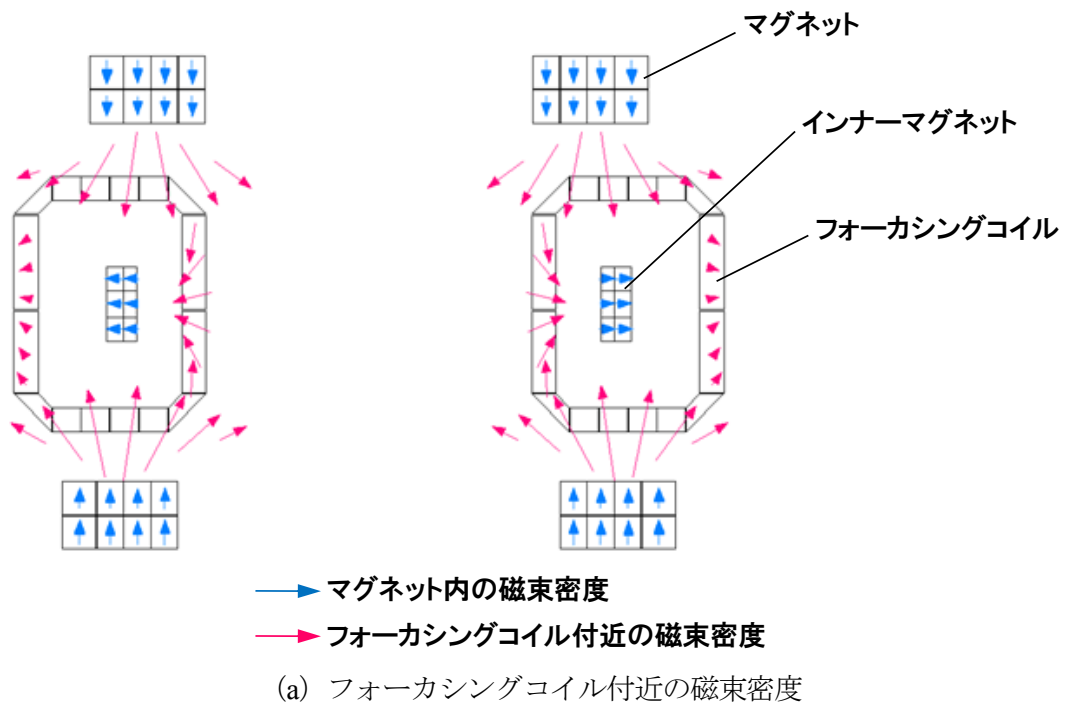
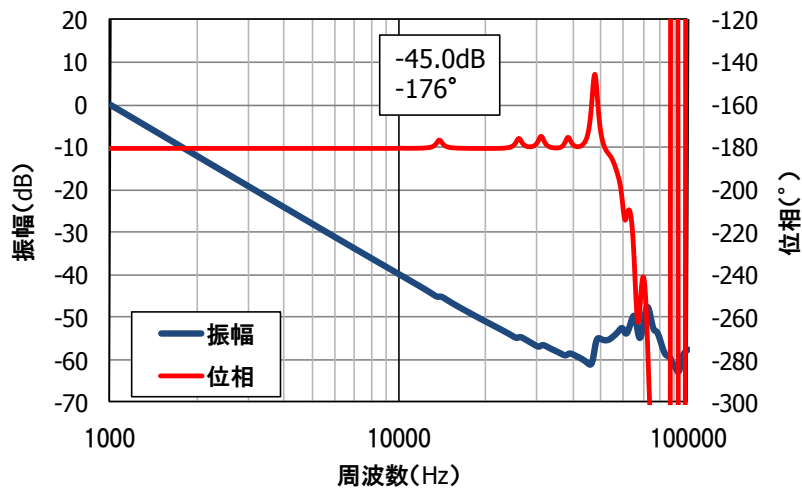


図 5.14 駆動点の間隔を変化させたときの周波数応答特性の計算結果

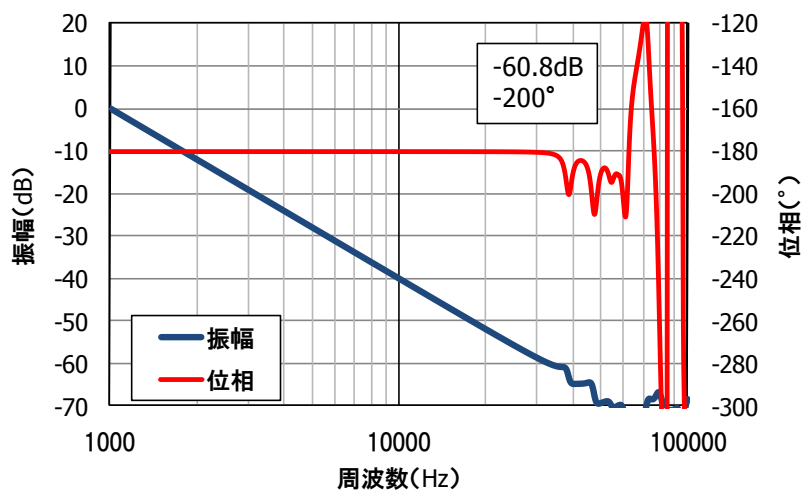


(b) フォーカシングコイルで発生する駆動力

図 5.15 DVD 用ウルTRASリム型対物レンズアクチュエータにおける磁場解析結果



(a) フォーカシング方向

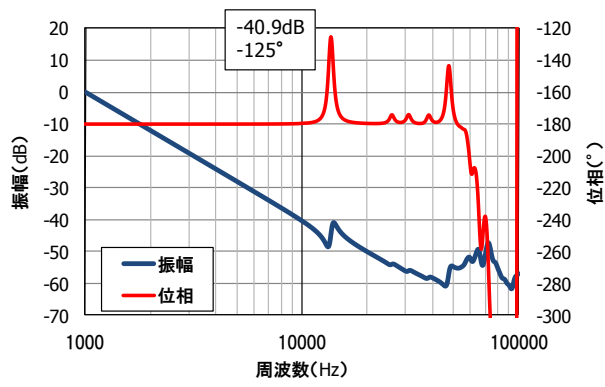


(b) トラッキング方向

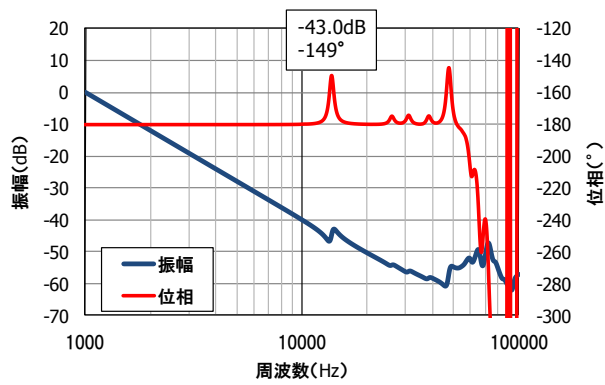
図 5.16 DVD 用ウルトラスリム型対物レンズアクチュエータにおける周波数応答特性の計算結果

フォーカシング方向の高次共振の振幅は、図 5.14 に示したように駆動点の位置によって変化するため、製造ばらつきによるマグネットの位置や寸法のずれに対して検討しておく必要がある。マグネットの取り付けは治具基準で行われ、治具の寸法公差は ± 0.03 mm 程度、マグネットの取り付け誤差は ± 0.05 mm 程度である。また、マグネットの寸法公差は ± 0.05 mm 程度である。したがって、マグネットの位置ずれとして ± 0.1 mm から最大で ± 0.2 mm を考慮しておけば十分である。

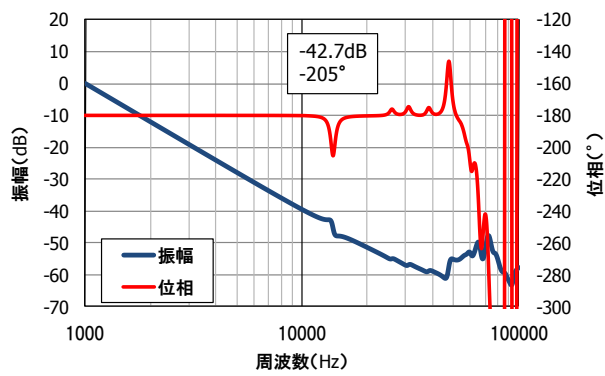
そこで、各マグネットの位置を基準状態から ± 0.2 mm 変化させたときのフォーカシング方向の周波数応答特性を計算した。なお、マグネットの位置は、トラッキング方向に沿った 2 個のマグネットの間隔が狭まったり広がったりする方向に変化させた。つまり、各マグネットの位置が -0.2 mm 変化というのは、2 個のマグネットの間隔が 0.4 mm 狭まることであり、各マグネットの位置が $+0.2$ mm 変化というのは、2 個のマグネットの間隔が 0.4 mm 広がることを表す。マグネット位置ずれに対するフォーカシング方向の周波数応答特性の計算結果を図 5.17 に示す。



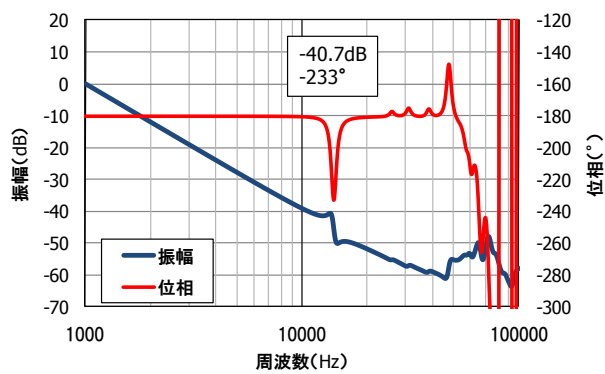
(a) マグネット位置-0.2 mm



(b) マグネット位置-0.1 mm



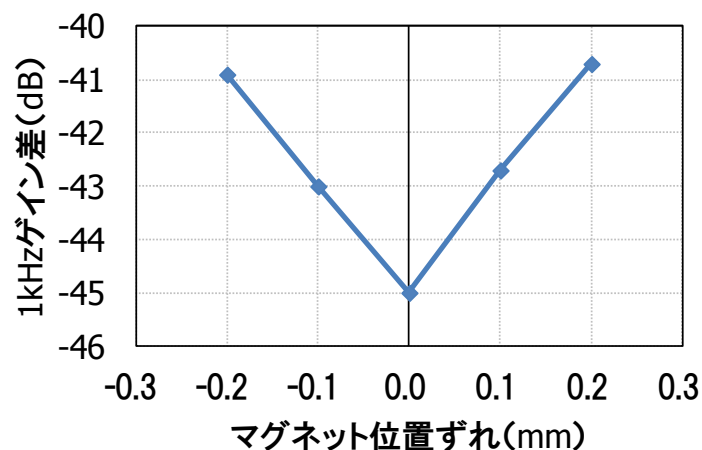
(c) マグネット位置+0.1 mm



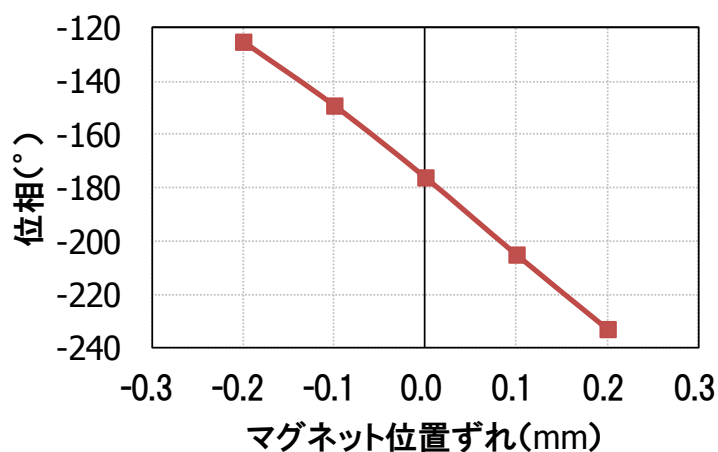
(d) マグネット位置+0.2 mm

図 5.17 マグネット位置ずれに対するフォーカシング方向の周波数応答特性の計算結果

フォーカシング方向の高次共振振幅の計算結果について、マグネット位置ずれに対する1 kHz ゲイン差と位相の変化を図 5.18 に示す。1 kHz ゲイン差と位相はマグネット位置ずれに対してほぼ直線的に変化し、マグネット位置ずれ 0.2 mm で、振幅は約 4 dB、位相は約 55° 変化する。この計算結果は、マグネット位置ずれ±0.2 mmがあっても、DVD ウルトラスリム型における1 kHz ゲイン差の目標値の-34 dB 以下を満足する見通しであることを示している。



(a) 1 kHz ゲイン差



(b) 位相

図 5.18 マグネット位置ずれに対するフォーカシング方向の高次共振振幅の計算結果

作製した DVD 用ウルトラスリム型の対物レンズアクチュエータの外観写真を図 5.19 に示す。この対物レンズアクチュエータにおける周波数応答特性の測定結果を図 5.20 に示す。縦軸の振幅は 1 kHz の値を 0 dB として表している。フォーカシング方向の高次共振は 13.3 kHz で生じており、1 kHz ゲイン差は -43.9 dB、位相は -177° 、トラッキング方向の高次共振は 37.6 kHz で、1 kHz ゲイン差は -60.0 dB、位相は -226° であった。測定結果は図 5.16 の高次共振の計算結果とほぼ同じ特性が得られており、特に注意すべきフォーカシング方向の高次共振振幅を十分に抑圧できている。この結果は、目標値である高次共振周波数 11 kHz 以上と 1 kHz ゲイン差 -34 dB 以下を満たしている。

対物レンズアクチュエータ実機において、マグネットの位置ずれに対するフォーカシング方向の高次共振振幅の変化を測定した。各マグネットの位置を ± 0.1 mm 変化させたときのフォーカシング方向の周波数応答特性の測定結果を図 5.21 に示す。また、1 kHz ゲイン差と位相の変化について、計算結果との比較を図 5.22 に示す。

計算結果と同様に、マグネット位置を -0.1 mm としたときに高次共振は位相進み側に生じ、マグネット位置を $+0.1$ mm としたときに位相遅れ側に生じている。図 5.22 では、1 kHz ゲイン差が計算結果よりも全体的に約 1 dB 大きくなっているものの、マグネット位置に対する振幅と位相の変化は、計算と同様の結果が得られている。マグネットの位置ずれ ± 0.1 mm における 1 kHz ゲイン差は -41 dB 以下に抑えられている。

以上から、この高次共振振幅抑制手法はマグネットの取り付けばらつきに対して十分に実用的であることを確認できた。

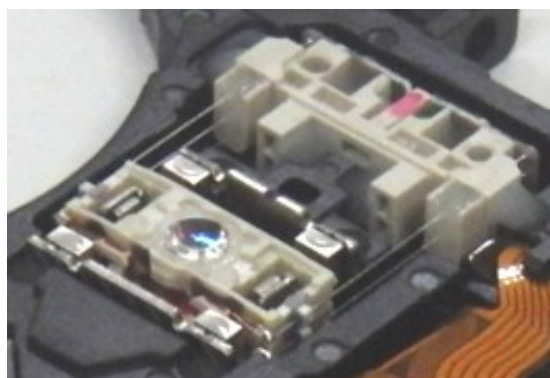
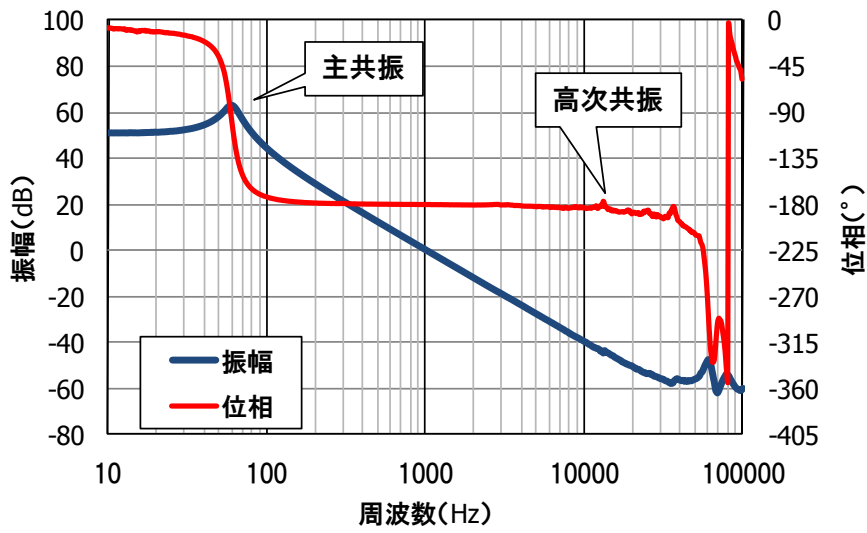
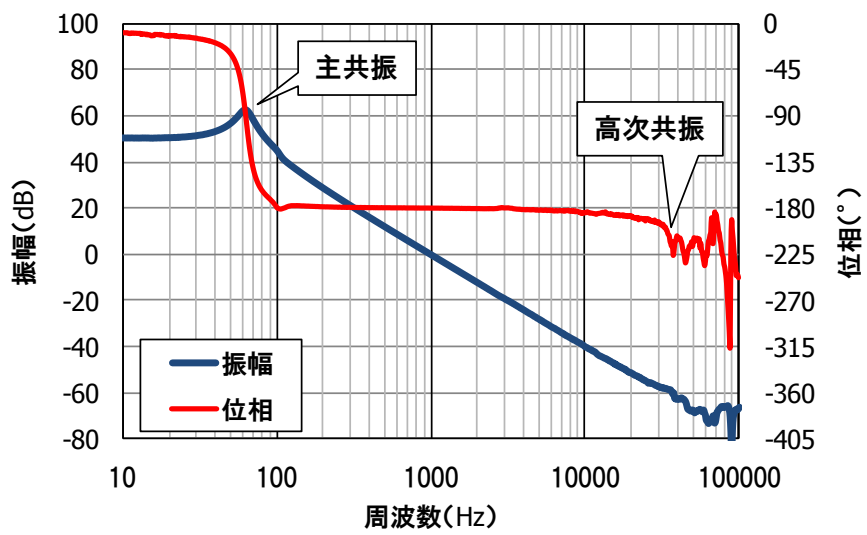


図 5.19 作製した DVD 用ウルトラスリム型対物レンズアクチュエータの外観

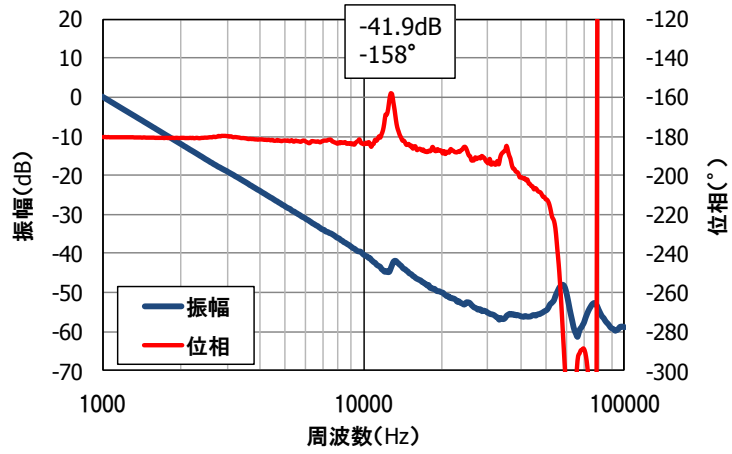


(a) フォーカシング方向

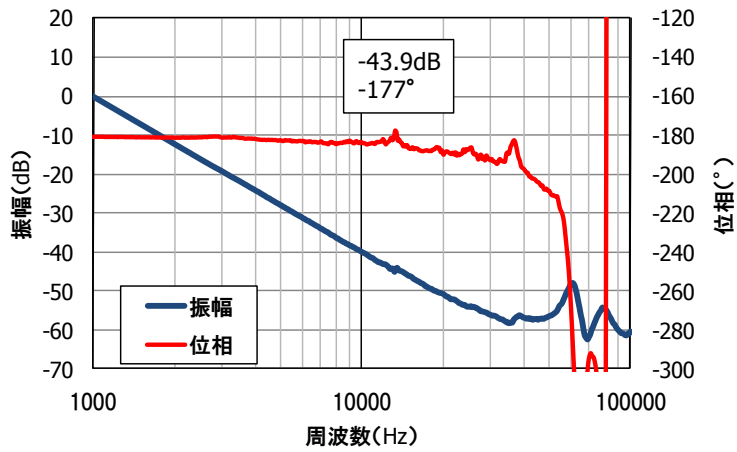


(b) トラッキング方向

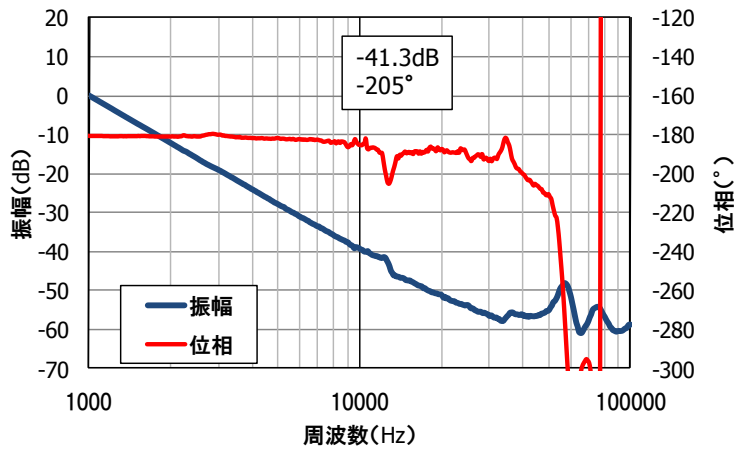
図 5.20 DVD 用ウルTRASリム型対物レンズアクチュエータにおける周波数応答特性の測定結果



(a) マグネット位置-0.1 mm

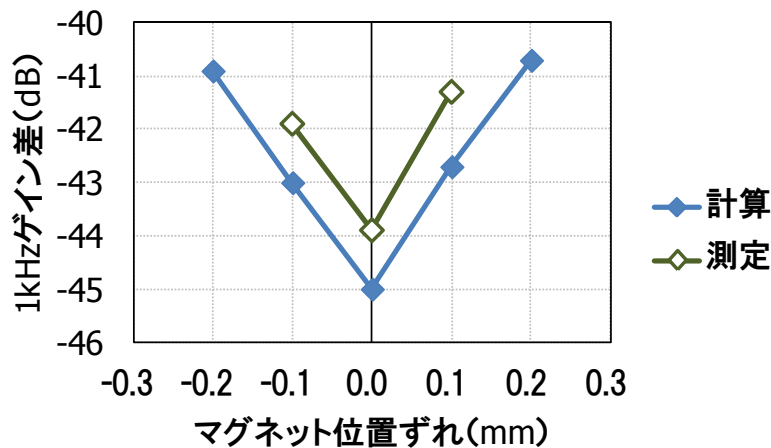


(b) マグネット基準位置

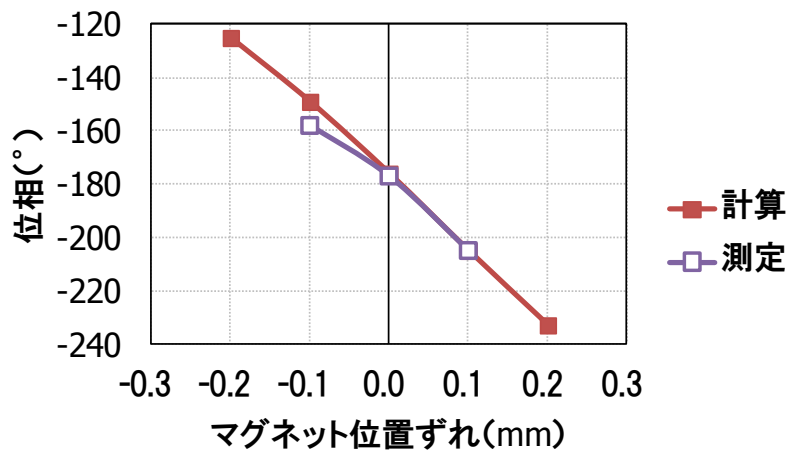


(c) マグネット位置+0.1 mm

図 5.21 マグネット位置ずれに対するフォーカシング方向の周波数応答特性の測定結果



(a) 1 kHz ゲイン差



(b) 位相

図 5.22 マグネット位置ずれに対するフォーカシング方向の高次共振振幅の計算結果と測定結果の比較

5.4.2 DVD 用ハーフハイト型対物レンズアクチュエータ

次に、図 5.2 に示した DVD 用ハーフハイト型の対物レンズアクチュエータへの適用結果を示す。DVD 用ハーフハイト型では、高次共振周波数 28 kHz 以上、1 kHz ゲイン差-50 dB 以下が求められる。

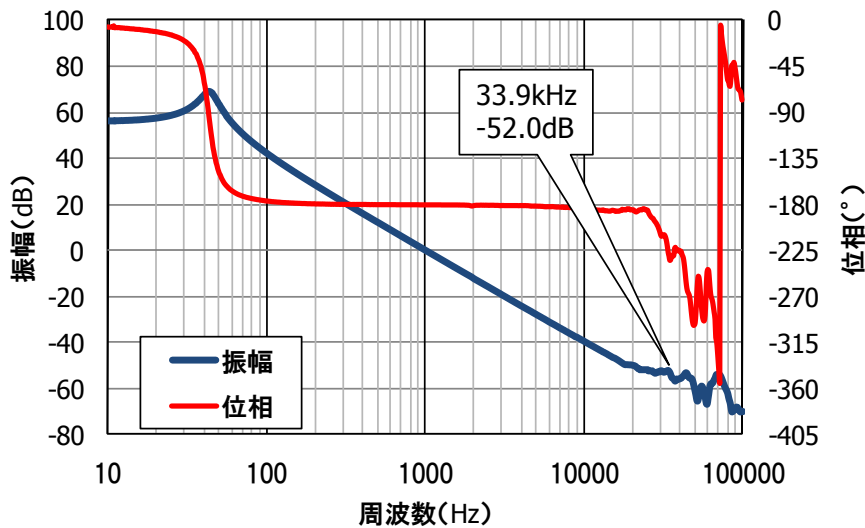
図 5.4 に示した振動モードの解析結果において、フォーカシング方向の周波数応答特性に現れる 1 次曲げモードの固有振動数の解析値が 34.7 kHz であり、目標値の 28 kHz に近い。そこで、この 1 次曲げモードの振幅を抑えることを意図して、フォーカシングコイルとマグネットの寸法と配置を設定した。トラッキング方向については、2 次曲げモードの固有振動数の解析値が 54.4 kHz であり、目標値に対して余裕があるので、振幅が極端に大きくならなければ問題無い。

作製した DVD 用ハーフハイト型の対物レンズアクチュエータの外観写真を図 5.23 に、周波数応答特性の測定結果を図 5.24 に示す。フォーカシング方向の高次共振は 33.9 kHz、1 kHz ゲイン差は -52.0 dB、トラッキング方向の高次共振は 55.5 kHz、1 kHz ゲイン差は -51.6 dB であった。

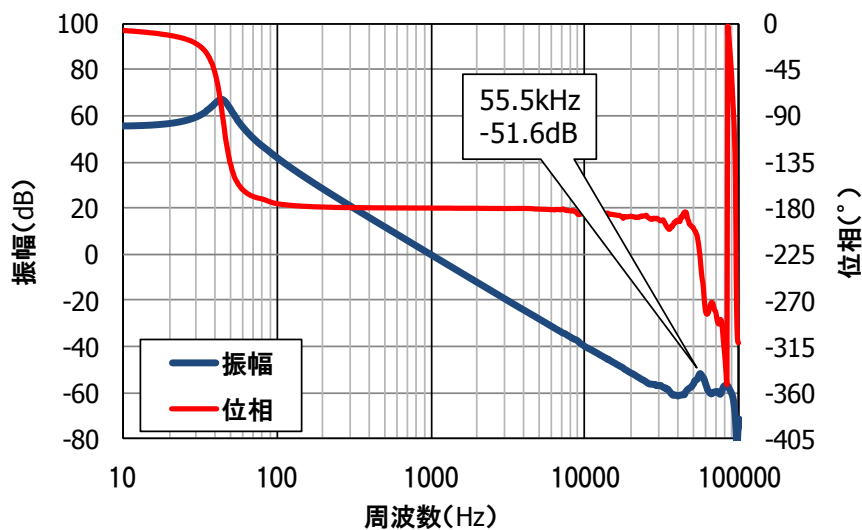
フォーカシング方向 33.9 kHz の振幅を完全には抑圧できていないが、目標値である高次共振周波数 28 kHz 以上と 1 kHz ゲイン差-50 dB 以下を満たしており、実用上は問題無い特性である。この高次共振は位相遅れ側に生じているので、駆動力が振動モードの節よりも外側に作用していることを表している。振幅をさらに低減するためには、フォーカシング方向の駆動力分布を対物レンズ中心に近い内側に寄せる必要がある。図 3.6 に示したフォーカシングコイルとマグネットの配置を参照すると、駆動力分布を対物レンズ中心に近い内側に寄せるには、フォーカシングコイルの幅を縮小するか、マグネットの幅を縮小することが考えられる。しかし、これらはフォーカシングコイルで発生する駆動力の大きさを低下させることにつながるため、ここでは、加速度感度と高次共振振幅の両立を考慮して、図 5.24 の特性を実機に適用した。



図 5.23 作製した DVD 用ハーフハイト型対物レンズアクチュエータの外観



(a) フォーカシング方向



(b) トラッキング方向

図 5.24 DVD 用ハーフハイト型対物レンズアクチュエータにおける周波数応答特性の測定結果

5.4.3 BD 用スリム型対物レンズアクチュエータ

次に、BD 用スリム型の対物レンズアクチュエータへの適用結果を示す。BD 用スリム型では、高次共振周波数 20 kHz 以上、1 kHz ゲイン差 -44 dB 以下が求められる。

BD 用スリム型光ピックアップの構造[39]を図 5.25 に示す。BD 用の光ピックアップでは、BD に加えて DVD と CD にも対応する必要があるため、BD 用の光学系と DVD/CD 用の光学系を備える。したがって、対物レンズは BD 用と DVD/CD 用の 2 個が配置される。

対物レンズアクチュエータの構造[39]を図 5.26 に示す。BD 対物レンズと DVD/CD 対物レンズをホルダ上面にトラッキング方向に沿って配置する。BD 用と DVD/CD 用の 2 本の光束が並列して配置されるため、対物レンズアクチュエータの可動部と光束が入射する側のマグネットは、光束よりも上側で構成する必要がある。この構成を実現するために、対物レンズアクチュエータとしてこれまでに類例のない 3 極磁場構造を考案した。

ホルダの周囲にフォーカシングコイルを取り付け、トラッキングコイルをホルダの二つの側面に2個ずつ配置する。ホルダの二つの側面に対向してマグネットを3個ずつトラッキング方向に沿って隣接して配置する。中央のマグネットの極性を外側の2個のマグネットと反転させた3極磁場構造としたことが本アクチュエータの特徴である。この3極磁場構造によってフォーカシング方向の高次共振振幅の抑制を図ったことについて以下に記す。

フォーカシングコイルで発生する駆動力を図 5.27 に示す。トラッキング方向において外側2個のマグネットに対向している部分で、動作させたい方向の力が発生する。図 5.27 では上向きの矢印で示している。中央のマグネットに対向している部分では、動作させたい方向と逆向きの力が発生する。フォーカシング方向の加速度感度という観点では、中央の逆向きの力の分だけ不利であるが、BD用として高次共振振幅の低減が必要であるため、この3極磁場構造とした。

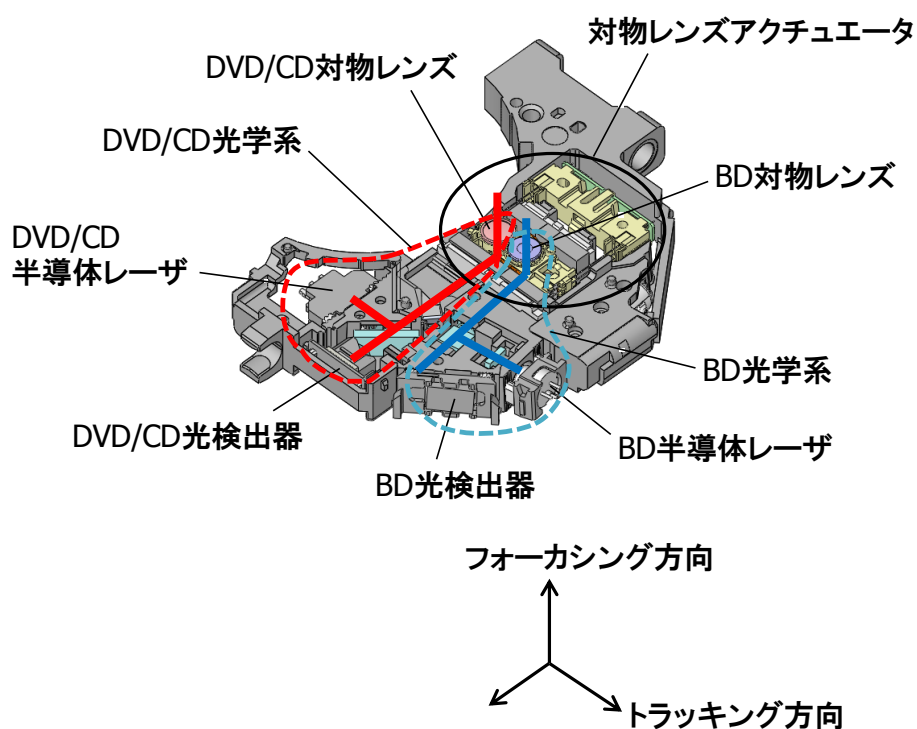


図 5.25 BD用スリム型光ピックアップの構造

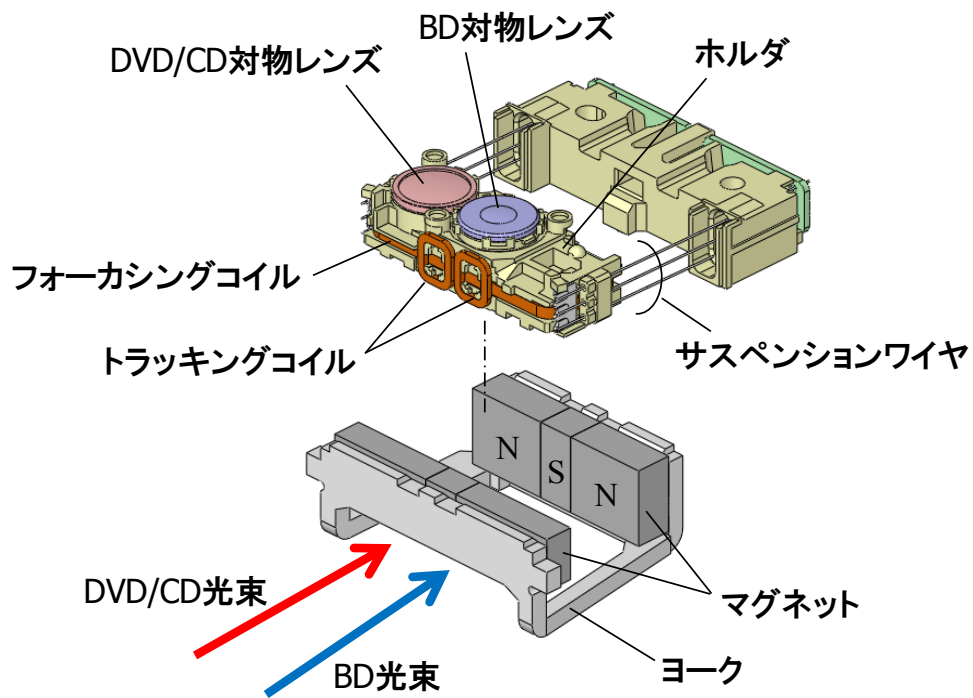


図 5.26 BD用スリム型対物レンズアクチュエータの構造

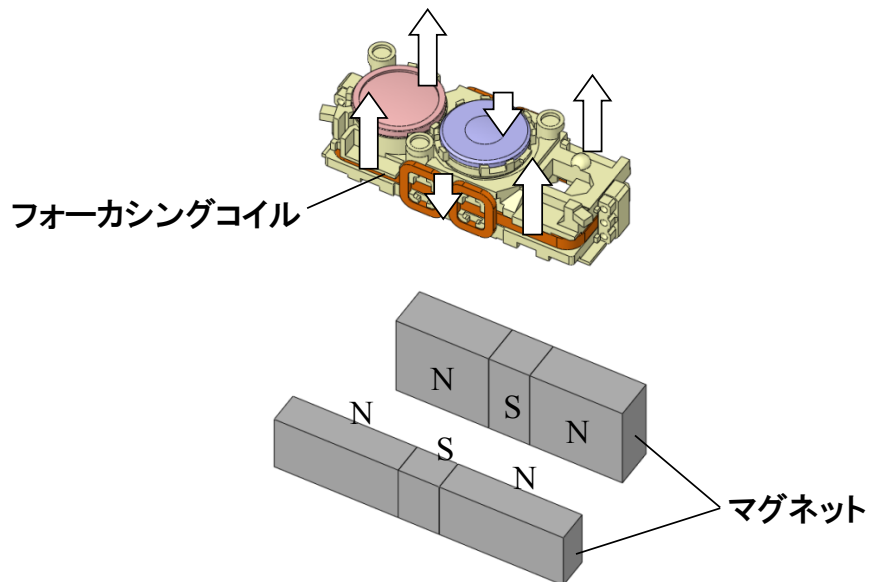


図 5.27 BD用スリム型対物レンズアクチュエータのフォーカシングコイルで発生する駆動力

可動部の1次曲げモードの解析結果を図5.28に示す。固有振動数の解析値は25.5 kHzである。この1次曲げモードに対して、3極磁場構造によって可動部の中央部分でフォーカシング方向の駆動力が、振動モード成分と逆方向に作用する。これにより中央部分での駆動力成分が、両側の駆動力成分と逆向きとなり、駆動力成分の総和をゼロに近づけることができる。この様子を模式的に図5.29に示す。

マグネットの幅によりフォーカシング方向の高次共振振幅を調整し、最終的に実機に適用した構造の外観写真を図5.30に示す。この対物レンズアクチュエータにおけるBD対物レンズの周波数応答特性の測定結果を図5.31に示す。フォーカシング方向の高次共振は24.5 kHz、1 kHz ゲイン差は-52.7 dBであり、高次共振振幅を十分に抑圧できている。BD対物レンズが可動部の中心から若干ずれて配置されるため、1次曲げモードがトラッキング方向の応答にも現れるが、振幅は小さく、1 kHz ゲイン差は-52.8 dBであった。フォーカシング方向、トラッキング方向共に目標値を満たす特性が得られている。

DVD/CD対物レンズの周波数応答特性の測定結果を図5.32に示す。この場合も目標値を満たす良好な特性が得られている。

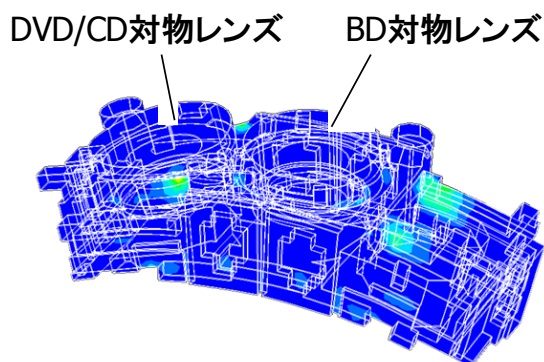


図5.28 BD用スリム型対物レンズアクチュエータにおける1次曲げモードの解析結果(25.5 kHz)

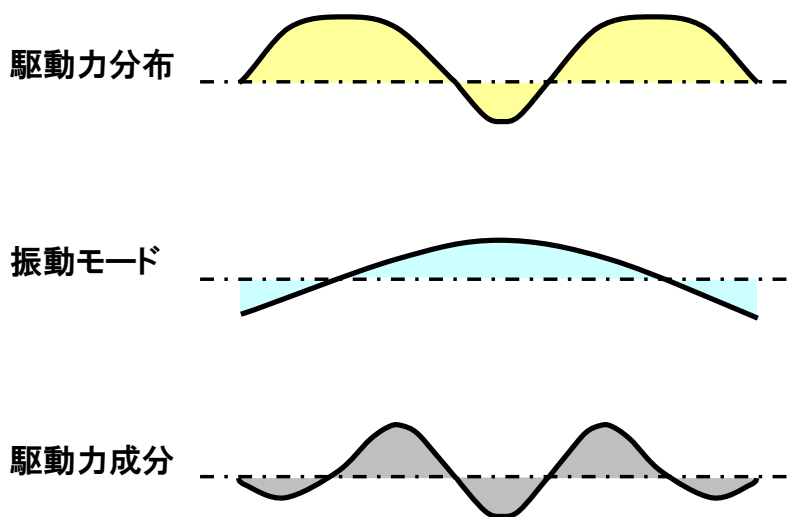


図5.29 3極磁場構造における駆動力分布と振動モードおよび駆動力成分の模式図

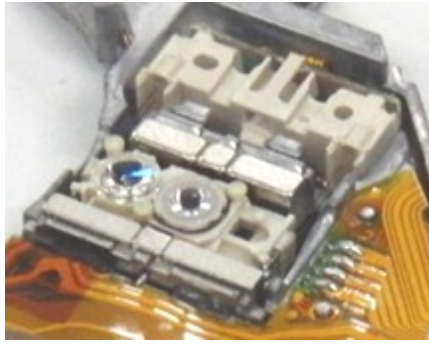
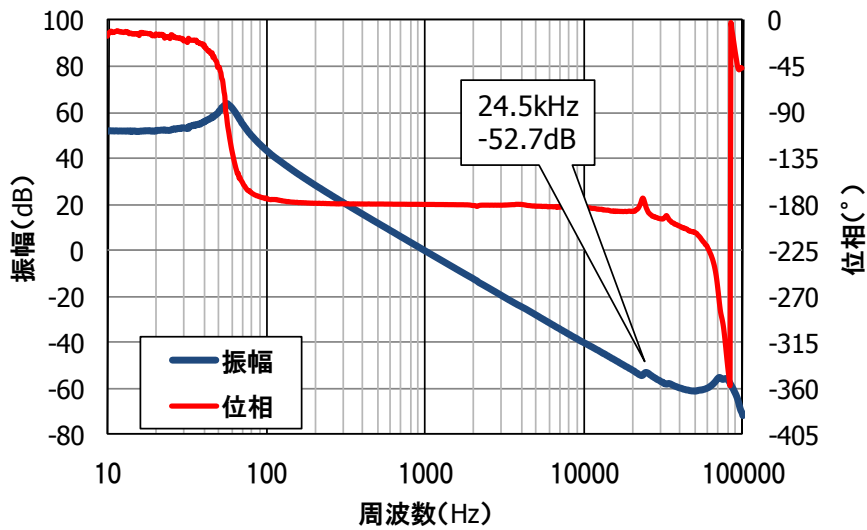
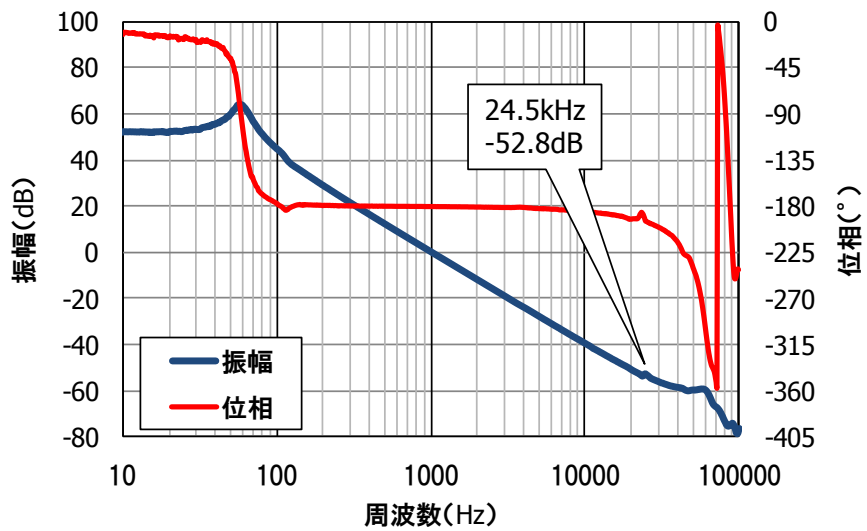


図 5.30 作製した BD 用スリム型対物レンズアクチュエータの外観

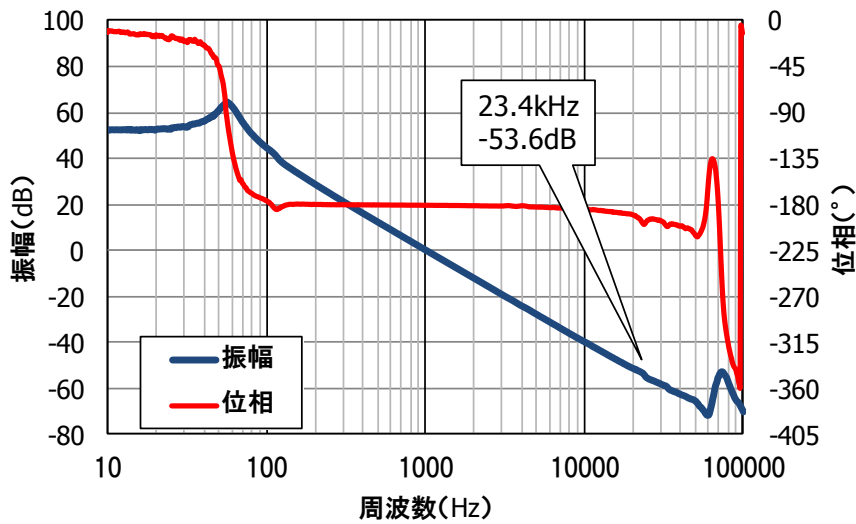


(a) フォーカシング方向

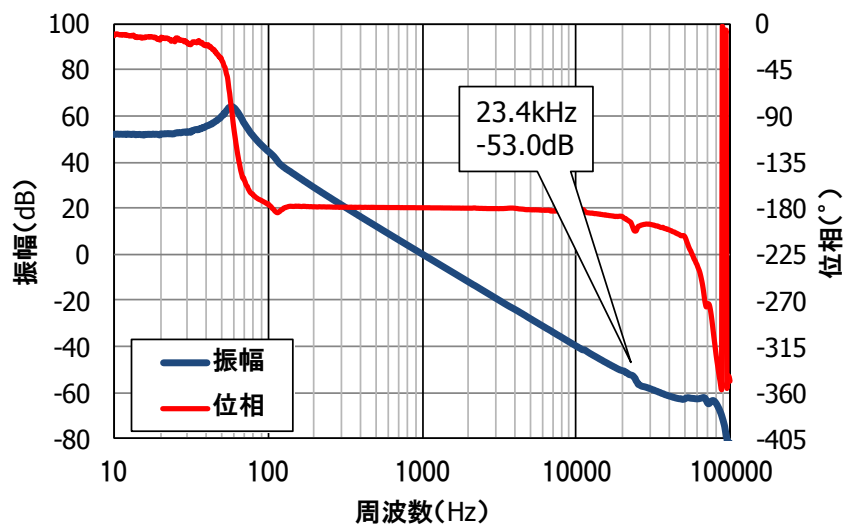


(b) トラッキング方向

図 5.31 BD 用スリム型対物レンズアクチュエータにおける周波数応答特性の測定結果 (BD 対物レンズ)



(a) フォーカシング方向



(b) トラッキング方向

図 5.32 BD 用スリム型対物レンズアクチュエータにおける周波数応答特性の測定結果 (DVD/CD 対物レンズ)

5.4.4 BD 用ハーフハイト型対物レンズアクチュエータ

最後に BD 用ハーフハイト型の対物レンズアクチュエータへの適用結果を示す。高次共振の目標値は BD 用ハーフハイト型で最も高くなり、高次共振周波数 40 kHz 以上、1 kHz ゲイン差 -56 dB 以下が求められる。

BD 用ハーフハイト型の対物レンズアクチュエータの構造[104]を図 5.33 に示す。磁気回路構造は図 3.5 および図 5.2 に示した 4 極マグネット、平面コイル形状と同じである。BD 用スリム型と同様に、BD 対物レンズと DVD/CD 対物レンズをホルダ上面に配置する。対物レンズが 2 個になっている他は、DVD 用ハーフハイト型の対物レンズアクチュエータと同様の構造である。DVD 用ハーフハイト型よりも高次共振周波数を高めるために、小径の対物レンズを用いることと、ホルダの高さ方向の寸法を大きくして 1 次曲げモードの高次共振周波数を高めている。

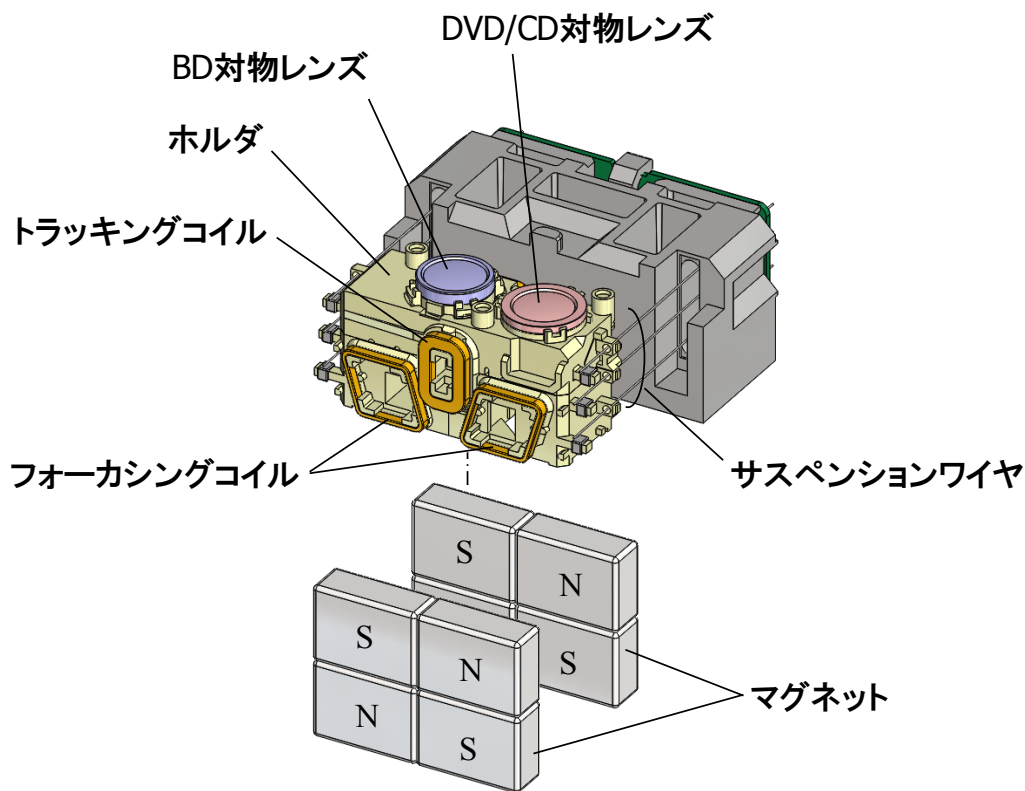


図 5.33 BD 用ハーフハイト型対物レンズアクチュエータの構造

作製した BD 用ハーフハイト型対物レンズアクチュエータの外観写真を図 5.34 に示す。この対物レンズアクチュエータ実機における周波数応答特性の測定結果を図 5.35, 図 5.36 に示す。図 5.35 の BD 対物レンズの周波数応答特性では、フォーカシング方向の高次共振は 39.3 kHz, 1 kHz ゲイン差は-56.2 dB, トラッキング方向の高次共振は 41.2 kHz, 1 kHz ゲイン差は-56.1 dB であった。高次共振周波数の目標値 40 kHz 以上に対して、フォーカシング方向がわずかに届いていないが、振幅は小さく抑えられており、ほぼ目標通りの特性となっている。図 5.36 の DVD/CD 対物レンズの周波数応答特性では、フォーカシング方向の高次共振は 40.8 kHz, 1 kHz ゲイン差は-53.4 dB, トラッキング方向の高次共振は 37.6 kHz, 1 kHz ゲイン差は-51.9 dB であった。BD 対物レンズの応答よりも振幅が大きくなるが、DVD 用としては問題の無い特性である。

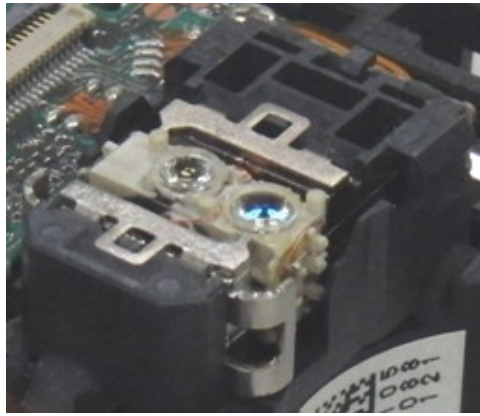
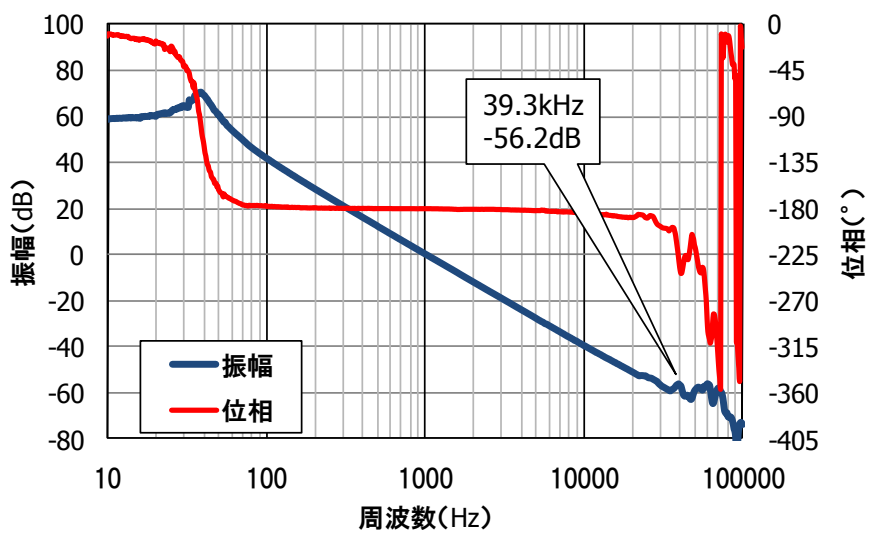
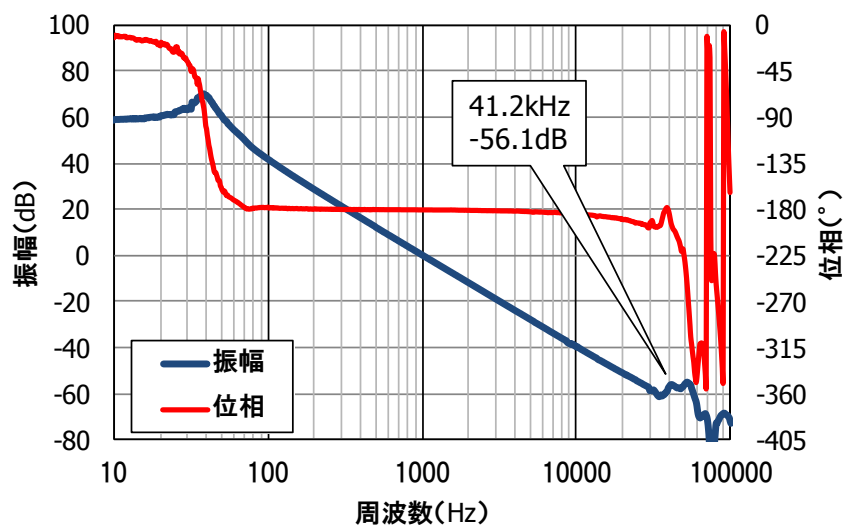


図 5.34 作製した BD 用ハーフハイト型対物レンズアクチュエータの外観

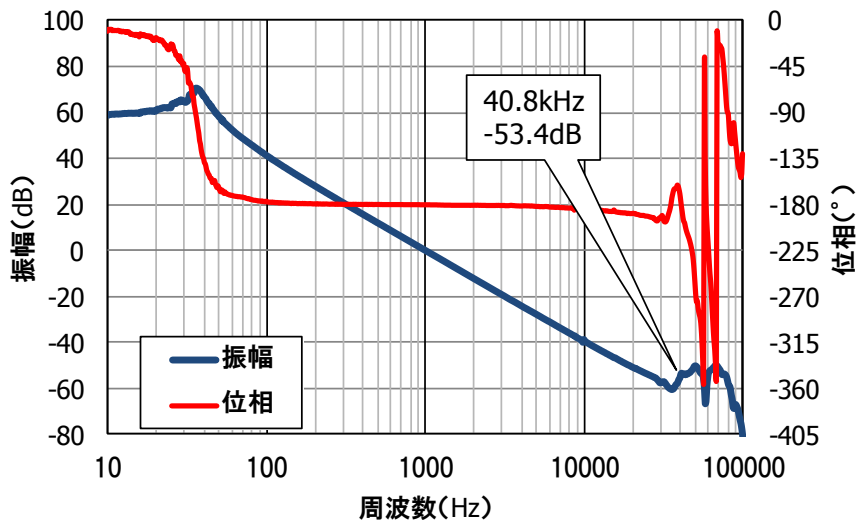


(a) フォーカシング方向

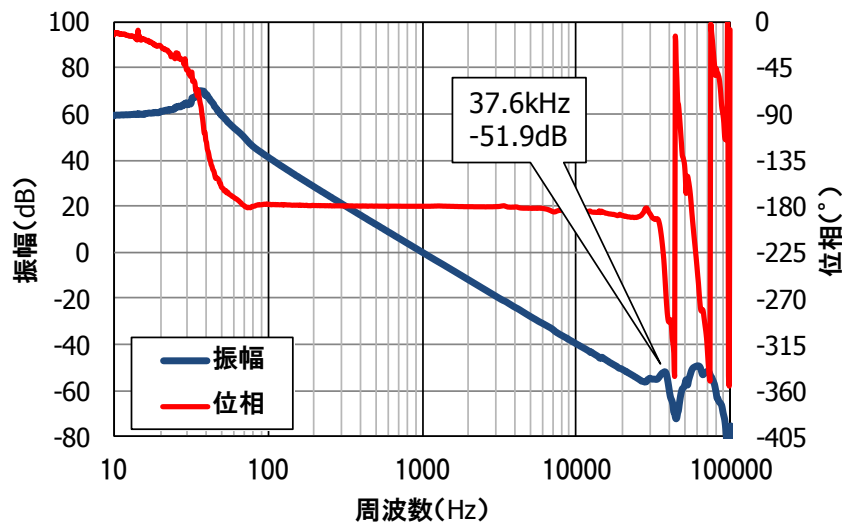


(b) トラッキング方向

図 5.35 BD 用ハーフハイト型対物レンズアクチュエータにおける周波数応答特性の測定結果 (BD 対物レンズ)



(a) フォーカシング方向



(b) トラッキング方向

図 5.36 BD 用ハーフハイト型対物レンズアクチュエータにおける周波数応答特性の測定結果 (DVD/CD 対物レンズ)

以上、高次共振の振動モード成分と駆動力の積で表される駆動力成分のコイル全体での総和を低減することで、高次共振振幅を抑制できることを示した。DVD 用のウルTRASリム型とハーフハイト型、およびBD 用のスリム型とハーフハイト型の対物レンズアクチュエータへの適用結果を示し、高次共振振幅低減の有効性を検証した。これによって、DVD 用ではウルTRASリム型でDVD8 倍速に、ハーフハイト型でDVD24 倍速に、BD 用ではスリム型でBD6 倍速に、ハーフハイト型でBD16 倍速に対応可能な対物レンズアクチュエータの振動特性を実現した。

なお、BD 用ウルTRASリム型の対物レンズアクチュエータは、BD 用スリム型よりもさらに薄型にする必要があり、まだ実用化できていない。BD 用ウルTRASリム型の製品化が残された課題である。

5.5 結言

本章では、対物レンズアクチュエータの周波数応答特性において、10 kHz 以上の周波数帯に現れ、制御系のゲインクロス周波数の制限となる高次共振について、その振幅を低減する方法について検討した。

コイルを駆動点、対物レンズを応答点として、コイルに駆動力が作用したときの対物レンズの変位応答を、振動モードと駆動力分布を用いて表した。これを基に、可動部の剛性によらず、加速度感度との両立が可能な高次共振振幅の抑制手法を提案した。この手法を対物レンズアクチュエータ実機に適用し、有効性を検証した。

得られた結果を以下に示す。

- (1) 着目する振動モードにおける応答点の変位応答は、駆動点の振動モード成分と駆動点の駆動力の積である駆動力成分を、駆動力が作用するコイル全体にわたって加算したものと、応答点の振動モード成分の積により表される。
- (2) 着目する振動モードの節に応答点がある場合は、応答点ではこの振動モードの変位応答は生じない。
- (3) 着目する振動モードの節だけに駆動力が作用する場合は、応答点の振動モード成分によらず、変位応答は生じない。
- (4) 駆動力がある範囲に作用する多点駆動の場合は、駆動力が作用する範囲にわたる駆動力成分の総和がゼロであれば、応答点の振動モード成分によらず、変位応答は生じない。
- (5) 上記の (2) の指針を対物レンズアクチュエータに適用し、応答点である対物レンズをホルダ上面の中央に配置することで、可動部のねじれ振動と回転振動の振幅を抑制できる。また、上記 (4) の指針を適用し、フォーカシング方向の高次共振として現れる可動部の 1 次曲げモードに対して、駆動力成分の総和を低減することで、高次共振振幅を抑制できることを明らかにした。この高次共振振幅抑制手法に基づいて、駆動力成分の総和をゼロに近づけることが可能な駆動コイルとマグネットの配置を創案した。
- (6) 具体例として、DVD 用ウルTRASリム型の対物レンズアクチュエータでは、フォーカシングコイルの内側の空間にインナーマグネットを配置した独自の構造を創出した。実機の測定結果において、フォーカシング方向の高次共振周波数は 13.3 kHz、1 kHz ゲイン差は -43.9 dB であり、DVD 用ウルTRASリム型の目標値である高次共振周波数 11 kHz 以上、1 kHz ゲイン差 -34 dB 以下を満足することを確認した。マグネットの位置ずれが ± 0.1 mm の範囲において、高次共振振幅の増加は 3dB 以下であり、本手法による高次共振振幅抑制は、マグネットの製造ばらつきに対して十分実用性がある。
- (8) DVD 用ハーフハイト型の対物レンズアクチュエータでは、縦横 2 分割の 4 極マグネットと平面コイル形状によって、加速度感度と振動特性の両立を図った。実機の測定結果において、フォーカシング方向の高次共振周波数は 33.9 kHz、1 kHz ゲイン差は -52.0 dB であり、DVD 用ハーフハイト型の目標値である高次共振周波数 28 kHz 以上、1 kHz ゲイン差 -50 dB 以下を満足することを確認した。
- (9) BD 用スリム型の対物レンズアクチュエータでは、ホルダの二つの側面に対向してマグネットを 3 個ずつトラッキング方向に沿って配置し、中央のマグネットの極性を外側の 2 個のマグネットに対して反転させた、これまでに類例のない 3 極磁場構造を考案した。実機の測定結果において、BD 対物レンズのフォーカシング方向の高次共振周波数は 24.5 kHz、1 kHz ゲイ

ン差は-52.7 dB であり、BD 用スリム型の目標値である高次共振周波数 20 kHz 以上、1 kHz ゲイン差-44 dB 以下を満足することを確認した。

- (10) BD 用ハーフハイト型の対物レンズアクチュエータでは、DVD 用ハーフハイト型よりも小径の対物レンズを用いることと、ホルダの高さ寸法を大きくすることで、高次共振周波数を高めた。実機の測定結果において、フォーカシング方向の高次共振周波数は 39.3 kHz、1 kHz ゲイン差は-56.2 dB であり、BD 用ハーフハイト型の目標値である高次共振周波数 40 kHz 以上、1 kHz ゲイン差-56 dB 以下に対して、周波数がわずかに低いものの、ほぼ満足する特性が得られることを確認した。
- (11) 以上によって、DVD 用ではウルTRASリム型で DVD8 倍速に、ハーフハイト型で DVD24 倍速に、BD 用ではスリム型で BD6 倍速に、ハーフハイト型で BD16 倍速の高速化に対応する振動特性を実現可能であることを検証した。

6. 並進動作時の対物レンズ傾きの低減

6.1 緒言

これまで述べてきた通り，光ディスク装置の高速高精度な位置決め制御を実現するために，対物レンズアクチュエータに求められる課題は，加速度感度の向上，主共振特性の設計精度向上，高次共振振幅の低減，対物レンズ傾きの低減である．このうち，加速度感度の向上，主共振特性の設計精度向上，高次共振振幅の低減については，第5章までに記した．第6章では対物レンズ傾きの低減について示す．

対物レンズと光ディスクが相対的に傾くと，光ディスクに集光される光スポットが広がり，記録再生特性が劣化する．対物レンズが傾いたときに光スポットに生じるコマ収差は，対物レンズの開口数である NA の3乗に比例して増加する．光ディスクの高記録密度化のために，対物レンズの NA は，CD の0.45 からDVD では0.6 に，BD では0.85 まで高められている．DVD とBD では光ディスクの光透過層厚を薄くすることで，コマ収差の影響を低減しているが，それでも，第2章の図2.12 に示したようにDVD とBD では，対物レンズ傾きの増加に伴う再生信号ジッタの増加は顕著である．したがって，対物レンズアクチュエータがフォーカシング方向およびトラッキング方向に並進動作した時の対物レンズ傾きを抑える必要がある．

対物レンズ傾きは，サスペンションワイヤの軸回りのローリングモードであり，静的傾きと動的傾きに分けられる．一般にローリング共振周波数は100～200 Hz に生じることが多く，光ディスクの回転周波数と近いため，ローリング共振時の動的傾きには特に注意が必要である．ローリング共振時の動的傾きは，減衰比にもよるが，静的傾きの10倍程度に増加する[37][81]．従来はローリング共振周波数を光ディスク回転周波数よりも高域に設定することで，ローリング共振時の動的傾きの影響を回避していた．しかし，ローリング共振周波数を高めるためにはサスペンションワイヤの剛性を高める必要があり，静的な駆動感度の確保が困難であった．

本章では，対物レンズアクチュエータ可動部がフォーカシング方向およびトラッキング方向に動作したときに付随的に生じる対物レンズ傾きを，コイルに作用する磁束密度分布から考察する．磁束密度分布の解析結果を基に，コイルに作用する磁束密度分布の設定により，可動部を回転させようとするローリングモーメントを低減可能な構造を提案する．そして，提案構造を適用した対物レンズアクチュエータにおいて，静的傾きと動的傾きの低減効果を示す．

6.2 コイルで発生するローリングモーメント

6.2.1 対物レンズ傾きの定式化

本章ではDVD用スリム型の対物レンズアクチュエータを例として説明する．ローリングモーメント低減構造を適用した対物レンズアクチュエータの構造[80]を図6.1に示す．基本的な構成は，図2.1，図5.13等で示したDVD用ウルTRASリム型の対物レンズアクチュエータと同じである．ローリングモーメント低減に関わる点は，トラッキングコイルのクロス配置と，フォーカシングコイル内側へのインナーマグネット配置である．トラッキングコイルのクロス配置は，トラッキングコイルで発生するローリングモーメントを低減する構造であり，インナーマグネット配置はフォーカシングコイルで発生するローリングモーメントを低減する構造である．それぞれの詳細は6.3節で記す．

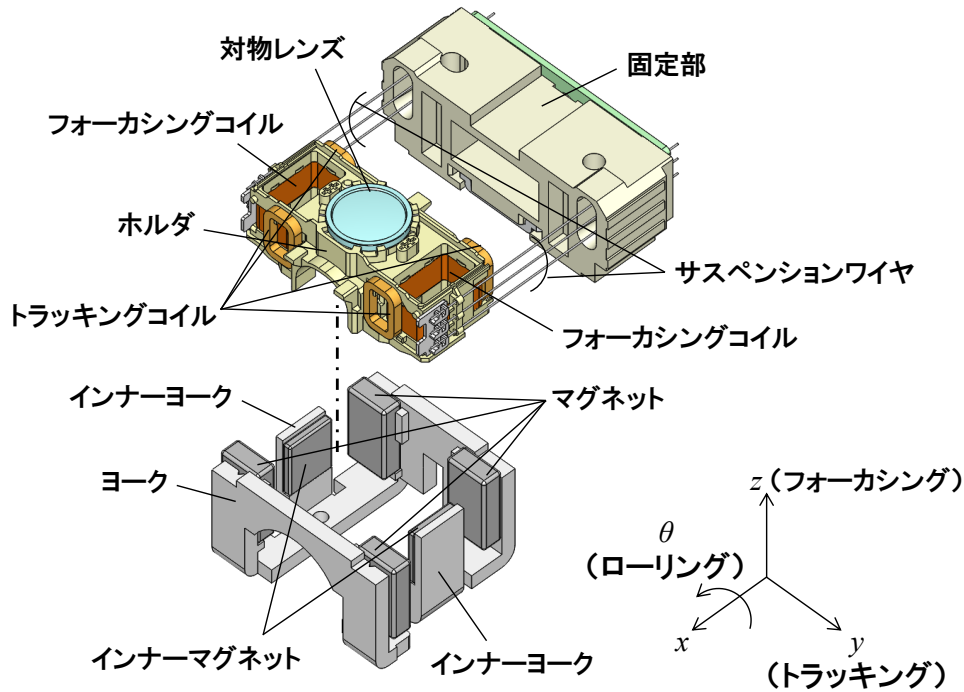


図 6.1 DVD 用スリム型対物レンズアクチュエータの構造

ローリング方向への対物レンズ傾きは、サスペンションワイヤの軸回りの回転動作である。図 6.2 に示すように、可動部にローリングモーメント M が作用すると、可動部の傾き、すなわち対物レンズ傾きが生じる。対物レンズの静的傾きはサスペンションワイヤの支持中心回りのローリングモーメントによって生じ、動的傾きは可動部の重心回りのローリングモーメントによって生じる。サスペンションワイヤの固定位置から支持中心までの距離を L_w 、サスペンションワイヤ 1 本当たりのばね定数を k_{w1} 、サスペンションワイヤの本数を n とすると、対物レンズの静的傾き θ_s は、

$$\theta_s = \frac{M}{nk_{w1}L_w^2} \quad (6.1)$$

と表される。式 (6.1) において分母は回転のばね剛性を示す。

動的傾きをローリング方向への 1 自由度の振動系の応答とみなせば、周波数を f 、ローリングモードの固有振動数を f_r 、減衰比を ζ とすると、動的傾きの振幅 Θ_D は、

$$\Theta_D = \frac{M}{nk_{w1}L_w^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{f^2}{f_r^2}\right)^2 + \left(2\zeta \frac{f}{f_r}\right)^2}} \quad (6.2)$$

と表される。

静的傾きおよび動的傾きを抑えるためには、回転のばね剛性は大きいほうが良い。しかし、式(6.1)は 3 軸アクチュエータとしてのチルト駆動時にも適用されるので、回転のばね剛性を大きくすることはチルト駆動感度の低下につながる。したがって、対物レンズ傾きを抑えるためには、ローリングモーメントを低減することが必要である。

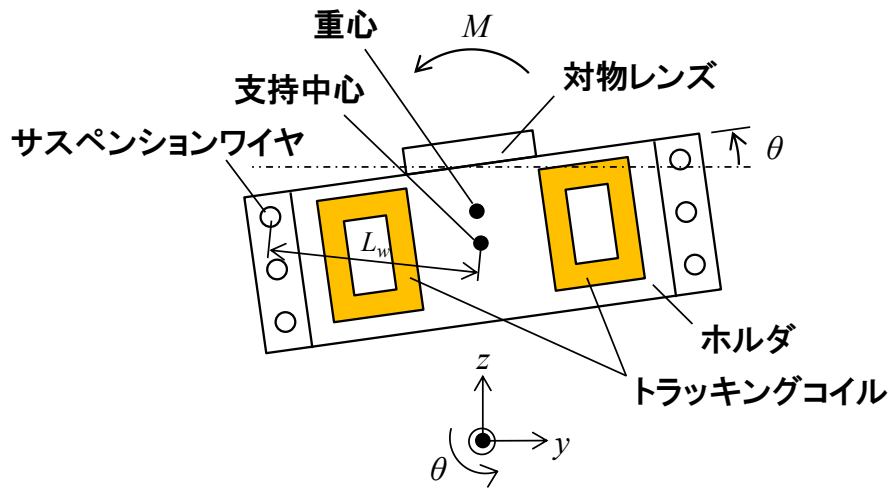


図 6.2 ローリングモーメントによる対物レンズ傾きの説明図

6.2.2 磁束密度分布とローリングモーメント

コイルに作用する磁束密度分布によってコイルで発生する駆動力とローリングモーメントの関係を考察する。フォーカシングコイルを例として、図 6.3 に示すような y 方向に平行なコイル線分を考える。コイル線分が $y = -b$ から $y = b$ に位置し、このコイル線分に作用する x 方向の磁束密度を $B_x(y)$ とする。このコイル線分で発生する駆動力 F と、コイル線分の中心 O に対するローリングモーメント M は、コイル線分に流れる電流を I として、

$$F = I \int_{-b}^b B_x(y) dy \quad (6.3)$$

$$M = I \int_{-b}^b B_x(y) y dy \quad (6.4)$$

と表される。

コイル線分が y 方向に変位した場合を図 6.4 に示す。コイル線分の y 方向への変位量を t とすると、コイル線分で発生する駆動力 $F(t)$ と、コイル線分の中心 O に対するローリングモーメント $M(t)$ は、

$$F(t) = I \int_{-b+t}^{b+t} B_x(y) dy \quad (6.5)$$

$$M(t) = I \int_{-b+t}^{b+t} B_x(y) (y-t) dy \quad (6.6)$$

と表される。

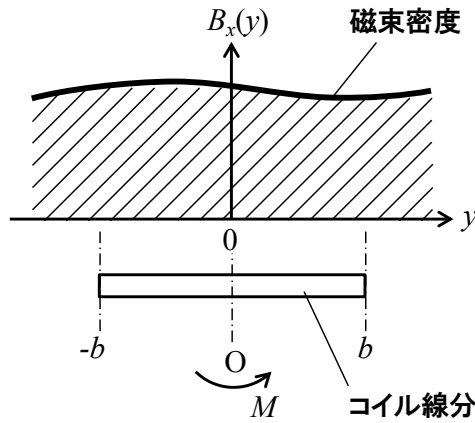


図 6.3 磁束密度が作用するコイル線分のモデル

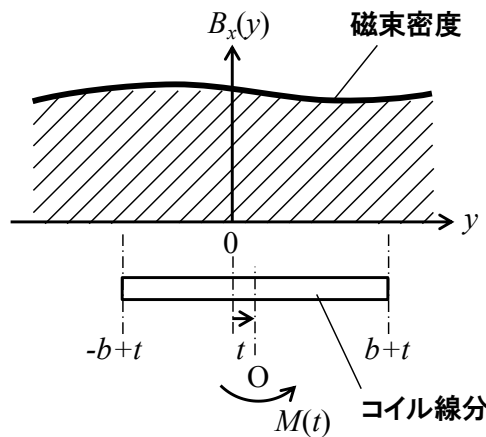


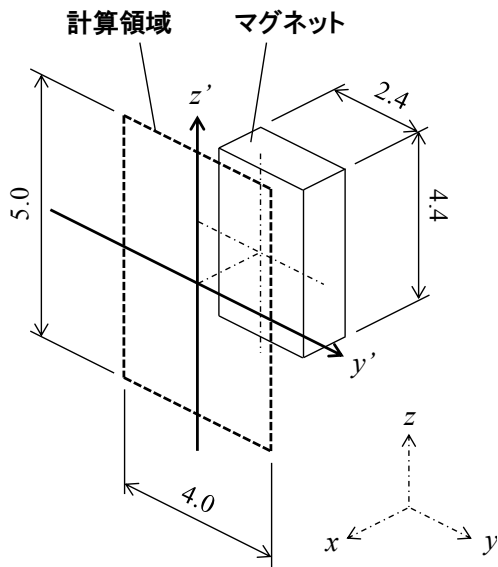
図 6.4 コイル線分が変位した状態を示すモデル

コイルに作用する磁束密度分布を求めるために、図 6.1 の対物レンズアクチュエータにおいて、マグネット表面近傍の磁束密度を計算した結果を図 6.5 に示す。

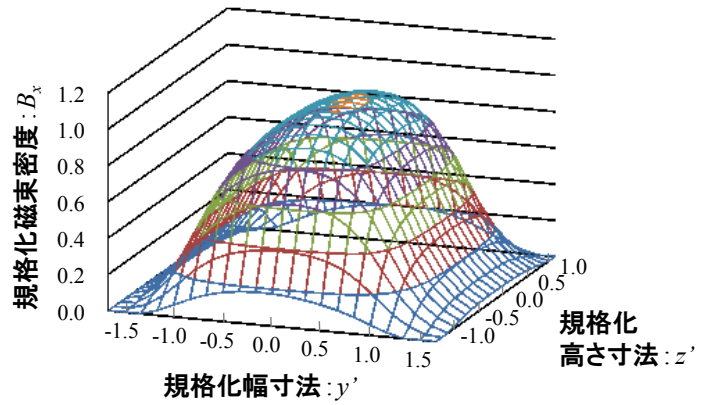
図 6.5 (a) はマグネットの寸法と磁束密度の計算領域を示している。マグネットの寸法は、幅 (y 方向) 2.4 mm、高さ (z 方向) 4.4 mm、厚み (x 方向) 1.2 mm であり、磁束密度の計算領域は、マグネット表面から 0.5 mm 離れた位置で、幅方向 4.0 mm、高さ方向 5.0 mm とした。マグネットの中心位置を $y' = 0$ 、 $z' = 0$ とし、マグネットの幅と高さの 1/2 の寸法 (それぞれ 1.2 mm, 2.2 mm) を 1 として規格化する。

図 6.5 (b) は $y'z'$ 面における x 方向の磁束密度 B_x の 3 次元表示、図 6.5 (c) はマグネットの高さ方向の中心 ($z' = 0$) での幅 (y') 方向に対する磁束密度 $B_x(y')$ 、図 6.5 (d) はマグネットの幅方向の中心 ($y' = 0$) での高さ (z') 方向に対する磁束密度 $B_x(z')$ である。磁束密度 B_x は、マグネットの中心位置 ($y' = 0$ 、 $z' = 0$) での値を 1 として規格化している。

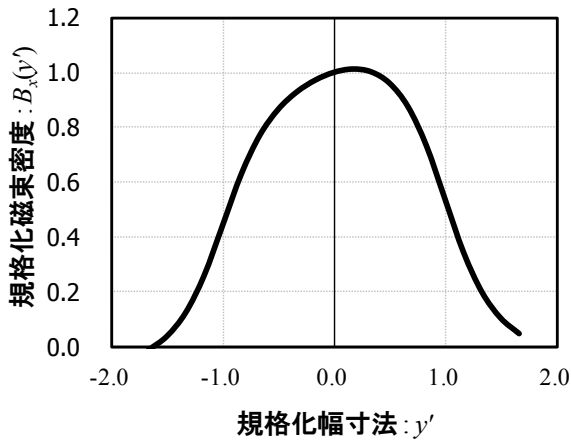
図 6.5 から、磁束密度 B_x が均一な領域はマグネットの中央付近に限られ、マグネットの外形端部では中央の約 1/2 に低下することがわかる。



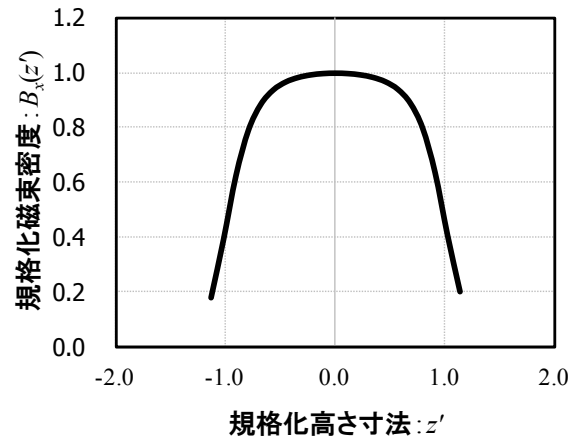
(a) 磁束密度計算領域



(b) 磁束密度の3次元表示



(c) y' 方向



(d) z' 方向

図 6.5 マグネット表面近傍の磁束密度分布の計算結果

図 6.5 の磁束密度分布は台形状に近い。そこで、コイルに作用する磁束密度分布を図 6.6 (i) に示す台形状として、式 (6.5), (6.6) により、コイル線分の変位量 t に対するコイル線分で発生する駆動力 $F(t)$ とローリングモーメント $M(t)$ を計算した結果を同じく図 6.6 に示す。ここで、 a と c は図中に示す y 座標の値、 d は $y=0$ での磁束密度 $B_x(0)$ である。また、コイル線分の両端は磁束密度分布の台形の傾斜部に位置する ($a < b < c$ かつ $-c < -b+t < -a$ かつ $a < b+t < c$) 場合を考える。

(i) の場合は、コイル線分で発生する駆動力 $F(t)$ の合力が、コイル線分の中心 O から y 座標において負側に集中して作用することと等価であり、 $t > 0$ の変位に対してローリングモーメント $M(t)$ の符号は負である。

次に、コイル線分の中央では磁束密度 B_x が作用せず、コイル線分の両端部から外側に向けて磁束密度 B_x が線形的に増加する (ii) の磁束密度分布を考える。この場合は、コイル線分で発生す

る駆動力 $F(t)$ が，コイル線分の中心 O から y 座標において正側に集中して作用することと等価であり， $t > 0$ の変位に対してローリングモーメント $M(t)$ の符号は正で，その大きさは (i) と等しい。

この結果から，(i) のコイル線分の中心に向かって磁束密度が大きくなる配置と，(ii) のコイル線分の外側に向かって磁束密度が大きくなる配置を組み合わせることで，ローリングモーメント $M(t)$ を低減できることがわかる。

なお，(i) と (ii) の磁束密度分布を足し合わせると，コイル線分に対して平坦な磁束密度分布が作用することと等価になる。これは，コイルに対してマグネットを十分に大きくすれば，ローリングモーメントを低減できることを意味する。しかし，実際の装置では寸法が限られているため，ローリングモーメントが問題とならない程度までマグネットを大きくすることは困難である。そこで，対物レンズアクチュエータの大きさを従来と大きく変えずに，マグネットとコイルの構成によってローリングモーメントを低減することが重要となる。

	磁束密度分布 $B_x(y)$	駆動力 $F(t)$	ローリングモーメント $M(t)$
(i)		$F(t) = I \frac{d}{c-a} (-a^2 - b^2 + 2bc - t^2)$	$M(t) = i \frac{d}{c-a} \left(a^2 - b^2 + \frac{t^2}{3} \right) t$
(ii)		$F(t) = I \frac{d}{c-a} (a^2 + b^2 - 2ab + t^2)$	$M(t) = -i \frac{d}{c-a} \left(a^2 - b^2 + \frac{t^2}{3} \right) t$

図 6.6 磁束密度分布形状による駆動力とローリングモーメントの計算結果

6.3 マグネットとコイルの配置によるローリングモーメント低減構造

6.3.1 従来構造

ローリングモーメント低減構造を適用する以前に、一般的に用いられていた対物レンズアクチュエータ構造を図 6.7, 6.8 に示す. 図 6.7 は対物レンズアクチュエータの斜視図で, 図 6.8 はコイルとマグネットの配置を示す上面図である. 従来構造では, トラッキングコイルはホルダの対角 4 箇所に, 対物レンズを中心として対称に配置される. それぞれのトラッキングコイルに対向してマグネットが, y 方向において対物レンズ中心に近い内寄りに配置される. また, フォーカシングコイルの内側の空間には, インナーマグネットは無く, インナーヨークだけが配置される.

この従来構造に対して, ローリングモーメントを低減するために, 前節の指針に基づいて考案した, トラッキングコイルのクロス配置と, インナーマグネット配置について以下に示す.

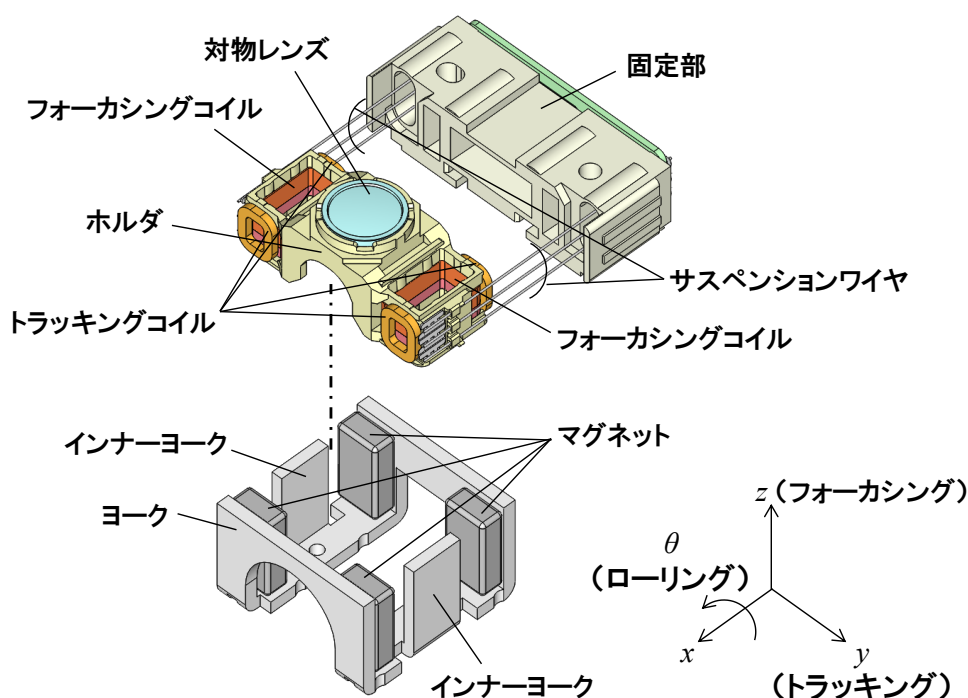


図 6.7 従来の対物レンズアクチュエータ構造

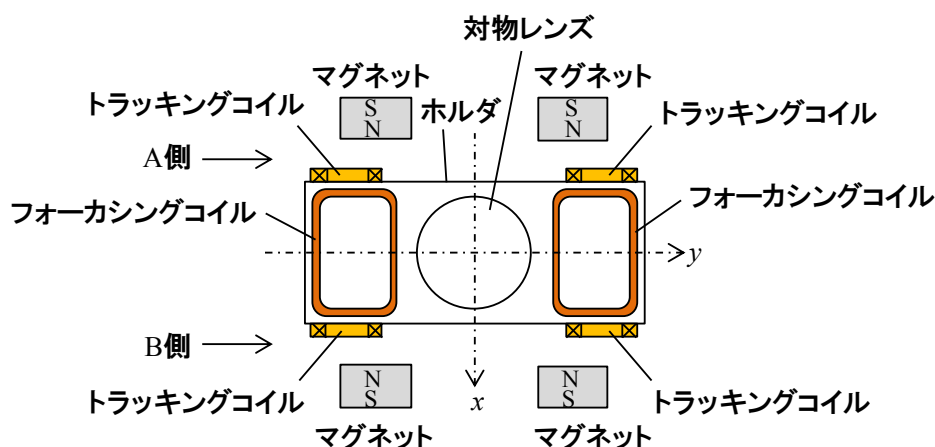


図 6.8 従来構造におけるコイルとマグネットの配置

6.3.2 トラッキングコイルのクロス配置

考案したローリングモーメント低減構造におけるコイルとマグネットの配置の上面図を図 6.9 に示す。トラッキングコイルのクロス配置は、ホルダの一方の側面 (A 側) では従来構造と同様にトラッキングコイルとマグネットを配置し、ホルダのもう一方の側面 (B 側) では従来構造と逆に、トラッキングコイルを対物レンズ中心に近い内寄りに、マグネットをトラッキングコイルに対して外寄りに配置する。なお、図 6.9 には次項で説明するインナーマグネットも図示している。

図 6.9 の新構造は、従来とほぼ同じ大きさとすることができる。また、駆動力に関しては、トラッキングコイルは A 側と B 側で駆動力を発生する箇所が異なっているだけなので、従来と同等の駆動力が得られ、フォーカシングコイルにはインナーマグネットからの磁束密度も作用するので、フォーカシングコイルでは従来よりも大きな駆動力が得られる効果もある。

従来構造とローリングモーメント低減構造における磁束の流れの解析結果を図 6.10, 6.11 に示す。赤色の矢印はコイル付近の磁束密度ベクトルを、青色の矢印はマグネット内部の磁束密度ベクトルを示している。両構造における、マグネット表面近傍の磁束密度分布を模式的に図 6.12, 6.13 に示す。図 6.13 には、インナーマグネットにより y 方向に作用する磁束密度 B_y も示す。

図 6.10, 6.12 の従来構造では、4 箇所のトラッキングコイルに作用する磁束密度 B_x は、いずれもトラッキングコイルの対物レンズ中心に近い側で絶対値が大きくなる。これに対して図 6.11, 6.13 のトラッキングコイルのクロス配置は、ホルダの一方の側面 (A 側) でトラッキングコイルの対物レンズ中心に近い側で磁束密度 B_x の絶対値が大きくなる配置と、ホルダのもう一方の側面 (B 側) でトラッキングコイルの対物レンズ中心から遠い側で磁束密度 B_x の絶対値が大きくなる配置を組み合わせたものである。

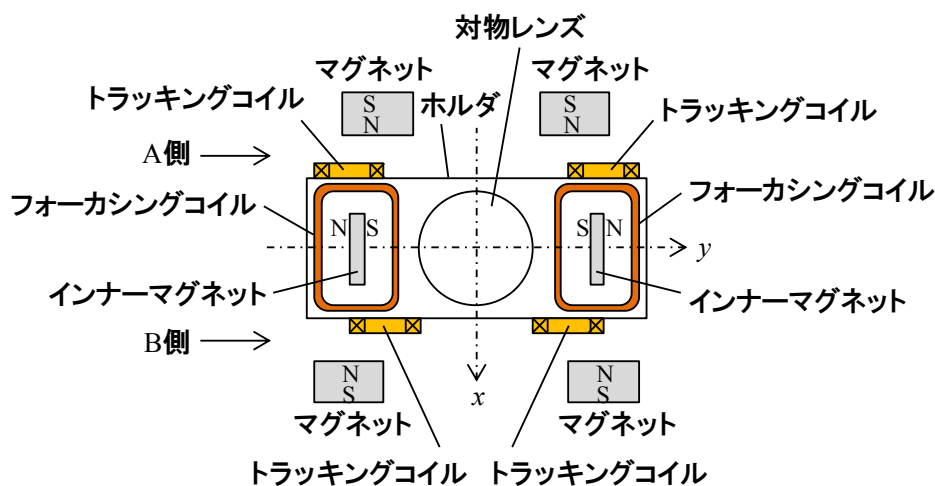


図 6.9 考案したローリングモーメント低減構造におけるコイルとマグネットの配置

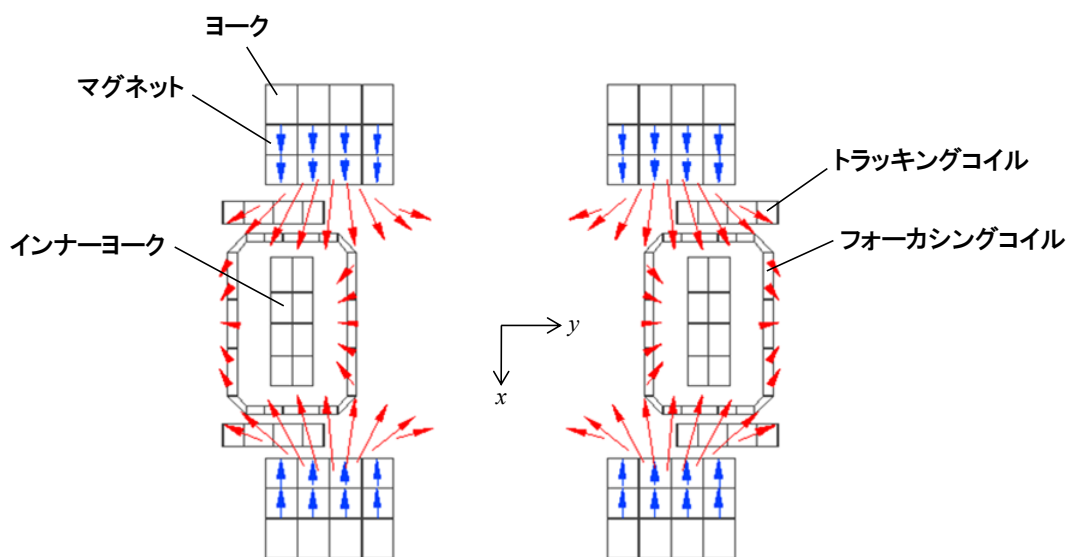


図 6.10 従来構造における磁場解析結果

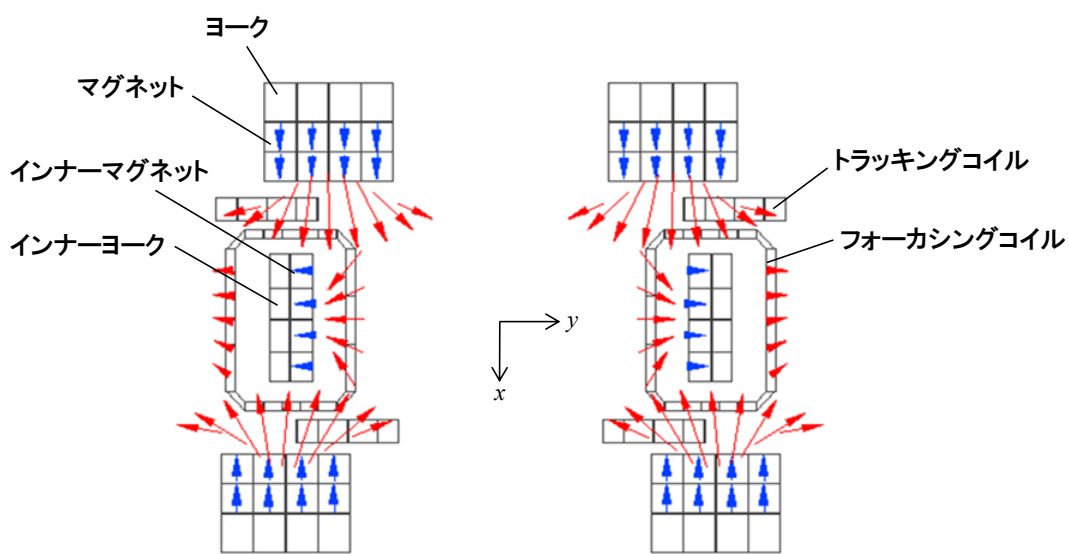


図 6.11 考案したローリングモーメント低減構造における磁場解析結果

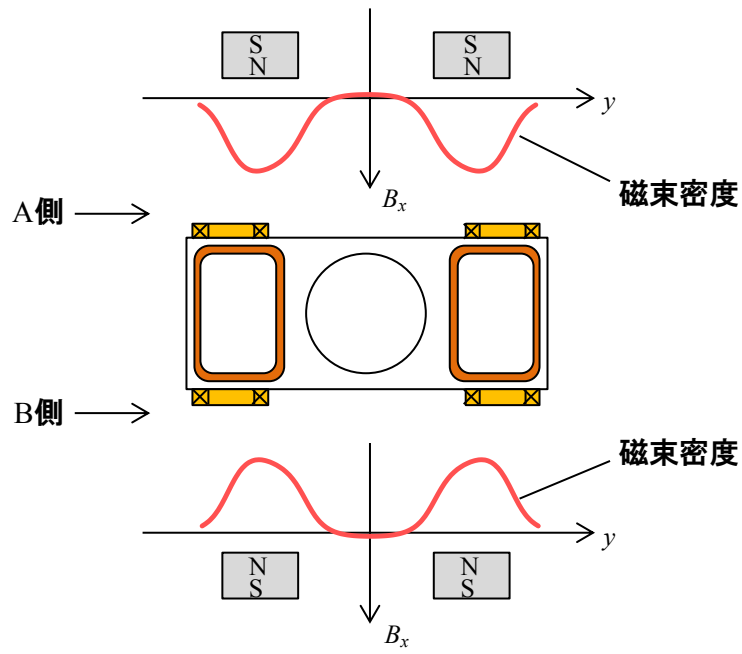


図 6.12 従来構造における磁束密度分布の模式図

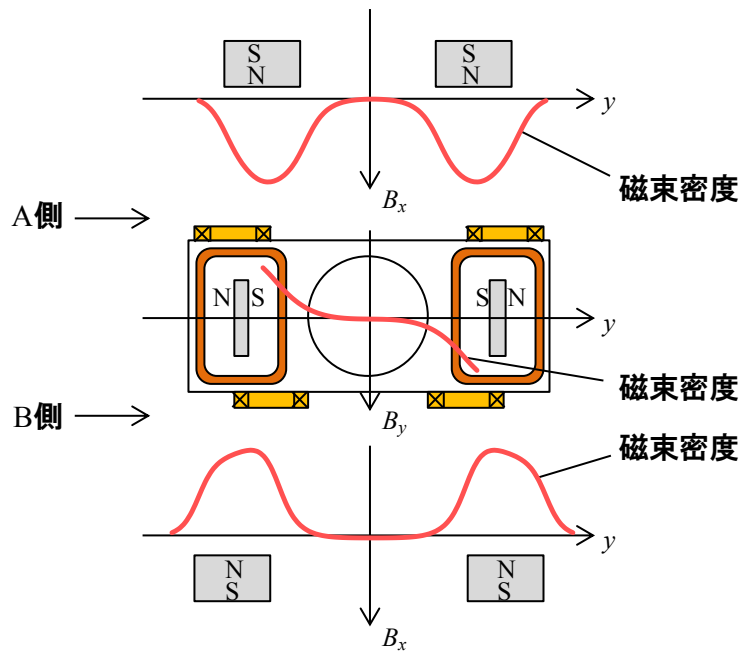


図 6.13 考案したローリングモーメント低減構造における磁束密度分布の模式図

それぞれの構造において、可動部がフォーカシング方向に Δz 変位した状態で、トラッキング方向の正側に動作する場合の、トラッキングコイルで発生する駆動力とローリングモーメントの様子を図 6.14, 6.15 に示す。トラッキングコイルとマグネットの位置関係をわかりやすくするために yz 面を平面的に示した図を図 6.16, 6.17 に示す。

図 6.5 (d) のマグネット表面近傍の磁束密度分布の計算結果に示したように、マグネットの上端部と下端部に対向する領域では磁束密度 B_x が低下する。このため、可動部がフォーカシング方向の正側に変位すると、トラッキングコイルの上部に作用する磁束密度 B_x は低下し、トラッキングコイルの下部に作用する磁束密度 B_x は増加する。したがって、トラッキングコイルの下部で発生する力が上部で発生する力よりも大きくなり、この力の大きさの差によってローリングモーメントが作用する。

図 6.14, 6.16 の従来構造では、ホルダの二つの側面 (A 側と B 側) で、トラッキングコイルで発生するローリングモーメントが同じ向きに作用する。これに対して図 6.15, 6.17 のトラッキングコイルのクロス配置では、マグネットに対して対物レンズ中心に近い内寄りに配置した側面 (B 側) において、トラッキングコイルに通電する電流の向きの反転によって、トラッキングコイルの上下のコイル部で発生する力が従来構造と逆向きになり、B 側で生じるローリングモーメントが A 側と逆方向に作用する。したがって、トラッキングコイルのクロス配置とすることで、トラッキングコイル全体としてローリングモーメントの低減が可能となる。

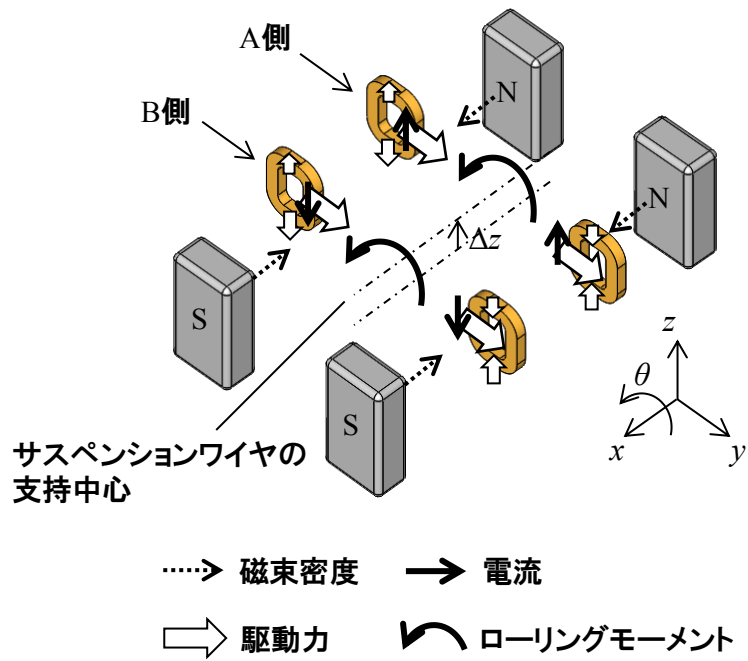


図 6.14 従来構造におけるトラッキングコイルで発生する駆動力とローリングモーメント

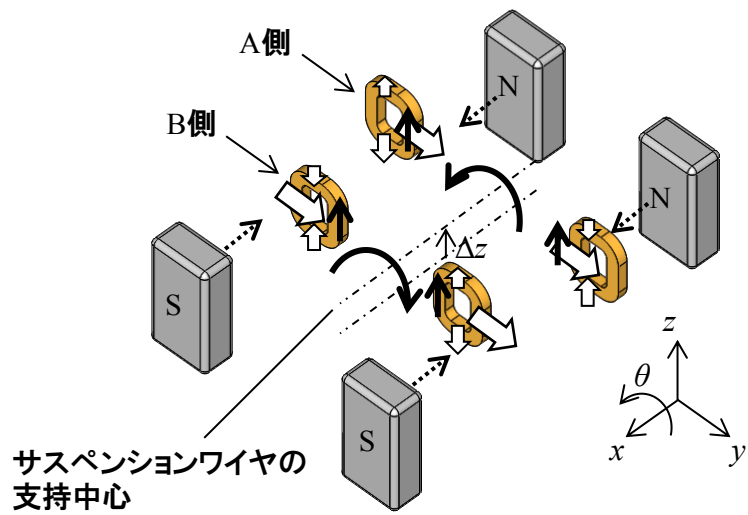


図 6.15 考案したトラッキングコイルのクロス配置におけるトラッキングコイルで発生する駆動力とローリングモーメント

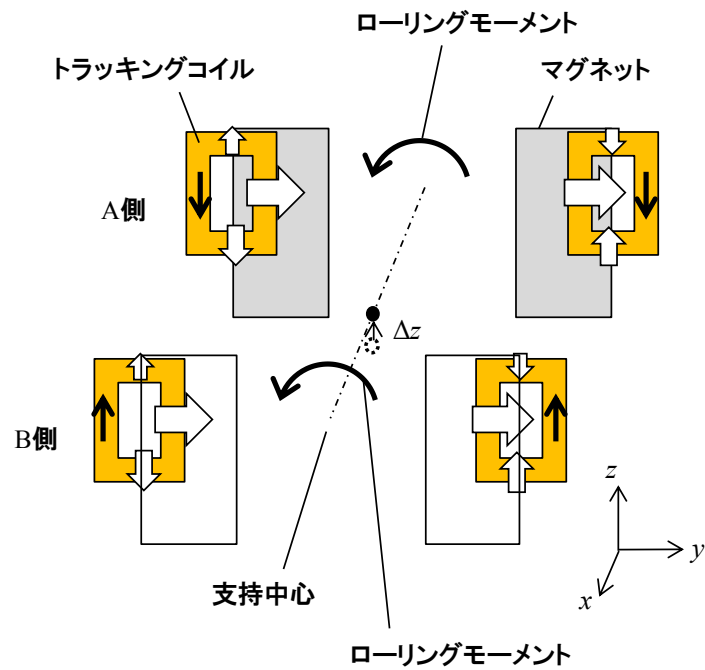


図 6.16 従来構造におけるトラッキングコイルで発生する駆動力とローリングモーメントを平面的に示した図

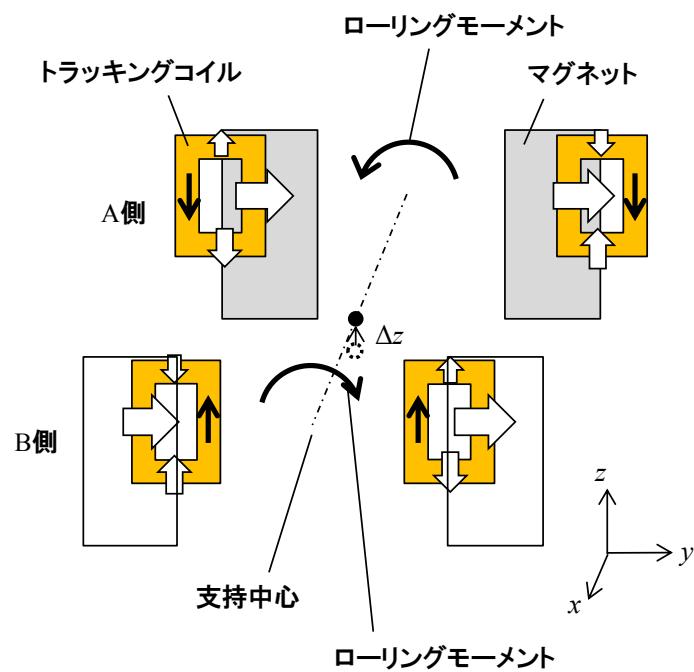


図 6.17 考案したトラッキングコイルのクロス配置におけるトラッキングコイルで発生する駆動力とローリングモーメントを平面的に示した図

トラッキングコイルのクロス配置において、図 6.18 に示すように、トラッキングコイルとマグネットが対向して重なる部分の長さを s として、 s を変化させたときのトラッキングコイルで発生するローリングモーメントと、従来構造におけるローリングモーメントの計算結果を図 6.19 に示す。インナーマグネットの幅 $w_{IM} = 2.6 \text{ mm}$ 、 $s = 0.4, 0.6, 0.8 \text{ mm}$ とした。横軸はフォーカシング方向の変位量、縦軸はトラッキング方向の単位駆動力当たりのローリングモーメント M_{OTR} である。 M_{OTR} の単位はモーメントを力で割ったものとなり、長さに相当する。

この結果から、 s が大きくなるにしたがって従来構造のローリングモーメントを打ち消す作用が増加していき、この場合は $s = 0.6 \text{ mm}$ 付近でローリングモーメントをほぼゼロにできることがわかる。すなわち、トラッキングコイルとマグネットが対向する長さ s の設定によって、トラッキングコイルで発生するローリングモーメントを抑制可能である。

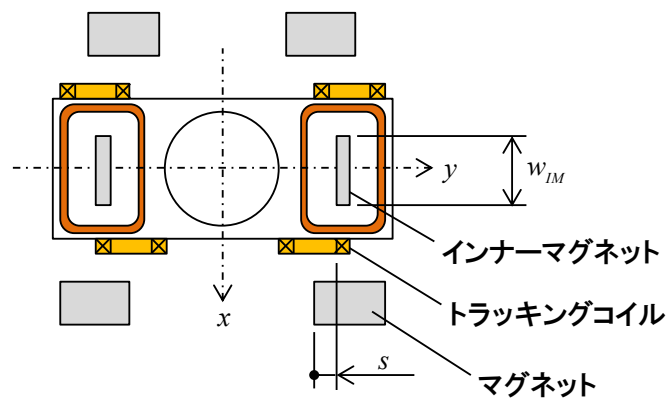


図 6.18 トラッキングコイルのクロス配置におけるトラッキングコイルとマグネットの重なる部分の長さ

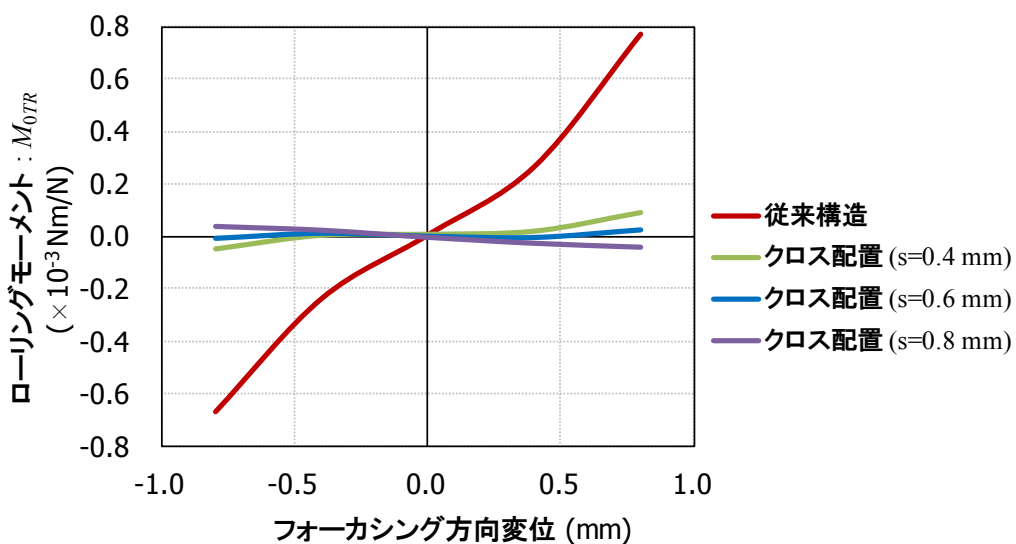


図 6.19 トラッキング方向の単位駆動力当たりのローリングモーメントの計算結果

6.3.3 インナーマグネット配置

インナーマグネット配置は、図 6.1, 6.9 に示したように、フォーカシングコイルの内側の空間に、磁束密度をトラッキング (y) 方向に作用させるインナーマグネットを配置したものである。このインナーマグネットにより、図 6.11, 6.13 に示したように、フォーカシングコイルの対物レンズ中心に近い側のコイル部に y 方向の磁束密度 B_y が作用し、マグネットに対向する 2 辺と合わせて 3 辺でフォーカシング方向の駆動力が発生する。

インナーヨークから漏れ出た磁束密度がフォーカシングコイルの外側の辺に作用することで、フォーカシング方向の負の駆動力が生じるが、フォーカシングコイルの内側の辺で生じる駆動力の方が大きいため、全体としてフォーカシング方向の駆動力は増加する。

従来構造とインナーマグネット配置において、可動部がトラッキング方向に Δy 変位した状態で、フォーカシング方向の正側に動作する場合の、フォーカシングコイルで発生する駆動力とローリングモーメントの様子を図 6.20, 6.21 に示す。フォーカシングコイルとマグネットの位置関係をわかりやすくするために x 方向から見た図を図 6.22, 6.23 に示す。図 6.23 ではインナーマグネット位置での断面を示す。

図 6.20, 6.22 の従来構造では、二つのフォーカシングコイルのうち一方 (図中、右側) はマグネットから遠ざかり、もう一方 (図中、左側) はマグネットの中心に近づく。マグネットに対向するコイル部で生じるフォーカシング方向の駆動力は、マグネットから遠ざかるコイル部では減少し、マグネットの中心に近づくコイル部では増加する。この駆動力の大きさの差によってローリングモーメントが作用する。

これに対して図 6.21, 6.23 のインナーマグネット配置では、図中、右側のフォーカシングコイルの内側のコイル部はインナーマグネットに近付き、図中、左側のフォーカシングコイルの内側のコイル部はインナーマグネットから離れる。図 6.13 に示すように、インナーマグネットによる y 方向の磁束密度 B_y の絶対値がインナーマグネットに近いほど大きくなるので、インナーマグネットに対向するコイル部で生じる駆動力は、インナーマグネットに近づく方では増加し、インナーマグネットから離れる方では減少する。このインナーマグネットに対向するコイル部で生じる駆動力の差によってローリングモーメントが作用する。インナーマグネットに対向するコイル部で生じるローリングモーメントは、マグネットに対向するコイル部で生じるローリングモーメントと逆向きに作用する。したがって、インナーマグネット配置とすることで、フォーカシングコイル全体としてローリングモーメントの低減が可能となる。

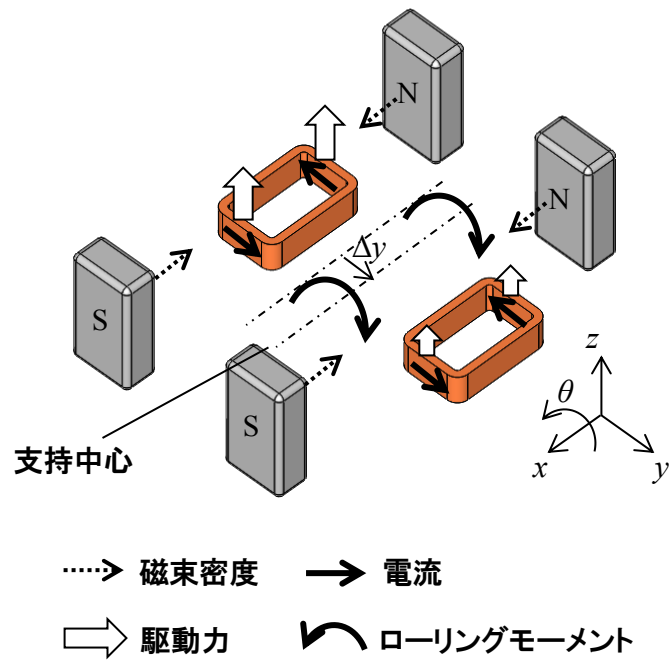


図 6.20 従来構造におけるフォーカシングコイルで発生する駆動力とローリングモーメント

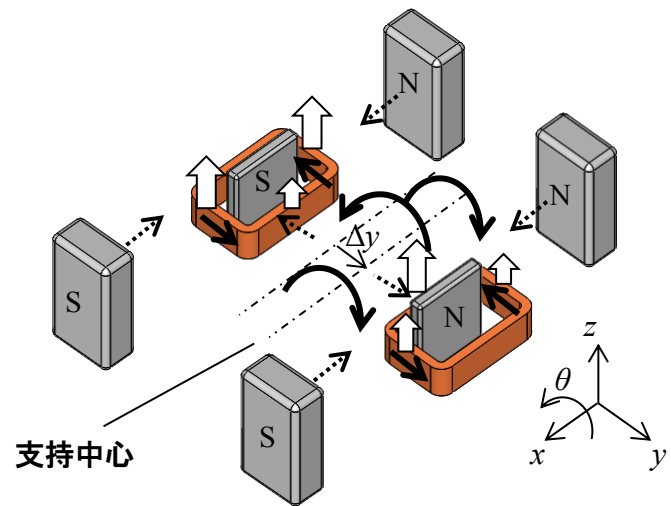


図 6.21 考案したインナーマグネット配置におけるフォーカシングコイルで発生する駆動力とローリングモーメント

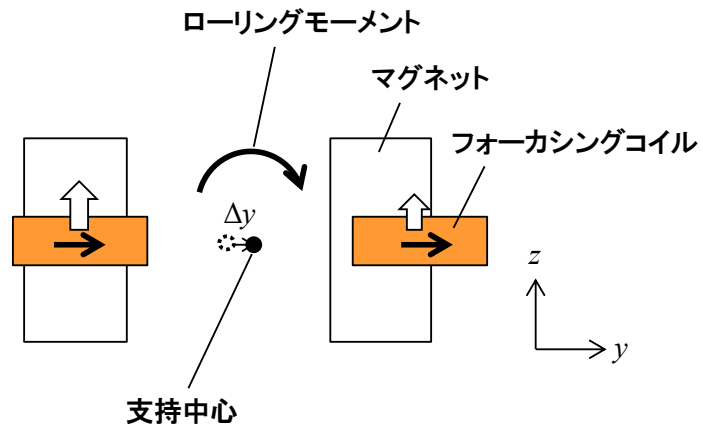


図 6.22 従来構造におけるフォーカシングコイルで発生する駆動力とローリングモーメントを平面的に示した図

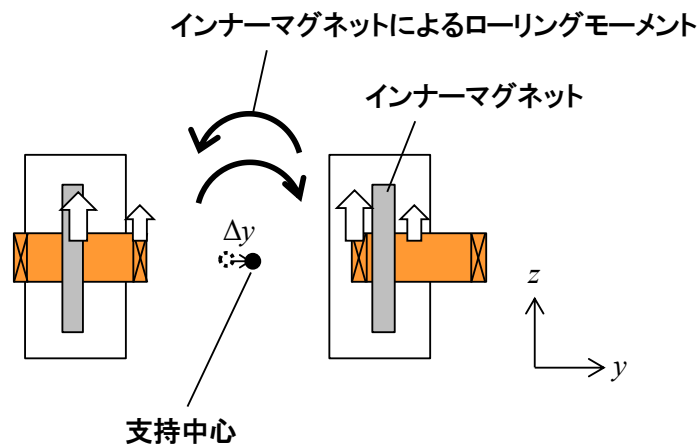


図 6.23 考案したインナーマグネット配置におけるフォーカシングコイルで発生する駆動力とローリングモーメントを平面的に示した図

従来構造とインナーマグネット配置において、トラッキング方向の変位量を+0.3 mm として、インナーマグネットの幅 (図 6.18 参照) を $w_{IM} = 1.8, 2.2, 2.6$ mm と変化させたときのフォーカシングコイルで発生するローリングモーメントの計算結果を図 6.24 に示す。トラッキングコイルとマグネットが対向して重なる部分の長さ $s = 0.6$ mm とした。横軸はフォーカシング方向の変位量、縦軸はフォーカシング方向の単位駆動力当たりのローリングモーメント M_{FO} である。

この結果から、 w_{IM} が大きくなるにしたがって従来構造のローリングモーメントを打ち消す作用が増加していき、この場合は $w_{IM} = 2.6$ mm 付近でローリングモーメントをほぼゼロにできることがわかる。すなわち、インナーマグネットの幅 w_{IM} の設定によって、フォーカシングコイルで発生するローリングモーメントを抑制可能である。

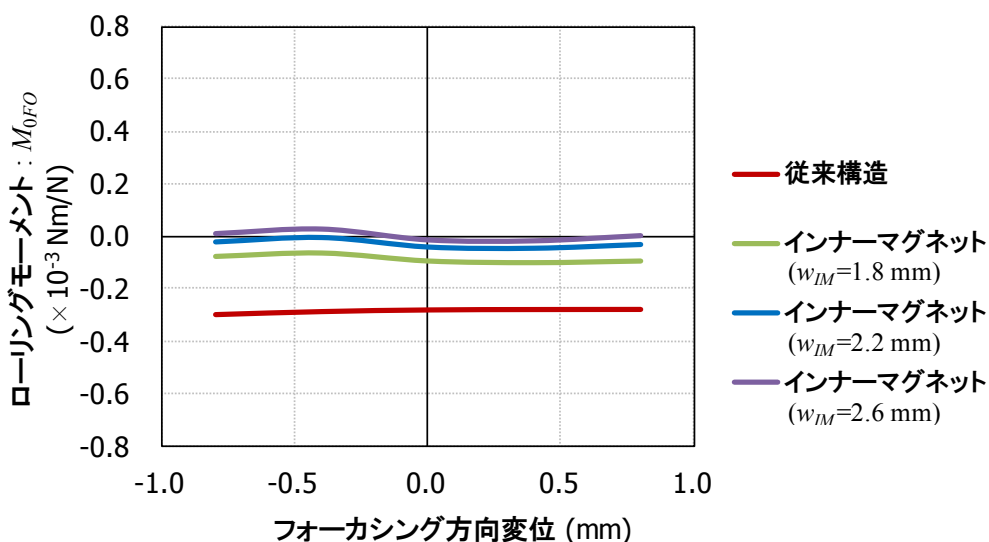


図 6.24 フォーカシング方向の単位駆動力当たりのローリングモーメントの計算結果

6.4 適用結果

6.4.1 静的傾きの低減

式 (6.1) において、ローリングモーメント M は、単位駆動力当たりのローリングモーメント M_0 と駆動力 F により、

$$M = FM_0 \quad (6.7)$$

と表すことができる。トラッキング方向の駆動力を F_{TR} 、トラッキング方向の変位量を Δy 、フォーカシング方向の駆動力を F_{FO} 、フォーカシング方向の変位量を Δz とすると、

$$F_{TR} = nk_{w1} \Delta y \quad (6.8)$$

$$F_{FO} = nk_{w1} \Delta z \quad (6.9)$$

である。

トラッキング方向の単位駆動力当たりのローリングモーメントを M_{OTR} ，トラッキング駆動力による対物レンズの静的傾きを θ_{STR} ，フォーカシング方向の単位駆動力当たりのローリングモーメントを M_{OFO} ，フォーカシング駆動力による対物レンズの静的傾きを θ_{SFO} とすると，

$$\theta_{STR} = \frac{\Delta y M_{OTR}}{L_w^2} \quad (6.10)$$

$$\theta_{SFO} = \frac{\Delta z M_{OFO}}{L_w^2} \quad (6.11)$$

となり，対物レンズの静的傾きは，単位駆動力当たりのローリングモーメントと，変位置と，サスペンションワイヤの固定位置から支持中心までの距離によって表される。

式 (6.10)，(6.11) を用いて，従来構造とローリングモーメント低減構造における対物レンズの静的傾きを計算した。図 6.19，6.24 の結果を基に，トラッキングコイルとマグネットが対向して重なる部分の長さ $s = 0.6 \text{ mm}$ ，インナーマグネットの幅 $w_M = 2.6 \text{ mm}$ とした。トラッキング方向の変位置は $\Delta y = 0.3 \text{ mm}$ ，サスペンションワイヤの固定位置から支持中心までの距離 $L_w = 5.7 \text{ mm}$ とした。トラッキング駆動時，フォーカシング駆動時の対物レンズ静的傾きの計算結果をそれぞれ図 6.25，6.26 に示す。

従来構造では，トラッキング駆動，フォーカシング駆動のいずれでもフォーカシング方向の変位置 $\pm 0.7 \text{ mm}$ で対物レンズ静的傾きの大きさは約 0.3° となる。フォーカシング方向の光ディスクの面振れ量 0.5 mm とばらつきを考慮すると，フォーカシング方向に $\pm 0.7 \text{ mm}$ 以上の変位は必要であり，対物レンズ傾きの目標値 $\pm 0.3^\circ$ 以内に対して余裕はない。

一方，ローリングモーメント低減構造では，図 6.19，6.24 に示した単位駆動力当たりのローリングモーメントの低減によって，トラッキング方向およびフォーカシング方向に変位しても対物レンズ静的傾きはほとんど増加しないことが期待できる。

従来構造と，上記のローリングモーメント低減構造を適用した対物レンズアクチュエータ実機において，トラッキング駆動時，フォーカシング駆動時の対物レンズ静的傾きを測定した結果をそれぞれ図 6.27，6.28 に示す。トラッキング方向の変位置は $\Delta y = 0.3 \text{ mm}$ とした。

測定結果は計算と同様の傾向となっている。フォーカシング方向の変位置 $\pm 0.7 \text{ mm}$ における対物レンズ静的傾きの大きさは，従来構造では，トラッキング駆動時に 0.29° ，フォーカシング駆動時に -0.30° ，ローリングモーメント低減構造では，トラッキング駆動時に -0.04° ，フォーカシング駆動時に -0.03° であった。ローリングモーメント低減構造の適用によって，対物レンズの静的傾きは従来構造の 20% 以下に低減されている。

以上から，コイルの移動に対して，コイルに近づくマグネットとコイルから遠ざかるマグネットを組み合わせることで，対物レンズの静的傾きを効果的に低減できることを確認した。

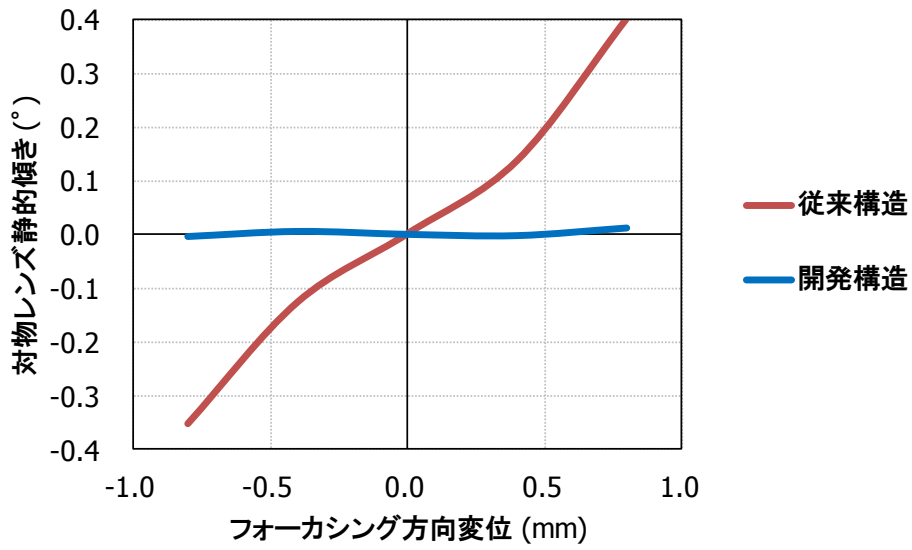


図 6.25 トラッキング駆動時の対物レンズ静的傾きの計算結果

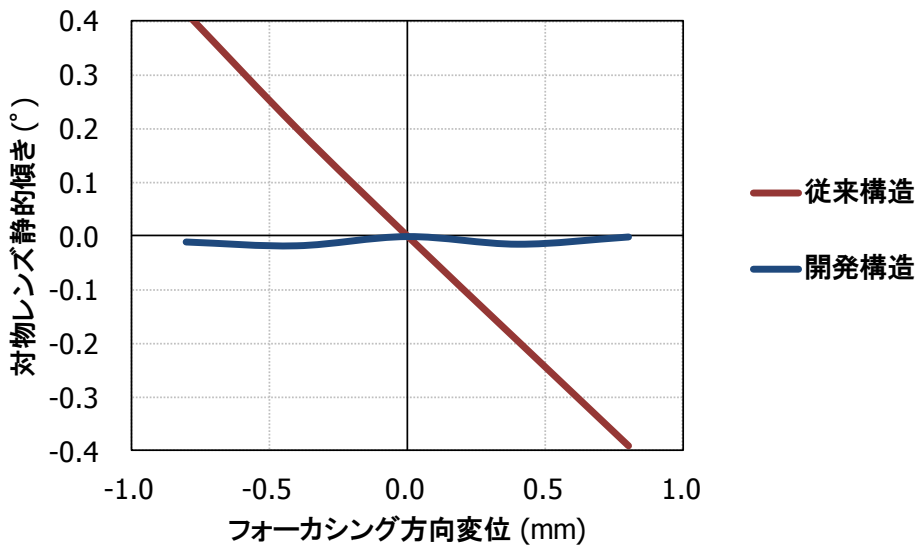


図 6.26 フォーカシング駆動時の対物レンズ静的傾きの計算結果

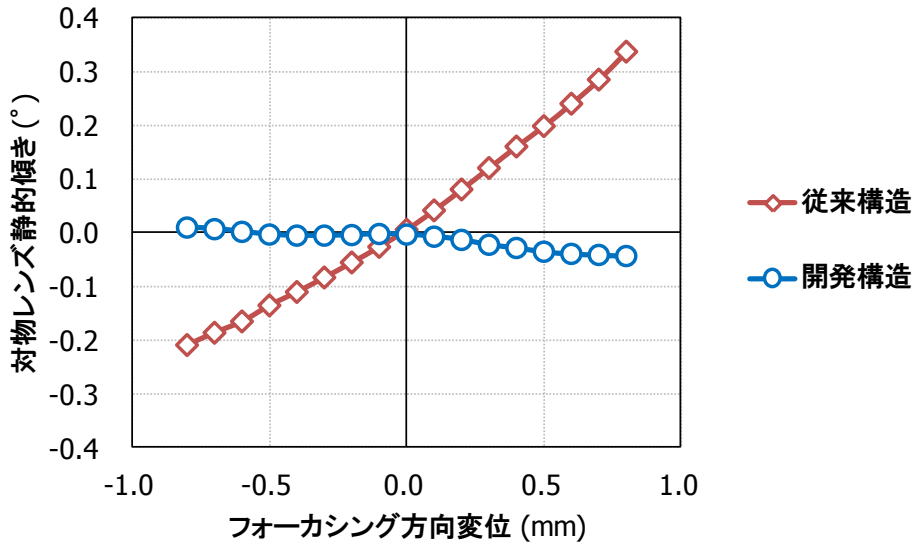


図 6.27 トラッキング駆動時の対物レンズ静的傾きの測定結果

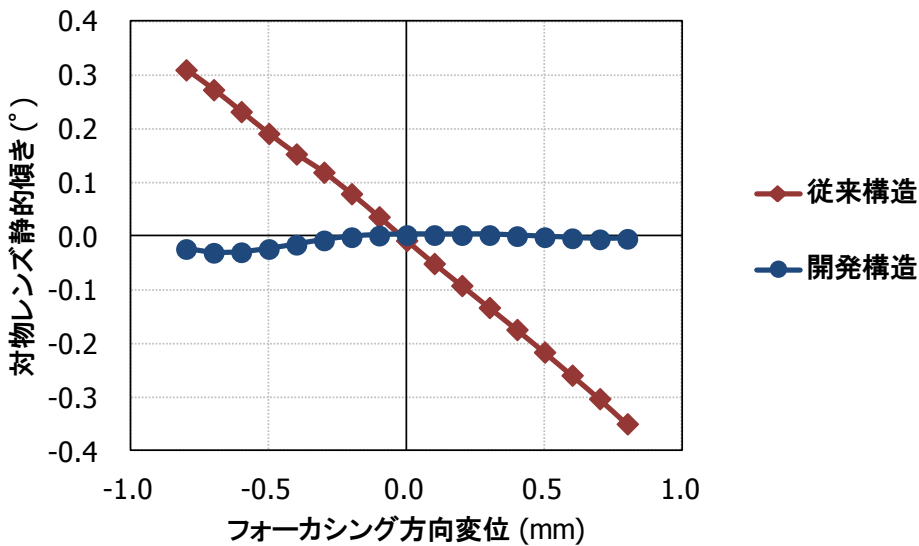


図 6.28 フォーカシング駆動時の対物レンズ静的傾きの測定結果

6.4.2 ローリング共振時の動的傾きの低減

対物レンズの動的傾きは可動部の重心回りのローリングモーメントによって生じる。特に、可動部がフォーカシング方向に変位した場合には、トラッキング方向の駆動力に対して可動部の重心がフォーカシング方向にずれた状態になりやすい。図 6.19 はトラッキング方向の単位駆動力に対する支持中心回りのローリングモーメントの計算結果であった。これを重心回りのローリングモーメントとして計算した結果を図 6.29 に示す。横軸はフォーカシング方向の変位量、縦軸はトラッキング方向の単位駆動力に対する重心回りのローリングモーメント M_{OTRG} である。

従来構造では、フォーカシング方向変位にほぼ比例してローリングモーメントが増加することがわかる。また、従来構造ではフォーカシング方向変位がゼロの状態でもローリングモーメントが生じ

ている。これは、可動部の重心がトラッキング方向の駆動力の中心に対して 0.15 mm 程度ずれていることを表している。一方、ローリングモーメント低減構造では、フォーカシング方向に変位してもローリングモーメントはほとんど変化していない。

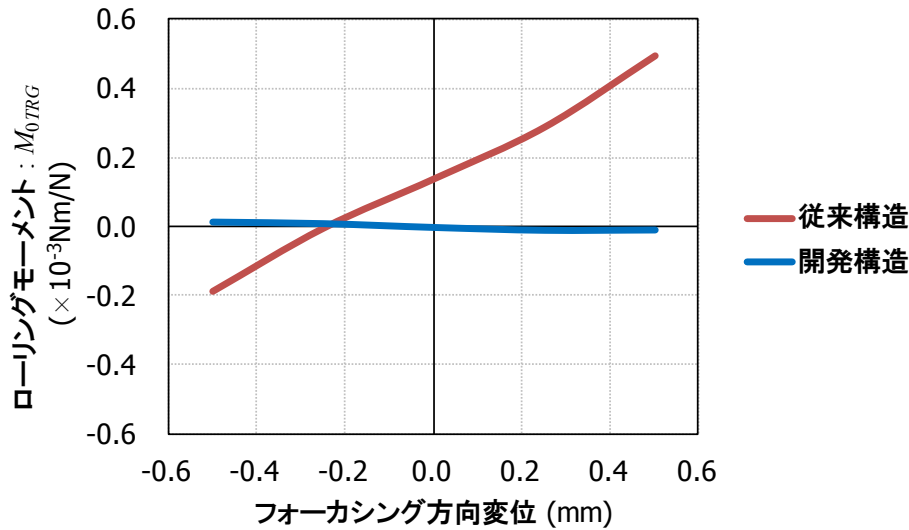


図 6.29 トラッキング方向の単位駆動力に対する重心回りのローリングモーメントの計算結果

式 (6.2) , (6.7) から、対物レンズ動的傾きの振幅 θ_D は、トラッキング方向の駆動力 F_{TR} 、トラッキング方向の単位駆動力に対する重心回りのローリングモーメント M_{OTRG} により、

$$\theta_D = \frac{F_{TR} M_{OTRG}}{nk_{wl} L_w^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{f^2}{f_r^2}\right)^2 + \left(2\zeta \frac{f}{f_r}\right)^2}} \quad (6.12)$$

と表される。式 (6.12) はトラッキング方向の駆動力 F_{TR} に対する対物レンズ動的傾きの振幅 θ_D の周波数応答を表す。トラッキング方向の駆動は光ディスクの偏心に起因しており、ここで求めたいのはトラッキング方向の変位入力に対する応答である。トラッキング方向の駆動力 F_{TR} に対するトラッキング方向の変位振幅 Y は、1 自由度振動系の周波数応答として、

$$Y = \frac{F_{TR}}{nk_{wl} \sqrt{\left(1 - \frac{f^2}{f_0^2}\right)^2 + \left(2\zeta \frac{f}{f_0}\right)^2}} \quad (6.13)$$

と表される。 f_0 は主共振周波数である。

式 (6.12) , (6.13) から、トラッキング方向の変位振幅 Y に対する対物レンズ動的傾きの振幅 θ_D の周波数応答は、

$$\Theta_D = \frac{YM_{OTRG}}{L_w^2} \sqrt{\frac{\left(1 - \frac{f^2}{f_0^2}\right)^2 + \left(2\zeta \frac{f}{f_0}\right)^2}{\left(1 - \frac{f^2}{f_r^2}\right)^2 + \left(2\zeta \frac{f}{f_r}\right)^2}} = \frac{YM_{OTRG}}{L_w^2} H(f) \quad (6.14)$$

と表される。 YM_{OTRG}/L_w^2 は式 (6.10) と同じく、トラッキング方向の変位 Y に対する静的な対物レンズ傾き成分を表しており、 $H(f)$ は周波数依存成分を表す。

これまでの実測結果に基づいて、 f_r/f_0 を 1.75 とし、 $\zeta = 0.08$ とした条件で、 f_0 を 50, 60, 70 Hz と変化させて、 $H(f)$ を計算した結果を図 6.30 に示す。この結果は、ローリング共振時の対物レンズ傾きが静的傾きの 10 倍程度に増加すること、共振点での $H(f)$ の値は f_0 によらず一定であることを示している。

スリム型の光ディスク装置の場合、光ディスクの回転周波数は最大 92 Hz であり、 f_0 が 50~60 Hz では、ローリング共振の影響を顕著に受ける。これを回避するためには、ローリングモーメント M_{OTRG} を低減することと、 f_0 を 70 Hz 以上に高め f_r を光ディスクの回転周波数から離すことが有効である。このうち、 f_0 を高めることは静的な駆動感度を低下させることにつながるため好ましくない。また、第 4 章で示したシリコーンゲルの減衰効果を増大させて、減衰比 ζ を大きくすることも周波数依存成分 $H(f)$ を低減することは可能である。しかし、減衰比は大きくても 0.2 程度であり、この場合の周波数依存項の振幅増加は 6 倍程度生じるため、シリコーンゲルの減衰効果だけでは対物レンズ動的傾きの低減に十分ではない。したがって、対物レンズ動的傾きの低減においても、静的傾きと同様に M_{OTRG} の低減が重要である。

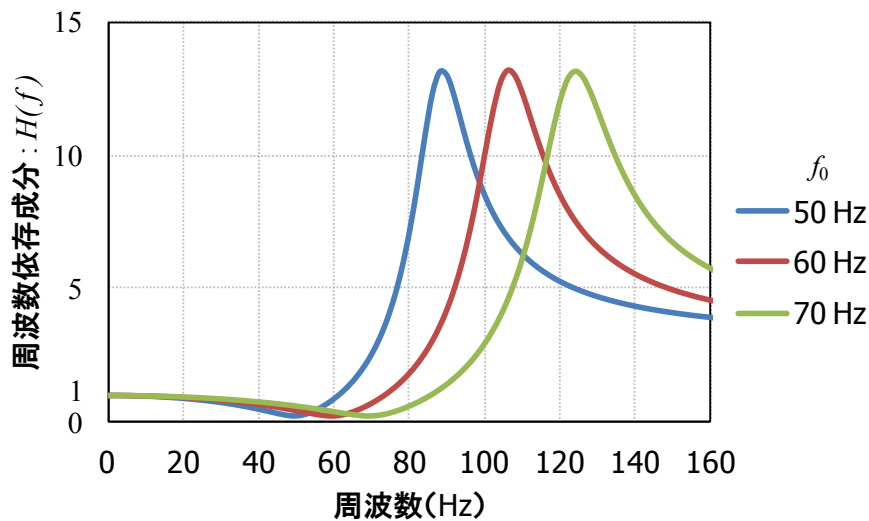


図 6.30 対物レンズ動的傾きの周波数依存成分の計算結果

従来構造とローリングモーメント低減構造において、図 6.29 に示したトラッキング方向の単位駆動力当たりのローリングモーメント M_{OTRG} と、式 (6.14) を用いて、対物レンズ動的傾き θ_D の周波数応答を計算した結果を図 6.31, 6.32 に示す。フォーカシング方向変位は $-0.50, -0.25, 0.00, +0.25, +0.50$ mm とし、 $Y = 0.1$ mm, $L_w = 5.6$ mm, $\zeta = 0.08$ とした。

従来構造では (a) $f_0 = 55$ Hz, $f_r = 95$ Hz, (b) $f_0 = 70$ Hz, $f_r = 120$ Hz の 2 種類、ローリングモーメント低減構造では $f_0 = 55$ Hz, $f_r = 95$ Hz の 1 種類を示す。

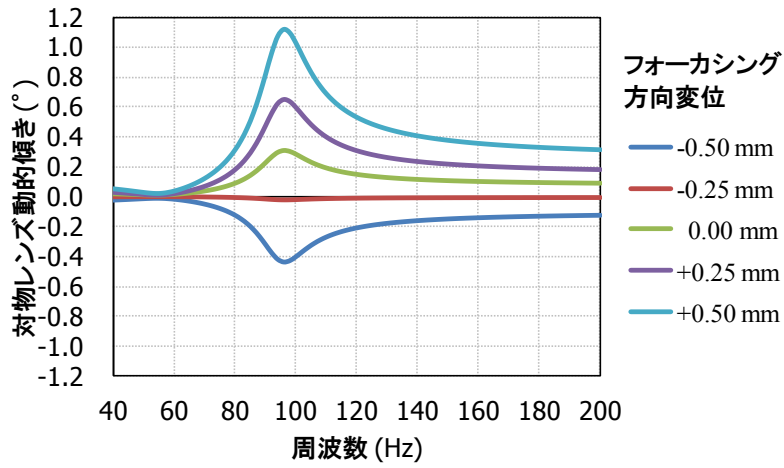
従来構造では、ローリング共振周波数付近において対物レンズ動的傾きが増加し、フォーカシング方向変位によって、その値が変化する。(a) の $f_0 = 55$ Hz, $f_r = 95$ Hz の場合は、スリム型における光ディスク回転周波数の最大値である 92 Hz において、フォーカシング方向変位 $+0.25$ mm で、対物レンズ動的傾きは 0.5° に達する。この状態では対物レンズ傾きの目標を満足できないので、従来構造では (b) の $f_0 = 70$ Hz, $f_r = 120$ Hz として、ローリング共振を回避している。この場合は、周波数 92 Hz において、フォーカシング方向変位 $+0.25$ mm で、対物レンズ動的傾きは 0.1° 、フォーカシング方向変位 $+0.50$ mm でも 0.2° に抑えられる。

これに対してローリングモーメント低減構造では、フォーカシング方向変位によらず対物レンズ動的傾きはほとんど増加しない。したがって、 $f_r = 95$ Hz として光ディスク回転周波数と近接させてもローリング共振の影響は受けずに、対物レンズ傾きを目標である $\pm 0.3^\circ$ 以内に抑えることが期待できる。

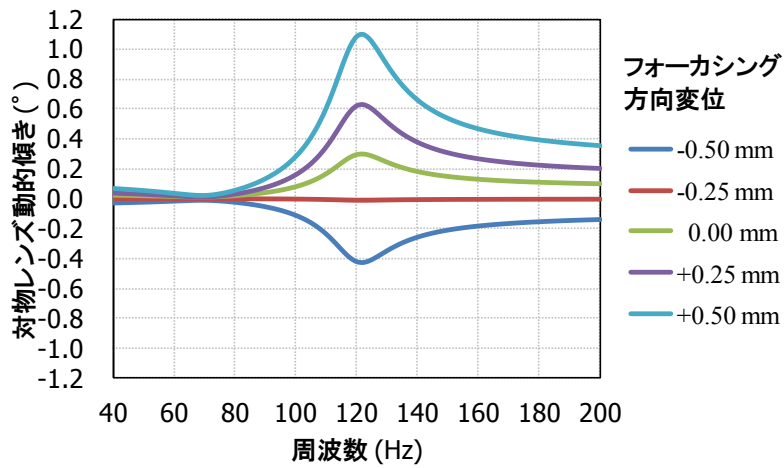
従来構造とローリングモーメント低減構造を適用した対物レンズアクチュエータ実機において、トラッキング方向の変位振幅 $Y = 0.1$ mm に相当する電流をトラッキングコイルに印加し、対物レンズ動的傾きの周波数応答を測定した。対物レンズ動的傾きの振幅 θ_D の測定結果を図 6.33, 6.34 に示す。従来構造では $f_0 = 70$ Hz, $f_r = 120$ Hz, ローリングモーメント低減構造では $f_0 = 55$ Hz, $f_r = 95$ Hz である。

測定結果は計算と同様の傾向が得られた。従来構造では、120 Hz のローリング共振周波数付近で対物レンズ動的傾きが増加し、フォーカシング方向変位 $+0.50$ mm の場合に、最大値は 0.98° であった。ローリングモーメント低減構造では、95 Hz のローリング共振周波数付近でも対物レンズ動的傾きはほぼ抑えられている。フォーカシング方向変位 ± 0.5 mm の範囲における対物レンズ動的傾きの最大値は 0.1° であり、従来構造の 10% に低減されている。

以上によって、考案したローリングモーメント低減構造は、対物レンズの静的傾きと動的傾きの低減に有効であり、対物レンズ傾きを目標よりも十分に小さく抑えられることを確認した。



(a) $f_0 = 55 \text{ Hz}$, $f_r = 95 \text{ Hz}$ の場合



(b) $f_0 = 70 \text{ Hz}$, $f_r = 120 \text{ Hz}$ の場合

図 6.31 従来構造における対物レンズ動的傾きの周波数応答の計算結果

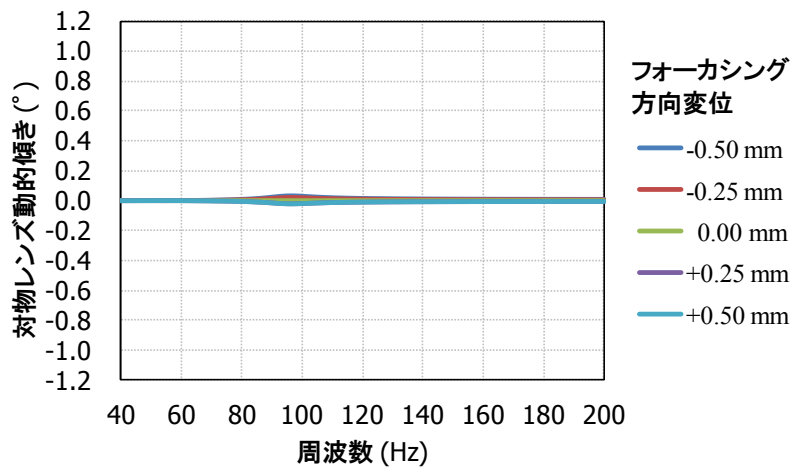


図 6.32 考案したローリングモーメント低減構造における対物レンズ動的傾きの周波数応答の計算結果 ($f_0 = 55 \text{ Hz}$, $f_r = 95 \text{ Hz}$ の場合)

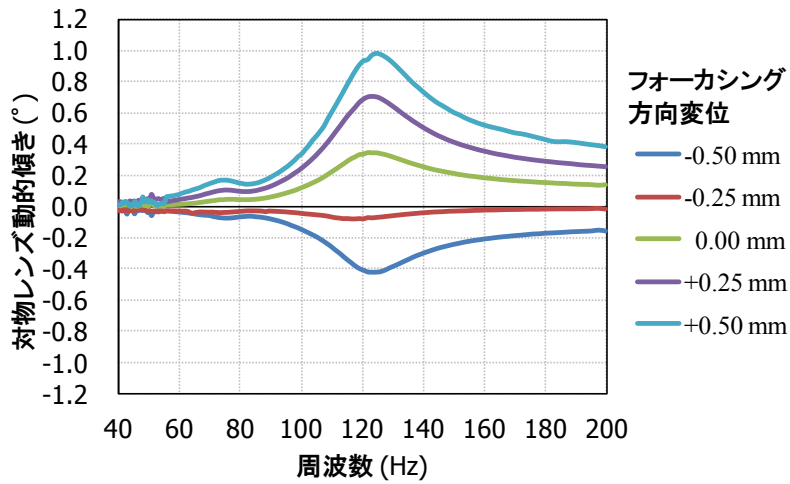


図 6.33 従来構造における対物レンズ動的傾きの周波数応答の測定結果

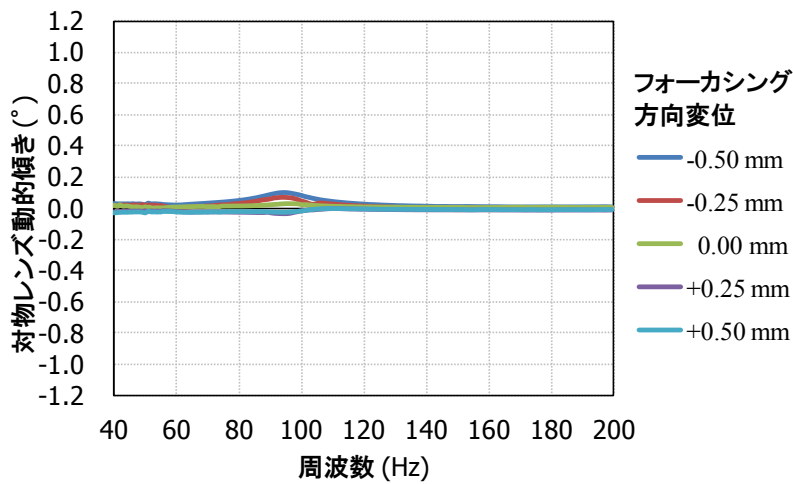


図 6.34 考案したローリングモーメント低減構造における対物レンズ動的傾きの周波数応答の測定結果

6.5 結言

本章では、対物レンズアクチュエータの可動部がフォーカシング方向およびトラッキング方向に動作したときの対物レンズ傾きを低減する構造について検討した。

コイルに作用する磁束密度分布の不均一性により、可動部を回転させようとするローリングモーメントが生じることを明らかにし、コイルに作用する磁束密度分布を台形状に単純化して、コイルに作用するローリングモーメントを考察した。この結果に基づいて、装置寸法を変えることなく、かつ駆動力を低下させることなく、ローリングモーメントを低減可能な構造を考案した。考案した構造において、対物レンズ傾きの低減効果を検証した。

得られた結果を以下に示す。

- (1) 対物レンズアクチュエータ可動部がフォーカシング方向およびトラッキング方向に動作したときの対物レンズ傾きは、コイルに作用する磁束密度分布の不均一性に起因するローリングモーメントによって生じる。対物レンズの静的傾きは、サスペンションワイヤの支持中心回りのローリングモーメントによって生じ、対物レンズの動的傾きは、可動部の重心回りのローリングモーメントによって生じる。
- (2) コイルに作用する磁束密度分布を台形形状に近似して、コイルに作用するローリングモーメントを算出した。このローリングモーメントの解析結果を基に、コイルの一方で増加する磁束密度分布と、コイルの他方で減少する磁束密度分布を組み合わせることで、ローリングモーメントを低減できることを理論的に示した。
- (3) この指針に基づいて、ローリングモーメント低減を実現し得る構造として、これまでにはなかったトラッキングコイルのクロス配置とインナーマグネット配置を考案した。トラッキングコイルのクロス配置は、ホルダの二つの側面の一方において、トラッキングコイルをマグネットに対して対物レンズ中心から見て外寄りに配置し、他方の側面において、トラッキングコイルをマグネットに対して対物レンズ中心に近い内寄りに配置する。インナーマグネット配置は、フォーカシングコイルの内側の空間に、トラッキング方向に磁束密度を作用させるマグネットを配置する。いずれもコイルの移動に対して、コイルに近づくマグネットと、コイルから遠ざかるマグネットを組み合わせた磁気回路構造である。
- (4) トラッキングコイルのクロス配置では、ホルダの二つの側面においてトラッキングコイルとマグネットの配置を反転させることによって、可動部がフォーカシング方向に動作したときに、トラッキングコイルの上下のコイル部で発生する力が二つの側面で逆向きとなり、トラッキングコイル全体としてローリングモーメントを低減できる。
- (5) インナーマグネット配置では、可動部がトラッキング方向に動作したときに、二つのフォーカシングコイルのうち的一方では、マグネットに対向するコイル部はマグネットから遠ざかり、インナーマグネットに対向するコイル部はインナーマグネットに近づく。同時に、もう一方のフォーカシングコイルでは、マグネットに対向するコイル部はマグネットに近づき、インナーマグネットに対向するコイル部はインナーマグネットから遠ざかる。この結果、マグネットに対向するコイル部で生じるローリングモーメントと、インナーマグネットに対向するコイル部で生じるローリングモーメントが逆向きとなり、フォーカシングコイル全体としてローリングモーメントを低減できる。
- (6) トラッキングコイルのクロス配置では、トラッキングコイルとマグネットがトラッキング方向に対向する長さの設定によって、トラッキングコイルの単位駆動力当たりのローリングモーメントを抑圧できることがわかった。また、インナーマグネット配置では、インナーマグネットの幅の設定によって、フォーカシングコイルの単位駆動力当たりのローリングモーメントを抑圧できることがわかった。
- (7) 上記構造を適用した対物レンズアクチュエータ実機において、アクチュエータ動作時の対物レンズの静的傾きとローリング共振時の動的傾きを、目標に対して十分に小さく抑制できることを確認した。

7. 結 論

7.1 結果の要約

光ディスク装置の主要性能である記録容量と転送速度の向上のために、光スポットの高精度位置決めを実現する駆動機構が必須である。本研究では、光ディスク上の光スポットを位置決め駆動する対物レンズアクチュエータを対象として、その動作特性を表すモデル化を行って、動作特性向上を実現する機構技術を提案し、量産製品に適用可能な構造を具現化することを目的とした。

対物レンズアクチュエータの動作特性として、加速度感度、主共振および高次共振、対物レンズ傾きに着目し、加速度感度を最大化する駆動コイルの条件、粘弾性減衰材を含む主共振特性の導出、振動モードと駆動力分布を組み合わせた高次共振振幅の低減手法、アクチュエータ動作時の対物レンズ傾きを低減する磁気回路構造について、従来の設計では用いられていないアプローチや独創的な発想による検討を試みた。得られた結果を以下に示す。

第2章では、光ディスク装置の仕様にに基づき、対物レンズアクチュエータの加速度感度、振動特性、対物レンズ傾きの目標値の設定について示した。

- (1) 光ディスクの面振れ量またはトラック位置変動量と、光ディスクの回転周波数の2乗との積によって必要な加速度が算出される。スリム・ウルTRASリム型ではCDの最高倍速である24倍速時に、ハーフハイト型ではCDの最高倍速である52倍速時に最大の加速度が必要となることを明らかにした。加速度感度の指標として従来用いられていた電流加速度感度と電圧加速度感度に加えて、それらの相乗平均を取って、新たな総合的感度の指標として電力加速度感度を定義した。必要な最大加速度に対して、許容消費電力を設定することで、電力加速度感度の目標値が規定されることを示した。
- (2) 光ディスクの回転周波数における面振れ量またはトラック位置変動量と、制御系の許容追従誤差から、必要となる制御系のゲインクロス周波数が求められる。CDからDVD、さらにBDと高密度光ディスクになるにつれて、また同じ光ディスクでは高倍速になるにつれて、ゲインクロス周波数の高域化が必要である。対物レンズアクチュエータの高次共振振幅に対する制御系のゲイン余裕を6dBに設定した場合、高次共振周波数はゲインクロス周波数の3倍以上、高次共振振幅は8dB以下が求められることを明らかにした。ゲインクロス周波数の高域化に対応して、高次共振周波数の高域化と、高次共振振幅の指標である1kHzゲイン差の絶対値の拡大が必要となることを示した。
- (3) サスペンションワイヤ支持方式の対物レンズアクチュエータでは、フォーカシング方向あるいはトラッキング方向の並進動作時に、サスペンションワイヤ軸回りのローリング方向への回転動作も発生し得る。このローリング方向への対物レンズアクチュエータ可動部の回転は、対物レンズの傾きとして現れ、光ディスク上への集束光にコマ収差を発生させ、記録再生特性の劣化を引き起こす。対物レンズ傾きに対する再生信号ジッタ特性の測定結果から、対物レンズ傾きの許容値は、CDで $\pm 1.35^\circ$ 、DVDで $\pm 0.34^\circ$ 、BDで $\pm 0.55^\circ$ となることがわかった。この結果から、対物レンズアクチュエータ可動部をフォーカシング方向およびトラッキング方向に並進動作させた時の対物レンズ傾きを $\pm 0.3^\circ$ 以内に抑える必要があることを明らかにした。

第3章では、光ディスク装置の高速化に直接関わる対物レンズアクチュエータの加速度感度について、電力加速度感度を指標とすることによって駆動コイルの最適化が可能となることを明らかにし、実機への適用結果を示した。

- (1) 加速度感度の指標として従来用いられてきた電流加速度感度と電圧加速度感度を、コイルの質量 m_c とコイル以外の質量 m_0 の比 m_c/m_0 で整理した。その結果、電流加速度感度は m_c/m_0 に対して単調増加の特性となり、電圧加速度感度は m_c/m_0 に対して単調減少の特性となることがわかった。
- (2) 新たな総合的感度の指標として、電流加速度感度と電圧加速度感度の相乗平均で定義した電力加速度感度は、 $m_c/m_0=1$ のとき、すなわちコイルの質量 m_c とコイル以外の質量 m_0 が等しいときに最大となることを明らかにした。電力加速度感度を用いることによって、従来用いられてきた電流加速度感度と電圧加速度感度では表せなかった駆動コイルの最適化が可能となる。
- (3) 上記指針を対物レンズアクチュエータ実機に適用し、ウルトラスリム、スリム、ハーフハイト型のいずれにおいても高倍速化に対応した加速度感度の目標を満足する対物レンズアクチュエータの具現化を検証した。

第4章では、対物レンズの位置決め制御系の高精度化を目的として、対物レンズアクチュエータの周波数応答特性において第一次の振動モードとして現れる主共振について、周波数応答特性の定式化を検討した。

- (1) シリコンゲルの弾性率の測定結果から、シリコンゲルはその弾性率が周波数特性を有するばねとして表現できることを示した。速度比例粘性減衰系としたサスペンションワイヤに、周波数特性を有するシリコンゲルが付加された振動モデルを用いることで、粘弾性減衰材を含む対物レンズアクチュエータのサスペンションワイヤ支持系の周波数応答特性を表現できる。
- (2) 上記(1)の周波数応答特性において、シリコンゲルの貯蔵弾性率はばね項として作用し、損失弾性率は減衰項として作用することがわかった。この周波数応答特性によって、シリコンゲルが無いサスペンションワイヤ単独の場合の固有振動数に対して、シリコンゲルが付加された場合の主共振周波数が増加する現象を良く再現できる。
- (3) 本モデルによる主共振周波数と共振係数の解析結果は実測結果と良く一致し、本モデルが対物レンズアクチュエータの主共振の周波数応答解析に有効であることを示した。

第5章では、制御帯域の拡大を目的として、対物レンズアクチュエータの周波数応答特性において、可動部の弾性変形モードとして10 kHz以上の周波数帯に現れる高次共振について、従来にはない振幅抑制手法を着想し、解析および実測によって有効性を検証した。

- (1) 高次共振モードの変位応答は多自由度振動系の応答として、駆動点の駆動力と駆動点の振動モード成分と応答点の振動モード成分の積をコイル全体にわたって加算した形式で表される。駆動点における駆動力と振動モードの積である駆動力成分を指標として、その総和をゼロとすることで、応答点の振動モード成分によらず、変位応答は生じないことを明らかにした。

(2) 上記 (1) の高次共振振幅抑制手法に基づいて、フォーカシング方向の高次共振として現れる可動部の 1 次曲げモードに対して、駆動力成分の総和をゼロに近づけることが可能な駆動コイルとマグネットの配置を創案した。

(3) 具体例として、DVD 用ウルトラスリム型の対物レンズアクチュエータでは、フォーカシングコイルの内側の空間にインナーマグネットを配置した独自の構造を創出した。

DVD 用ハーフハイト型の対物レンズアクチュエータには、縦横 2 分割の 4 極マグネットと平面コイル形状を適用し、振動特性と加速度感度の両立を図った。

BD 用スリム型の対物レンズアクチュエータでは、ホルダの二つの側面に対向してマグネットを 3 個ずつトラッキング方向に沿って配置し、中央のマグネットの極性を外側の 2 個のマグネットに対して反転させた、これまでに類例のない 3 極磁場構造を考案した。

BD 用ハーフハイト型の対物レンズアクチュエータでは、DVD 用ハーフハイト型よりも小径の対物レンズを用い、ホルダの高さ寸法を大きくすることで、高次共振周波数を高めた。

上記構造によって、DVD 用ではウルトラスリム型で DVD8 倍速に、ハーフハイト型で DVD24 倍速に、BD 用ではスリム型で BD6 倍速に、ハーフハイト型で BD16 倍速の高速化に対応する振動特性を実現可能であることを検証した。

第 6 章では、光ディスクの高密度化時の課題であった対物レンズ傾きの低減について示した。対物レンズアクチュエータ可動部がフォーカシング方向およびトラッキング方向に動作したときに付随的に生じる対物レンズ傾きを、コイルに作用する磁束密度分布から考察した。複数の磁束密度分布を組み合わせることで、可動部を回転させようとするローリングモーメントを低減できることを明らかにし、考案した磁気回路構造における対物レンズ傾きの低減効果を示した。

(1) 対物レンズアクチュエータ可動部がフォーカシング方向およびトラッキング方向に動作したときの対物レンズ傾きは、コイルに作用する磁束密度分布の不均一性に起因するローリングモーメントによって生じることを明らかにした。コイルに作用するローリングモーメントの解析結果を基に、コイルの一方で増加する磁束密度分布と、コイルの他方で減少する磁束密度分布を組み合わせることで、ローリングモーメントを低減できることを理論的に示した。

(2) この指針に基づいて、ローリングモーメント低減を実現し得る構造として、これまでにはなかった、トラッキングコイルのクロス配置とインナーマグネット配置を考案した。トラッキングコイルのクロス配置は、ホルダの二つの側面の一方において、トラッキングコイルをマグネットに対して対物レンズ中心から見て外寄りに配置し、他方の側面において、トラッキングコイルをマグネットに対して対物レンズ中心に近い内寄りに配置する。インナーマグネット配置は、フォーカシングコイルの内側の空間に、トラッキング方向に磁束密度を作用させるマグネットを配置する。いずれもコイルの移動に対して、コイルに近づくマグネットと、コイルから遠ざかるマグネットを組み合わせた磁気回路構造である。

(3) トラッキングコイルのクロス配置では、トラッキングコイルとマグネットが対向する長さの設定によって、また、インナーマグネット配置では、インナーマグネットの幅の設定によって、ローリングモーメントを抑制できることを数値計算で明らかにした。上記構造を適用した対物レンズアクチュエータにおける解析と実測によって、対物レンズの静的傾きとローリング共振時の動的傾きを効果的に低減できることを確認した。

7.2 総括

光ディスク装置の大容量化と高速化においては、光ディスク装置の基幹部品である対物レンズアクチュエータの高精度化が不可欠である。本研究では、加速度感度の向上、制御帯域の拡大、対物レンズ傾きの低減といった課題に対応するために、従来にはなかった独創的な発想によって、電力加速度感度による駆動コイルの最適化、粘弾性減衰材を含むサスペンションワイヤ支持系の振動モデル化、振動モードと駆動力分布を組み合わせた高次共振振幅の低減手法、ローリングモーメント低減構造を提案し、DVD や BD 等の量産型光ディスク装置に適用して高速化と高精度化の実現を検証した。

本研究で得られた成果は、現在の光ディスク装置の高機能化と普及に大きく寄与しているとともに、次世代のアーカイブストレージ機構の高精度化にも有用である。

参考文献

- [1] C. Bricot, J. C. Leheureau, C. Puech and F. Le Carvence, Optical readout of videodisc, IEEE Transaction on Consumer Electronics, Vol.CE-22, No.4, pp.304-308, (1976).
- [2] M. Carasso, J. Peek and J. Shinjou, The compact disc digital audio system, Philips Technical Review, Vol.40, No.6, pp.151-156, (1982).
- [3] Y. Komma, S. Nishino and S. Mizuno, Dual focus optical head for 0.6 mm and 1.2 mm disks, Optical Review, Vol.1, pp.27-29, (1994).
- [4] N. Takahashi, H. Sato, H. Osawa, K. Nagai, H. Isobe and I. Kasuga, Digital video disk/compact disk (DVD/CD)-compatible pickup head with dual lens rotating actuator, Japanese Journal of Applied Physics, Vol.36, No.1B, pp.467-473, (1997).
- [5] H. Minemura, K. Watanabe, K. Adachi and R. Tamura, High-speed write/read techniques for a Blu-ray write-once disc, International Symposium on Optical Memory and Optical Data Storage Topical Meeting 2005, No.ThA4, (2005).
- [6] 川前治, 清水貴久男, 今中良史, 門間淳也, 仲尾武司, 世界初4倍速記録 Blu-ray Disc ドライブ, 日立評論, Vol.88, No.10, pp.40-43, (2006).
- [7] 大野鋭二, 光ディスクの動作原理と高密度化技術, 応用物理, Vol.81, No.7, pp.603-606, (2012).
- [8] 島野健, 次世代光ディスク (BDXL) の記録および読み出しの方法, 応用物理, Vol.81, No.8, pp.690-693, (2012).
- [9] 服部正勝, 鈴木博, 菅谷誠一, HDD, ODD, 及び SSD の技術動向, 東芝レビュー, Vol.66, No.8, pp.30-35, (2011).
- [10] 松本郁夫, 光ディスクのアーカイブ応用の必然性と重要性, 第129回微小光学研究会「グリーンフォトニクスの新展開」, pp.25-30, (2013).
- [11] 後藤顕也, 光ディスク位置決め技術, O plus E, No.132, pp.100-107, (1990).
- [12] 小野裕明, 倍速って何, 映像情報メディア学会誌, Vol.61, No.9, pp.1304-1306, (2007).
- [13] 井上雅之, 佐々木徹, 末永秀夫, 矢部昭雄, DVD-ROM 用光ピックアップ, 日立評論, Vol.82, No.11, pp.49-52, (2000).
- [14] F. Issiki, N. Maeda, K. Kimura, H. Suenaga and T. Kurokawa, Triple-write one-lens optical pickup for Blu-ray disc/DVD/CD supporting 4x Blu-ray read/write, International Conference on Consumer Electronics, pp.117-118, (2007).
- [15] 西原孝史, 槌野晶夫, 秋山哲也, 児島理恵, 宮川直康, 山田昇, 書換形2倍速2層BDディスクの開発, パナソニック技報, Vol.54, No.3, pp.21-25, (2008).
- [16] 川久保伸, 3-1 光ディスク, 電子情報通信学会「知識ベース」, 8群2編3章, pp.2-6, (2011).
- [17] A. Mitsumori, T. Higuchi, T. Yanagisawa, M. Ogasawara, S. Tanaka and T. Iida, Multilayer 500 Gbyte optical disk, Japanese Journal of Applied Physics, Vol.48, 03A055, (2009).
- [18] M. Inoue, A. Kosuda, K. Mishima, T. Ushida and T. Kikukawa, 512 GB recording on 16-layer optical disc with Blu-ray Disc based optics, Proceedings of SPIE 7730, 77300D, (2010).
- [19] M. Ogasawara, K. Takahashi, M. Nakano, M. Inoue, A. Kosuda and T. Kikukawa, Sixteen-layer write once disc with a separated guide layer, Japanese Journal of Applied Physics, Vol.50, 09MF01, (2011).
- [20] 井出達朗, 三上秀治, 大澤賢太郎, 渡辺康一, マイクロプログラムを用いた位相多値記録の解

- 析, 映像情報メディア学会技術報告, Vol.35, No.12, pp.13-17, (2011).
- [21] H. Horimai, X. Tan and J. Li, Collinear holography, *Applied Optics*, Vol.44, No.13, pp.2575-2579, (2005).
- [22] K. Shimada, T. Ishii, T. Ide, S. Hughes, A. Hoskins and K. Curtis, High density recording using monocular architecture for 500 GB consumer system, *Proceedings of SPIE 7505*, 75050Q, (2009).
- [23] T. Muroi, N. Kinoshita, N. Ishii, K. Kamijo, H. Kikuchi, Y. Kawata and N. Shimizu, Optical compensation of hologram distortion avoiding inter-page crosstalk on reconstructed image in angle-multiplexed holograms, *Applied Optics*, Vol.50, No.29, pp.5700-5709, (2011).
- [24] 渡部一雄, 次世代光ディスク技術, 東芝レビュー, Vol.66, No.8, pp.47-50, (2011).
- [25] 的場修, スペックルシフト多重反射型ホログラフィックメモリの記憶容量, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.111, No.387, pp.13-16, (2012).
- [26] 有本昭, 尾島正啓, 後藤敏彦, 光ビデオディスクにおける光学系の許容収差量の検討, *光学*, Vol.12, No.6, pp.491-495, (1983).
- [27] 久保田重夫, 光ディスクにおけるアイパターンのジッター解析, *光学*, Vol.12, No.6, pp.437-443, (1983).
- [28] 久保田重夫, 岡美智雄, 大里潔, 光ディスクにおけるアイパターンのジッター解析 II, *光学*, Vol.14, No.2, pp.137-139, (1985).
- [29] 尾上守夫監修, 光ディスク技術, ラジオ技術社, pp.58-66 (1989).
- [30] 角田義人監修, 光ディスクストレージの基礎と応用, 電子情報通信学会, pp.117-132, (1995).
- [31] 木村勝彦, 吉田忍, 斎藤博, 吉田宏靖, 品田聡, 市川文仁, 高速 CD-ROM 装置用対物レンズアクチュエータの開発, 日本機械学会論文集(C 編), Vol.66, No.652, pp.3991-3996, (2000).
- [32] L. Huang, M. Gong, W. Jia, P. Yan, R. Cui and H. Zhang, New methods to achieve high sensitivity of objective lens actuator in optical disc system, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol.40, No.12, pp.6874-6875, (2001).
- [33] 木村勝彦, 次世代光ディスクの高密度・高精度・高速化, 第1章 第1節 アクチュエータの設計と最適化, 技術情報協会, pp.3-10, (2004).
- [34] 三枝省三, 山内良明, 森弘充, 梅基敏行, 対物レンズアクチュエータのモーダルモデルと高次減衰の簡易評価法, 日本機械学会論文集(C 編), Vol.60, No.576, pp.2664-2669, (1994).
- [35] 三枝省三, 斎藤博, 加藤盛一, 梅基敏行, 末永秀夫, 山内良明, 二重平行リンクサスペンション形対物レンズアクチュエータの減衰設計, 日本機械学会論文集(C 編), Vol.63, No.610, pp.2023-2029, (1997).
- [36] 木村勝彦, 小笠原浩, 末永秀夫, 薄型 DVD 装置用対物レンズアクチュエータの開発, 日本機械学会論文集(C 編), Vol.68, No.674, pp.2956-2961, (2002).
- [37] 木村勝彦, 小笠原浩, 佐竹光雄, 伊東徹雄, 薄型光ディスク装置用傾き補正三次元アクチュエータの開発, 日本機械学会論文集(C 編), Vol.71, No.702, pp.597-602, (2005).
- [38] 米澤実, HD DVD システムの機構・サーボ技術, 東芝レビュー, Vol.60, No.1, pp.21-24, (2005).
- [39] 木村勝彦, 加藤盛一, 斎藤英直, 高志岩, 3 極磁場構造を用いたスリム型 BD 光ピックアップ対物レンズアクチュエータ, 日本機械学会情報・知能・精密機器部門講演会講演論文集(IIP2013), pp.238-240, (2013).
- [40] 田中裕司, 古賀稔浩, 井出淳, 富崎幹雄, 前田文秀, 9.5mm 厚 Super Multi ドライブ, 松下テクニ

- カルジャーナル, Vol.51, No.5, pp.512-516, (2005).
- [41] 堀之内昇吾, 弓田昌平, 松尾友裕, 12.7mm 厚スリム型 BD ドライブ, パナソニック技報, Vol.54, No.3, pp.145-150, (2008).
- [42] B. Y. Song, D. J. Lee, H. j. Kang, W. I. Cho, B. R. Ryoo, P. Y. Seong, K. H. Lee, N. C. Park and Y. P. Park, Mechanical filter on actuator for system stability of 9.5 mm drive, Japanese Journal of Applied Physics, Vol.43, No.7B, pp.4786-4789, (2004).
- [43] H. Nakata, T. Nagata and H. Tomita, Ultra compact optical pickup with integrated optical system, Japanese Journal of Applied Physics, Vol.45, No.8B, pp.6713-6717, (2006).
- [44] M. Togashi, T. Sasaoka, H. C. Lee and H. S. Jeong, Miniaturized optical pickup and mechanism for mobile optical disc drive, Japanese Journal of Applied Physics, Vol.43, No.7B, pp.4763-4767, (2004).
- [45] Y. M. Cheong, J. W. Lee, K. Kim, S. S. Kim, J. C. Choi, C. S. Chung and I. S. Park, Pickup for small form factor optical drive with 2.3 mm height actuator, Japanese Journal of Applied Physics, Vol.44, No.5B, pp.3356-3359, (2005).
- [46] P. C. Choi, Y. C. Lin and S. Cheng, Optimization of seesaw swing arm actuator design for small form factor optical disk drive, Japanese Journal of Applied Physics, Vol.49, 052502, (2010).
- [47] 西原浩, 春名正光, 栖原敏明, 光集積回路, オーム社, pp.291-292 (1985).
- [48] 栖原敏明, 西原浩, 光ピックアップの光集積回路化, O plus E, Vol.76, pp.102-108, (1986).
- [49] 栖原敏明, 西原浩, 光集積ディスクピックアップにおける読出し応答の解析, 光学, Vol.18, No.2, pp.82-90, (1989).
- [50] H. Kando, M. Kainuma, M. Muranishi and A. Ichikawa, An integrated optical pickup with parabolic waveguide mirrors, Microoptics Conference '91 Technical Digest, pp.238-241, (1991).
- [51] H. Kando, Y. Kusano, M. Kainuma, M. Muranishi and A. Ichikawa, Increasing the wavelength tolerance of an integrated optical pickup using a micro grating coupler, Proceedings of Conference on Lasers and Electro-Optics 1992, pp.336-337, (1992).
- [52] 木原民, 青木真金, 藤田俊介, 広江昭彦, 横森清, 導波路型光磁気信号検出素子の基本特性, 光メモリシンポジウム論文集, pp.53-54, (1992).
- [53] 栖原敏明, 岡田訓明, 河村政宏, 西原浩, 光源分離型光集積ディスクピックアップ, 光メモリシンポジウム論文集, pp.109-110, (1992).
- [54] K. Yokomori, S. Fujita, S. Misawa, T. Kihara, M. Aoki, H. Hiroe, A. Takamura, Y. Nakayama and H. Funato, Integrated optical pickup with highly sensitive servo signal detection, Japanese Journal of Applied Physics, Vol.31, No.2B, pp.548-550, (1992).
- [55] 木村勝彦, 神藤英彦, 貝沼守, 村西勝, 市川厚司, 集積型光ディスクピックアップのサーボ信号高感度化, 日本機械学会通常総会講演論文集, Vol. C, pp.567-569, (1992).
- [56] 木村勝彦, 神藤英彦, 貝沼守, 村西勝, 集積型光ディスクピックアップによる信号読出し特性, 日本機械学会全国大会講演論文集, Vol. E, pp.514-516, (1992).
- [57] 村西勝, 神藤英彦, 貝沼守, 木村勝彦, 集積型光ピックアップによる実ディスクからの信号読出し, 光メモリシンポジウム論文集, pp.111-112, (1992).
- [58] Y. Yoshida, K. Minami, A. Yoshimoto, H. Yamamoto and Y. Kurata, Integrated hologram pickup with an optical waveguide device for magneto-optical disk players, Japanese Journal of Applied Physics, Vol.37, No.8, pp.4401-4404, (1998).

- [59] 高須賀祥一, 井島新一, 河内泰之, 中西秀行, 吉川昭男, 高速・高密度光ディスク用超薄型ホログラムユニット, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.98, No.254, pp.7-12, (1998).
- [60] 吉房幸司, 大寺一弘, 大野博文, 西村薫, 藤井憲晃, 高速度 CD-ROM 用薄型ピックアップ HPC-5H, シヤープ技報, No.72, pp.66-67, (1998).
- [61] 大塚尚孝, ホログラムレーザ, シヤープ技報, No.84, pp.58-62, (2002).
- [62] D. J. Lee, S. J. Park, J. Oh, N. C. Park, Y. P. Park and H. S. Jung, Development of rotary-type voice coil motor actuator for small-form-factor optical disk drive, Japanese Journal of Applied Physics, Vol.45, No.2B, pp.1124-1128, (2006).
- [63] S. M. Kang, J. E. Lee, W. C. Kim, N. C. Park, Y. P. Park, E. H. Cho, J. S. Sohn and S. D. Suh, Development of integrated small-form-factor optical pickup with Blu-ray disc specification, Japanese Journal of Applied Physics, Vol.45, No.8B, pp.6723-6729, (2006).
- [64] D. J. Lee, J. H. Woo, S. U. Kim, J. S. Oh, H. H. Yoo, N. C. Park, Y. P. Park, T. Shimano and S. Nakamura, Development of L-shaped rotary voice coil motor actuator for ultra slim optical disk drive using integrated design method based on coupled-field analysis, Japanese Journal of Applied Physics, Vol.46, No.6B, pp.3715-3723, (2007).
- [65] B. Zhang, J. Ma, L. Pan, X. Cheng, H. Hu and Y. Tang, High-sensitivity actuator with new magnetic circuit in optical pickup, Japanese Journal of Applied Physics, Vol.47, No.7, pp.5809-5811, (2008).
- [66] J. H. Woo, N. C. Park, Y. P. Park, K. S. Park, Y. S. Oh and K. B. Kim, Development of asymmetric twin objective lens actuator using integrated design method, Japanese Journal of Applied Physics, Vol.49, No.8, pp.08KA02.1-08KA02.2, (2010).
- [67] I. H. Choi, S. P. Hong, W. E. Chung, Y. J. Kim, M. H. Lee and J. Y. Kim, Concentrated anisotropic magnetization for high sensitivity of optical pickup actuator, IEEE Transactions on Magnetics, Vol.35, No.3, pp.1861-1864, (1999).
- [68] D. J. Lee, G. W. Jung, N. C. Park, H. S. Yang, Y. P. Park, B. Y. Song, W. I. Cho, P. Y. Seong and K. H. Lee, Coupled-field-analysis and dynamic improvement of ultra-slim optical pickup actuator, Japanese Journal of Applied Physics, Vol.44, No.5B, pp.3373-3378, (2005).
- [69] J. Ichihara, K. Tezuka and K. Ogawa, Development of actuators for small-size magneto-optical disk drives, Japanese Journal of Applied Physics, Vol.31, No.2B, pp.519-523, (1992).
- [70] 木村勝彦, 越智学, 水野隆一郎, 斎藤英直, 杉浦壽彦, 光ディスク装置の対物レンズアクチュエータにおける粘弾性減衰材を用いた支持系の周波数応答特性, 日本機械学会論文集, Vol.81, No.824, 14-00561/1-13, (2015).
- [71] 山田昭夫, シリコーンゲルを用いたばね-質量系のインパルス応答, 日本機械学会論文集(C編), Vol.60, No.571, pp.837-841, (1994).
- [72] 清水信行, 粘弾性振動子の動的性質, 日本機械学会論文集(C編), Vol.61, No.583, pp.902-906, (1995).
- [73] 清水信行, 張衛, 分数階微分オペレータで記述される粘弾性体の有限要素解析, 日本機械学会論文集(C編), Vol.66, No.647, pp.2135-2142, (2000).
- [74] 上田広樹, 井上善雄, 一方向繊維強化プラスチックの減衰特性解析, 日本機械学会論文集(C編), Vol.66, No.647, pp.2115-2121, (2000).
- [75] 佐藤美洋, 涌井太, 曾我部潔, 清水信行, シリコーン β ゲル-質量系の定常応答, Dynamics and

- Design Conference 2000, No.647, (2000).
- [76] 佐藤美洋, 野口恵, 高固有振動数片持ちはり用粘弾性動吸振器, Dynamics and Design Conference 2010, No.530, (2010).
- [77] 三枝省三, 加藤盛一, 斎藤博, 伊熊昭等, CD-ROM 用平面サスペンション形二次元対物レンズアクチュエータの動的設計, 日本機械学会論文集(C編), Vol.62, No.599, pp.2730-2736, (1996).
- [78] 山中一彦, 奥田拓也, 東條友昭, 井島新一, 小野澤和利, 上田大助, 久保淳一, 北川清一郎, 磁性流体を用いた高放熱構造を有する光学系駆動型光ピックアップ, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.104, No.287, pp.17-22, (2004).
- [79] B. Y. Song, D. J. Jang, Y. B. Lee and J. Lee, Improvement of system performance of the optical disc drive adopting ferrofluidic damper for pickup actuator, Japanese Journal of Applied Physics, Vol.46, No.6B, pp.3741-3746, (2007).
- [80] 木村勝彦, 佐藤良広, 斎藤英直, 小笠原浩, 杉浦壽彦, 光ディスク装置の対物レンズアクチュエータにおけるローリングモーメント低減構造, 日本機械学会論文集, Vol.80, No.814, 2014dr0161/1-15, (2014).
- [81] K. Kimura, H. Saito and T. Sugiura, Reduction in rolling tilt of objective lens actuators for optical disc drives, 日本 AEM 学会誌, Vol.23, No.3, pp.504-509, (2015).
- [82] S. Kim, M. G. Song, N. C. Park, J. Yoo, Y. P. Park and K. S. Park, Optimal design of moving-magnet type actuator for optical disk drives considering effect of coil electromagnet, IEEE Transactions on Magnetics, Vol.45, No.5, pp.2228-2231, (2009).
- [83] 背戸一登, 梶原逸朗, 長松昭男, 森藤浩明, 制御性を考慮した構造最適化法による光サーボ系の設計 (第1報), 日本機械学会論文集(C編), Vol.55, No.516, pp.2029-2036, (1989).
- [84] 梶原逸朗, 背戸一登, 長松昭男, 制御性を考慮した構造最適化法による光サーボ系の設計 (第2報), 日本機械学会論文集(C編), Vol.55, No.516, pp.2037-2044, (1989).
- [85] 梶原逸朗, 背戸一登, 長松昭男, 森藤浩明, 中江信之, 制御性を考慮した構造最適化法による光サーボ系の設計 (第3報), 日本機械学会論文集(C編), Vol.55, No.516, pp.2045-2052, (1989).
- [86] 市原順一, 手塚耕一, 蒔田昭彦, 光磁気ディスク装置用トラッキング機構, 精密工学会誌, Vol.58, No.8, pp.1393-1398, (1992).
- [87] 立石潔, 古川淳一, 村尾則明, 大滝賢, 岩崎正之, 液晶によるチルトサーボ, 第58回応用物理学学会学術講演会講演予稿集, No.3, p.1135, (1997).
- [88] N. Eguchi, M. Oka, H. Suganuma, K. Uemura and S. Kubota, Fast disk skew servo for optical disk pickup, Symposium on Optical Memory, pp.83-84, (1994).
- [89] 松井勉, 北原晋一, 山方英人, 花木真一, バランス駆動方式を用いた高密度光ディスク装置用3軸光ヘッド, 電子情報通信学会論文誌 C-II, Vol.77, No.2, pp.110-119, (1994).
- [90] 小守孝之, 三浦篤志, 田中伸和, 河面悠, 光ピックアップ対物レンズのチルト制御, 電子情報通信学会論文誌 C-II, Vol.77, No.9, pp.408-409, (1994).
- [91] 永里誠, 茂木康男, 石橋頼幸, 菊入信孝, 高密度光ディスク用4軸対物レンズアクチュエータの開発, 日本機械学会年次大会講演論文集, Vol.5, pp.151-152, (1999).
- [92] J. Aso, T. Haruguchi and S. Horinouchi, High response actuator with tilt function for 12.7 mm slim optical disc drives, International Symposium on Optical Memory and Optical Data Storage Topical Meeting 2002, pp.326-328, (2002).

- [93] T. Kawasaki, G. Akanuma, I. Maeda, T. Kitazawa and S. Andoh, Radial and tangential tilt servo using four-axis actuator, Japanese Journal of Applied Physics, Vol.44, No.5B, pp.3402-3404, (2005).
- [94] 中垣保孝, 八木克哉, 波多野洋, 山崎茂, 黒釜龍司, 田村希志臣, レンズアクチュエータのロバスト設計, Konica Minolta Technology Report, Vol.8, pp.122-129, (2011).
- [95] S. N. Hong, I. H. Choi, Y. J. Kim, M. S. Suh and J. Y. Kim, Force characteristics of slim pickup actuator to improve actuating performances, Japanese Journal of Applied Physics, Vol.40, No.3B, pp.1771-1774, (2001).
- [96] 加藤喜久次, 光ディスク用軸しゅう動レンズアクチュエータの二段トラッキング制御特性の改善, 日本機械学会論文集(C編), Vol.60, No.576, pp.2649-2656, (1994).
- [97] 松井勉, 高密度光ヘッド用軸摺動式アクチュエータの線形性, 電気学会論文誌 C, Vol.115, No.8, pp.970-974, (1995).
- [98] 中村恵司, 宇多小路雄, 渡辺教弘, 矢部実透, 篠田昌久, 木目健治朗, DVD 用ツインレンズ光ピックアップの開発, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.95, No.220, pp.53-60, (1995).
- [99] 山内良明, 石井英二, 木村勝彦, 佐竹光雄, 三木久弘, 高速 DVD-ROM 装置のディスク振動の検討, 日本機械学会情報・知能・精密機器部門講演会講演論文集(IIP2001), pp.107-110, (2001).
- [100] H. Awano, H. Ido, H. Kishi, A. Inaba, H. Yamanaka, M. Tani, S. Osawa, M. Yoshihiro, T. Iida, Y. Watanabe, N. Ota, T. Yoshida, T. Shimizu, I. Naniwa, Y. Abe, K. Yoshida and K. Sato, Aerodynamic stability and high speed W/R characteristics of ultra thin disk for SVOD, International Symposium on Optical Memory 2006, We-H-02, (2006).
- [101] 木村勝彦, 斎藤英直, 千賀淳一, 羽藤順, 平行四辺形コイルを用いた光ピックアップ対物レンズアクチュエータ, 日本機械学会情報・知能・精密機器部門講演会講演論文集(IIP2011), pp.123-124, (2011).
- [102] 日本機械学会編, 振動のダンピング技術, 養賢堂, pp.69-94, (1998).
- [103] 長松昭男, モード解析入門, コロナ社, pp.79-130, (1993).
- [104] 勝木学, 矢部昭雄, 清水貴久男, 今中良史, Blu-ray/HD DVD Dual ドライブ, 日立評論, Vol.89, No.10, pp.30-33, (2007).

著者論文目録

1. 定期刊行誌掲載論文（主論文に関連する原著論文）

- (1) 木村勝彦, 小笠原浩, 末永秀夫, “薄型 DVD 装置用対物レンズアクチュエータの開発”, 日本機械学会論文集(C 編), Vol.68, No.674, pp.2956-2961, (2002).
- (2) 木村勝彦, 佐藤良広, 斎藤英直, 小笠原浩, 杉浦壽彦, “光ディスク装置の対物レンズアクチュエータにおけるローリングモーメント低減構造”, 日本機械学会論文集, Vol.80, No.814, 2014dr0161/1-15, (2014).
- (3) 木村勝彦, 越智学, 水野隆一郎, 斎藤英直, 杉浦壽彦, “光ディスク装置の対物レンズアクチュエータにおける粘弾性減衰材を用いた支持系の周波数応答特性”, 日本機械学会論文集, Vol.81, No.824, 14-00561/1-13, (2015).
- (4) K. Kimura, H. Saito and T. Sugiura, “Reduction in rolling tilt of objective lens actuators for optical disc drives”, 日本 AEM 学会誌, Vol.23, No.3, pp.504-509, (2015).

2. 定期刊行誌掲載論文（その他の論文）

- (1) 木村勝彦, 吉田忍, 斎藤博, 吉田宏靖, 品田聡, 市川文仁, “高速 CD-ROM 装置用対物レンズアクチュエータの開発”, 日本機械学会論文集(C 編), Vol.66, No.652, pp.3991-3996, (2000).
- (2) 木村勝彦, 小笠原浩, 佐竹光雄, 伊東徹雄, “薄型光ディスク装置用傾き補正三次元アクチュエータの開発”, 日本機械学会論文集(C 編), Vol.71, No.702, pp.597-602, (2005).

3. 国際会議論文（査読付きの full-length papers）

なし

4. その他の国際会議発表

- (1) K. Kimura*, N. Watanabe, S. Yoshida and S. Nakatsuka, “Wavefront-controllable laser diode using separated current injection”, Second International Symposium on Optics in Engineering, (Tsukuba Memorial Foundation, Tsukuba, Japan), No.B2, (1997).
- (2) K. Kimura*, H. Saito and T. Sugiura, “Reduction in rolling tilt of objective lens actuators for optical disc drives”, 8th Asia-Pacific Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics, (APSAEM 2014, Taichung, Taiwan), pp.72-73, (2014).
- (3) F. Issiki*, N. Maeda, K. Kimura, H. Suenaga and T. Kurokawa, “Triple-write one-lens optical pickup for Blu-ray disc/DVD/CD supporting 4x Blu-ray read/write”, International Conference on Consumer Electronics, (ICCE 2007, Las Vegas, USA), pp.117-118, (2007).

5. 国内学会発表

- (1) 木村勝彦*, 神藤英彦, 貝沼守, 村西勝, 市川厚司, “集積型光ディスクピックアップのサーボ信号高感度化”, 第 69 期通常総会講演会 (日本機械学会, 東京), Vol. C, pp.567-569, (1992).
- (2) 木村勝彦*, 神藤英彦, 貝沼守, 村西勝, “集積型光ディスクピックアップによる信号読出し特性”, 第 70 期全国大会 (日本機械学会, 長野), Vol. E, pp.514-516, (1992).
- (3) 木村勝彦*, 村西勝, 貝沼守, 神藤英彦, 三枝省三, “光磁気ディスク装置用 MO・サーボ信号一体

検出器”, 第 55 回応用物理学学会学術講演会 (応用物理学会, 名古屋), No.3, p.918, (1994).

- (4) 木村勝彦*, 佐竹光雄, 斎藤博, 市川文仁, 品田聡, “高倍速 CD-ROM 装置用対物レンズアクチュエータの開発”, IIP’99 情報・知能・精密機器部門講演会 (日本機械学会, 東京), pp.136-138, (1999).
- (5) 木村勝彦*, 小笠原浩, 末永秀夫, “薄型 DVD 装置用対物レンズアクチュエータの開発”, IIP2001 情報・知能・精密機器部門講演会 (日本機械学会, 東京), pp.89-92, (2001).
- (6) 木村勝彦*, 佐竹光雄, 小笠原浩, 伊東徹雄, “光ディスク傾き補正用スリム 3 次元アクチュエータの開発”, 2002 年度年次大会 (日本機械学会, 東京), pp.257-258, (2002).
- (7) 木村勝彦*, 佐藤良広, 斎藤英直, 小笠原浩, “光ディスク装置用対物レンズアクチュエータにおけるローリングモーメントの低減”, IIP2004 情報・知能・精密機器部門講演会 (日本機械学会, 東京), pp.108-110, (2004).
- (8) 木村勝彦*, 佐藤良広, 羽藤順, “光ディスク装置用 3 マグネット型対物レンズアクチュエータ”, IIP2005 情報・知能・精密機器部門講演会 (日本機械学会, 東京), pp.199-202, (2005).
- (9) 木村勝彦*, 斎藤英直, 千賀淳一, 羽藤順, “平行四辺形コイルを用いた光ピックアップ対物レンズアクチュエータ”, IIP2011 情報・知能・精密機器部門講演会 (日本機械学会, 東京), pp.123-124, (2011).
- (10) 木村勝彦*, 加藤盛一, 斎藤英直, 高志岩, 羽藤順, “3 極磁場構造を用いたスリム型 BD 光ピックアップ対物レンズアクチュエータ”, IIP2013 情報・知能・精密機器部門講演会 (日本機械学会, 東京), pp.238-240, (2013).
- (11) 木村勝彦*, 越智学, 水野隆一郎, 斎藤英直, 杉浦壽彦, “光ディスク装置の対物レンズアクチュエータにおける粘弾性減衰材を用いた支持系の周波数応答特性”, Dynamics and Design Conference 2014 (日本機械学会, 東京), No.305, (2014).
- (12) 村西勝*, 神藤英彦, 貝沼守, 木村勝彦, “集積型光ピックアップによる実ディスクからの信号読出し”, 光メモリシンポジウム’92 (応用物理学会, 横浜), pp.111-112, (1992).
- (13) 山内良明*, 石井英二, 木村勝彦, 佐竹光雄, 三木久弘, “高速 DVD-ROM 装置のディスク振動の検討”, IIP2011 情報・知能・精密機器部門講演会 (日本機械学会, 東京), pp.107-110, (2011).
- (14) 山崎達也*, 木村勝彦, 福田和之, “光ピックアップにおける光学部品の回転ずれ低減構造”, IIP2013 情報・知能・精密機器部門講演会 (日本機械学会, 東京), pp.243-244, (2013).
- (15) 山崎達也*, 木村勝彦, 福田和之, “光ピックアップにおける光学部品の回転ずれ低減構造の開発”, 2013 年度年次大会 (日本機械学会, 岡山), No.S162013, (2013).
- (16) 越智学*, 木村勝彦, 斎藤英直, 水野隆一郎, “光ピックアップのミラーの回転振動を考慮した対物レンズの焦点変位解析”, IIP2014 情報・知能・精密機器部門講演会 (日本機械学会, 東京), No.B-2-5, (2014).

6. その他

- (1) 受賞 2001 年度 日本機械学会 技術奨励賞
- (2) 受賞 2002 年度 日本機械学会 情報・知能・精密機器部門ベストプレゼンテーション表彰
- (3) 解説 木村勝彦, “次世代光ディスクの高密度・高精度・高速化, 第 1 章 第 1 節 アクチュエータの設計と最適化”, 技術情報協会, pp.3-10, (2004).

謝 辞

本研究は、著者が日立製作所において従事してきた光ディスク装置の対物レンズアクチュエータに関して、慶應義塾大学大学院理工学研究科後期博士課程にて、慶應義塾大学理工学部 杉浦壽彦教授のご指導のもとに行ったものです。社会人ドクターとして快く受け入れて下さり、研究のまとめ方から論文執筆に至るまで多岐にわたりご指導下さいました杉浦教授に厚くお礼申し上げます。

本論文を作成するにあたり、有益なご討論と貴重なご助言を賜りました慶應義塾大学理工学部 澤田達男教授、小茂鳥潤教授、竹村研治郎准教授、早稲田大学基幹理工学部 川本広行教授に深く感謝申し上げます。

日立製作所研究開発グループ機械イノベーションセンタの玉本淳一氏、馬場淳史氏、日立ハイテクロジーズの小山昌宏氏には、会社に勤務しつつ博士課程に在学する機会を与えていただきました。日立製作所情報・通信システムグループの神藤英彦氏、同 電力・インフラシステムグループの吉田忍氏、就実大学経営学部 三枝省三教授には、日立製作所機械研究所入社当初から、研究開発の進め方の基礎からご指導いただきました。深く感謝いたします。

光ディスク装置関連の研究開発を共に行った日立製作所研究開発グループ機械イノベーションセンタの加藤盛一氏、佐藤良広氏、越智学氏、木下康氏、日立産業制御ソリューションズの山内良明氏に感謝いたします。

日立エルジーデータストレージの佐々木徹氏、矢部昭雄氏、末永秀夫氏、福田和之氏、小笠原浩氏、斎藤英直氏、水野隆一郎氏、羽藤順氏、山田総一郎氏、斎藤博氏、梅基敏行氏、佐竹光雄氏、柴田徹氏、北田保夫氏、日立産業制御ソリューションズの伊東徹雄氏ほか、多くの方々に対物レンズアクチュエータの開発に際してご協力いただきました。心から感謝いたします。

最後に、常に温かく見守ってくれた両親と、支えになってくれた家族に感謝します。