

光磁気ディスク装置開発における シミュレーション技術

Simulation Technologies for the Development of Magneto-Optic Disk Drives

あらまし

光磁気ディスク装置はその名称から明らかなように、磁気記録技術と光学技術を用いて情報を記録する装置である。したがってこの装置の開発にあたっては電磁気学および光学的な知識が必要とされることはもちろんであるが、そのほかに機械、制御、信号処理技術など、広範な技術分野の適用が要求される。しかも、これらの技術は互いに影響し合い、装置の性能を左右する。このような多岐な技術分野を包含する複雑な系においては、シミュレーション技術を用いた装置の特性評価が、情報記録密度の向上を主とした高性能化という観点から必須である。さらに、シミュレーション技術の適用は試作回数低減による開発の効率化、開発期間の短縮などにも有効である。本稿では光磁気ディスク装置開発に適用されている機構部振動解析、電磁界解析および光学系解析の各シミュレーション技術に関して、その目的と得られた成果について概略を解説する。

Abstract

Magneto-optic (MO) disk drives record information using magnetic recording and optical technologies. Engineers who develop MO disk drives not only need a knowledge of electromagnetism and optics but must also be familiar with a wide range of other technologies such as mechanics, control, and signal processing. These technologies are interrelated, and their applications to an MO disk drive determine its performance. Developing an MO disk drive, which is a complex system covering various fields of technologies, requires an evaluation of the drive's characteristics using simulations to enhance its performance (mainly its recording density). Use of simulations also leads to a reduced number of prototypes, more efficient development, and shorter development periods. This paper describes the simulation technologies for analyzing the vibrations of mechanical parts, electromagnetic fields, and optical systems which have been used for developing MO disk drives and the outcomes of their applications.



市原順一（いちはら じゅんいち）

ペリフェラルシステム研究所 所属
現在、光磁気ディスク装置の開発に
従事。



手塚耕一（てづか こういち）

ペリフェラルシステム研究所 所属
現在、光磁気ディスク装置の開発に
従事。

まえがき

富士通は1992年から3.5インチ光磁気ディスク装置の商品化を開始した。最初の128 Mバイト容量装置から、230 Mバイト、640 Mバイトと大容量化し、1999年2月に1.3 Gバイト装置を製品化し、さらなる大容量装置の製品化に向けて研究開発が行われている。

光磁気ディスク装置の記録原理は磁気記録であるが、光を用いることにより、大容量で信頼性の高い可換媒体装置として構成したことが最大の特徴である。ほかの方式の光ディスク装置と比較して、データ転送速度、アクセス速度などの性能面で優れていることから、アーカイバル装置として広く利用されるようになり、出荷数が年々増大している。

光磁気ディスク装置の基本構成

光磁気ディスク装置の基本的な構成を図-1に示す。光磁気ディスク媒体にはプリグループと呼ばれる案内溝があらかじめ加工されており、この溝に沿って情報が記録される。対物レンズはキャリッジと呼ばれる媒体半径方向に移動する機構に搭載されて所定記録トラック(プリグループ)位置へと移動する。キャリッジは通常可動コイルモータで駆動される(モータは図示していない)。固定部の光学系に含まれる光源(半導体レーザー: LD)から発した光は、対物レンズを介して記録膜表面に絞り込まれ、反

射して同じ経路をたどって固定光学系へと至り、ここで往路と分岐されて各種信号を検出する光学系へと導かれる。光磁気記録の基本的な原理は磁気記録である。対物レンズによってレーザー光を媒体記録膜に直径1 μm程度にまで絞り込むことにより温度が上昇し、記録膜は磁化反転しやすい特性へと変化する。この状態で、バイアス磁石と呼ばれる電磁石によって磁界をかけると、その磁界に従って記録膜に光の当たっている部分の磁化が変化し、情報が微少な磁区として記録される。再生は、記録膜磁化の方向によって媒体からの反射光の偏光面が回転する効果(磁気カー効果)を利用し、検光子(光の特定方位の偏波成分だけを透過させる光学素子)を用いて偏光面の回転角を検出することにより行う。高密度化に伴いトラックピッチ(プリグループの間隔)は小さくなり、1.3 Gバイト容量の媒体で0.9 μmとなっている。

光磁気ディスク装置はその形態の類似性から、磁気ディスク装置(HDD)と共通な技術分野が少なくないが、このように光を利用しているということに起因する差も多い。

シミュレーション技術の適用

現在、富士通の光磁気ディスク装置開発において、シミュレーション技術が適用されている主な技術分野と適用対象は下記のようなものである。

(1) 機構部振動解析(各種アクチュエータ可動部、装置

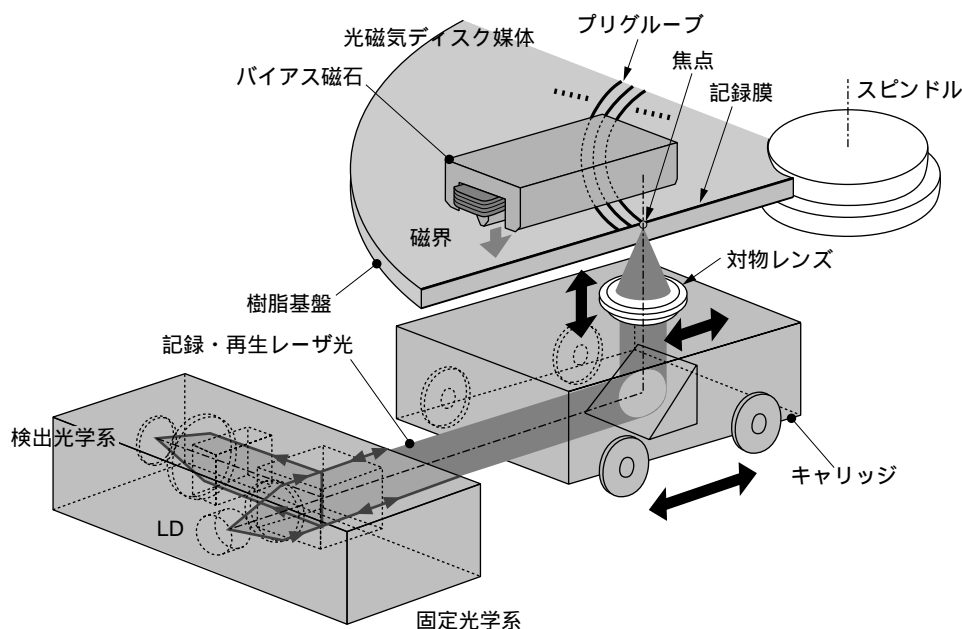


図-1 光磁気ディスク装置の概略構成

Fig.1-Magneto-optic disk drive.

- ベースなどの設計および評価など)
- (2) 電磁界解析(アクチュエータ電磁駆動機構の設計および評価など)
- (3) 制御系解析(アクチュエータ制御系の設計および評価など)
- (4) 光学系解析(収差・波面解析を用いた光学系および光学素子開発, 偏光解析による光学系評価, 媒体設計など)
- (5) 信号処理解析(光磁気信号評価, 媒体設計および評価など)

個々の技術分野に対するだけでなく、複数の技術分野を結合した形のシミュレーションも行われている。例えば、制御系解析は機構部振動シミュレーションデータを利用して行われ、信号処理と光学系解析は連携したシミュレーションが行われている。

本稿ではこれらの中で、とくに機構部振動解析、電磁界解析および光学系解析シミュレーション技術に的を絞って解説する。

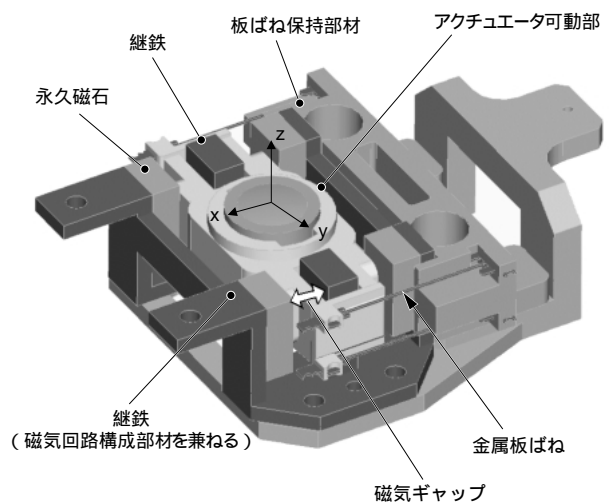
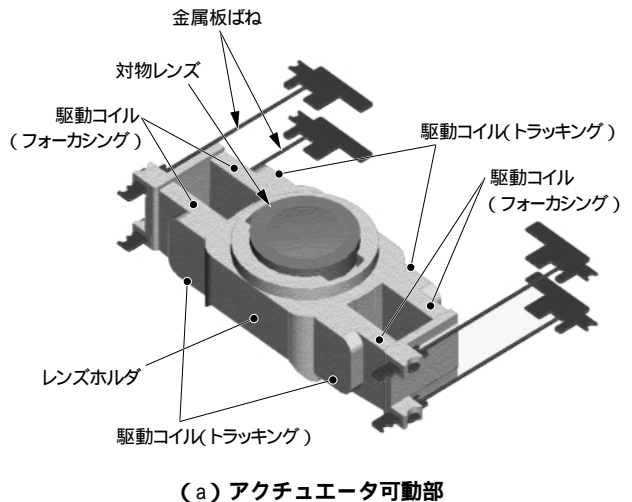
機構部振動解析シミュレーション技術

光磁気ディスク媒体は樹脂で製作されているため、面振れが0.1 mm程度と大きい。また、可換媒体であることからスピンドルへのチャッキングの際に心ずれが生じ、トラックの偏心も60 μm程度と大きい。このような大きな面振れおよび偏心を持って回転する媒体に対して、対物レンズ焦点を媒体記録膜表面上およびトラック(プリグルーブ)上に正確に一致させることが、高密度化という観点から極めて重要である。焦点を媒体記録膜表面に一致させる制御を「フォーカシング制御」、トラック上に一致させる制御を「トラッキング制御」という。フォーカシング制御で許容される位置誤差は1 μm以下である。誤差がより大きくなると、記録膜上の光ビーム径が大きくなるいわゆるピンぼけ状態となって、高密度の記録・再生ができなくなる。トラッキング制御の許容位置誤差は、トラック間隔0.9 μmに対して0.1 μm以下である。誤差が大きくなると、隣接トラック上に情報を記録してしまったり、あるいは再生信号に隣接トラックの信号が混入する(クロストーク)といった問題が発生するので、同様に高密度化が難しくなる。

対物レンズ焦点を許容誤差内で媒体記録膜表面およびトラックに追従させるために、フォーカシング、トラッキング制御系の性能を十分高める必要がある。これらの制御系の性能を表す指標の一つとして、制御帯域と呼ばれる周波数がある。制御帯域が高いほど制御系の性能は

優れており、焦点の位置誤差を小さくできる。光磁気ディスク装置の場合には、フォーカシング、トラッキング制御とも3 kHz以上の値が要求されている。

これらの制御には、図-2に示すレンズアクチュエータと呼ばれる対物レンズを精密に移動させる機構が用いられる。このアクチュエータは図-1のキャリッジに搭載されている。この機構は4本の金属製の板ばねによって、対物レンズ、トラッキングおよびフォーカシング駆動コイルが搭載された可動部(図-2(a))が支持され、可動コイル型モータにより、対物レンズをその光軸方向に駆動してフォーカシング制御を、媒体の半径方向に駆動してトラッキング制御を行う。可動コイル型モータの駆動原理は、磁束中を移動する電荷に作用するローレンツ力を利用するものである。永久磁石のN極とS極を連結する継鉄



(a) アクチュエータ可動部

(b) アクチュエータ全体構成図

図-2 レンズアクチュエータ
Fig.2-Lens actuator.

の一部を切断して磁気ギャップを構成し、磁気ギャップ中の磁束と、このギャップに挿入される各駆動コイルに流れる電流の相互作用により、コイルにローレンツ力が発生し可動部が駆動される。アクチュエータの非可動部には永久磁石および継鉄から成る磁気回路が設置されている。

このようなアクチュエータ機構は多くの固有振動モードを持っている。その固有振動数と等しい周波数でアクチュエータが駆動された場合、固有モードは励振されて共振が発生することがある。アクチュエータの最低次の共振(通常、支持板ばねのたわみ共振である)に関しては、制御系によってその影響をなくすることができる。しかし、より高次の共振の影響をなくすることは難しく、この結果、高次の共振が制御系によって不安定化され、発振し、正確な焦点の位置決めが不可能になる。この現象を回避するために、光磁気ディスク装置のような情報機器の場合、一般に制御帯域の10倍以下の周波数範囲にアクチュエータの高次共振が存在しないことが要求される。このような振動特性を実現するため、アクチュエータ設計においては振動解析シミュレーションが非常に重要である。

図-2のレンズアクチュエータ可動部の振動解析シミュレーション結果を図-3に示す。本図ではフォーカシング駆動時に43 kHzで共振として現れる固有モードの変形状態を示している。可動部がその中央部でたわむような変形を行う。可動部の構造や材料選択を工夫して、このような変形に対する剛性を高めるような設計を行った結果、固有振動数が43 kHzと、目標とする制御帯域(3.5 kHz)の10倍以上になり、制御上問題にならないレベルにすることに成功した例である。

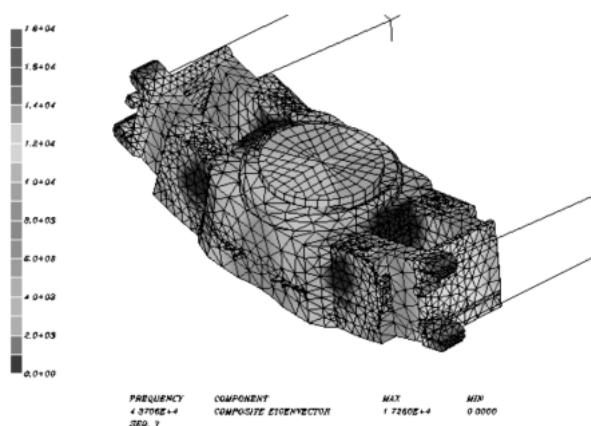


図-3 可動部共振モード(43 kHz)
Fig.3-Mode shape of resonance.

振動解析シミュレーションはアクチュエータのみに限らず、アクチュエータを搭載するキャリッジ、装置ベースなど、さらには媒体の振動解析にも適用され、必要とされる諸性能実現に役立っている。⁽¹⁾

電磁界解析シミュレーション

前章で述べたアクチュエータの固有モードは実際には無限個存在し、10 kHz以下の低周波数領域では図-3のような可動部が変形するモードは少なく、主に可動部を支持する金属板ばねの変形に起因するモードが多い。固有モードは、これが存在するからといって直ちに共振が発生し、制御系の安定性が損なわれるとは限らない。この固有モードが励振されるような力学的条件下で共振が生ずる。とくに、低周波数域の支持板ばねが変形する固有モードは、可動部に加わる力のわずかな不釣り合いによって容易に励振され、制御系の安定性を損なうことがある。したがって、アクチュエータに作用する慣性力、電磁駆動力などについて、その大きさ、方向、集中的に見た場合の力の作用点に関して十分な分析が必要となる。

慣性力に関しては3D-CADによるマス・パラメタ分析が有効であるが、電磁駆動力について分析するためには、磁気ギャップ中の磁束密度を計算し、駆動コイルとの位置関係から発生力を求めなければならない。このために電磁界解析シミュレーションが必要となる。従来、このような静磁界の場合には、磁気回路と等価な電気回路モデル(集中定数系モデル)を用いた解析が行われていた。しかし、アクチュエータが小型化されるにつれ、磁気ギャップ寸法がほかの磁気回路寸法と比較して相対的に大きくなり、磁気ギャップ以外の部分に洩れ出る磁束(漏洩磁束)の影響が大きくなる。この結果、従来の単純な集中定数系モデルでは実際の系を正確に表現できなくなり、解析の精度が低下するという問題があった。より正確な設計を行うため、分布定数系モデルによるシミュレーションが必須となっている。

図-4は図2で示したレンズアクチュエータの磁気ギャップ中の磁束密度分布を計算した結果である。磁気ギャップ中の磁束密度分布が一樣でない場合には、コイルの位置によって発生力が異なったり、並進力だけを発生するように設計したつもりでも、並進力とともに偶力を発生してしまうようなことが起こる。これらはいずれも固有モードを励振する原因となり得る。図-4に示す結果では、比較的一樣な磁束密度分布が得られているが、これは、シミュレーションを繰り返し、ギャップ中の磁束密度分布が一樣でなくなるような要因をとり除いて

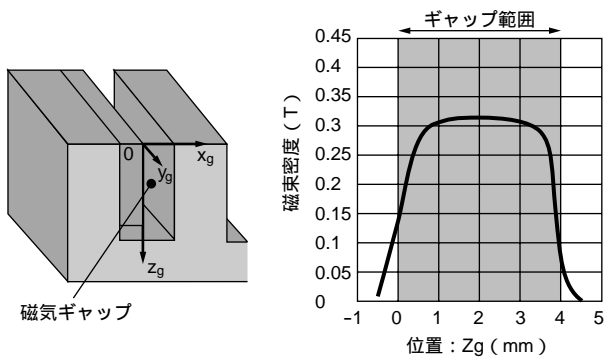


図4 磁束密度分布計算結果
(x_g, y_g 方向ともギャップの中央での計算結果)
Fig.4-Calculated distribution of flux density.

いった結果、得られたものである。

電磁界解析シミュレーションは、上記のような摘用以外にも、ギャップ磁束密度を高めて駆動特性を効率化するための設計、アクチュエータ磁気回路の漏洩磁束が記録特性に及ぼす影響の評価、バイアス磁石の設計など、各方面に適用されている。

光学系解析シミュレーション

光磁気ディスク装置の高密度化に伴い、そこに使われる光学系の精度への要求はより高度なものとなっている。例えば各光学素子の面精度不良によるわずかな波面収差が再生信号品質の低下を招くからである。光学的収差は各光学素子で発生した収差が重畳されるという性質を持っている。したがって、媒体記録膜表面での収差をより小さくして、良好な信号品質を得るためには、光源から記録膜表面に至る光路に介在する光学素子の精度管理が重要である。対物レンズはもちろんのこと、反射ミラー、プリズムに至るまで、部品設計段階から光学系全体を通した解析を行って、その設計仕様を定めることが必要となる。光学素子はその製作や評価に多くの時間と設備が必要となることが多く、また試作コストも高いことから、光学系解析シミュレーションは光磁気ディスク装置開発において重要な位置を占めている。

光磁気ディスク装置開発において用いられる光学系解析シミュレーションは、主に、回折理論による波面解析に適用され、古典的な幾何光学解析はレンズ設計以外ではあまり用いられない。回折計算は二次元フーリエ積分を用いて行われる。最近ではスーパーコンピュータの利用やFFT(Fast Fourier Transformation)の適用により、大規模な光学系に対しても比較的短時間で解析が可能になっている。⁽²⁾

図-5は媒体法線と対物レンズ光軸間に角度偏差がある

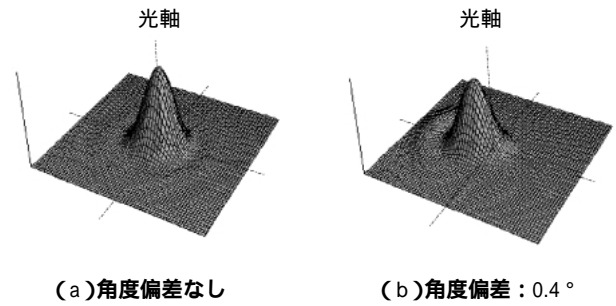


図5 媒体表面における光強度分布
Fig.5-Intensity distribution.

場合の、記録膜表面での光の強度分布を計算した結果である。図-5(a)は角度偏差のない場合で光が光軸を中心として真円状に絞られている。図-5(b)は角度偏差のある場合で、光軸に対してアンバランスな分布となっている。これはコマ収差と呼ばれる収差が発生した結果起こる現象で、このような現象が発生した場合は、光が隣接トラックに及ぶことになり、クロストークが発生するほか、再生信号品質自体も低下する。記録密度をより高めるためには、このような角度偏差を小さくすることが要求されている。このようなシミュレーションを通して、レンズアクチュエータを組み立てる場合の対物レンズの光軸精度など、光学系の設計仕様が定められる。

正確なトラッキング制御を行うために、プリグループと焦点間の相対位置誤差を検出する必要があるが、この検出は光学的に行われる。プリグループは、光の波長に対してある特定の深さを持っている。この結果、溝部からの反射光波面と非溝部からの反射光波面は溝深さに応じた位相差を持つ。このような光が回折することにより、プリグループと焦点間の相対位置に応じて、媒体からの反射光の強度分布は変化する。この強度分布の変化をフォトダイオードのような光電検出器を用いて測定し、その結果から相対位置誤差を検出することができる。

図-6は、プリグループに対する焦点の位置に応じた反射光の強度分布を、シミュレーションにより求めた結果を示す。焦点がプリグループの中心にある場合{焦点位置(a)},またはグループ間の中心にある場合{同(b)}は、反射光の強度は左右対称の分布を持っている。一方、焦点位置がこのような位置関係からはずれている場合{同(c),(d)}は、強度分布は非対称となる。強度分布は、焦点の相対位置誤差量、およびその方向に応じて変化する。焦点とプリグループ間の相対位置誤差を検出することが可能となる。このようなシミュレーション結果は、焦点の位置誤差検出光学系の設計に適用されるほか、媒体設

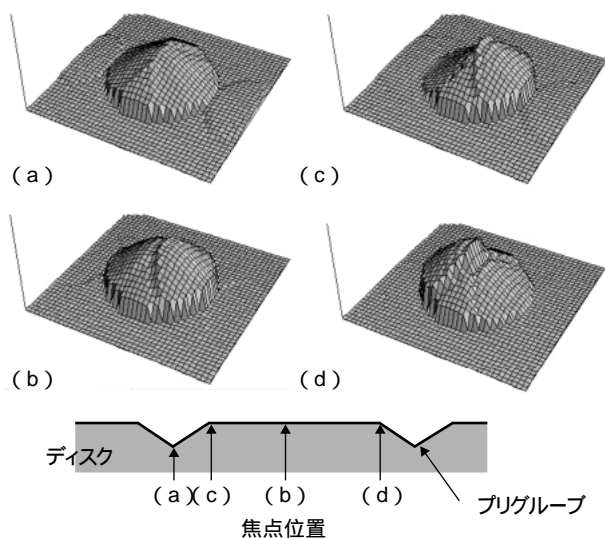


図6 プリグルーブと焦点間の位置誤差による反射光の強度分布
 Fig.6-Intensity distribution of reflected beam for different beam position against groove.

計時のプリグルーブ仕様決定にも利用される。

む す び

光磁気ディスク装置開発における各技術分野でシミュレーション技術は多く適用され、とくに開発の効率化、開発期間の短縮という面で大きな貢献をしている。今後とも、この技術の適用は進むものと考えられるが、以下に現状での技術とその適用に関する課題と問題点を記しておきたい。

(1) CADとの連携

機械設計CADデータなどをそのままCAEに適用してシ

ミュレーションを行うことができれば、開発効率のさらなる向上が期待できる。このような環境は整えられつつあるものの、十分とは言えない。

(2) 異分野間の連携の推進

機械系、電気系、制御系、光学系などの異分野間での連携を更に進め、より実際に即したシミュレーションを行うことが望まれる。

(3) シミュレーション精度の向上

現状でもシミュレーション結果は実際の測定結果と良く一致する場合が多い。しかし、例えば、機械振動シミュレーションの高次モードに関しては、実際と一致しない場合もある。より確度の高い設計を行うため、さらなる高精度化が望まれる。

(4) ほかの解析技術との協調

シミュレーション技術が極めて有用であることは述べてきたとおりであるが、シミュレーションだけでは理解できない問題も当然多く、試作をとおした実験的な解析との連携、あるいはシミュレーションモデルの有効性、限界を十分考慮した開発計画の立案が、より効率的な製品開発のために重要である。

参考文献

- (1) J. Ichihara : Mechanical technologies of magneto-optical disk drives. Proceedings of Magneto-optical Recording International Symposium(1997), pp.229-234.
- (2) H. H. Hopkins : Diffraction theory of laser read-out systems for optical video discs. *Journal of Optical Society of America*, 69, 1, pp.4-24(1979)