

新 制

工

891

京大附図

磁気テープの変形と浮上特性に関する研究

1992年

小寺秀俊



磁気テープの変形と浮上特性に関する研究

1992年

小寺秀俊



# 目次

第1章 序論	-----	1
1.1 研究の位置付け	-----	1
1.2 磁気記録メカニズム	-----	2
1.2.1 磁気記録の問題点	-----	4
1.3 従来の研究	-----	8
1.3.1 フォイル軸受に関する研究	-----	8
1.3.2 計算機用磁気テープ装置の解析	-----	8
1.3.3 VTR用磁気テープ装置の解析	-----	11
1.3.3.1 差分法による解析	-----	11
1.3.3.2 有限要素法による解析	-----	12
1.3.4 磁気ヘッドと磁気テープの接触と摩耗に関する研究	-----	13
1.4 本研究の目的と意義	-----	15
1.5 本論文の構成	-----	16
第2章 支配方程式	-----	17
2.1 研究対象	-----	17
2.2 現象のモデル化	-----	18
2.3 動作原理	-----	18
2.4 基礎方程式	-----	23
2.4.1 潤滑方程式	-----	23
2.4.2 磁気テープの変形方程式	-----	26
2.4.3 磁気テープの材料異方性の取り扱い	-----	31
2.5 有限要素法による離散化	-----	33
2.5.1 修正レイノルズ方程式の展開	-----	33
2.5.2 面内変形方程式の展開	-----	36
2.5.3 曲げ変形方程式の展開	-----	37
2.6 方程式の解法	-----	39
2.7 結論	-----	44

第3章 磁気テープの材料定数と変形量・浮上量の測定	4 5
3. 1 テープの材料定数の測定	4 5
3. 1. 1 従来の方法	4 5
3. 1. 2 超音波測定による磁気テープ異方性の測定	4 8
3. 1. 3 測定装置	5 0
3. 1. 4 測定結果及び考察	5 2
3. 2 磁気テープ変形の測定	5 5
3. 2. 1 測定装置	5 8
3. 3 結 論	6 2
第4章 計算アルゴリズムと解析例	6 3
4. 1 計算アルゴリズム	6 3
4. 2 テスト解析	6 5
4. 2. 1 解析モデル	6 5
4. 2. 2 検証実験	7 1
4. 2. 3 解析結果と実験結果との比較	7 1
4. 3 磁気ヘッド付モデルの解析	8 0
4. 3. 1 解析モデル	8 0
4. 3. 2 境界条件	8 5
4. 3. 3 検証実験	9 0
4. 3. 4 結果及び考慮	9 3
4. 4 磁気ヘッド上での隙間分布	1 0 4
4. 4. 1 隙間分布の測定	1 0 4
4. 4. 2 実験結果と解析結果の比較	1 0 4
4. 5 計算についての検討	1 0 7
4. 5. 1 計算時間と収束性	1 0 7
4. 6 結 論	1 1 2
第5章 実機解析への展開	1 1 4
5. 1 全体解析	1 1 6
5. 1. 1 解析モデル	1 1 6
5. 1. 2 解析条件	1 1 9

5. 1. 3	検証実験	-----	1 2 2
5. 1. 4	結果と考察	-----	1 2 2
5. 2	ヘッド近傍部分領域の解析	-----	1 3 9
5. 2. 1	解析対象領域	-----	1 4 0
5. 2. 2	解析条件の設定	-----	1 4 0
5. 2. 3	解析条件	-----	1 4 5
5. 2. 4	検証実験	-----	1 4 5
5. 2. 5	解析結果と考察	-----	1 4 8
5. 3	結 論	-----	1 5 6
第6章	磁気記録再生特性予測への応用展開	-----	1 5 8
6. 1	表面粗さと摩耗について	-----	1 5 8
6. 2	磁気ヘッド摩耗解析	-----	1 6 4
6. 2. 1	磁気ヘッドの表面形状の測定	-----	1 6 4
6. 2. 1. 1	測定方法	-----	1 6 6
6. 2. 2	摩耗計算モデル	-----	1 6 6
6. 2. 3	摩耗計算と検証実験	-----	1 7 6
6. 2. 4	解析結果と考察	-----	1 8 0
6. 3	エンベロープ解析	-----	1 8 8
6. 3. 1	エンベロープについて	-----	1 8 8
6. 3. 2	エンベロープ実験と結果	-----	1 9 0
6. 3. 3	エンベロープ予測計算	-----	1 9 0
6. 3. 4	解析結果と考察	-----	1 9 3
6. 4	結 論	-----	1 9 7
第7章	結 論	-----	2 0 2
	参 考 文 献	-----	2 0 7
	謝 辞		
	関連発表論文		



# 第1章 序 論

## 1. 1 研究の位置付け

磁気記録は現在6兆円の市場を持ち、テープやディスクといった媒体を用いることによりオーディオやビデオ及び情報機器分野で音声、画像を含む各種情報を記録保存し、また再利用のため用いられている。家庭における利用だけでなく工業的、商業的分野でも広く使われ、今後さらに成長すると考えられている。そのためには、現在よりも1桁以上高い密度で記録再生する技術革新が必要である。

磁気記録は磁気ヘッドと磁気記録媒体が相対的に運動することで行われている。始動時と停止時には磁気ヘッドと記録媒体の物理的接触があるが、動作時には媒体は磁気ヘッドに対して相対的に浮上し、両者の間には潤滑膜である空気が存在する。磁気ヘッド上での媒体の浮上量は $0.01\ \mu\text{m}$ のオーダーになり、これは磁気ヘッドおよび記録媒体の表面粗さと同じオーダーである。記録密度をさらに高めるためには磁気ヘッドの磁気コイル部での記録媒体の浮上量をできるだけ小さくする必要がある。磁気ヘッド上での記録媒体の浮上を確保するために、磁気ヘッドの表面形状は単純な球や回転楕円体ではなく、3次元曲面形状にしている。さらに磁気テープ装置の場合には、磁気ヘッドだけでは浮上量を確保できないため、磁気ヘッドは回転するドラムに取り付けられ、ドラムと共に回転することで、潤滑膜を発生させることにより浮上を確保しており、さらにドラム上に溝を設ける等の工夫もほどこされている。一方磁気ディスク装置の場合には、磁気ヘッドはスライダに取り付けられ、スライダ面とディスクの間に潤滑膜を発生させ浮上を確保している。磁気ディスク装置では記録媒体は変形しないが、フロッピーディスク及び磁気テープのようにフレキシブルな記録媒体は浮上時に変形を伴う。したがって、記録媒体の材料特性が浮上量を決定する主要因の一つになる。磁気テープ装置の場合、高密度記録を達成するためには、磁気テープの厚さを減らすことも必要であり、これも浮上量を左右する主要因の一つとなっている。

磁気記録において、浮上量を確保しないと磁気ヘッドと記録媒体とが接触することにな

る。両者が接触すると摩擦が生じ、データの記録再生時の信頼性の低下や繰り返し使用する場合の磁気ヘッド及び記録媒体の寿命を低下させることになる。この磁気ヘッドと記録媒体の間に生じるトライボロジーと変形のメカニズムを基本的に理解することは、今後の磁気記録の高密度化と高信頼性を実現するためには必要不可欠である。

磁気記録装置における浮上量特性の検討に関しては、対象となる領域が小さく、磁気テープや磁気ディスクの記録媒体が不透明であることから、実験的に現象を把握することは困難である。また、現象を左右する設計変数が多いことから、設計変数の相互作用の把握及び最適化を実験的に行うことは困難であり、時間的ロスも大きい。そのため数値実験による現象把握を実現することが必要である。このような数値解析については、これまで多くの方法が提案されているが、定性的な現象把握にとどまり、定量的な評価にまでには至っていないのが現状である。

本論文は、画像及び音声を記録再生するビデオテープレコーダ（以下VTRと称す）の高密度記録の実現を目的として、ビデオテープレコーダ装置において、回転するドラムと磁気ヘッド上における磁気テープの挙動に関する基本的なメカニズムを解明し、磁気記録特性の最適化を実現する設計変数を見出すための数値実験手法を提案し、その有効性を示すものである。

## 1. 2 磁気記録メカニズム

磁気記録には記録と再生という2つの動作がある。すなわち磁気ヘッドのコイルにより発生した磁束を用いて記録媒体を磁化することで信号を記録し、逆に記録媒体の磁束により磁気ヘッドのコイルに誘起される電流を検出することで信号を再生する。記録再生を実現するには一定以上の磁束を磁気ヘッドと記録媒体の間に発生させる必要がある。図1.1にそのメカニズムを示す<sup>[1,2]</sup>。磁気ヘッドはループ状をした誘磁率の高い材料にコイルを巻いて作られている。コイルに電流を流すと磁気ヘッド内に磁束が図1.1の破線のように発生する。磁気ヘッドの先端は2つに分かれており、その間にギャップが設けられている。このギャップを磁束が通過する時、ギャップを通して磁束が外にもれる。この外にもれる磁束の通る位置に記録媒体の磁性材料がある場合、材料はこの磁束と反対向きに磁化され、その外側にギャップと同じ方向の磁束を発生する。この磁化を保持することで、

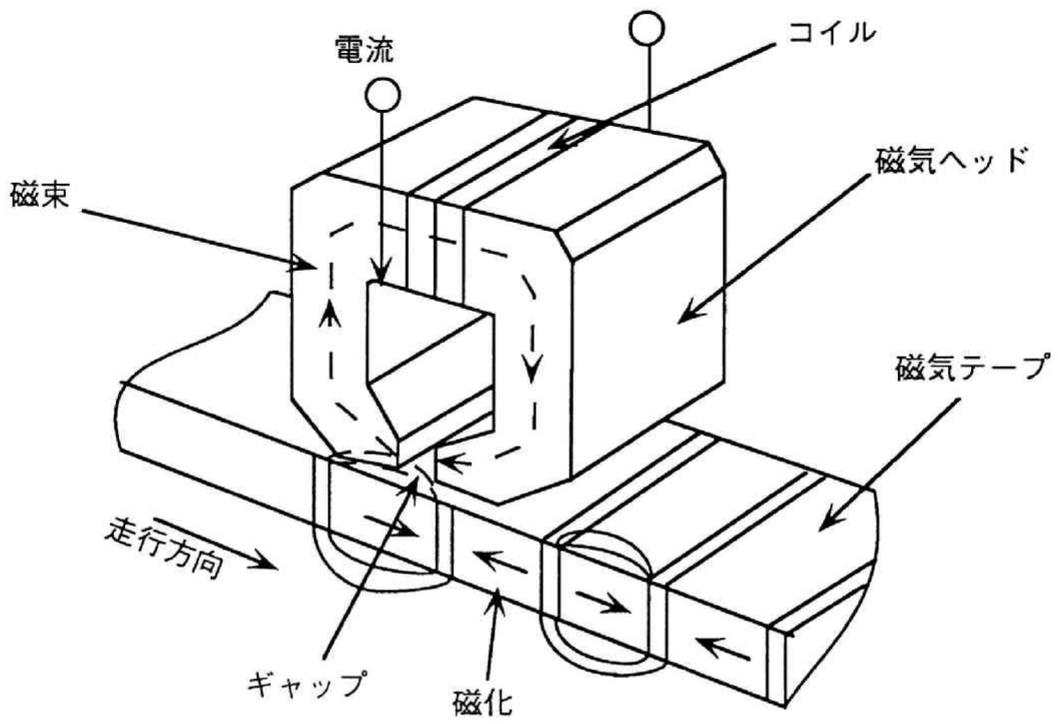


図 1.1 磁気記録のメカニズム

信号を記録する。これとは逆に、磁気テープに記録された磁化により発生する磁束を磁気ヘッドに作用させ、磁気ヘッドで電気信号に変換することで、記録信号の再生を行う。

### 1.2.1 磁気記録の問題点

記録媒体に誘起される磁化の強さは、磁性材料を通るもれ磁束の強さにより決まり、それは磁性材料とギャップの距離とギャップの大きさに左右される。ギャップを小さくするとギャップから外へもれる磁束が減少するため、記録媒体内で記録再生に必要な磁束を得るためには、記録媒体を磁気ヘッドに近づける必要がある。逆に、ギャップを大きくすると、磁束の減衰が生じる。ギャップ部による磁束の減衰を少なくするためには、ギャップは小さくする必要がある。また記録密度を高めるためにも、ギャップを小さくし、同時にコイルに流す電流の周波数を高くする必要がある。Wallace<sup>[3]</sup>らは再生時の出力を、ギャップによるロスや磁気ヘッドと記録媒体間の距離によるロスを考慮して算出している。家庭用VTR装置の場合、記録周波数は4MHzから7MHz、波長 $0.5\mu\text{m}$ の信号を記録ピッチ $0.58\mu\text{m}$ で記録し再生している。磁気ヘッドのギャップは家庭用VTR装置では、 $0.03\mu\text{m}$ から $0.04\mu\text{m}$ 程度であり、磁気ヘッドのギャップ部と記録媒体の距離は $0.1\mu\text{m}$ 以内に保つ必要がある。この距離をできるだけ小さくすることが要求されているが、両者を近づけると、動作時に両者が接触するようになる。両者が接触すると、相對運動のために摩耗が生じ、両者とも寿命が短くなるという問題が生じる。そこで両者の間に空気の潤滑膜を発生させ、空気潤滑膜の作用による非接触で磁気記録を実現することが行われている。

計算機用の磁気ヘッドは図1.2(a)のように磁気ヘッドの幅が長さ(磁気テープ走行方向)に比べて大きい。磁気ヘッドの幅は $10\text{mm}$ 程度あり、磁気ヘッドと磁気テープとの干渉領域は磁気テープの幅の4割程度である。すなわち、磁気ヘッドの表面で磁気テープとの間に潤滑膜を保持し磁気テープの変形を支えることができる(磁気ヘッド上での磁気テープとの干渉領域)面積は $30\sim 60\text{mm}^2$ <sup>[2]</sup>である。この結果、磁気ヘッド上での磁気テープの浮上量は、磁気ヘッドの形状と磁気テープの構造でほぼ決定される。また磁気ヘッドは回転するドラムの表面から $100\mu\text{m}$ 前後突き出してドラムに取り付けられており、磁気ヘッドの表面形状は、曲率半径約 $20\text{mm}$ の円筒形状である。つまり、計算機用の磁気ヘッドはドラム表面に設けられた、球面または円筒面の比較的大きく滑らかな

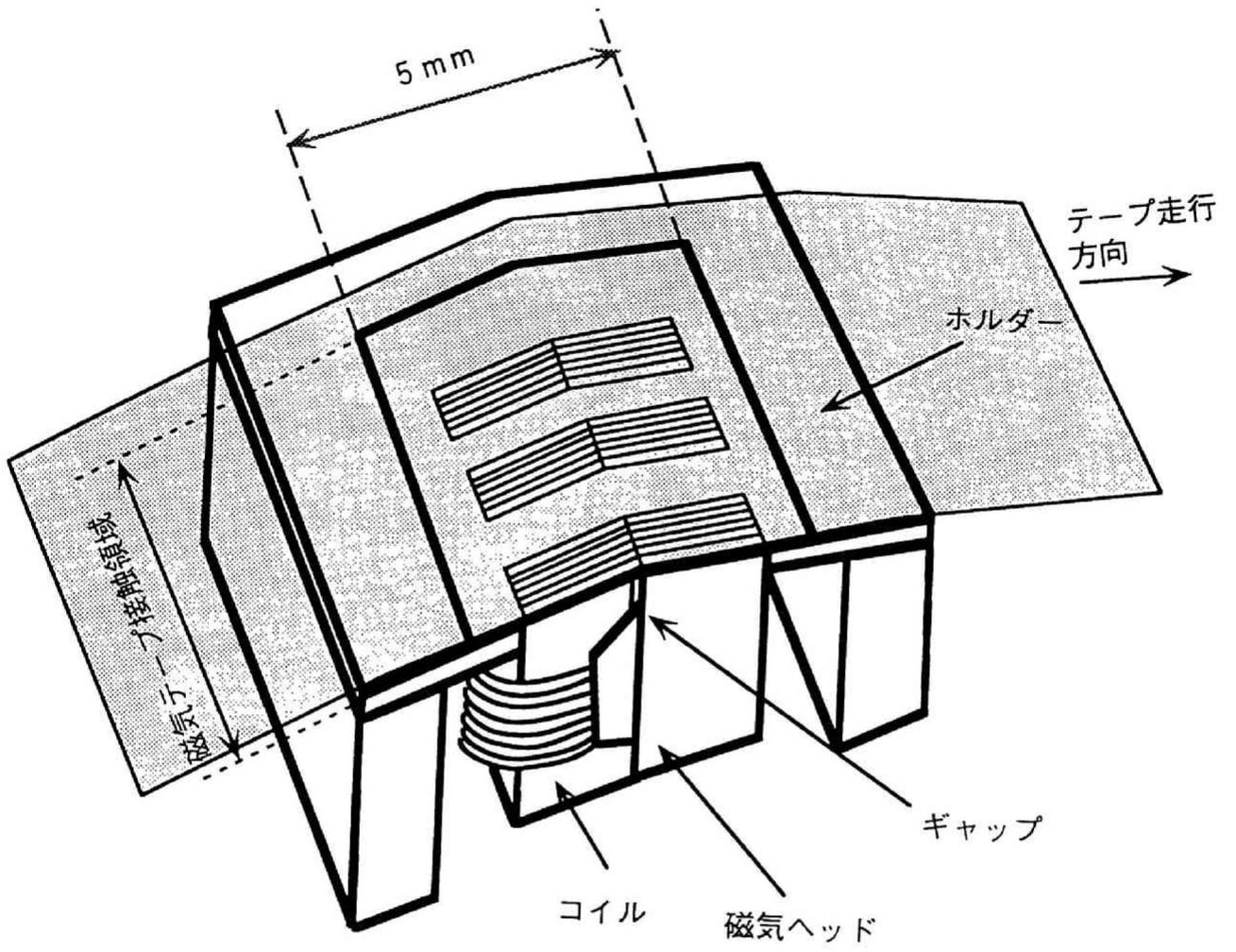


図 1.2 (a) 計算機用磁気ヘッド

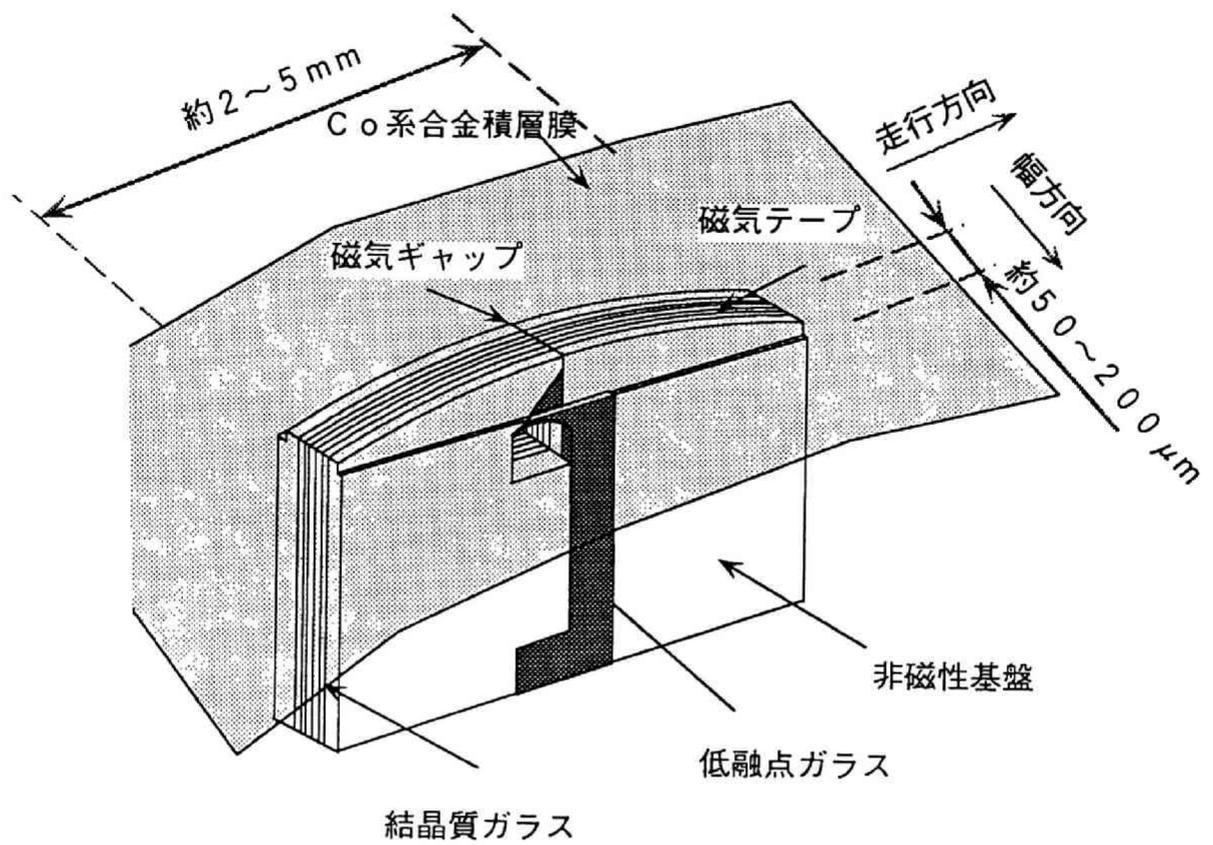


図 1.2 (b) VTR用積層型磁気ヘッド

突起物として考えられる。この結果、磁気テープはドラム上でほぼ円筒状に変形・浮上するが、磁気ヘッド近傍での磁気テープの変形はドラム上での変形と比較して、特異的な形状にはならない。

これに対してVTR用の磁気ヘッドは、図1.2 (b) に示すように幅が狭く、長さも短い(家庭用VTRのヘッドの場合、幅0.16mm, 長さ3mm, 磁気ヘッド上での磁気テープとの干渉領域面積は約 $0.5\text{mm}^2$ ; 磁気テープの幅の0.8%)<sup>[4]</sup>。この結果、磁気ヘッドの表面に発生する空気潤滑膜の圧力だけでは、磁気テープの変形を支えることは困難であり、計算機用磁気テープ装置の場合とは異なった作動状態になる。すなわち、磁気テープはドラムの回転により磁気テープとの間に引き込まれる空気の圧力によってドラム上で浮上する。そして、磁気ヘッドはドラムの回転により磁気テープが浮上する浮上量よりも大きく突き出ているために、磁気テープは磁気ヘッドの突き出しにより変形する。また、磁気ヘッドはドラムに設けられた穴に取り付けられており、磁気テープは磁気ヘッドの突き出しと同時に取り付け穴の影響を受けて、磁気ヘッド近傍で複雑な形状に変形する。磁気ヘッド上でも潤滑膜が形成され、磁気テープは磁気ヘッドに対して浮上しているが、条件によっては磁気テープは磁気ヘッドに接触する場合があります。磁気ヘッドは磁気テープの材質やドラムの周速等の走行条件の違いにより異なった形状に摩耗する<sup>[5,6,7]</sup>。このことにより、ある材料定数を持つ磁気テープにより摩耗した磁気ヘッドに、異なる材料定数や厚さを持つ磁気テープを用いて磁気記録再生を行うと、記録信号出力の減衰および磁気ヘッドの寿命の低下という問題が生じることになる。

以上のように、計算機用の磁気テープ装置とVTR装置とでは、磁気ヘッドとその近傍における構造の違いにより、磁気ヘッド近傍の潤滑膜圧力分布及びそれによる磁気テープの変形と浮上の状態は異なる。また、計算機用の磁気テープ装置では、磁気ヘッドの構造により磁気ヘッド上に発生する圧力で磁気テープが変形し浮上する。これに対して、VTR装置では、磁気ヘッド上の圧力では磁気テープの変形と浮上を支えることが困難で、磁気ヘッドを含む走行系全体の構造により、磁気テープの変形及び浮上を制御する必要がある。

これらの点から、計算機用の磁気テープ装置とVTR装置では、基本的な機構と制御の原理は同じであるが、現象は異なり解析方法も新たに構築する必要がある。

### 1. 3 従来の研究

磁気テープの浮上特性に関する従来の研究を、研究対象及び手法を基に分類した結果を図1.3に示す。以下この分類の項目に従って、従来の研究について論じる。

#### 1. 3. 1 フォイル軸受に関する研究

磁気テープを用いた磁気記録の磁気テープ浮上・変形現象はフォイル軸受に帰着することができる。

フォイル軸受に関する研究はBlock<sup>[8]</sup>により開始され、その後Eshel等<sup>[9-17]</sup>によって多くの研究が行われ、その基本特性が明かになっている。森・矢部らはその一連の研究で<sup>[18-24]</sup>非圧縮性流体及び圧縮性流体を動作流体とする動圧フォイル軸受を取り上げ、剛体ドラムの上をフォイルが一定速度で走行する時のフォイルとドラムの隙間分布及び圧力を実験と解析の両面から検討し、同時に入口出口の剥離境界条件についても検討し、その特性を明かにしている。これら2次元フォイル軸受の研究においては、円筒の幅がフォイルよりも大きく、また、円筒は突起のない単純な形状をしているため、フォイルの変形は小さい。さらに、フォイルは円筒の軸と垂直方向に走行すると仮定しているため、流体の斜めの流れの影響も小さい。

#### 1. 3. 2 計算機用磁気テープ装置の解析

これらフォイル軸受の理論をもとに磁気記録の磁気テープの浮上・変形解析が試みられている。1974年Stahlらは<sup>[25]</sup>、計算機用の磁気テープと磁気ヘッド間の現象を解析することを目的として、磁気テープの変形を非定常の曲げ変形の式で、また空気の圧力と隙間の関係をレイノルズ方程式でモデル化し、それぞれを差分法を用いて展開し両者を結合している。しかしながらその方法は不明確であるばかりでなく、系全てが平面上にあるようにモデル化されているために手法の有効性は低く実用的ではない。

1979年Greenbergらは<sup>[26]</sup>、円筒シェルの変形理論とレイノルズ方程式をフーリエ変換して、両者を交互に別々に解き、圧力分布が収束する条件を用いて解を求めているが定量的な評価には至っていない。小野と水川らは<sup>[27-31]</sup>球面フォイル軸受について、軸受

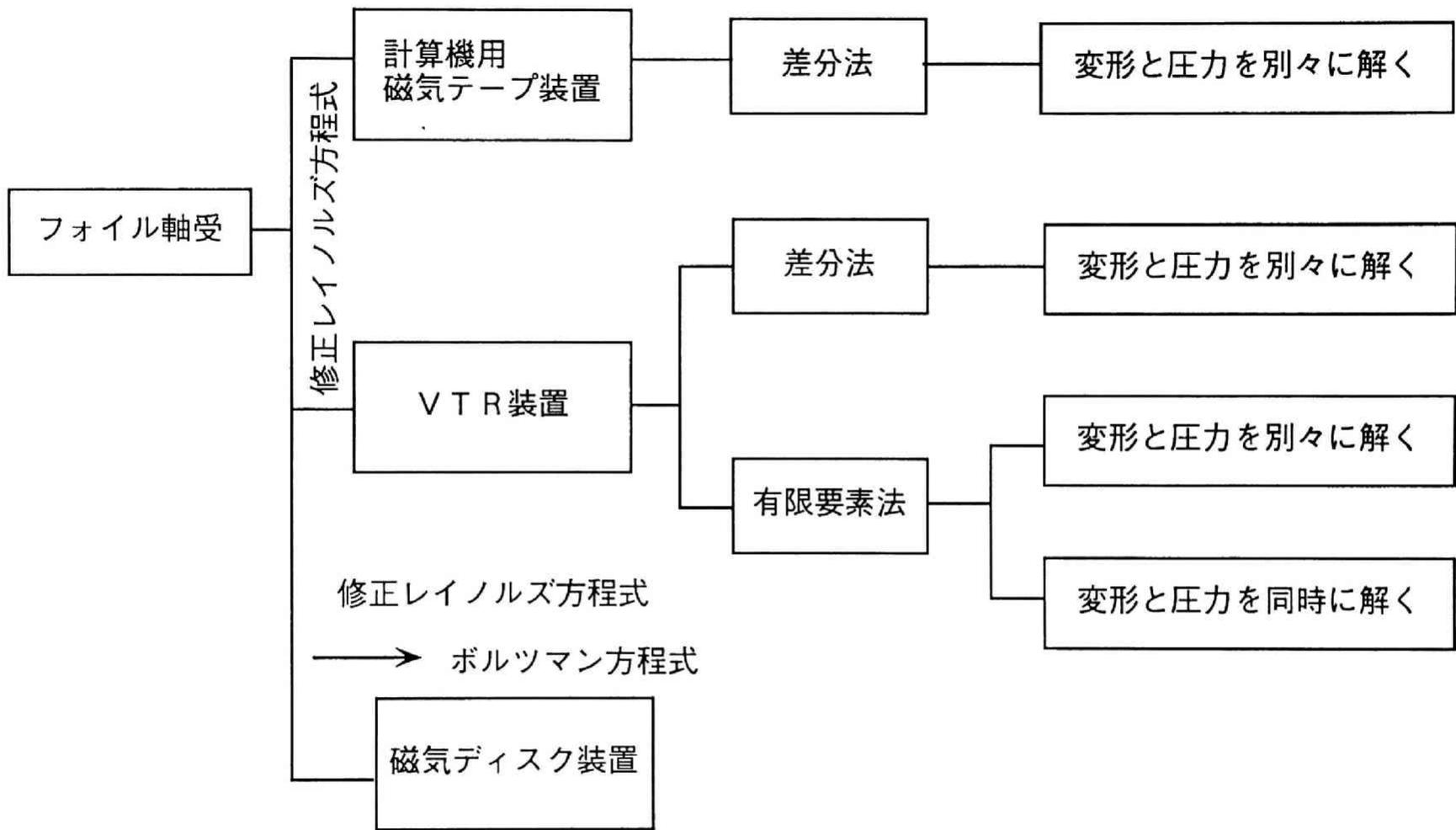


図 1.3 従来の研究分野（対象物と手法による分類）

のフォイルへの押し込み量が小さい場合、フォイル張力と圧力を平衡させることで、レイノルズ方程式とフォイルの変形の式を解いている。しかし、磁気ヘッド形状を球面で仮定し、フォイルの曲げ変形に関する釣合の式を、周辺の単純支持条件と圧力を集中力で近似することで解析的に解き、レイノルズ方程式と別々に交互に解くことで解を求めている。この結果、収束解を求めるためには、圧力または変位の修正量に対して緩和係数を必要とし、収束性に問題がある。また、圧力を集中力に置き換えているために要素分割を細かくする必要があり、大きな計算機資源を必要とする。さらに、周辺単純支持の条件が仮定できる場合にのみ適用でき、VTR装置を始めとする磁気テープ装置のように、斜めにかけた磁気テープの走行系の浮上特性を定量的に解析することは困難であり、自由曲面からなる磁気ヘッドを有する磁気テープ装置の解析には至っていない。

気体潤滑理論は磁気テープ装置の分野へ展開されるとともに、磁気ディスク装置の作動特性の解析へも応用されている<sup>[2]</sup>。磁気テープ装置と磁気ディスク装置とでは、構造において

- 1) 磁気ヘッドの大きさ
- 2) 記録媒体の剛性
- 3) 磁気ヘッドの浮上構造

等の点で大きく異なる。特に3)により両者の浮上現象は大きく異なる。すなわち磁気テープ装置では、磁気テープをドラムの回転により発生した空気潤滑膜の圧力により浮上させる。一方磁気ディスク装置では、回転する磁気ディスクと磁気ヘッドを取り付けたスライダの間に空気潤滑膜を形成しその圧力でスライダを浮上させている。磁気ディスク装置のスライダの浮上量は $0.1\ \mu\text{m}$ 以下と小さく、この領域においては潤滑膜の厚さが潤滑膜気体の分子平均自由行程と同程度のオーダーになる。福井らは<sup>[32,33]</sup>潤滑膜厚さが分子の平均自由行程よりも小さくなる場合、これまでフォイル軸受の解析に利用されてきたすべり流れを仮定した修正レイノルズ方程式の代りにボルツマン方程式に立脚した解析法を適用することの必要性について論じ、ボルツマン方程式を基にした支配方程式を提案し、その現象について検討している。彼らの研究は、潤滑膜の厚さが分子の平均自由行程よりも小さい場合に、どのような現象が生じているかを知るには重要な研究である。しかし、磁気テープ装置では、第2章で詳細に述べるが、ほとんどの潤滑領域において潤滑膜の厚さは分子の平均自由行程よりも大きいため、従来のすべり流れモデルに基づいた修正レイノルズ方程式を支配方程式として用いることができると考えられる。

### 1. 3. 3 VTR用磁気テープ装置の解析

VTR装置の長時間記録及び画像の精度向上を目的として、また記録再生特性の向上を目指して、磁気テープは薄手のものへの要求が高くなっている。磁気テープの厚さが薄くなることにより、磁気テープは厚さの3乗に比例して剛性を失うために、磁気ヘッドと磁気テープの間の隙間分布を良好に保つことが困難となり、信号の記録再生を安定に行うことができないという問題が生じてくる。現在、磁気記録の高密度化が望まれており、ドラム上に磁気ヘッドを複数個取付けたり、また1つの磁気ヘッドに複数の磁気ギャップを設けたり、さらには1カ所に複数の磁気ヘッドを連続して取り付けたりすることが検討されている。このような動向に伴って、フォイル軸受におけるフォイルの変形及び空気の隙間形成の現象に関する研究結果を、VTR装置における磁気テープの変形と磁気ヘッド上の隙間分布の解析に利用するようになった。しかし、VTRの磁気ヘッドは前述したようにナイフエッジ状であり、フォイル軸受及び計算機用の磁気テープの解析方法をそのまま利用できないという問題があった。

#### 1. 3. 3. 1 差分法による解析

1980年、坂口らは<sup>[34,35]</sup>、回転するドラムに巻き付けられた磁気テープを、平面状の静止したドラムと磁気ヘッドの上を両者の実際の相対速度で逆方向に平面状に磁気テープが走行するモデルで簡略化して、磁気テープの浮上量を解析することを試みている。彼らは磁気テープの変形を曲げ変形のみ限定し、磁気テープの張力を考慮した曲げモーメントの釣合の式を、磁気テープの変形の支配方程式として用い、一方潤滑膜の圧力方程式はレイノルズ方程式を支配方程式として用いている。この2式をそれぞれ差分法で離散化し、圧力を仮定して曲げモーメントを求め、得られた変形をもとに磁気テープとドラム及び磁気ヘッドとの隙間を算出している。そして、与えられた隙間分布における圧力をレイノルズ方程式を解いて求め、次に、再びその圧力を用いて変形を求めるといった繰り返しの潤滑膜圧力と磁気テープの変形が収束するまで行う。このようにして、磁気テープの変形方程式と圧力のレイノルズ方程式の2式をソフトウェアの処理上で順次解くことで両者を疑似的に連立して解くことを試み、磁気ヘッド上の隙間分布を求めている。しかし、比較的大

大きい曲率を持ったドラムを平面で近似し、磁気テープも等方性材料としてモデル化しており、さらに平面モデルであるにもかかわらずドラムと磁気テープの相対速度による磁気テープの遠心力を考慮している。実際のVTR装置では磁気テープの送り速度は小さく、ドラムの周速と比較すると無視できる。しかし彼らは、磁気テープとドラム及び磁気ヘッドとの間の相対速度による遠心力が磁気テープに作用するように支配方程式を導いている。その結果、曲率を持つ磁気ヘッド上で磁気テープはドラムの周速に対応した遠心力が外力として加わることになり、磁気テープの本来の送り速度による遠心力よりも大きな外力を受け大きく変形する事になる。

1986年坂口らは<sup>[36]</sup>同様の理論を用いて4連ヘッドの計算を試みているが、やはり過大な遠心力を考慮しており、かつ解析モデルが平面モデルであるためその結果は信頼性に問題がある。

1988年加藤ら<sup>[37]</sup>は、張力と曲げを考慮した磁気テープの運動方程式と修正レイノルズ方程式を差分法を用いて展開し、坂口らと同様それらを別々に交互に解き連成解を求めている。このように、磁気テープの変形と流体の圧力を別々に解く場合、方程式の収束性は悪く、両者とも磁気テープの変形及び隙間分布について現象の定量的な説明までには至っていない。

### 1. 3. 3. 2 有限要素法による解析

磁気媒体の変形と流体の圧力を同時に解く試みは、米田<sup>[38]</sup>らにより、それぞれを有限要素法で離散化した式を用いて行われ、彼らはフロッピーディスクの磁気ヘッド上での浮上解析を試みている。さらに米田<sup>[39,40]</sup>らはその方法を用いて、磁気テープ装置における磁気テープ浮上特性の解析を試みている。しかし磁気テープを等方性材料とし、面内変形と大たわみを考慮しているが、磁気ヘッドを”点”でモデル化し、ドラム上での磁気テープの変形の解析を試みただけに留まっている。また、磁気テープの変形と流体の圧力を同時に解くことの有効性は明確にはされていない。磁気テープの変形解析の目的は、磁気ヘッドのギャップ上における磁気テープとの隙間分布を解析し、これを最適に制御することにある。従って、磁気ヘッドを”点”でモデル化することによって得られる結果は、定性的な変形の傾向を知るには有効であるが、実機への応用という点においては十分ではない。

磁気テープはその製造過程において長手方向に伸延加工される場合があり、また磁性層

は磁性針状粒子をバインダで結合されたものを用いるために、これら加工と磁性針状粒子による材料異方性を示す。これまでの研究ではすべて磁気テープを等方性材料として扱い、また磁気ヘッドを簡略化しているという、解析モデルにおける問題がある。また、磁気テープの変形と流体の圧力を別々に解く場合には解の収束性が悪く、その結果、解の信頼性に問題があった。変形と流体圧力の2つの式を連成させて解く方が、交互に解くよりもよい解が得られると考えられるが、解析結果を定量的に実験結果と比較し、その有効性を示すに至っていない。

以上のようなことから、VTRの磁気ヘッドと磁気テープ及び回転ドラム間の圧力や変形を正確に解析し、現象を解明するとともに各種設計変数の影響を明確にし、装置の特性を最適化できる数値計算手法はいまだ確立されていない。

今後のVTR装置の研究開発には、実験研究が時間及び研究開発効率と測定が困難であると言う点において限界にきており、この現象の解明と設計変数の最適化を実現する、計算機を用いた計算機実験手法の確立と実用化が強く望まれている。

#### 1. 3. 4 磁気ヘッドと磁気テープの接触と摩耗に関する研究

磁気記録における記録再生特性を左右する重要な要因の一つとして、磁気ヘッド及び記録媒体の摩耗が挙げられる。磁気ヘッドと記録媒体は両者の接触による摩耗や異物の巻き込みによる摩耗を生じる。その結果、磁気ヘッド上での記録媒体と磁気ヘッドの隙間分布が変化し、記録再生信号の減衰が生じることが問題になっており、これに対処するために、磁気ヘッドの摩耗現象を簡便に予測する事が必要になっている。摩耗防止のため、磁気ヘッドと記録媒体間の距離を大きくすることを目的として、磁気ディスク装置では浮上型スライダ、VTR装置では回転ドラムが用いられている。しかし、磁気ヘッドのギャップ近傍における磁気ヘッドと記録媒体の距離が近い程、記録再生信号の減衰は少なく、良好な記録信号を得ることができる。したがって、この記録再生信号を良好に保つために、磁気ヘッドと記録媒体の距離をできる限り小さくすることが要求されるが、そうすることにより外部からの振動による両者の接触や異物の巻き込みにより磁気ヘッド、ドラムと磁気記録媒体の摩耗が生じやすくなる。このように、摩耗を防止するための要求と記録再生信号を良好に保つための要求は、相矛盾する。より高密度な磁気記録を実現するには、磁気ヘッドと記録媒体との距離を現在よりもより小さくかつ磁気ヘッドのギャップもより狭くす

る必要がある。

磁気記録信号の減衰量  $\Delta S$  (dB) は磁気ヘッドと記録媒体間の距離  $h$  と記録波長  $\lambda$  を用いて 1-1 式で表される [3]。

$$\Delta S(\text{dB}) = -20 \log e^{-2\pi h/\lambda} \quad 1-1$$

磁気記録波長  $\lambda$  は短い場合  $0.5 \mu\text{m}$  程度であり、もし距離  $h$  が  $0.01 \mu\text{m}$  大きくなると信号は 1 (dB) 減衰することになる。記録再生信号を良好に保つためには、磁気ヘッド内部の磁気回路や記録信号処理系を含めて全体の信号の減衰を最大 2 (dB) から 3 (dB) に押える必要がある。それには、少なくとも磁気ヘッドと記録媒体の距離は  $0.1 \mu\text{m}$  以内に保つ必要がある。しかし、磁気ヘッドの表面粗さは平均  $0.02 \mu\text{m}$  程度あり、また磁気テープは平均  $0.04 \mu\text{m}$  程度の表面粗さを持つため、両者の距離を  $0.1 \mu\text{m}$  以下に保つ場合には両者が接触する領域が存在する。磁気テープの表面粗さを小さくすることは可能であるが、そうした場合には、磁気ヘッドの摩耗及び磁気テープの摩耗が増加することが知られている。この現象は、表面粗さにより空気層が保持されており、表面粗さが小さくなると磁気ヘッドと磁気テープの間の隙間に空気層がなくなり、表面粗さが大きい場合よりも、接触する領域が増加するためであると考えられている。またドラムと磁気テープの相対速度により両者の間に発生する潤滑膜層も、それぞれの表面粗さにより保持され、固体接触を軽減するように作用すると考えられている。その結果、磁気テープは磁気ヘッド上で完全に浮上しているのではなく、両者の表面粗さの平均値程度で浮上し、したがって部分的には接触していると考えられている [2]。

磁気記録における表面粗さによる固体間の接触と摩耗に関する研究は 1950 年に Bowden ら [41,42] によって始められ、Greenwood と Williamson [43,44] 及び Bhushan [45] は弾性接触に対する理論を提案し、その一連の研究により表面粗さの最大分布がガウス分布に従う事を示している。そして、表面粗さにより、記録媒体と磁気ヘッドまたはスライダの間の最低浮上量を考慮する方法も提案されている [46]。また、太田らは [47,48] 磁気テープ装置の磁気ヘッドの摩耗を解析することを試みている。彼らは、磁気ヘッドの初期形状を直方体のブロックとし、平面状に単純支持した磁気テープに静的に押し付けるモデルに対して、小野ら [27-31] の方法を用いて、平面状のヘッドと磁気テープの接触解析を行い、接触要素の形状を修正するという摩耗計算方法を提案している。しかしそこでは流体の圧力が無視されており、実機への展開は困難である。このように、磁気ヘッド及び記録媒体の表面粗さを考慮して、摩耗現象による磁気ヘッドの形状変化及び形状変化による記録再生信号の変化

を予測する計算方法については、実用的な方法はまだない状況にある。

#### 1. 4 本研究の目的と意義

本研究は、磁気記録装置の内、画像及び音声等の情報を蓄積し再利用するための回転ヘッド型磁気記録装置を対象とする。そして、その動作時における磁気テープと磁気ヘッド及び回転ドラムの間の空気膜圧力分布と、その圧力により磁気テープが浮上、変形する現象を定量的に予測する方法を確立することを目的とする。すなわち、磁気テープと回転ドラム及び磁気ヘッド間の相対速度により、磁気テープと回転ドラム及び磁気ヘッドとの間に引き込まれる空気膜を潤滑問題として定式化し、この潤滑により発生する圧力と走行張力を外力として磁気テープの変形を薄肉シェルの変形問題として定式化して、両者を連立して流体／構造の連成問題として扱う。そして、この連成問題を高精度、高速、かつ安定に解く方法の確立を行うものである。

本研究で確立した方法により、従来、実験的に測定が困難であったサブミクロンの潤滑領域である、磁気ヘッドと磁気テープの間に生じる現象の把握を効率よく実現することができる。その結果、より高密度かつ高精度な磁気記録装置の実現を、加速度的に早めることが可能となると期待できる。また、現在の試作実験という研究開発方法における問題点である試作実験期間の短縮と、現象の複雑化に起因する実験による要因分析の困難さの克服及び、近年の産業界の重要な課題である、省資源省力化と小型化を実現することが可能になると期待できる。

本研究では、従来の研究では必ずしも実現されていなかった以下の項目に重点を置くものとする。

- 1) 潤滑の方程式と磁気テープの変形の方程式を連成し、それを安定にかつ効率よく、解析する手法を確立すること。
- 2) 計算に必要な材料定数の測定方法を確立し、解析結果を評価するに必要な実験方法を確立すること。
- 3) 計算結果と実験結果を比較することにより、本研究で提案した方法が定量的に現象を説明でき、本手法が有効性であることを検証すること。
- 4) 本手法を用いて磁気ヘッドの摩耗を解析する方法を提案し、その有効性を示

し、これを通じて本研究手法の発展性について示すこと。

以上4点を示すことで、本研究が工業的に利用できる可能性を実証する。

## 1. 5 本論文の構成

本論文は7章から構成されされる。

第2章では、磁気テープの浮上／変形現象を解析する系の支配方程式を流体と構造の連成方程式として導出する。そして、支配方程式を有限要素法を用いて展開し解くべき方程式を導き、従来不明確であった方程式を解く方法と解の安定性について論じている。

第3章では、本研究で使用する磁気テープの材料定数の測定方法について、超音波を用いた測定方法と解析結果の有効性の確認のために行った実験方法及び測定方法について論じている。

第4章では第2章で論じた計算手法をもとに計算機で実行するアルゴリズムについて説明し、簡単なモデルを用いた解析により、本研究で提案した計算手法の有効性について論じる。

第5章では、本研究の手法を用いて実機を解析する場合に問題となる、計算時間の短縮化や精度向上及び解析効率の向上を実現する方法として、解析領域を分割して解析を行い、得られた解析結果を接続する方法を提案しその有効性を論じる。

第6章では、本研究の発展的な利用として、磁気ヘッドの摩耗現象を解析する手法と入出力信号の予測方法を提案し、実験結果との比較を行うことにより、本研究で提案した基本的な計算方法の有効性を再度実証すると共に、摩耗計算手法と入出力信号計算手法の有効性を示す。

第7章では、第2章から第6章において得た本研究の成果について総括を行い、本研究で提案した磁気テープ変形浮上量解析手法の有効性と工業的な利用の可能性について論じ、本論文の結論としている。

## 第 2 章 支配方程式

本章では、VTR装置における磁気テープ浮上現象の支配方程式、特に磁気テープとドラム及び磁気ヘッドとの間の潤滑膜圧力と磁気テープの変形について、現在及び今後のVTR装置の磁気テープ/磁気ヘッドインターフェースの特徴をもとに論じる。

### 2. 1 研究対象

本研究は映像及び音声の記録装置としてのVTR (Video Tape Recorder) 装置における、磁気テープとドラム及びナイフエッジ状の磁気ヘッドの間の空気膜の圧力とそれにより磁気ヘッドとドラムの上で磁気テープが浮上・変形する問題を対象とする。この問題を一般化すると、剛体曲面と薄膜構造体で構成される三次元弾性流体の潤滑膜変形問題となる。以下これをインターフェースと称する。ドラムに掛けられた磁気テープは、ドラムの回転によってドラムとの間に発生する気体潤滑膜により、ドラム上で浮上する。ドラムには、ナイフエッジ形状をした磁気ヘッドがドラムに開けた穴にドラム表面よりも突出して取り付けられている。その突出量は、ドラムの回転により磁気テープがドラム上で浮上する量よりも大きい。磁気ヘッドの突出と磁気ヘッドを取り付けるためにドラムに開けた穴により、磁気テープとドラムの間の空気の流れは乱され、磁気ヘッド近傍において圧力は複雑に変化する。また磁気テープと磁気ヘッド及びドラムは接触する場合があります、その場合両者に摩耗が生じる。この両者の摩耗は、磁気ヘッドおよび磁気テープの寿命や入出力信号の減衰等の問題をもたらす。それを防止することを目的に、ドラム及び磁気ヘッドを回転し動圧を発生させ磁気テープを浮上させているが、磁気ヘッドの形状やドラムの形状及び磁気テープの特性により、磁気テープの変形と浮上量は変化する。本研究で用いているインターフェースという用語は、ドラムと磁気ヘッドが回転し磁気テープとの間に動圧を発生し、それにより磁気テープが変形するとともに浮上する現象の総称である。

このインターフェースのさらに詳細な動作原理は以下の通りである。

## 2. 2 現象のモデル化

図2.1は典型的なVTRのドラムと磁気テープの構造を示したものである。実際のVTR装置において、ドラムは上下に分割してあり（それぞれ上ドラム、下ドラムと呼ぶ）磁気テープはこのドラムの回転軸に対して斜めに巻き付けてある。磁気テープは2本のガイドピンで位置決めされており、家庭用VTRでは、ドラムの回転方向と同方向にドラムの周速の約 $1/100$ の速度（ドラムの周速 $5.8\text{ m/s}$ 、磁気テープの走行速度 $33\text{ mm/s}$ ）で走行している。また、磁気テープの位置を制御することを目的として、下ドラムには図2.1に示すリードガイドと呼ばれる段差が設けてある。磁気ヘッドは上ドラムと下ドラムの間に取り付け用の窓を設け、その窓から数十 $\mu\text{m}$ 突き出た状態で上ドラムに取り付けてあり（図2.2）、上ドラムの回転とともに回転する。磁気テープの浮上量を制御することを目的として、ドラム表面には幅 $100\ \mu\text{m}$ 深さ $100\ \mu\text{m}$ 程度の溝が数本円周上に切られている。実機の構成は複雑であるため、現象を簡略化し、一般化したモデルを用いて磁気テープとドラム、及び磁気ヘッドのインターフェースを説明する。

図2.3は本章で用いるインターフェースモデルである。実機ではドラムは上下2つに分かれ別の速度で回転するが、本章では図2.3に示すように、上下一体のドラムを仮定する。また、磁気テープはクラッド材で材料異方性を示すが、本研究では異方性を有する単一材料として扱う。そして、本章では磁気テープはドラムの回転方向に対して平行に掛けた構造を取るものとする。

## 2. 3 動作原理

空気はドラムの回転により、ドラム表面と磁気テープの間に引き込まれる。ドラムが周速 $V_D$ で回転し磁気テープが速度 $U$ で送られている時、その相対速度 $V = (V_D - U)$ によりドラムと磁気テープの間に流体圧力 $P$ が発生し、磁気テープはその圧力 $P$ により変形する。磁気テープには張力 $T$ が作用しており、圧力 $P$ により磁気テープに発生する応力とつり合うことにより、動作時のドラムと磁気テープの隙間分布が形成される。家庭用VTRの場合、動作時のドラムと磁気テープの隙間は平均で $10\ \mu\text{m}$ 程度であるのに対し、磁気ヘッドの突き出し量は $45\ \mu\text{m}$ である。その結果、磁気テープは磁気ヘッド周辺で図2.4の

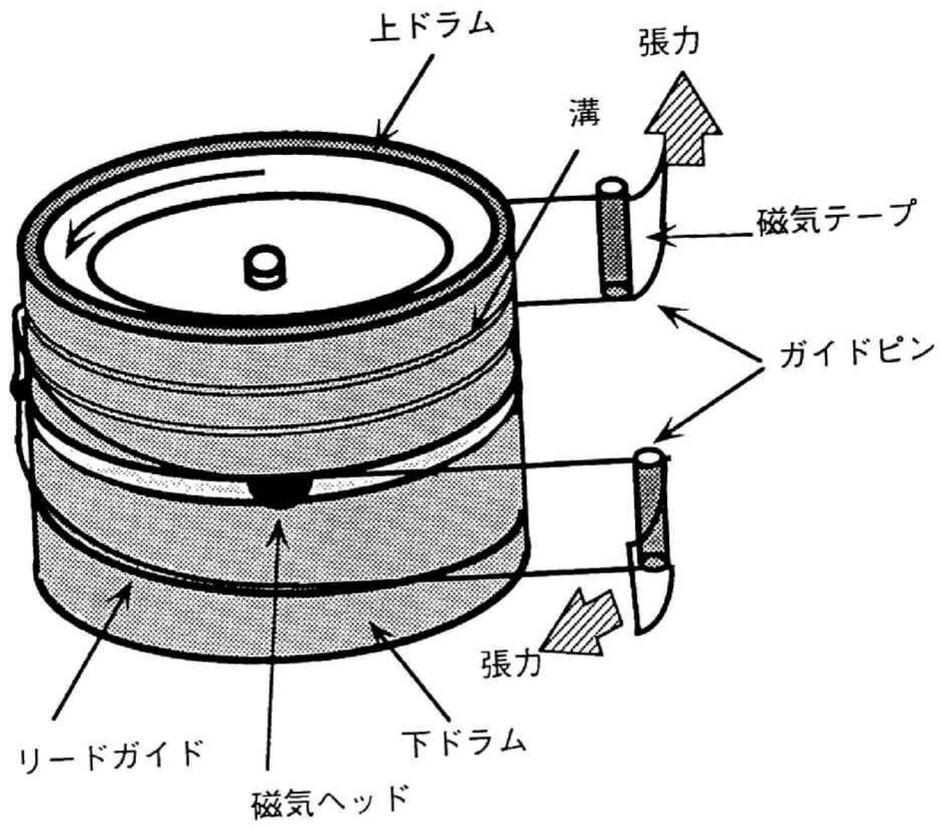


図 2.1 典型的な V T R 装置の  
ドラムと磁気テープの関係

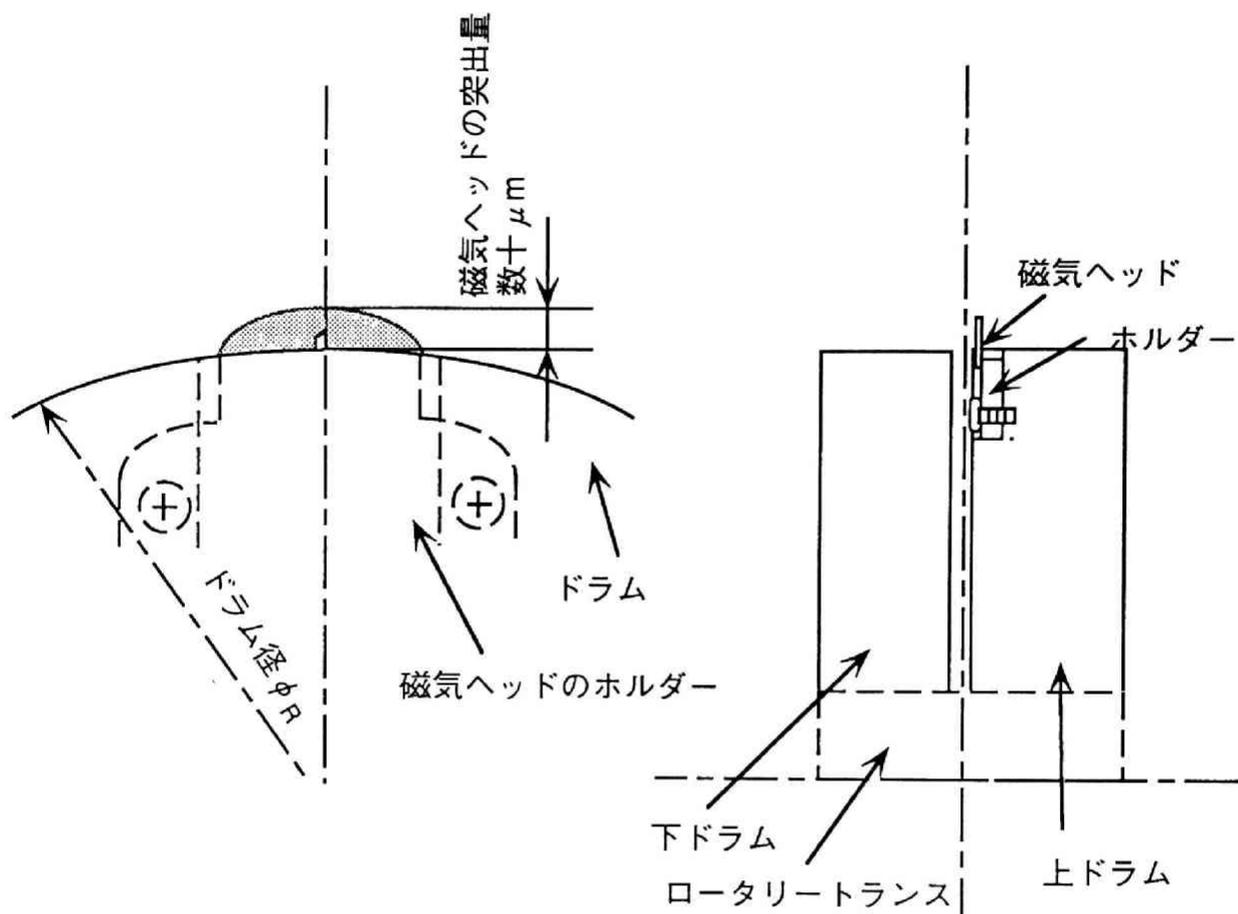


図 2.2 磁気ヘッドとドラムの関係

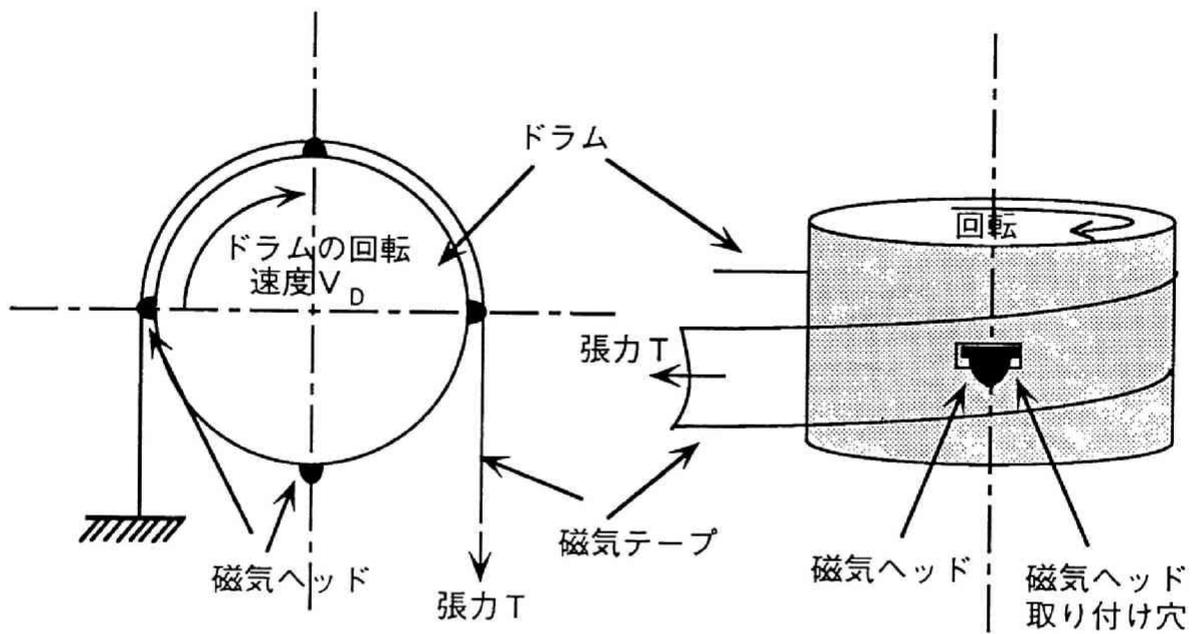


図 2.3 解析対象インターフェースモデル

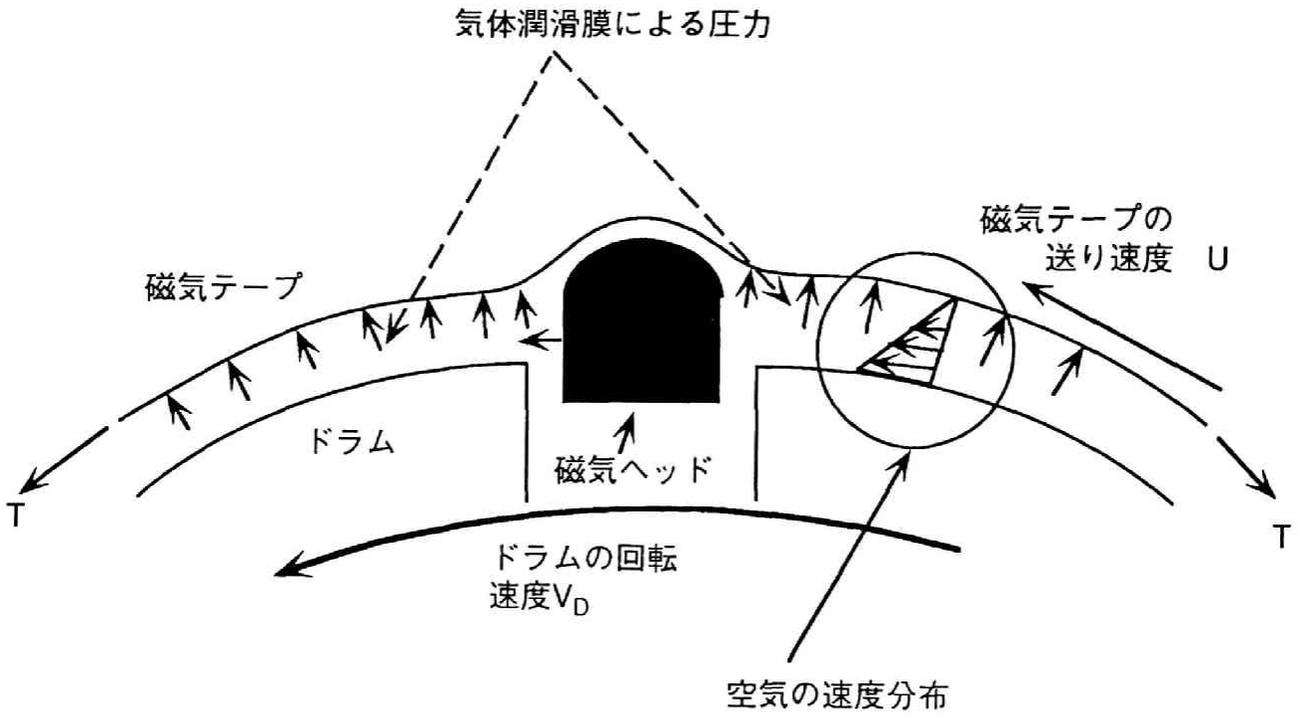


図 2.4 磁気テープの浮上メカニズム

ように変形する。磁気ヘッド上では、空気膜の厚さが $0.1 \mu\text{m}$ 以下になる領域が生じ、磁気テープと磁気ヘッドが接触する場合もある。また、走行条件によっては、磁気テープは下ドラム表面と接触する場合がある。

このインターフェース現象を解析するには、ドラムと磁気テープの間の空気層の流れに対して導いた圧力を未知数とした潤滑方程式と、磁気テープの幾何学的形状の変形を未知数とした磁気テープの変形方程式とを連立して解く必要がある。

## 2. 4 基礎方程式

本節では、VTRのテープ/ヘッドインターフェース現象を解明する為に必要な基礎方程式を導出する。

### 2. 4. 1 潤滑方程式

Burgdorferは気体潤滑の分野に気体の分子運動論の考えを初めて導入した<sup>[49]</sup>。彼は、気体の粒子性の効果を表す次式で定義されるクヌッセン数 $K_n$

$$K_n = \lambda / h_0 \quad 2-1$$

(ここで、 $h_0$ は代表長さ(最小隙間)、 $\lambda$ は分子の平均自由行程である。 $\lambda$ は25度1 Torrの空気の場合約 $0.064 \mu\text{m}$ )が非常に小さい( $K_n \ll 1$ )と仮定し、スリップ流れの近似を用いて、圧力 $P$ が満足すべき2-2式を導いている。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left\{ P h^3 \frac{\partial P}{\partial x} \left( 1 + \frac{6\lambda}{h} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ P h^3 \frac{\partial P}{\partial y} \left( 1 + \frac{6\lambda}{h} \right) \right\} = 6\mu V \frac{\partial(P h)}{\partial x} \quad 2-2$$

ここで、 $h$ は隙間の大きさ、 $V$ は壁面の相対速度、 $\mu$ は気体の粘性係数である。2-2式は修正レイノルズ方程式と呼ばれている。Hisaらは<sup>[50]</sup>2次のスリップ量まで考慮した方程式を提案しているが、理論的な根拠を欠き、いわゆる実験式と言うべきものである。また、クヌッセン数と境界面での流れの状態については、計算機用の浮動ヘッドスライダを用いて実験的な検討も行われている<sup>[51,52]</sup>。Gansは、気体分子の運動を統計的に表現

したボルツマン方程式に基いて、気体潤滑の方程式を導いているが、近似が粗く、得られた方程式は修正レイノルズ方程式と等価であると結論している。

福井らは、さらに近似ボルツマン方程式を用いて、 $K_n \gg 1$  の領域においても有効な潤滑特性を求める方法について提案し、無限幅の浮動ヘッドスライダの浮上特性の解析に対して適用している [32,33]。彼らが対象としている磁気ディスク装置等の浮動磁気ヘッドは数mm角の大きさを持ち、潤滑膜の厚さは  $0.1 \mu\text{m}$  以下である。磁気ディスク装置の浮上型磁気ヘッドの場合、スライダと磁気記録媒体間の領域（数mm角）全体が  $0.1 \mu\text{m}$  程度浮上し、スライダに取り付けられた磁気ヘッドと記録媒体との相対位置はスライダの浮上量により決定される。この磁気ディスク装置の場合、磁気ヘッドを含むスライダ全領域において、クヌッセン数  $K_n$  が 1 以上になる場合もあり、福井らが提案するボルツマン方程式を基礎とした潤滑方程式を使うことが必要になる可能性がある。

VTR装置の場合、潤滑領域はドラムの上かけられた磁気テープ全域である。ドラム上での潤滑膜の厚さは  $10 \sim 15 \mu\text{m}$  である一方、磁気ヘッドの大きさは長さ  $3 \sim 4 \text{mm}$ 、幅  $100 \mu\text{m}$  程度と小さく、磁気ヘッド上での潤滑膜の厚さは  $0.1 \mu\text{m}$  以下である。VTRの場合の潤滑領域面積を磁気ディスク装置の場合と比較すると、表 2.1 のようになる。この表 2.1 から判るように、VTRでは潤滑領域は磁気ディスク装置に比べて 3 オーダ大きな潤滑領域面積となり、磁気ヘッドの面積はその中で  $0.04\%$  にしかない。VTRの場合は、磁気ヘッド上での最小隙間は  $0.1 \mu\text{m}$  以下であり、磁気ヘッド上における領域でのクヌッセン数は、 $K_n \geq 0.64$  になるが、磁気ヘッド部以外の領域では浮上量が  $10 \mu\text{m}$  程度あり、クヌッセン数は  $K_n = 0.0064$  と非常に小さい。これらのことより、VTR装置の磁気テープ浮上の解析には、すべり流れ領域での潤滑現象においてこれまでその有効性が示されている、分子の平均自由行程を考慮した 2-3 式で表される修正レイノルズ方程式で現象を記述することは合理的であると考えられる。

$$\left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left( \text{Ph}^3 \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \text{Ph}^3 \frac{\partial P}{\partial y} \right) \right\} + 6\lambda_a P_a \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left( h^2 \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( h^2 \frac{\partial P}{\partial y} \right) \right\} = 6\mu \left\{ V_x \frac{\partial(\text{Ph})}{\partial x} + V_y \frac{\partial(\text{Ph})}{\partial y} + \text{Ph} \frac{\partial(V_x)}{\partial x} + \text{Ph} \frac{\partial(V_y)}{\partial y} \right\} \quad 2-3$$

ここに、 $V_x$  は  $x$  方向の速度、 $V_y$  は  $y$  方向の速度を表し、 $\lambda_a$  は大気圧状態における分子の平均自由行程であり、 $P_a$  は大気圧である。

表 2.1 磁気ディスクと磁気テープの  
潤滑領域の比較例

項目	磁気テープ	磁気ディスク
磁気ヘッド	0.16 mm × 3 mm	0.6 mm × 4 mm × 2
磁気ヘッド上の面積 (潤滑領域における 割合)	0.5 mm <sup>2</sup> (0.04%)	4.8 mm <sup>2</sup> (100%) (スライダを含む)
全潤滑領域の面積 (磁気テープは ドラム径 31 mm 180度掛け)	1231 mm <sup>2</sup>	4.8 mm <sup>2</sup>

## 2. 4. 2 磁気テープの変形方程式

VTR装置の場合、ドラムは5m/s～50m/s程度の速度で回転しているのに対し、磁気テープは数十mm/sの送り速度で走行している。この場合、磁気テープには図2.5に示す次の5種類の力が加わる。

- 1) テープの張力-----  $T$  (N/m)
- 2) 曲げモーメント-----  $M_x, M_y$  (Nm)
- 3) テープ走行(送り)による遠心力--  $F$  (N)
- 4) 潤滑流体(空気)の動圧力-----  $P$  (Pa)
- 5) 外圧-----  $P_a$  (Pa)
- 6) 磁気テープと磁気ヘッドあるいはドラムとの接触により発生する反力--  $R$  (N)

この6つの力によって磁気テープは変形し、ドラム及び磁気ヘッドとの隙間分布が定常状態を呈する。

家庭用VHS方式の磁気テープ(幅12.65mm, 厚さ18 $\mu$ m, 弾性定数 $E$ は5.88GPa)の場合、長手方向を $x$ 軸として、 $x$ 軸方向に張力 $T=23.4$ N/mが負荷された場合、磁気テープに発生する $x$ 軸方向の応力は $\sigma_x=1.29$ MPaとなり、 $x$ 軸方向の伸びひずみは $\varepsilon_x=2.19 \times 10^{-4}$ となる。このため、面外の変形のみならず、面内の変形を考慮する必要がある。坂口らの解析では<sup>[34,35]</sup>、この面内変形を考慮しておらず、また平面でモデル化した、静止したドラム上を磁気テープのみが速度 $V$ で走行するモデルを用いており、さらに磁気テープがドラムとの相対速度により遠心力を受けるとしている。

本論文の対象となるVTR装置及びその他の磁気テープを用いたヘリカルスキャン型の磁気記録装置では、前述したように磁気テープには送り速度による遠心力と張力とドラムの回転によって発生する潤滑膜圧力が作用し、磁気テープはドラム及び磁気ヘッド上で浮上・変形する。磁気テープの送り速度が小さい場合には、遠心力の影響は少ない。これに対し送り速度が大きい場合、遠心力が問題となる。坂口らのように平面モデルにおいてドラムの周速と磁気テープの送り速度の相対速度により磁気テープが遠心力を受けるとすると、磁気テープにかかる遠心力を過大に評価することになる。本来、平面モデルの場合、磁気テープは曲率が0で走行する為に遠心力を考慮する必要はなく、実際には曲率を持つ磁気ヘッド周辺での複雑な現象を解析するのに、このようにモデル化をすることで計算結果に問題が生じると考えられる。以上のように平面モデルでは、3次元の曲面形状が解析

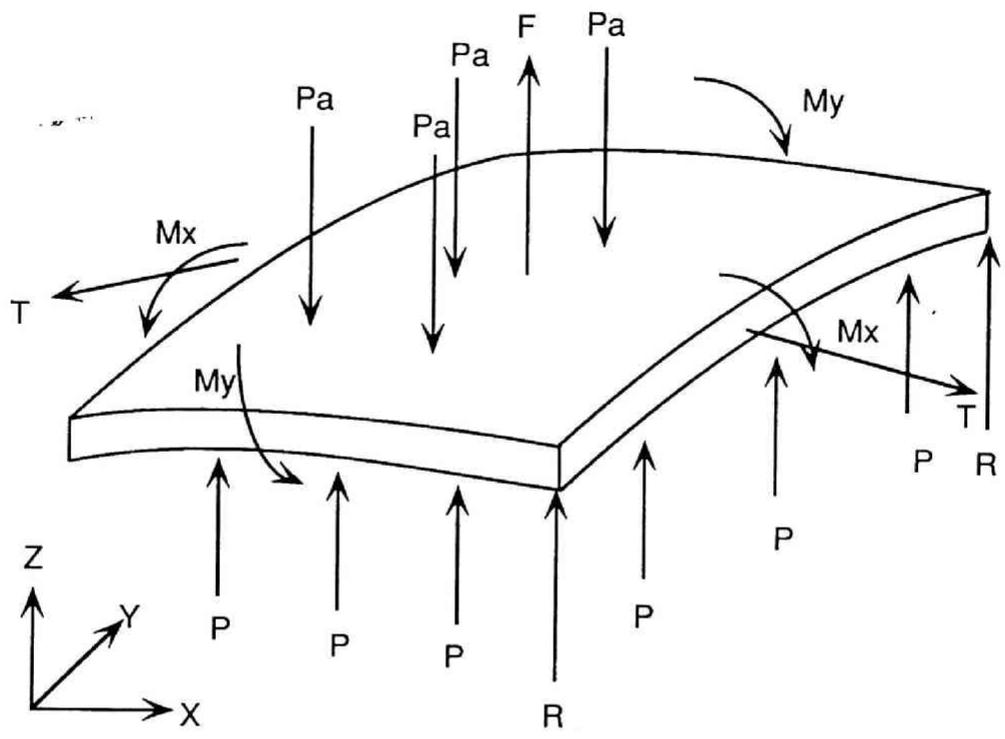


図 2.5 磁気テープの力の釣合

結果に大きく影響するVTR等のドラムや磁気ヘッド駆動のヘリカルスキャン型の磁気記録装置に対して、工業的に利用できるような浮上特性の定量評価はできない。

本論文では、面内応力と磁気テープの送り速度を考慮した、線形異方性弾性変形問題として磁気テープの変形を次式によって表す。式中 $x, y, z$ は局所座標系を、 $X, Y, Z$ は全体座標系を表す。

面内応力について応力と外力の平衡方程式は

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + f_x = 0 \quad 2-4$$

$$\frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + f_y = 0 \quad 2-5$$

となる。

応力とひずみの関係式は

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} E_x/(1-\nu_x\nu_y) & \nu_x E_y/(1-\nu_x\nu_y) & 0 \\ \nu_y E_x/(1-\nu_x\nu_y) & E_y/(1-\nu_x\nu_y) & 0 \\ 0 & 0 & G_{xy} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad 2-6$$

と表せる。ここで、

$$G_{xy} = \frac{E_x E_y}{\{E_x + E_y(1+2\nu_x)\}} \quad 2-7$$

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \partial u / \partial x \\ \partial v / \partial y \\ \partial u / \partial y + \partial v / \partial x \end{Bmatrix}$$

である。

また、曲げ変形の平衡方程式は

$$D_{xx} \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2(D_{xy} + D_{ss}) \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + D_{yy} \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} + t(\rho U_x^2 \sigma_x) \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = P - P_a \quad 2-8$$

ここで、

$$D_{xx} = \frac{E_x t^3}{12(1 - \nu_x \nu_y)} \quad 2-9$$

$$D_{yy} = \frac{E_y t^3}{12(1 - \nu_x \nu_y)} \quad 2-10$$

$$D_{xy} = \nu_y D_{xx} \quad 2-11$$

$$D_{ss} = G_{xy} t^3 / 6 \quad 2-12$$

となる。ここで  $t$  は磁気テープの厚さ、 $\rho$  は磁気テープの体積密度、 $u$ 、 $v$ 、 $w$  はそれぞれ  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向の変位、 $P$  は潤滑膜圧力、そして  $P_a$  は大気圧（25 度 C、一気圧）であり、 $U_x$  は磁気テープの  $x$  軸方向の送り速度、 $E_x$ 、 $E_y$  はそれぞれ  $x$  方向及び  $y$  方向の磁気テープの弾性定数、 $\nu_x$ 、 $\nu_y$  はそれぞれ  $x$  軸方向及び  $y$  軸方向のポアソン比である。2-8 式の左辺第 4 項は遠心力の項を含んでいる。

磁気ヘッド近傍での磁気テープの変形は図 2.6 のようになり、磁気テープの厚さが薄い場合には磁気ヘッドの突き出しにより磁気テープの変形量が磁気テープ厚さを越えるため、米田らは磁気テープの変形の支配方程式として、2 次の非線形項を考慮した大たわみの方程式を用いている [36,37]。有限変形理論では、応力は面外への移動による変形を考慮し、応力とひずみの関係は 2-6 式に対して、

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} E/(1-\nu^2) & \nu E/(1-\nu^2) & 0 \\ \nu E/(1-\nu^2) & E/(1-\nu^2) & 0 \\ 0 & 0 & G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{1}{2} \left\{ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right\} \\ \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{1}{2} \left\{ \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right\} \\ \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \left( \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y} \right) \end{bmatrix} \quad 2-13$$

$$G = E/2(1 + \nu) \quad 2-14$$

となる。2-13 式では等方性弾性変形を仮定しており、 $E$  は等方性の弾性定数である。

VTR の磁気ヘッドの突き出し量は家庭用 VTR の場合、磁気テープの平均浮上面から約 45  $\mu\text{m}$  である。これにより磁気テープはテント形状に変形し、その端は磁気ヘッドの取り付け穴の外側まで広がる。本章では磁気テープの長手方向に  $x$  軸を取り、その方向に張力  $T$  が作用するように座標軸を取っている。このとき、VHS 用の塗布型磁気テープの場合、磁気ヘッド周辺での各項のひずみのオーダーは次のようになる。

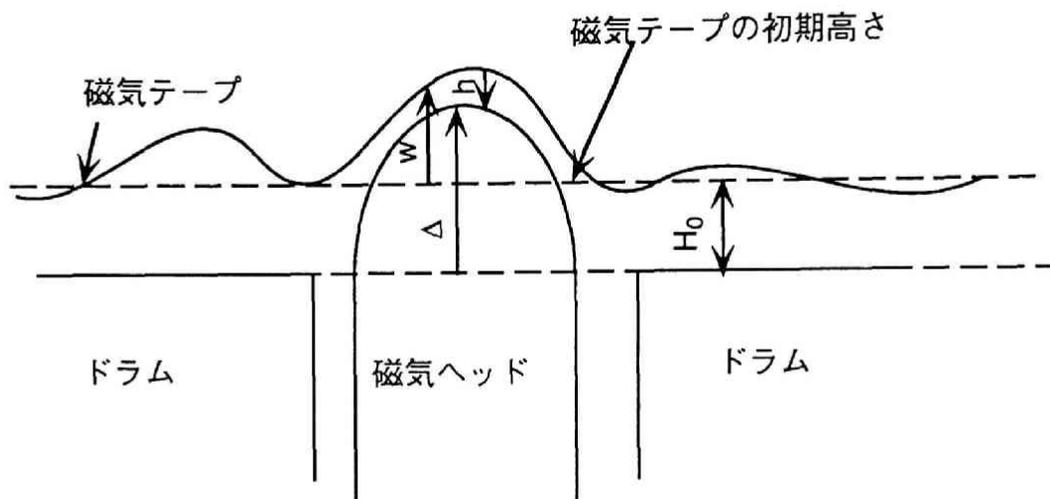


図 2.6 浮上量と磁気ヘッドの形状関数の関係

$$\frac{\partial u}{\partial x} \cong 10^{-4} \quad , \quad \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \cong 10^{-5} \quad , \quad \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \cong 10^{-5}$$

これら以外の非線形項はさらに小さいオーダーになる。この結果、面内応力の大きさは、 $u$ 、 $v$ の大きさが同じであるとして微小変形理論を用いて解析すると、有限変形理論を用いた場合よりも10%低くなり、従って、逆に同じ応力下では変形は10%程度大きくなると予測できる。磁気テープの厚さは19  $\mu\text{m}$ 程度であり、また、磁気ヘッドは長さ3 mmから5 mmで幅100  $\mu\text{m}$ でその曲率半径は10 mm程度である。この場合、各項はオーダー解析の結果、曲げ変形においてひずみの線型項が支配的であり、非線形項は線型項に比べて最も大きい磁気ヘッドの周辺で線型項の10%以下しかない。また、磁気テープの変位 $w$ が磁気テープの厚さ $t$ を越える領域は、磁気ヘッドの近傍のみでありドラム上では $w$ は $t$ を越えない。磁気ヘッド周辺の面積は全解析対象領域の2%程度であり、全体として大たわみ問題として取り扱う必要はない。逆に、大たわみ問題として計算すると、非線形の処理が入るために数値計算誤差が蓄積され、解の精度が落ちるといった問題が生じる。また、磁気テープの厚さは薄く、弾性定数等の測定が困難である。引張り試験等による弾性定数の測定においては10%程度の誤差を含む可能性があり、非線形計算の解の収束性及び繰り返し計算における蓄積誤差といった問題を内包する有限変形理論を用いるよりも、より安定な計算手法の実現が先決である。そこで本研究では、まず微小変形理論を用いて計算理論及び計算手法の確立を行い、後にその結果に基づき有限変形理論の必要性について論じることとする。

### 2. 4. 3 磁気テープの材料異方性の取り扱い

図2.7は磁気テープの典型的な構造を示したものである。磁気テープはバックコート、ベースフィルム、磁性層の3層からなり、磁性層には酸化鉄 ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) 等が含有されている。下の2層は初期には等方性であるが、最上層は酸化鉄等の磁性針状粒子を含むために異方性を示す。さらに、磁気テープは製造過程において延伸加工されるために、長手方向に伸ばされており、その結果、下2層も異方性を示すようになる。磁気テープの変形を正確にモデル化するには、内部構造を考慮に入れる必要があるが、本研究では磁気テープは異方性を示す単一材料として扱うこととする。

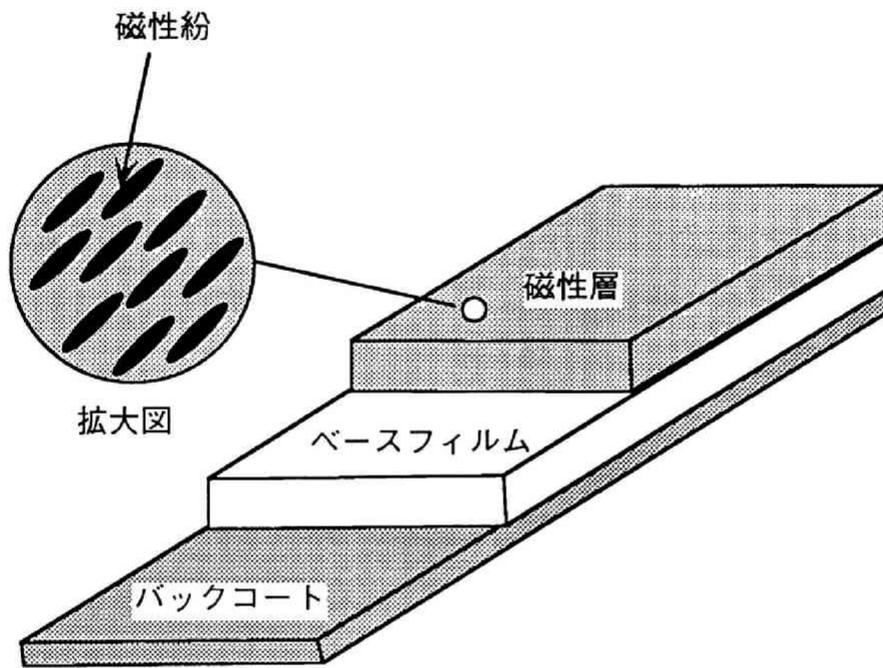


図 2.7 磁気テープの構造

材料が異方性を示す場合の応力-ひずみの関係は、2-6式で表せる [53,54,55]。さらに、Maxwell-Bettiの相反定理より、2-15式が得られる。

$$\frac{\nu_x}{E_x} = \frac{\nu_y}{E_y} \quad 2-15$$

$E_x$ ,  $E_y$ については材料試験から求めることができるが、せん断応力  $G_{xy}$ については測定が困難であるために、いくつかのモデルが提案されている [56,57,58]。このうち、2-16式の赤坂の式では、等方性媒体に対して  $x$  軸及び  $y$  軸方向の弾性定数を等しいとしても ( $E_x = E_y$ ) 等方性の場合の2-14式に一致しない。

$$G = \frac{1}{8} \left( \frac{E_x + E_y - 2\nu_x E_y}{1 - \nu_x \nu_y} + \frac{E_x}{2(1 + \nu_x)} \right) \quad 2-16$$

赤坂の式はラジアルタイヤ等異方性の強い材料に対して適用されている。磁気テープの場合は次式で定義する異方性比率  $\phi$  (2-17式) が  $\phi = 0.5 \sim 1.5$  程度であるため、本研究では、このような材料に対して成立するとされている2-7式の大久保の式を用いることにする。

$$\phi = E_y / E_x \quad 2-17$$

## 2.5 有限要素法による離散化

本節では、VTRテープ/ヘッドインターフェース解析に必要な3つの支配方程式すなわち修正レイノルズ方程式、曲げ変形と面内変形に関する式を有限要素法を用いて離散化する [59,60,61]。

### 2.5.1 修正レイノルズ方程式の展開

修正レイノルズ方程式 (2-3式) を有限要素法を用いて離散化する。

磁気テープの浮上解析は大気圧の環境において行う。そこで、2-3式の圧力  $P$  を大気圧  $P_a$  と大気圧からの変化量  $p$  に分解する。

$$P = P_a + p \quad 2-18$$

2-3式の両辺に重み関数 $p^*$ をかけて、解析領域全体について積分すると2-19式を得る。

$$\begin{aligned}
 & \int_{\Omega} p^* \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left( h^3 p \frac{\partial(P_a+p)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( h^3 p \frac{\partial(P_a+p)}{\partial y} \right) \right\} dx dy \\
 & + 6\lambda P_a \int_{\Omega} p^* \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left( h^2 \frac{\partial(P_a+p)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( h^2 \frac{\partial(P_a+p)}{\partial y} \right) \right\} dx dy \\
 & - 6\mu \int_{\Omega} p^* \left\{ hp \frac{\partial V_x}{\partial x} + pV_x \frac{\partial h}{\partial x} + hV_x \frac{\partial(P_a+p)}{\partial x} \right\} dx dy \\
 & - 6\mu \int_{\Omega} p^* \left\{ hp \frac{\partial V_y}{\partial y} + pV_y \frac{\partial h}{\partial y} + hV_y \frac{\partial(P_a+p)}{\partial y} \right\} dx dy = 0
 \end{aligned} \tag{2-19}$$

ここで、 $V_x$ は $x$ 軸方向への壁面と磁気テープとの相対速度、 $V_y$ は $y$ 軸方向への壁面と磁気テープとの速度をそれぞれ表し、 $\Omega$ は解析領域を表す。

$\mu$ と $\lambda$ は圧力により変化せず領域内で一定であると仮定して、2-19式の左辺第1及び第2項に部分積分を施して整理すると2-20式を得る。

$$\begin{aligned}
 & \int_{\Omega} \left\{ h^3 p \frac{\partial(P_a+p)}{\partial x} \frac{\partial p^*}{\partial x} + h^3 p \frac{\partial(P_a+p)}{\partial y} \frac{\partial p^*}{\partial y} \right\} dx dy \\
 & + 6\lambda P_a \int_{\Omega} \left\{ h^2 \frac{\partial(P_a+p)}{\partial x} \frac{\partial p^*}{\partial x} + h^2 \frac{\partial(P_a+p)}{\partial y} \frac{\partial p^*}{\partial y} \right\} dx dy \\
 & - 6\mu \int_{\Omega} p^* \left\{ hp \frac{\partial V_x}{\partial x} + pV_x \frac{\partial h}{\partial x} + hV_x \frac{\partial(P_a+p)}{\partial x} \right\} dx dy \\
 & - 6\mu \int_{\Omega} p^* \left\{ hp \frac{\partial V_y}{\partial y} + pV_y \frac{\partial h}{\partial y} + hV_y \frac{\partial(P_a+p)}{\partial y} \right\} dx dy \\
 & = \int_{\Gamma} p^* h^3 p \frac{\partial(P_a+p)}{\partial n} ds + 6\lambda P_a \int_{\Gamma} p^* h^2 p \frac{\partial(P_a+p)}{\partial n} ds
 \end{aligned} \tag{2-20}$$

ここに、 $s$ は解析領域 $\Omega$ の境界を表し、 $n$ は境界 $s$ に立てた外向き法線方向を表す。

解析領域 $\Omega$ をアイソパラメトリック一次要素で要素分割する。要素の形状関数を $N_{\alpha}$ とすると隙間 $h$ 及び圧力 $p$ そして速度 $V_x$ 及び $V_y$ は各要素内で次式のように補間できる。

$$p = \sum_{\alpha}^m N_{\alpha} p_{\alpha} \tag{2-21}$$

$$h = \sum_{\alpha}^m N_{\alpha} h_{\alpha} \tag{2-22}$$

$$V_x = \sum_{\alpha}^m N_{\alpha} V_{x\alpha} \quad 2-23$$

$$V_y = \sum_{\alpha}^m N_{\alpha} V_{y\alpha} \quad 2-24$$

ここで  $h_{\alpha}, p_{\alpha}, V_{x\alpha}, V_{y\alpha}$  は要素を構成するの各節点での隙間と圧力及び速度の値で、 $m$  は要素を構成する節点数である。

2-21式から2-24式を2-20式に代入し、重み関数  $P^*$  として形状関数  $N_{\alpha}$  を用いるとすると、2-25式に示す要素  $e$  において満足すべき離散化方程式  $R_i^e$  を得る。

$$\begin{aligned} R_i^e = & \sum_{\beta}^m \sum_{\gamma}^m \int_{\Omega} \left( \sum_{\delta}^m N_{\delta} h_{\delta} \right)^3 N_{\beta} P_{\beta} P_{\gamma} \left( \frac{\partial N_{\gamma}}{\partial x} \frac{\partial N_i}{\partial x} + \frac{\partial N_{\gamma}}{\partial y} \frac{\partial N_i}{\partial y} \right) dx dy \\ & + P_a \sum_{\beta}^m \int_{\Omega} \left( \sum_{\delta}^m N_{\delta} h_{\delta} \right)^3 P_{\beta} \left( \frac{\partial N_{\beta}}{\partial x} \frac{\partial N_i}{\partial x} + \frac{\partial N_{\beta}}{\partial y} \frac{\partial N_i}{\partial y} \right) dx dy \\ & + 6\lambda P_a \sum_{\beta}^m \int_{\Omega} \left( \sum_{\delta}^m N_{\delta} h_{\delta} \right)^2 P_{\beta} \left( \frac{\partial N_{\beta}}{\partial x} \frac{\partial N_i}{\partial x} + \frac{\partial N_{\beta}}{\partial y} \frac{\partial N_i}{\partial y} \right) dx dy \\ & + 6\mu \sum_{\beta}^m \int_{\Omega} \left\{ N_i (N_{\beta} P_{\beta} + P_a) \left( \sum_{\delta}^m N_{\delta} h_{\delta} \right) \left( \sum_{\gamma}^m V_{x\gamma} \frac{\partial N_{\gamma}}{\partial x} \right) \right. \\ & \quad + N_i (N_{\beta} P_{\beta} + P_a) \left( \sum_{\delta}^m h_{\delta} \frac{\partial N_{\delta}}{\partial x} \right) \left( \sum_{\gamma}^m V_{x\gamma} N_{\gamma} \right) \\ & \quad \left. + N_i P_{\beta} \frac{\partial N_{\beta}}{\partial x} \left( \sum_{\delta}^m h_{\delta} N_{\delta} \right) \left( \sum_{\gamma}^m V_{x\gamma} N_{\gamma} \right) \right\} dx dy \\ & + 6\mu \sum_{\beta}^m \int_{\Omega} \left\{ N_i (N_{\beta} P_{\beta} + P_a) \left( \sum_{\delta}^m N_{\delta} h_{\delta} \right) \left( \sum_{\gamma}^m V_{y\gamma} \frac{\partial N_{\gamma}}{\partial y} \right) \right. \\ & \quad + N_i (N_{\beta} P_{\beta} + P_a) \left( \sum_{\delta}^m h_{\delta} \frac{\partial N_{\delta}}{\partial y} \right) \left( \sum_{\gamma}^m V_{y\gamma} N_{\gamma} \right) \\ & \quad \left. + N_i P_{\beta} \frac{\partial N_{\beta}}{\partial y} \left( \sum_{\delta}^m h_{\delta} N_{\delta} \right) \left( \sum_{\gamma}^m V_{y\gamma} N_{\gamma} \right) \right\} dx dy = 0 \\ & \quad i = 1, 2, \dots, m \end{aligned} \quad 2-25$$

ただし、境界における圧力については自然境界として境界積分項（式2-20の右辺）は

0とした。すなわち、

$$\int_s p^* h^3 p \frac{\partial(P_a+p)}{\partial n} ds + 6\lambda P_a \int_s p^* h^2 p \frac{\partial(P_a+p)}{\partial n} ds = 0 \quad 2-27$$

とした。

## 2. 5. 2 面内変形方程式の展開

次に面内変形に関する基礎式である2-6式を有限要素法を用いて離散化する。

節点 $\alpha$ における面内の $x$ 及び $y$ 方向の変形量を $u_\alpha, v_\alpha$ とする。要素内における任意点での変形量は2-28式, 2-29式で表される。

$$u = \sum_{\alpha}^m M_{\alpha} u_{\alpha} \quad 2-28$$

$$v = \sum_{\alpha}^m M_{\alpha} v_{\alpha} \quad 2-29$$

ここで、 $M_{\alpha}$ は形状関数、そして $m$ は要素を構成する節点数である。本研究では、一次三角形要素と四辺形要素を用いており、それぞれ $m=3, 4$ である。本章では今後三角形要素に基づいて理論展開を進める。

2-28式, 2-29式を用いて通常有限要素法の手順により積分し離散化した結果、2-30式に示す要素 $e$ における連立1次方程式を得る。

$$\mathbf{K}_L^e \mathbf{u} = \mathbf{f}_L^e \quad 2-30$$

$$\mathbf{K}_L^e = \int_{\Omega} \mathbf{B}_L^T \mathbf{D}_L \mathbf{B}_L dx dy$$

$$\mathbf{B}_L = \begin{pmatrix} \frac{\partial M_1}{\partial x} & 0 & \frac{\partial M_2}{\partial x} & 0 & \frac{\partial M_3}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial M_1}{\partial y} & 0 & \frac{\partial M_2}{\partial y} & 0 & \frac{\partial M_3}{\partial y} \\ \frac{\partial M_1}{\partial y} & \frac{\partial M_1}{\partial x} & \frac{\partial M_2}{\partial y} & \frac{\partial M_2}{\partial x} & \frac{\partial M_3}{\partial y} & \frac{\partial M_3}{\partial x} \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{D}_L = \begin{pmatrix} E_x/(1-\nu_x \nu_y) & \nu_x E_y/(1-\nu_x \nu_y) & 0 \\ \nu_y E_x/(1-\nu_x \nu_y) & E_y/(1-\nu_x \nu_y) & 0 \\ 0 & 0 & G_{xy} \end{pmatrix}$$

ここで $\mathbf{K}_b^e$ は面内変形の要素剛性行列、 $\mathbf{f}_b^e$ は要素eにおける各節点における外力ベクトルで、 $\mathbf{u}$ は $(u_1, v_1, u_2, v_2, \dots, u_m, v_m)$ を成分とする変位ベクトルである。

### 2. 5. 3 曲げ変形方程式の展開

次に、曲げ変形方程式を有限要素法で離散化し、要素剛性行列を求める。

2-8式の第1項から第3項までは通常の曲げ変形の力の釣合の式であるから、面内応力について2-30式を求めた方法と同じ方法で離散化する。

まず要素eにおける節点変位ベクトル $\mathbf{w}^e$ を式2-31で定義する。

$$\mathbf{w}^e = \left( w_1 \quad \theta_{x1} \quad \theta_{y1} \quad w_2 \quad \theta_{x2} \quad \theta_{y2} \quad w_3 \quad \theta_{x3} \quad \theta_{y3} \right)^T = \left( w_1 \quad \frac{-\partial w_1}{\partial x} \quad \frac{\partial w_1}{\partial y} \quad w_2 \quad \frac{-\partial w_2}{\partial x} \quad \frac{\partial w_2}{\partial y} \quad w_3 \quad \frac{-\partial w_3}{\partial x} \quad \frac{\partial w_3}{\partial y} \right)^T \quad 2-31$$

ここに $\theta_{x\alpha}, \theta_{y\alpha}$ はそれぞれ節点 $\alpha$ におけるx軸及びy軸回りの回転を表す。

要素e内の点q(x,y)における変位ベクトル $\mathbf{w}_q^e(w_q, \theta_{xq}, \theta_{yq})$ は、形状関数を $\mathbf{L}_q^e = \{L_{ij}^e\}$ とすると2-32式となる。

$$\begin{aligned} w_q &= \sum_{\alpha=1}^m w_\alpha L_{\alpha 1}^e \\ \theta_{xq} &= \sum_{\alpha=1}^m \theta_{x\alpha} L_{\alpha 2}^e \\ \theta_{yq} &= \sum_{\alpha=1}^m \theta_{y\alpha} L_{\alpha 3}^e \end{aligned} \quad 2-32$$

$$\begin{aligned} L_{\alpha 1}^e &= \delta_\alpha + \delta_\alpha^2 \delta_{\alpha+1} + \delta_\alpha^2 \delta_{\alpha+2} - \delta_{\alpha+1}^2 \delta_\alpha - \delta_{\alpha+2}^2 \delta_\alpha \\ L_{\alpha 2}^e &= (y_\alpha - y_{\alpha+1}) (\delta_\alpha^2 \delta_{\alpha+1} + \delta_\alpha \delta_{\alpha+1} \delta_{\alpha+2}) + (y_{\alpha+2} - y_\alpha) (\delta_\alpha^2 \delta_{\alpha+2} + \delta_\alpha \delta_{\alpha+1} \delta_{\alpha+2}) \\ L_{\alpha 3}^e &= (x_{\alpha+1} - x_\alpha) (\delta_\alpha^2 \delta_{\alpha+1} + \delta_\alpha \delta_{\alpha+1} \delta_{\alpha+2}) + (x_\alpha - x_{\alpha+2}) (\delta_\alpha^2 \delta_{\alpha+2} + \delta_\alpha \delta_{\alpha+1} \delta_{\alpha+2}) \\ &\alpha = 1, 2, \dots, m \end{aligned}$$

ここで、 $\delta_\alpha$ は面積座標を表す。そして、要素剛性マトリックス $\mathbf{K}_b^e$ は2-33式となる。

$$\mathbf{K}_b^e = \int_{\Omega} \mathbf{B}_b^T \mathbf{D}_b \mathbf{B}_b dx dy \quad 2-33$$

$$\mathbf{B}_b = \left( -\frac{\partial^2}{\partial x^2} \mathbf{L}_q^e \quad -\frac{\partial^2}{\partial y^2} \mathbf{L}_q^e \quad 2\frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \mathbf{L}_q^e \right)^T \quad 2-34$$

$$\mathbf{D}_b = \begin{pmatrix} D_{xx} & \nu_x D_{yy} & 0 \\ \nu_y D_{xx} & D_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & D_{ss} \end{pmatrix} \quad 2-35$$

ここで、 $\mathbf{B}_b, \mathbf{D}_b$ はそれぞれ変位からひずみベクトル $\epsilon_b$ を与えるオペレーターと曲げ剛性の行列である。

曲げによるひずみベクトルは2-36式で与えられる。

$$\epsilon_b = \begin{pmatrix} -\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \\ -\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \\ 2\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \end{pmatrix} \quad 2-36$$

2-8式の左辺第4項及び右辺の項は外力ベクトルであり、面内の変形と圧力の関数として次式のようになる。

$$\mathbf{f}_b^e(\mathbf{u}, \mathbf{p}) = \{f_{\beta b}^e\} \quad (\beta=1, 2, \dots, m) \quad 2-37$$

$$\{f_{\beta b}^e\} = \int_{\Omega} L_{\beta 1q}^e \left\{ -t(\rho U_x^2 - \sigma_x) \sum_{\alpha}^m w_{\alpha} \left( \frac{\partial^2 L_{\alpha 1q}^e}{\partial x^2} \right) + \sum_{\alpha}^m p_{\alpha} L_{\alpha 1q}^e \right\} dx dy$$

ここで $\sigma_x$ は要素におけるx方向の面内応力であり、 $p_{\alpha}$ は要素を構成する節点 $\alpha$ における圧力である。外力 $\mathbf{f}_b^e(\mathbf{u}, \mathbf{p})$ は、面内変形による応力 $\sigma_x$ と要素における圧力 $p_{\alpha}$ のみであり、回転 $\theta_x, \theta_y$ に対する外力は存在しないので、曲げモーメントに対する外力成分は0である。

以上より曲げ変形について要素が満足する方程式は2-38式となる。

$$\mathbf{K}_b^e \mathbf{w}^e = \mathbf{f}_b^e(\mathbf{u}, \mathbf{p}) \quad 2-38$$

2-25式, 2-30式, 2-38式を同時に満足する節点変位及び圧力( $u_{\alpha}, v_{\alpha}, w_{\alpha}, \theta_{x\alpha}, \theta_{y\alpha}, p_{\alpha}$ )を求めることが必要である(ここで $\alpha$ は節点を表す)。通常の有限要素法の手順に従って、これら3つの式をそれぞれ全要素の全節点について重ね合わせることにより、解く

べき連立方程式（2-39式，2-40式，2-41式）を得る。

$$\begin{aligned} \mathbf{R} &= 0 && 2-39 \\ \mathbf{G} &= \mathbf{K}_L \mathbf{u} - \mathbf{f}_L = 0 && 2-40 \\ \mathbf{F} &= \mathbf{K}_b \mathbf{w} - \mathbf{f}_b(\mathbf{u}, \mathbf{p}) = 0 && 2-41 \end{aligned}$$

ここで、 $\mathbf{R}$ 、 $\mathbf{G}$ 、 $\mathbf{F}$ はそれぞれ修正レイノルズ方程式と面内変形の式と曲げ変形の式を有限要素法で離散化し、全要素について重ね合わせて得られる連立方程式を表す。 $\mathbf{K}_L$ 及び $\mathbf{K}_b$ はそれぞれ2-30式と2-33式を全要素について重ね合わせて得られるマトリックスである。また、 $\mathbf{f}_L$ と $\mathbf{f}_b$ はそれぞれ2-30式の右辺と2-37式で定義される外力ベクトルを全節点について重ね合わせて得られるベクトルである。さらに $\mathbf{p}$ 、 $\mathbf{u}$ 、 $\mathbf{w}$ は、それぞれ全節点における圧力と面内および曲げの変位からなる変数ベクトルである。

修正レイノルズ方程式において $h$ は磁気テープと磁気ヘッドおよびドラムの間の隙間の大きさである。節点 $i$ における隙間 $h_i$ は磁気テープの変形量の関数であり2-42式の関係が成立する（図2.6参照）。

$$h_i = H_{oi} - \Delta_i + w_i \quad 2-42$$

ここで、 $H_{oi}$ は節点 $i$ における初期隙間（非線形計算をニュートンラフソン法で解く時の初期値）、 $\Delta_i$ は磁気ヘッド及びドラムの表面形状関数である。

## 2.6 方程式の解法

従来のフォイル軸受及びVTRテープ浮上解析の処理フローを図2.8(a)に示す。データを読み込んだ後、構造解析に必要な要素剛性方程式と流体の修正レイノルズ方程式を離散化した連立一次方程式を作成し、それぞれ別々に、境界条件を用いて解く。曲げ変形量 $w$ と圧力 $p$ が連立しているために、2種類の計算方法がとられていた。

その一つは次の通りである。まず初期圧力を仮定して、構造解析（2-40式と2-41式：但し等方性材料のみ）により磁気テープの変形を求める。次に、その磁気テープ変形により生じた隙間分布を用いて、修正レイノルズ方程式（2-39式）より圧力分布を計算する。この圧力と変形を互いに仮定して変形方程式と修正レイノルズの方程式の解を別々に求め、磁気テープの変形と圧力が、ある一定範囲内に収束するまでこの計算を繰り返す。

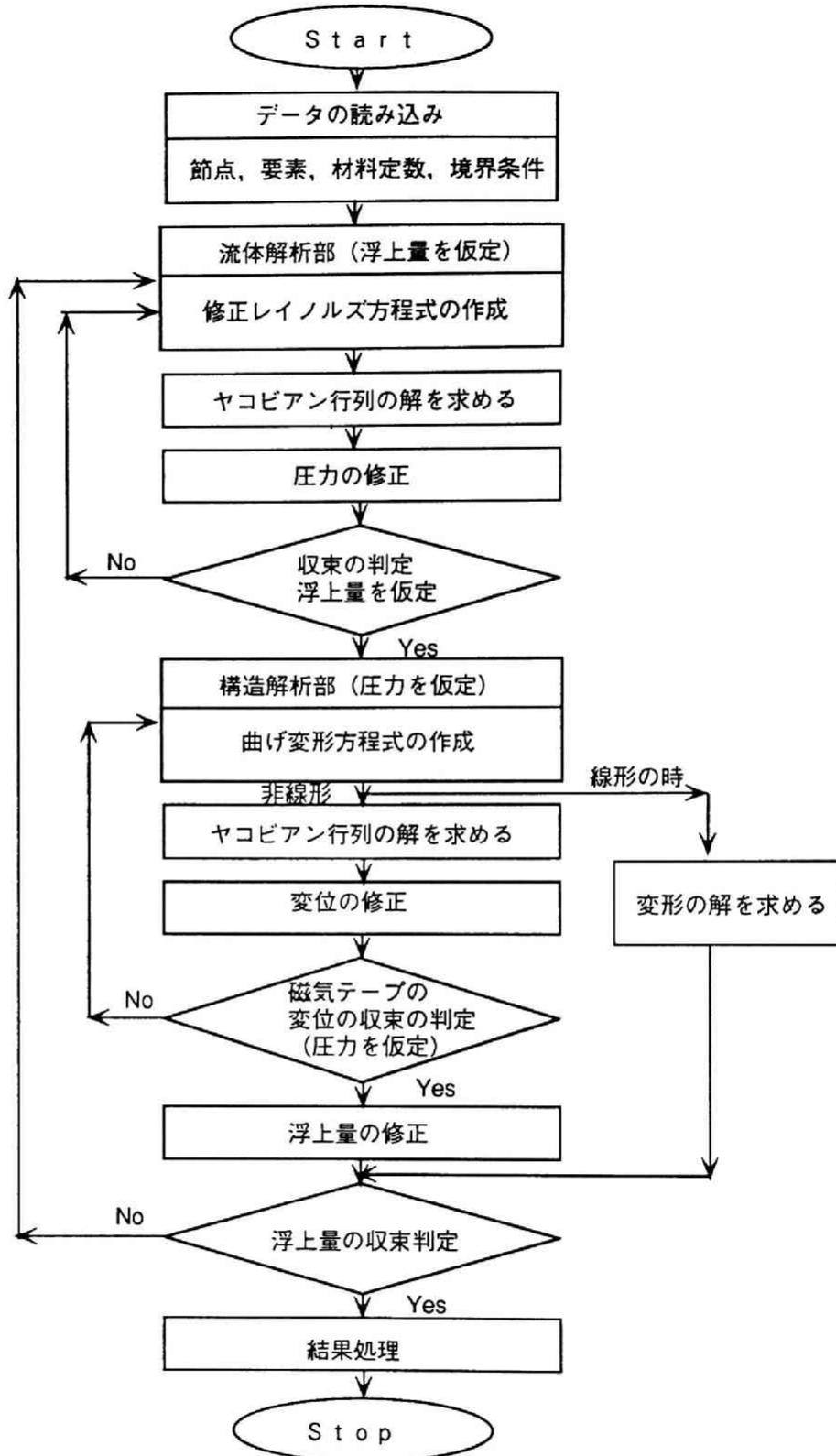


図 2.8 (a) 従来の計算アルゴリズム

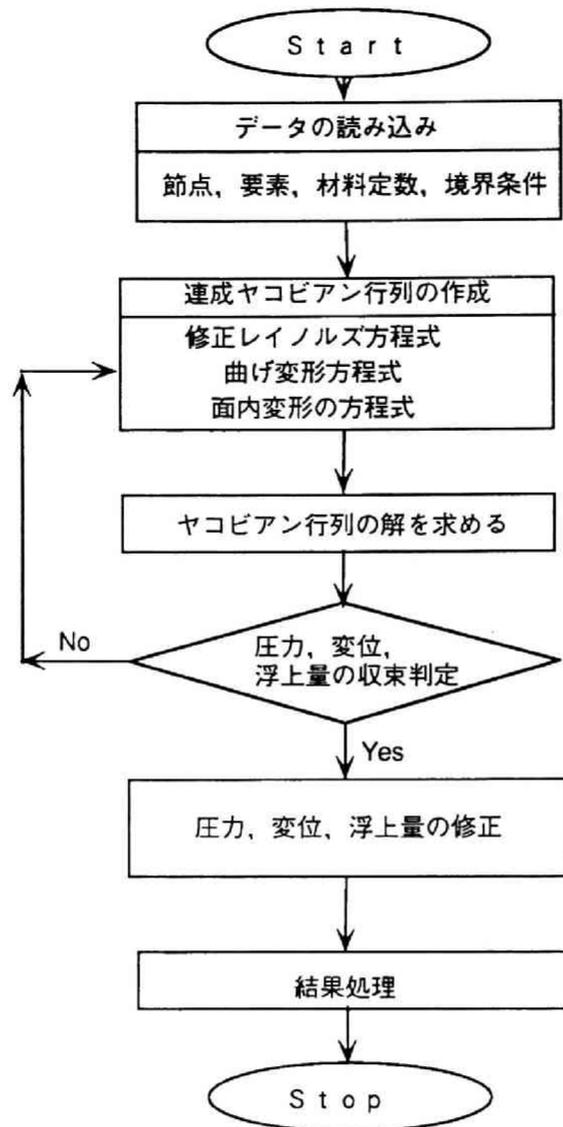


図 2.8 (b) 本研究の計算アルゴリズム

返す。

もう一つの方法は変形量 ( $\mathbf{w}$ ,  $\mathbf{u}$ ) を仮定して始め、後は前者と同じである。これらの方法の問題点を以下に説明する。

説明において式を簡略化するために、2-39式から2-41式に示すように、修正レイノルズ方程式を  $R(p, h(\mathbf{w}, \mathbf{u}))$  で面内変形の方程式を  $G(\mathbf{w}, \mathbf{u})$  で面外変形の方程式を  $F(\mathbf{w}, \mathbf{u}, p)$  で代表する。修正レイノルズ方程式においては磁気テープの変位が与えられていると仮定しているため、磁気テープの変位  $\mathbf{w}$ ,  $\mathbf{u}$  は定数となり、圧力  $p$  のみを変数となる。その結果、修正レイノルズ方程式は次式のように書き換えることができる。

$$R(p, h(\mathbf{w}, \mathbf{u})) = R(p) |^{h(\mathbf{w}, \mathbf{u})} \quad 2-43$$

磁気テープの曲げと面内変形による力の平衡方程式は、圧力  $p$  を含む方程式である。圧力は修正レイノルズ方程式を解いた結果すでに与えられていると仮定することで、磁気テープの変位  $\mathbf{w}$ ,  $\mathbf{u}$  のみを変数となり、次式のように書き換えることができる。

$$F(p, \mathbf{w}, \mathbf{u}) = F(\mathbf{w}, \mathbf{u}) |^p \quad 2-44$$

$$G(\mathbf{w}, \mathbf{u}) = G(\mathbf{w}, \mathbf{u}) \quad 2-45$$

修正レイノルズ方程式は非線形方程式であり、面内および曲げ変形の平衡方程式に大たわみを考慮する場合には変形の平衡方程式も非線形方程式になる。この非線形方程式の解を求める方法としてニュートンラフソン法を用いる場合、解くべき方程式はヤコビアン行列を用いて次式のようにになる。修正レイノルズ方程式  $R(p) |^{h(\mathbf{w}, \mathbf{u})}$  と応力の平衡方程式  $F(\mathbf{w}, \mathbf{u}) |^p$  および  $G(\mathbf{w}, \mathbf{u})$  とは独立しているため、ヤコビアン行列  $J$  において  $J_{12} = J_{13} = J_{21} = J_{31}$  は 0 である。

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial R}{\partial p} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial F}{\partial \mathbf{w}} & \frac{\partial F}{\partial \mathbf{u}} \\ 0 & \frac{\partial G}{\partial \mathbf{w}} & \frac{\partial G}{\partial \mathbf{u}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta p_{i+1} \\ \Delta \mathbf{w}_{i+1} \\ \Delta \mathbf{u}_{i+1} \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} R |^i \\ F |^i \\ G |^i \end{pmatrix} \quad 2-46$$

ここで、 $\mathbf{u}$  は変位 ( $u$ ,  $v$ ) のベクトルである。また、 $\Delta p_{i+1}$ ,  $\Delta \mathbf{w}_{i+1}$ ,  $\Delta \mathbf{u}_{i+1}$  は  $i+1$  回目の繰り返し計算における圧力  $p$  及び変位 ( $\mathbf{w}$ ,  $\mathbf{u}$ ) の修正量を表し、 $R |^i$ ,  $F |^i$ ,  $G |^i$  は  $i$  回目の繰り返し計算の結果得られた圧力及び変位を2-39式~2-41式に代入した値である。

このヤコビアン行列方程式を解いて得られる修正量  $(\Delta p_{i+1}, \Delta w_{i+1}, \Delta u_{i+1})$  で圧力及び変位を修正する。上式から分かるように、圧力の修正量と変位の修正量は独立である。本来、修正レイノルズ方程式及び曲げ変形の方程式は圧力と変位の関係を記述しているにもかかわらず、修正量が独立であることはこの修正量を用いても解の収束性は保証されないことを意味する。

収束解を得るためには、2-46式を解いて得られる修正量  $(\Delta p_{i+1}, \Delta w_{i+1}, \Delta u_{i+1})$  に緩和係数をかけて計算に必要な修正量を算出する必要があるために、計算精度が悪化し計算時間も長くなるという問題が生じる。

本来、修正レイノルズ方程式は、

$$R(p, w, u) = 0 \quad 2-47$$

および、曲げ変形及び面内変形の方程式は

$$F(p, w, u) = 0 \quad 2-48$$

$$G(w, u) = 0 \quad 2-49$$

のように圧力  $p$  と変位  $w, u$  を未知数とする方程式で代表することができる。これらの式を連立して、全てを変数として同時に修正量を求める場合、解くべき方程式は

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial R}{\partial p} & \frac{\partial R}{\partial w} & 0 \\ \frac{\partial F}{\partial p} & \frac{\partial F}{\partial w} & \frac{\partial F}{\partial u} \\ 0 & 0 & \frac{\partial G}{\partial u} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta p_{i+1} \\ \Delta w_{i+1} \\ \Delta u_{i+1} \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} R^i \\ F^i \\ G^i \end{pmatrix} \quad 2-50$$

となる。

この方程式を解いて得られる  $(\Delta p_{i+1}, \Delta w_{i+1}, \Delta u_{i+1})$  は、修正レイノルズ方程式の解および曲げ変形と面内変形の全ての方程式を同時に満足する解の方向を与える。したがってこの方法を用いることによって、解の収束性は保証される。そこで、本研究では、修正レイノルズ方程式 (2-8式) とシェル の面内および面外変形の方程式 (2-3式から2-12式) とを有限要素法で離散化し、それを一つにまとめた一連の式を解くことで、圧力と変形を同時に求めることを試みた。式2-50は1点について、 $(p, u, v, w, \theta_x, \theta_y)$  の6つの変数を持ち、3角形要素では一要素につき  $18 \times 18$  のマトリックスができる。

図2.8 (b) に、本手法による解析システムの処理フローを示す。

2-50式を用いることにより、圧力と変位を同時に満足する解を得ることができる。従来の方法では、圧力に応じた変位を得るために、圧力を仮定して変位を計算し、次に、変位を仮定して圧力を計算する処理を繰り返し行わなければならなかったが、本方法ではその必要がない。すなわち、2-50式を解いて得られる圧力と変位は、隙間分布と圧力を支配する修正レイノルズ方程式と、変位を支配する面内変形及び曲げ変形の2方程式の全てを満足する。これにより解の収束性は向上し、計算時間の短縮化と解の精度向上を実現することが可能になる。

## 2.7 結論

本章では、まずVTR装置のインターフェースを解析するのに必要な支配方程式を導いた。流体の圧力と隙間の大きさについては、磁気テープの平均浮上量と磁気ヘッドの面積をもとに検討し、修正レイノルズ方程式を支配方程式とした。磁気テープの変形と浮上量については、シェルの面内変形を考慮する必要性を示した。そして、有限変形理論におけるひずみ増分についてVTR装置の特徴に基づきオーダー解析を行った結果、有限変形を考慮した場合のひずみ増分は微小変形理論による値に対して10%以内であること確かめた。その結果、本研究では、微小変形理論に基づく面内変形及び面外変形の力の釣合方程式を支配方程式とし、テスト解析及び実機解析の結果より、その有効性について考察することにした。また、磁気テープの材料異方性について示し、支配方程式に材料異方性を考慮する必要性を示し、面内変形及び曲げ変形の釣合の式に材料異方性を取り入れた。

以上、一連の式を有限要素法で離散化する方法と離散化した結果、解くべき方程式を求めた。さらに、離散化した一連の方程式を解く方法として、個々の方程式を別々に解き繰り返し計算で収束解を求める従来方法の欠点を示した。そして本研究で用いる一連の式を連立して同時に解く本方法と従来法を比較し、本方法の長所と優位性を示すとともに、その特徴について考察した。

## 第3章 磁気テープの材料定数と変形量・浮上量の測定

本章では、本研究での解析に必要な各種磁気テープの材料定数の測定方法と、解析結果の検証のために行った磁気テープの変形量・浮上量の測定方法について述べる。

### 3.1 テープの材料定数の測定

#### 3.1.1 従来の方法

VTR等磁気記録用の磁気テープは、図3.1に示すように、非磁性支持体であるポリエチレンテレフタレート（PET：ベースフィルム）の上に、磁性層を塗布又は、蒸着で付着してある。方向を区別するために、図3.2に示すように、磁気テープの巻き取り方向（長手方向）をMD、幅方向をTDと定義する。

ベースフィルムは、磁性層を塗布又は蒸着で付けられる前に、MD方向又はTD方向に延伸加工されることもあり、その前加工の違いにより、バランスタイプ、無加工、MDテンサライズトタイプ、MDスーパーテンサライズトタイプ、TDテンサライズトタイプに分けられる。また、磁性層は $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 等の針状磁性粉を含んでおり、塗布又は蒸着時に磁場をかけることによりMD方向に配向させてあり、MD方向とTD方向でその弾性定数は大きく異なる。これらの磁性粉による異方性と、磁気テープ自体のMD-TD方向への弾性定数の違いにより、記録再生時のヘッド近傍での磁気テープの変形形状は磁気テープの種類によって異なる。その結果、厚さの異なる磁気テープや加工方法の異なる磁気テープ間に設計上および性能上の互換性がないといった問題を生じている。このため、インターフェース解析においては、磁気テープ材料の弾性定数を正確に求め、かつ異方性をも考慮する必要がある。

従来、材料の弾性定数の測定は引張り試験機を用いて行なっていた。しかし、フィルムや繊維などの試料は厚さが数 $\mu\text{m}$ 程度しかないため、測定時に試料にしわがよったり、荷重が小さいために測定誤差も大きくなるという問題点があった。磁気テープ装置の場合、磁気テープは曲率半径を持つドラムの側面を摺動しながら走行するために、磁気テープの曲げ剛性（テープスティフネスと呼ぶ）が変形に大きく影響する。薄板（弾性定数E、厚

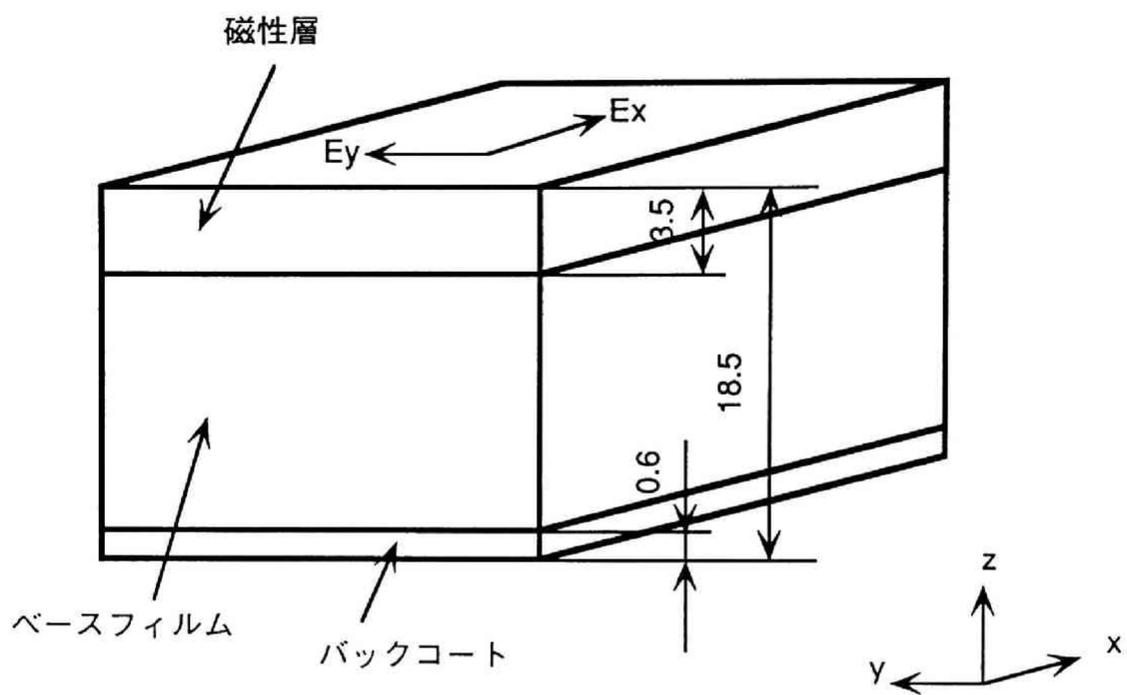


図 3.1 一般的な V T R 磁気テープの構造と寸法  
(V H S 用) (単位  $\mu\text{m}$ )

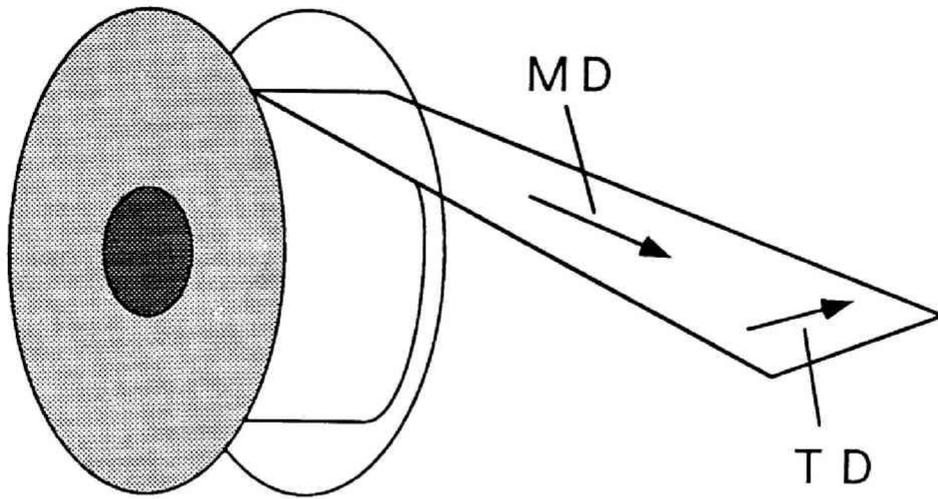


図 3.2 磁気テープの方向の定義

さ  $t$ 、ポアソン比  $\nu$ ) が単位幅あたり曲げモーメント  $M$  を受けるときに  $y$  方向に生じるたわみを  $\Delta$  とすると、スティフネス  $D$  と曲げモーメント及び弾性定数の関係は次のようになる。

$$M = D \left( \frac{\partial^2 \Delta}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 \Delta}{\partial z^2} \right) \quad 3-1$$

ここに

$$D = \frac{E t^3}{12(1 - \nu^2)} \quad 3-2$$

である。

これまで、磁気テープのスティフネスを実験的に求める時には、磁気テープを 1.5 mm 程度の長さに切り、両端を接合して円筒状にした後、図 3.3 に示すように側面に歪みゲージを貼り、上から強制変位又は荷重  $F$  を与えて得られる変位  $\Delta$  と荷重の関係から弾性定数を算出していた。この方法の場合には次のような問題がある。

- 1) 磁気テープを曲げて試料を作成する時に、磁気テープに初期ひずみ及び初期応力が発生しがちである。
- 2) 磁気テープを曲げて円筒にする時の精度が実験結果を大きく左右する。
- 3) 磁気テープの任意軸方向の材料定数を測定するにはその切り出し方法が問題となる。

以上のような問題があったため、従来のスティフネス試験から磁気テープの弾性定数を求める方法では、種々の材料について任意の方向の測定が困難であった。さらに測定に時間をがかかり、しかも信頼性が低下するという問題があった。

本節では、本研究で使用した、超音波分子配向計を用いた弾性定数測定方法について論述する。

### 3. 1. 2 超音波測定による磁気テープ異方性の測定

材料内の低周波数の超音波の伝達速度  $V$  と弾性定数の関係は、3-3式、3-4式で与えられる。

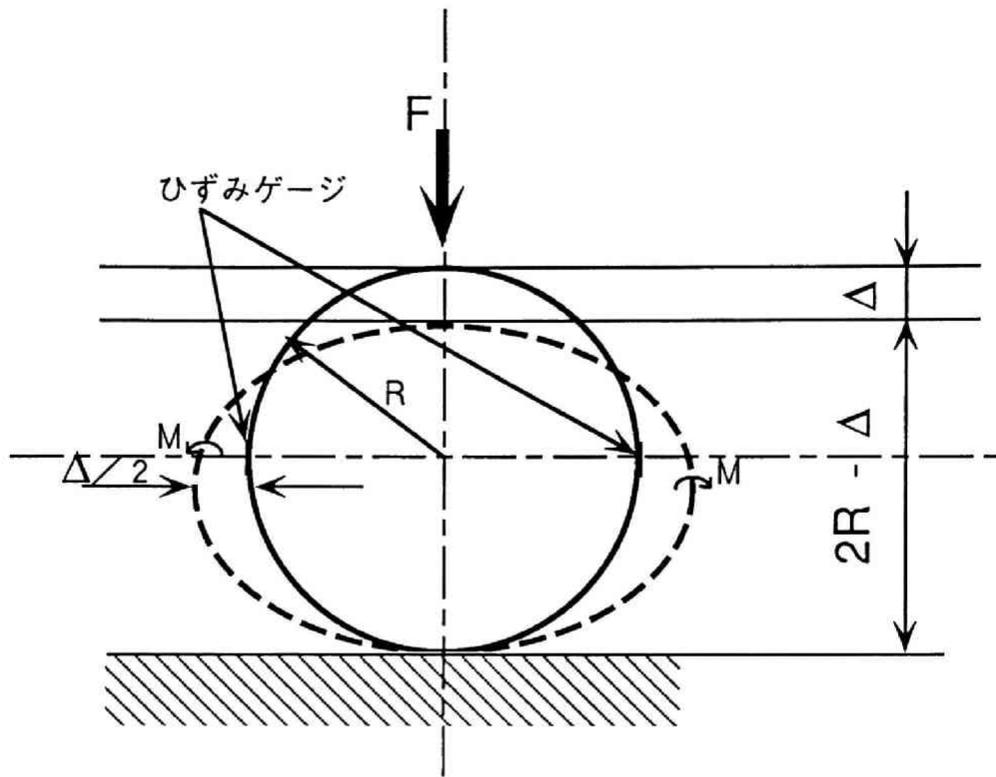


図 3.3 スティフネスの測定方法

縦波の速度 $V_l$ については

$$E = \frac{\rho(1+\nu)(1-2\nu)V_l^2}{(1-\nu)} \quad 3-3$$

となり、また、横波の速度 $V_t$ については

$$E = \rho(1-\nu)V_t^2 \quad 3-4$$

となる。ここに、 $\rho$ は材料の密度、 $\nu$ はポアソン比である。

VTRやオーディオ及びフロッピーディスク等のように、磁性層の厚さが $10\ \mu\text{m}$ 前後と薄くかつ非磁性支持体（ベースフィルム）との接着性が高い場合には、磁気記録媒体が一体の構造物として振動するために、磁性層と非磁性支持体における超音波の伝達速度は等しくなる。そこで、磁気テープ全体及び非磁性支持体単独での伝達速度を個々に測定し、それぞれの弾性定数を3-3式より求め、層間の接着強度を無視して、複合則を用いて、3-5式より磁性層の弾性定数を算出した。

$$E_{\text{mag}} = \frac{d_{\text{Tot}}E_{\text{Tot}} - d_{\text{base}}E_{\text{base}}}{d_{\text{mag}}} \quad 3-5$$

ここで、 $E_{\text{mag}}$ は磁性層の弾性定数を、 $E_{\text{Tot}}$ は全体の弾性定数を、 $E_{\text{base}}$ はベースフィルムの弾性定数を表し、 $d_{\text{Tot}}$ は磁気テープ全体の厚さを、 $d_{\text{base}}$ はベースフィルムの厚さを、 $d_{\text{mag}}$ は磁性層の厚さをそれぞれ表している。

また、ポアソン比については非磁性支持体の値を用いることにした<sup>[62]</sup>。

### 3. 1. 3 測定装置

測定装置の概略を図3.4に示す。

圧電セラミックスや圧電性高分子膜の圧電素子を距離 $L = 10\ \text{mm}$ 離して試料の磁気テ

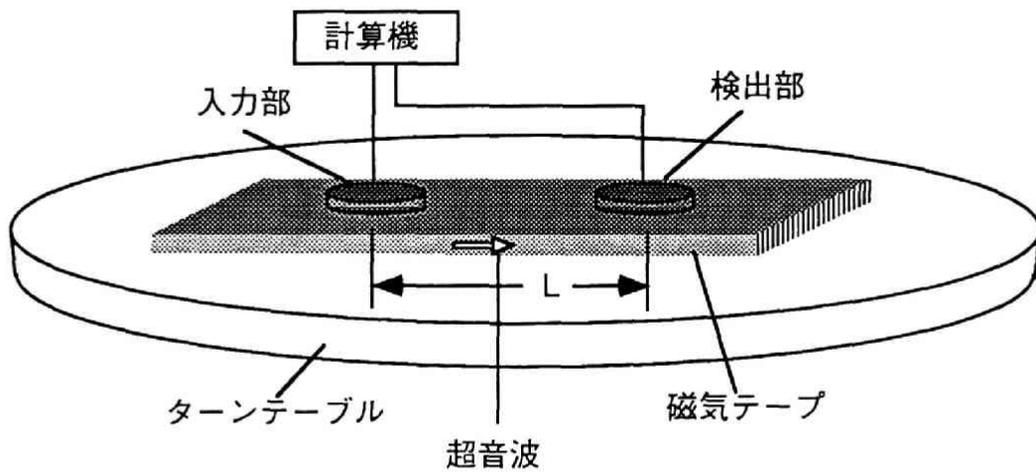


図 3.4 超音波測定装置の概略

ープに接着する。発信端子に超音波を入力し、受信端子で観測されるまでの時間  $T_{ime}$  を測定する。そして、3-6式を用いて伝達速度  $V$  を求めた。

$$V = L/T_{ime} \quad 3-6$$

入力周波数としては、30 kHzを用いた。これは5 kHz以下にすると、音響ノイズの影響が生じ易く、また測定距離も長く取る必要があり、また40 kHz以上の周波数の超音波を使うと、磁気テープのような複合材料では、超音波の減衰が大きくなるためである。

### 3. 1. 4 測定結果及び考察

測定に使用した試料の詳細及び機械的特性を表3.1に示す。試料としては、磁性層厚さが2.5  $\mu\text{m}$ から3.5  $\mu\text{m}$ で、非磁性支持体（ベースフィルム）の厚さが7  $\mu\text{m}$ から15  $\mu\text{m}$ の塗布型のVTR用メタルテープ（表中A～E, G）と、磁性層厚さ0.15  $\mu\text{m}$ で、非磁性支持体の厚さが10  $\mu\text{m}$ の蒸着型のVTR用メタルテープ（同F）を用いた。表3.1内の弾性定数は引張り試験で測定した値であり、ステイフネスは前述のステイフネス試験より求めた値である。

図3.5に、超音波分子配向測定法で求めた弾性定数の値を縦軸に、従来の引張り試験で求めた弾性定数の値を横軸に取り、同一試験片に対して測定した結果をプロットした。超音波分子配向測定法で求めた弾性定数は引張り試験の結果に比べて7%程度高い値を示している。また、引張り試験での測定値の分散が10%であるのに対し、超音波分子配向測定法では1%以下であった。このように、測定値の分散が小さいことは測定精度とも関係し、本手法の再現性と有効性が高いことを示している。

高分子材料の弾性定数は一般にひずみ速度によって変化すると言われている。Bhrushらは<sup>[63]</sup>、磁気テープの弾性定数のひずみ速度依存性について実験し、周波数100 Hzの場合、弾性定数は静的弾性定数に対して最大45%高い値を示すことがあると報告している。家庭用VTRでは、ドラムは磁気ヘッドとともに1800 rpmから5400 rpmで回転しているため、磁気ヘッドは（ドラムに4個の磁気ヘッドが取り付けられている場合）120 Hzから360 Hzで周期的に磁気テープに干渉することになる。すなわち、磁気テープはこの周波数の変形を繰り返し受けていることになる。これらのことから、磁気テープの変形を解析するには、ひずみ速度の影響を考慮した弾性定数を用いることが必要である。

表 3.1 各種磁気テープの機械的特性

用途		全厚 t	各層の厚さ			弾性定数	スティフネス S	
単位		$\mu\text{m}$	磁性層	ベース フィルム	バック コート	GPa	MD $\mu\text{Pa}\cdot\text{m}^3$	TD
	A	18.5	3.5	14.4	0.6	6.96	4.55	3.55
	B	18.6	3.6	15.0	0.0	5.88	3.91	2.95
	C	15.3	3.5	11.2	0.6	7.35	2.72	1.90
	D	15.5	3.5	11.4	0.6	7.84	3.01	2.26
	E	11.2	3.0	7.6	0.6	10.00	1.45	0.97
	F	10.7	0.2	10.0	0.5	5.12	0.65	0.76
	G	10.8	2.5	7.8	0.5	5.88	0.76	0.33

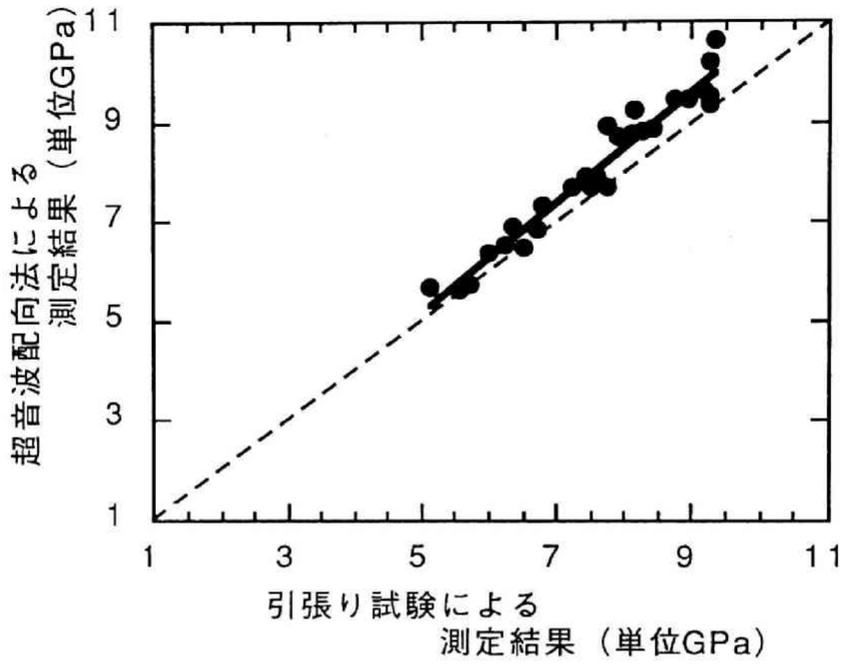


図 3.5 弾性定数の測定結果の比較

しかし、本解析では磁気テープはひずみ速度に依存しない弾性体として扱い、超音波分子配向測定法で求めた弾性定数を用いることにする。

図3.6 (a) 及び (b) はVHS用磁気テープの任意軸方向における弾性定数を、超音波分子配向法を用いて測定した結果である。等方性材料の場合には測定結果のグラフは真円になり、真円からのずれは異方性の強さを表している。図3.6 (a) はベースフィルムと磁気テープ全体の結果、そして、(b) は磁性層単独の結果である。磁性層はMD方向に針状鉄粉を配向してあるために、MD方向にかなり高い弾性定数を持ち、異方性を持っていることが分かる。これに対し、非磁性支持体のベースフィルム (図3.6 (a) に示す) は等方性を示すことが分かる。磁気テープ全体としては磁性層の厚さがベースフィルムの3分の1しかないが、MD方向に強い異方性を示している。

図3.7 (a) , (b) は、Co-Crを蒸着したテープの場合の測定結果である。磁性層はTD方向に弱い異方性を示すが、磁性層の厚さが $0.2\ \mu\text{m}$ と薄いために、テープ全体としてはベースフィルムの特性が支配的ではほぼ等方性を示している (図3.7 (a) )。

### 3. 2 磁気テープ変形の測定

VTRにおける記録再生時において、磁気テープは上下別動するドラム (図2.1または図2.2参照) 上で浮上する。摺動する磁気ヘッドはドラム上の磁気テープ平均浮上量の数倍の突出量を持っており、磁気ヘッド近傍において磁気テープは複雑に変形し (図2.6参照) 、かつ磁気ヘッド上においても $0.1\ \mu\text{m}$ 前後の浮上量で浮いている。ヘッドはドラムとともに回転しており、通常の家用途用VTRの場合で走行速度は、 $5.8\ \text{m/s}$  (直径 $62\ \text{mm}$ のドラムで $1800\ \text{rpm}$ ) である。隙間に発生する圧力は $10^{-2}\ \text{MPa}$ 程度であり、動作時の圧力を実験的に測定することは測定領域が狭いため困難である。また磁気テープの浮上量は、磁気テープが軟らかく浮上量が小さいため、ダイヤルゲージ等の接触方式で測定することは困難である。

そこで、本研究ではレーザー変位計を用いて、動作時の磁気テープの変形を非接触で測定することにした。その結果から、磁気テープの浮上量等を算出し解析結果との比較に用いた。

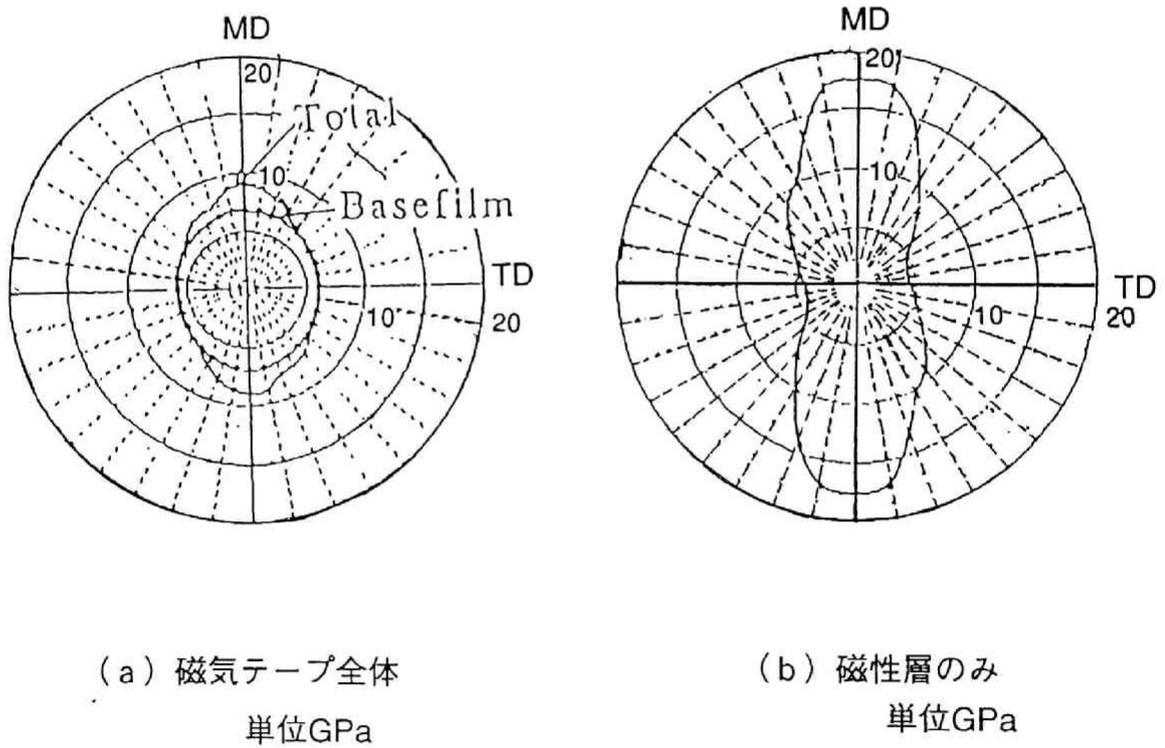
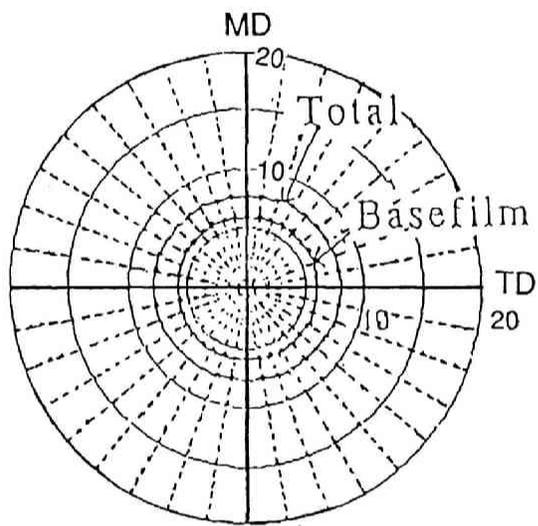
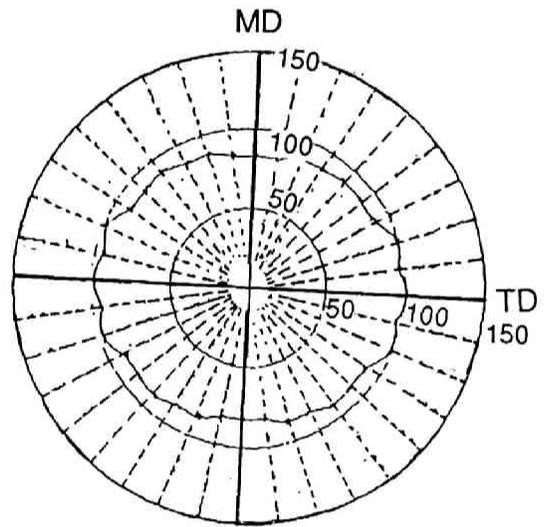


図 3.6, 塗布型磁気テープの弾性定数測定結果



(a) 磁気テープ全体  
単位GPa



(b) 磁性層のみ  
単位GPa

図 3.7 蒸着型磁気テープの弾性定数測定結果

### 3. 2. 1 測定装置

図3.8に測定装置の概略を示す。本実験装置はガイドピンにより、回転するドラムに磁気テープを掛け、磁気テープに張力を負荷することができる。また、磁気テープの巻取りリールに低速のモータを取り付けてあり、磁気テープを低速で巻き取ることができる。磁気ヘッドとドラムは磁気テープの同一部分と干渉すると、磁気ヘッドと磁気テープの接触により、磁気テープの磁性層が剥離する。また、磁気テープの磁性層は蒸着または塗布により製造されており、その材料特性は長手方向に必ずしも均一ではない。そこで、磁気テープを巻取りリールで巻取りながら磁気テープの変形・浮上量を測定することにより、磁気テープの機械的特性のバラツキが測定結果に影響することなく平均的な結果を得ることができるようにした。

磁気テープのドラム半径方向の浮上量は半導体レーザを用いた光マイクロメータを用いて測定した。その原理図を図3.9に示す。半導体レーザから出た光は投光レンズで絞られて被測定物表面で反射し、反射光は結像レンズを用いて集光され、ポジションセンサの受光面上に投影される。ポジションセンサは、光が受光面のどの位置にあるかを電気出力として出力する。その信号はFFTアナライザで処理されてコンピュータに取り込まれ、磁気ヘッドの位置情報と同期させ変位データに変換される。磁気ヘッドの位置情報と同期することにより、周期的に回転してくる磁気ヘッドとドラムに対して、測定目標とする位置が検出部を通過する時の磁気テープの変形及び浮上量を非接触で測定することが可能となる。このように、本装置によって時間に依存した定点での磁気テープ変形の時間的変化を測定することができる。

光マイクロメータをドラム面に対し磁気テープの幅方向に移動させることで、磁気テープの幅方向の変位分布を測定することができる。また、光マイクロメータはドラムの周方向の任意の位置に取り付けることが可能で、これにより周上の浮上量分布を3次元的に測定することができる。

図3.10に測定結果の一例を示す。本測定法は定点測定であるので、横軸は時間 $t$ で縦軸は磁気テープの浮上量である。ドラムと磁気ヘッドは一定速度で回転しており、ドラムが真円であると仮定すると、測定点の近傍においては横軸をドラムの周方向に取った局所的な位置座標に読み替えることができる。この場合、測定結果はある瞬間における測定点近傍のドラム上での、磁気テープの浮上量分布と考えることができる。なお、試料上で

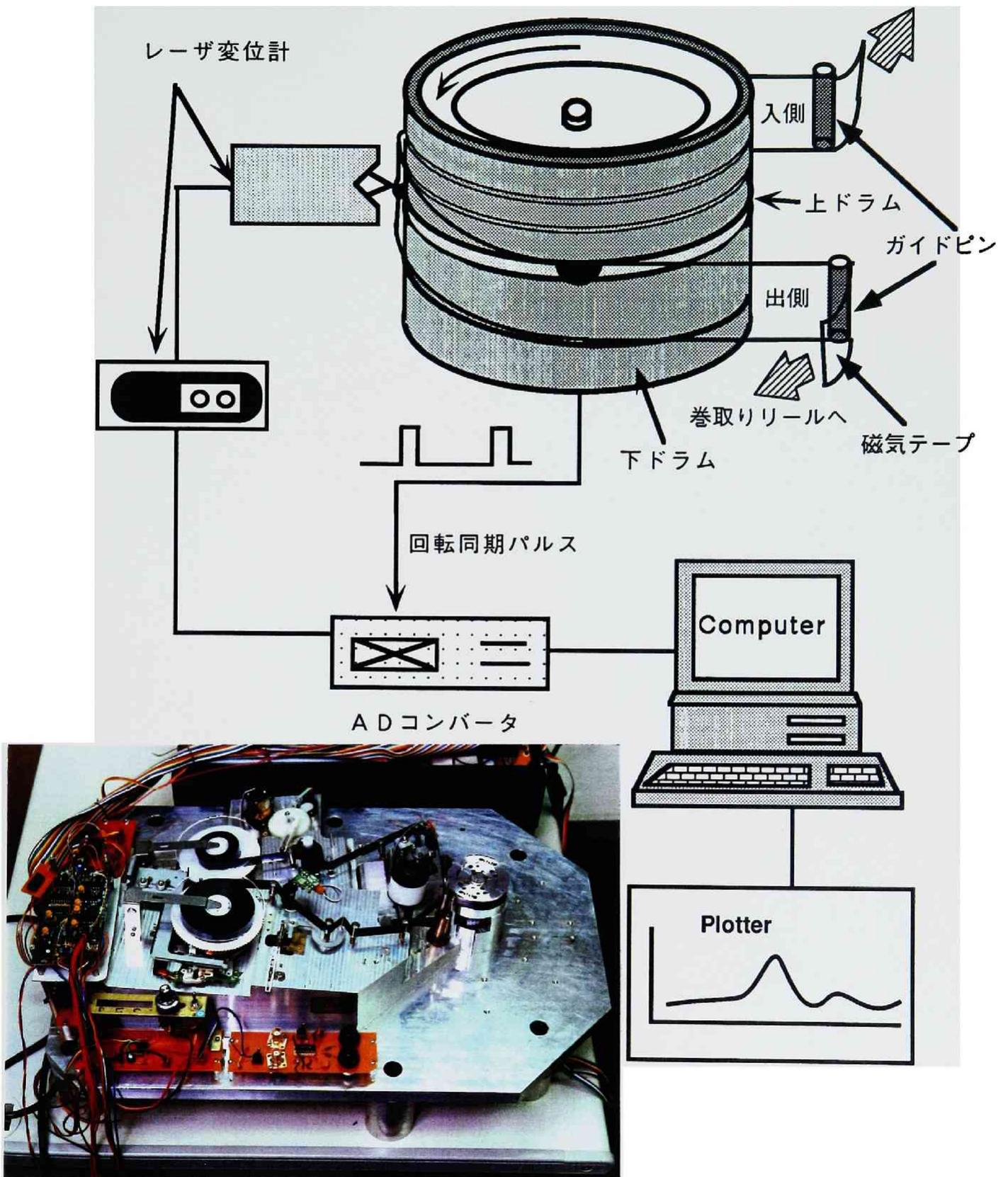


図 3.8 測定装置の概略図

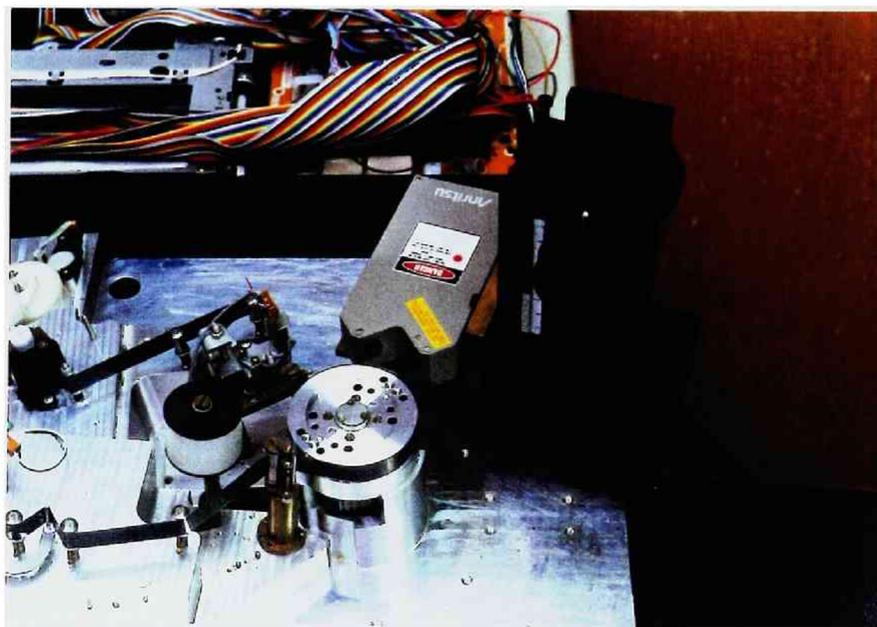
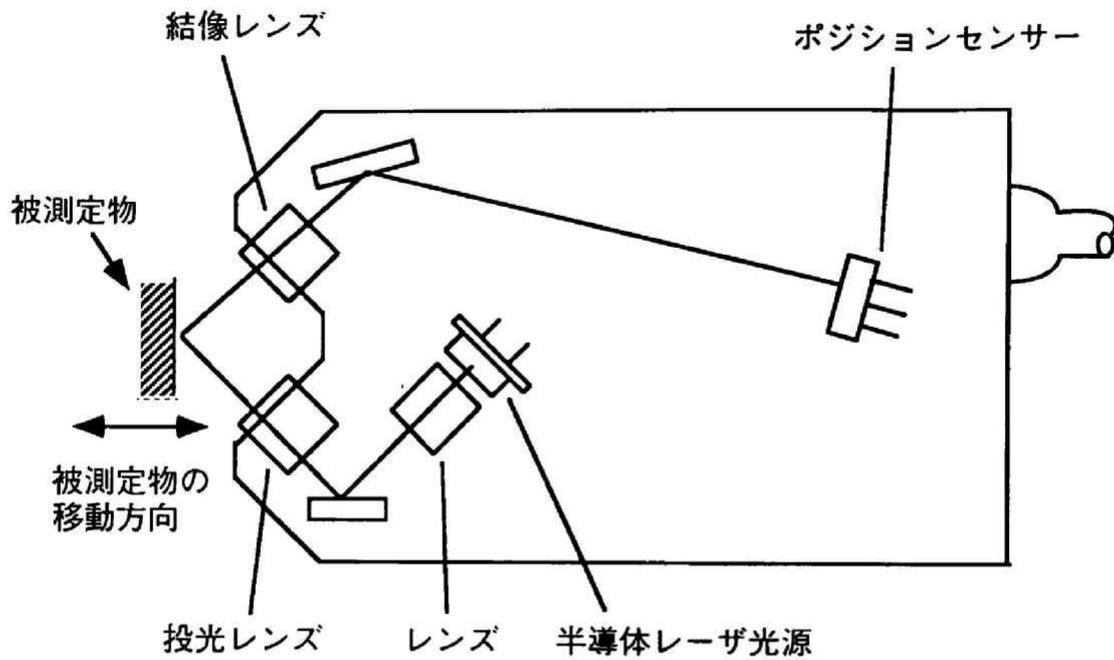


図 3.9 光マイクロメータの原理図

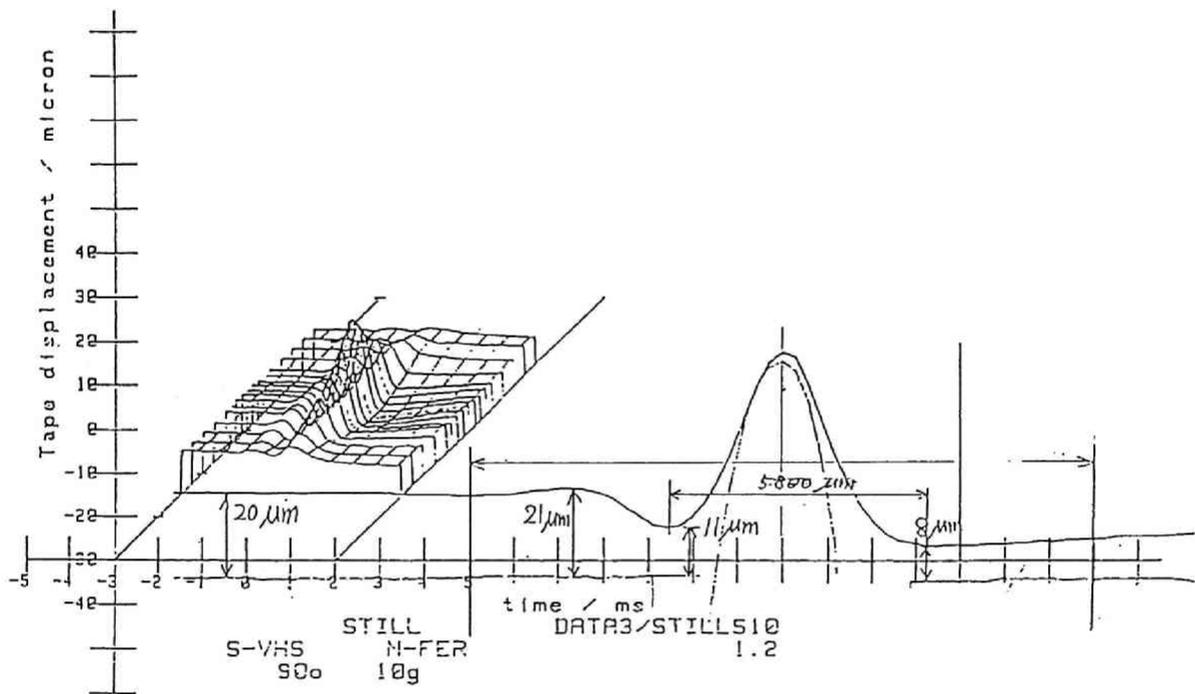


図 3.1 0 磁気テープの浮上量測定結果例

のレーザ光のスポット径は $10\ \mu\text{m}$ であり、赤色レーザ（波長 $780\ \text{nm}$ ）を用いているので高さ方向の分解能は $0.1\ \mu\text{m}$ である。

### 3. 3 結 論

本章では、磁気テープ等記録媒体の弾性定数の測定方法として、超音波の伝達速度を測定し、その速度から弾性定数を単一材あるいは複合材として求める方法を考案し、得られた結果を従来の引張り試験の結果と比較することによって本手法の有効性を確認し、以下の結論を得た。

- 1) 超音波法による測定結果は引張り試験による結果とよく一致した。
- 2) 測定結果の分散は $1\%$ 以下であり、引張り試験よりも高精度に測定することが可能であった。
- 3) 本手法によって簡便にかつ高精度に、弾性定数を測定する方法を確立した。

また、動作時における磁気テープの変形・浮上量を、光マイクロメータを用いて測定する方法を構築した。

## 第4章 計算アルゴリズムと解析例

本章では、第2章で理論展開を行ったVTRテープ浮上解析理論を用いた計算アルゴリズムについて説明し、それを用いて行った解析例を示し、本手法の有効性を述べる。

### 4.1 計算アルゴリズム

第2章では、磁気テープの変形に関する式と流体の圧力に関する式とを別々に解き、プログラム上で交互に繰り返して全体の解を求めるという従来方法の欠点を挙げ、両方程式を一体化し連成して解く本手法についてその理論展開を示し、その処理フローについて述べた。本節では、第2章で行った理論展開をもとに、計算機上で処理するための計算アルゴリズムについて示す。

図4.1は本研究で用いるVTRテープ浮上解析システムの処理フローチャートである。節点及び要素のデータと境界条件、解析条件の読み込みを行った後、構造及び流体に関する連立一次方程式を作成する。そして境界条件の処理を行い、線形方程式を解き修正ベクトル ( $\Delta p_{i+1}$ ,  $\Delta \mathbf{w}_{i+1}$ ,  $\Delta \mathbf{u}_{i+1}$ ) を求める。線形方程式を解く手法には直接法と間接法があるが、方程式が非対称であること (2-50式参照) さらに間接法であるILUBCG法には収束性に問題があることを考え、本研究ではガウスの消去法を用いることにした。

$i+1$ 回目の修正ベクトルにより新しい解を求めた結果、磁気テープの座標値がドラムまたは磁気ヘッドと接触したり、ドラムまたは磁気ヘッドの内側に来る (ドラム及び磁気ヘッド内に食い込む) ことがある。この場合には磁気テープの節点をドラムまたは磁気ヘッドの上の  $h_0 = 0.08 \mu\text{m}$  の位置に  $z$  方向に固定した。この理由は次の通りである。もし磁気テープの節点とドラムまたは磁気ヘッドの隙間を0にすると、修正レイノルズ方程式はその節点において特異性を持つため解が得られない。したがって、次の計算 ( $i+2$ 回目) において圧力の修正量がなくなり、方程式の収束性が悪くなると同時に結果の精度が低下する。また、磁気ヘッドやドラムの表面は、 $0.04 \mu\text{m}$  程度の表面粗さがあり、ドラム

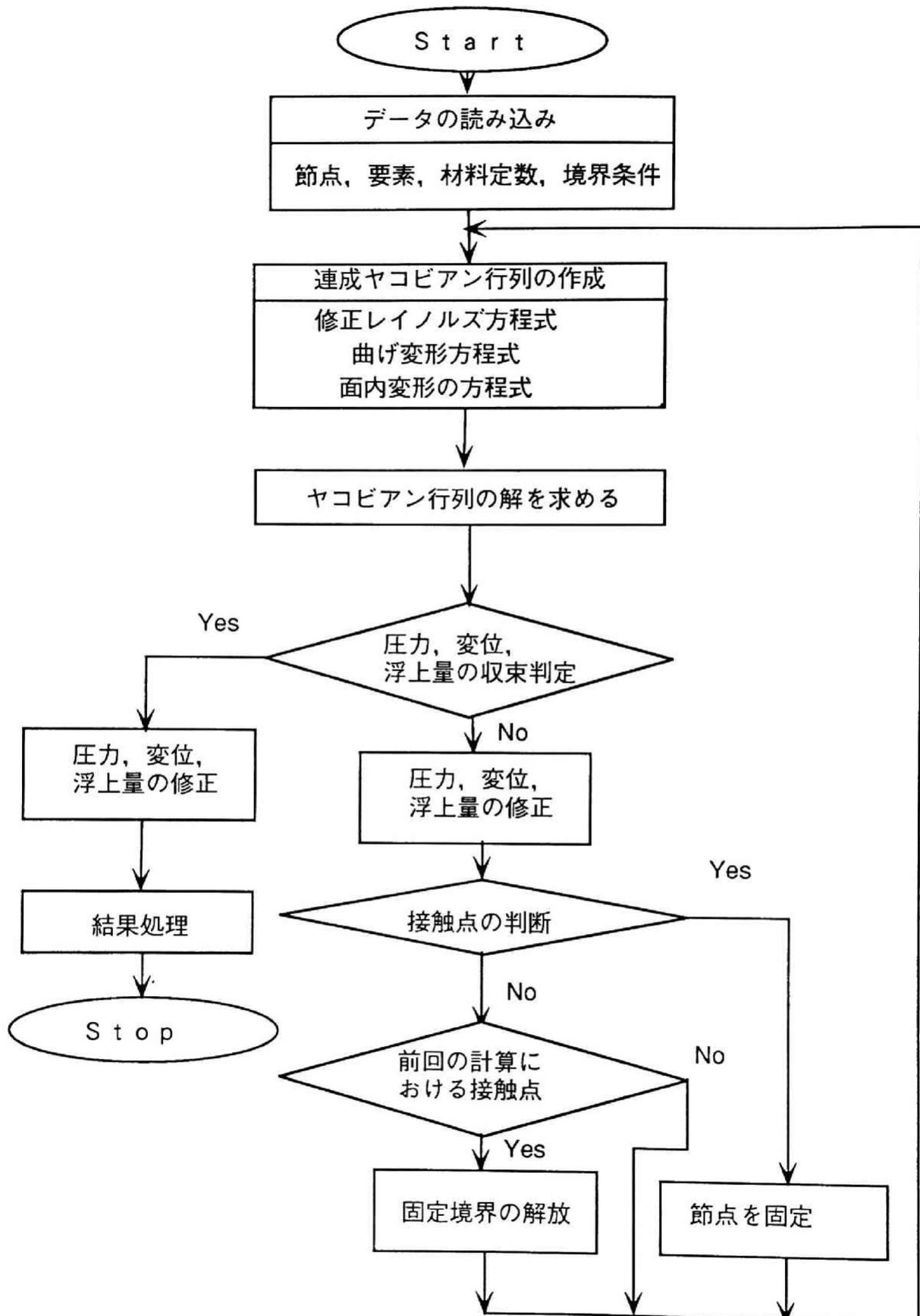


図 4.1 VTR 浮上解析システム  
フローチャート

や磁気ヘッド上での磁気テープは表面の突起に支えられることになる。したがって磁気テープがドラムまたは磁気ヘッドと接触する状況が現れるような場合でも、実際には磁気テープと磁気ヘッドまたはドラムとの間には $0.1 \mu\text{m}$ 程度の空気層が存在すると考えてよい。以上のことから、計算において磁気テープの浮上量が0または負、つまり磁気テープがドラムあるいは磁気ヘッドと接触するような変位量が算出された場合、その節点をドラムあるいは磁気ヘッド上にある大きさの隙間を持って固定することにし、隙間の大きさを $h_0 = 0.08 \mu\text{m}$ とした。

この $z$ 方向に固定した点では磁気テープがドラム及び磁気ヘッドから受ける反力を、得られた変位をもとに、2-4式から2-7式を用いて計算する。但し、計算の結果、この部分に正の動圧力が発生し、接触していた節点 ( $h_0 = 0.08 \mu\text{m}$ ) を磁気ヘッドあるいはドラムの表面から引き離す圧力及び変形が生じた場合、次のステップの計算時の境界条件から $h_0 = 0.08 \mu\text{m}$ の高さへの固定を解除する。この結果、磁気テープがドラムあるいは磁気ヘッドに最も接近した場合においても、 $h_0 = 0.08 \mu\text{m}$ の厚さの空気層が存在することになる。

計算は変位 $\Delta w_{i+1}$ ,  $\Delta u_{i+1}$ ,  $\Delta v_{i+1}$ ,  $\Delta \theta_{x_{i+1}}$ ,  $\Delta \theta_{y_{i+1}}$ と圧力 $\Delta p_{i+1}$ の変化量が充分小さくなるまで繰り返す。計算が収束した後、変位及び圧力等の必要な量を出力する。

## 4. 2 テスト解析

本解析における理論及び解析アルゴリズムの有効性を確認することを目的として、まず単純なモデルについて解析し、実験結果と比較した。

### 4. 2. 1 解析モデル

図4.2は本節で用いる計算及び実験用のモデルである。外径62mmのドラム（表面粗さ $0.05 \mu\text{m}$ , 幅30mm）の中央に幅12.65mmの家庭用VTRの磁気テープをかけ、磁気テープの一端を固定し、他端を張力 $T$ で引張っているとす。磁気テープはドラムの

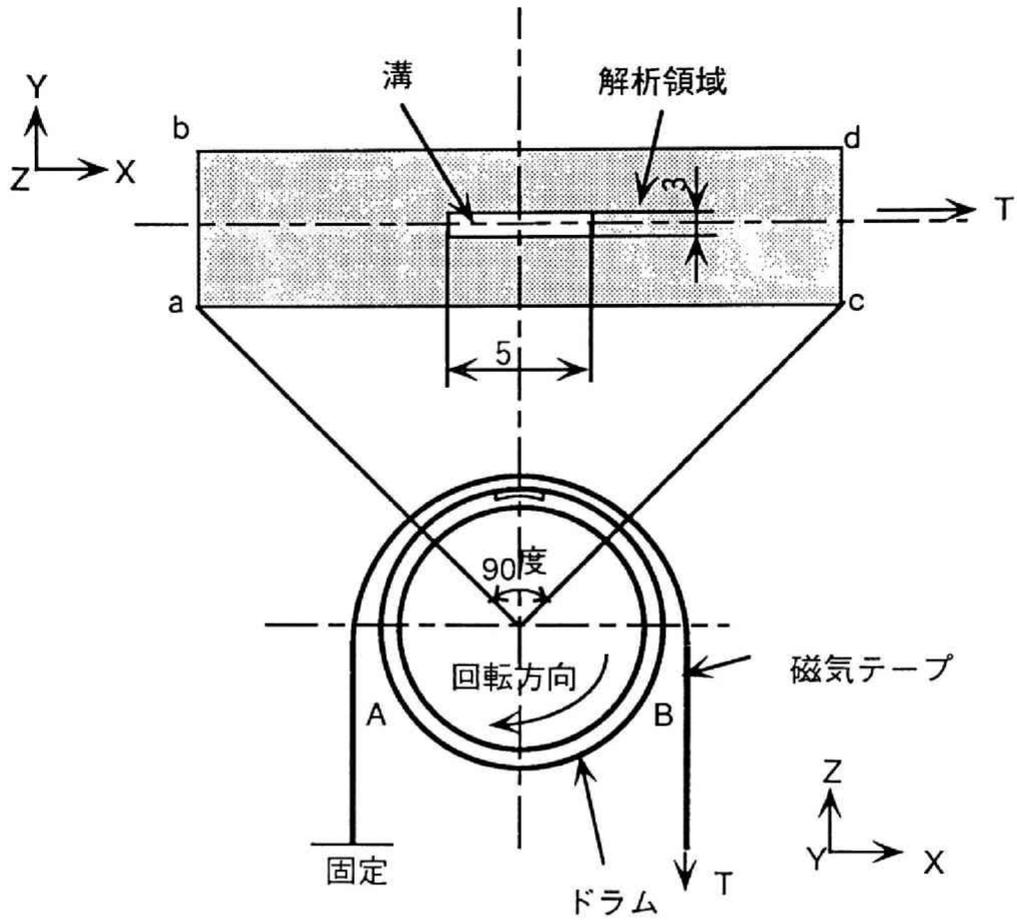


図 4.2 解析／実験対象モデル

回転方向と平行にドラム周上で180度かけてある。実機では磁気ヘッドはドラム表面から45 $\mu$ m程度突出しているが、このテストモデルではドラムの幅方向の中心に、図4.2に示す3mm $\times$ 5mm角で深さ7 $\mu$ mの矩形の溝を作成してある。ドラムが回転すると、磁気テープはドラムとの間に潤滑膜を形成し浮上する、そして、この溝により磁気テープは溝の近傍で変形する。ドラム表面から突き出た磁気ヘッドの代わりに溝を設けているこのテストモデルでは、磁気ヘッドの突出の影響を再現することはできない。しかし、回転するドラムの上に磁気テープに変形を起こす領域が存在するという点で、対象とする現象は流体と構造の連成問題であり、磁気ヘッドがある場合と類似している。したがって、本研究で提案する流体に関する方程式と磁気テープの変位に関する方程式を同時に解くという手法の有効性とその問題点を把握するためのテストモデルとして用いることができる。

この溝を作成したドラムを回転させ、磁気テープを図4.2のように180度かけた場合、溝の回転位置により流体の圧力および磁気テープの変形は変化する。溝の位置を表すために、図4.2に示すように座標系の中心がドラムの中心にある右手系の直交座標系を考える。ドラムは図4.2において時計方向に回転するものとする。その結果ドラムは磁気テープの固定端から磁気テープと干渉し、図4.2の領域Aでは空気を巻き込み領域Bでは吐出す。この領域Aと領域Bでは、矢部らにより<sup>[18-24]</sup>、潤滑層の剥離が存在し、それを考慮することが必要であることが示されている。そこで、本節ではこの入口領域A及び出口領域Bの影響の最も少ないと思われる $X=0$ の面を中心として前後45度で、Y方向には磁気テープ幅（家庭用VTRの磁気テープ幅12.65mmとした）の領域を解析領域とする。そして、溝の中心が $X=0$ の平面に一致する瞬間の磁気テープの変形を求め、同様の実験を行い両者の結果を比較する。表4.1及び表4.2は、解析に用いた各寸法及び定数である。

図4.3に解析に用いた磁気テープの要素分割を示す。要素数は1900で2016節点あり、未知数は14112個である。

修正レイノルズ方程式（2-3式）は潤滑面を構成する壁面の片方が一定速度 $V=(V_x, V_y)$ で移動している場合において、隙間の大きさ $h$ と隙間内の圧力 $P$ の関係を与えるものである。磁気テープ浮上特性を有限要素法を用いて解析する場合、所謂観測点は磁気テープ上に設定することになり、解析領域を有限要素に離散化する場合には、磁気テープのみを要素に分割すればよい。計算条件としては、ドラム表面における周速（2-3式の $V=(V_x, V_y)$ ）を $V_x=5.8$  m/sとし、磁気テープの送り速度（2-8式の $U_x$ ）は $U_x=0$ と

表 4.1 溝付きドラム解析用材料定数

Tape	
Young's Modulus	6.5 GPa
Poisson's ratio	0.44
Density	0.24 kg/m <sup>3</sup>
Thickness	18.5 μm
Width	12500 μm
Air	
Viscosity coefficient	17.9 μPa · s
Molecular mean free path	0.064 μm
Ambient pressure	0.101 MPa

表 4.2 溝付きドラム解析用解析条件

Drum radius	31 mm
Tape tension	23.4N/m
Relative velocity	5.8 m/s
Size of Concaved Area	3mm×5mm
Depth of Concaved Area	7 $\mu$ m

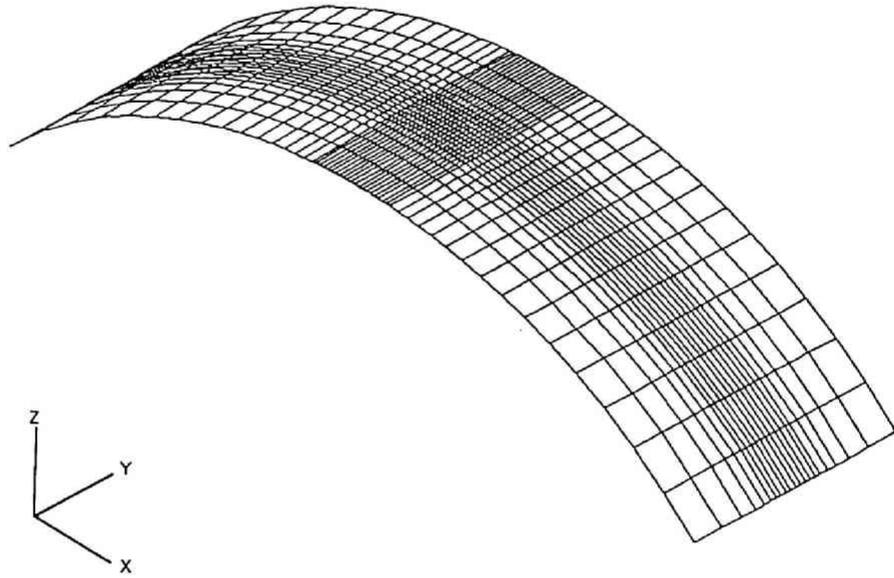


図 4.3 溝付きドラム解析用要素分割図

した。解析領域はドラム上の一部であるため、計算には切り出した両端での磁気テープの浮上量  $h$  と、そこでの圧力を与える必要がある。浮上量としては、切り出した磁気テープの境界である辺  $ab$  及び辺  $dc$  (図 4.2 参照) 上の節点は本モデルを用いて行った実験から求められる値 ( $10 \mu\text{m}$ ) に固定し、変位しないものとした。またこの 2 辺における圧力は  $P=T/\phi_R$  とした ( $\phi_R$  はドラムの半径である)。磁気テープの側面の辺  $ac$  及び辺  $bd$  上の点における圧力及び変位は未知数とした。ニュートンラフソン法 (式 2-50) における繰り返し計算の初期量としては  $h=10 \mu\text{m}$  となるように変数  $u, w$  を設定しそれ以外の未知数は 0 とした。

#### 4. 2. 2 検証実験

計算結果を検証することを目的として、計算に用いた条件をできるだけ再現した磁気テープ浮上実験を行い、第 3 章で示した方法で浮上量の測定を行った。実験に使用したドラムの形状を図 4.4 (a) に示す。肉厚  $2 \text{mm}$  で外径が  $62 \text{mm}$ 、幅  $30 \text{mm}$  のアルミニウム製ドラムの幅の中央に図のように  $5 \text{mm} \times 3 \text{mm}$ 、深さ  $7 \mu\text{m}$  の矩形の溝をエッチングで作成した。ドラムを図 4.4 (b) に示す実験装置に設置し、材料異方性を持たない磁気テープ (弾性定数等各種材料定数は表 4.1 と同じ) を溝の中心軸と磁気テープの中心軸が一致するようにドラムの回転方法に平行に  $180$  度巻き付くようにかけた (図 4.4 (b) 参照)。計算モデルと同じになるように、一端を固定し他端に  $30 \text{g}$  の重りを下げ (このとき磁気テープに作用する張力は  $T=23.4 \text{N/m}$  となる)、 $X=0$  の面において、溝の通過時における磁気テープの浮上量  $h$  をドラムの表面を高さ  $h=0$  として、光マイクロメータを用いて測定した。

#### 4. 2. 3 解析結果と実験結果との比較

ドラムの表面における周速  $V_x$  を  $5.8 \text{m/s}$  とした場合の、ドラム上に設けた深さ  $7 \mu\text{m}$  の溝周辺の圧力分布の解析結果を図 4.5 に示す。図中の矢印はドラムの回転方向を示す。圧力は溝の前部と後部で高くなっており、溝の前の角での圧力の方が後ろの角での圧力よりも高くなっている。溝の前の角における高い圧力が、磁気テープの側面近傍における圧力にまで影響を及ぼしていることが分かる。すなわち、溝により磁気テープが変形し、そ

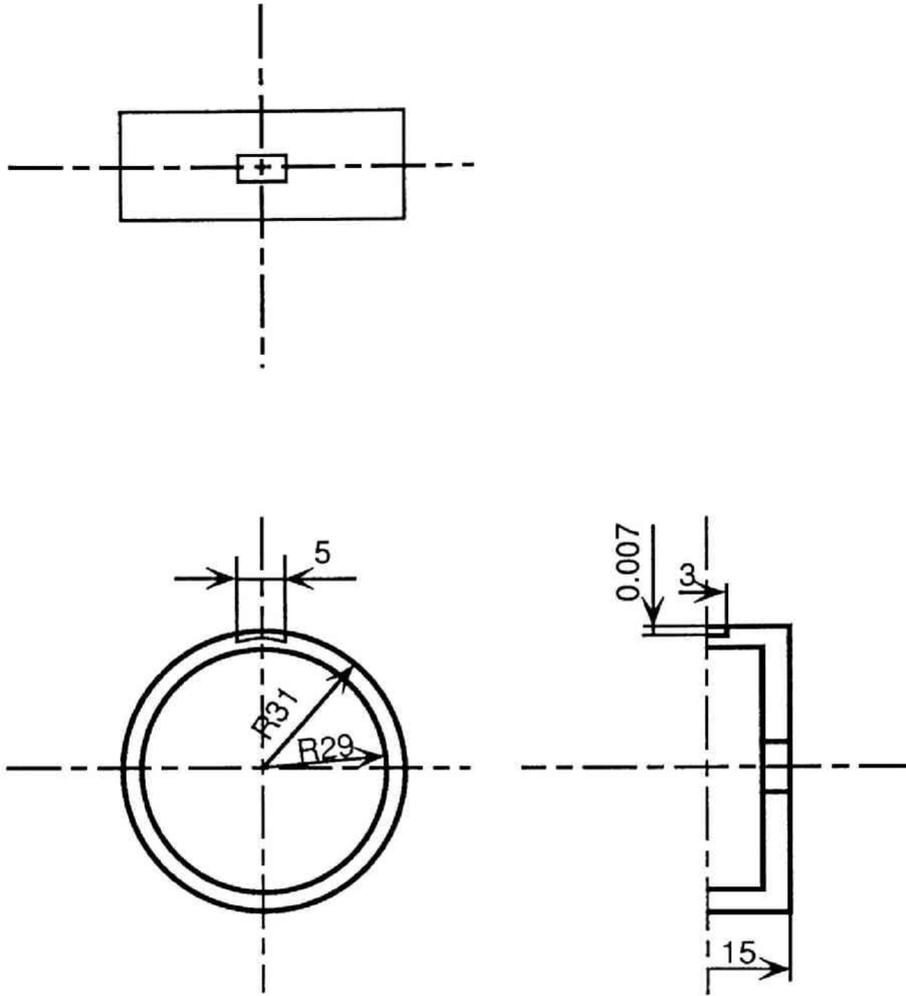


図 4.4 (a) 矩形溝付きドラム

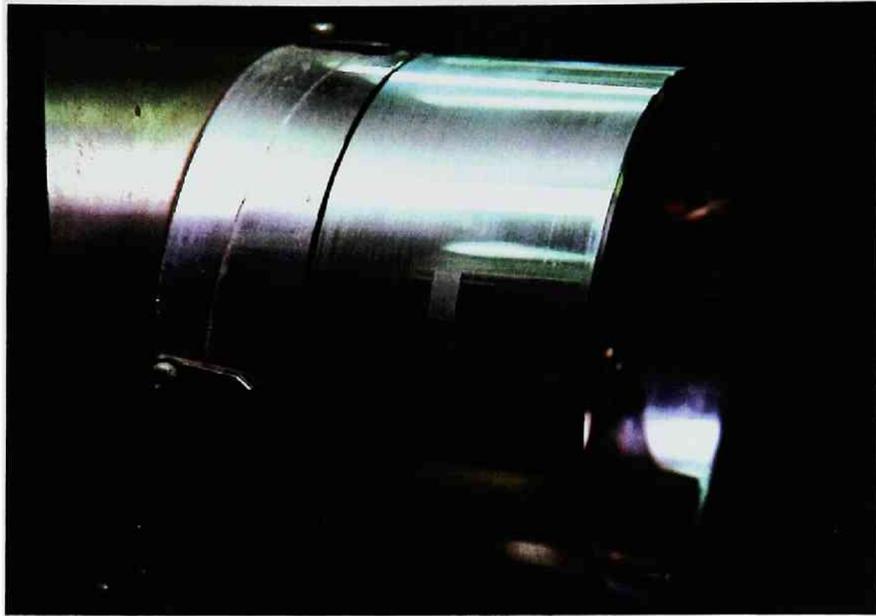


図 4.4 (b) 溝付きドラム実験装置

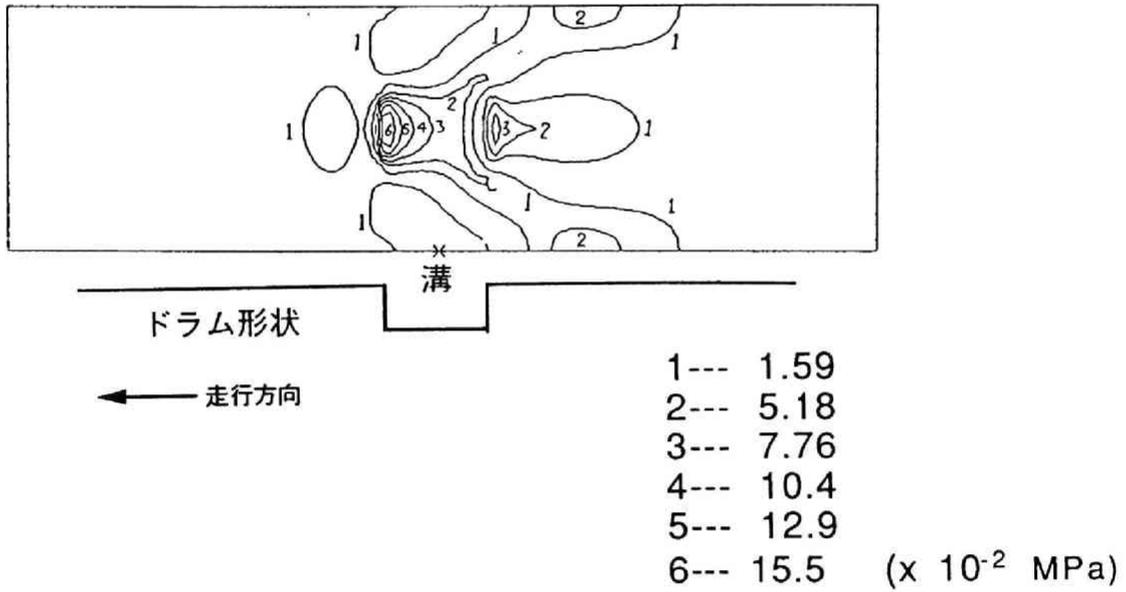


図 4.5 溝付きドラムの圧力分布

の変形が磁気テープ側面領域まで及ぶことになる。また、溝の後ろの角の影響は溝の後方にまで広がっていることが分かる。図4.6に、図4.5に示した圧力により変形した磁気テープの変形形状を鳥瞰図で示す。前述したように圧力が分布することにより、磁気テープは幅方向の変形を受け、またその側面が波打っている。

図4.7は磁気テープ幅の中央断面における、磁気テープの変形形状について解析結果と実験結果を比較したものである。両者はよく一致しており、この断面における両者の誤差は最大3%であった。磁気テープは溝の前方で波打ち、そして大きく浮上してから溝に引き込まれている。また溝の後方では再び大きく浮上した後、ドラム上の浮上量として境界条件で与えた高さまで回復している。

図4.8は、溝近傍における磁気テープの形状と空気の流れをモデル化したものである。空気は直角な溝の前の角を回するのに必要な曲率を得るために、溝の前方 $\alpha$ 点での圧力が上昇する。これにより磁気テープも浮上するが、流量保存により圧力が低下し、その後方の $\beta$ 点で磁気テープはドラム上の平均浮上量よりも下がる。そのため流路が狭くなり、 $\beta$ 点の後方では圧力が再び高くなり、平均浮上量以上に浮上すると考えられる。磁気テープは、溝の前端 $\gamma$ 点を過ぎると溝のへこみにより流路が広がるため圧力が下がり、溝の後角部である $\lambda$ 点以降、流路が狭くなるために一度大きく浮上して平均浮上量にまで回復する。

以上のように、図4.7のような測定結果をかなりよく再現する計算結果が得られている。 $\gamma$ 点及び $\lambda$ 点の位置及び浮上量が実験値と異なるのは、

- 1) 解析に用いた要素サイズが粗いこと
- 2) 修正レイノルズ方程式において角を回る流れを考慮できないこと

等の原因によるものと考えられる。このことは、溝内での磁気テープの変形形状が、実験値と計算値で異なることにも関係する。実験結果において、溝内での磁気テープは下に凸の2次関数的な形状に変形しているのに対し、計算結果では、溝の矩形形状の影響を受け矩形形状に変形している。実際には図4.8に示すように溝の角部には渦が生じていると考えられるが、計算モデルではこのことを考慮していない。この渦により実験では、磁気テープは計算結果ほど変形しないと考えられる。

図4.9は幅方向の6箇所での走行方向断面における、磁気テープの変形形状を比較した結果である。(a)には実験結果を、(b)には計算結果を示す。いずれの断面においても両者よく一致しており、特に磁気テープの側面( $Y=5.625\text{ mm}$ )の部分でもよく一致している。このことから、側面の変形及び圧力について計算に与えた境界条件は正し

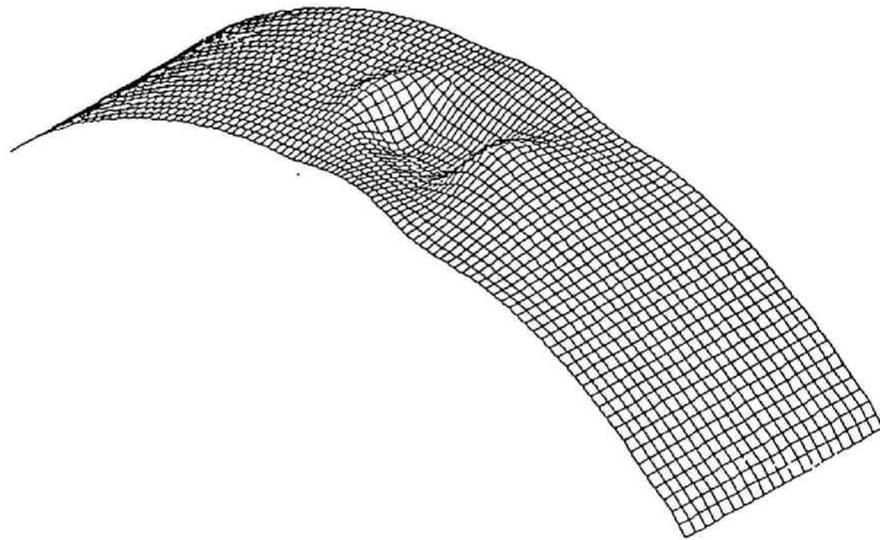


図 4.6 溝付きドラム上での  
磁気テープの変形形状

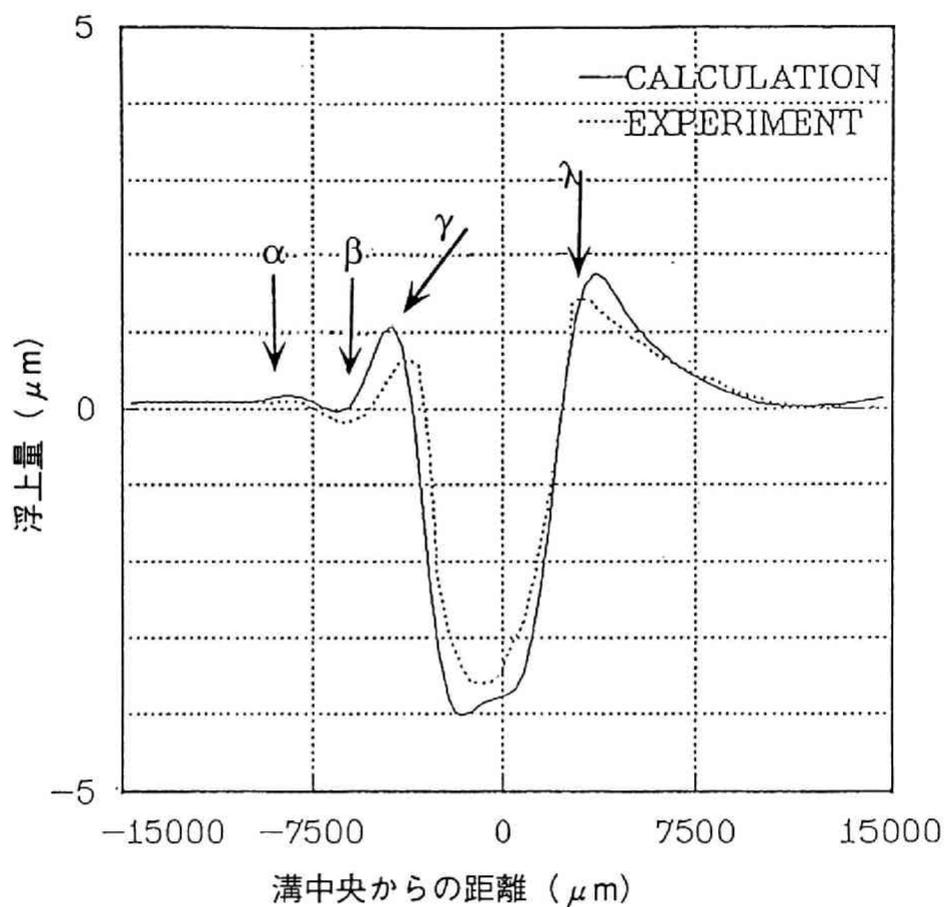


図 4.7 溝中央における磁気テープの変形  
(長手方向)

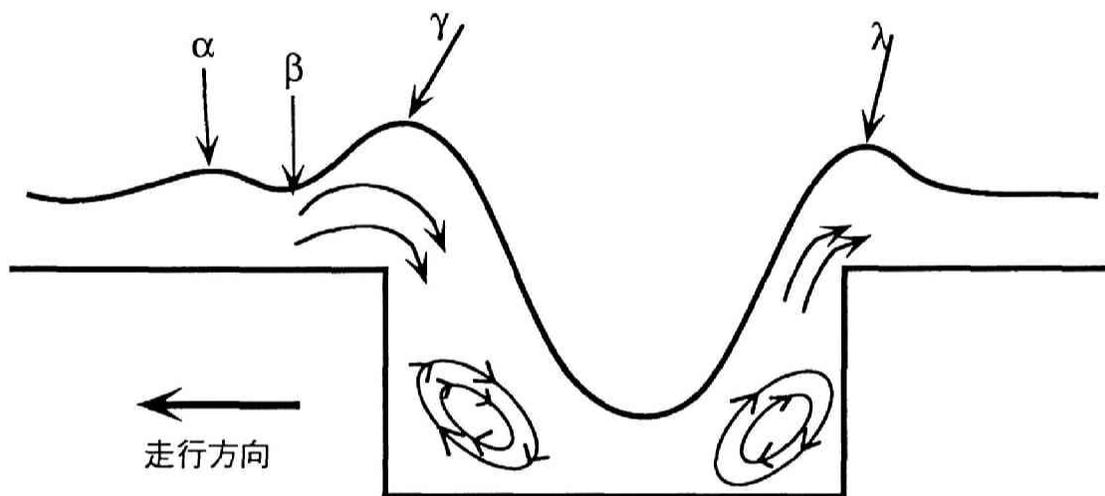
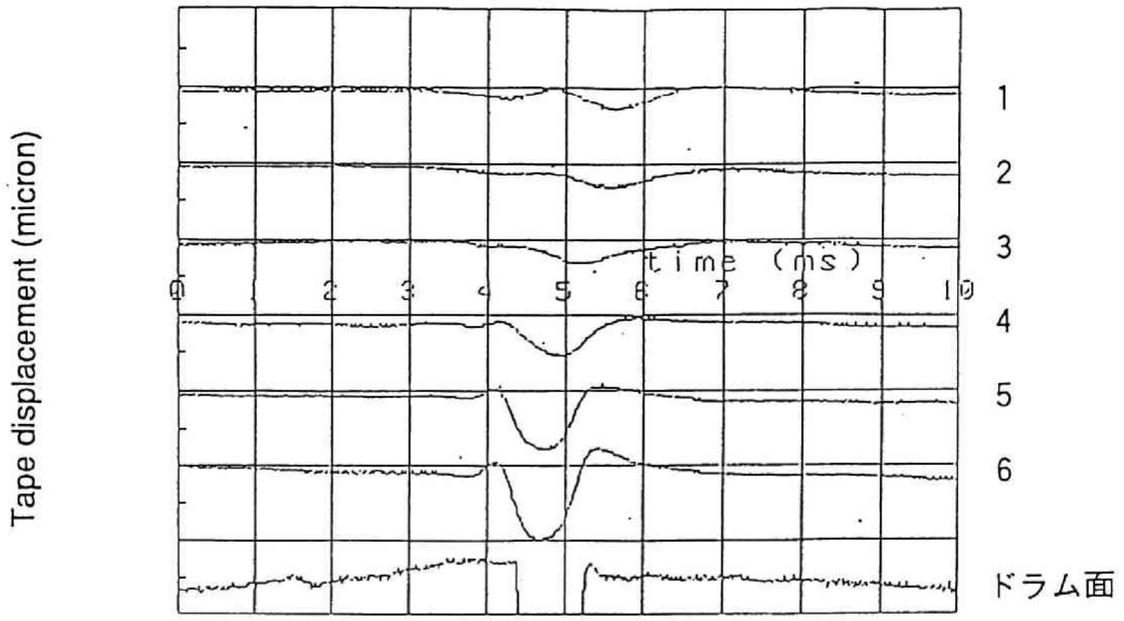
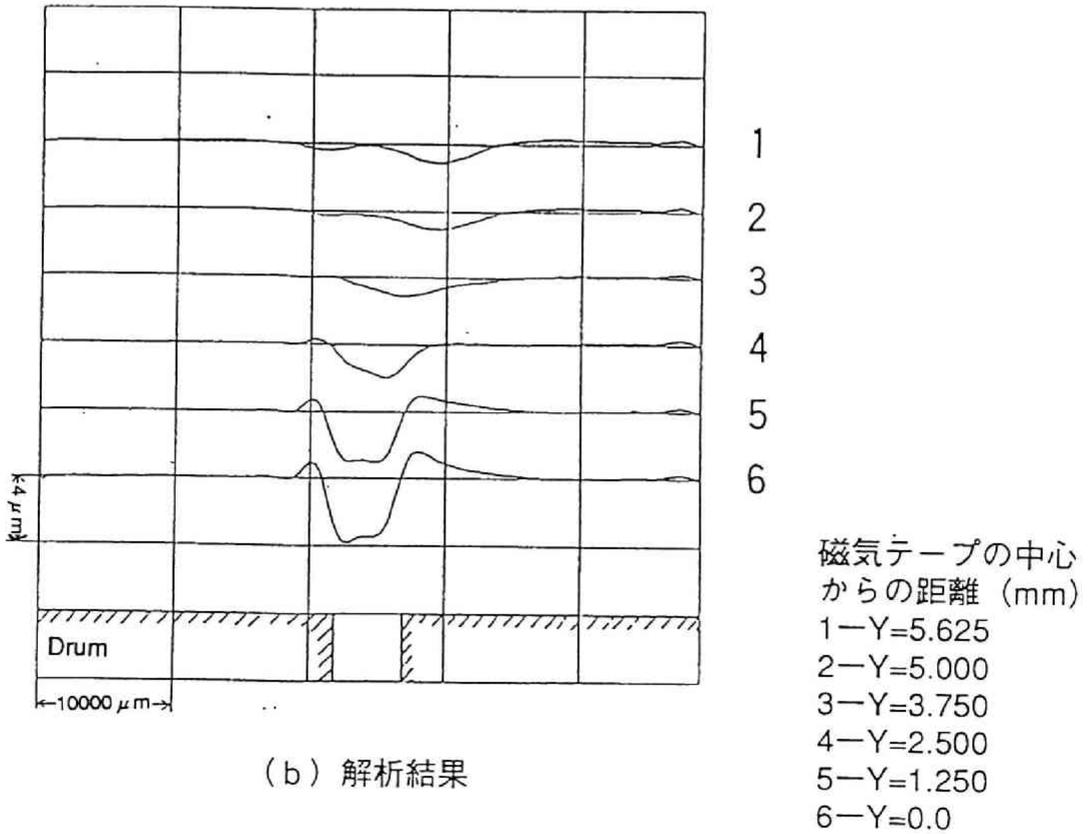


図 4.8 溝周辺における流れ



(a) 実験結果



(b) 解析結果

図 4.9 磁気テープの幅方向断面における浮上量分布

いと結論できる。

### 4. 3 磁気ヘッド付モデルの解析

磁気記録装置のインターフェースにおいては、良好な磁気記録再生を実現するため磁気ヘッドと磁気記録媒体との距離を最適に保つ必要がある。この目的を実現するためには、解析に磁気ヘッド形状を取り込み、磁気ヘッド上での浮上量を正確に求める必要がある。そこで、本節では磁気ヘッドの付いたドラムに、磁気テープをドラムの回転方向と平行にかけた場合の解析を試みる。

前節において、磁気ヘッドの代わりに溝を設けたドラムに、磁気テープをドラムの回転方向と平行にかけた場合について解析と実験を行った。その結果、本研究の方法を用いることで、矩形の溝を持つドラム上での磁気テープの浮上及び変形を、高精度に解析できることを示した。本節では、ヘッドを考慮した場合のモデル化と境界条件について示し、解析結果を実験結果と比較する。

#### 4. 3. 1 解析モデル

図4.10に実機の磁気テープとドラムおよび磁気ヘッドの模式図を示す。実機のドラムは上下に分かれており、別々に回転する。磁気ヘッドは上部ドラムと下部ドラムとの間に窓を設けて上部ドラムに取り付けられており（図2.2参照）、上部ドラムとともに回転する。ドラム上には磁気テープの浮上量を制御するため、数本のV型の溝が切られている。磁気テープは上下のドラムに対し斜めに掛けられている。図4.11は実機の構造をもとに、動作時に磁気ヘッドが磁気テープ上を通過する軌道を示したものである。この軌跡を磁気ヘッドが通過し信号が記録される。このように実機は複雑な構造と相対位置関係のもとに動作している。この現象を簡略化し、第4.2.1節と同じように、次の前提のもとに磁気ヘッド付きの解析モデルを設定する。

前提

- 1) ドラムは上下一体であるとする。

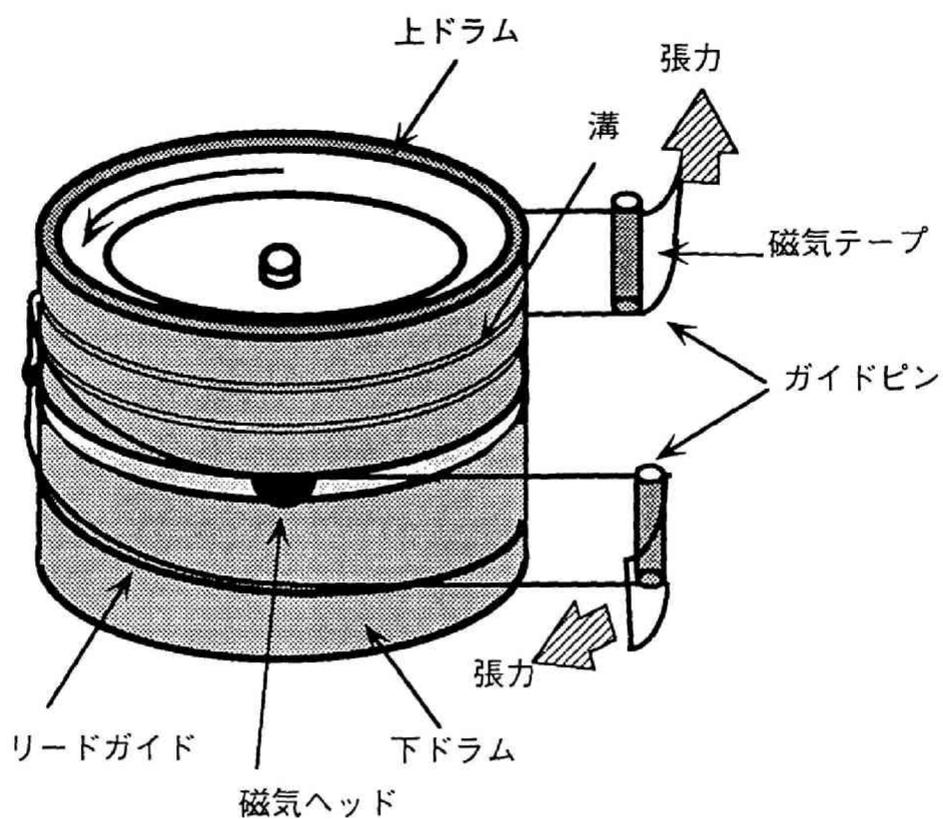


図4.10 実機の磁気テープとドラム  
および磁気ヘッドの模式図

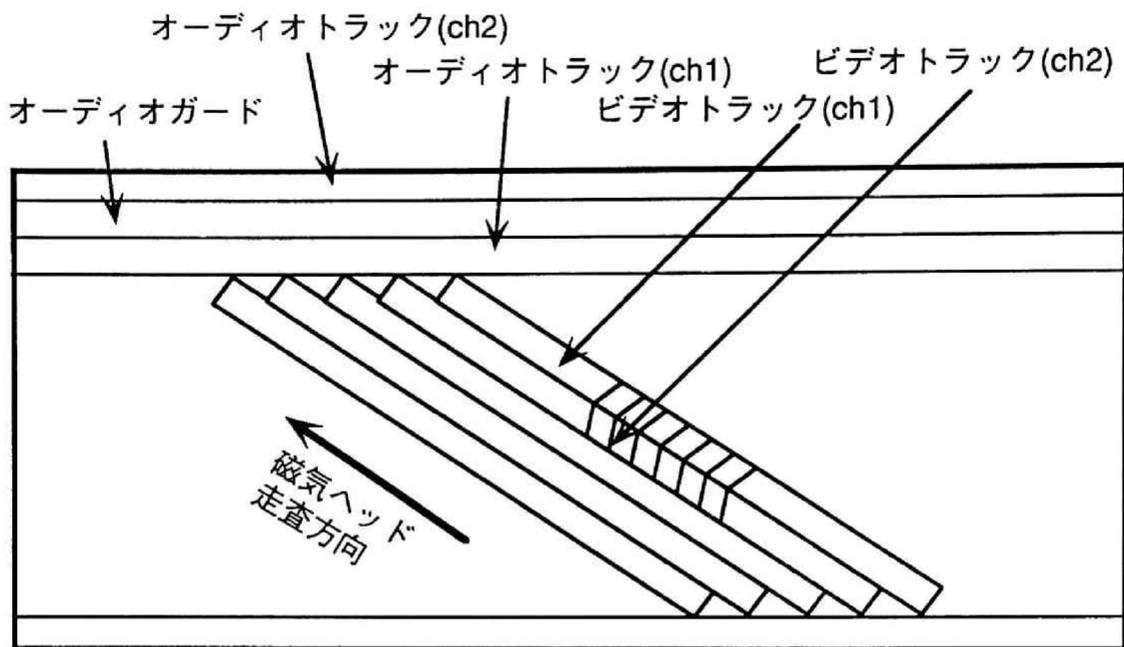


図 4.1 1 磁気ヘッドの走査軌跡

- 2) 磁気ヘッドはドラムに作成した窓 (5 mm x 3 mm) に取り付けられている。
- 3) 磁気テープはドラムの回転方向と平行に掛けられている。
- 4) 磁気ヘッドの表面形状は、幅及び走行方向それぞれ  $r = 2.9 \text{ mm}$  及び  $R = 13.1 \text{ mm}$  の曲率半径を持つ回転楕円体表面とする。
- 5) 定常状態とする。
- 6) ドラム表面と磁気テープの表面粗さはそれぞれ平均  $0.04 \mu\text{m}$  とし、磁気テープとドラムの隙間は  $0.08 \mu\text{m}$  以下にならない。
- 7) 磁気テープは異方性を示す単一材料とし、断面中心は磁気テープの厚さの中央部にあるとする。
- 8) 磁気テープには、その長手方向 (送り方向) に張力が均一にかかっている。
- 9) ドラムの径は磁気テープの厚さに比べて十分大きいとし、磁気テープをドラムに巻き付けた初期形状において、初期応力は無視できるものとする。
- 10) 磁気テープの送り速度は  $0 \text{ m/s}$  とする。
- 11) 磁気ヘッド及びドラムと磁気テープが、6) に記した状態で接触した (すなわち浮上量が  $0.08 \mu\text{m}$ ) 場合における摩擦はないものとする。また、磁気テープの走行による温度変化は生じない。
- 12) 周囲は大気圧で摂氏  $25$  度とする。

図 4.12 に解析モデルと解析領域の関係を示す。4.2.1 節と同様に、磁気テープはドラムの回転方向に平行に掛けられており、巻き付け角度は  $180$  度である。磁気テープの一端は固定してあり他端に張力  $T$  が磁気テープの幅に均等に分布するように付加されている。磁気ヘッドの回転位置により磁気テープのドラム上での浮上量が変化する。その結果磁気ヘッド上での磁気テープの変形及び浮上量は、磁気ヘッドがどの角度の位置にあるかによって異なる。特に、ドラムと磁気テープが干渉しはじめる A 部 [入側] と B 部 [出側] においては、浮上量の分布が大きく変化する。また、磁気テープの変形形状及び浮上量はドラムの回転位置により異なり、磁気テープとドラムの入側及び出側では空気の剥離及び磁気テープ周辺の空気の流れの影響があると思われる。これらの理由により、本節では磁気ヘッドを考慮した解析方法について検討することを目的としているため、入側と出側の影響が最も少ないと考えられる、入側から  $90$  度の位置を磁気ヘッドが通過する瞬間におけるインターフェース現象を求める。つまり解析領域は、磁気ヘッドの中心が図 4.12

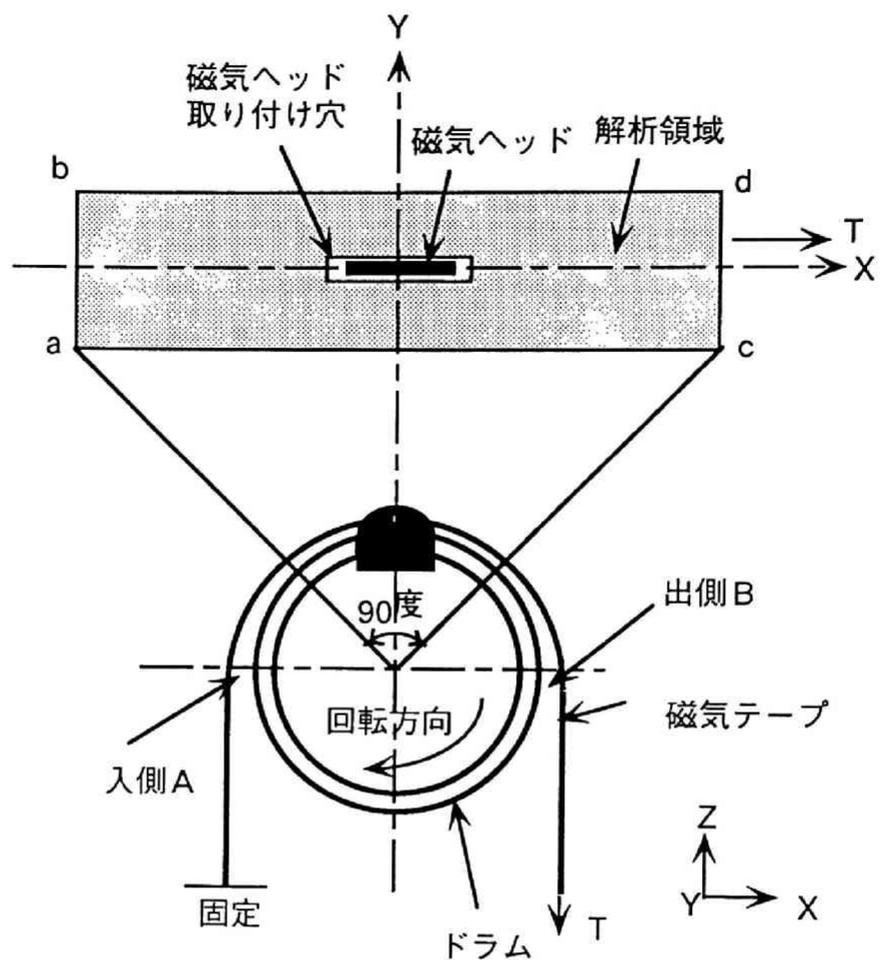


図 4.1 2 磁気ヘッド付き平行掛け  
解析／実験対象モデル

示す  $X = 0$  の平面にあり、ドラムの中心を中心として磁気ヘッドの前後 45 度で、Y 軸方向には磁気テープの幅の領域とする。表 4.3 と表 4.4 に、本解析で用いた各種材料定数及び各部の寸法と設定条件を示す。

図 4.13 は解析領域を三角形要素で分割した分割図である。磁気テープはドラムの中心にドラムの走行方向に対して平行に掛けてあるので、磁気テープの半分のみを分割した。

#### 4.3.2 境界条件

図 4.14 に解析モデルで設定した境界条件を示す。解析領域のドラムの回転方向の前後の端部（辺 a b 及び辺 c d）は、測定から得られた平均浮上量  $H_0 = 10 \mu\text{m}$  の隙間を持つものとして浮上量を固定し ( $h = H_0$ )、変形に関する全ての自由度を拘束した。磁気テープには、本来、荷重が付加されているために張力方向に伸びる。家庭用 VTR（弾性定数が  $E_x = 6.5 \text{ GPa}$  で、厚さ  $t = 18 \mu\text{m}$ 、幅  $w_t = 12.65 \text{ mm}$ ）の磁気テープに張力  $T = 23.4 \text{ N/m}$  が作用し、張力は幅方向に均一であるものとする、外半径  $\phi_R = 31 \text{ mm}$  のドラム上の解析領域（90 度分）の長さ（48.670 mm）に対しての磁気テープの伸び  $\Delta L$  は、

$$\Delta L = 9.7 \mu\text{m}$$

となる。このとき、伸びひずみ  $\epsilon_x$  は

$$\epsilon_x = 2 \times 10^{-4}$$

となり、磁気テープの伸びの量は小さいので、荷重端において荷重方向の変位を拘束することにした。解析領域の前後端 a b, c d 上では、磁気テープは均一に ( $H_0 = 10 \mu\text{m}$ ) 浮上しその形状はドラムの表面と平行であると仮定した。すなわち、この解析領域の前後端において圧力勾配はないとして、圧力を 4-1 式の値に固定した。

$$p = P - P_a = T / \phi_R \quad 4-1$$

ここで、 $T$  は磁気テープに負荷された張力 ( $\text{N/m}$ ) であり、 $\phi_R$  はドラム外周の半径で

表 4.3 ヘッド付きモデル解析用材料定数

Tape	
Young's Modulus $E_x/E_y$	6.5 /5.1 GPa
Poisson's ratio $\nu_x/\nu_y$	0.44/0.34
Density	0.24 kg/m <sup>3</sup>
Thickness	18.5 $\mu$ m
Width	12650 $\mu$ m
Air	
Viscosity coefficient	17.9 $\mu$ Pa · s
Mean free path	0.064 $\mu$ m
Ambient pressure	0.101 MPa

表 4.4 ヘッド付きモデル解析用解析条件

Drum radius	31 mm
Tape tension	23.4N/m
Relative velocity	5.8 m/s
Head protrusion	50 $\mu$ m
Head width	160 $\mu$ m
Head length	3000 $\mu$ m
Head small radius	2.9 mm
Head large radius	13.1 mm

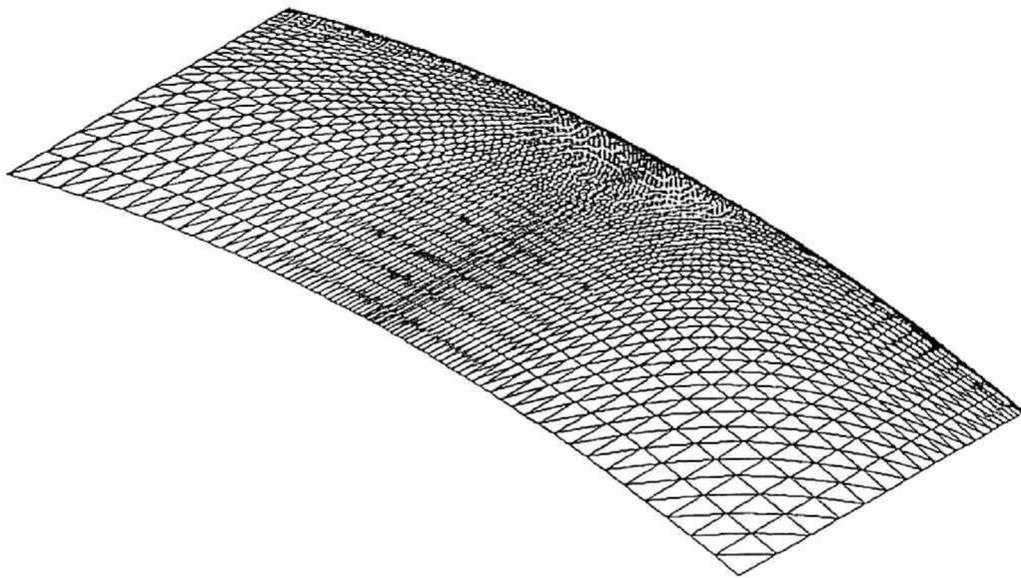
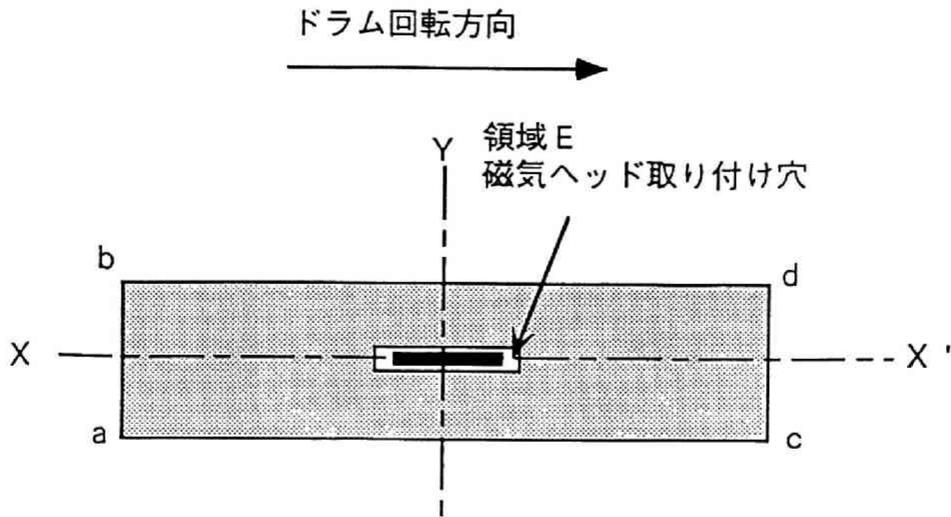


図 4.1 3 磁気ヘッド付きモデル解析要素



圧力：解析領域周（ $a-b+c-d$ ）  $P = T / \phi_R + P_a$   
 領域 E  $P = P_a$

変形：入側及び出側端部（ $a-b, c-d$ ） 全自由度固定  
 $u=v=w=\theta_x=\theta_y=0$   
 $h=H_0$

図 4.1.4 磁気ヘッド付き解析における境界条件

ある。これは、圧力  $(P - P_a)$  と外力  $T$  により、磁気テープが半径  $\phi_R$  の円筒状に変形した場合の力の釣合を近似したものである。本来、ドラム上での圧力は均一ではなく、 $a$   $b$  端部と  $c$   $d$  端部で異なる。したがって、厳密には解析にそのような圧力の変化を考慮する必要があるがその方法については第5章で取り扱い、本節では4-1式の近似を用いることにした。磁気ヘッドを取り付けた穴の領域E (図4.14参照) における圧力については、穴は貫通しており大気圧に等しいとして、

$$p = P - P_a = 0 \quad 4-2$$

とした。

また磁気テープの対称軸であるX軸上では、対称条件としてy軸方向の変位(磁気テープの幅方向の変位)  $v$  は

$$v = 0 \quad 4-3$$

、軸  $x$  に対する回転  $\theta_x$  は

$$\theta_x = 0 \quad 4-4$$

とした。

### 4.3.3 検証実験

解析結果を評価することを目的として、解析モデルをできるだけ忠実に再現した実験を行った。図4.15に実験用に作成したドラムを示す。解析に用いたのと同じ外径6.2mmで幅2.5mmのアルミ製のドラムの中央に幅3mmで長さ5mmの貫通穴を作成し、その穴に家庭用VTRの磁気ヘッドをドラムの表面よりも50 $\mu$ m突き出して取り付けてある。磁気ヘッドは図4.16に示すように、ホルダーに取り付けてあり、このホルダーの大きさは厚さ1.5mm、幅1.2mmでドラムに開けた穴よりも幅が狭い。ホルダーを取り付けた場合、ホルダーの上部はドラムの内径よりも内側にくるために、ドラムの穴をふさぐことはないが、穴の底面として作用する可能性がある。

磁気テープを磁気ヘッドの中央にドラムの回転方向に平行に180度に向け、一端を固定し、そして他端に0.294Nの重りを磁気テープの幅に対して均等に荷重がかかるよ

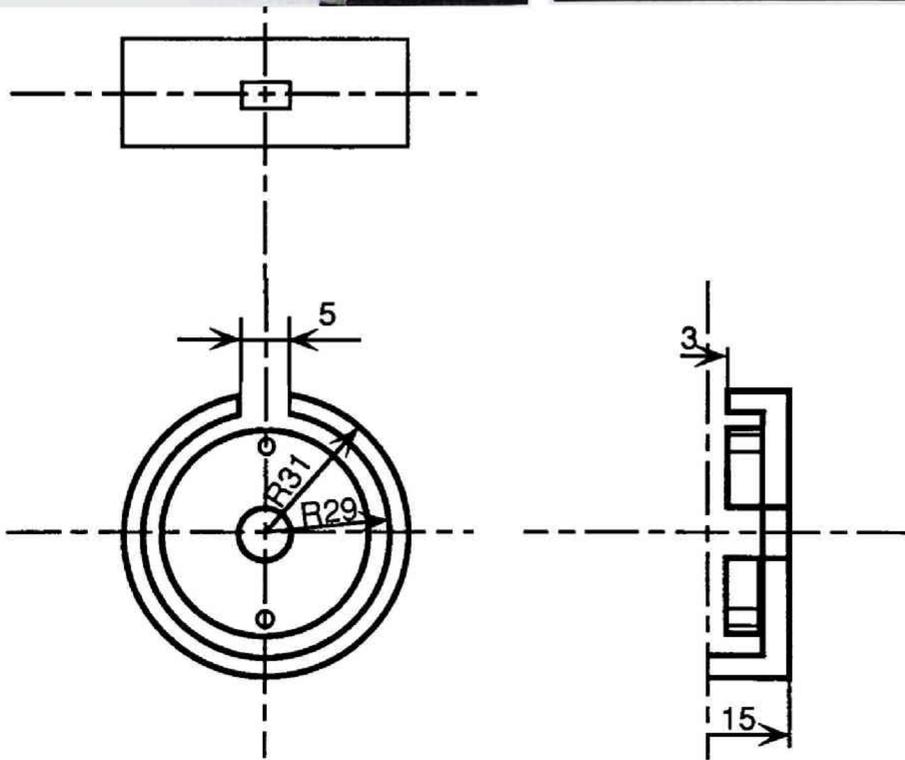


図 4.1 5 磁気ヘッド付き平行掛け  
実験用ドラム

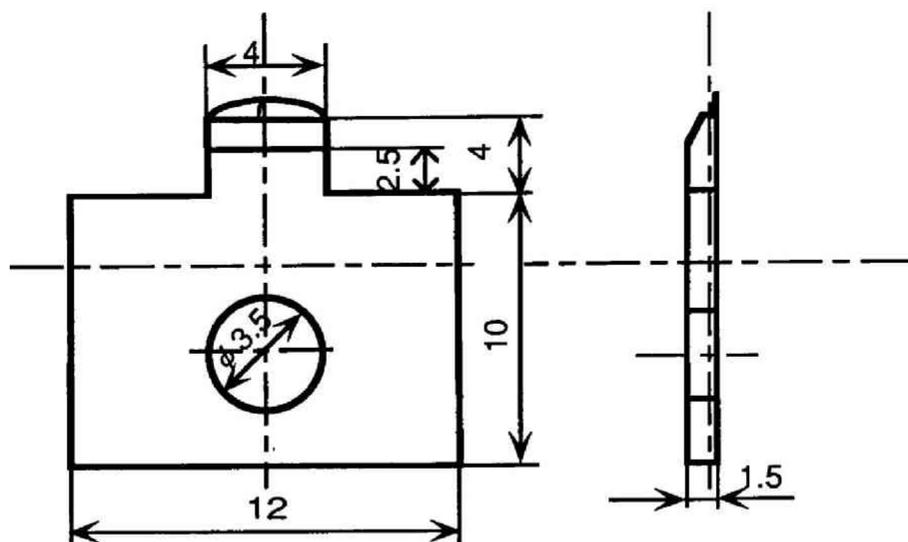


図 4.1 6 磁気ヘッドのホルダの例  
(家庭用VHS)

うに取り付けた。ドラムを解析で使用した周速と同じ周速 $5.8\text{ m/s}$ で回転し、入側と出側の中間の位置を磁気ヘッドが通過する時の、磁気テープの変形を第3.2節で説明した方法で測定した。測定装置の全景を図4.17に示す。

#### 4.3.4 結果及び考慮

まず、磁気テープを等方性材料（表4.3において $E_x = E_y = 6.5\text{ GPa}$ ）とした場合の解析結果を示す。しかしながら後（図4.22（d））に示すように、磁気ヘッドの中心断面における長手方向の変形状態においては、等方性の場合と異方性を考慮した場合（ $E_x = 6.5\text{ GPa}$ ,  $E_y = 5.1\text{ GPa}$ ）との差はほとんどなかった。

図4.18は、解析により求めた磁気テープの変形の鳥瞰図である。z方向の変形は、分かり易いようにx, y方向に対して100倍拡大して表示している。図4.19にX軸（図4.14参照）上での磁気テープの変形について、解析結果と実験結果の比較を示す。実線は計算結果を、破線は実験結果を示す。実験結果と解析結果はよく一致しており、全節点における誤差は平均7%であった。図4.19において、ドラムと磁気ヘッドは左方向に運動しており、磁気ヘッドの前方の領域において、磁気ヘッドの運動及び4.2節でも示したように窓の影響により、磁気テープが波打って変形している。一方、磁気ヘッドの後方の領域において、磁気テープは前方の領域よりも降下し、徐々にドラム上に設定した平均浮上量 $h = 10\ \mu\text{m}$ に回復する。

磁気ヘッドの後方において、計算結果の方が $2\ \mu\text{m}$ 程度浮上量が多い。理論計算では解析領域を磁気ヘッドの中心から前後45度とし、解析領域の後端（図4.14の辺cd）での浮上量を $h = 10\ \mu\text{m}$ として固定している。一方、ドラム上での磁気テープ浮上量はドラムの周上で均一ではなく、解析領域として設定した入側と出側の中間を中心とした前後45度の部分（図4.14の辺abと辺cd）では、磁気ヘッドがある場合には浮上量は同じにならないことを、実験結果は示していることになる。この結果から、磁気ヘッドの近傍における解析結果を定量的に利用可能にするには、次の2つの方法が考えられる。

- 1) ドラム上の磁気テープ浮上量をドラム全域にわたって同時に解くか、または、ドラム上の磁気テープの浮上量を解析し、その結果得られる浮上量分布を用いて、磁気ヘッド近傍の解析を行う。
- 2) 解析領域を図4.14のab-cdのようにZ軸を含む90度とするのではなく、



図 4.1 7 磁気ヘッド付き平行掛けの  
実験装置

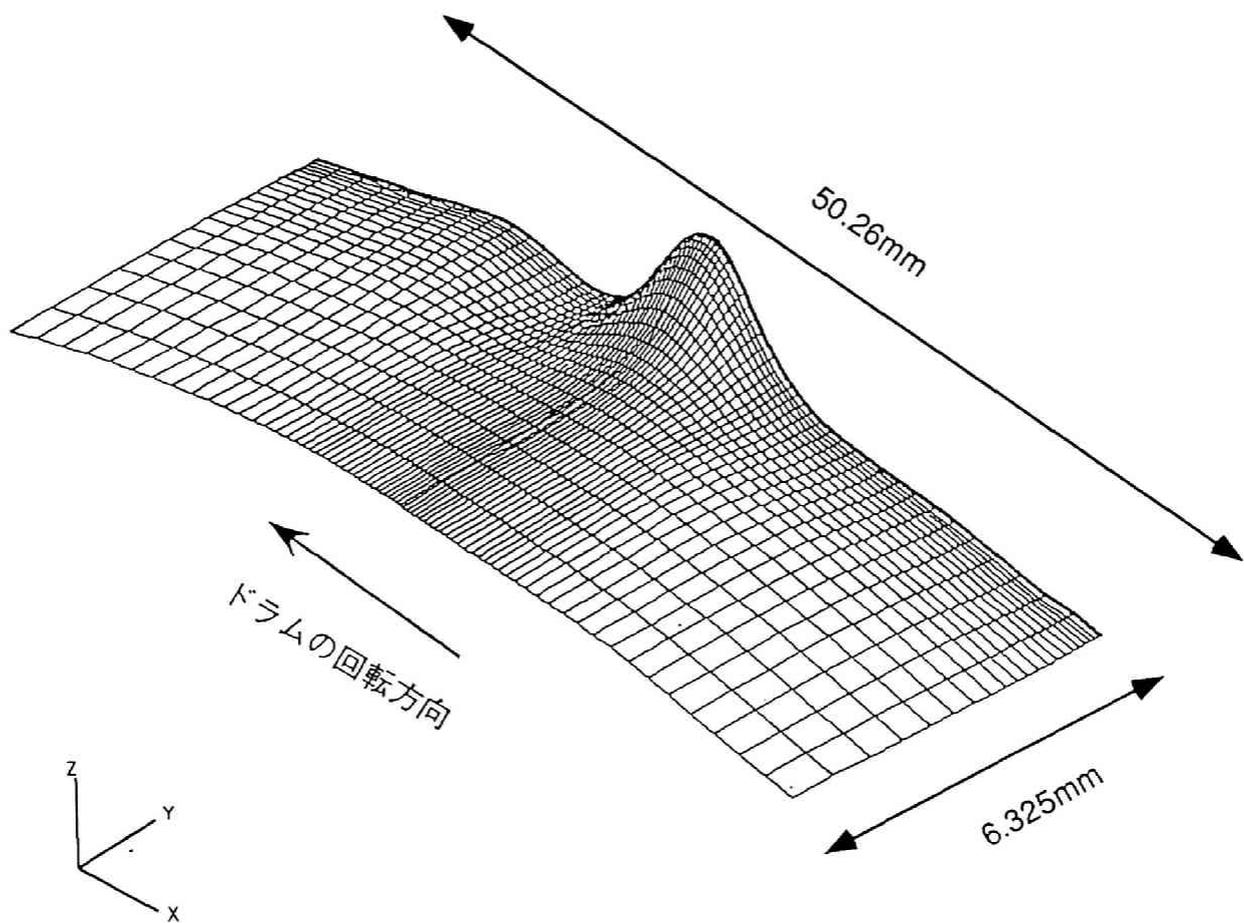


図 4.1 8 磁気ヘッド近傍解析結果  
(変形形状)

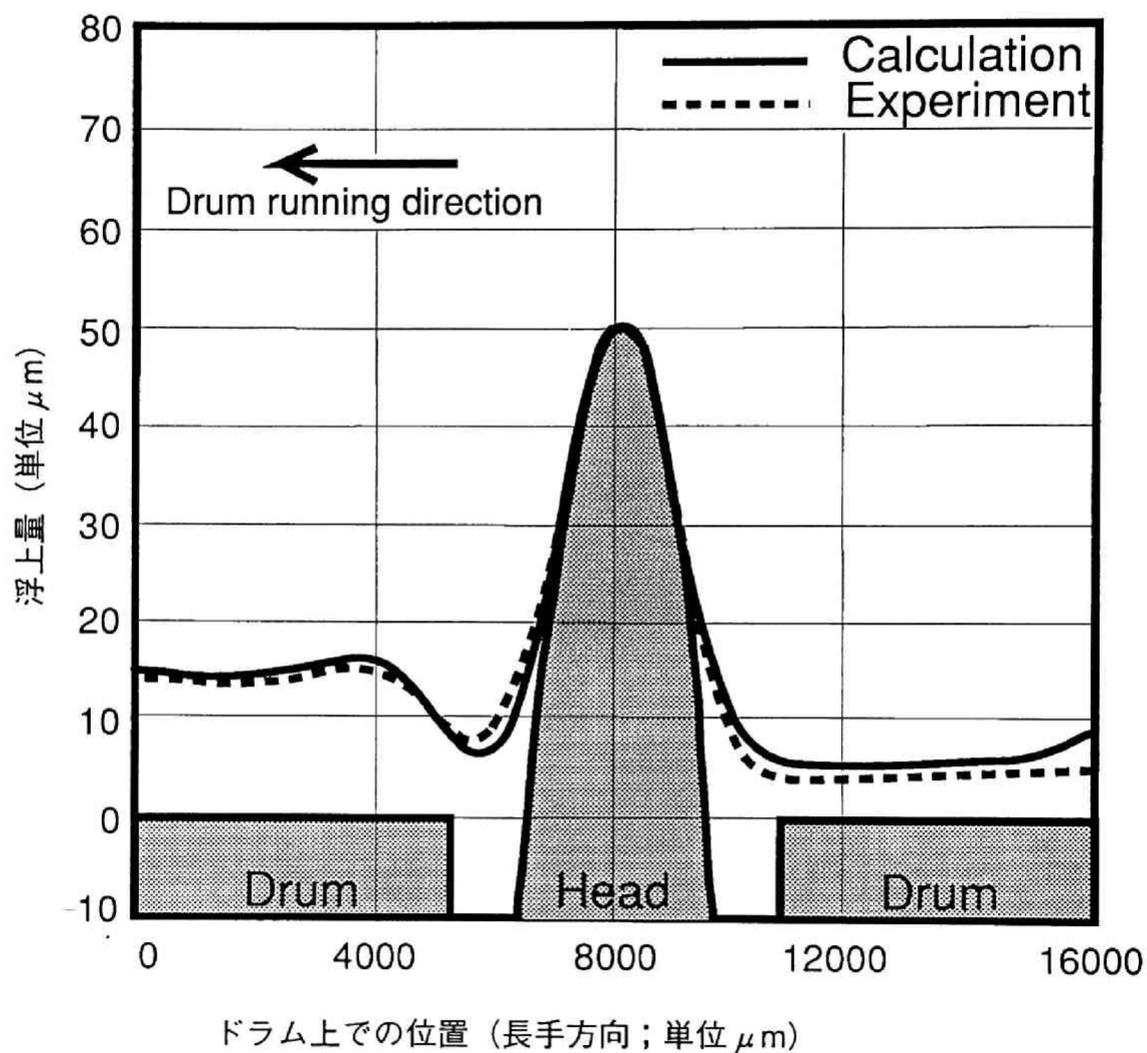


図 4.1 9 磁気テープ中央断面  
 における浮上量 (長手方向)  
 ( $T=23.4\text{N/m}$ )

例えば、180度とするように領域を大きく取り、a b, c d 端部での浮上量が磁気ヘッドによる影響が小さくなるようにして解析を行う。

いずれにしても、小さな磁気ヘッドを含むドラム全体について解析する場合、解析精度を高く保つには要素数が多くなり、計算時間と計算機資源が問題となる。また、大きさの極端に異なる要素を同時に扱うことになり、解析精度を高く保つことは難しい。これらの問題点を解決する方法については、第5章で取り扱う。

磁気ヘッド近傍における磁気テープの変形を3種類の張力 ( $T = 7.8 \text{ N/m}$ ,  $T = 23.4 \text{ N/m}$  及び  $T = 39.0 \text{ N/m}$ ) に対して、解析結果と実験結果を比較して図4.20に示す。X軸 (図4.14参照) 上における磁気テープの変形は図4.20 (a) に示す3箇所での浮上量で特徴付けることができる。特徴的な3箇所とは、磁気ヘッド前方の磁気テープの波打ちの最高点  $\alpha$  と、最下点  $\beta$  と磁気ヘッド後方の磁気テープの最下点  $\lambda$  である。この3箇所における磁気テープのドラムからの高さ  $h$  と磁気テープに負荷する張力  $T$  との関係を示す。図4.20 (b), (c), (d) に示す。破線は実験結果を実線は計算結果である。計算結果は実験結果とよく一致し、いずれの位置においても、磁気テープに負荷した張力の増加とともに、浮上量は減少する。張力が高くなるにつれて実験結果と解析結果の差が少なくなるのは、全体の浮上量が減少し、磁気ヘッド周辺での磁気ヘッドや磁気ヘッド取り付け穴の、磁気テープの浮上量に対する影響が小さくなる為と考えられる。特に張力が大きくなると、磁気テープが磁気ヘッド表面と接触する部分が大きくなる。磁気テープと磁気ヘッドが接触する場合、実際には磁気テープは接触による磁気ヘッドの走行方向への摩擦力を受ける。その結果、磁気テープは磁気ヘッド前方の  $\beta$  点における浮上量を減少させると思われる。しかし、解析ではこの摩擦力を考慮していない。また、ある有限の幅を持った磁気ヘッドが潤滑膜内を運動する場合、磁気ヘッドの前方の幅による空気抵抗を受ける。そして、磁気ヘッドが受ける空気抵抗の反力は圧力として磁気テープに作用する。その結果、 $\beta$  点における浮上量 (図4.20 (c)) の解析結果が実験結果よりも大きくなったものと考えられる。

解析においては、磁気ヘッドの取り付け窓の内部は圧力一定 ( $p = 0$ ) としており、この圧力の変化を考慮していない。また、上述したように、磁気ヘッドの周速及び負荷される張力が増加すると、磁気ヘッドおよびドラムと磁気テープの間の接触による摩擦力と磁気ヘッドの幅による空気の抵抗が増加する。この場合、摩擦力と空気抵抗の反力が外力として磁気テープに作用し、磁気テープの変形及び浮上量に影響を与える。これらの点につ

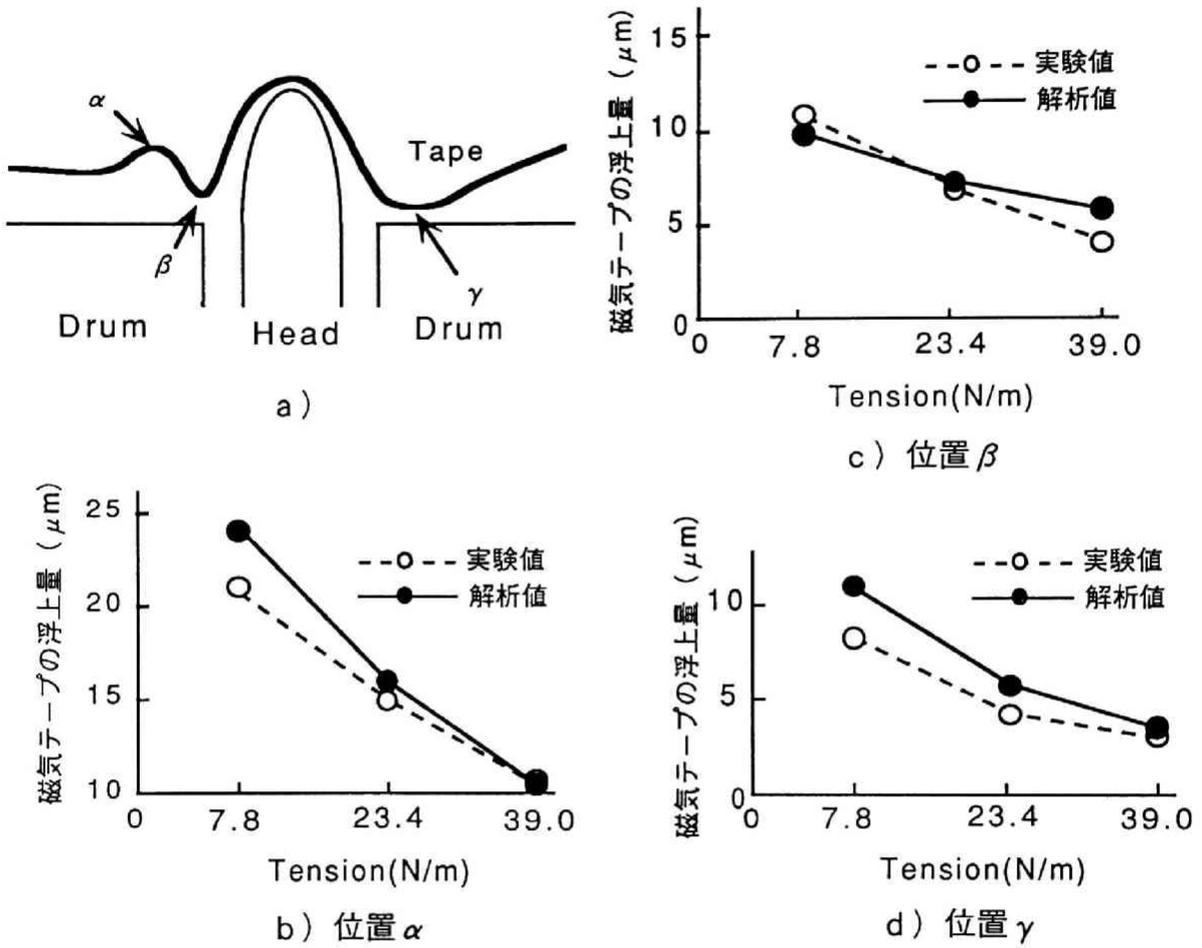


図 4.20 荷重に対する浮上量の変化

いては、今後さらに検討する必要がある。

図4.21に、磁気ヘッド中央断面 ( $X=0$ ) における磁気テープの幅方向の変形量の分布 ( $T=23.4\text{ N/m}$ ) を示す。破線は実験結果を、また実線は計算結果である。この図から分かるように、磁気テープを等方性材料とした場合の解析結果と実験結果は全体的に合っていない。

従来の研究では磁気テープは等方性材料として扱われているが、第2章で示したように、磁気テープはベースフィルムの前処理や磁性層の針状磁性粉のために異方性を示す。そこで、材料異方性を考慮した場合としない場合について解析を行い、解析結果と実験値を比較した(図4.22)。実際の磁気テープの弾性定数は長手方向 ( $E_x$ ) と幅方向 ( $E_y$ ) とで異っている、この異方性を考慮しない解析においては弾性定数の値としては、方向にかかわらず  $E_x$  の値を用いている ( $E_x=E_y$ )。図4.22(a)は張力  $T=23.4\text{ N/m}$  の場合、図4.22(b)は張力  $T=39.0\text{ N/m}$  の場合である。図4.22も図4.21と同様に、磁気テープの幅方向の変形の様子を示したものである。張力が高い程、変形形状は幅方向に狭くなるが、異方性を考慮した計算結果は実験結果とよく一致している。図4.22(a)の結果を図4.21にならって描いたのが図4.22(c)である。磁気テープを等方性材料として解析した結果は、材料異方性を考慮した場合の解析結果よりも、浮上量が大きくなっており、実験結果と  $4\text{ }\mu\text{m}$  から  $5\text{ }\mu\text{m}$  程度異っている。材料異方性を考慮した解析結果と実験結果を比較すると、磁気ヘッドから  $100\text{ }\mu\text{m}$  ~  $1000\text{ }\mu\text{m}$  の間で実験による磁気テープの浮上量の方が小さくなっている。また、磁気ヘッドから大きく離れたドラム上 ( $2500\text{ }\mu\text{m}$  ~  $3000\text{ }\mu\text{m}$ ) でも同程度の差異がみられる。これは、実験に使用した磁気テープは下に凸の形状の初期ひずみがあったと考えられることと、磁気ヘッドとドラムの間にある磁気ヘッド取り付け穴の深さの影響があるためと考えられる。

図4.22(d)は張力  $T=23.4\text{ N/m}$  の時の  $X$  軸上での磁気テープの浮上量について、磁気テープの材料定数を、等方性材料として解析した結果、異方性材料として解析した結果及び実験により測定した結果を比較したものである。解析結果については、異方性考慮の有無に拘らず殆ど同一であり、実験結果とよく一致している。これは、等方性材料として解析する際に幅方向の材料定数を長手方向のそれと等しくしたことによる。これらの結果から、長手方向と幅方向の材料定数の違いによりその変形形状は幅方向では異なるが、幅方向の材料定数の影響は長手方向にほとんど影響しないといえる。

以上の結果から、3次元的な磁気テープの変形を定量的に評価する必要がある場合、材

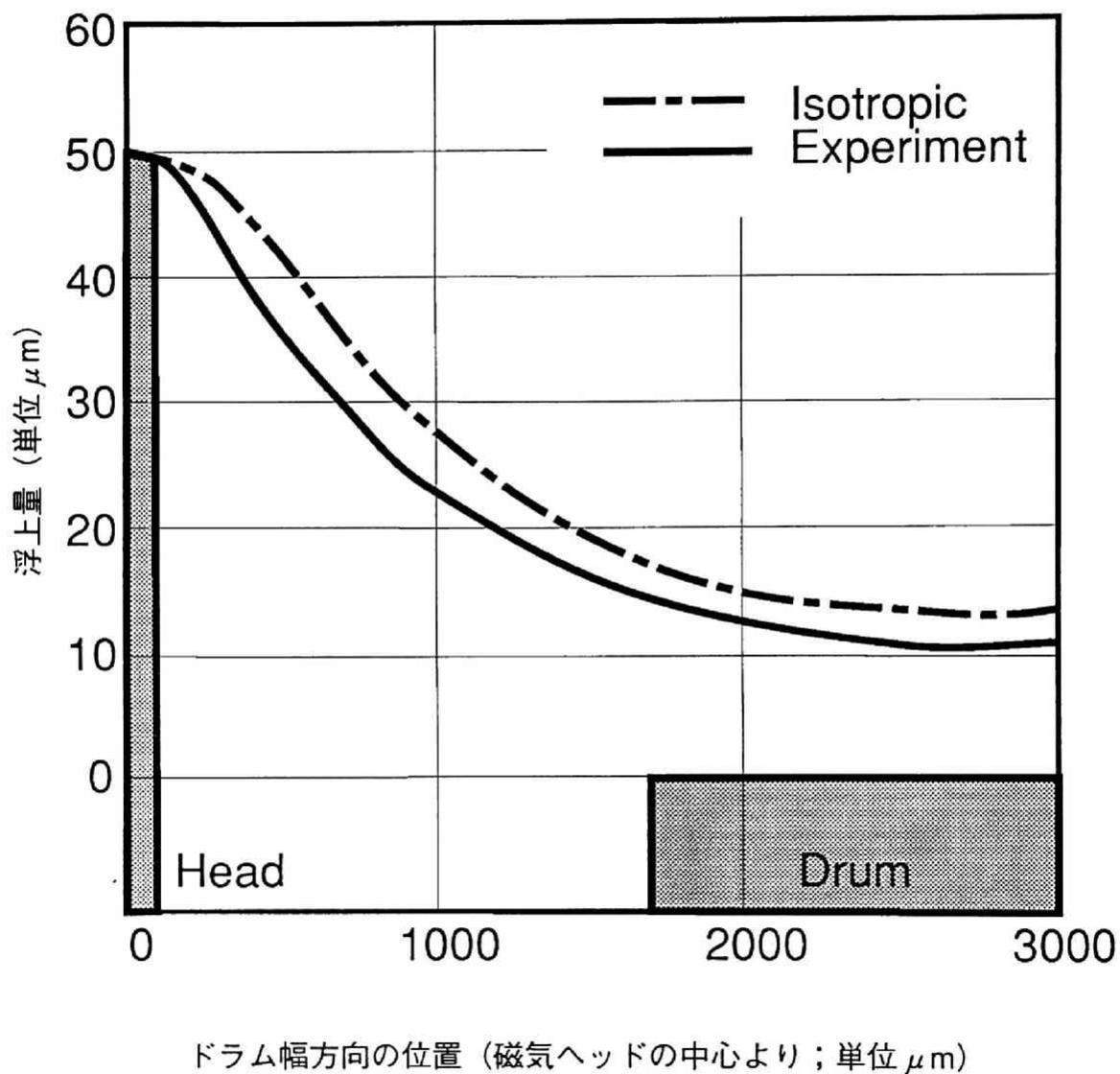
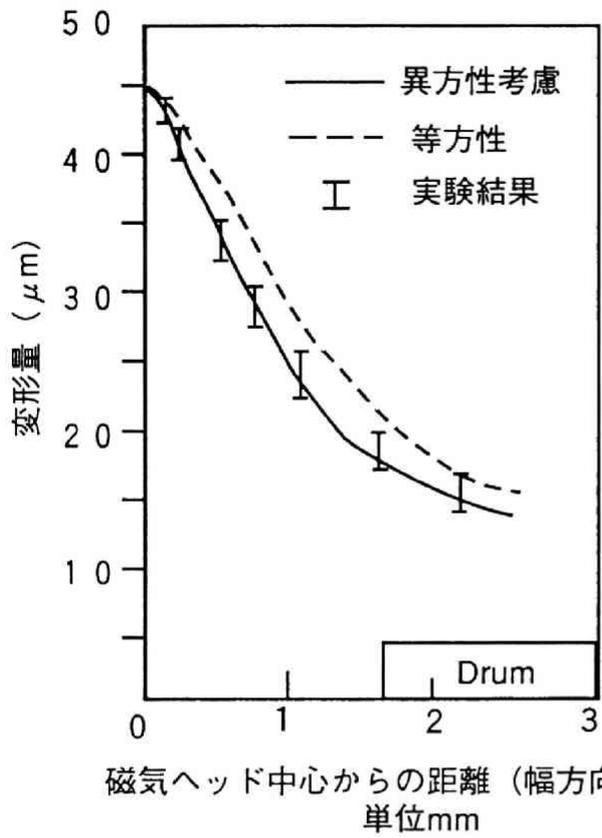
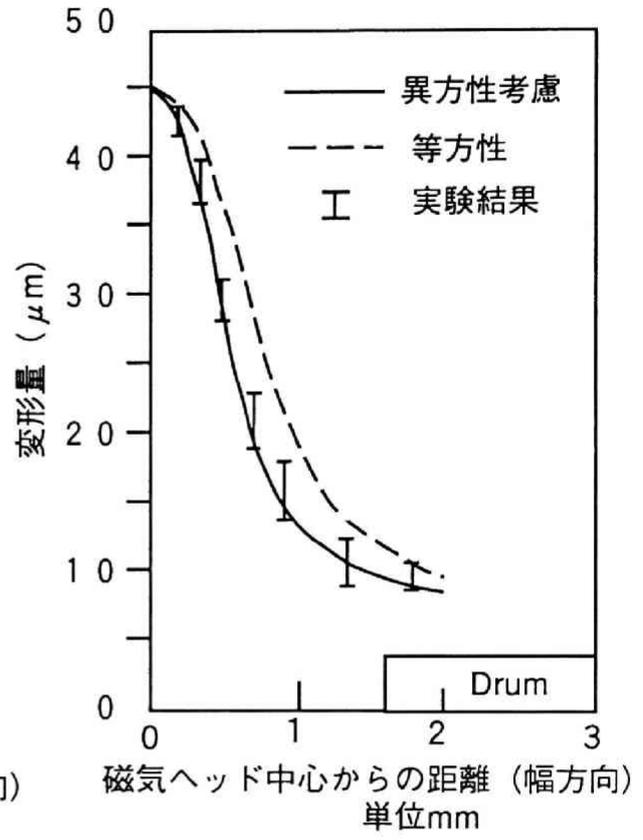


図 4.2 1 磁気ヘッド中央における  
磁気テープの浮上量 (幅方向)  
( $T = 23.4 \text{ N/m}$ )

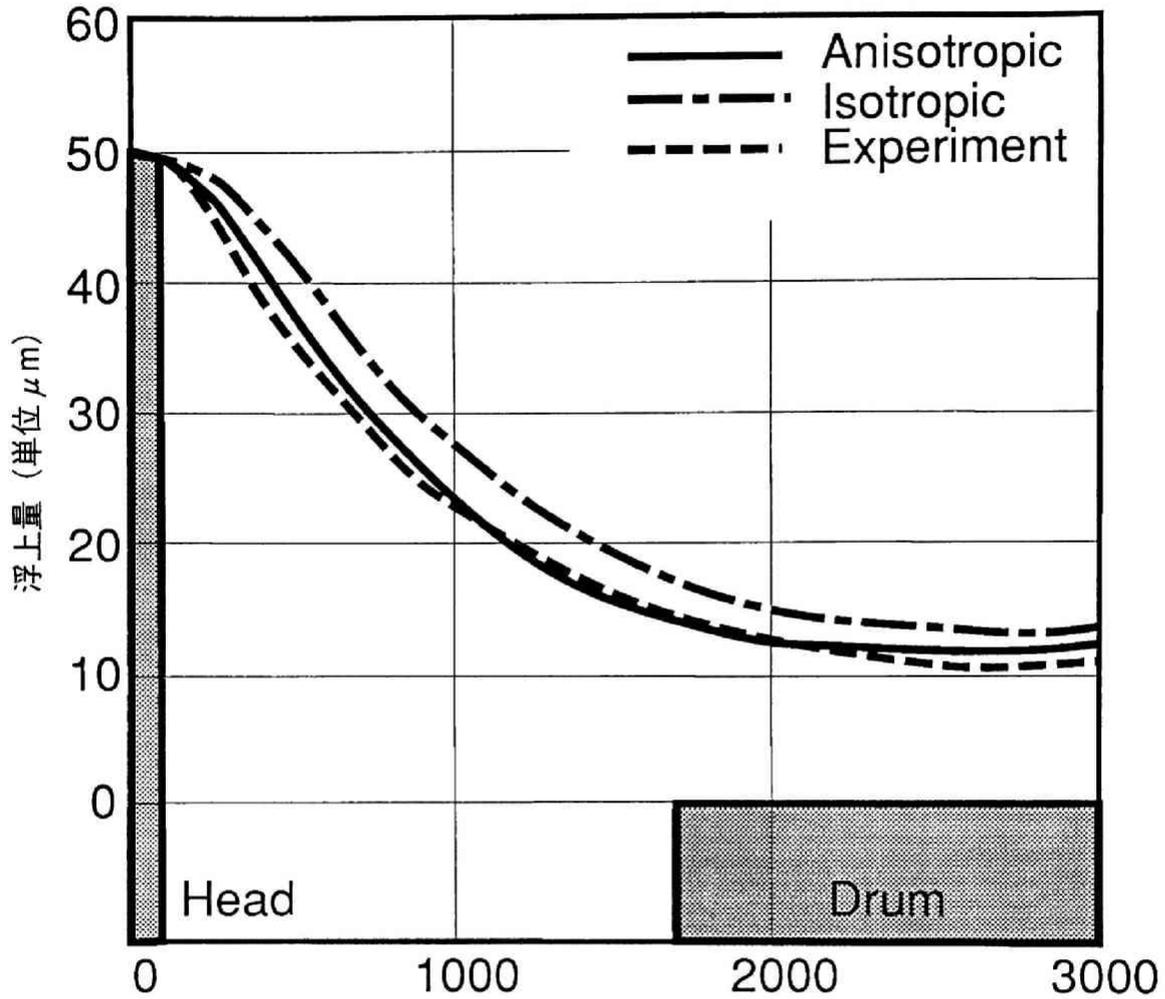


(a)  $T = 23.4 \text{ N/m}$



(b)  $T = 39.0 \text{ N/m}$

図 4.2 2 材料異方性による変形形態の違い  
(幅方向)



・ ドラム幅方向の位置 (磁気ヘッドの中心より; 単位  $\mu\text{m}$ )

図 4.22 (c) 材料異方性による変形形態の違い  
磁気テープの浮上量 (幅方向)

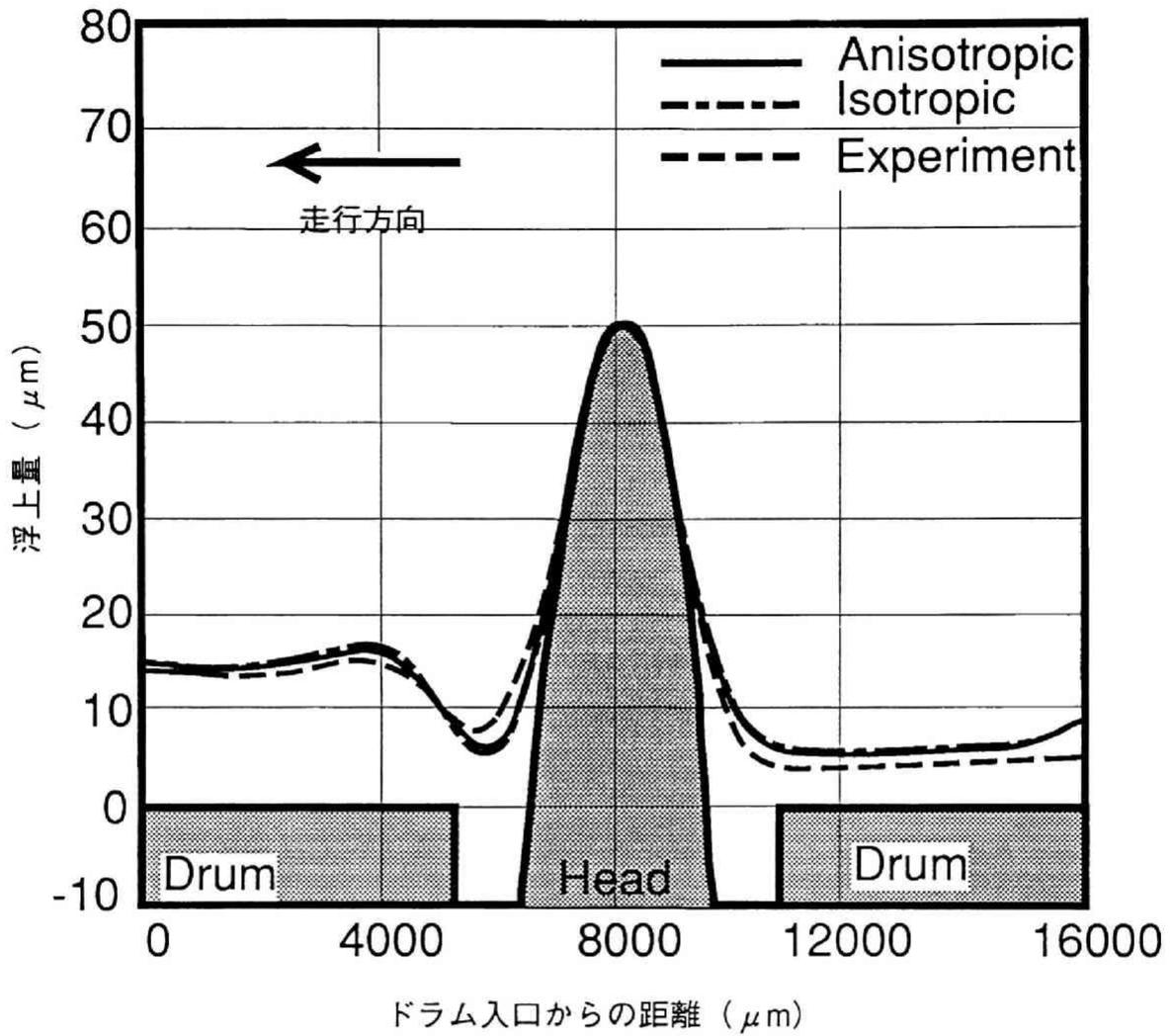


図 4. 2 2 (d) 長手方向の浮上量の比較  
(等方性材料と異方性材料及び実験結果)

料異方性を考慮することが重要であることが結論できる。さらに磁気ヘッド面状での隙間分布を議論する必要があるVTRのインターフェースでは、磁気テープの材料異方性の考慮が不可欠であると結論できる。

また、実験値と解析値がよく一致したことは、第2章に述べたように、磁気テープの変形を線形変形のみ考慮することで充分精度よく解析できることを示している。米田らは[38,39,40]非線形項を考慮して解析を行っているが、定量的な解析にまでには至っていない。これは非線形項を考慮することによる計算誤差の増加のためであると考えられる。以上のことから、本手法の妥当性が示されたと言える。

#### 4. 4 磁気ヘッド上での隙間分布

##### 4. 4. 1 隙間分布の測定

磁気ヘッド上での隙間分布を光干渉法を用いて測定する方法を、図4.23に示す。ドラムを1800rpmで回転し、その上に透明なテープを平行に掛け、一端を固定し、他端に張力 $T = 7.8 \text{ N/m} \sim T = 39.0 \text{ N/m}$ の重りを釣り下げる。磁気ヘッド上での磁気テープの浮上量を光マイクロメータで測定する場合と同様（第3.2節参照）に、磁気ヘッドが測定位置を通過するのに同期して、透明テープの上方から光をあてる。磁気ヘッド面からの反射光と透明テープ面からの反射光とが干渉し干渉縞が現れるので、対物干渉レンズを用いてその干渉縞を測定する。干渉縞は、ビデオカメラで取り込み記録した。光源として白色光を用い、波長547nmのフィルタを用いているので1本の干渉縞の隙間は $0.273 \mu\text{m}$ である。つまり、一本の干渉縞は $h = 0.273 \mu\text{m}$ の潤滑膜がそこに存在していることを示している。

##### 4. 4. 2 実験結果と解析結果の比較

図4.24は3種類の厚さの異なるテープを用いた場合の浮上量の測定結果である。磁気テープの厚さが厚いほど、また、磁気テープに負荷した張力が大きいほど、磁気ヘッドと磁気テープの隙間が小さくなり、1番内側の干渉縞（浮上量 $h = 0.273 \mu\text{m}$ に相当）

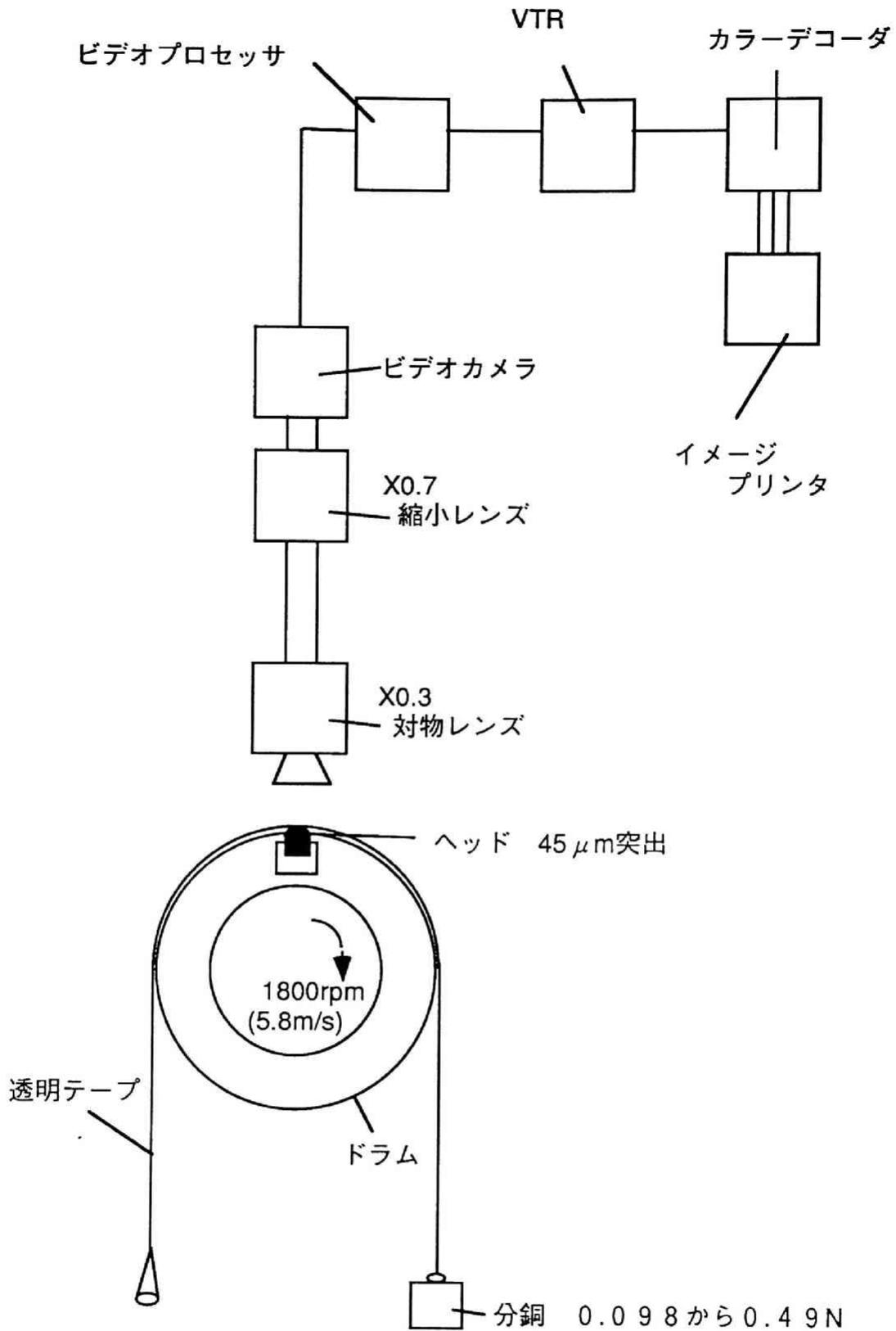
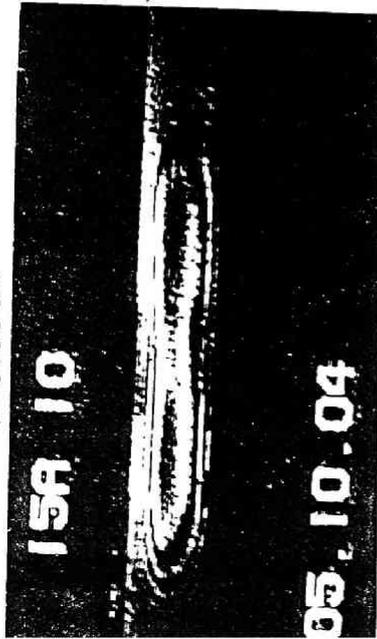
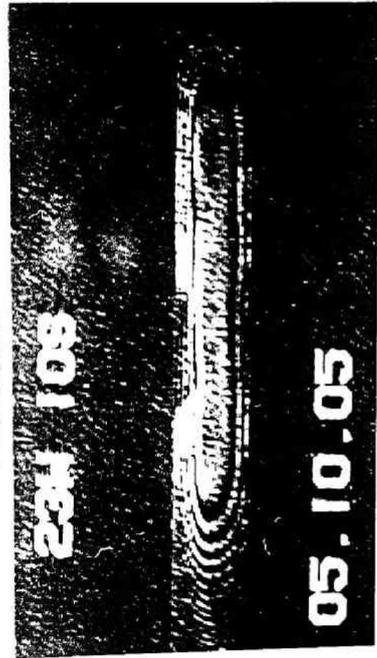


図 4.2 3 透明テープによる磁気ヘッドとの隙間分布の測定装置

$t=15\ \mu\text{m}$   
 $T=0.098\text{N}$



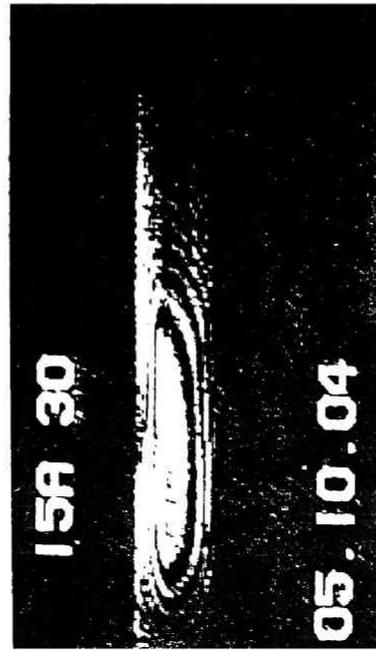
$t=23\ \mu\text{m}$   
 $T=0.098\text{N}$



$t=33\ \mu\text{m}$   
 $T=0.098\text{N}$



$t=15\ \mu\text{m}$   
 $T=0.294\text{N}$



$t=23\ \mu\text{m}$   
 $T=0.294\text{N}$



$t=33\ \mu\text{m}$   
 $T=0.294\text{N}$



図 4.2.4 厚さの異なる磁気テープと磁気ヘッドの隙間分布

の領域が広がっているのが分かる。

図4.25に、厚さ $19\mu\text{m}$ の透明テープを用い、張力 $T=7.8\text{N/m}$ とした時の隙間分布の実験結果の干渉縞の写真(図4.25(a))と計算結果(図4.25(b))を示す。計算結果における等高線は、 $0.27\mu\text{m}$ 間隔で示している。実験結果と解析結果はよい一致を示している。図4.25(c)はテープを等方性材料として計算した時の等高線である。異方性を考慮した時の結果(図4.25(b))と比較すると、長手方向の浮上量分布は異方性であるか等方性であるかによらずほぼ同じであるが、磁気ヘッドの幅方向の隙間分布については、等方性材料とした解析結果の方が隙間が大きくなっている。これは、等方性材料と仮定して解析した場合、長手方向の弾性定数と同一の値を幅方向にも用いていることによる。すなわち、幅方向の弾性定数は長手方向に比べて20%程度低いにもかかわらず、長手方向の弾性定数を幅方向にも用いたために、幅方向には浮上量が大きくなったものと考えられる。実機においては、磁気テープは磁気ヘッドに斜めに掛けられており、磁気ヘッドとの隙間分布は磁気テープの幅方向の影響を大きく受けることになるので、異方性を考慮することは本解析において必要欠くべからざる条件であるといえる。

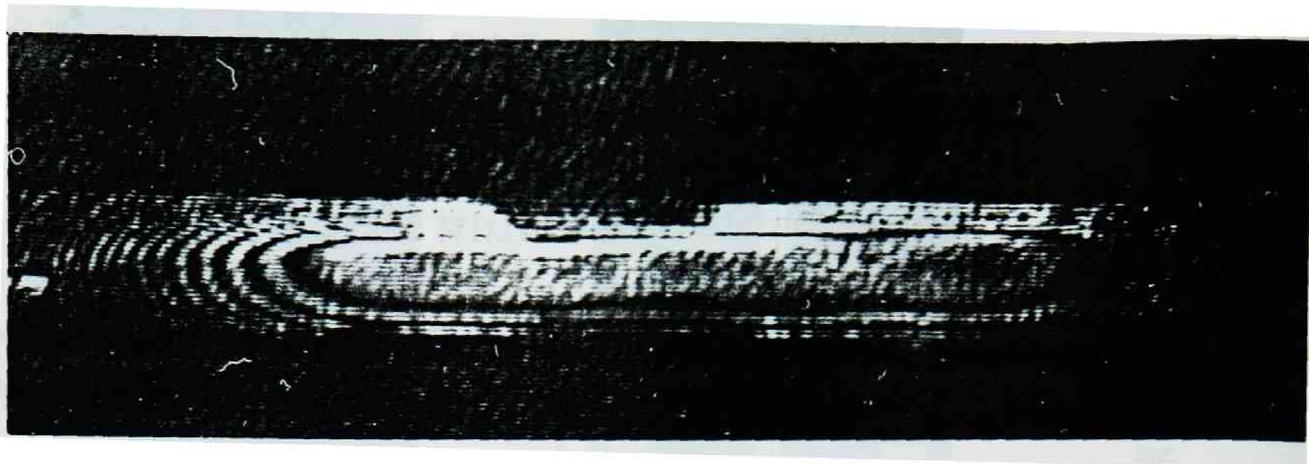
#### 4.5 計算についての検討

一般に数値解析を行い、その結果を商品及び技術に対して工業的に利用展開する場合、使用する計算機のコスト及び計算時間が重要な問題となる。そこで、本節では、本章第1節で示した計算手法を用いて行った第2節の溝付ドラム解析及び、第3節の磁気ヘッド付平行掛けモデルにおける計算上の問題点について議論する。

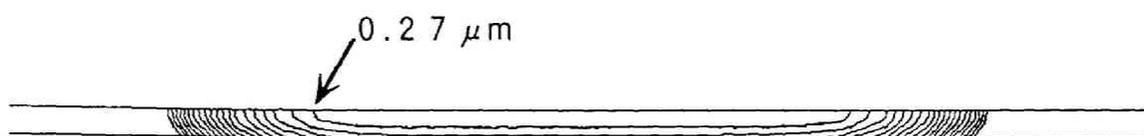
##### 4.5.1 計算時間と収束性

第3節で用いた解析モデルは、領域を4角形一次要素で分割しており要素数は1900、節点数は2016あり、未知数は約12000個ある。方程式は非対称になるために、バンド幅約150の領域を全て記憶する必要がある。この領域を倍精度で計算する場合、計算を実行するには約70MBの記憶容量を必要とする。方程式の解法には直接法を用いており、300MFlopsの計算機を用いてCPU時間は約11分であった。

修正レイノルズ方程式は非線形であり、本手法ではニュートンラフソン法を用いて収束

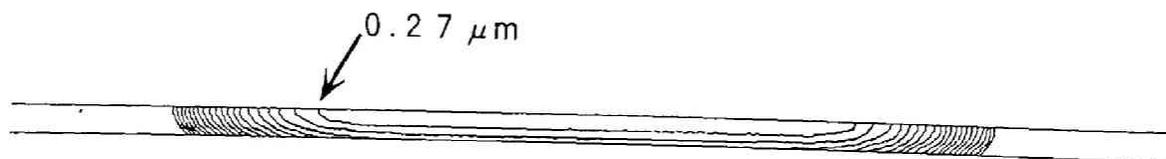


(a) 異方性磁気テープによる測定結果



(b) 異方性磁気テープの浮上分布

解析結果



(c) 等方性磁気テープの浮上分布

解析結果

図 4.25 材料異方性による磁気テープの磁気ヘッド上における浮上量分布の違い

計算を行っている。収束計算における圧力及び変位の変化率は、次式で定義した $\Delta e_p$ 及び $\Delta e_d$ の形にそれぞれ整理して示すことにする。

$$\Delta e_p = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|p_i^k - p_i^{k-1}|}{|p_i^k|} \quad 4-5$$

$$\Delta e_d = \frac{1}{3N} \sum_{i=1}^N \left\{ \frac{|u_i^k - u_i^{k-1}|}{|u_i^k|} + \frac{|v_i^k - v_i^{k-1}|}{|v_i^k|} + \frac{|w_i^k - w_i^{k-1}|}{|w_i^k|} \right\} \quad 4-6$$

ここに、 $p_i^k$ はk回目の繰り返し計算における節点iにおける圧力で、 $u_i^k$ 、 $v_i^k$ 、 $w_i^k$ はk回目の繰り返し計算における節点iにおける変位 ( $u_i^k$ 、 $v_i^k$ 、 $w_i^k$ ) である。また、Nは解析領域の全節点数である。したがって、 $\Delta e_p$ と $\Delta e_d$ は節点一個当りの圧力及び変位 ( $u$ 、 $v$ 、 $w$ ) の繰り返し計算における修正量の変化率を示す。

繰り返し計算における収束条件としては、

$$\Delta e_p < 10^{-3} \quad 4-7$$

$$\Delta e_d < 10^{-4} \quad 4-8$$

を用いた。この条件は数値計算上かなり厳しいが、対象とする領域が20mm×100mm程度の大きさを持つのに対して磁気ヘッド上の浮上量は $10^{-4}$ mmのオーダーであり、6桁のオーダー差があることと、変位 ( $u_i^1$ 、 $v_i^1$ 、 $w_i^1$ ) は数十 $\mu$ mであるのに対して、必要精度は0.1 $\mu$ mであり、 $\Delta e_d$ は $10^{-4}$ 以下である必要がある。これらの理由により、本研究では上記の条件を採用した。本解析では、いずれの場合も非線形計算は最大20回の繰り返しで収束した。

図4.26 (a) に、第4.3節の磁気ヘッド付き解析における、本解析方法による圧力変化率 $\Delta e_p$ と変位変化率 $\Delta e_d$ とニュートンラフソン法での繰り返し回数との関係を示す。破線は変位の変化率、実線は圧力の変化率である。変位の修正量は単調に減少するのに対して、圧力のそれは途中で振動するが、20回程度では収束していることが分かる。図4.26 (b) に従来法 (流体と変形方程式を別々に解く方法) を用いた場合の同様の結果を示す。破線は変位の変化率を実線は圧力の変化率を示す。従来法では、変位及び圧力は

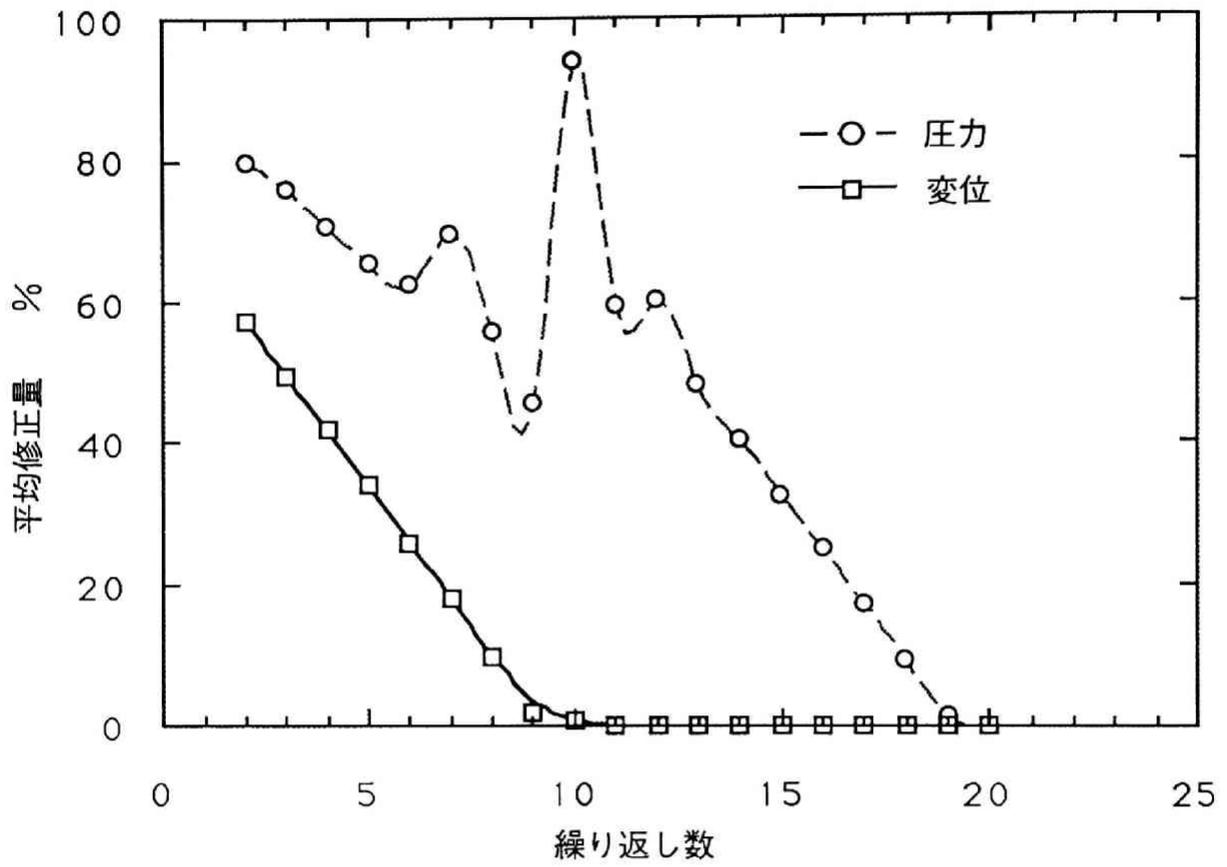


図 4.2 6 ( a ) 流体と構造を同時に解く場合の収束特性

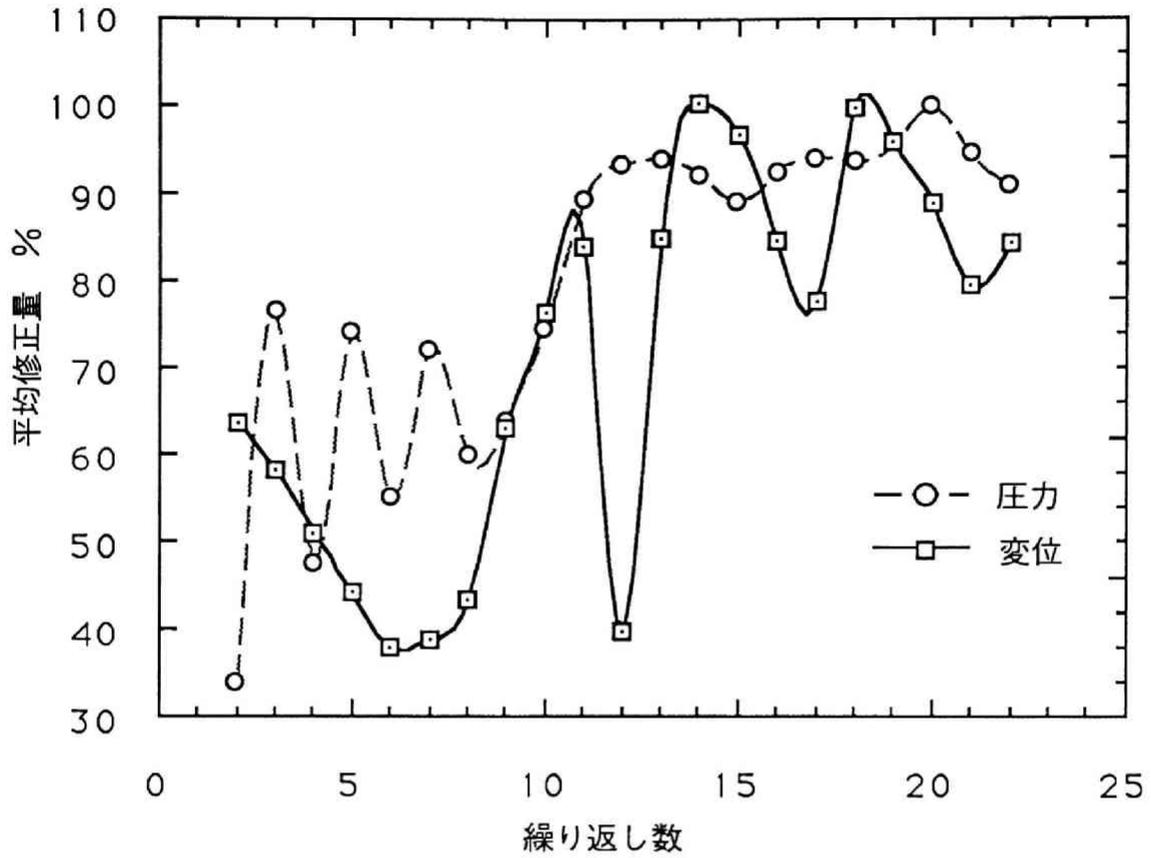


図 4.2 6 (b) 流体と構造を別々に解く場合  
の収束特性

一方が与えられた状態で他方の収束方向が各繰り返しステップごとに決ることになるので、変位は始め収束方向に向かうが、圧力は変位の変化により振動し、最終的には変位、圧力とも収束せずに発散してしまっている。この結果から、本研究で用いた連成計算手法が、従来の別々に解く方法よりも収束性において優れていることが分かる。

#### 4. 6 結 論

本章では、まず第2章で展開し求めた理論を基に、VTRのインターフェースを解析する計算アルゴリズムを示した。次に矩形の溝を設けたドラムに、磁気テープをドラムの回転方向と平行にかけた場合と、家庭用VTRの磁気ヘッドを取り付けたドラムに磁気テープをやはり平行にかけた場合の、2つの場合について解析を行い、実験結果と比較し、次の結論を得た。

- 1) いずれの場合も、計算値と実験値は最大7%以下の誤差で一致した。
- 2) 溝を設けたドラムの解析の結果、溝内の角を回る渦の影響があり、溝の内部での磁気テープの変形形状は、解析値は実験値と異なっていた。しかし、磁気ヘッドを取り付けた場合には、磁気ヘッド用の穴付近では同様な違いは認められなかった。すなわち、磁気ヘッドがある場合には、取り付け穴の内部の渦の影響は軽減されるものと考えられる。
- 3) 磁気テープの材料異方性について検討した結果、材料異方性は解析結果を大きく左右することが分かった。そして、等方性を考慮した場合と比較して、磁気テープの変形が長手方向、幅方向とも実験とよく合うことが分かった。このことから、インターフェースを定量的に解析するには材料異方性の考慮は必須であり、本研究で用いた材料定数が正しく、また、材料異方性の解析理論への組み込みが有効に行われていることが確認できた。
- 4) 磁気ヘッドの幅及び磁気ヘッドと磁気テープとの接触による摩擦力が、磁気ヘッド前方の磁気テープ変形及び浮上量に影響すると思われる。磁気ヘッドと磁気テープの相対速度の増加により、その影響は大きくなると考えられ、今後これらの点について考慮する必要がある。
- 5) 本章での解析は、磁気ヘッド近傍をドラム全体から切り出して解析を行ったものである。その結果、切り出した部分の境界条件が解析結果に大きく影響してい

ることが明かとなった。今後、効率よく解析を実現するためには、ドラム上での磁気テープの浮上を解析し、磁気ヘッド近傍の解析に必要な各種条件を抽出する方法を検討する必要がある。

- 6) 従来多く用いられてきた、潤滑膜圧力と磁気テープの変形を別々に解く方法と本方法を比較した結果、本方法が収束性においてより優れていることが分かった。
- 7) 本章で行った解析結果が実験結果とよい一致を示し、かつ安定に解を求めることが可能であったことは、第2章で示した磁気テープを線形変形のみ考慮することの妥当性が示されたと言える。

以上の結果を総合して、以下のことが言える。

本研究で提案する理論及び計算手法によってVTRインターフェースを定量的に解析することができ、従来、問題とされてきた解の収束性及び精度の問題を解決できる。さらに、本研究の方法を用いることで、VTRインターフェースの現象を定量的に把握し、各種設計変数の影響の検討が可能である。そして、本研究で開発した解析技術は、今後のVTRシステムの研究開発において、従来の実験研究に加えて、有力な計算機実験手法として利用できる結論できる。

## 第5章 実機解析への展開

第4章までに、修正レイノルズ方程式と薄板シエルの面内変形方程式及び曲げ変形の方程式を有限要素法を用いて離散化し、3つの方程式を連成して解くことによって、VTRの磁気テープと磁気ヘッド及びドラムの間の潤滑膜の圧力及び磁気テープの変形と浮上量分布が精度良く求められることを示した。本章では、第4章までに示した方法を用いて、実機のインターフェースを解析し、本研究の方法の妥当性について述べる。

第4章では磁気テープを上下一体のドラムの回転方向に対して平行に掛けていた(図4.2, 図4.12参照)ので、磁気テープは磁気ヘッドから離れたドラム上では一様に浮上していた。実際のVTR装置(図5.1参照)では、上下別動するドラムに磁気テープを斜めに巻き付けている。そのため、磁気テープの浮上量は上ドラム上と下ドラム上とは異なり、ドラムの周上で複雑に分布する。そして、上下ドラムの間に取り付けられた磁気ヘッド近傍における磁気テープの変形及び浮上量は、ドラムの周上に分布した磁気テープ浮上量の影響を受ける。家庭用VTRの場合は、磁気ヘッド形状は周方向長さ3~5mm, 幅100 $\mu$ m程度のナイフエッジ形状であるので、ドラムの上で浮上する磁気テープの面積の1/2500が磁気ヘッド上での浮上面積であることになる。つまり、磁気テープの浮上は回転ドラムによる圧力の寄与がほとんどであり、磁気ヘッド部で発生する潤滑膜圧力の寄与は小さいと言える。磁気ヘッド近傍での磁気テープの浮上及び変形は、ドラム上での浮上、変形と磁気ヘッドの形状とその近傍の構造で決定されると考えられる。

磁気ヘッドとドラム全体を同時に解析する場合には以下のような問題が挙げられる。

- 1) 磁気ヘッドはドラム上の磁気テープの領域に比べて小さいため、以下の問題がある。
  - a) 磁気テープの変形形状及び潤滑膜圧力分布を求めるために、これまでの有限要素法による解析手法をもとに、解析領域を要素分割した場合、磁気ヘッド上の要素の大きさとドラム上の要素の大きさが極端に異なる。この結果、磁気ヘッド上の節点において、桁落ち及び丸め誤差が集中し、本来精度を必要とする磁気ヘッド近傍の解析精度が低下する。
  - b) 全領域を磁気ヘッドの大きさに応じて細分割すると、要素数が多くなる。その結果、解析に必要な計算機資源(記憶容量と計算時間)が大きくなり、実用的でない。
- 2) ドラムに磁気テープが斜めに掛けられているため、以下の問題がある。



(a) VTR装置



(b) 磁気ヘッド部分

図 5.1 実際のVTR装置

- a) ドラムの回転位置により、磁気テープの変形量及び浮上量が異なる。この結果、磁気ヘッド近傍の形状が磁気ヘッドの回転位置により変化する。そのために、磁気ヘッドを含めて全体を解析する場合、磁気ヘッドの位置によりドラムを含めた全領域の要素を、その都度分割する必要がある。

これらの問題により、磁気ヘッドの存在を考慮してドラム全体を解析することは、精度及び効率を考えると、実用的ではない。

そこで本章では、実際のVTR装置における磁気テープの変形、浮上特性を解析する方法として、次の方法を提案する。

「解析を2つのステップ（全体領域解析と部分領域解析）に分け、全体領域の解析結果を用いて部分領域の解析を行う。」

- 1) 磁気ヘッドを持たないドラムに磁気テープを巻き付け、ドラム上での磁気テープの変形と浮上量および潤滑膜圧力分布を解析する。これを全体解析と称する。
- 2) 磁気ヘッド近傍のみを解析領域として、解析領域の境界条件（潤滑膜圧力と磁気テープ変形）及び領域内の初期形状と初期圧力分布を全体解析の結果より算出し、磁気ヘッド近傍の磁気テープの変形と潤滑膜の圧力分布を再度解析する。これを、磁気ヘッド近傍部分領域の解析と称する。

この方法を用いることにより、次の効果が期待できる。

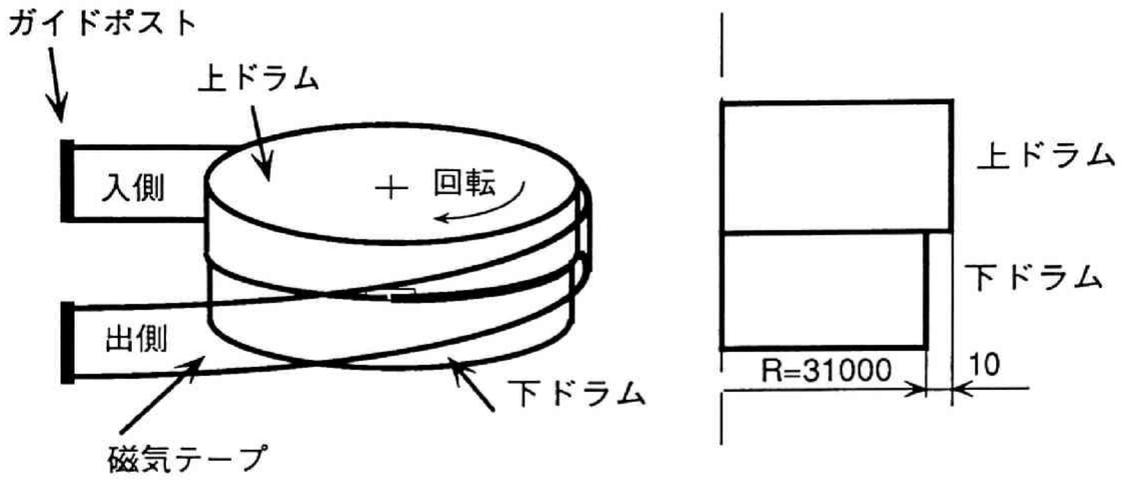
- 1) 磁気ヘッド上での解析結果の精度は、ドラム上での要素分割の影響を受けにくい。
- 2) 解析に必要な要素分割数を削減でき、その結果、計算に必要な計算機資源が削減できる。

以下に上記の2つの解析について、解析方法を説明し、解析結果と実験結果を比較することで、本研究で提案する方法の有効性を示す。

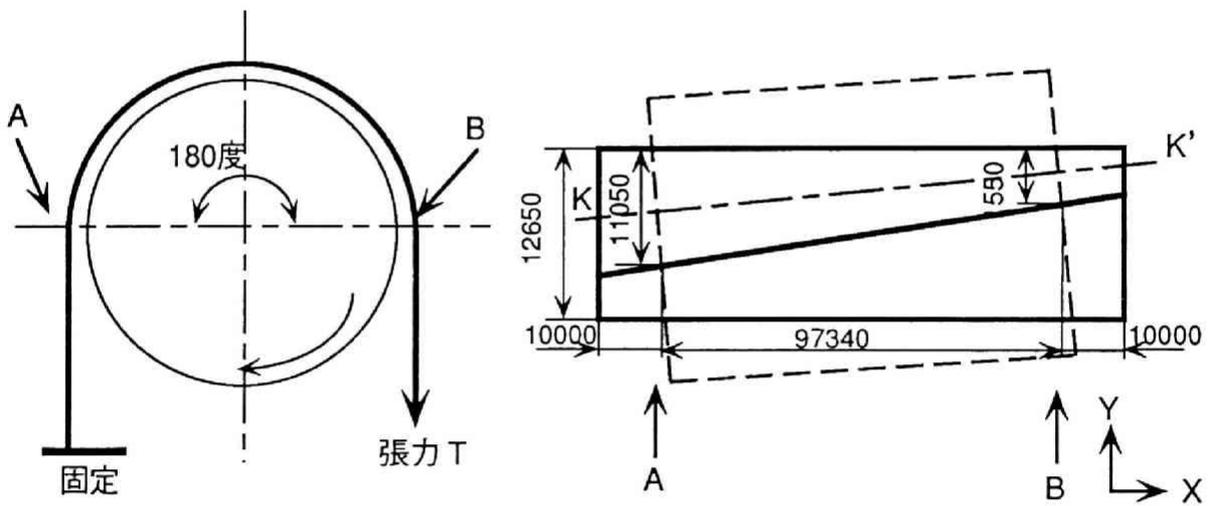
## 5. 1 全体解析

### 5. 1. 1 解析モデル

図5.2に全体解析の解析モデルを示す。ドラムは上下に分かれており、上ドラムと下



(a) 解析モデル



(b) ドラムと磁気テープの位置関係

図 5.2 実機解析モデル (全体解析用)

ドラムの間には空気の逃げる隙間はないものとする。磁気テープはドラムに斜めに巻き付けられており、その巻き付け角は $180$ 度である。まず本節では、ドラム周上全体における磁気テープの浮上量を解析することを目的とする。そこで、上ドラムは磁気ヘッド及びその取り付け窓のない単純な円筒とする。解析領域はドラムの両側にあるガイドポスト(図5.1参照)からドラムまでの領域を含むテープ巻き付け領域全体とする。

解析における仮定は第4章の場合と同じとする。

- 1) 定常状態とする。
- 2) ドラム表面と磁気テープの表面はそれぞれ平均 $0.04\ \mu\text{m}$ の表面粗さを持つものとし、磁気テープとドラムの隙間は $0.08\ \mu\text{m}$ 以下にはならない。
- 3) 磁気テープは異方性を示す単一材料と仮定し、断面中心は磁気テープの厚さの中央部にあるとする。
- 4) 磁気テープには、その長手方向(送り方向)に張力が均一にかかっている。
- 5) ドラムの径は磁気テープの厚さに比べて十分大きいとし、磁気テープをドラムに巻き付けた初期形状において、初期応力は無視できるものとする。
- 6) 磁気テープの送り速度は $0\ \text{m/s}$ とする。
- 7) 磁気ヘッド及びドラムと磁気テープが2)に記した状態で接触した(すなわち浮上量が $0.08\ \mu\text{m}$ )場合における摩擦はないものとする。また、磁気テープの走行による温度変化は生じない。
- 8) 周囲は大気圧で摂氏 $25$ 度とする。

走行条件として、上ドラムのみが $1800\ \text{rpm}$ で回転し、下ドラムは止まっているものとする。そして上下ドラムは $10\ \mu\text{m}$ の半径差を持ち、上ドラムの半径が $R=31010\ \mu\text{m}$ であるのに対し、下ドラムの半径は $R=31000\ \mu\text{m}$ である。

上ドラムが時計方向に回転すると仮定すると、空気は図5.2(a)(b)に示す固定端側から巻き込まれ、ドラムに沿って流れ、張力側で流出する。そこで、固定端側を入側、張力側を出側と呼び、今後、観測点の位置をドラムの入側からの角度を用いて表現する。

磁気テープの初期形状を、図5.2(b)に示す。磁気テープの長手方向を $x$ 軸とし幅方向を $y$ 軸、これに垂直な方向を $z$ 軸としてモデル化する。磁気テープはドラムに斜めに(ドラム軸に対して $5.58$ 度を成す)巻き付けられているため、上ドラムと下ドラムの境界は $x$ 軸に対して $5.58$ 度傾く(図5.2(b)参照)。

入側で磁気テープが巻き付き始める点Aを0度の点とし、この位置で図5.2 (b)に示すように、磁気テープと上ドラムとは11050  $\mu\text{m}$ 干渉しているとする。入側(点A)及び出側(点B)からポストまでの長さは10000  $\mu\text{m}$ で、磁気テープの初期形状はドラム上では(点AB間)円筒面とし、それ以外の領域では平面とした。図中K-K'は上ドラムと干渉する磁気テープの入側及び出側の等分点を結んだ直線で、5.1.4節ではこの直線上での磁気テープの浮上量について検討する。

### 5.1.2 解析条件

表5.1に解析に用いた磁気テープと空気の物性値、走行条件の値を示す。上ドラムの周速度が $V = 5.8 \text{ m/s}$ ,  $11.6 \text{ m/s}$ ,  $17.4 \text{ m/s}$ の三つの場合について検討した。下ドラムはいずれの場合についても静止しているものとした。磁気テープに作用する張力 $T$ は $T = 15.6 \text{ N/m}$ ,  $23.4 \text{ N/m}$ ,  $31.2 \text{ N/m}$ ,  $39.0 \text{ N/m}$ の四種類について行った。

3種類の周速と4種類の張力を組み合わせ合計12種類の場合について解析し、張力と周速が磁気テープ浮上量に及ぼす影響について調べた。図5.3に解析に用いた境界条件を示す。図5.2 (a), (b)に示した解析モデルを対象とし、磁気テープの送り速度はドラムの周速に対して遅いとしているので、図5.2の解析モデルの入側を固定端として、並進及び回転の全自由度を0に拘束した。すなわち、

$$u=v=w=\theta_x=\theta_y=0 \quad 5-1$$

とした。

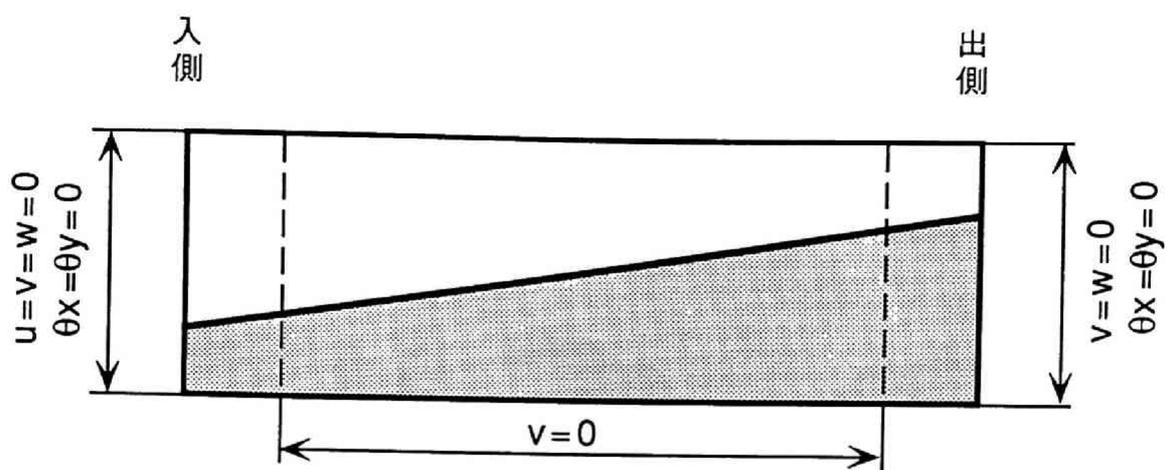
張力を付加した出側の端部は、磁気テープが初期の平面内で張力方向に平行に動き得るとして、 $x$ 軸方向の並進変位 $u$ のみ解放し、次の条件を与えた。

$$v=w=\theta_x=\theta_y=0 \quad 5-2$$

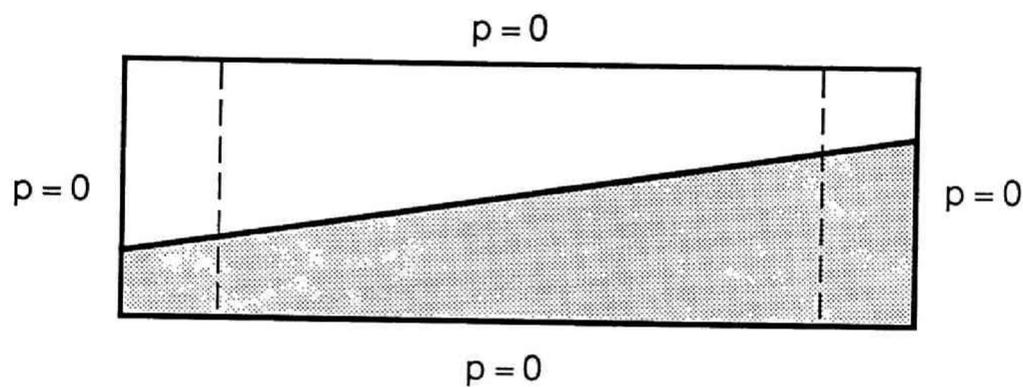
下ドラムには図5.1に示すような、磁気テープのドラム上での幅方向への剛体移動を抑制することを目的とし、段差(リードガイドと呼ばれる)が表面に設けられている。そこで解析においても、このリードガイドにより磁気テープはドラムの幅方向へは剛体移動しないものとし、下ドラム側の磁気テープ側面上の節点について、 $y$ 方向の並進変位 $v$ を

表 5.1 実機解析モデル材料定数と解析条件

Drum speed	5.8 ,11.6,17.4 m/s
Tape tension	15.6,23.4,31.2,39.0 N/m
Tape	
Young's Modulus $E_x/E_y$	6.5 /5.1 GPa
Poisson's ratio $\nu_x/\nu_y$	0.44/0.34
Density	0.24 kg/m <sup>3</sup>
Thickness	18.5 $\mu$ m
Width	12650 $\mu$ m
Air	
Viscosity coefficient	17.9 $\mu$ Pa · s
Mean free path	0.064 $\mu$ m
Ambient pressure	0.10 1 MPa



(a) 変位の境界条件



(b) 圧力の境界条件

図 5.3 境界条件

0とした。

圧力の境界条件（図5.3（b）参照）としては、磁気テープの入側および出側の両端部ではドラムの回転による圧力の影響がない程十分遠いとして、圧力を0にした。磁気テープの側面では、実際にはドラムの回転による斜め吹き出しがあるが、それによる動圧は小さいと考えられ、ここではモデルを簡略化するため圧力を0にした。また、下ドラムは止まっているため下ドラム上での圧力は0とした。

磁気テープの浮上量 $h$ は、ドラムの中心と磁気テープ上の節点を結んだ距離からドラムの半径を引いた値を用いた。

### 5. 1. 3 検証実験

解析結果を検証するために、解析に用いた条件で実験を行った。図5.4に実験装置の概略図を示す。この図のように図5.2に示した解析に用いたと同じ半径 $31010\mu\text{m}$ の上ドラムと半径 $31000\mu\text{m}$ の下ドラムに磁気テープをドラムの回転方向に対して $5.58$ 度傾けて取り付けられている。磁気テープはガイドピンで位置決めされ、下ドラムに設けたリードガイドにより、ドラムの幅方向への並進変位は抑制されている。ガイドピンにはバネが取り付けられており、磁気テープに必要な張力を与えることができる。上ドラムのみ $5.8\text{m/s}$ から $17.4\text{m/s}$ の周速で回転するようになっている。本節での実験は全体解析の検証実験であるので磁気ヘッドは取り付けずに行っている。

浮上量の分布は光マイクロメータで測定した。光マイクロメータを入側から $0$ 度、 $30$ 度、 $60$ 度、 $90$ 度、 $120$ 度、 $150$ 度、 $180$ 度の位置に設置し、ドラムの幅方向に移動させ、幅方向の磁気テープの浮上量分布を測定した。上ドラムには磁気ヘッド取り付け用の穴が開いているが、光マイクロメータによる測定では、磁気ヘッドの取り付け穴の影響がないように、取り付け穴から最も離れた箇所が観測位置に来た時刻に同期して磁気テープの浮上量を測定した。実験に使用した磁気テープは、解析に使用したのと同じ材料定数のものである。

### 5. 1. 4 結果と考察

図5.5に解析に用いた磁気テープの要素分割を示す。磁気テープは前節で示した初期

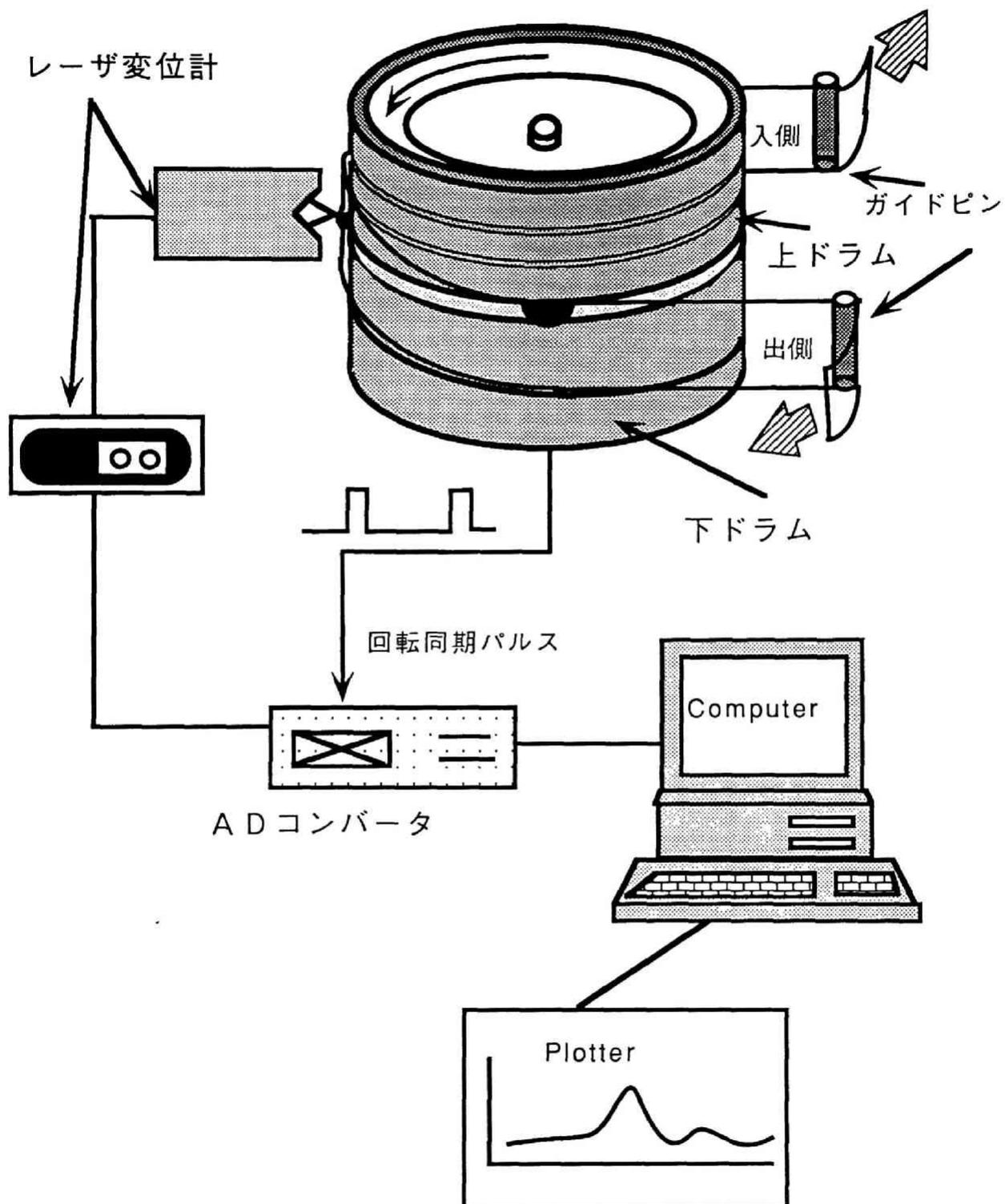


図 5.4 実験装置の概略図

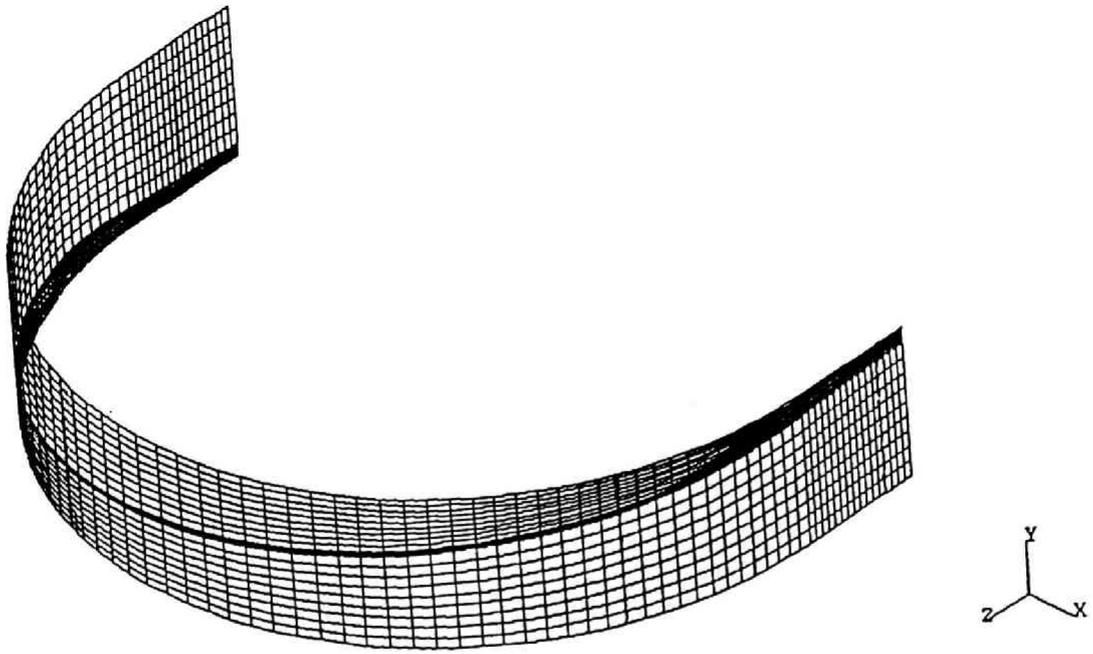


図 5.5 全体モデル要素分割

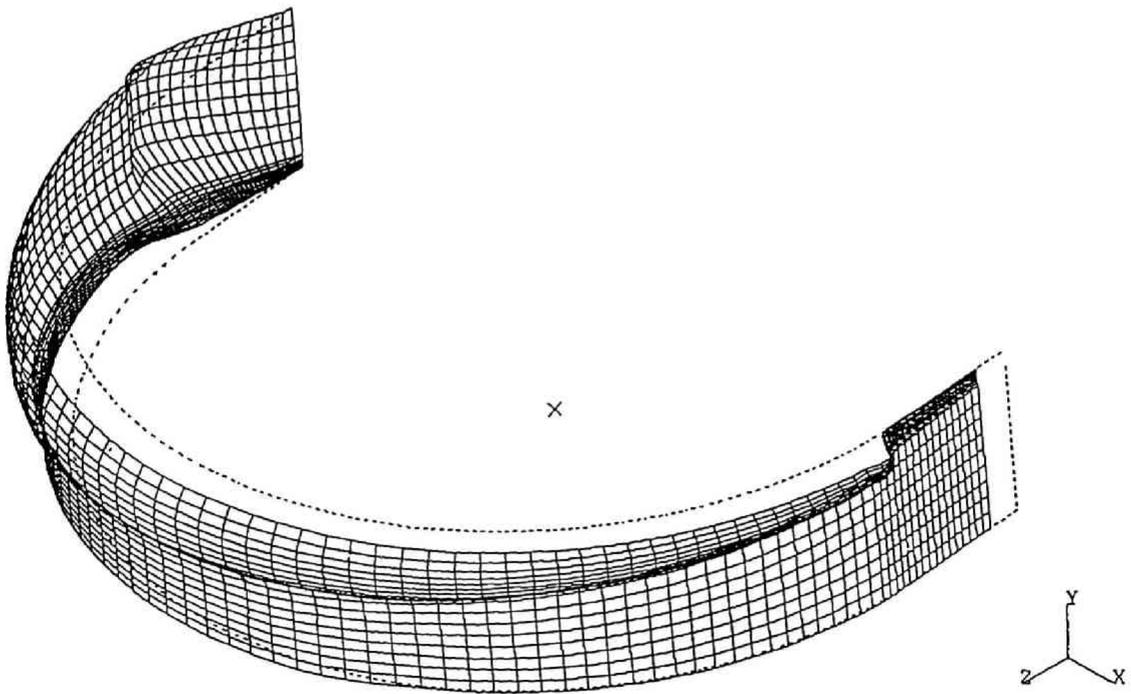


図 5.6 全体モデル解析結果（変形図）

形状を持つものとして解析する。図5.6は周速 $5.8\text{ m/s}$ で上ドラムを回し、張力 $23.4\text{ N/m}$ を与えた時の解析結果を示す。図は解析で得られた磁気テープの変形量をもとに初期の要素分割図を移動させた、磁気テープ浮上の鳥瞰図である。z方向（半径方向）の変形は $20\text{ }\mu\text{ m}$ 程度と小さいため、その傾向が分かるように、z方向には他の方向に対して $100$ 倍程度拡大して示してある。磁気テープは上ドラムの回転により空気層を保持するように浮上し変形する。その変形は上ドラムに沿うように分布していることが分かる。

図5.7は磁気テープ上の圧力分布を示す。圧力は出側に行くほど高くなっている。

図5.8に周速と張力の違いによる、上ドラム上での磁気テープの浮上量の分布の変化の様子を示す。磁気テープは上ドラム上でかまぼこ状に変形する。磁気テープの幅方向における最大浮上箇所は、上ドラム上の磁気テープの中央部であった。そこで、図5.8では、図5.2（b）に示すK-K'線上での磁気テープ浮上量とドラムの周方向位置との関係を示している。図5.8（a）はドラムの周速が $V=5.8\text{ m/s}$ の時、図5.8（b）は $V=11.6\text{ m/s}$ の時、図5.8（c）は $V=17.4\text{ m/s}$ の時の結果を示す。張力を大きくすると浮上量は小さくなり、周速が大きい程、浮上量は大きくなる。張力の影響は入口から $90$ 度までの領域において顕著に現れ、張力の違いによる浮上量の差は角度が大きくなるとともに小さくなり、 $90$ 度以降の領域では、張力の差による浮上量の差はほとんどなくなる。そして、出側に近づくとつれて、張力が高い程、入側とは逆に、浮上量は大きくなっている。これは、角度 $180$ 度の出側での特徴といえる。さらに、入側での浮上量は速度の影響を大きく受け、速度の変化により浮上量が大きく変化するのに対し、出側での浮上量の変化は小さいことが判る。

図5.9は上ドラムと下ドラムの境界線上（すなわち磁気ヘッド取り付け部）における磁気テープの浮上量に対する磁気テープ張力とドラム速度の影響を示したものである。図5.9（a）はドラムの周速が $V=5.8\text{ m/s}$ の時、図5.9（b）は $V=11.6\text{ m/s}$ の時、図5.9（c）は $V=17.4\text{ m/s}$ の時の結果を示す。磁気ヘッドがこの境界に設置されるため、この位置での磁気テープ浮上量分布は磁気記録にとって重要な意味を持つ。下ドラムは静止しており上ドラムのみ回転するため、入側からの角度が大きいところでは、図5.8とは異り磁気テープは上ドラムに接触している。張力が高いほど接触しはじめる角度位置が小さい。

図5.10は3種類のドラムの周速（（a）は $V=5.8\text{ m/s}$ 、（b）は $V=11.6\text{ m/s}$ 、（c）は $V=17.4\text{ m/s}$ ）における入側から $30$ 度ごとの、磁気テープの断面形状を

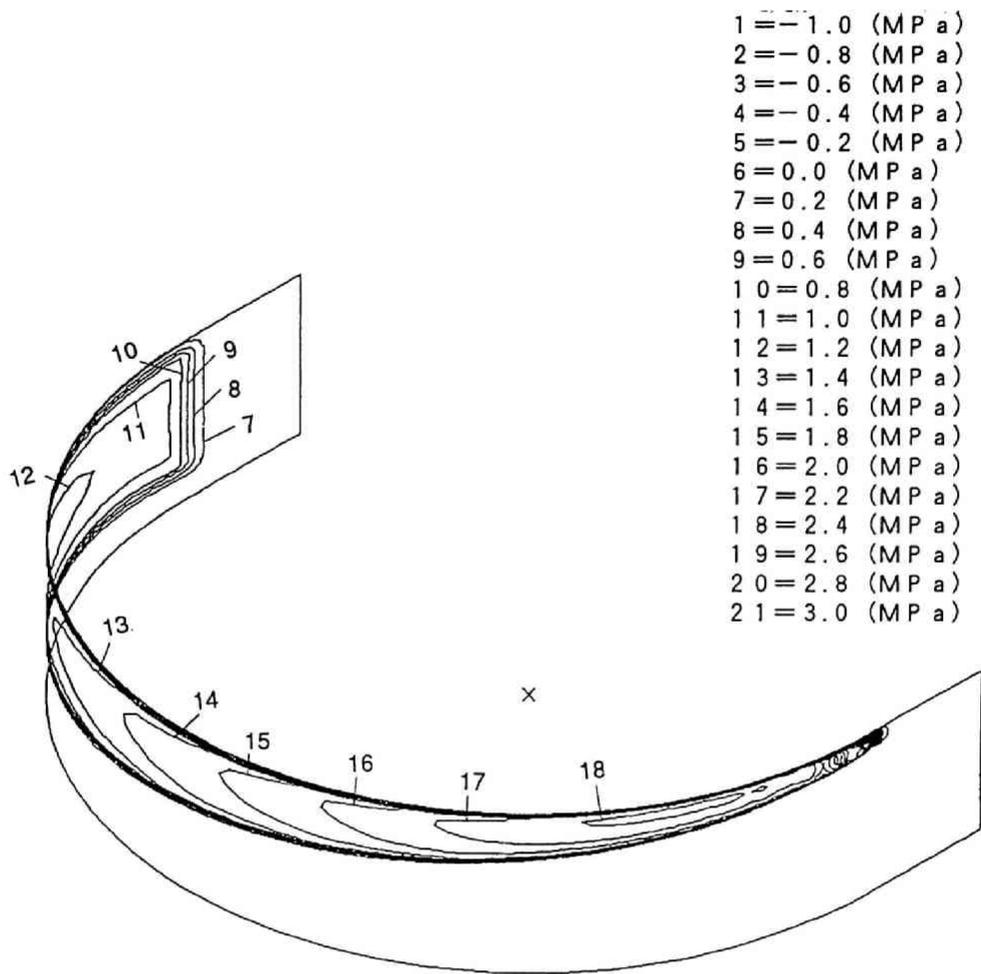
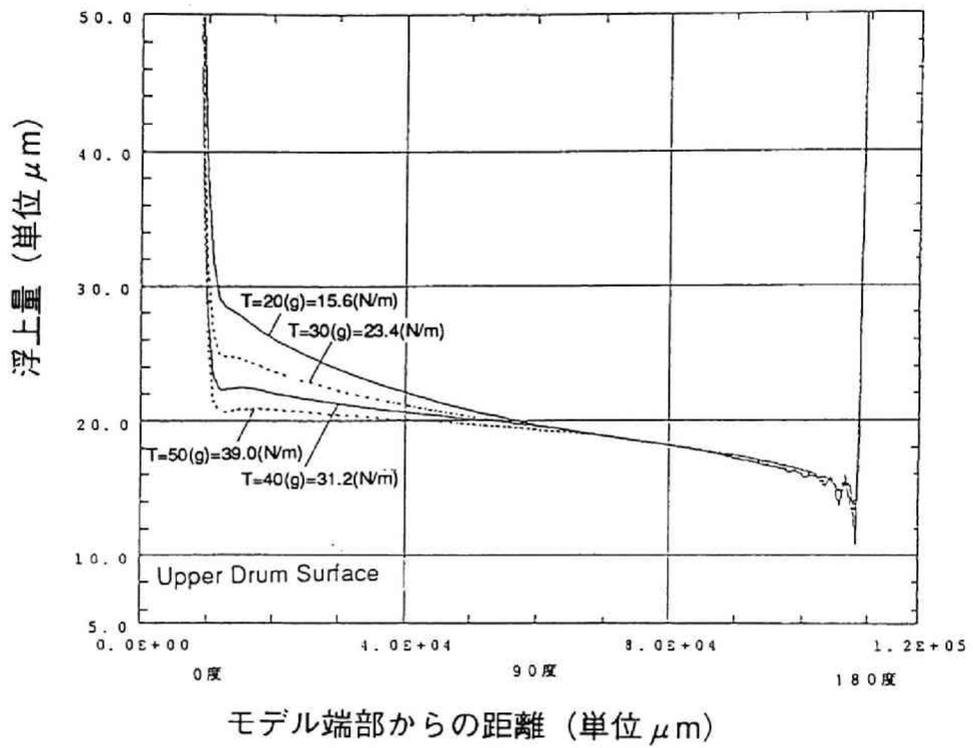
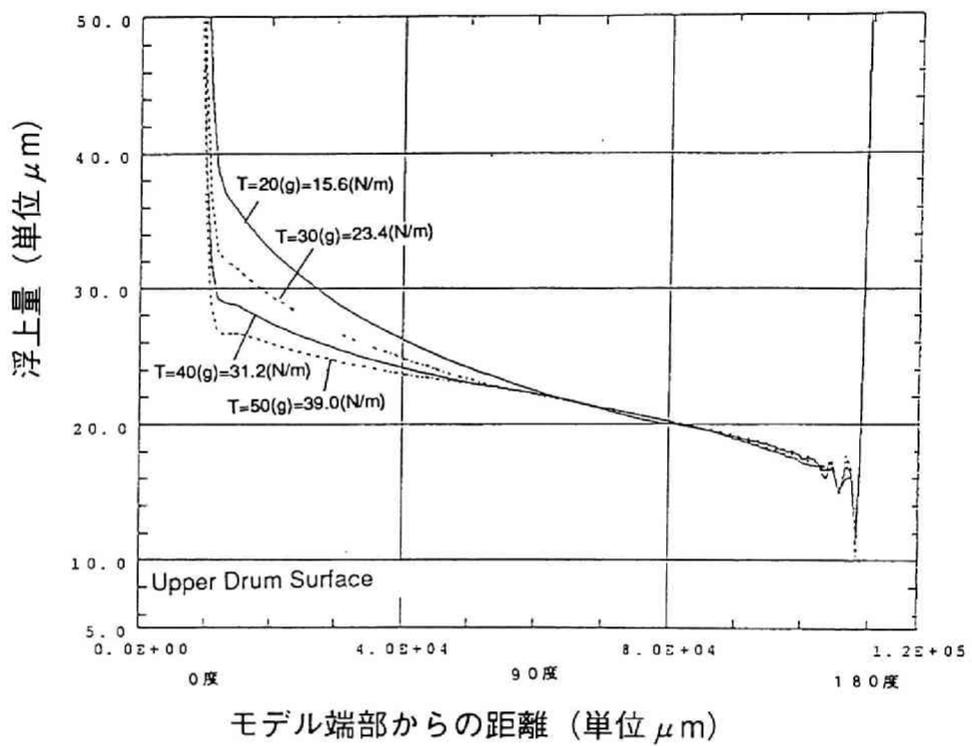


図 5.7 全体モデル解析結果  
 (圧力分布)



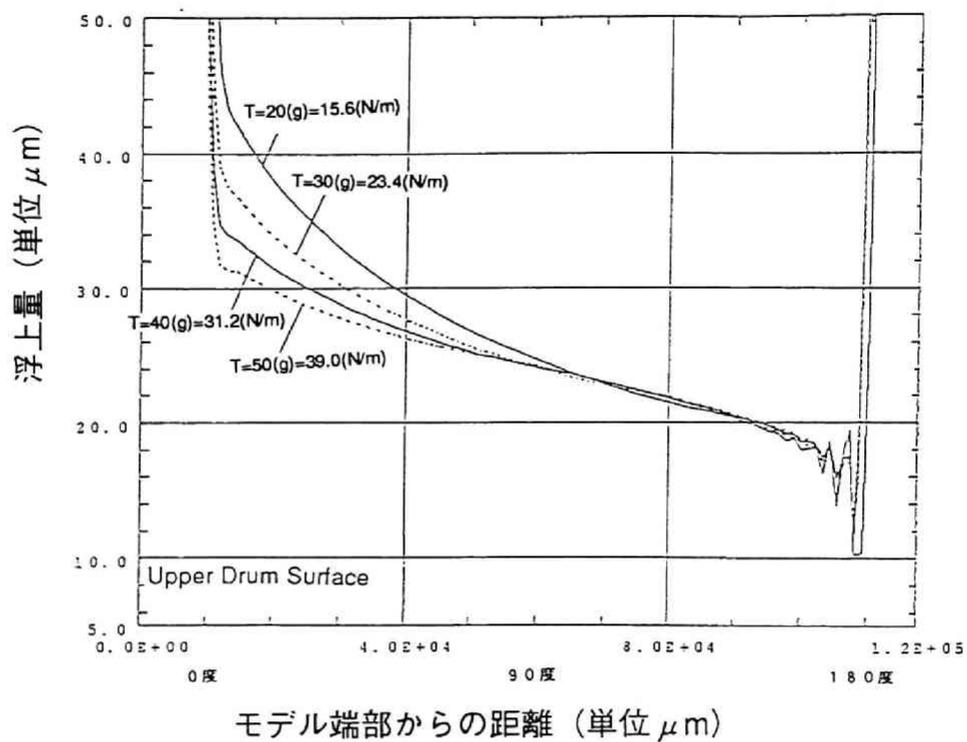
( a ) 5.8 m/s

図 5.8 ドラム周上におけるテープの浮上量分布



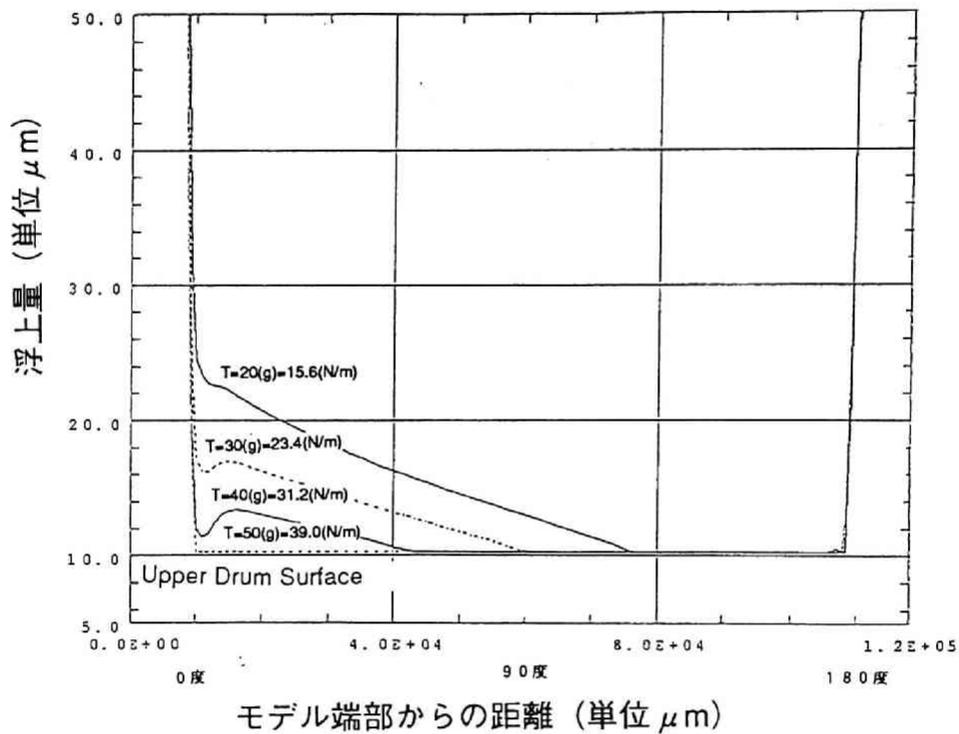
(b) 11.6 m/s

図 5.8 ドラム周上におけるテープの浮上量分布



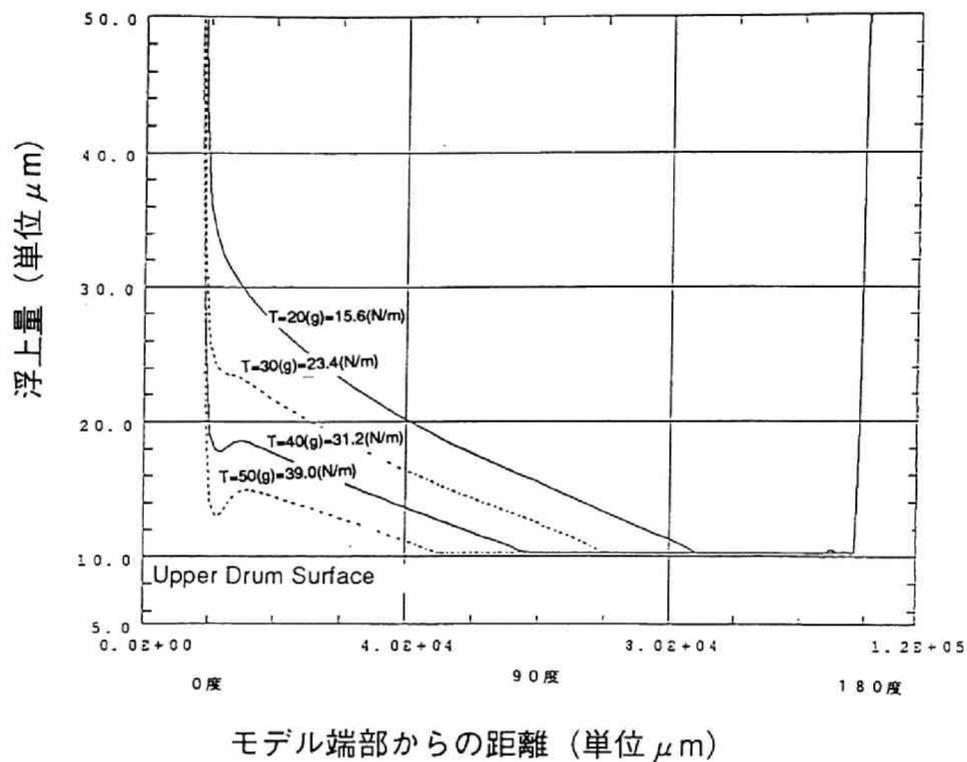
(c) 17.4 m/s

図 5.8 ドラム周上におけるテープの浮上量分布



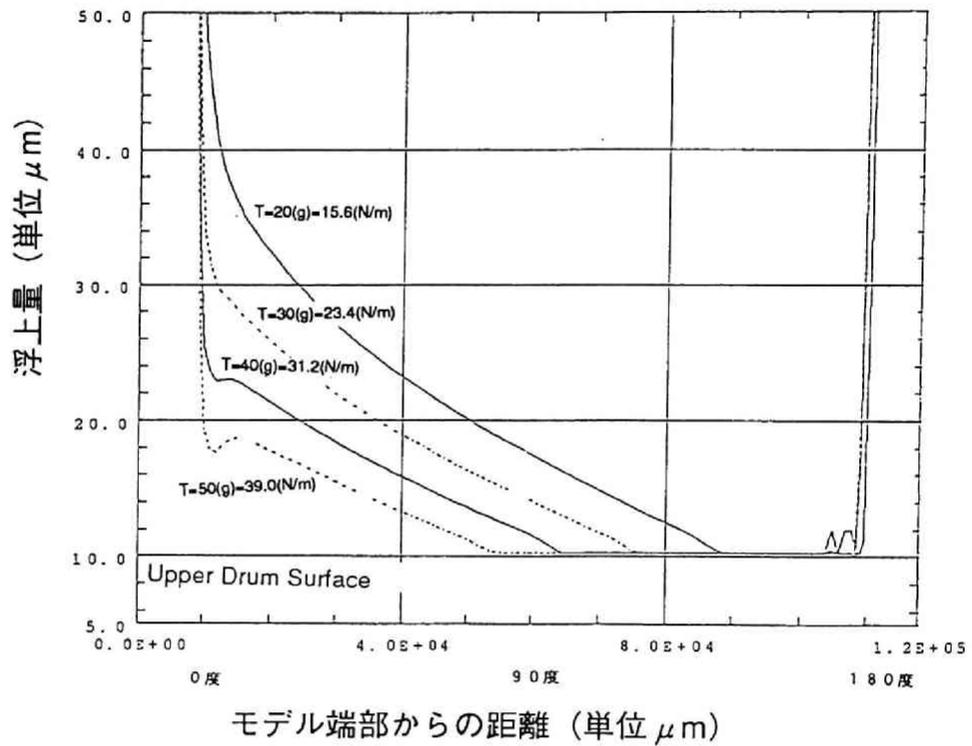
( a ) 5.8 m/sec

図 5.9 速度の違いによるドラムの回転角における浮上量分布 (磁気ヘッド取り付け位置)



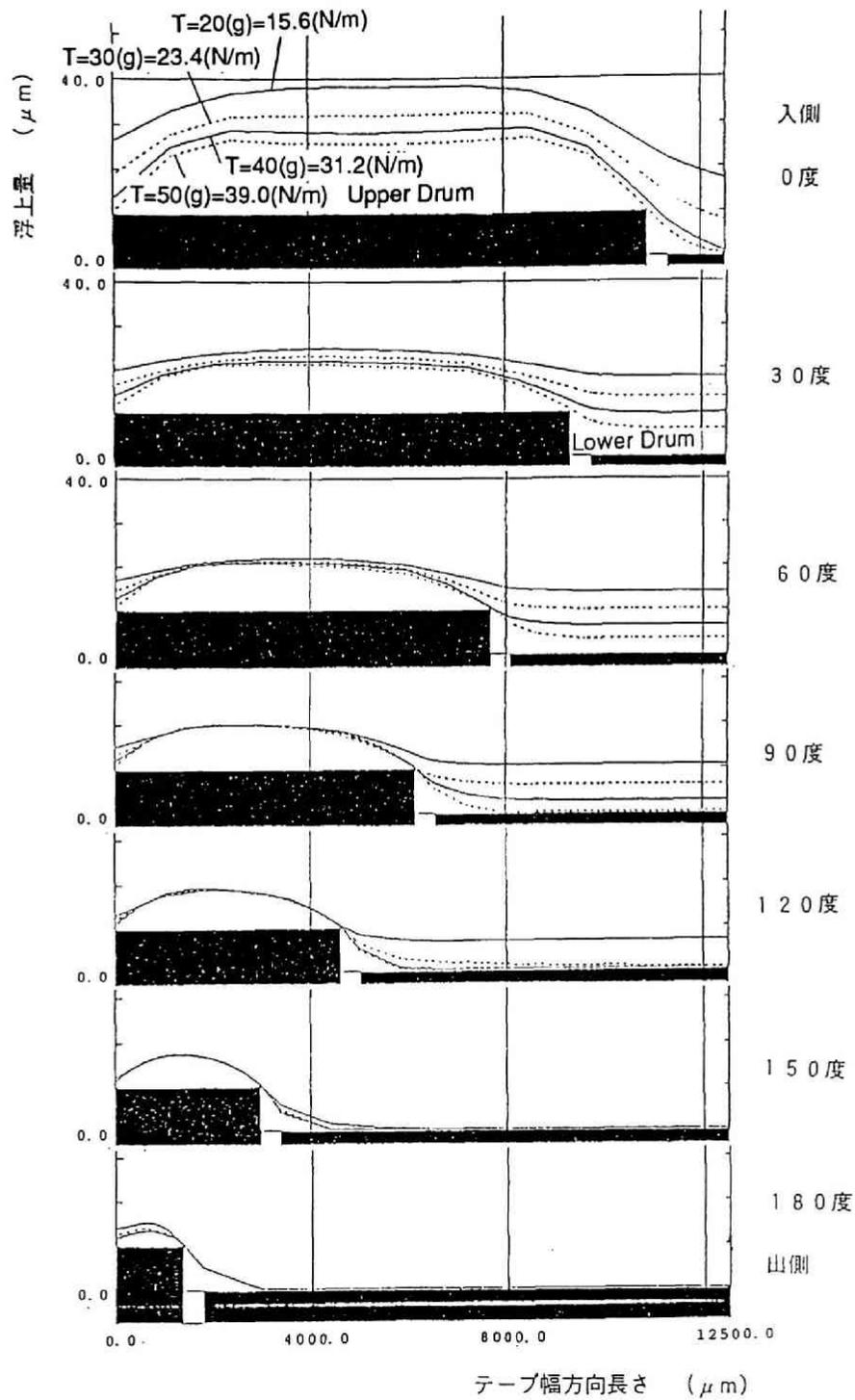
(b) 11.6 m/s

図 5.9 速度の違いによるドラムの回転角における  
 浮上量分布 (磁気ヘッド取り付け位置)



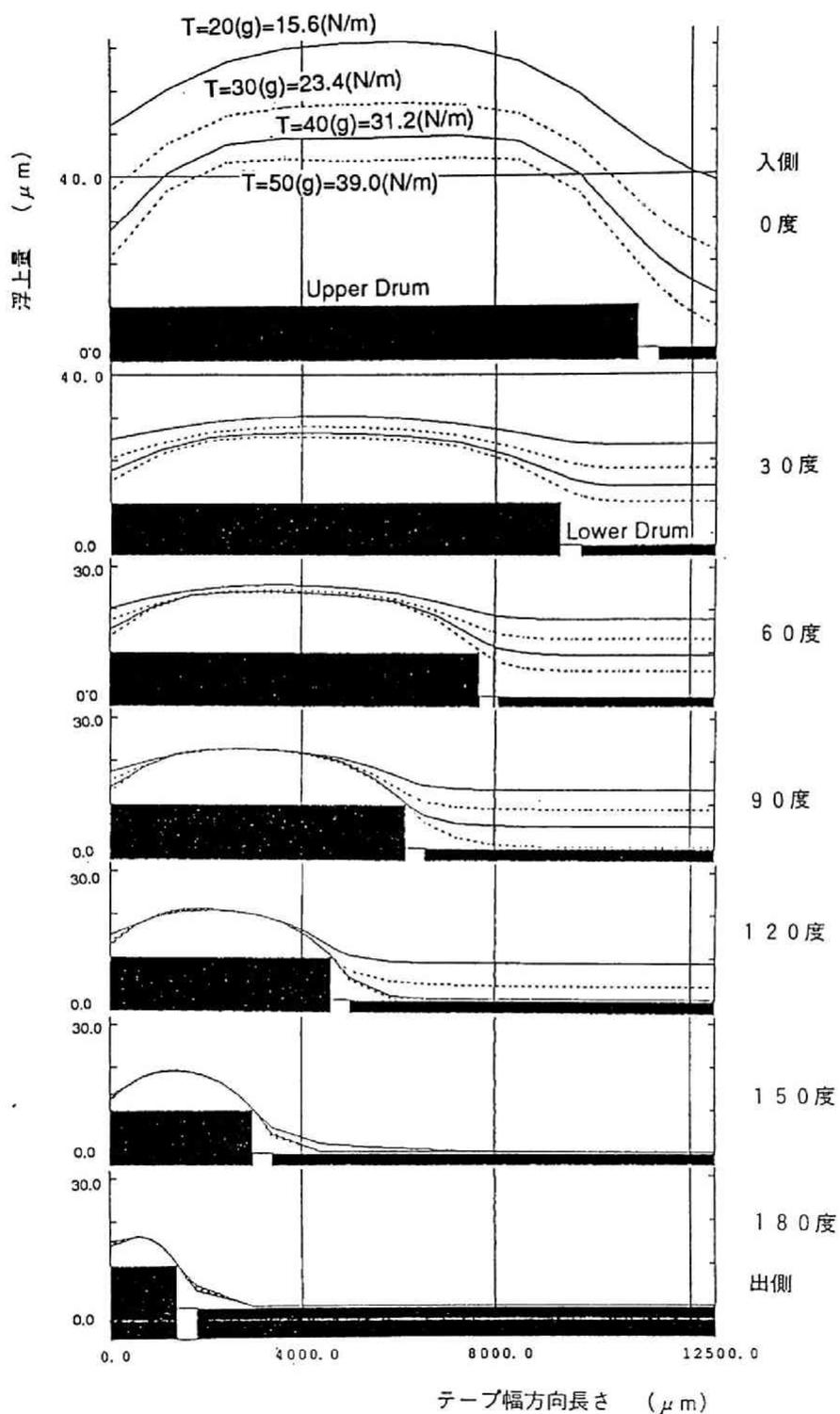
(c) 17.4 m/s

図 5.9 速度の違いによるドラムの回転角における浮上量分布 (磁気ヘッド取り付け位置)



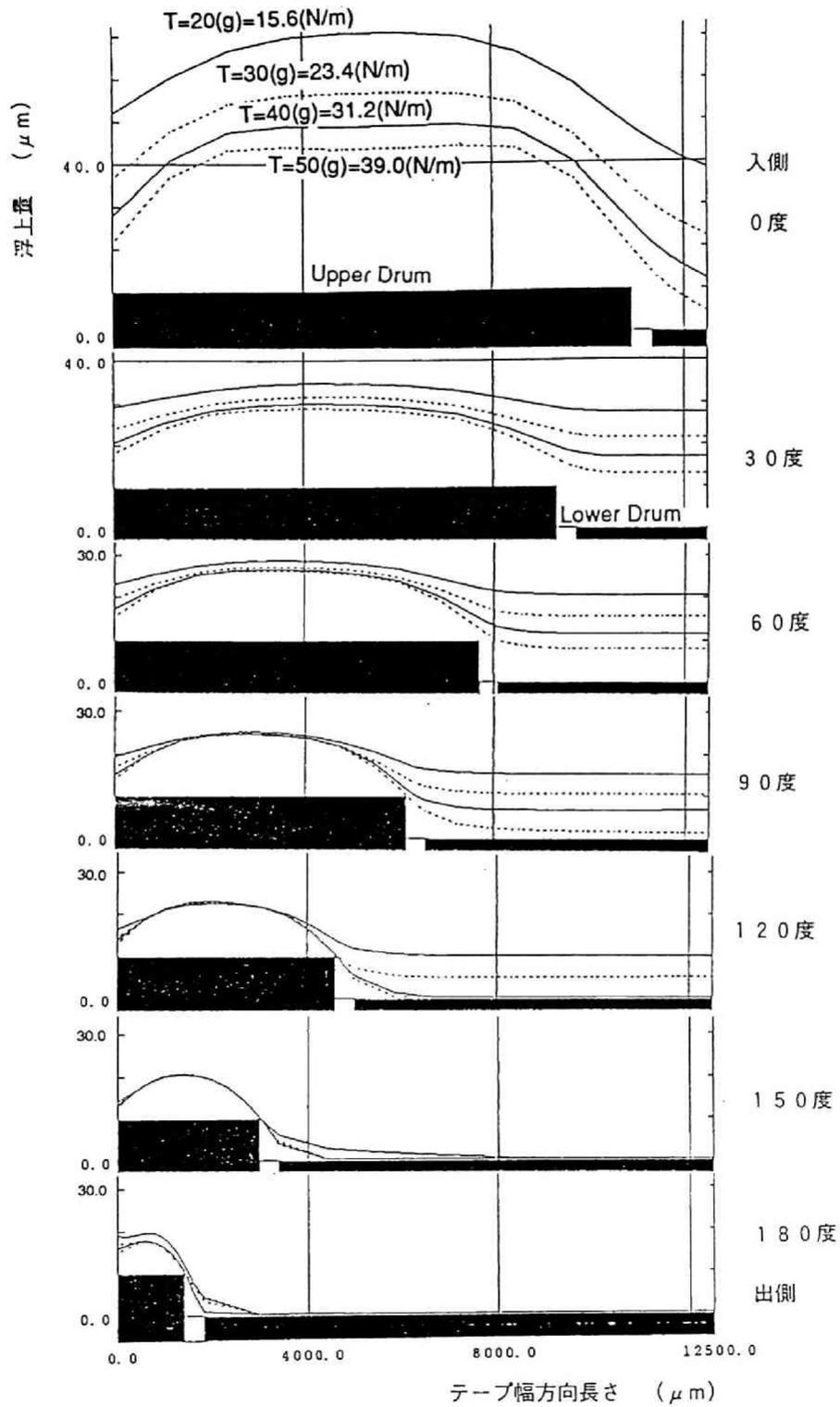
(a) 5.8 m/s

図 5.10 磁気テープの幅方向の浮上量分布



(b) 11.6 m/s

図 5.10 磁気テープの幅方向の浮上量分布



(c) 17.4 m/s

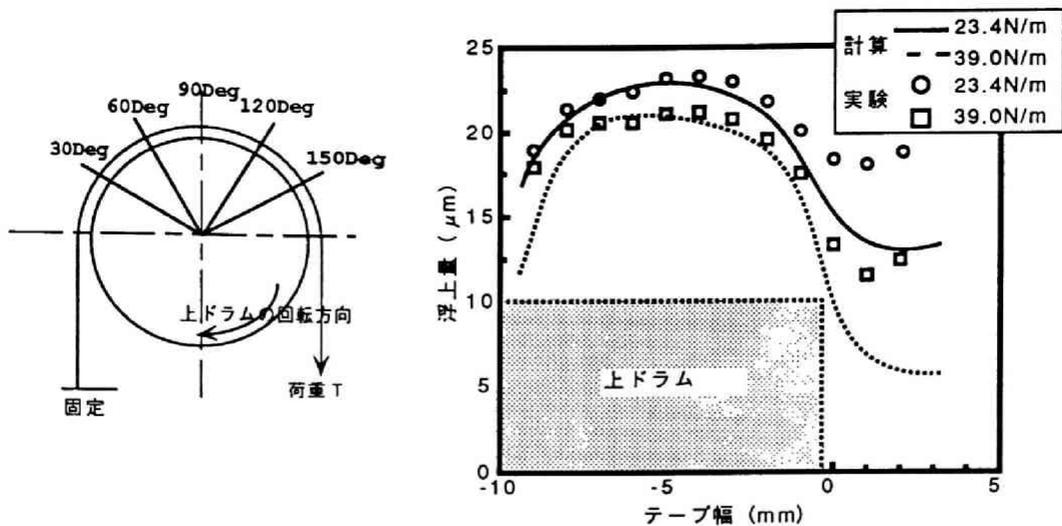
図 5.10 磁気テープの幅方向の浮上量分布

示したグラフである。4種類の張力のいずれの場合にも、入側から60度までは、磁気テープは下ドラム上で浮上しているが、角度が大きくなるにつれ、また張力が高くなるにつれて磁気テープは下ドラムに接触するようになる。また同時に、上ドラムの角に接触するようになる。実機においては、この上ドラムとの接触を減らすことを目的として、上ドラムの角に面取りを設けることがある。この図からも面取りを設けると磁気テープとドラムの接触防止に有効である事が推測される。

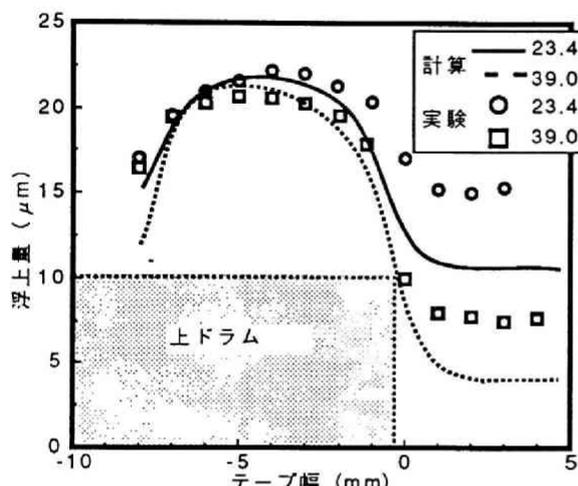
入側から90度を越えた位置から出側までの領域では、張力を変えても最大浮上量はほとんど変わらない。これは上ドラムの角と下ドラムに磁気テープが接触し、その結果、磁気テープにかけられた張力が接触反力及び潤滑膜圧力と釣り合うことによるためと考えられる。

図5.11 (a) ~ (e) に、上ドラム周速 $V=5.8\text{ m/s}$ でテープ張力 $T=23.4\text{ N/m}$ と、 $39.0\text{ N/m}$ の場合の解析結果と実験結果を入側から30度、60度、90度、120度、150度の断面位置でそれぞれ比較した結果を示す。上ドラム上での浮上量は両者でよく一致している。一方下ドラム上でのテープの浮上量はいずれの場合においても解析結果と実験結果は異っている。例えば、150度の角度位置での測定結果において、磁気テープは上ドラムの端から2mmの所で一度下ドラムと接触している。しかし、下ドラムが静止しているにもかかわらず、下ドラムの上の端から2mm~10mmの領域で、 $2.0\text{ }\mu\text{m}$ から $2.5\text{ }\mu\text{m}$ の高さに再び浮上している。同様の現象が張力 $T=39.0\text{ N/m}$ の場合の90度の位置での測定結果と、張力 $T=23.0\text{ N/m}$ の場合の120度の位置での測定結果においても生じている。これは、次のように考えられる。すなわち実験では、定点における浮上量を動的に測定しているが、ドラムの回転により磁気テープは少しの外乱で振動する。磁気テープが振動した場合、静止している下ドラムと磁気テープとの間に空気が閉じ込められスグイズフィルムが生じる結果、下ドラム上でも磁気テープが浮いた状態になったものと考えられる。また、解析ではドラム表面は完全に平坦であると考えているのに対し、実際には $0.05\text{ }\mu\text{m}$ 程度の表面粗さを持っていることにより、実験結果と解析結果には $0.05\text{ }\mu\text{m}$ 程度の差が見込まれ、ここに空気層が保持されと思われその影響が実験結果に現れる可能性がある。今後、理論解析において表面粗さを考慮することが必要であると考えられる。

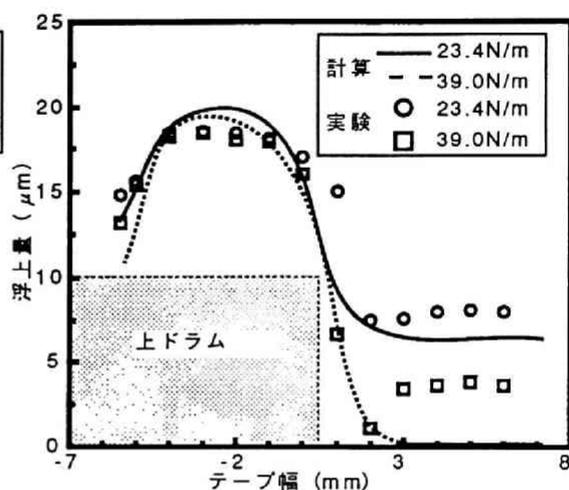
図5.12は入側のガイドピンと出側のガイドピンで測定した磁気テープの荷重(○印で示す)である。入側と出側では磁気テープに作用する張力が異なっている。これは、実



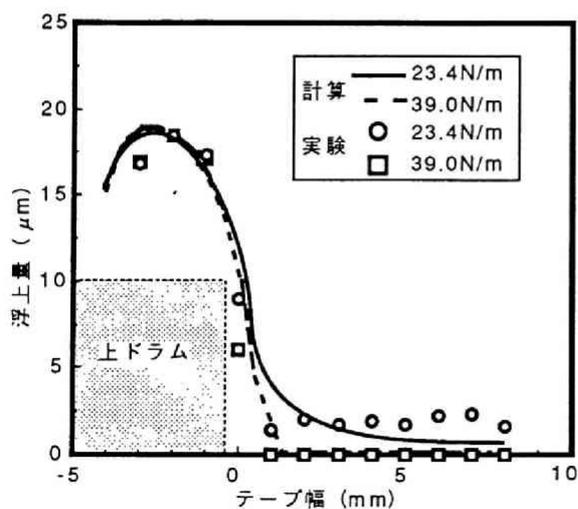
a) 30度位置での比較



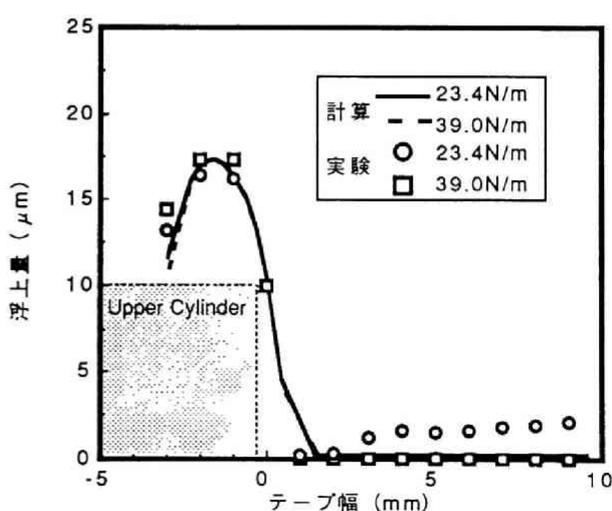
b) 60度位置での比較



c) 90度位置での比較



d) 120度位置での比較



e) 150度位置での比較

図 5.11 5断面における磁気テープの浮上量分布  
 $V = 5.8 \text{ m/s}$

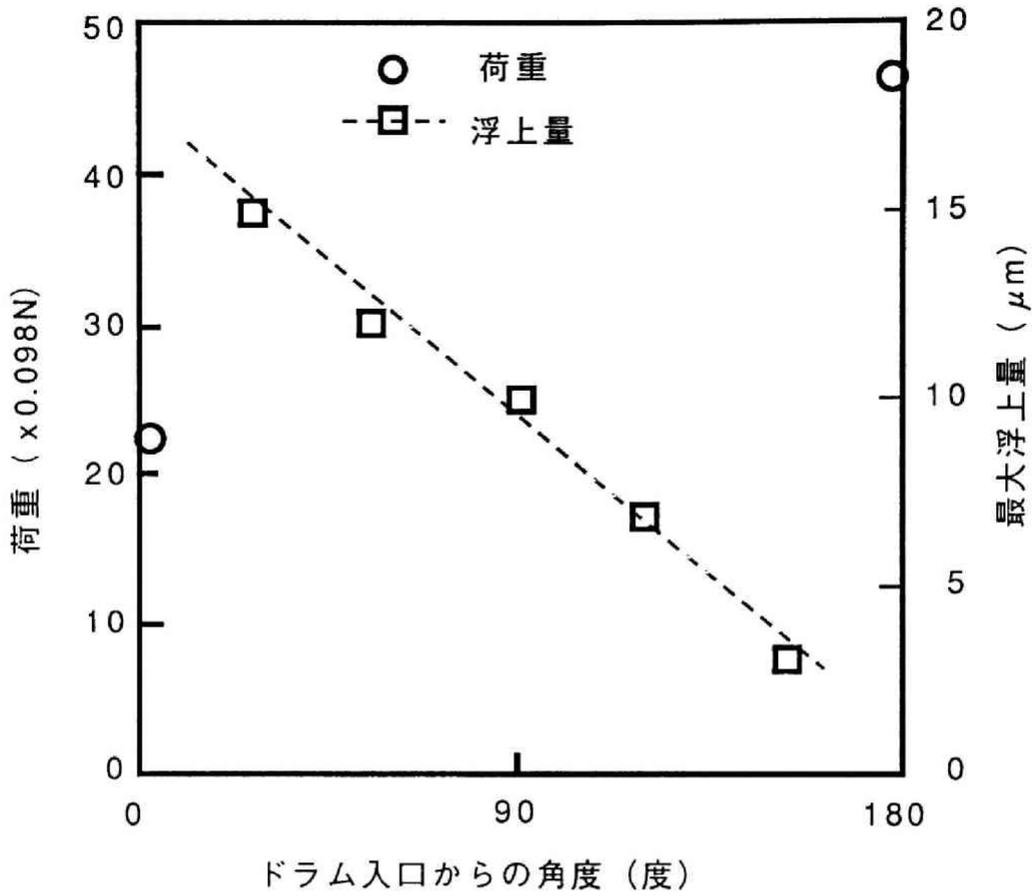


図 5.1 2 テープに作用する荷重及び  
最大浮上量のドラム (周) 上での分布  
( $V = 5.8 \text{ m/s}$ )

験においては磁気テープは33 mm/sで出側に動かしており、下ドラム表面と上ドラムの角に磁気テープが接触すると、異なる方向の摩擦力が磁気テープに作用する。その摩擦力の差により、磁気テープに作用する張力が入側で低下していると思われる。解析では摩擦を考慮していないので、張力としては実験で求めた入側と出側の張力の中間値を用いた。今後、より精度よく解析を行うために摩擦の影響を考慮することが必要であると思われる。図5.12の□印は、ドラムの入口からの角度における磁気テープの最大浮上量を測定した結果である。ドラム上での磁気テープの浮上量は、摩擦がない場合においても、入側で大きく出側で小さくなる。磁気テープに摩擦が作用することにより張力が位置により変化し、磁気テープの最大浮上量分布は入側と出側の間では線形に変化していることが分かる。

上ドラム上の磁気テープの端部（図5.11（a）から（e）の図のそれぞれにおける左端の実験結果と解析結果）において解析結果と実験結果との間には、約5 μm程度の浮上量の違いがある。この原因は次の様に考えられる。解析の際の境界条件で説明したように、磁気テープ側面部において、圧力pを0に固定して解析しているが、ドラムは磁気テープに対して斜めに5.58度の角度を持って回転しており、周速 $V_D$ に対し

$$\begin{aligned} V_y &= V_D \sin \theta \quad ; \theta = 5.58 \text{ 度} \\ &= 5.8 \sin 5.58 = 0.55 \text{ m/s} \end{aligned}$$

で表される磁気テープ幅方向への速度成分 $V_y$ を持っており、その大きさは周速の10%程度である。このため磁気テープの側面部磁気テープとドラムの隙間内の空気の横漏れが助長され、そのような空気の流れによって磁気テープの端が浮く。解析ではこの影響を考慮していないために、磁気テープの浮上量が実験値よりも少なくなるものと思われる。

実験結果と解析結果を比較した結果、全節点における両者の差のRMS (Root Mean Square)は4%であった。

## 5.2 ヘッド近傍部分領域の解析

本節では、前節に示した磁気ヘッドを持たないドラムの上での磁気テープの変形、浮上量の解析結果を利用して、磁気ヘッドを有するドラム上の任意位置での磁気ヘッド近傍の磁気テープの変形および浮上量の解析を行う方法を示す。そして、解析結果を実測結果と

比較しその有効性について検討する。

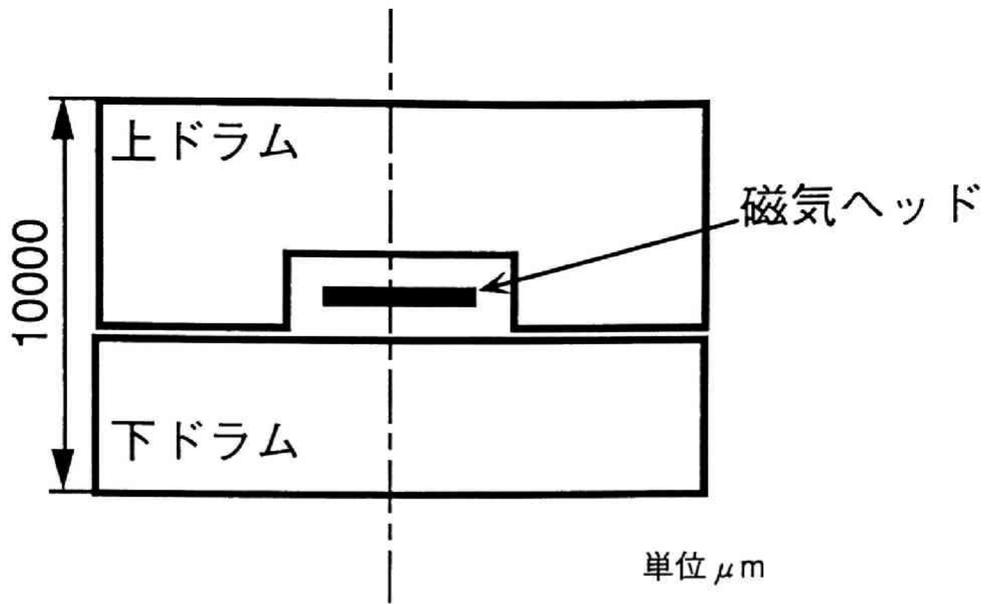
### 5. 2. 1 解析対象領域

図5.13に本節で対象とするヘッド近傍の解析対象領域を示す。図5.13(a)はドラム側面から見た解析領域における上ドラムと下ドラム及び磁気ヘッドの関係である。磁気ヘッドは上ドラムに取り付け穴を設けて取り付けられてあり、上ドラムと共に回転する。磁気ヘッド中央における断面形状を図5.13(b)に、そして上ドラムと下ドラムの境界面における断面形状を図5.13(c)に示す。全体領域から切り出した部分領域として、磁気ヘッドを中心とする30度の領域を対象とし、磁気テープの幅方向についても磁気テープ幅よりも狭い領域を対象とする。すなわち、部分領域として任意の小領域を選択することになる。これは、将来一箇所に複数個の磁気ヘッドを設けた場合のように、解析領域が複雑になった場合、解析に必要な計算機資源が大きくなるという問題が生じると考えられる。部分解析領域として、任意の領域の選択が可能であれば、計算機資源と解析精度から判断して、最適な解析領域を決定することが可能となるためである。ドラムの全体領域との幾何学的な関係を図5.14に示す。

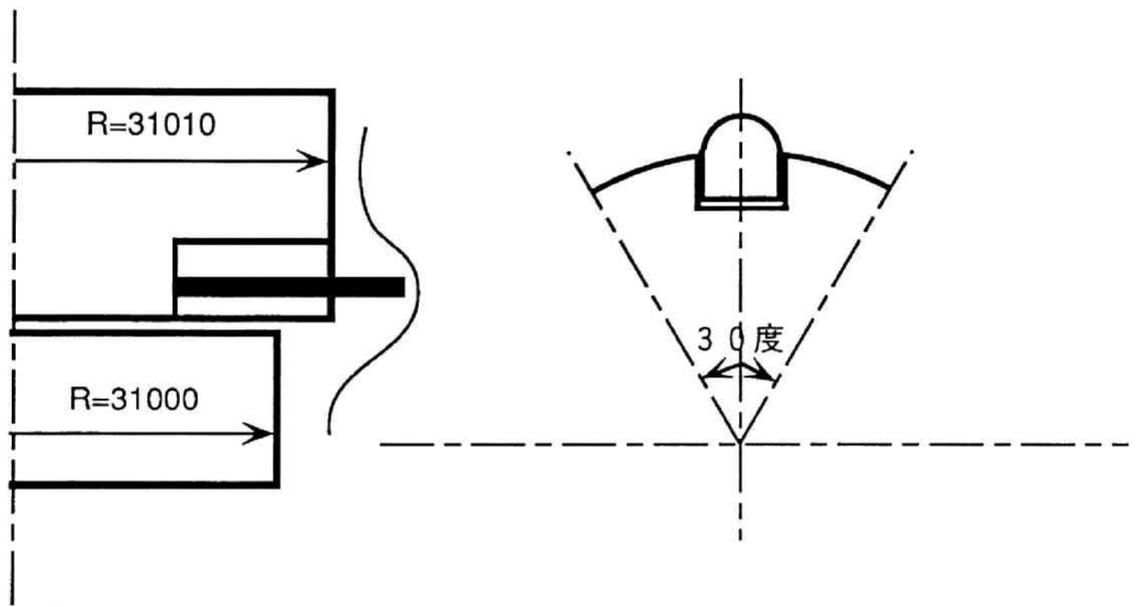
### 5. 2. 2 解析条件の設定

部分領域の解析を行う場合の解析条件としては、各種材料定数と磁気ヘッドやドラム等の幾何学的条件の設定に加えて、境界条件と磁気テープの初期形状及び潤滑膜の初期圧力分布が必要である。第5.1節の全体領域の解析の場合には、変位に関しては、磁気テープの端部の条件として、固定端と張力を加える荷重端及び、磁気テープの側面についてはドラム上での剛体移動を止め、さらに圧力に関しては、側面において潤滑膜圧力が大気圧になると言う条件を付加することで解析できた。しかし、磁気ヘッド近傍の領域を全体から切り出した場合、その幾何学的な関係は図5.14に示したようになり、部分領域の解析において必要な磁気テープの変形及び潤滑膜圧力の境界条件は、部分領域がドラムのどの位置にあるかで異なる。すなわち、部分領域の解析に必要な変位と圧力の境界条件を全体領域の解析結果より算出することが必要になる。

図5.15に全体領域解析要素と磁気ヘッド近傍部分領域解析要素の幾何学的な関係を



(a) ドラム側面



(b) 断面図

(c) 正面図

図 5.1 3 磁気ヘッド近傍解析モデル

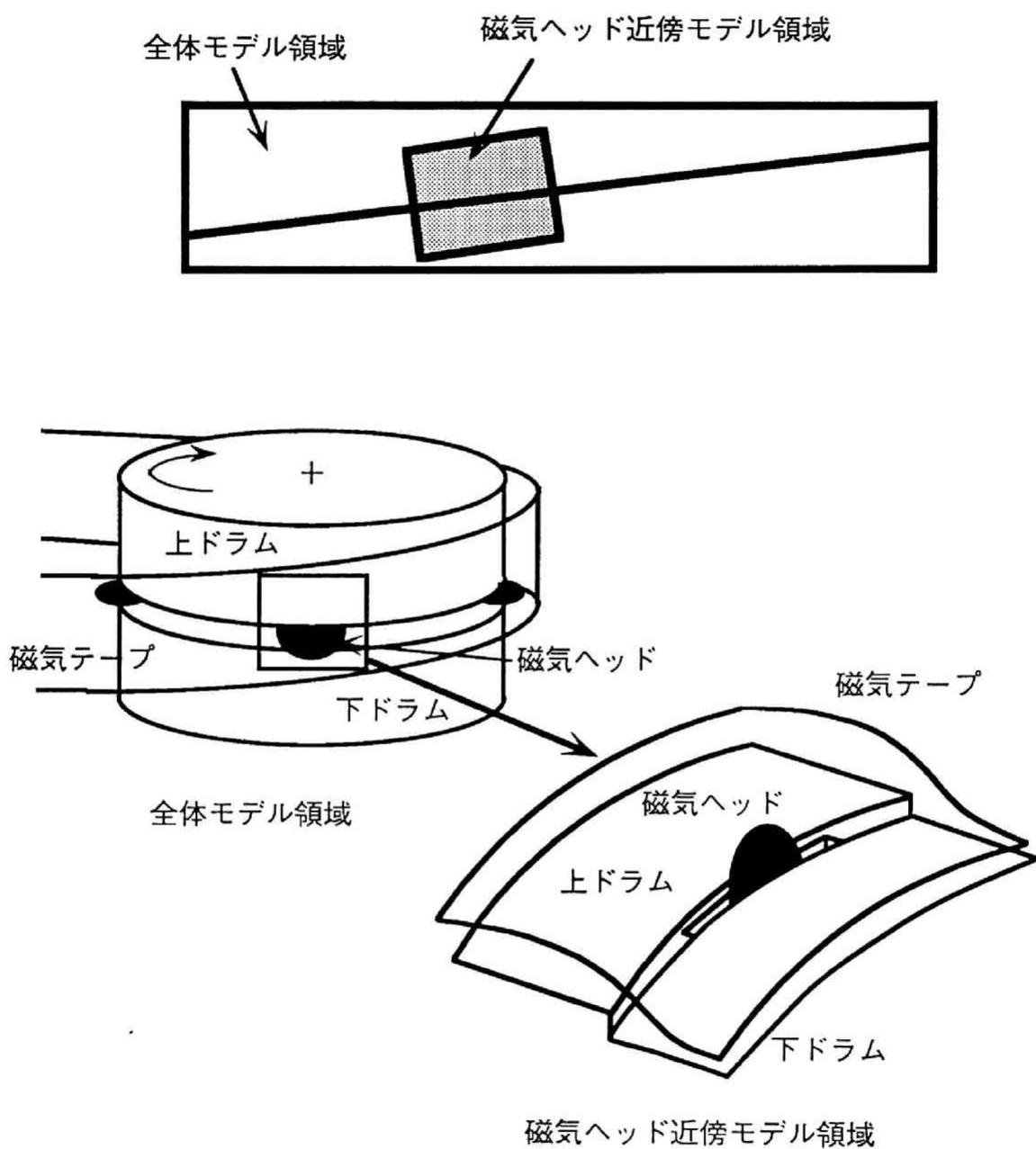


図 5.1 4 全体モデルと磁気ヘッド近傍モデルの幾何学的関係

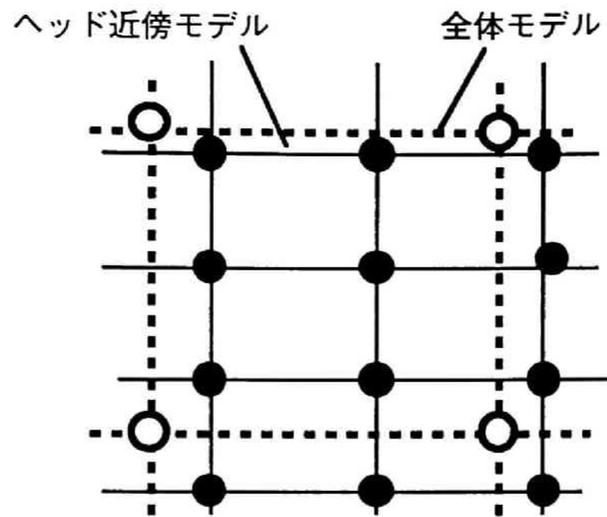


図 5.1 5 全体領域解析要素と磁気ヘッド近傍解析要素における要素と節点の関係

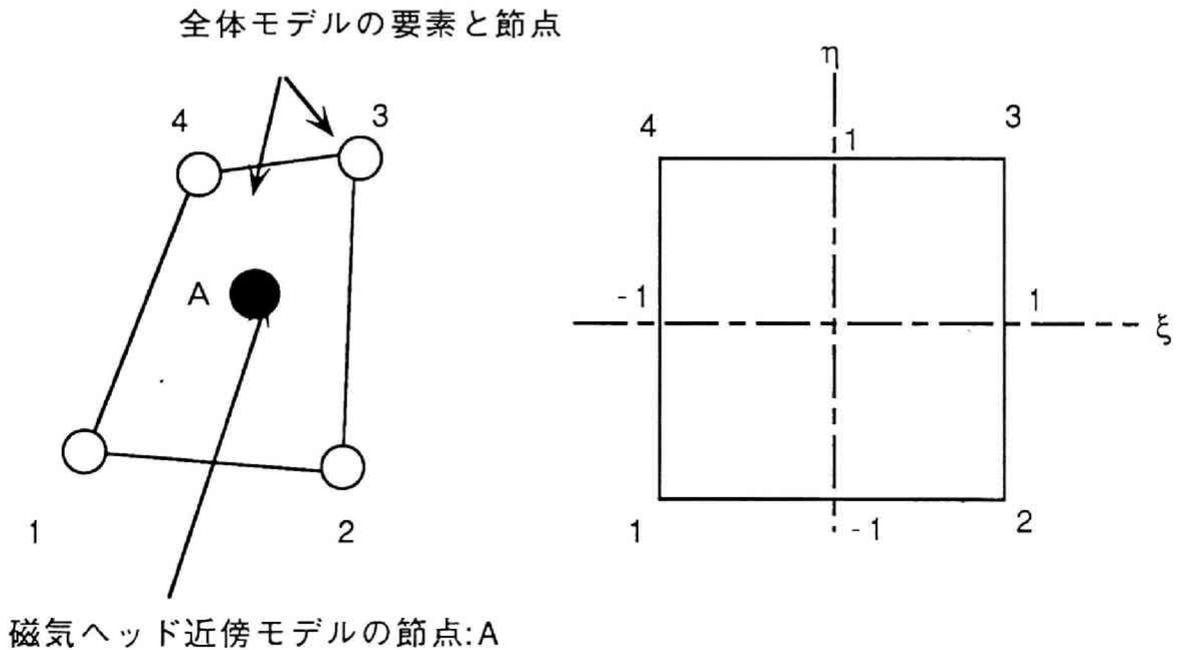


図 5.1 6 変数を要素内で内挿

示す。実線で示してある領域が磁気ヘッド近傍部分領域の解析要素で、破線は全体領域の解析要素に対応する。このように両者の節点は初期状態において異なり、かつ全体領域の解析の結果、全体領域の要素及び節点は複雑に変形し移動している。図 5.15 の全体領域の一要素に着目し、全体領域の解析の結果、要素は図 5.16 に示すように変形したとする。白丸印は全体領域の解析の節点であり、これらで構成される要素の中に部分領域(磁気ヘッド近傍モデル内)の節点 A があるとして、その点 A における部分領域解析に必要な磁気テープの初期変形量及び潤滑膜圧力を算出する方法を以下に示す。

解析要素として一次のアイソパラメトリック四辺形要素を用いた場合、その内挿関数を  $N_i$  とする。初期の浮上量  $h$  及び圧力  $p$  を全体解析の要素における各節点での変形量  $h_i$  と圧力  $p_i$  と内挿関数により次式で定義する。

$$h = \sum_{i=1}^4 N_i h_i, \quad p = \sum_{i=1}^4 N_i p_i, \quad 5-2$$

$$N_1 = (1-\xi)(1-\eta)/4, \quad N_2 = (1+\xi)(1-\eta)/4,$$

$$N_3 = (1-\xi)(1+\eta)/4, \quad N_4 = (1+\xi)(1+\eta)/4,$$

ここで、 $\xi$  と  $\eta$  は注目している全体解析要素の要素座標系である。 $h$  及び  $p$  は部分解析領域の節点 A における変位と圧力であり、 $h_i$  及び  $p_i$  として全体解析によって求められた値を用いることによって、部分領域の解析が可能となる。すなわちこの関係を用いて求めた変形量及び圧力を初期条件として与えると同時に、磁気ヘッド近傍解析領域の境界では、これを境界条件として利用することにより、磁気テープがドラム全体に掛かり浮上、変形した場合の、磁気テープの変形及び磁気テープに作用する境界圧力分布と張力分布を磁気ヘッド部分領域解析に取り入れることができる。

5-2 式を用いて磁気テープの変形と潤滑膜圧力に関する境界条件が全て決まるため、磁気テープの変形の釣合方程式(2-4 式, 2-5 式)において外力が 0 となり、強制変位問題となる。すなわち、解析には、2-4 式と 2-5 式の代わりに、次に示す 5-3 式, 5-4 式を用いる。

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0 \quad 5-3$$

$$\frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} = 0$$

全体領域解析の結果から、部分領域を解析する処理のフローを図5.17に示す。

### 5.2.3 解析条件

解析に使用したドラムの形状は、第5.1節で述べた解析条件で用いたものと同じである。上ドラムは半径 $R = 31010 \mu\text{m}$ で、下ドラムは半径 $R = 31000 \mu\text{m}$ である。磁気テープは図5.2に示すようにドラムに回転方向と5.58度傾けて取り付けられているとする。部分領域と全体領域の関係を、図5.18及び図5.19に示す。磁気ヘッドが入側から30度、90度、150度、時計回りに回転した位置に来た状態での磁気ヘッド近傍を解析の対象領域とする。すなわち解析領域は、磁気テープの長手方向がドラムの入側から30度、90度、150度の点を中心とした前後15度の領域である。

実際の磁気テープの幅は12.65mmであるが、部分解析では前述したように磁気テープの幅よりも小さな領域とし、 $10000 \mu\text{m}$ とした。解析に用いた磁気ヘッドの形状は、長手方向の曲率半径は13.1mmで幅方向の曲率半径は2.9mmとし、回転楕円体で近似した。また、磁気ヘッドの長さは3mm、幅は0.16mmとし、さらに、磁気ヘッドは上ドラムの表面から $45 \mu\text{m}$ 突き出しているものとした。解析に使用した磁気テープの材料定数および空気に関する各定数は表5.1と同じである。

図5.17に示した処理フローに従って、全体解析で求めた磁気テープの全体変形量と浮上量および潤滑膜圧力分布を用いて境界条件を算出し、部分領域の磁気テープの変形と浮上量および圧力分布を求めた。磁気ヘッド取り付け穴内部の圧力は0とした。

### 5.2.4 検証実験

解析結果の検証を目的として、磁気テープをドラムに斜めにかけて、上ドラムのみ回転させて下ドラムを静止させて、磁気ヘッド近傍における磁気テープの変形形状と浮上量を測定した。磁気ヘッドは、第5.1.3節で用いた上ドラムにドラム表面より $45 \mu\text{m}$ 突き出して取り付けられた。磁気ヘッドの形状は、解析に用いたものと同じ形状である。ドラムを解

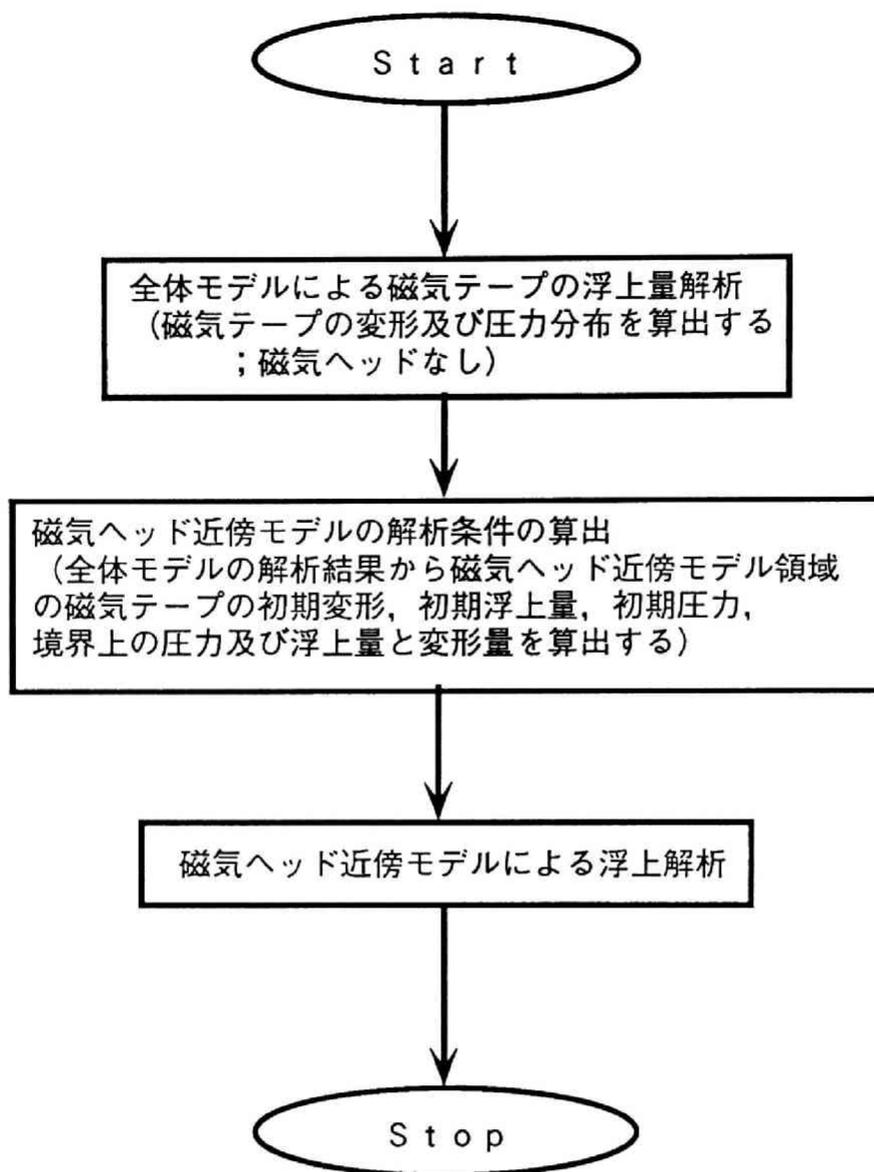


図 5.1 7 部分領域解析の処理フロー

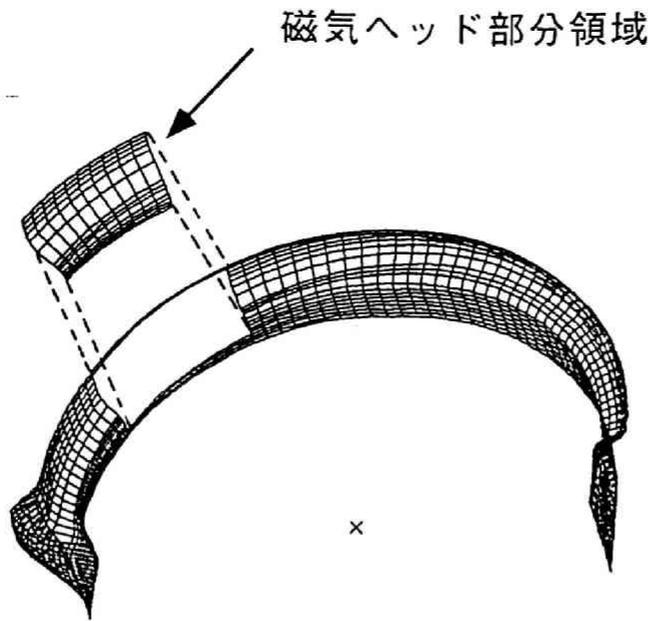


図 5.1 8 全体領域と磁気ヘッド部分領域の関係

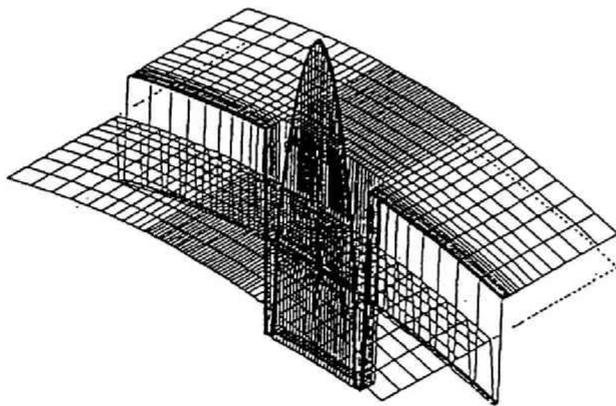


図 5.1 9 磁気ヘッド近傍モデル対象領域

析における条件と同じ条件で回転し、磁気テープに  $23.4 \text{ N/m}$  の張力が幅方向にできるだけ均一になるように負荷した。磁気テープの変形形状の測定は、全体解析に対する検証実験における磁気テープの変形形状の測定方法と同様に、光マイクロメータを用いて行った。磁気ヘッド通過時の磁気テープの変形を測定するために、磁気ヘッドの測定点の通過に同期して、一定時間の浮上量変化を測定し記録した。その測定結果をもとに、時間軸に対する磁気テープの変形形状と浮上量を算出した。また、光マイクロメータをドラムの幅方向に移動し幅方向での浮上量分布を測定した。幅方向の磁気テープの変形形状を時間経過に従って測定し、時間軸を周速をもとに距離に変換すると、3次元の変形形状を得ることができる。図5.20に測定結果の一例を示す。図5.20(a)は磁気テープの変形形状を等高線で表示したもので、一本の等高線の間隔は  $5 \mu\text{m}$  である。図5.20(b)は測定点における磁気テープの変形量 (Z軸) の時間変化 (X軸を時間軸) を測定し、さらに測定点を磁気テープの幅方向に移動して得た一連の変形量と時間変化の関係を、磁気ヘッドの回転周期に合わせて整理した結果である。すなわち、この図は磁気テープの変形形状の鳥瞰図であると言える。ここで、X軸 (時間軸) は回転方向、Y軸 (測定位置) は幅方向そしてZ軸は変形量である。図5.20(c)は入側から  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $150^\circ$ ,  $180^\circ$  の位置での磁気ヘッド中央断面における幅方向の磁気テープ変形形状である。また、図5.20(d)は入側から  $90^\circ$  の位置での、磁気ヘッド中央における長手方向の磁気テープの変形形状である。

### 5.2.5 解析結果と考察

図5.21に磁気ヘッド近傍領域解析に用いた要素分割を示す。図5.22(a)は、全体解析の結果から部分領域の各節点における磁気テープ変形量を5-2式によって求めた結果をもとに、各節点をその値で移動させたものであり、図中の点線は移動させる前の形状を表している。図5.22(b)は潤滑膜圧力分布の等高線であり、磁気テープ変形量と同様に5-2式より求めた結果である。この結果を初期及び境界条件としてこの部分領域の解析を行う場合、全体領域解析では磁気ヘッドを考慮していないために磁気ヘッドの部分で磁気テープは磁気ヘッドの頂点よりも低い位置に浮上していることになる。そこで解析の初期形状としてさらに磁気ヘッドの表面より  $0.2 \mu\text{m}$  浮上した位置まで変形量を増加させた。このとき、磁気テープの境界ではヘッドの突き出し量の分だけ応力が増加し、

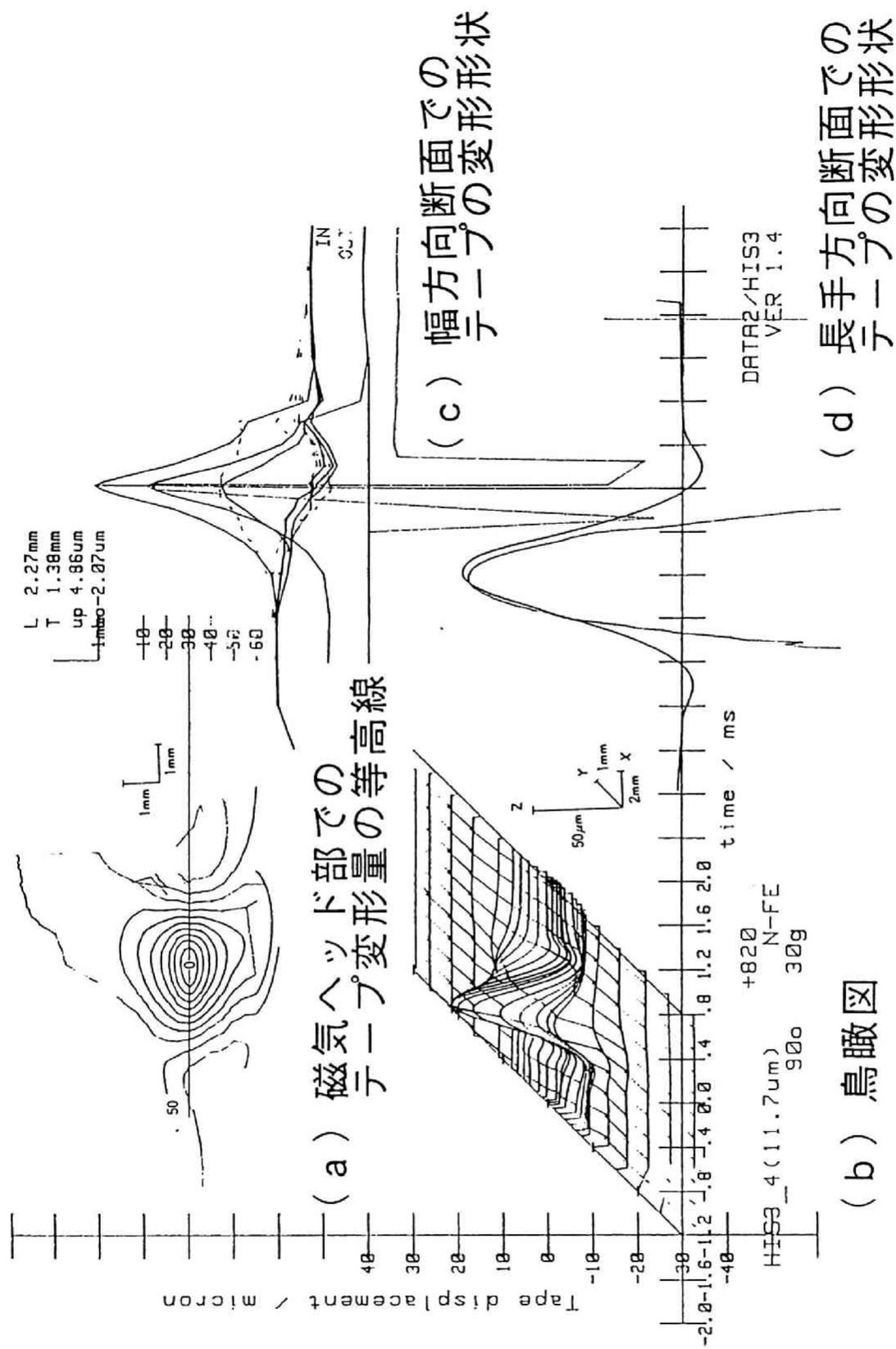


図 5.2.0 3次元変形形状測定例

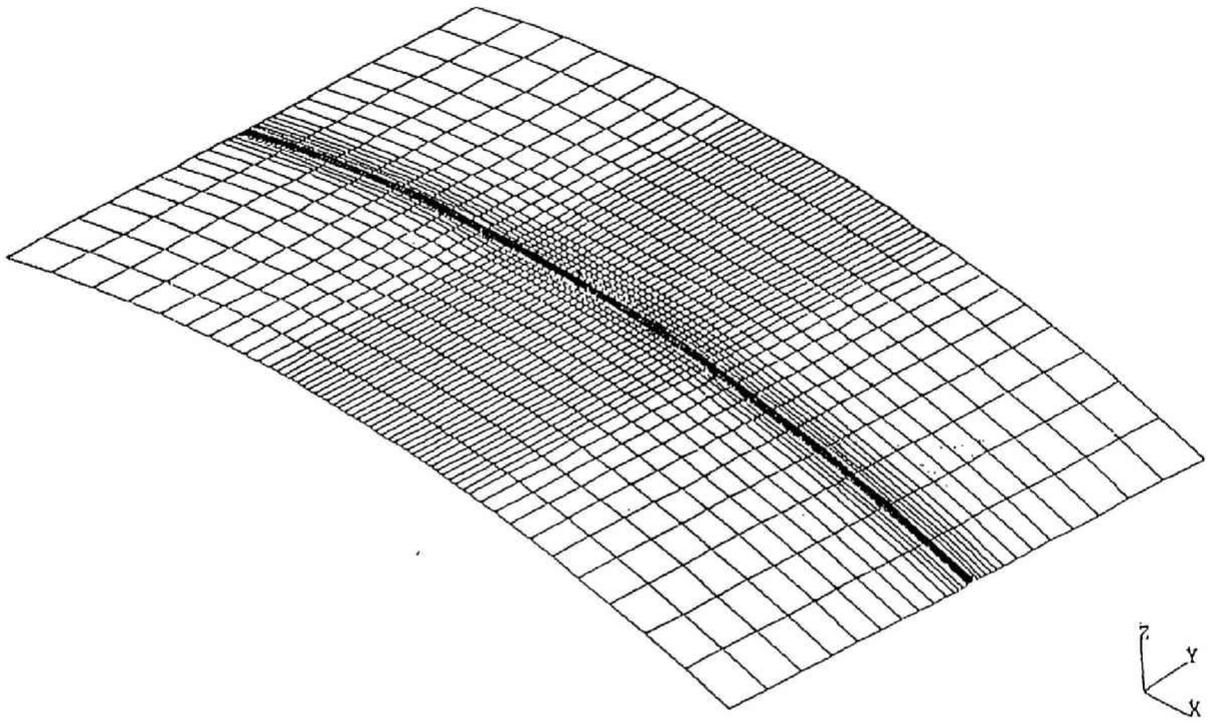
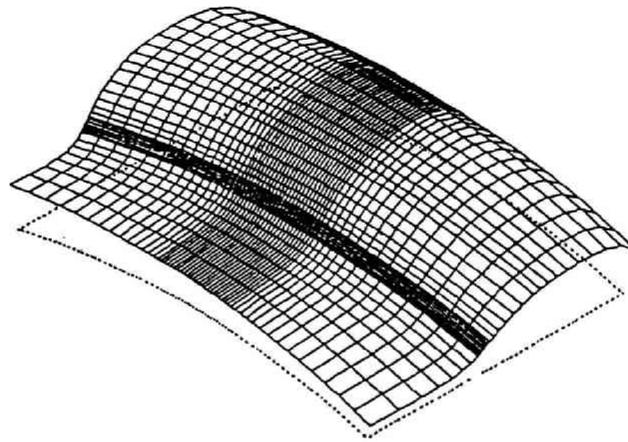
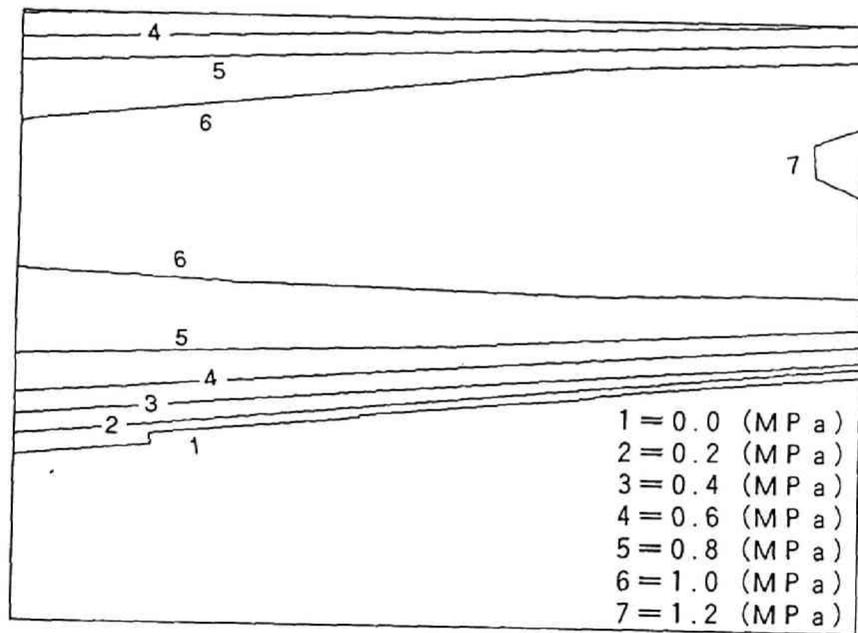


図 5.2 1 磁気ヘッド近傍モデル要素分割



( a ) 変形形状



( b ) 圧力

図 5.2 2 初期変形形状及び圧力

変形することが考えられるので境界における反力を計算し境界を移動させた。

部分領域の解析結果の一例の鳥瞰図を図 5.23 に示す。図 5.24 は入側から 30 度、90 度、150 度の位置における、磁気テープの変形形状に関する実験結果を右に、そして解析結果を左に示している。解析結果と実験結果を比較すると、磁気テープの変形形状はどの角度位置においてもほぼよく似ている。しかし、実験結果では、磁気ヘッドの前後において磁気テープが磁気ヘッドの取り付け穴に引き込まれるように変形しているのに対して、解析結果では引き込まれる量は実験値よりも小さい。これは、解析において、磁気ヘッドの取り付け穴部における圧力を  $p = 0$  に設定したが、実験では  $p < 0$  になっているものと考えられる。この負圧の発生は、穴の中の構造に依存すると考えられ、この圧力を正確に求めるには、ドラム内部の流体の挙動を 3 次元的に解析する必要がある。この点については、今後検討する必要があると思われる。

図 5.24 から分かるように、磁気テープの磁気ヘッド部での幅方向断面における変形形状は下ドラム側の側端部近傍において、実験結果と解析結果ともに磁気テープは下に凸の変形をしている。このことは、図 5.11 においても見られる。この位置での磁気テープ浮上量は、定量的には実験における値は解析結果よりも全体的に大きくなっている。両者の差は 90 度位置では少ないが 30 度と 150 度位置では大きくなっている。これは磁気テープが下ドラム及び上ドラムの角に接触し、摩擦力が外力として磁気テープに作用することで、磁気テープの張力が変化することによると考えられる。解析で使用した張力は、実験で求められた入側と出側の張力の中間値であり、この張力は 90 度位置での張力に一致する。このことにより、90 度位置での変形形状が実験値と解析値でよく一致したと思われる。90 度位置以外の実験結果と解析結果の違いについては、以下の原因が考えられる。

- 1) 全体解析のところでも考察したように、実験では下ドラム上での表面粗さ及びスクイズフィルムの影響を受けているのに対して、解析ではこの点を考慮していないことによる。
- 2) 下ドラムと磁気テープの摩擦により、磁気テープにかかる張力がドラム上の位置によって異なるが、解析ではこの摩擦を考慮していない。摩擦により磁気テープの張力が小さくなることにより、磁気テープの幅方向の端部における浮上量が増加したと考えられる。

図 5.25 に磁気ヘッド周辺における磁気テープ浮上量の解析結果と実験結果を等高線

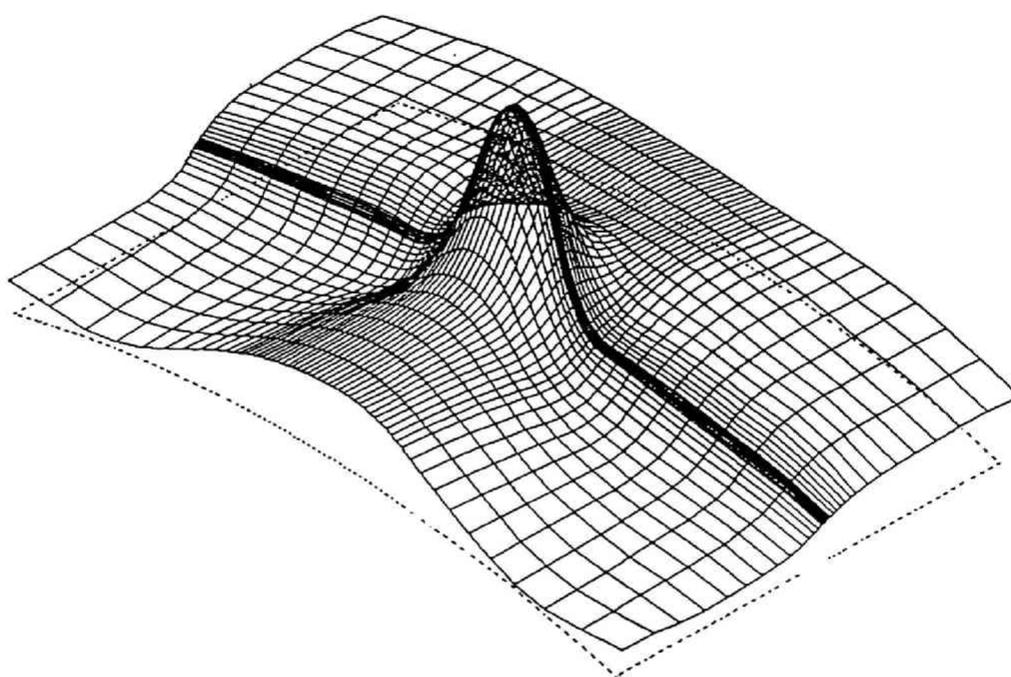


図 5.2.3 解析結果の鳥瞰図

計 算

実 験

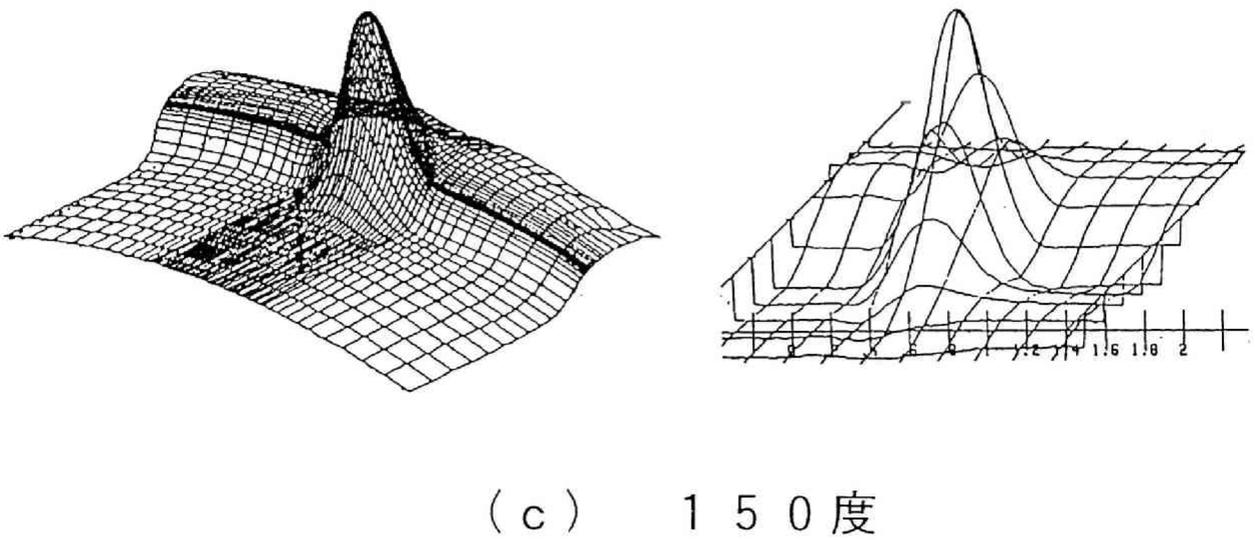
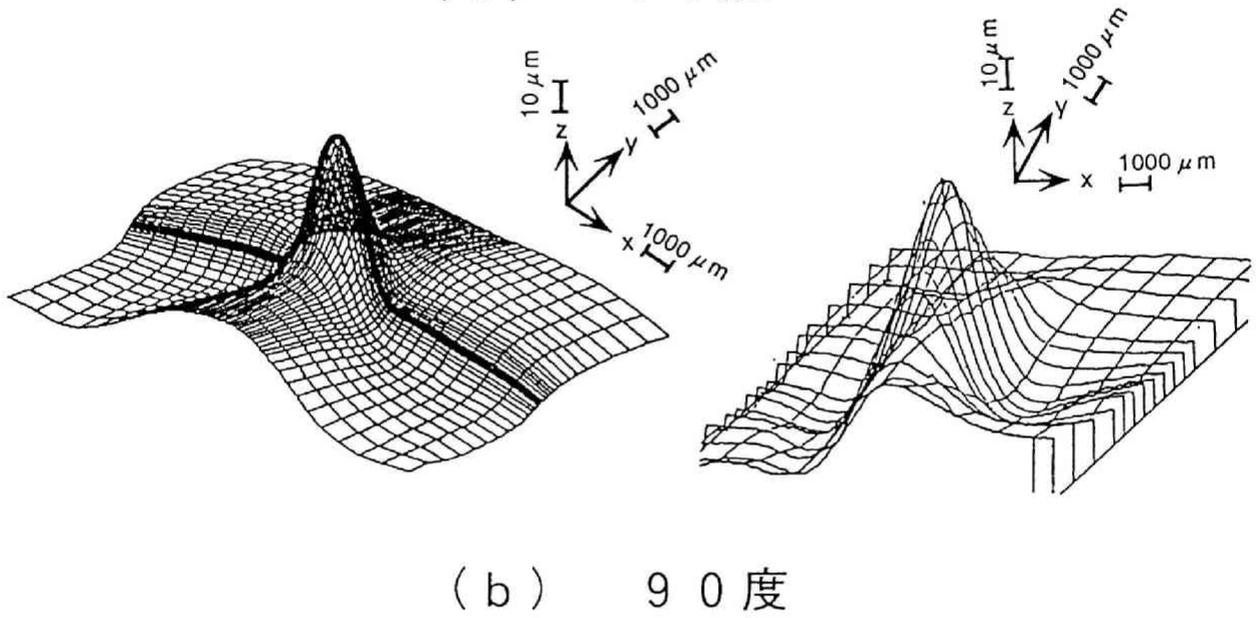
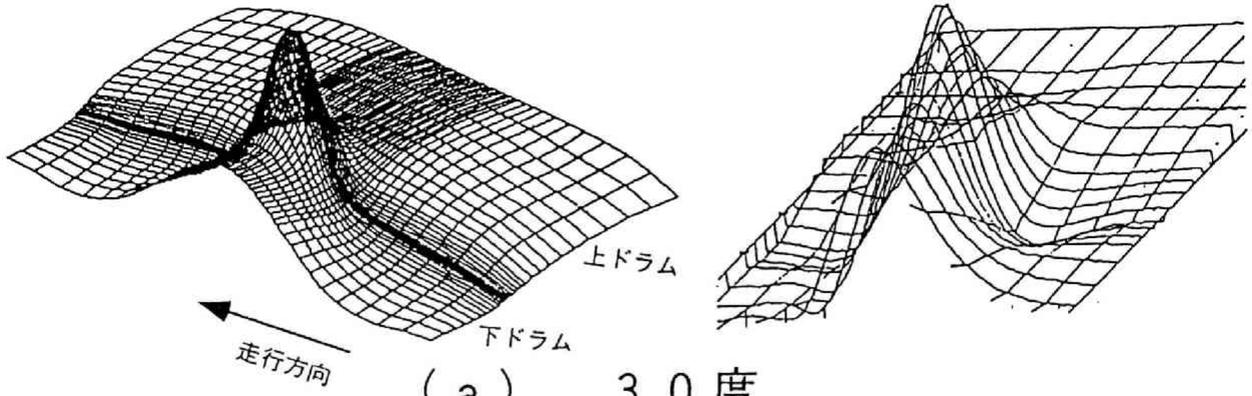
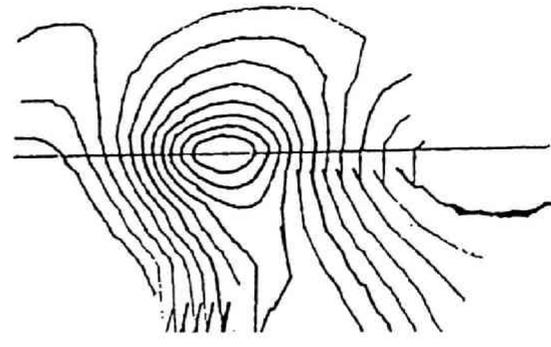
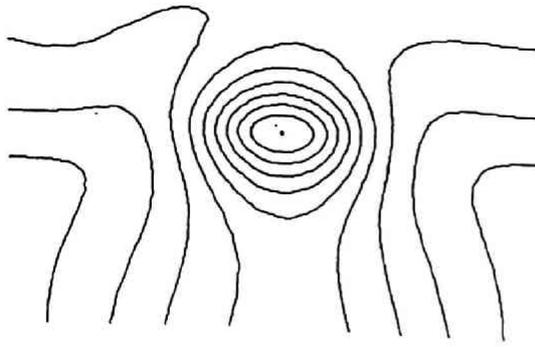


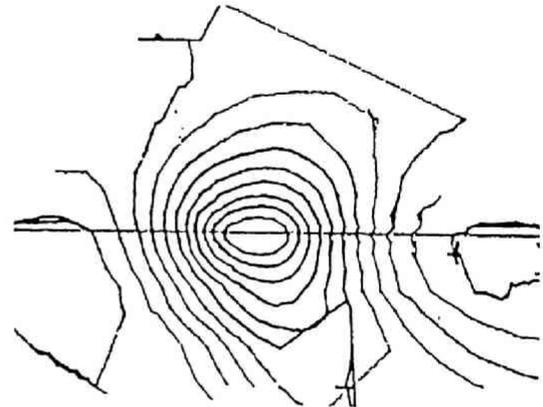
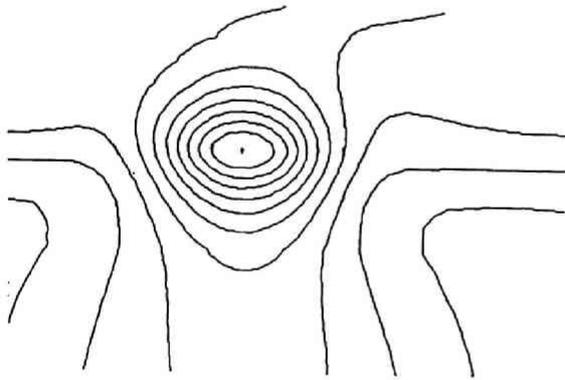
図 5.2 4 磁気ヘッド近傍解析結果と実験結果  
(鳥瞰図による比較)

計 算

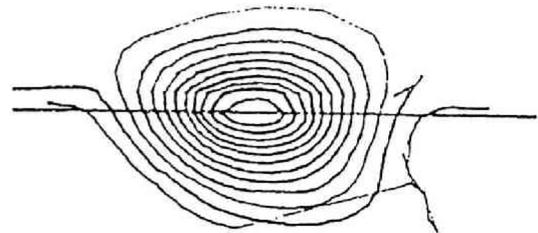
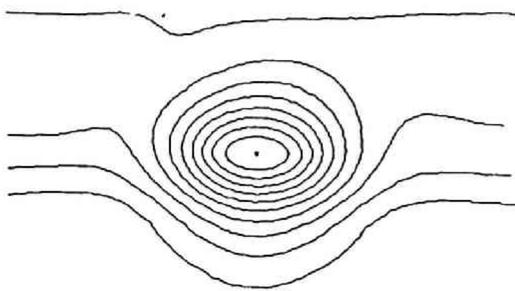
実 験



(a) 30度



(b) 90度



(c) 150度

図 5.25 磁気ヘッド近傍解析結果と実験結果  
(等高線による比較)

図の形で示す。図の左側は解析結果、右側は実験結果である。いずれも中心軸から上が上ドラム側で、下が下ドラム側である。磁気ヘッドは図の右から左に動いている。磁気ヘッド周辺において、磁気テープの変形形状は実験結果と解析結果でいずれの角度位置においてもよく一致していると言える。30度位置及び90度位置での実験結果において、等高線は磁気ヘッドの後方に流れているが、解析結果ではその傾向は見られない。これは前述したように、磁気テープは磁気ヘッドの走行方向に送られており、静止している下ドラムと接触することにより磁気ヘッドの走行方向とは逆方向に摩擦力が作用する。一方、磁気ヘッド上では、磁気テープは磁気ヘッドと接触することで走行方向の摩擦力を受ける。すなわち、方向の異なる摩擦力が磁気テープに作用するために、磁気テープにはせん断応力が面内に生じる。その結果、浮上量の等高線が磁気ヘッド後方に流れるような結果になったものと考えられる。これは、実験結果において、等高線の流れが上ドラムでは小さく、一方下ドラムでは大きくなっていることから分かる。実験結果において、上ドラム部における等高線の分布が走行方向に対して前後対称の形状をしている。このことから磁気ヘッドと磁気テープの摩擦力は小さく、磁気テープの全体的な変形形状への影響は小さいと言える。

実験結果と解析結果を比較した結果、全節点における両者のRMSは平均5%であった。

### 5. 3 結 論

本章では、VTRの実機における磁気テープ浮上解析を実現する方法として、対象となるドラム全体の解析領域を、磁気ヘッドを持たないドラムだけの解析モデルとドラム上の任意角度における磁気ヘッド近傍の部分領域モデルに分ける解析方法を提案した。

まず、全体領域の解析方法を示し、部分領域の解析に必要な磁気テープの初期形状及び変位と潤滑膜圧力の境界条件の算出方法について示した。

実機のドラム及び磁気ヘッドと磁気テープを用いて、ドラム上の磁気テープの浮上量分布を測定し、同様のモデルに対して行った解析結果と比較し、さらに、磁気ヘッドを備えた実機の磁気ヘッド近傍の磁気テープの変形及び浮上量を測定し、同じ条件における解析結果と比較した結果以下の結論を得た。

- 1) 解析結果と実験結果はよく一致しておりその誤差は5% (全節点におけるRMS)

以内であった。

2) 磁気テープの浮上量及び変形は、静止した下ドラムとの接触による摩擦の影響を受けることが分かった。

3) 計算にはIBM社製のEWS (RS6000/550) を使用し、全体領域解析、部分領域解析とも要素数は約2000で未知数は約14000で計算時間は、約40分であった。(記憶容量70MB)

以上のことより、本章で提案した実機解析の方法によって実機のインターフェース現象を定量的にかつ、簡便に解析することが可能になったと言える。

今後実機のインターフェースをより詳しく定量的に解析するには、以下の項目について考慮する必要がある。

1) 磁気ヘッドの取り付け穴の圧力分布

2) 磁気テープと磁気ヘッド及びドラムの接触

これには、表面粗さを考慮した、真実接触面積を検討する必要がある。

3) 磁気テープとドラム及び磁気ヘッドの接触による摩擦力

4) スクイズフィルム効果の影響

## 第6章 磁気記録再生特性予測への応用展開

本章では、第5章までに提案しその有効性を示したインターフェース解析手法をもとに、これを実際のVTR装置の開発に利用展開する一つの方法を提案する。

### 6.1 表面粗さと摩耗について

磁気記録は磁気ヘッドに作成した磁気ギャップからもれる磁束により、磁気テープの磁性層に永久磁化を与えることで行われる。磁気ギャップにおける信号の低下は6-1式で与えられる[3]。

$$G(\lambda) = -20 \log_{10}[\pi g / \lambda \sin(\pi g / \lambda)] \quad 6-1$$

ここで $g$ はギャップの大きさ、 $\lambda$ は記録波長である。

磁気ギャップの大きさは記録波長 $\lambda$ 以下にする必要があり、磁気テープ装置の場合、通常 $0.5 \mu\text{m}$ 程度である。また、第1.3節で述べたように、磁気テープとギャップの間の距離によっても信号の低下が生じ、その量は1-1式で与えられる。高密度記録を実現するには、記録波長を短くし、さらに磁気ヘッドのギャップ $g$ の大きさを小さくする必要がある。一方1-1式から分かるように、記録波長 $\lambda$ が短くなると、磁気テープと磁気ヘッドの距離 $h$ による信号の低下が増加するため、両者の距離 $h$ を小さくする必要がある。両者の距離が小さくなると、磁気ヘッド及び磁気テープの表面粗さが問題となってくる。磁気ヘッド及び磁気テープの表面粗さに関する測定はGreenwoodとWilliamson<sup>[41,42]</sup>及びBhushan<sup>[43]</sup>らにより行われ、最大粗さの分布がガウス分布となることが報告されている。表面粗さの測定方法には、Talysurfなどの接触式測定方法と光を用いる測定方法があり、分解能の高いレーザーを用いた2光式表面粗さ測定が主流になっている。また最近では、STM(Scanning Tunnel Microscopy)およびAFM(Atomic Force Microscopy)を用いた測定が利用され始めている。

磁気テープの表面及び磁気ヘッドの表面粗さを平均数十nmに加工することは技術的には可能であるが、表面粗さを小さくすると、磁気ヘッドと磁気テープの接触領域が大きく

なる可能性がある。両者が接触することは、静的にはBhushanらにより確認されており [64,65]、動作状態における接触については、磁気ヘッドと磁気テープ間の走行中における電気抵抗の変化を測定することにより確認されている [6]。また、本研究においても磁気ヘッドと磁気テープは接触していることが確認されている。

図 6.1 は実機において測定した、磁気ヘッドの形状変化の結果である（測定方法は第 6.2 節で述べる）。図 6.1 の□は初期における磁気ヘッドの幅方向の曲率半径の分布であり、磁気ギャップの位置を横軸の 0 として磁気テープの長手方向への分布を示している。初期において磁気ヘッドの幅方向の曲率半径は長手方向にはあまり変化せずほぼ一定の値（ $r = 2.9 \text{ mm}$ ）であると言える。この磁気ヘッドを実機（図 5.1 参照）に装着し、通常の磁気テープを用いて 600 分間記録再生を行った後、再び磁気ヘッドの幅方向の曲率半径の分布を測定した結果、磁気ヘッドの幅方向の曲率半径は図 6.1 の△のように変化していた。このことは、走行中に磁気ヘッドと磁気テープが接触し、その結果、磁気ヘッドが摩耗して形状が変化していることを表している。

一方、図 6.2 は、第 4.3 節における磁気ヘッド付き解析で計算が収束した時点において、磁気ヘッド上で  $h = 0.08 \mu\text{m}$  の高さに固定した節点を示したものである。このように解析においても磁気テープが磁気ヘッドに接触する状況が表れており、インターフェース解析に磁気ヘッドの摩耗を取り入れる必要があると言える。

磁気ヘッドの摩耗形状（通常摺動痕と呼ばれる）は磁気テープと磁気ヘッドの接触領域の分布及び接触圧力によって変化する。言い替えると、磁気ヘッド上で磁気テープがどの様に浮上、変形しているかにより摩耗形態が変化し、これには磁気テープの材料定数及び厚さが大きく影響する。実際には多くの種類の磁気テープが使用されており、その材料特性及び厚さは異っている。例えば、磁性層を蒸着で装着してある磁気テープは厚さが  $10.0 \mu\text{m}$  であるのに対して、塗布により装着されている磁気テープの厚さは  $18.5 \mu\text{m}$  である。また、蒸着型の磁気テープは塗布型の磁気テープに比べて弾性定数は高い（表 3.1 参照）。

図 6.3 は厚さが同じ（ $t = 18.5 \mu\text{m}$ ）で、弾性定数が  $E_x = 5.88 \text{ GPa}$ 、 $6.96 \text{ GPa}$ （基準）及び  $7.84 \text{ GPa}$  の磁気テープについて、磁気ヘッドの幅方向への磁気テープの変形形状を解析した結果である。弾性定数が  $E_x = 6.96 \text{ GPa}$  の磁気テープの場合には、磁気テープは磁気ヘッドの表面に沿って変形している。これに対して、弾性定数が低い

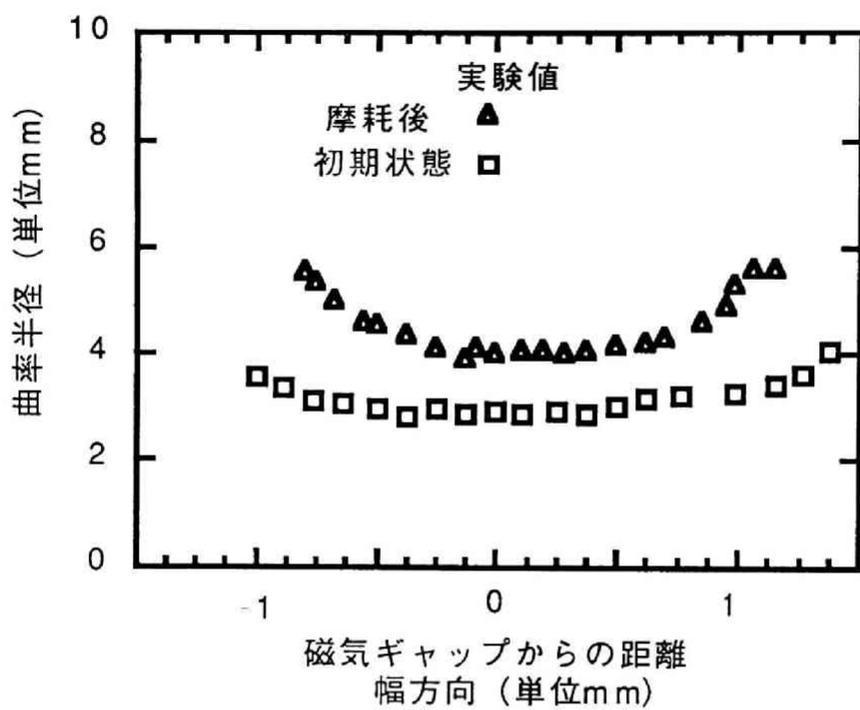


図 6.1 摩耗前後の幅方向の曲率半径変化

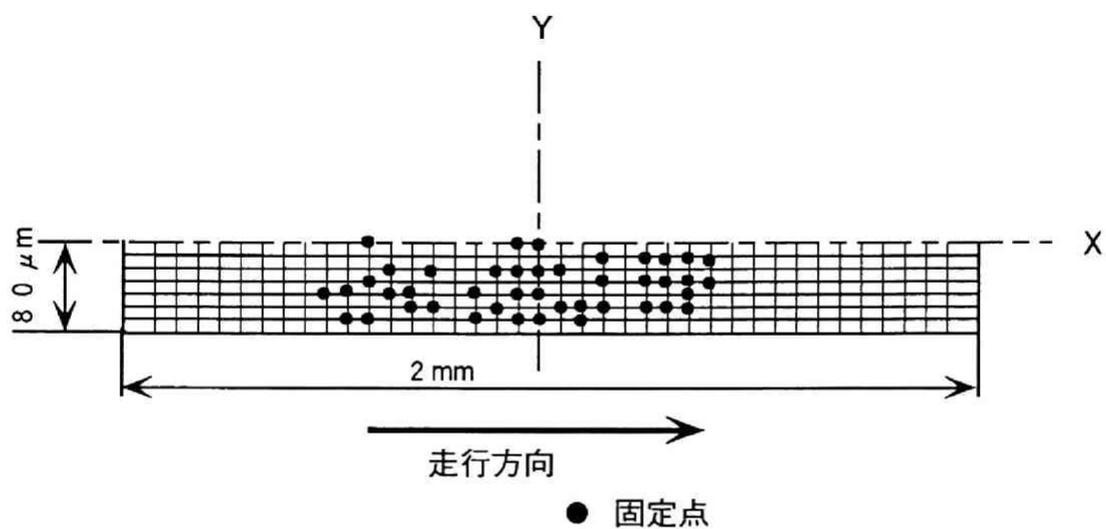
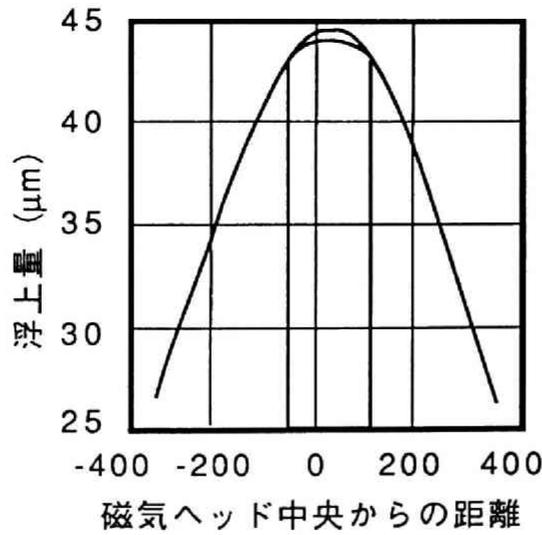
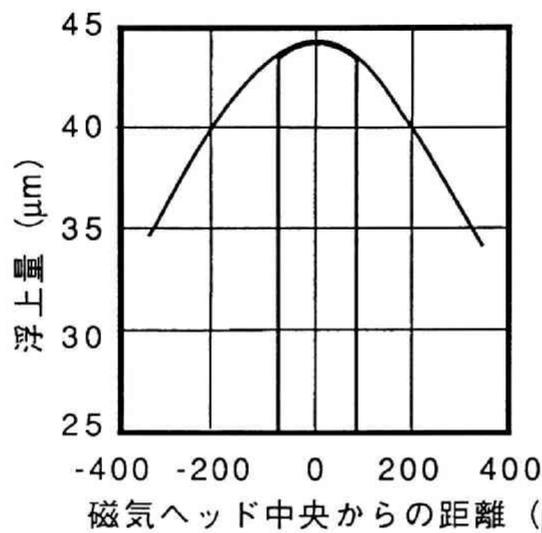


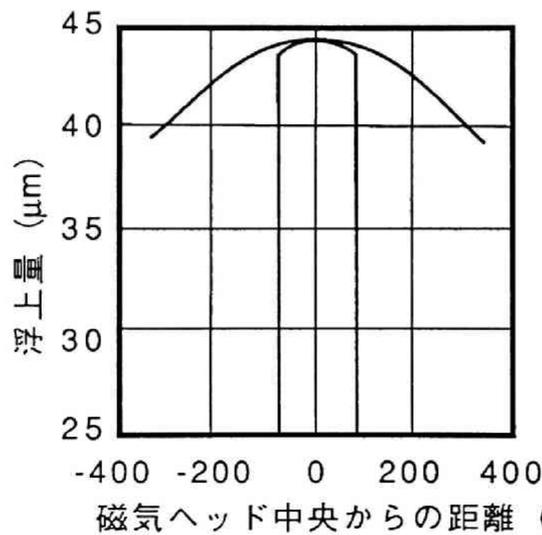
図 6.2 磁気ヘッド上の接触点分布  
 (計算の収束時に  $0.08 \mu\text{m}$  に固定した点)



(a) 弾性定数が低い場合( $E_x = 5.88 \text{ GPa}$ )



(b) 基準の弾性定数の場合( $E_x = 6.96 \text{ GPa}$ )



(c) 弾性定数が高い場合( $E_x = 7.84 \text{ GPa}$ )

図 6.3 弾性定数によるテープ幅方向の変形形態の違い

$E_x = 5.88 \text{ GPa}$ の磁気テープの場合には、磁気ヘッドの中央部において磁気テープと磁気ヘッドが離れ、磁気ヘッドの角において磁気テープが接触している。また、弾性定数が高い $E_x = 7.84 \text{ GPa}$ の磁気テープの場合には、磁気ヘッドの中央部において磁気テープと磁気ヘッドが接触し、磁気テープは磁気ヘッドよりも大きい曲率半径をもつ形状に変形している。その結果、磁気ヘッドの中央部から離れるに従って、磁気テープと磁気ヘッドの間の距離は大きくなっている。このように、磁気テープの弾性定数をはじめとする設計変数及び材料特性の違いにより、磁気ヘッド近傍における変形形状は変化する。

このように弾性定数及び厚さの異なる磁気テープを、同一のVTR装置に対して使用する場合、次の様な現象が生じ、磁気テープの互換性が取れないこと及び磁気ヘッドの寿命が短くなること等の問題が生じている。例えばその現象とは、磁気テープの違いにより、入出力信号が減衰するというものである。これは次のように考えられる。まず、ある磁気テープとの接触により磁気ヘッドが摩耗したとする、その後に材料特性または厚さの異なる磁気テープを用いて信号の記録再生を行う場合、磁気ヘッド上での磁気テープの浮上量分布が前者の場合と異なる。その結果、磁気ギャップ部での磁気ヘッドと磁気テープの距離が離れ、入出力信号が減衰する。

従来、実機による摩耗試験により得られた摺動痕を測定し検討することで、磁気ヘッドの摩耗現象を把握し、摩耗現象に関連する次の5つの設計変数の最適化が図られてきた。

- 1) 磁気ヘッドの形状
  - (a) 幅方向の曲率半径の分布
  - (b) 長手方向の曲率半径の分布
- 2) 磁気ヘッドの材料
- 3) 磁気ヘッドの突き出し量
- 4) ドラムの形状と溝の形状と分布
- 5) 磁気テープの材料特性（弾性定数、厚さ等）

しかし実験による測定では、摩耗形状しか求めることができず、現象を充分把握できなかった。また、摩耗試験は時間がかかりコストも増加するため、摩耗試験を効率よく行い、かつ現象を充分把握できる方法の確立が必要であった。これまで、数値実験により磁気ヘッドの摩耗形状を求めるため、磁気テープを矩形の突起に静的に押し付け、その結果接触する要素を変形させるということが試みられた<sup>[45,46]</sup>。しかし、気体潤滑膜の圧力により磁気テープが浮上し変形することを考慮しておらず、実際の現象を解析するまでには

至っていない。また、磁気ヘッドの摩耗を考慮して磁気記録の入出力信号の変化を求める試みは、これまでなされていない。

本章では、第6.2節において磁気ヘッドの摩耗を解析する方法を提案し、摩耗実験との比較から、提案した方法の妥当性を示す。さらに、第6.3節では、磁気ヘッド摩耗解析の結果を利用して、記録再生信号の特性を予測する方法について示す。

## 6. 2 磁気ヘッド摩耗解析

### 6. 2. 1 磁気ヘッドの表面形状の測定

磁気ヘッドの摩耗形態の解析には磁気ヘッドの表面形状を正確に測定する必要がある。本節では本研究で用いた磁気ヘッドの表面形状の測定方法と、その結果より磁気ヘッドの表面の曲率半径を算出する方法について述べる。

図6.4に典型的なVTRの磁気ヘッドの形状を示す。最近のVTRヘッドはアモルファスの積層ヘッドで長さ3.2mm、幅0.16mm、高さ1.85mmで取り付け用のホルダーに取り付けられ、ドラム表面から45μm程度突出して取り付けられている。磁気ヘッドの表面は長手方向及び幅方向にそれぞれ曲率 $\phi_R$ 、 $\phi_r$ を持っている。曲率は位置の関数で6-2式で表される。

$$\begin{aligned}\phi_R &= \phi_R(x, y) \\ \phi_r &= \phi_r(x, y)\end{aligned}\tag{6-2}$$

前述したように、磁気ヘッドは磁気テープとの摺動と接触により摩耗し、そのため表面の形状は経時変化する。そこで、磁気ヘッドの表面形状を測定し三次元スプライン関数で近似する方法を考案した。

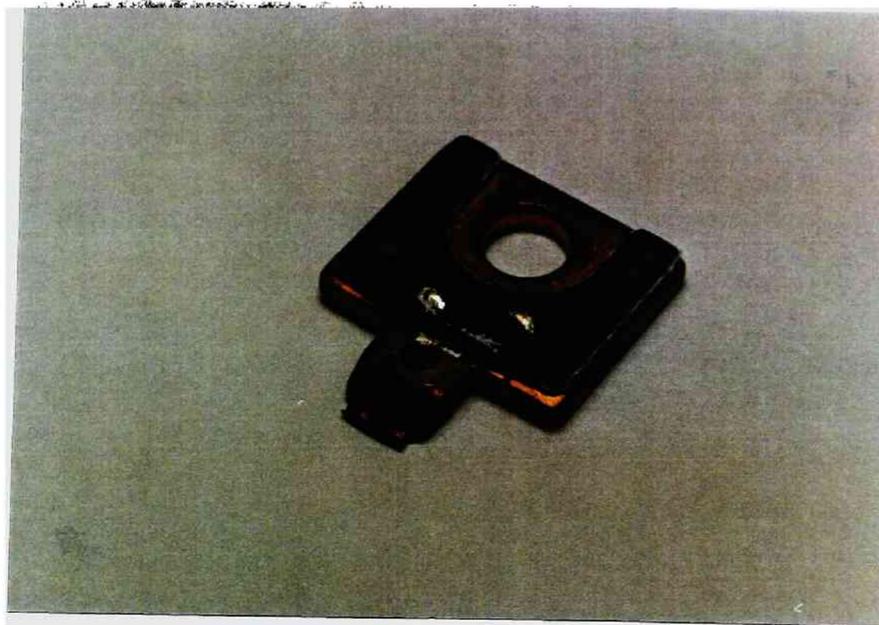
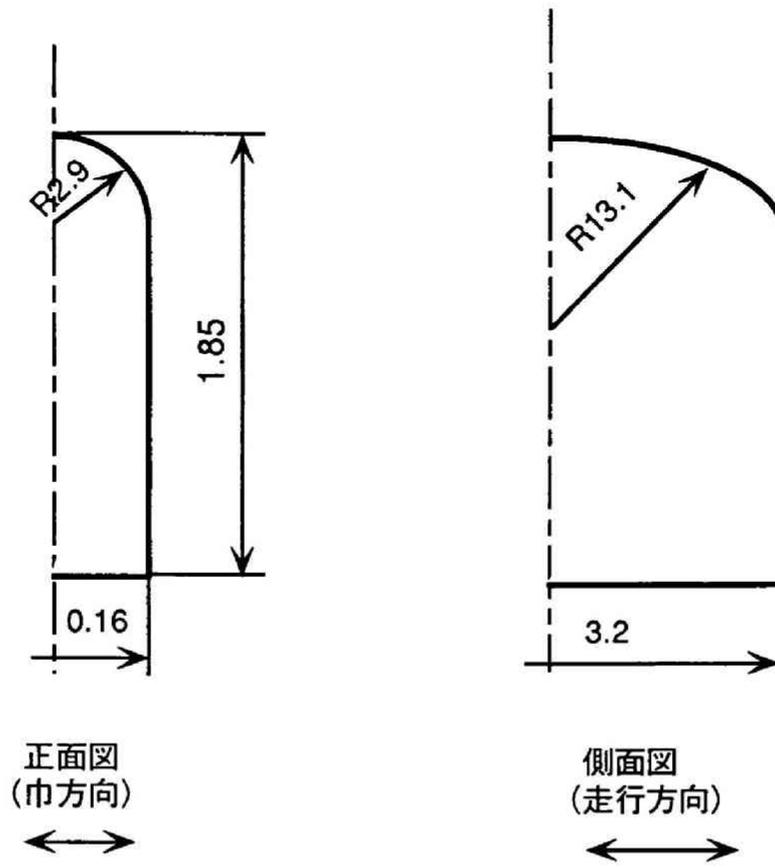


図 6.4 磁気ヘッドの構造図

## 6. 2. 1. 1 測定方法

磁気ヘッドの表面形状は触針式の表面粗さ計でも測定できるが測定誤差が大きく微妙な形状変化の測定が困難である。また測定に時間がかかるという問題がある。そこで、本研究では図 6.5 に示すように、光学顕微鏡を用いた干渉縞の測定を行い、画像処理により磁気ヘッド表面形状を求めた。

図 6.6 (a) は、2 光束干渉レンズを用いて測定した、磁気ヘッドの干渉縞の結果である。これを A/D 変換し三次元座標の点に直した結果を図 6.6 (b) に示す。この点列を三次元不等分割スプライン補間し三次元形状を求めた結果を図 6.6 (c) に示す。図 6.6 (d) はスプライン補間した結果と測定結果の比較を行った結果である。スプライン関数により求めた値は測定結果とよく一致している。

図 6.7 に家庭用 VTR の磁気ヘッドの初期形状の測定結果を示す。干渉縞による測定結果をもとに表面形状をスプライン補間し、得られた表面形状から各断面における曲率半径を最小 2 乗法を用いて算出した。磁気ヘッドの中心（ギャップ中央）から前後約 1 mm の範囲を測定した。ギャップの近傍において、磁気ヘッドは幅方向に曲率半径  $r = 2.9$  mm の表面形状をしている。中心から離れるに従って曲率半径は大きくなり、1 mm 離れた所では  $r = 3.5$  mm となっており、その分布はギャップを中心にほぼ対称である。幅方向の曲率半径はほぼ一定であるが、長手方向の曲率半径は磁気ギャップ部で大きく、磁気ギャップ部から離れるに従って小さくなっている。

## 6. 2. 2 摩耗計算モデル

固体間の接触による摩耗は次のように分類できる<sup>[66,67]</sup>、

### 1) 凝着摩耗；

固体間の真実接触部の凝着により生じ、被摩耗体が破断し相手材に移着して、摩耗が進行する。これは、比較的マイルドな摩耗である。

### 2) アブレッシブ摩耗；

相手の突起または介在異物により切削が生じ、摩耗が進行する。

### 3) その他；

腐食および衝突による摩耗

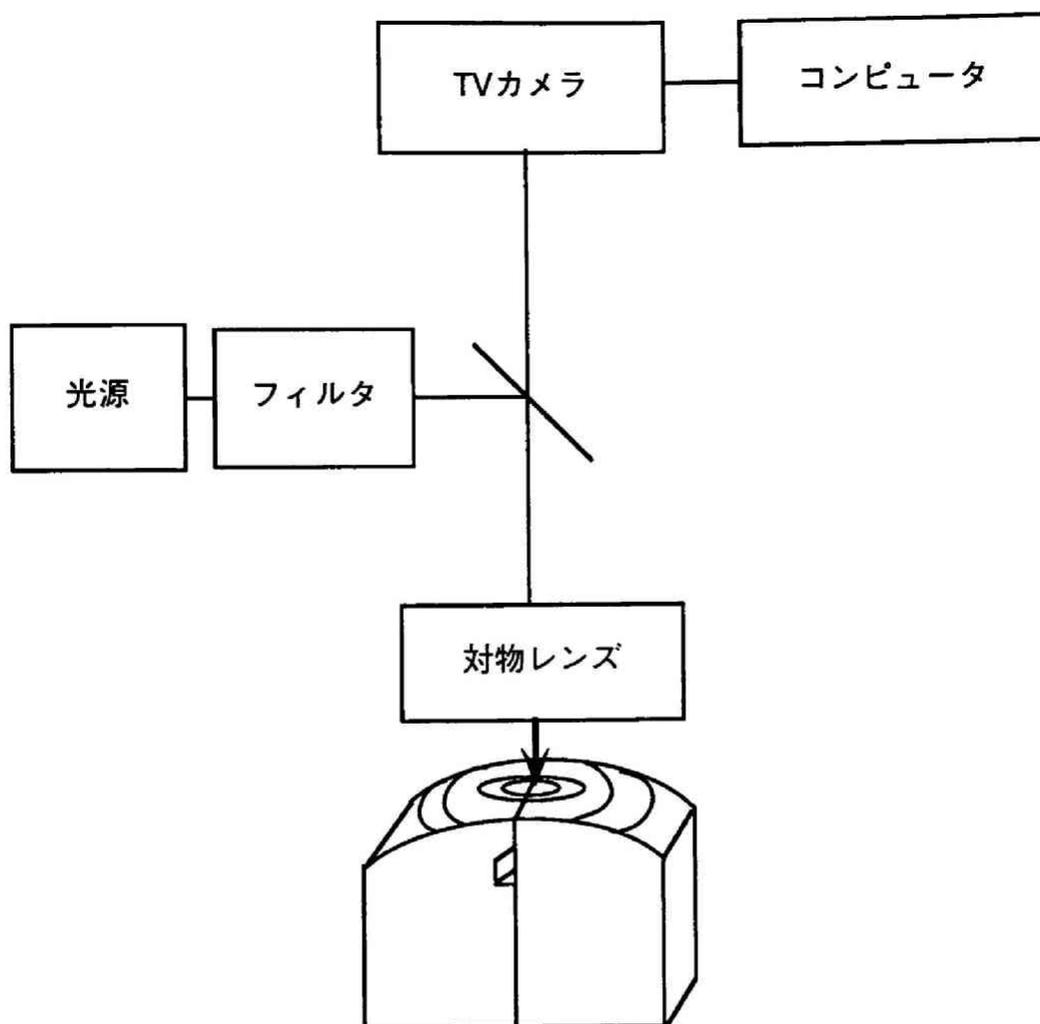
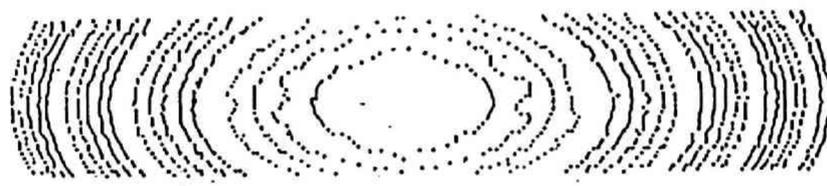


図 6.5 光学顕微鏡による干渉縞測定装置



(a) 光干渉縞 (測定用)

図6.6 磁気ヘッドの表面形状

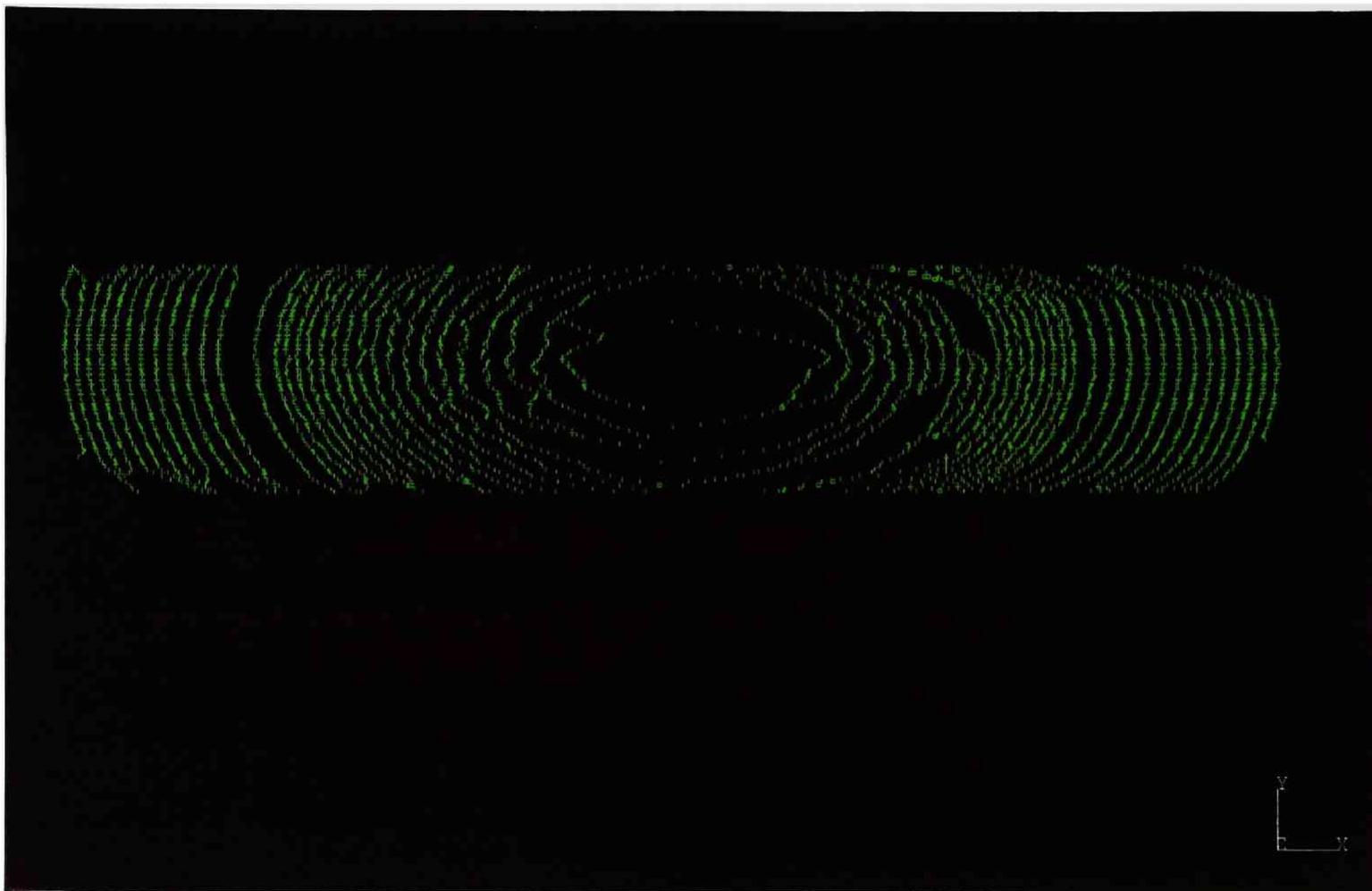


図 6.6 (b) 計算機への取り込み

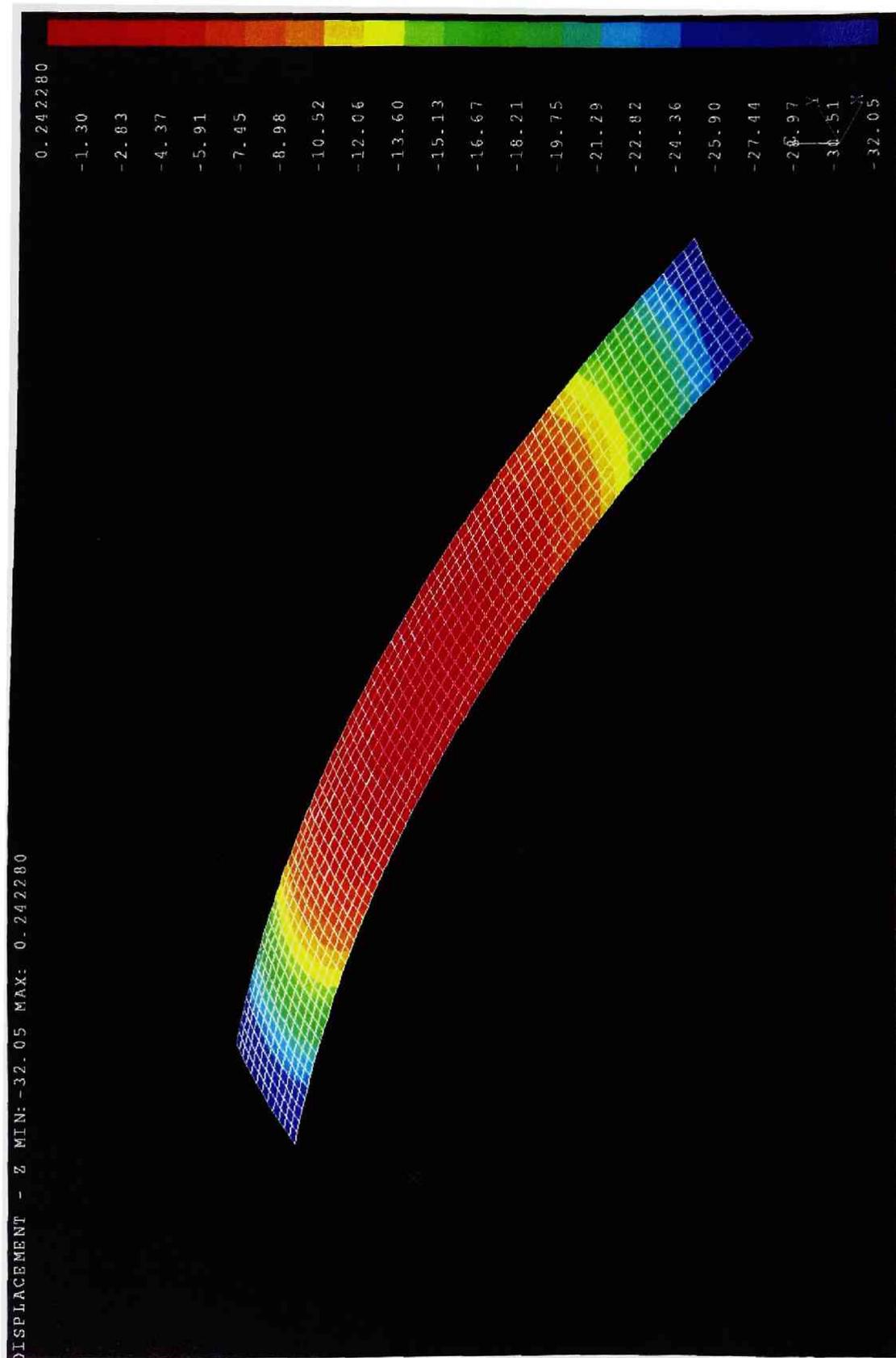


図6.6 (c) スプライン関数による補間処理

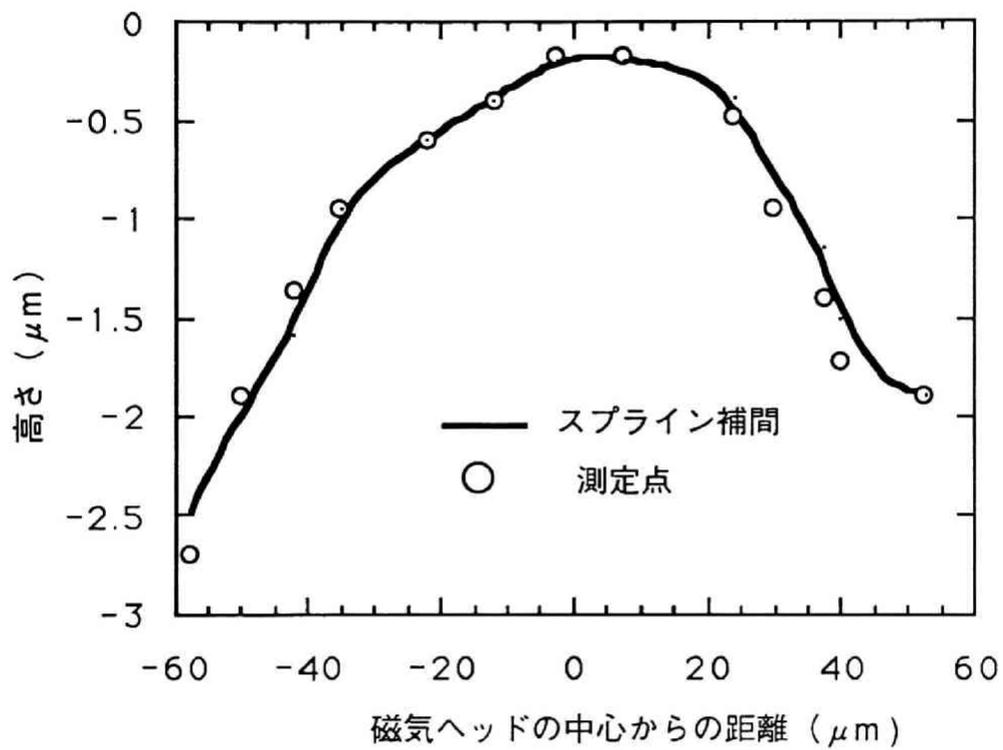


図 6.6 (d) 測定値と補間処理の比較  
(磁気ヘッドの幅方向, ヘッド中央)

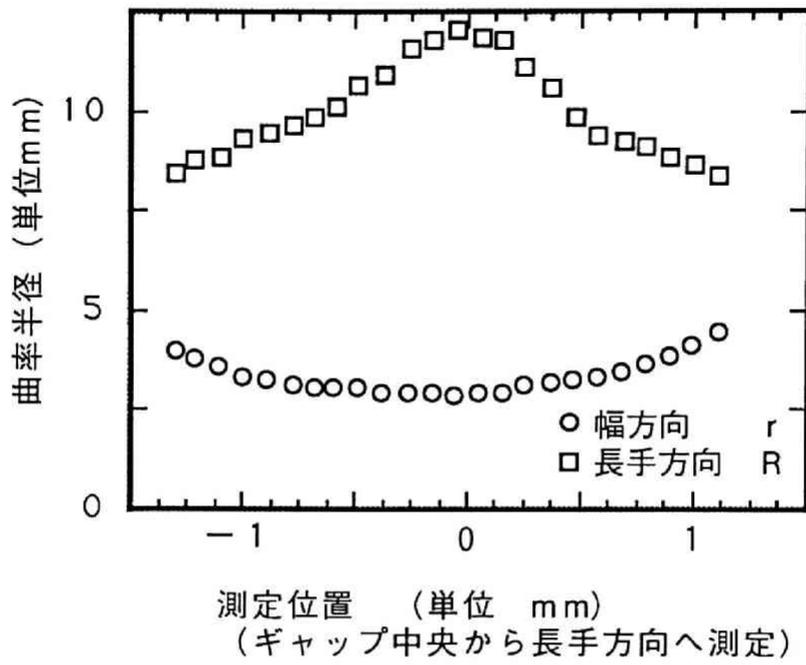


図 6.7 磁気ヘッドの曲率分布の測定結果

磁気ヘッドの摩耗は磁気テープとの間に空気の潤滑膜が介在するので、表面粗さによる固体の真実接触による摩耗と考えるのが妥当であると思われる。

真実接触面では、図 6.8 に示す様に両物体表面の突起が弾性変形（一部塑性変形も起こり得る）していると考えられている。マクロな立場での弾性接触の問題はヘルツ接触とも呼ばれており、半径  $r$  の同じ材料の球同士の接触の場合、接触領域の半径  $a$  は、

$$a = \sqrt[3]{\frac{3(1-\nu^2)P_s r}{4E}} \quad 6-3$$

で与えられる。ここに、 $a$  は接触領域の半径、 $\nu$  は材料のポアソン比、 $P_s$  は球に加えられた荷重を、 $E$  は弾性定数である。

圧力分布  $P_H$  は

$$P_H = 3P_s \sqrt{1 - (x/a)^2} \quad 6-4$$

となる。ここで、 $x$  は中心からの半径位置である。

図 6.9 に接触圧力の概念図を示す。この接触半径  $a$  は、真実接触面積の分布の局所的な平均値を与えていると考えられる。但し、ヘルツ接触では、空気による潤滑の寄与は考慮されていない。

これに対し凝着摩耗は、真実接触面でのすべりによる摩耗を考えている。この場合、真実接触面内では接触圧力は塑性流動圧力  $P_m$  に達しており、圧力は一定である。この考え方は、Holm が提案したものである<sup>[68]</sup>。Holm らは、摩耗量が真実接触面積  $A_r$  と摩耗距離  $L$  に比例すると考え、摩耗量  $W$  を次式で定義している。

$$W = CA_r L \quad 6-5$$

ここで、 $C$  は材料によって決る定数である。

また、分子論的に、Holm の摩耗式（6-5 式）を導くことが可能である。Archard らは<sup>[69]</sup>、図 6.10 に示す半径  $a$  の突起の出会いのモデルを用いて、真実接触面積  $A_r$  と、突起の出会いの総数  $N_p$  と摩耗量  $W$  を導いている。しかし、これら摩耗量に関する式は、突起の半径が同じであるといった仮定を用いているために、実機の解析に応用するには無理がある。

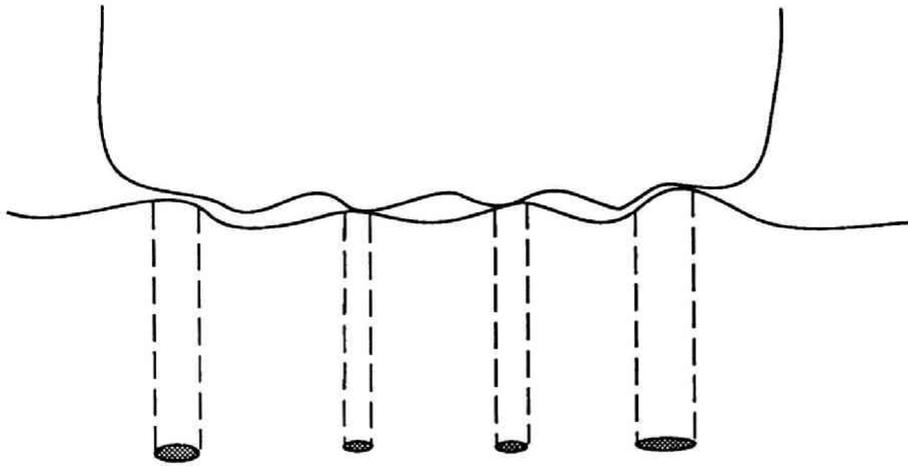


図 6.8 真実接触のモデル[69,70]

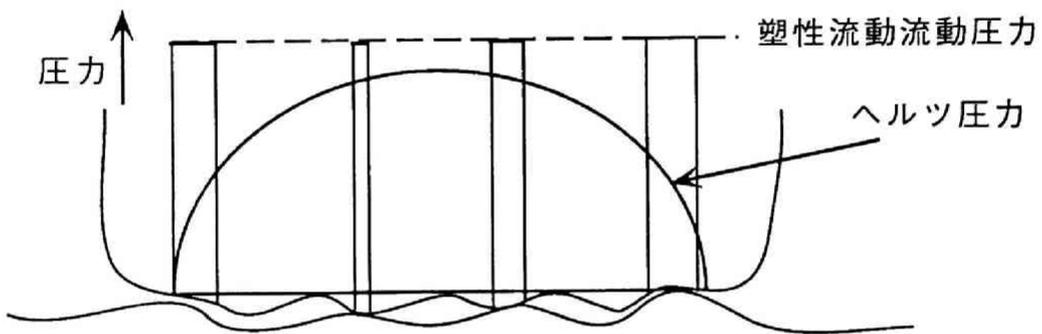


図 6.9 接触圧力の概念図[69,70]

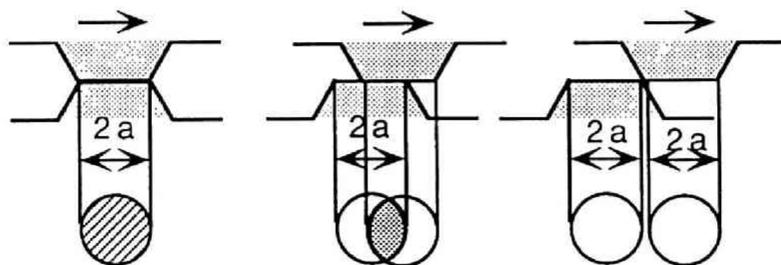


図 6.10 突起の出会いのモデル[69,70]

本研究では第5章までに述べてきた本解析手法への取り込みを考慮して、次のような簡単な摩耗モデルを導入する。すなわち磁気ヘッドの摩耗量は真実接触面積と磁気ヘッドの接触圧力の両方に比例すると仮定する。ところが第5章までに導いた磁気テープの浮上量解析では、真実接触面積を求めることができない。そこで、平均の浮上量から真実接触面積を推定することにする。

前章までの解析においては、磁気テープと磁気ヘッドが接触した場合、表面粗さを考慮して限界隙間を $0.08\ \mu\text{m}$ とした(第4.1節参照)。すなわち、計算の過程において、磁気テープの変位の修正量 $\Delta w$ により、磁気テープと磁気ヘッドおよびドラムの距離が $0.08\ \mu\text{m}$ 以下になる場合には、磁気テープの節点の位置を磁気ヘッドまたはドラムの表面から $0.08\ \mu\text{m}$ の高さに固定している。これは、磁気テープとドラムまたは磁気ヘッドとの真実接触面積が非常に小さく、解析の1要素の中に、接触する点が存在しても、大部分の領域は浮上しており、磁気テープとドラムまたは磁気ヘッドの間に潤滑膜が介在しているとする方が妥当であると考えたためである。この考え方は、表面粗さによる平均浮上量と同じであり、その量についてはいくつかの提案がなされている(Michell<sup>[70]</sup>, 三矢<sup>[71,72]</sup>)。

接触圧力の計算方法には、様々なモデルが考えられる。

- 1) 拘束点( $0.08\ \mu\text{m}$ の拘束点)ので反力(磁気テープの応力から算出)を用いる方法
- 2) 接触点での本来の変位量から予測する方法
- 3) 磁気ヘッドの表面粗さの幾何学的形状を用いる方法

等が挙げられる。本研究では2)と3)を考慮し、圧力と摩耗量は $h^2$ に反比例すると仮定し、次に示す摩耗計算モデルを作成した。

- 1) 磁気テープの浮上計算が収束した状態で、接触している節点(すなわち $0.08\ \mu\text{m}$ の浮上高さに固定した節点)の位置にある磁気ヘッド表面のZ座標 $\Delta$ を初期の位置から $0.04\ \mu\text{m}$ だけ小さくする。これは、VTR装置をある一定時間運転した場合、磁気ヘッドと磁気テープの接触部が $0.04\ \mu\text{m}$ だけ摩耗したと想定していることを意味する。
- 2) 計算の結果、磁気テープの浮上量が $0.08\ \mu\text{m}$ 以上 $0.24\ \mu\text{m}$ 以下の節点については、浮上量 $h$ から次式で摩耗量 $W$ を算出し、1)と同様に磁気ヘッドの表面形状を修正する。

$$W(\mu\text{m})=C_1(C_2/h)^2$$

6-6

ここに、 $C_1 = 0.04$  ,  $C_2 = 0.08$  ,  $0.08 \leq h \leq 0.24$ である。

2) の操作は、実際には平均浮上量が  $0.08 \mu\text{m}$  よりも大きい所でも摩耗が生じることをモデル化したものである。これは、1) の操作の結果、繰り返し計算の過程において、浮上量が  $0.08 \mu\text{m}$  から  $0.24 \mu\text{m}$  の領域の節点が次の繰り返し計算の結果、接触するようになることが認められたため、計算を加速することを目的に2) の操作を付加したものである。図6.11 (a) に、摩耗解析の処理フローを、図6.11 (b) に磁気ヘッド摩耗による磁気ヘッド形状変化の予測計算の概念図を示す。ある磁気ヘッド形状に対して磁気テープの変形、浮上量の計算を行い、浮上量計算が収束した結果、接触した節点と接触はしていないが2) で定義した範囲内の節点を抽出し、その点に対応する磁気ヘッドの表面形状を修正する。

### 6. 2. 3 摩耗計算と検証実験

磁気ヘッド摩耗計算に用いた解析モデルは、第4.3節と同じ磁気テープを上下一体のドラムに平行にかけて運転した場合の磁気ヘッド近傍の解析モデルである。実際には、磁気ヘッドと磁気テープの接触状態は、入側から出側まで順次変化しており、磁気ヘッドの摩耗はこのような接触の繰り返しによってもたらされて、磁気ヘッドの形状が変化すると考えられる。従って厳密には、解析においても、入側から出側までの、磁気ヘッドと磁気テープの浮上量分布を連続的に解析し、摩耗モデルを用いて、磁気ヘッドの形状を修正する必要がある。しかしそのような手法はあまりにも複雑であるため、本章では、入側と出側の中間に磁気ヘッドがある場合における磁気テープの浮上量解析のみを行い、摩耗モデルを用いて磁気ヘッドの形状修正を行った。

一方、検証実験を第4.3節で述べた実験で使用したのと同じ装置を用いて行った。解析に用いたのと同じ初期形状を持つ磁気ヘッドを用いて、磁気テープをかけドラム及び磁気ヘッドを回転し、磁気ヘッドを磁気テープで摩耗させた。磁気ヘッドの初期形状及び摩耗後の形状を第6.2.1節の方法で測定し、解析で得られた形状と比較した。

解析に用いたドラム及び磁気ヘッドの形状および、磁気テープ等の各種材料定数と解析条件を、表6.1と表6.2に示す。

表 6.1 摩耗解析用材料定数

Tape	
Young's Modulus $E_x/E_y$	6.96 /5.43 GPa
Poisson's ratio $\nu_x/\nu_y$	0.44/0.343
Density	$2.4 \times 10^4$ kg/m <sup>3</sup>
Thickness	18.5 $\mu$ m
Width	12650 $\mu$ m
Air	
Viscosity coefficient	17.9 $\mu$ Pa · s
Mean free path	0.064 $\mu$ m
Ambient pressure	0.101 MPa

表 6.2 摩耗解析用解析条件

Drum radius	31 mm
Tape tension	23.4 N/m
Relative velocity	5.8 m/s
Head protrusion	45 $\mu$ m
Head width	160 $\mu$ m
Head length	3200 $\mu$ m
Head small radius	2.9 mm
Head large radius	9.5mm

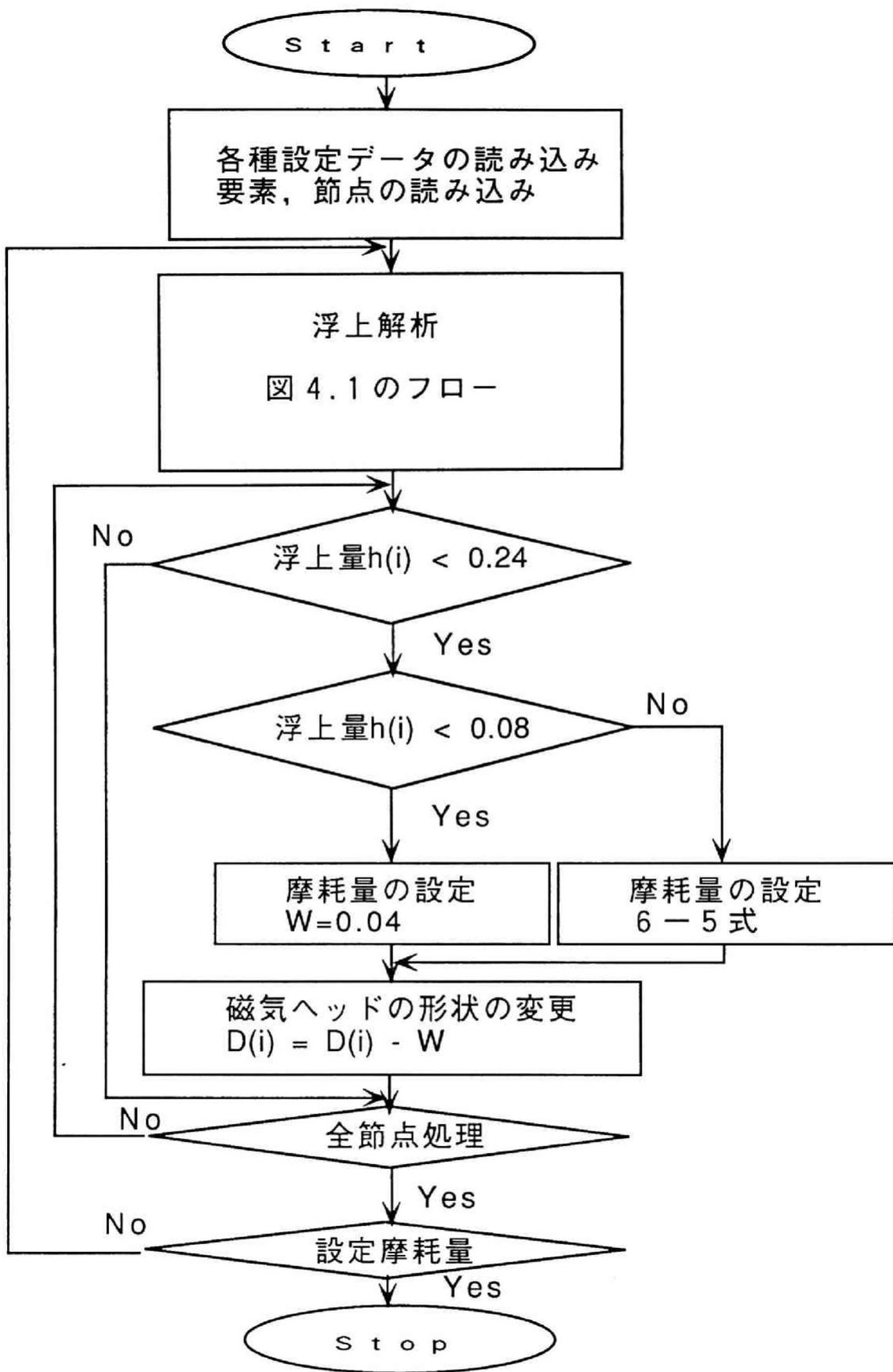


図 6.11 (a) 摩耗解析の処理フロー

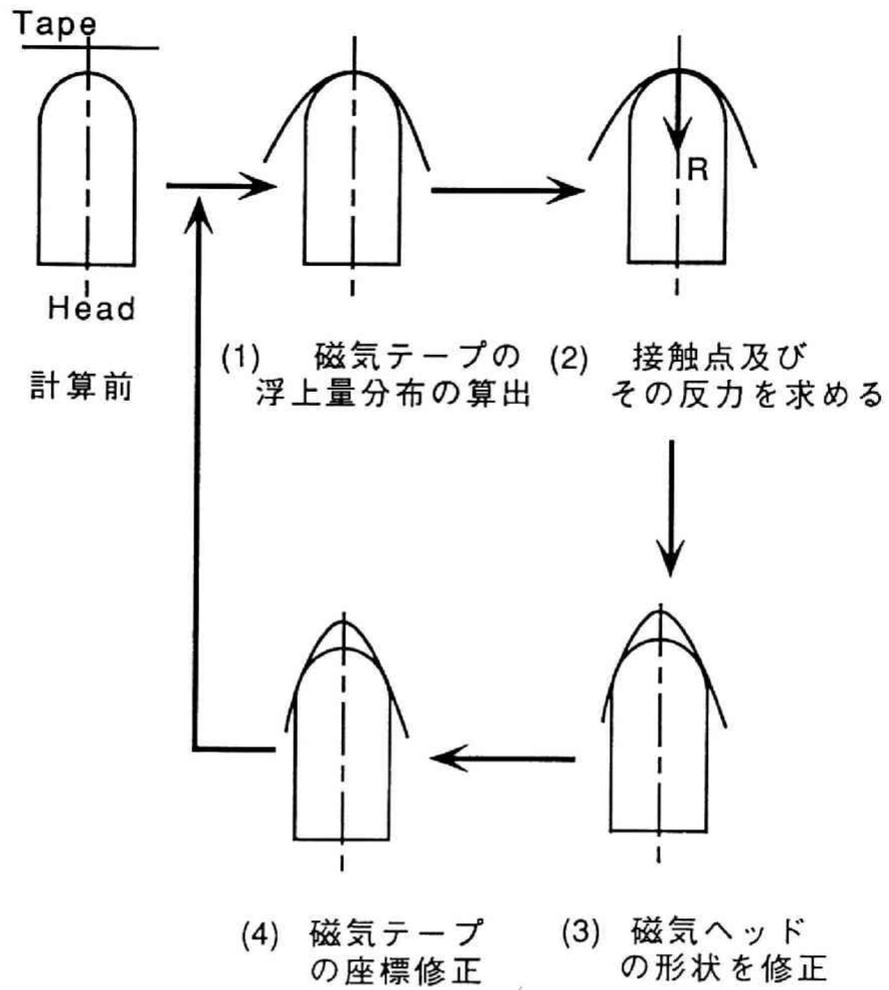


図 6.1 1 (b) 磁気ヘッド摩耗予測計算の概念図

#### 6. 2. 4 解析結果と考察

磁気ヘッドの初期形状の測定結果（図6.1参照）より、磁気ヘッドの幅方向の曲率半径の大きさは長手方向位置によって変化しているがほぼ一定であり、解析においては第5章と同様に一定（ $r = 2.9 \text{ mm}$ ）とした。また、磁気ヘッドの長手方向の曲率半径は、長手方向の位置によって $R = 9 \text{ mm}$ から $11 \text{ mm}$ まで分布しているが、幅方向と同様に一定の値（ $R = 9.5 \text{ mm}$ ）であるとした。すなわち、解析における磁気ヘッドの初期形状は、幅方向の曲率半径 $r = 2.9 \text{ mm}$ ，長手方向の曲率半径 $R = 9.5 \text{ mm}$ の回転楕円体で近似した。

まず表6.1に示した材料定数を持つ磁気テープを用いて、表6.2に示す走行条件で600分走行させる実験を行った。600分後に磁気ヘッドは $1 \mu\text{m}$ 摩耗し、最大突出量は初期の突出量よりも約 $1 \mu\text{m}$ 低くなっていた。摩耗後の磁気ヘッドの表面形状を測定した結果、幅方向の曲率半径の分布は、図6.12の△印の様な分布に変化していた。磁気ヘッドの中央部は $1 \mu\text{m}$ 摩耗していたが、中央から離れるに従って摩耗量が増加し、曲率半径は大きくなっていた。

次に、6.2.2節及び6.2.3節で提案した方法で理論計算を行い、得られた磁気ヘッドの幅方向の表面形状を実験と同様に近似し、曲率半径を求めた結果を図6.12に実線で示す。一回の摩耗計算では、最大 $0.04 \mu\text{m}$ だけ磁気ヘッドの表面形状を変化させることにしているため、中心部の摩耗量が $1 \mu\text{m}$ に達するには60回の摩耗計算を必要とした。図は60回の摩耗計算後の磁気ヘッド形状である。すなわち、第6.2節で提案した摩耗モデルにおいて設定した操作1)の摩耗量 $0.08 \mu\text{m}$ と操作2)の $C_1 = 0.04$ ， $C_2 = 0.08$ を用いて行った一回の摩耗計算は10分間摩耗実験したことに相当することになる。実機における摩耗速度は、磁気ヘッドと磁気テープの材料の摩耗特性および表面粗さと環境（温度，湿度等）により変化するが、第6.2節で提案した理論摩耗モデルでは、これらを考慮していない。異なる環境下における摩耗現象及び異なる摩耗特性を持つ磁気ヘッドおよび磁気テープに対する摩耗現象を解析する場合には、第6.2節で提案した摩耗モデルにおいて、1)の操作における摩耗量（ $0.08 \mu\text{m}$ ）と2)の操作における6-6式の定数 $C_1$ と $C_2$ はともに、これら磁気ヘッド及び磁気テープの材料特性および環境により変える必要がある。今後、任意の材料及び表面粗さを持つ磁気ヘッドと磁気テープに対して、本研究で提案した摩耗モデルをより効率よく適用するためには、これらの摩耗特性を解析モデルに取り入れる必要があると考えられる。

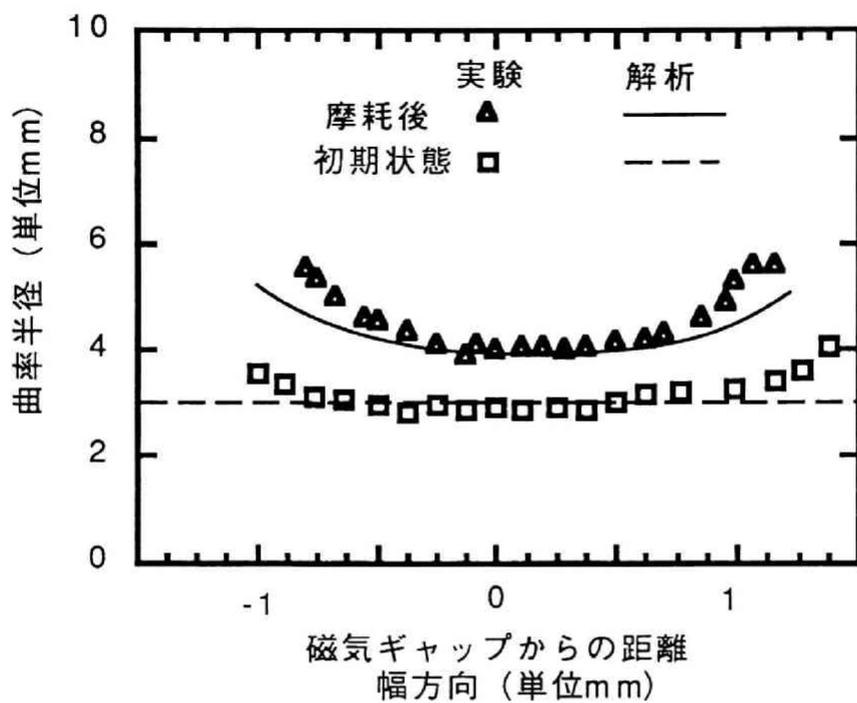


図 6.1 2 磁気ヘッドの形状  
(摩耗前後の幅方向の曲率半径)

実験による摩耗後の磁気ヘッドの曲率半径の分布と、解析により求めた曲率半径の分布はよく一致している。ギャップ部から離れた領域においては、実験における摩耗量は解析におけるそれよりも少し大きな値を示している。これは、初期の磁気ヘッド形状の違いによるものと考えられる。

長手方向の磁気ヘッドの曲率半径についての、摩耗実験前後における曲率半径の分布測定の結果と、摩耗解析の結果を図6.13に示す。解析結果と実験結果はよい一致を示している。

図6.14(a)に摩耗実験の過程(100分後, 400分後, 600分後)における、磁気ヘッド表面の摺動痕の変化の測定結果を示す。図6.14(b)は解析結果より得られた摺動痕形状である。10回, 40回, 60回の摩耗計算によって表面形状を修正した領域を、解析における摺動痕とした。10回, 40回, 60回と摩耗計算が進むにつれて、摩耗が進行しているのがよく分かる。実験結果において、摩耗試験を開始して100分後には、磁気ヘッドの中央部が摩耗し、摩耗が進行するに従って幅方向に摩耗領域が広がり、中央が少しくびれた形状になっている。そして、さらに摩耗が進行し磁気ヘッドの幅全体まで広がる。解析結果もこの過程を表しており、実験結果とよく一致している。このことから磁気ヘッド表面の曲率半径の変化のみならず、摩耗過程も含めて定量的に解析できていると言える。

次に、磁気ヘッドをまずドラム表面から $45\mu\text{m}$ 突き出した状態から計算を開始し、摩耗計算により磁気ヘッドの最大突出量が $22\mu\text{m}$ になるまで摩耗させるシミュレーション計算を行った。またこれと同様の実験を行った。摩耗の進行過程における、磁気ヘッド中央部の幅方向及び長手方向の曲率半径の変化を図6.15に示す。○及び□は実験結果を、実線および破線は解析結果である。幅方向および長手方向ともに実験結果と解析結果はよい一致を示している。

さらに、磁気テープの弾性定数が変わったときの磁気ヘッドの摩耗形状の変化について、弾性定数と厚さの異なる4種類の磁気テープを用いて、磁気ヘッドの中央部を $1\mu\text{m}$ 摩耗させる実験及び解析を行った。表6.3に実験及び解析に使用した、4種類の磁気テープの諸データを示す。厚さ及び異方性比率が同じで、弾性定数のみ異なる磁気テープを得ることは困難であったため、厚さおよび弾性定数と異方性比率の異なる市販の磁気テープを使用した。図6.16にその結果を示す。実験及び解析に使用した4種類の磁気テープは厚さ、弾性定数、異方性比率の全てが異なるため、磁気ヘッド全体における摩耗形状の変

表 6.3 計算及び実験に使用  
した磁気テープの特性

		A (基準)	B	C	D
Young's Modulus Ex/Ey	GPa	6.96 /5.43	5.34 /4.38	7.84 /5.49	10.07/7.05
Poisson's ratio	$\nu_x / \nu_y$	0.44/0.343	0.44/0.36	0.44/0.3	0.44/0.3
Density	kg/m <sup>3</sup>	2.4x10 <sup>4</sup>	2.4x10 <sup>4</sup>	2.4x10 <sup>4</sup>	2.4x10 <sup>4</sup>
Thickness	$\mu\text{m}$	18.5	27.2	15.5	11.0
Width	$\mu\text{m}$	12650	12650	12650	12650

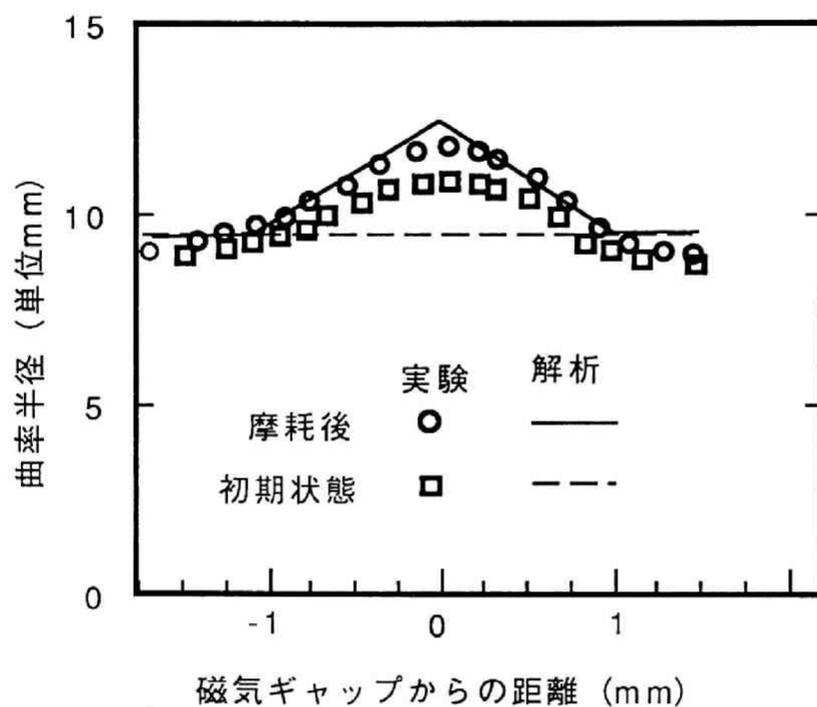
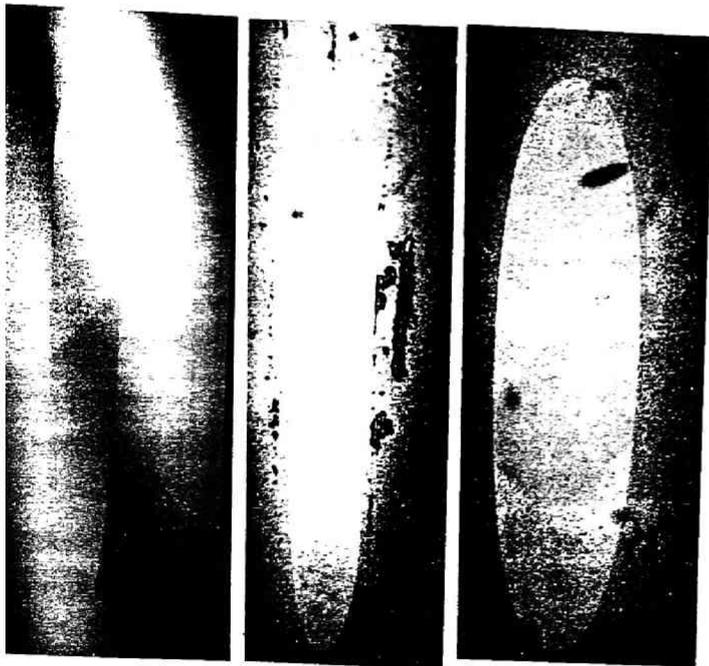
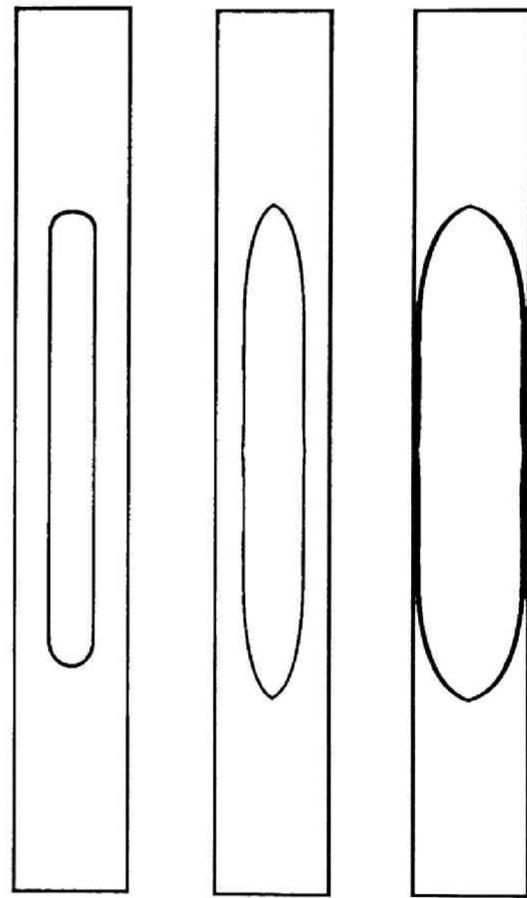


図 6.1.3 長手方向の曲率半径分布



100分      400分      600分

(a) 実験結果



10回      40回      60回  
 (100分相当) (400分相当) (600分相当)

(b) 解析結果  
 摺動痕

図 6.1 4 ヘッド表面の摺動痕

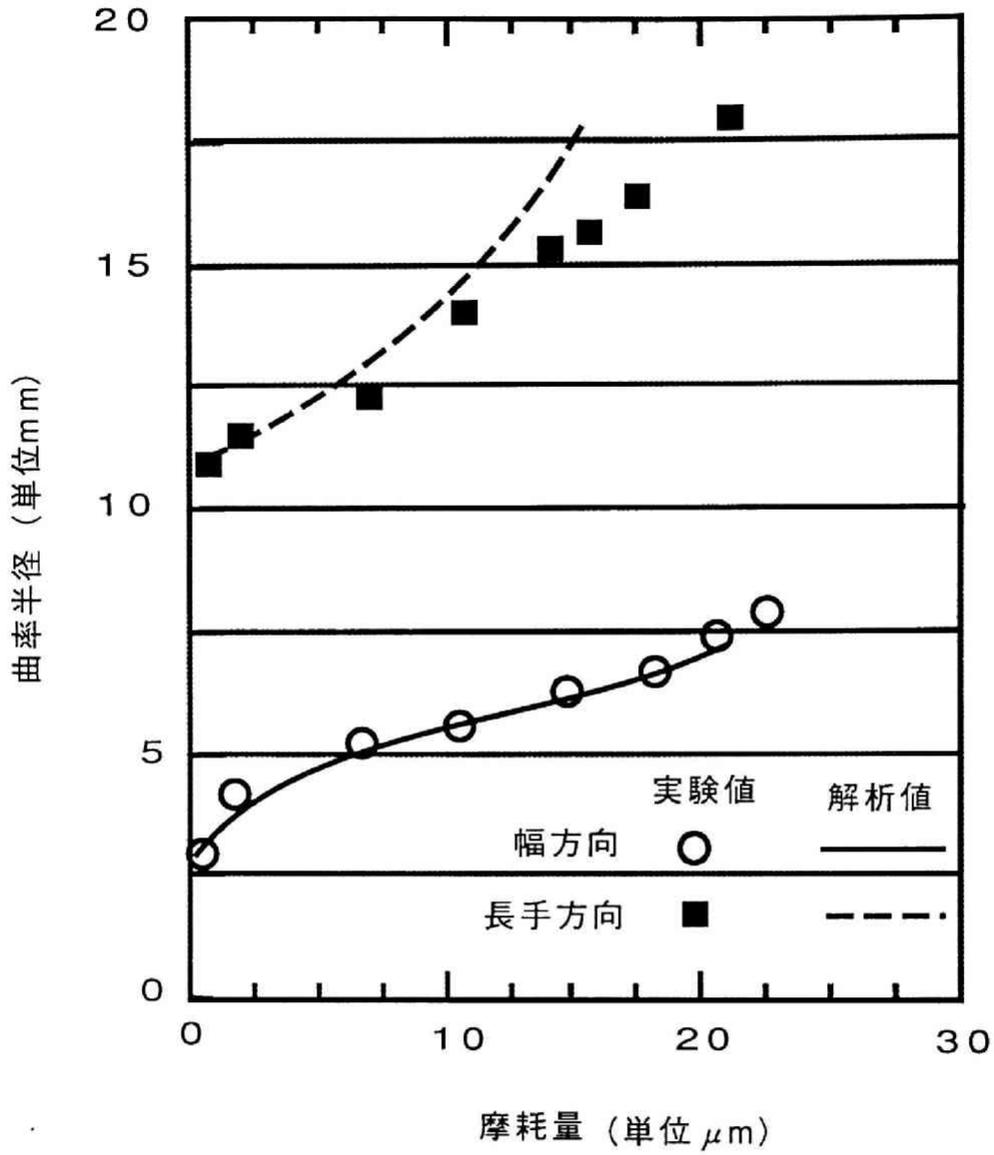


図 6.1 5 摩耗の進行における  
磁気ヘッドの曲率半径の変化

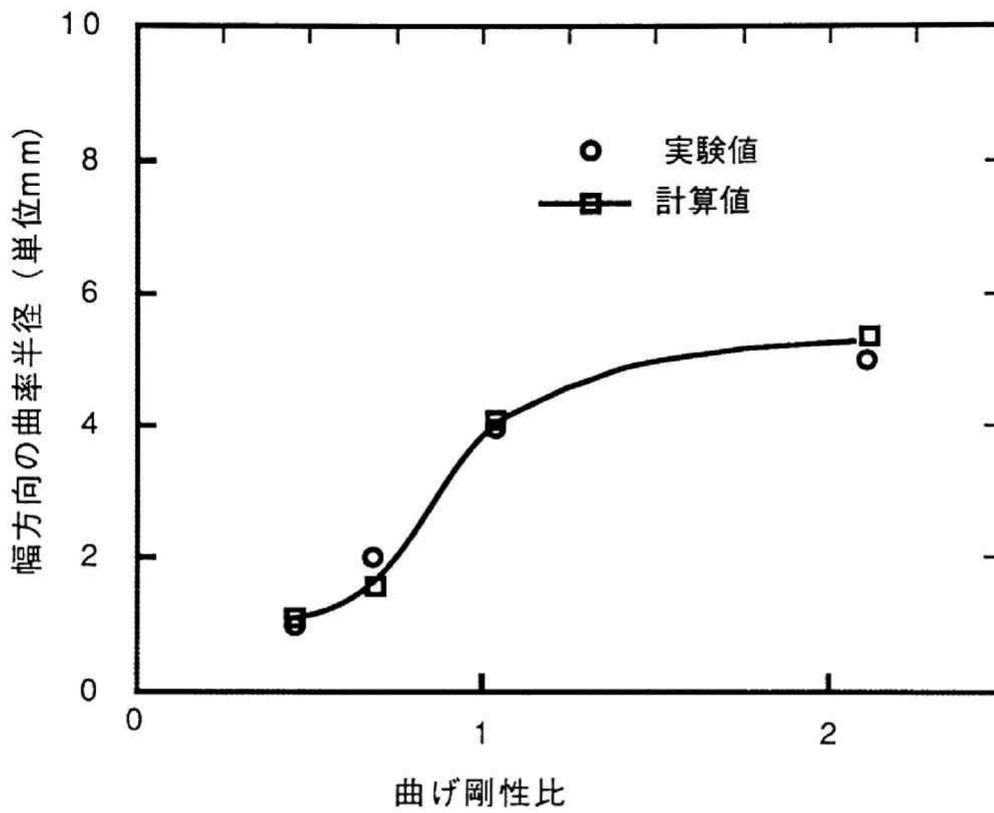


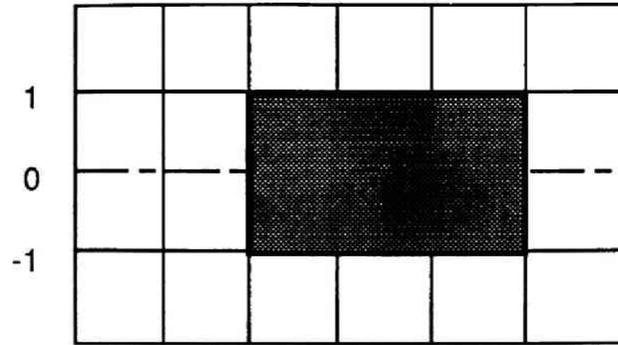
図 6.1 6 曲げ剛性比と幅方向の  
曲率半径  $r$  の関係

化を比較することはできない。そこで、これらの違いの影響が最も少ない、磁気ヘッド中央における、摩耗後の幅方向の曲率半径と磁気テープの幅方向の曲げ剛性との関係で示すことにした。横軸の曲げ剛性比は、3-2式より算出した曲げ剛性をもとに、表6.3のAの磁気テープを基準としてその比を算出した。図において、○印は実験結果を□印は解析結果を示す。両者はよく一致している。この図から、磁気テープの幅方向の曲げ剛性の違いにより、磁気ヘッドの摩耗形態と幅方向の曲率半径が変化し、曲げ剛性比率が1以上では曲率半径がある一定の値に収束する傾向を示すことが分かる。

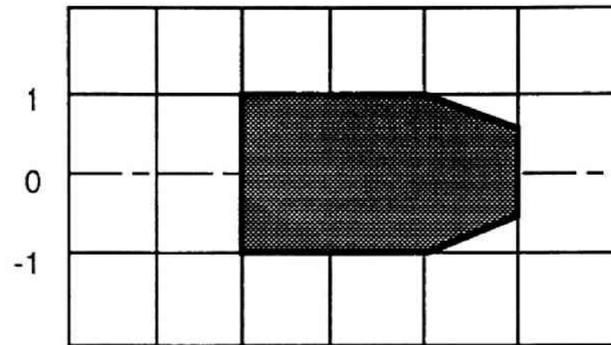
### 6.3 エンベロープ解析

#### 6.3.1 エンベロープについて

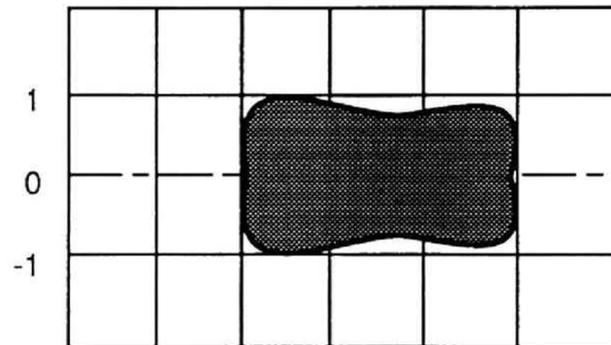
磁気記録装置において、磁気テープと磁気ヘッド（ギャップ）との距離が離れると、磁気信号は減衰する。その減衰量は1-1式で算出できる。VTR装置のように磁気ヘッドをドラムとともに回転させ、ドラムに斜めに磁気テープをかけると、図4.11のように磁気テープに対して斜めに信号を記録することになる。ドラムにかけた磁気テープの浮上量については、第5章でその特徴を示した。磁気テープはドラムの入側と出側及びその間において、磁気ヘッドとドラム上での浮上量が変化する。この結果、ギャップと磁気テープの間の距離が磁気ヘッドの位置（磁気テープとの相対位置）により変化し、記録信号及び再生信号の出力が変化する。その出力信号を図式的に表したのが、図6.17である。横軸は入側からの磁気ヘッドの回転角度位置であり、縦軸は最大出力を±1とした時の出力である。この信号を、その形状からエンベロープと呼ぶ。一定の強度を持つ正弦波信号を記録し再生した場合、磁気ヘッドの角度位置による出力信号の減衰がなければ、出力信号は図6.17(a)の様に一定の出力強度となる。しかし、ギャップ上の磁気テープの距離が磁気ヘッドの位置により変化することによって、この出力信号は図6.17(b, c, d)のような3種類の形状に減衰する。図6.17(b)は信号の後端が減衰した場合で、出側で磁気テープの浮上量が増加した場合に生じる。後端部での磁気テープの浮上量増加する一つの要因として、磁気テープとガイドローラ及び下ドラムと磁気ヘッド等との摩擦の影響により、磁気テープにかけられている張力が入側よりも低くなることが考え



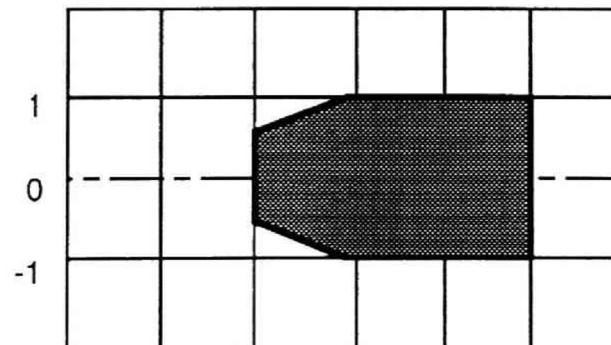
0度 60度 120度 180度  
 (a) 正常のエンベロープ



0度 60度 120度 180度  
 (b) 出側の減衰



0度 60度 120度 180度  
 (c) 中間での減衰



0度 60度 120度 180度  
 (d) 入側での減衰

図 6.1 7 エンベロープのパターン

られる（図5.12参照）。図6.17（c）は信号の中央部の出力が減衰する場合を示し、ドラムの入側と出側の中間での磁気テープの浮上量が増加した場合の出力信号である。図6.17（d）は信号の前端部の出力が減衰する場合である。これは、例えばドラムの回転速度が早くなり入側での磁気テープの浮上量が増加した場合に現れる。

以上のような信号の減衰量を表す指標として、6-7式で定義するエンベロープ比Envを用いる。

$$\text{Env} = 100 \cdot (\text{Omin} / \text{Omax}) \quad 6-7$$

ここに、Omaxは出力信号の最大値を、Ominは出力信号の最小値である。

### 6.3.2 エンベロープ実験と結果

あらかじめ表6.4に示す磁気テープA（基準）を用いて1 $\mu$ m摩耗させた磁気ヘッドを用いて、表6.4に示す厚さ及び弾性定数の異なる6種類の磁気テープに、5MHzの正弦波の信号を記録し再生時における出力信号をオシロスコープで測定した。A（基準）の磁気テープに対して記録再生を行った場合には、磁気ヘッドが摩耗により磁気テープになじんでいるために、図6.17（a）に示すような、入側から出側まで一定の出力を得ることができた。

磁気テープは厚さ及び弾性定数と弾性定数の異方性比率が異なるために、第6.2節の場合と同じ様に曲げ剛性を指標にしてその違いを整理した。

図6.18に曲げ剛性とエンベロープ比の関係を示す（出力信号を表示）。磁気テープの曲げ剛性が低い場合は、出力信号は出側での減衰が大きい。曲げ剛性が3.0（ $\mu\text{Pam}^3$ ）から10.0（ $\mu\text{Pam}^3$ ）の磁気テープでは出力の減衰はなく、曲げ剛性が10.0（ $\mu\text{Pam}^3$ ）を越える磁気テープでは図6.17（d）の形態の入側における減衰を生じている。つまり、磁気テープの曲げ剛性が高くなると入側での出力が減衰し、曲げ剛性が低いと出側での出力が減衰することが分かった。

### 6.3.3.エンベロープ予測計算

磁気テープの再生信号の減衰量は、ギャップの上での磁気テープの浮上量を求めること

表 6.4 エンベロープの実験及び計算に使用した磁気テープの特性

(a) 実験

	A (基準)	B	C	D	E	F
Young's Modulus Ex/Ey GPa	6.96 /5.43	5.34 /4.38	7.84 /5.49	4.50/3.60	7.30/4.67	8.23/4.77
Poisson's ratio $\nu_x/\nu_y$	0.44/0.343	0.44/0.36	0.44/0.3	0.44/0.35	0.44/0.28	0.44/0.255
Stiffness MD/TD $\mu\text{Pam}^3$	4.55 /3.22	11.1/8.47	3.02/1.89	39.6/29.3	2.80/1.58	2.43/1.23
Thickness $\mu\text{m}$	18.5	27.2	15.5	44.0	15.5	14.2
Width $\mu\text{m}$	12650	12650	12650	12650	12650	12650

(b) 計算

	A (基準)	B	C	D	E	F
Young's Modulus Ex/Ey GPa	6.96 /5.43	5.34 /4.38	7.84 /5.49	4.50/3.60	8.23/4.77	10.07/7.05
Poisson's ratio $\nu_x/\nu_y$	0.44/0.343	0.44/0.36	0.44/0.3	0.44/0.35	0.44/0.255	0.44/0.0.3
Stiffness MD/TD $\mu\text{Pam}^3$	4.55 /3.22	11.1/8.47	3.02/1.89	39.6/29.3	2.80/1.58	2.43/1.23
Thickness $\mu\text{m}$	18.5	27.2	15.5	44.0	14.2	11.0
Width $\mu\text{m}$	12650	12650	12650	12650	12650	12650

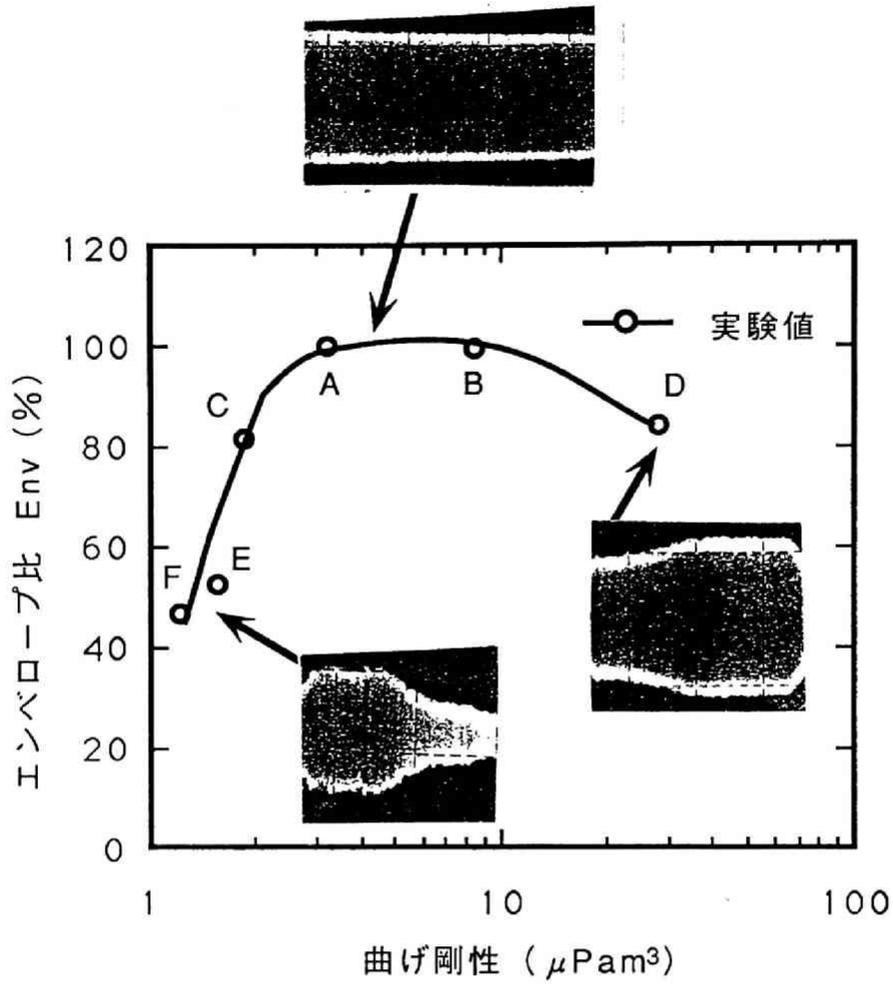


図 6.1 8 磁気テープの曲げ剛性の違いによるエンベロープ比の変化

ができれば、1-1式を用いて算出できる。そこで、表6.4(a)に示した実験に用いたものと類似の6種類の材料定数と形状を持つ磁気テープ(表6.4(b)に示す磁気テープAからF)について磁気テープの浮上量を解析した。磁気ヘッド(幅方向の曲率半径 $r = 2.9 \text{ mm}$ で長手方向の曲率半径 $R = 13.1 \text{ mm}$ の回転楕円体)を第6.2節の摩耗解析で使用したドラムに表面から $45 \mu\text{m}$ 突出させて取り付けた場合を想定し、磁気テープ(厚さ $18.5 \mu\text{m}$ , 弾性定数 $6.96 \text{ MPa}$ , 異方性比率 $0.78$ , 基準磁気テープA)を用いて $1 \mu\text{m}$ 摩耗させるシミュレーション計算を行った後の磁気ヘッド形状を、エンベロープ解析のための磁気ヘッド形状として用いた。

図6.19にエンベロープ予測計算の概念図を示す。上述したように厚さと弾性定数の異なる6種類の磁気テープを用いて、図に示す7箇所(ドラムの入側から0度, 30度, 60度, 90度, 120度, 150度, 180度の位置)における磁気テープの浮上量解析を行った。磁気テープの浮上量は磁気ヘッドの上では幅方向に一様ではないため、浮上量解析の結果得られるギャップ部での浮上量 $h$ からその平均値(幅方向の平均値)を求めてそれを代表浮上量とし、1-1式を用いて信号の減衰量を算出した。こうすることによって、磁気テープ(表6.4(b)の磁気テープA)により摩耗した磁気ヘッドを用いて、機械特性の異なる6種類の磁気テープに5MHzの正弦波信号を記録再生する時の、エンベロープを計算することができる。

#### 6.3.4 解析結果と考察

図6.20に、厚さ $15.5 \mu\text{m}$ で弾性定数が $7.84 \text{ GPa}$ の磁気テープ(磁気テープC)を用いた場合の、入側から30度, 60度, 90度, 120度, 150度の位置に磁気ヘッドがきた場合の、磁気ヘッド近傍の磁気テープの変形形状を示す。入側から30度から90度の領域では磁気テープは磁気ヘッドの表面に沿って変形している。それに対して120度以降では、磁気ヘッドの両端で磁気テープが接触し、ギャップのある中央部では浮いていることが分かる。ギャップ部における幅方向の浮上量を平均し、その値を代表浮上量とし、この代表浮上量を式1-1に代入し減衰量を算出したエンベロープの計算結果を図6.21(a)に示す。ここでは0度位置での信号出力を1として、減衰係数を算出している。

図6.20に示したように、120度の位置以降での領域において、磁気テープの中央

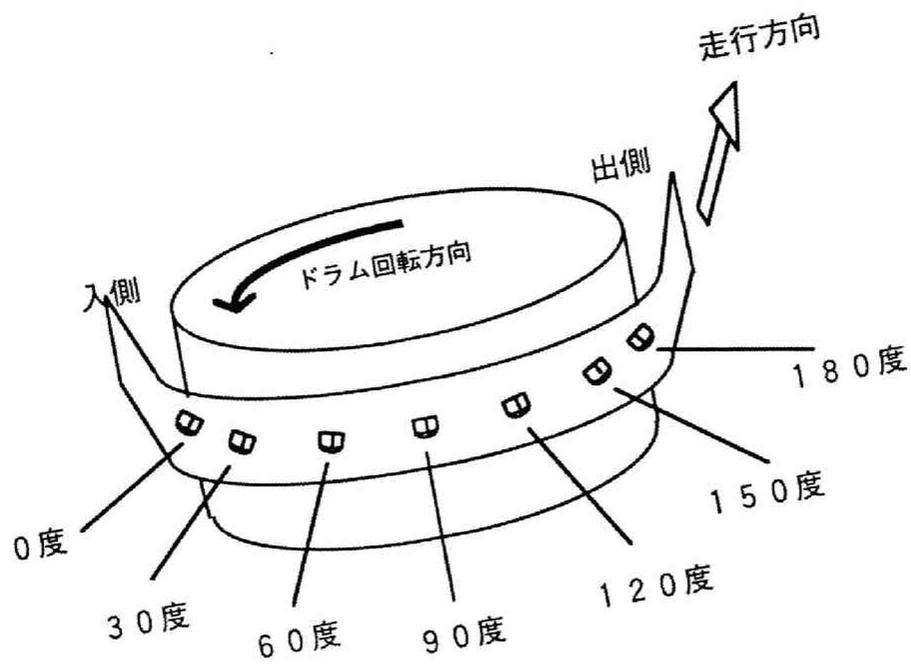
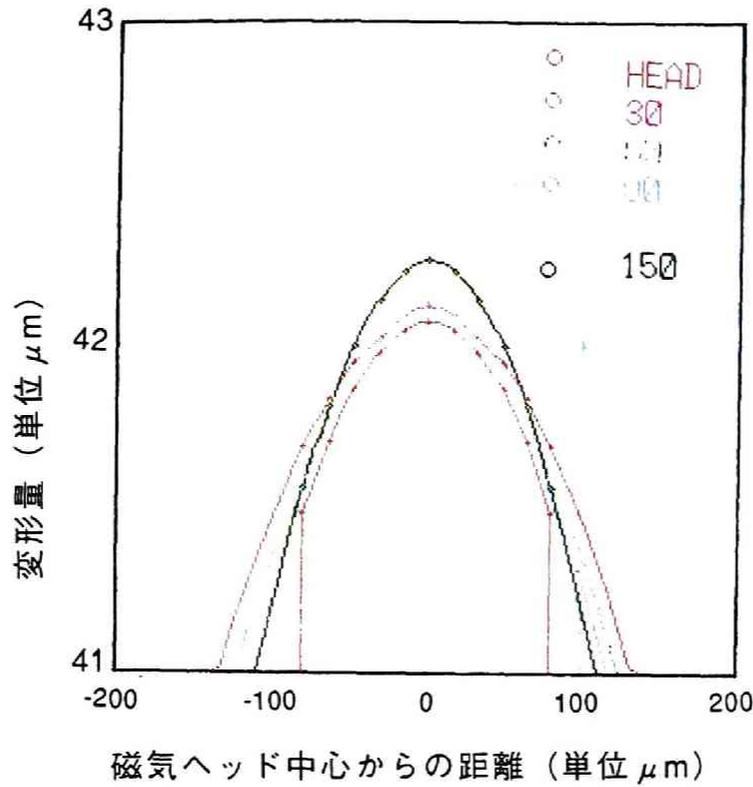
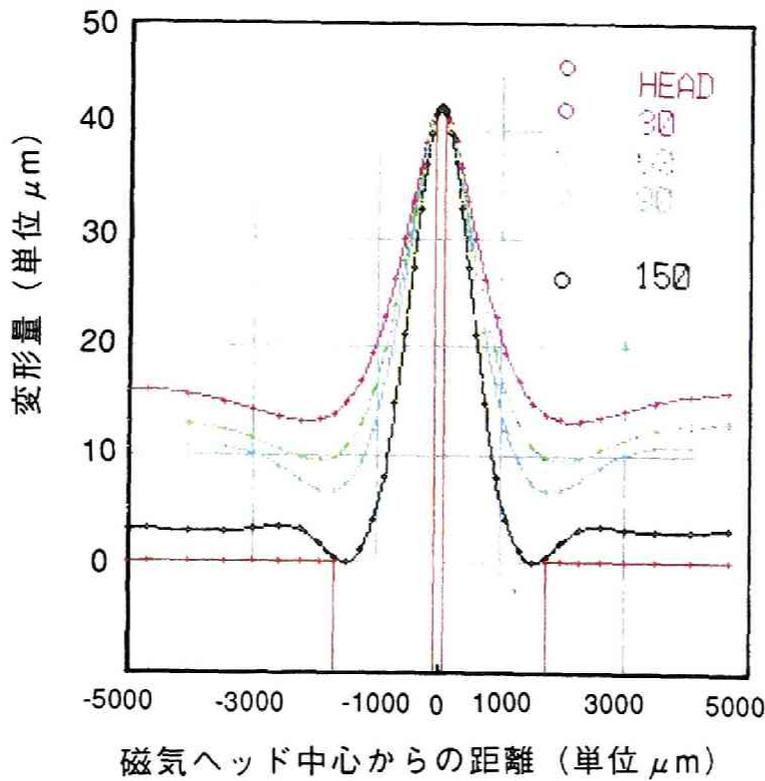


図 6.19 エンベロープ解析概念図

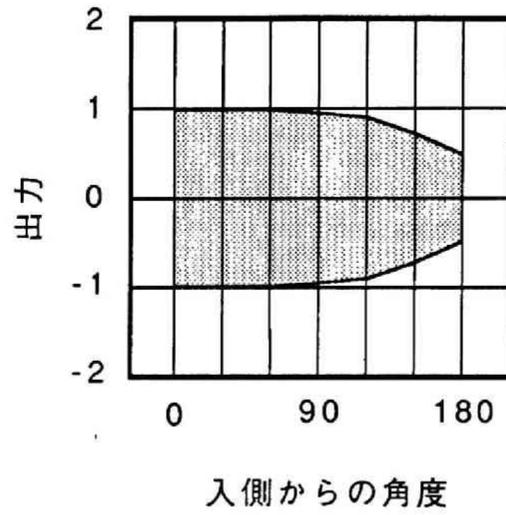


(a) 磁気ヘッド上

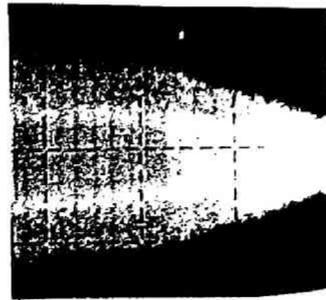


(b) 磁気ヘッド近傍

図 6.2 0 磁気テープ変形形状のドラム位置依存性



( a ) 解析結果



( b ) 実験結果

図 6.2 1 薄手テープのエンベロープ

の浮上量が増加し、磁気ヘッドの角に接触するように磁気テープは変形している。その結果、図 6.2 1 (a) に示すように、平均浮上量が増加し出側での信号が減衰する。図 6.2 1 (b) は解析に使用したのと同じ条件における実験結果である。実験結果においても 120 度の位置以降で信号の減衰が生じており、解析結果のエンベロープ形状とよく一致している。

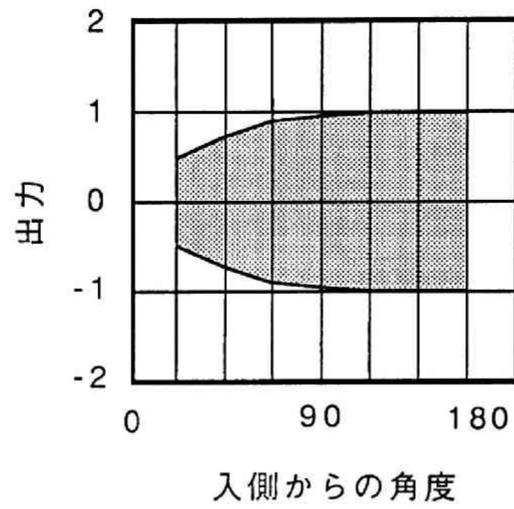
図 6.2 2 に、厚さ  $44\ \mu\text{m}$  で弾性定数  $4.5\ \text{GPa}$  の磁気テープ (磁気テープ D) の浮上量解析により算出したエンベロープを示す。図 6.2 2 (a) は解析結果である。磁気テープは入側において図 6.3 (c) のように変形していたので、その結果、入側での信号が減衰しエンベロープは入側の部分が減衰している。図 6.2 2 (b) は計算に対応する磁気テープを用いて行った実験結果であるが、やはり入側での信号の減衰が生じている。

これら薄手磁気テープ及び厚手磁気テープの解析結果と実験結果がよく一致していることより、本研究で提案する手法によりエンベロープの解析が定性的に実現できていると言える。

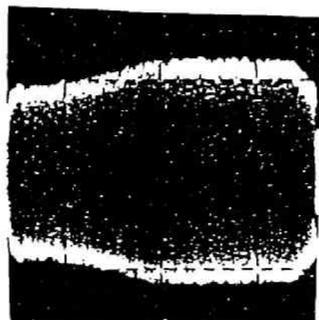
図 6.2 3 に、6 種類の磁気テープについてエンベロープ比と曲げ剛性の関係について、解析結果と実験結果を比較した結果を示す。○印は実験結果を□印は解析の結果を示す。エンベロープ比で整理すると、実験結果と解析結果はよく一致している。磁気テープの曲げ剛性が低い場合は、剛性の変化に対して信号の減衰が顕著に表れるが、剛性が高い場合には信号の減衰の割合は少ないといえる。つまり、より低い剛性を持つ磁気テープで記録再生を行う場合、信号の減衰は顕著に表れるが、より剛性の高い磁気テープに対しては減衰は生じるがその量は比較的小さいと言える。図 6.1 7 に示すように、解析により求めたエンベロープ比は定性的な減衰傾向のみならず、その減衰量においても実験結果とよく一致を示している。すなわち、本方法を用いて、定量的にもエンベロープを解析することが可能であることを示している。

#### 6. 4 結論

本章では、第 5 章までにその有効性を示したインターフェース解析手法を用いて、実際の VTR 装置の開発において問題となる、磁気ヘッドの摩耗と、磁気テープの材料定数の違いによる記録再生信号の減衰特性の解析を行う方法を提案した。



( a ) 解析結果



( b ) 実験結果

図 6.2 2 厚手テープのエンベロープ  
(  $t = 44.0 \mu\text{m}$  )

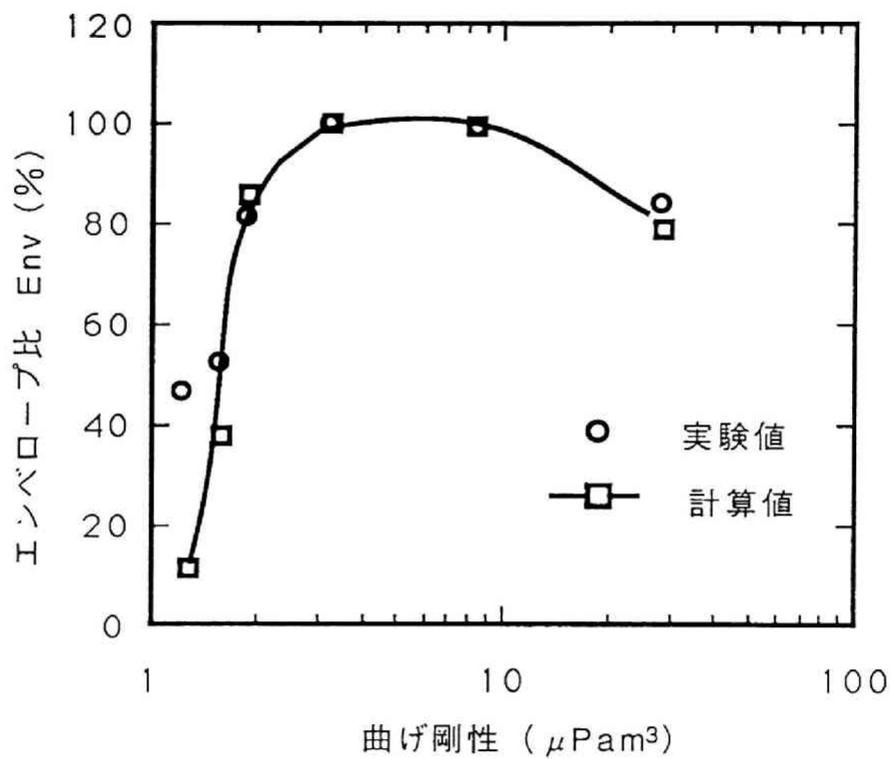


図 6.2 3 磁気テープの曲げ剛性の違いによるエンベロープ比の解析結果

磁気ヘッドの摩耗解析において、真実接触面積を解析で求めることは困難であり、また、摩耗現象そのものの理論的な裏付けが不明確であるため、本研究では、独自の摩耗モデルを提案した。すなわち、磁気テープと磁気ヘッドの平均表面粗さが存在することを利用して、浮上解析の結果、磁気ヘッド上での磁気テープ浮上量が $0.24\ \mu\text{m}$ 以下の部分における磁気ヘッドの表面形状を次式を用いて修正するものである。

$$W(\mu\text{m})=C_1(C_2/h)^2 \quad 6-6$$

この摩耗計算モデルは、磁気テープとドラム及び磁気ヘッドの間の潤滑と、それに伴う磁気テープの変形を考慮している点で、従来の静的接触による摩耗計算モデルとは異なる。

この摩耗計算モデルを用いて、磁気ヘッドを回転ドラムに取付け磁気テープをドラムに対して平行にかけた場合について、磁気ヘッドの摩耗解析を行い、実験結果と比較した。その結果以下のことが明かとなった。

- 1) 摩耗実験の結果得られた磁気ヘッドの形状と、摩耗解析の結果得られた磁気ヘッドの形状を比較した。磁気ヘッド表面の曲率半径とその分布は、走行方向、幅方向ともに良い一致を示した。
- 2) 摩耗後の磁気ヘッドの表面形状のみならず、摩耗の過程における形状を実験結果と解析結果で比較した結果、両者は定量的にも良く一致していた。

以上のことから、本研究で提案した、摩耗計算モデルと計算方法の有効性が確認できたと結論できる。しかし、本研究で提案した摩耗モデルにおいては、磁気ヘッドと磁気テープの材料特性と表面粗さ及び摩耗環境（温度、湿度等）の効果を考慮していない。今後より汎用的に摩耗解析を行うためには、これらを考慮した摩耗モデルを構築することが必要である。

次に、磁気テープに正弦波信号を記録再生する時の、出力信号がドラムの回転角度により減衰する、いわゆるエンベロープを計算で求めることを試みた。浮上解析の結果得られる磁気テープと磁気ヘッドとの距離をもとに、出力信号の減衰量を予測した。基準の磁気テープを用いて、上記摩耗計算によってあらかじめ磁気ヘッドを $1\ \mu\text{m}$ 摩耗させ、その磁気ヘッドに材料定数の異なる6種類の磁気テープをかけた場合について、磁気ヘッドが種々の位置に来た時の磁気ヘッド近傍での磁気テープの浮上量解析を行い、エンベロープの予測計算を行った。また、基準の磁気テープを用いてあらかじめ磁気ヘッドを $1\ \mu\text{m}$ 摩耗させた磁気ヘッドに、解析の場合と同様の材料特性を持つ磁気テープをかけ、5 MHzの

正弦波信号を記録再生し、出力信号を測定した。実験結果と解析結果とを比較した結果、以下の結論を得た。

- 1) 実験結果と解析結果は定性的に良い一致を示し、本研究で求めたインターフェース解析方法により、出力信号エンベロープの解析が可能であることが分かった。

本章で提案した磁気ヘッドの摩耗及び出力信号エンベロープの予測計算の解析結果が、実験結果と定量的、定性的に良い一致を示したことは、本研究で用いた、支配方程式と材料異方性等の考慮が適切であったことを示す。さらに、本章の結果、本研究で開発した解析方法は定量的にVTR装置のインターフェースを解析でき、実機の研究開発の有効な数値実験技術であると結論できる。

## 第 7 章 結 論

本研究では、映像及び音響をはじめとする各種情報の記録再生装置としての、V T R 装置におけるインターフェース現象の解明と、磁気ヘッド及びドラムと磁気テープの走行条件及び各設計変数の最適化を実現することを目的に、インターフェース解析手法を提案し、その有効性について検討した。

現象を、流体と構造の連成問題として定式化し、解析及び実験の両面から検討し、

- 1) 3次元流体構造連成解析理論による数値計算方法の確立
- 2) 磁気テープの材料定数及び磁気テープ浮上量の測定方法の確立
- 3) 簡易モデルによる解析手法の検討と精度の確認
- 4) 実機解析手法の提案及び問題点の抽出
- 5) 磁気ヘッドの摩耗解析と記録信号特性解析への応用展開の検討

を行った。以下に、本研究の結果の概要を示す。

第 1 章では、本研究の工業的な重要性を示すとともに、従来の方法における技術的課題について述べた。

第 2 章では、まず現象について論じ、現象解析に必要な支配方程式について整理した。磁気テープと磁気ヘッド及びドラムの間には発生する潤滑膜圧力と隙間の大きさに関して、磁気テープの平均浮上量と磁気ヘッドの面積とクヌッセン数の観点から検討を加え、支配方程式として修正レイノルズ方程式を用いることを示した。また、磁気テープの変形については、実際の V T R 装置における磁気テープの変形の特徴をもとに検討し、微小変形理論に基づく面内変形及び面外変形の力の釣合方程式を支配方程式として用いることを示した。さらに、磁気テープの材料異方性を示し、支配方程式に材料異方性を考慮する必要性を示し支配方程式に材料異方性を取り入れた。

そして、一連の支配方程式を有限要素法で離散化する方法と、離散化した結果、解くべ

き方程式を求めた。さらに、得られた方程式を解く方法として、全ての方程式を連立したヤコビアン行列を解く方法を示した。そして、従来のそれぞれの方程式を別々に解く方法と比較し、本研究で用いる方法が解の方向を正確に認識しながら計算できる根拠を示し、解析精度及び計算時間においてより有効であることを示した。

第3章では、本研究で解析に必要な各種材料定数の測定方法と、解析結果の検証のために行った磁気テープの浮上量の測定方法について論じた。解析に最も必要な、磁気テープの材料定数の測定方法として、超音波による測定方法を用い、その測定結果を引張り試験の結果と比較することで、その有効性を示した。また、非接触で、走行中の磁気テープの浮上量を測定する方法を示した。

第4章では、まず第2章で展開し求めた解析理論をもとに、VTR装置のインターフェースを解析する計算アルゴリズムを示した。次に本研究で提案する方法の精度と特性を論じることを目的とし、実機VTRの構造を簡略化した構造モデルについて解析と実験により検討した。解析モデルは、矩形の溝を設けたドラムに、磁気テープを平行に掛けたモデルと、家庭用VTRの磁気ヘッドを取り付けたドラムに磁気テープを平行に掛けたモデルとし、解析及び実験により以下の結果を得た。

- 1) いずれのモデルにおいても、計算値と実験値は最大3%の誤差で一致した。
- 2) 溝を設けたドラムを用いた場合の磁気テープ浮上特性の解析の結果、溝内の角を回る渦の影響があり、溝の内部での磁気テープの変形形状は、解析と実験とは異なっていた。しかし、磁気ヘッドを取り付けた場合には、磁気ヘッド用の穴付近ではそのような違いは認められなかった。すなわち、磁気ヘッドを考慮する場合には、取り付け穴の内部の渦の影響は無視できると考えられる。
- 3) 磁気テープの材料異方性について検討した結果、材料異方性は解析結果を大きく左右することが分かった。定量的にインターフェースを解析するには、磁気テープの材料異方性の考慮は必須であり、本研究で用いた材料定数が正しく、また、材料異方性の解析理論への組み込みが有効に行われていることが確認できた。
- 4) 磁気ヘッド前方での圧力上昇ならびに磁気ヘッドと磁気テープの接触による摩擦力が、磁気ヘッド前方の磁気テープ変形及び浮上量に影響すると思われる。磁

気ヘッドと磁気テープの相対速度が増加すると、この影響はより顕著になると推測される。今後これらの点について検討する必要がある。

- 5) 磁気ヘッド近傍をドラム全体から切り出して解析した結果、切り出した部分の境界条件が解析結果に大きく影響していた。今後、効率のよい解析を実現するためには、ドラム上での磁気テープの浮上特性を解析し、磁気ヘッド近傍の解析に必要な各種条件を抽出する方法を検討する必要がある。
- 6) 従来多く用いられてきた、潤滑膜圧力と磁気テープの変形を別々に解く方法と本方法を比較した結果、本方法が収束性において優れていることが分かった。

第5章では、本研究で提案した方法により実機のVTR装置の磁気テープ浮上量特性解析へ展開した。まず、実機解析において、必要な計算機資源をできるだけ削減し、かつ高精度解析を簡便に行う方法について検討し、新たな計算方法を提案した。すなわち、解析対象及び領域を磁気ヘッドを持たないドラムだけの場合の磁気テープ浮上量解析と、磁気ヘッドの近傍の浮上量解析に分離して別々に解析するものである。まずドラム全体での磁気テープの浮上量を解析し、その解析結果をもとに磁気ヘッド近傍を解析する。磁気ヘッド近傍解析に対しては、計算に必要な境界条件及び初期条件を、ドラム全体の浮上解析の結果より算出する方法について示した。

実機のドラム及び磁気ヘッドと磁気テープを用いて、ドラム上の磁気テープ浮上量分布を測定し、同様のモデルに対して行った解析結果と比較した。また、実機における磁気ヘッド近傍の磁気テープの変形及び浮上量を測定し、同様の条件における解析結果と比較し以下の結果を得た。

- 1) 解析結果と実験結果はよく一致しておりその誤差は5% (RMS) 以内であった。
- 2) 磁気テープの浮上量及び変形は下ドラムの摩擦の影響を受けることが分かった。
- 3) 計算にはIBM社製のEWS (RS6000/550) を使用し、全体領域解析、部分領域解析とも要素数は約2000、未知数は約14000で、計算時間は約40分であった。(記憶容量70MB)

以上のことより、第5章で提案した実機解析の方法は実機のインターフェース現象を定量的に、かつ、簡便に解析することが可能であるとの結論を得た。

第6章では、第5章までにその有効性を示した、インターフェース解析手法を用いて、実際のVTR装置の開発において問題となる、磁気ヘッドの摩耗と、磁気テープの材料定数の違いによる、記録再生信号特性の解析を行う方法を提案した。また、摩耗現象を解析するために、磁気ヘッドの表面形状を測定する方法を論じ、そして測定結果より3次元スプライン補間を用いて定量的に磁気ヘッドの形状を処理する方法について示した。

磁気ヘッドの摩耗解析において、真実接触面積を解析で求めることが困難であり、また、摩耗現象そのものの理論的な裏付けが不明確であるため、本研究では、独自の摩耗モデルを提案した。すなわち、磁気テープと磁気ヘッドの平均表面粗さが存在することを利用して、磁気テープ浮上量解析の結果、磁気ヘッド上での磁気テープ浮上量がある値以下にある節点に対する磁気ヘッドの表面形状を修正するものである。この摩耗計算モデルは、磁気テープとドラム及び磁気ヘッドの間の潤滑膜の存在と、それに伴う磁気テープの変形を考慮している点で、従来の静的接触による摩耗計算モデルと異なる。この摩耗計算モデルを用いて、実際の磁気ヘッドを回転ドラムに取り付け、磁気テープをドラムに対して平行にかけた場合について、磁気ヘッドの摩耗解析を行い、実験結果と比較し、以下の結果を得た。

- 1) 摩耗実験の結果得られた磁気ヘッドの形状と、摩耗解析の結果得られた磁気ヘッドの形状を比較した。磁気ヘッド表面の曲率半径とその分布は、走行方向、幅方向ともに良い一致を示した。
- 2) 摩耗後の磁気ヘッドの表面形状のみならず、摩耗過程においてその形状の変化を実験結果と解析結果で比較した結果、両者は定量的にも良く一致した。

また、磁気テープに正弦波信号を記録再生する時の、出力信号がドラムの回転角度位置により減衰する、いわゆるエンベロープを計算で求めることを試みた。磁気テープ浮上量解析の結果得られる磁気テープと磁気ヘッドとの距離をもとに、信号の減衰量を予測した。S-VHSの磁気テープを用いてあらかじめ磁気ヘッドを $1\mu\text{m}$ 摩耗させ（摩耗計算により磁気ヘッドの形状を変更）、その磁気ヘッドに材料定数の異なる4種類の磁気テープをかけた場合について、ドラムの7箇所回転角度位置での磁気ヘッド近傍の磁気テープ浮上量解析を行い、エンベロープの予測計算を行った。また実機を用いて、S-VHSの磁気テープを用いてあらかじめ磁気ヘッドを $1\mu\text{m}$ 摩耗させた磁気ヘッドに、解析と同様の材料特性を持つ磁気テープをかけ、5MHzの正弦波信号を記録再生し、ドラムの各回転位

置に対して出力信号を測定した。実験結果と解析結果とを比較した結果、両者は定性的かつ定量的に良い一致を示し、本研究で求めたインターフェース解析方法により、エンベロープの解析が可能であることが分かった。

第2章から第6章で示した結果を総合すると、以下のことが言える。

- A) 本研究で提案した解析方法によってVTR装置のインターフェース現象を解明でき、磁気ヘッドの形状等の各種設計変数の相互作用を定量的に評価することが可能になったと結論できる。
- B) 本研究の解析技術を用いることにより、実験に代って加速度的かつ高精度に現象を再現し、評価することが可能であることを示した。
- C) 本研究において流体膜の圧力については修正レイノルズ方程式を支配方程式とし、磁気テープの変形に対しては微小変形理論における異方性シェルの面内及び面外変形の力の釣合方程式を支配方程式としたが、これら一連の支配方程式を解くことでインターフェースを解析することが可能であると結論できる。
- D) 今後さらに本研究の成果を発展させるには、次の4点について特に考慮する必要があることを示した。
  - 1) 磁気ヘッドの取り付け穴の圧力分布
  - 2) 磁気テープと磁気ヘッド及びドラムの接触。  
(これには、表面粗さを考慮した、真実接触面積を検討する必要がある。)
  - 3) 磁気テープとドラム及び磁気ヘッドの接触による摩擦力
  - 4) スクイズフィルム効果の影響
  - 5) 磁気ヘッドの摩耗に対する材料特性の考慮

本研究で確立した解析方法は、実機VTR装置の動作特性を定量的にかつ効率良く解析できる計算機実験の基礎となるものであり、今後さらに発展が期待できる。これらの意味において、本研究はVTRという家庭用及び業務用の情報記録装置の研究開発において、重要な数値実験技術を生むものである。

今後、高密度記録及び環境問題（省資源、省エネルギー、リサイクル）に向けての、技術開発に寄与することが期待される。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] 松本光功, " 磁気ヘッドと磁気記録" 総合電子出版社,1983
- [ 2 ] B.Bhushan, " Tribology and Mechanics of Magnetic Storage Devices" .Springer-Verlag,1990
- [ 3 ] Wallace,R.L., " The reproduction of magnetically recorded signal" Bell Syst. Tech.J.30,1145,1951
- [ 4 ] 竹村裕夫,田中繁夫," 家庭用ビデオ機器" コロナ社, 1991
- [ 5 ] Bhushan,B., " Head-wear measurements by autoradiography of the worn magnetic tapes" ,Trans.ASME,J.Trib., 108,241-255,1986
- [ 6 ] 上中浩之, 向江秀明,他 2 名." テープ剛性がヘッド/テープ接触状態に及ぼす影響" 日本応用磁気学会誌13, 77-80,1989
- [ 7 ] 溝尾嘉章, 養田広, " 磁気ヘッドの摩耗のエンベロープに及ぼす影響" 日本応用磁気学会誌 15, 129-132,1991
- [ 8 ] Block,H.,Rossum,J.J.," The Foil Bearings - A New Departure in Hydrodynamic Lubrication" , Lubrication Engineering, 316-320,1953
- [ 9 ] Eshel,A.,Elrod,H.G.," Theory of Infinitely Wide, Perfectly Flexible, Self-Acting Foil Bearing" , Trans.ASME, J. Basic Engineering, Vol.87,No.4,831-836,1965
- [ 1 0 ] Eshel,A.,Elrod,H.G.," Stiffness Effects on the Infinitely Wide Foil Bearings" , Trans.ASME, J.O.L.T., Vol.89,No.1,92-97,1967
- [ 1 1 ] Balow,E.J.," Derivation of Governing Equations For Self-Acting Foil Bearings" ,Trans.ASME, J.Lubrication Technology,Vol.89,No.3,334-340,1967
- [ 1 2 ] Balow,E.J.," Self-Acting Foil Bearings of Infinite Width" , Trans.ASME, J.Lubrication Technology,Vol.89,No.3,341-345,1967
- [ 1 3 ] Eshel,A.," Compressibility Effects on the Infinitely Wide, Perfectly Flexible Foil Bearings" , Trans.ASME, J.Lubrication Technology, Vol.90,No.1,221-225,1968
- [ 1 4 ] Eshel,A.," On Controlling the Film Thickness in Self-Acting Foil Bearings" , Trans.ASME, J.Lubrication Technology, Vol.92,No.2,359-362,1970
- [ 1 5 ] Eshel,A.," On Fluid Inertia Effects on the Infinitely Wide Foil Bearings" , Trans.ASME, J.Lubrication Technology, Vol.92,No.3,490-494,1970
- [ 1 6 ] Licht,L.," An Experimental Study of Elastohydrodynamic Lubrication of Foil Bearings" , Trans.ASME, J.Lubrication Technology, Vol.90,No.1,199-220,1968
- [ 1 7 ] Wildmann,M.," Foil Bearings" Trans.ASME, J.Lubrication Technology, Vol.91,No.1,37-44,1969
- [ 1 8 ] 森美郎,矢部寛,林和宏," フォイル軸受の 2 次元潤滑理論" , 日本機械学会論文 集 (第3部) ,35巻,276号,1781-1787,1969
- [ 1 9 ] 森美郎,林和宏,横見哲介," フォイル軸受に関する研究 (フォイル形状の実 験的検討)" 日本機械学会論文 集 (第3部) ,37巻,295号,602-

610,1971

- [ 2 0 ] 森美郎,林和宏,横見哲介," フォイル軸受に関する研究 (圧縮性の影響について)" 日本機械学会論文集 (第3部),37巻,303号,2229-2235,1971
- [ 2 1 ] 森美郎,林和宏,横見哲介," フォイル軸受に関する研究 (小さな巻角の影響について)" 日本機械学会論文集 (第3部),37巻,313号,2414-2422,1972
- [ 2 2 ] 森美郎,林和宏,横見哲介," フォイル軸受に関する研究 (有限幅の影響について)" 日本機械学会論文集 (第3部),41巻,342号,685-692,1977
- [ 2 3 ] 森美郎,矢部寛,中山昭三," フォイル軸受に関する研究 (フォイル剛性の影響についての理論解析)" 日本機械学会論文集 (第3部),43巻,366号,730-735,1977
- [ 2 4 ] 谷豊文,矢部寛,他2名," フォイル軸受におけるテープ浮上解析について" 日本機械学会論文集 (C編),52巻,480号,2135-2140,1986
- [ 2 5 ] Sahl,K.J.,White,J.W.,Decket,K.L.," Dynamic Response of Self-Acting Foil Bearings" ,IBM Journal of Research & Development,Vol.18,No.6,513-520,1974
- [ 2 6 ] Greenberg,H.J.," Study of Head-Tape Interaction in High Speed Rotating Head Recording" IBM Journal of Research & Development,Vol.23,No.2,197-205,1979
- [ 2 7 ] 小野右京,原臣司,村田幸嗣," 磁気テープの変形特性" ,日本機械学会論文集 (A編),45巻,393号,535-542,1979
- [ 2 8 ] 水川真,小野右京," 球面フォイル軸受の研究 (第1報, フォイル変形に張力が支配的な場合の理論研究)" ,日本機械学会論文集 (C編),45巻,396号,919-928,1979
- [ 2 9 ] 水川真,小野右京," 球面フォイル軸受の研究 (第2報, フォイル剛性を考慮した解析と実験)" ,日本機械学会論文集 (C編),47巻,416号,449-456,1980
- [ 3 0 ] 水川真,小野右京," 球面フォイル軸受の研究 (第3報, 軸受押込量の大きい場合の解析)" ,日本機械学会論文集 (C編),51巻,461号,95-102,1985
- [ 3 1 ] 水川真,小野右京," 球面フォイル軸受の研究 (第4報, 軸受押込量の大きい場合の実験と解析)" ,日本機械学会論文集 (C編),51巻,461号,104-111,1985
- [ 3 2 ] 福井茂寿,金子礼三," ボルツマン方程式に基づく薄膜気体潤滑特性の解析 (第1報,一般化された潤滑方程式の導出)" ,日本機械学会論文集 (C編),53巻,487号,829-838,1987
- [ 3 3 ] 福井茂寿,金子礼三," ボルツマン方程式に基づく薄膜気体潤滑特性の解析 (第2報,境界面の適応係数の影響)" ,日本機械学会論文集 (C編),53巻,492号,1807-1813,1987
- [ 3 4 ] 坂口正信," テープ/ヘッド/ドラム系1次モデルとその数値解析" ,電子情報通信学会,磁気記録研究会,資料MR80-14,11-18,1980

- [ 3 5 ] 坂口正信, "テープ/ヘッド/ドラム系のモデルとその数値解析", 電子情報通信学会, 磁気記録研究会, 資料MR80-32, 19-27, 1980
- [ 3 6 ] 原雅明, 坂口正信, 森屋隆介, "テープ浮上特性数値解析の4連ヘッドVTRへの適用", テレビジョン学会全国大会, 157-158, 1986
- [ 3 7 ] 加藤秀明, 松野進, 佐野謙一, "回転ヘッド磁気記録装置におけるテープ浮上特性解析", 日本機械学会論文集 (C編), 54巻, 504号, 1866-1872, 1988
- [ 3 8 ] 米田弘, 沢田武, "ビデオフロッピーにおけるヘッド媒体浮上特性シミュレーション", 日本応用磁気学会誌, Vol.10, No.2, 117-120, 1986
- [ 3 9 ] 米田弘, 沢田武, "VTRドラム系におけるテープ浮上特性の面内応力を考慮した解析", 日本応用磁気学会誌, Vol.12, No.2, 133-136, 1988
- [ 4 0 ] 米田弘, 沢田武, "下ドラムを固定したVTRドラム系におけるテープ浮上解析", 電子情報通信学会, VR88-50, 17-24, 1988
- [ 4 1 ] Bowden, F.P., Tabor, D., "Friction and Lubrication of Solids" Part I, Clarendon Press, 1950
- [ 4 2 ] Bowden, F.P., Tabor, D., "Friction and Lubrication of Solids" Part II, Clarendon Press, 1964
- [ 4 3 ] Greenwood, J.A., Williamson, J.B.P., "Contact of normally flat surfaces", Proc. Roy. Soc. Lond., A295, 300-319, 1966
- [ 4 4 ] Greenwood, J.A., "The Area of Contact Between Rough Surfaces and Flats", ASME, J. Lubrication Technology, 81-91, 1967
- [ 4 5 ] Bhushan, B., "Analysis of the real area of contact between a polymeric magnetic medium and a rigid surface", Trans. ASME, J. Trib., 106, 26-34, 1984
- [ 4 6 ] Mitsuya, Y., "Stokes roughness effects on hydrodynamic lubrication, Part II - Effects under slip flow boundary conditions", Trans. ASME, J. Trib., 108, 159-166, 1986
- [ 4 7 ] 太田斎, 苗村康次, 他2名, "テープと接触するヘッドの摩耗形状に関する研究 (第1報, 実験的研究)", 日本機械学会論文集 (C編), 55巻, 512号, 1061-1067, 1989
- [ 4 8 ] 太田斎, 苗村康次, 他2名, "テープと接触するヘッドの摩耗形状に関する研究 (第2報, 解析法の検討)", 日本機械学会論文集 (C編), 57巻, 542号, 3333-3340, 1991
- [ 4 9 ] Burgdorfer, A., "The influence of the molecular mean free path on the performance of hydrodynamic gas lubricated bearings", Trans. ASME, J. Basic Engineering, 81, 94-100, 1959
- [ 5 0 ] Hsia, Y.T., Domoto, G.A., "An experimental investigation of molecular rarefaction effects in gas lubricated bearings in ultra-low clearances", Trans. ASME, J. Trib., 105, 120-130, 1983
- [ 5 1 ] Gans, R.F., "Lubrication theory at arbitrary Knudsen number", J. Trib., Trans., ASME, 107, 431-433, 1985

- [ 5 2 ] Mitsuya,Y.,Ohkubo,T.,” High Knudsen number molecular rarefaction effects in gas-lubricated slider bearings for computer flying heads” , Trans. ASME, J.Trib., 108,159-166,1986
- [ 5 3 ] Hull,D.,” 複合材料入門” , 培風館,1983
- [ 5 4 ] 小林,近藤,” 弾性力学” , 培風館,1987
- [ 5 5 ] 神谷紀生,” 異方性弾性板の理論” , 森北出版,1974
- [ 5 6 ] 大久保肇,” 木板内の応力分布の一の慣例において” 機械学会論文集, 1 0 卷, 4 0 号,第一部,1944
- [ 5 7 ] Akasaka,T.,” A Practical Method of Evaluating the Isotropic Elastic Constants of Glass Mat Reinforced Plastics” ,FUKUGO ZAIRYO KENKYU, Composite materials & structures, Vol.3,No.3, 21-22. 1974
- [ 5 8 ] 神谷紀生,” 異方性弾性板の理論” 森北出版, 1974
- [ 5 9 ] 鷺津久一郎,他 4 名,” 有限要素法ハンドブックI,II” , 培風館,1983
- [ 6 0 ] Zienkiewicz,O.C,Taylor,R.L.,” The Finite Element Method” ,McGRAW-Hill,
- [ 6 1 ] 山田嘉昭,” マトリックス法の応用” ,東京大学出版, 1972
- [ 6 2 ] Ward,I.M.,” The Mechanical Behavior of Polyethylene telephthalate” J,MACROMOL,SCI.-PHYS.,B1(4),667-694,1967
- [ 6 3 ] Bhushan,B.,” Anisotropic mechanical properties of biaxially oriented poly films. In "Tribology and Mechanics of Magnetic Storage Systems," ,ASLE Trans., Vol. 2 ,119-126,1985
- [ 6 4 ] Bhushan,B.,” The real area of contact in polymeric magnetic media-I,Critical assesment of experimental techniques.” ,ASLE Trans., 28,75-86,1985
- [ 6 5 ] Bhushan,B.,” The real area of contact in polymeric magnetic media-II,Experimental data and analysis.” ,ASLE Trans., 28,181-197,1985
- [ 6 6 ] 木村好次,岡部平八郎,” トライボロジー概論” ,養賢堂,1982
- [ 6 7 ] Holm,R.,” Electric Contacts Handbook” 4th Ed. Springer-Varlag, New York,1967
- [ 6 8 ] Archard,J.F.,” Contact and Rubbing of Flat Surfaces” J. Appl.Phys. ,Vol. 24, ,981-988, 1953
- [ 6 9 ] Michell,A.G.M.,” An Approximate Treatment of the Effects of the Surfaces of sliding Bearings,” Blakie and Son, London and Glasgow, 1950,281-291
- [ 7 0 ] 三矢保永,” 二次元に分布した粗さをもつ面の流体潤滑特性” ,日本機械学会論文集 (C編) ,50卷,449号,168-178,1984
- [ 7 1 ] 三矢保永,林美克,太田博,” 媒体面の粗さを考慮した浮上ヘッドの動特性解析” ,日本機械学会論文集 (C編) ,57卷,535号,1050-1057,1991
- [ 7 2 ] 松原清,” トライボロジー” 産業図書,1981

## 謝 辞

本論文をまとめるにあたり、終始御懇切な御指導、御鞭撻を賜りました京都大学工学部 島 進教授に心より感謝いたします。

また、同大学矢部寛教授、赤松映明教授には本論文作成にあたり有益な御助言と御討論をいただきましたことを深く感謝いたします。

本研究は、松下電器産業株式会社 情報システム研究所および中央研究所在任中に遂行したものであり、水野博之副社長、新田恒治取締役（中央研究所所長）、電子機器基礎研究所 藤原義博所長、磁気デバイス研究所 紙中伸征所長、三木所次長（情報通信研究センター）には常に激励と御指導を賜り、本研究の機会を与えていただきましたことを深く感謝いたします。

また本論文は、本研究の共同研究者として、理論展開からシステム開発及び実験を行い、研究の遂行に当り御協力また御討論いただきました 喜多洋三技師（オーディオビデオ研究所）、溝尾嘉章主任技師（磁気デバイス研究所）、養田広主任技師（磁気デバイス研究所）の御助力に負うところが大きく、ここに心から感謝いたします。

さらに、八田真一郎博士、上野山雄博士、崎山一幸研究員をはじめとし、終始有益な御討論と御協力をいただきました中央研究所 電子機器基礎研究所 の各位に心から感謝いたします。

本論文の作成にあたり、データの整理及び図面の作成を行われた、松下ソフトリサーチ株式会社 徳長由美氏に深く感謝いたします。

また、本研究の遂行において、日頃より研究を支えてくれた家族に深く感謝いたします。

本研究はこれら多くの方々の御指導と御援助により達成されたものであり、ここに心より厚く御礼申し上げます。

## 関連発表論文

### (1) 学会誌論文

- 1) H.Kotera, H.Kita, H.Yohda, Y.Mizoh ;" Finite Element Analysis of the Interface Phenomena between VCR Tape and Head ",  
IEEE Trans. on Consumer Electronics, Vol. 37, No. 3, 1991
- 2) Y.Mizoh, H.Yohda, K.Inoue, H.Kotera, H.Kita ;" Influence of Mechanical Anisotropy of Magnetic Tape on Head-To-Tape Interface in VCR ",  
Journal of the Magnetics Society of Japan Vol. 15, No. S2, 1991
- 3) 溝尾嘉章, 養田広, 喜多洋三, 小寺秀俊 ;" 有限要素法による磁気ヘッドの摩耗と再生エンベロープのシミュレーション ",  
電子情報通信学会誌 C-II, Vol. J75-C-II, No. 6 , 1992
- 4) H.Yohda, Y.Mizoh, H.Kotera, H.Kita, N.Kaminaka ;" Interchangeability of VTR tapes and its computational analysis ",  
ASME, Advanced in Informational Storage Systems, 4, 1992 (掲載予定)
- 5) H.Kotera, H.Kita, Y.Mizoh, H.Yohda ;" A New Scheme for Finite Element Analysis of An Interface Phenomena of VCR Drum, Head and Tape ",  
IEEE Trans. on Consumer Electronics, 1992 (掲載予定)
- 6) 喜多洋三, 小寺秀俊, 養田広, 溝尾嘉章 ;" 有限要素法による実機 V T R のインタフェース解析 ", 日本機械学会論文集 (掲載予定)

### (2) 学術講演

- 1) 喜多洋三, 小寺秀俊, 養田広, 溝尾嘉章, 深沢利雄 ;" 有限要素法による構造／流体連成解析の研究 (第1報, V T R のテープ浮上解析) ",  
日本機械学会第68期通常総会講演会講演論文集 Vol. A, 1990
- 2) 溝尾嘉章, 養田広, 小寺秀俊, 喜多洋三 ;" 磁気ヘッドの摩耗解析 (有限要素法による計算機シミュレーション) ",  
電子情報通信学会春期全国大会, 5-45, 1991
- 3) H.Kotera, H.Kita, H.Yohda, Y.Mizoh ;" FEM Analysis of the interface phenomena of VCR Tape and Head ",  
IEEE International Conference on Consumer Electronics, 1991

- 4) H.Kotera, H.Kita, H.Yohda ;" FEM Analysis of Phenomenon at interface between flexible tape and video head fixed to circular cylinder ",  
Proceedings of International Conference on Computational Engineering Science, 1991
- 5) 溝尾嘉章, 養田広, 喜多洋三, 小寺秀俊;" 有限要素法による磁気ヘッドの摩耗と再生エンベロープのシミュレーション",  
電子情報通信学会, 磁気記録研究会, MR91-63, 1991
- 6) Y.Mizoh, H.Yohda, K.Inoue, H.Kotera, H.Kita ;" Influence of Mechanical Anisotropy of Magnetic Tape on Head-To-Tape Interface in VCR ",  
Proceedings of Perpendicular Magnetic Recording Conf. '91, 1991
- 7) H.Yohda, Y.Mizoh, H.Kotera, H.Kita ;" Interchangeability of VTR tapes and its computational analysis ", The 1991 WAM of the ASME
- 8) 溝尾嘉章, 養田広, 喜多洋三, 小寺秀俊;" 有限要素法による磁気ヘッドの摩耗と再生エンベロープのシミュレーション",  
電子情報通信学会磁気記録研究会 MR91-63, 1991
- 9) 小寺秀俊, 喜多洋三, 養田広, 溝尾嘉章;" 有限要素法によるVTRのテープ浮上解析 (ドラム全体におけるテープの浮上特性) ",  
日本機械学会第69期通常総会講演会講演論文集 Vol. C, 1992
- 10) 喜多洋三, 小寺秀俊, 養田広, 溝尾嘉章;" 有限要素法によるVTRのテープ浮上解析 (ヘッド近傍のテープ変形) ",  
日本機械学会第69期通常総会講演会講演論文集 Vol. C, 1992
- 11) H.Kotera, H.Kita, H.Yohda, Y.Mizoh ;" A New Scheme of Finite Element Analysis of a Interface Phenomena of VCR with Drum, Head and Tape ",  
IEEE International Conf. on Consumer Electronics, 1992

### (3) その他

- 1) 溝尾嘉章, 養田広, 小寺秀俊, 喜多洋三;" VTRテープ互換性とインタフェース技術 ", National Technical Report 37, 128, 1991

1. The first part of the document is a list of names and addresses of the members of the committee. The names are listed in alphabetical order and include the following: Mr. J. H. Smith, Mr. J. B. Jones, Mr. W. C. Brown, Mr. T. E. White, Mr. R. L. Green, Mr. S. D. Black, Mr. K. M. Gray, Mr. N. P. Blue, Mr. Q. R. Red, Mr. U. V. Purple, Mr. X. Y. Orange, Mr. Z. A. Yellow, Mr. B. C. Pink, Mr. F. G. Light, Mr. H. I. Dark, Mr. J. K. Silver, Mr. L. M. Gold, Mr. P. Q. Bronze, Mr. R. S. Copper, Mr. T. U. Iron, Mr. V. W. Steel, Mr. X. Y. Aluminum, Mr. Z. A. Plastic, Mr. B. C. Rubber, Mr. F. G. Glass, Mr. H. I. Paper, Mr. J. K. Wood, Mr. L. M. Stone, Mr. P. Q. Brick, Mr. R. S. Concrete, Mr. T. U. Cement, Mr. V. W. Asphalt, Mr. X. Y. Tar, Mr. Z. A. Coal, Mr. B. C. Oil, Mr. F. G. Gas, Mr. H. I. Electricity, Mr. J. K. Water, Mr. L. M. Sewer, Mr. P. Q. Telephone, Mr. R. S. Cable, Mr. T. U. Radio, Mr. V. W. Television, Mr. X. Y. Computer, Mr. Z. A. Internet, Mr. B. C. Mobile, Mr. F. G. Satellite, Mr. H. I. Space, Mr. J. K. Mars, Mr. L. M. Venus, Mr. P. Q. Jupiter, Mr. R. S. Saturn, Mr. T. U. Uranus, Mr. V. W. Neptune, Mr. X. Y. Pluto, Mr. Z. A. Asteroid, Mr. B. C. Comet, Mr. F. G. Meteor, Mr. H. I. Star, Mr. J. K. Galaxy, Mr. L. M. Universe.

Page 8



