フイル軸受におけるテープ浮上特性について*

谷 豊 文**, 矢 部 寛***
標 博 雄**, 三 輪 博****

On the Behavior of Magnetic Tape in Self-Acting Foil Bearings

by Toyofumi TANI, Hiroshi YABE,
Hiroo SHIMEGI, and Hiroshi MIWA

The fluid film thickness between a magnetic tape and a rotating drum is studied experimentally using a laser measuring system under conditions where the fluid film thickness is affected by the bending stiffness of the tape. For comparatively flexible tape cases, the experimental results coincide fairly well with theoretical ones obtained by applying the separation boundary condition. For cases with stiffer tape conditions, the tendency of the experimental results may also be explained well by the theoretical analysis, by introducing the concept of the tangency point condition as well as the infinity point condition for the film pressure generation point.

Key Words: Bearing, Lubrication, Gas Bearing, Foil Bearing, Tape Stiffness, Magnetic Tape Lubrication, Magnetic Recording Equipment

1. 緒 言

VTRなどに用いられる回転ヘッド方式の磁気記録再生装置では、記録の高密度化に伴う装置の小形化により、回転ヘッドの周速が低速化する傾向にあり、回転ドラム上のテープ浮上量も従来より小さくなってきている。このため、テープがドラムに接触しやすく、また、これを防ぐためにテープ張力を小さくしすぎるとヘッドとテープ間の最適な浮上状態が得られなくなる。このようにして、回転ドラム上でのテープ浮上量をより厳密に管理する必要が生じてきた。

従来、この種の問題はフイル軸受の問題として検討されている。実機におけるテープ浮上特性を検討するに際してはテープ曲げ剛性の影響を考慮する必要があり、理論的にも、そのような状況下での浮上特性の検討が行われている^{(1)~(4)}。一方、テープ浮上特性に関する実験結果の報告については、テープを完全可とう

体と考えると整理したものが多く^{(5)~(8)}、テープ曲げ剛性の影響を考慮に入れた実験的検討はほとんど報告されていない。また、従来、浮上量の測定は容量変位計を使用したものが多く、テープ上にアルミニウム蒸着などを施しており、実機で使用するテープとは曲げ特性が異なっている可能性がある。

そこで、本報では、レーザ光による測定系⁽⁹⁾を用いることにより、実機で使用するテープをそのまま使うことができるようにし、また、テープ曲げ剛性が浮上特性に影響を及ぼすような条件のもとで、回転ドラム上でのテープ浮上量を測定し、浮上特性を実験的に検討することとする。また、測定結果に対して理論的説明を試みる。

2. 実 験

2.1 実験装置と実験方法 図1に実験装置の構成を示す。本測定法はドラムの外側からレーザ光をテープ面に照射し、その反射点の動きを測り、これよりテープ浮上量を求めるものである⁽⁹⁾。図1に示す変位形は静圧空気軸受支持方式の微動台によりテープ幅方向に走査される。幅方向の測定位置はパーソナルコンピュータにより指定される。一方、変位計からの出力

* 昭和59年8月24日 第926回講演会および昭和60年3月20日 関西支部第60期定時総会講演会において講演、原稿受付 昭和60年10月2日。

** 正員、三菱電機㈱ (〒661 尼崎市塚口本町8-1-1)。

*** 正員、京都大学工学部 (〒606 京都市左京区吉田本町)。

**** 三菱電機(株)。

信号は、ドラム軸に取付けたエンコードからの回転同期信号により記録のタイミングをとりながらディジタルに記録され、パーソナルコンピュータに転送される。ドラムの回転速度はエンコードからの信号をカウンタで読むことにより監視される。

テープは回転ドラム上にドラム軸に対して直角方向にほぼ180°分巻き付けられている。テープは静止しており、長手方向に張力が与えられている。

浮上量は、ドラム静止時のテープ位置と、ドラムを回転させた時のテープ位置との差で定義し、テープ幅方向および周方向巻き付け角位置ともにほぼ中央で測定する。

供試ドラムの高さは30 mm、テープはVTR用市販品(幅12.7 mm)である。また、本研究での実験条件の範囲は次のとおりである。

ドラム直径	$2R: 30 \sim 70 \text{ mm}$
ドラム周速	$U: 0.85 \sim 13.2 \text{ m/s}$
テープ曲げ剛性	$D: 1.3 \sim 3.0 \times 10^{-6} \text{ N}\cdot\text{m}$ $\{1.27 \sim 2.94 \times 10^{-7} \text{ kgf}\cdot\text{m}\}$

図1 実験装置の構成

テープ張力 $T: 0.8 \sim 62 \text{ N/m}$

$\{0.078 \sim 6.08 \text{ kgf/m}\}$

2.2 実験結果 テープ曲げ剛性を考慮した、無限幅・非圧縮性フォイル軸受の浮上量特性は、次式で定義される無次元浮上特性量 K と無次元テープ曲げ剛性 S で整理できる^{(1),(2)}。

$$K = \frac{h_0}{R} \left(\frac{T}{6\mu U} \right)^{2/3} \dots\dots\dots (1)$$

$$S = \frac{D}{TR^2} \left(\frac{T}{6\mu U} \right)^{2/3} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 h_0 : 中央領域でのテープ浮上量、 R : ドラム半径、 T : テープ張力、 μ : 粘性係数、 U : ドラム周速、であり、また $D = Et^3/[12(1-\nu^2)]$ で、 E : テープ縦弾性係数、 t : テープ厚さ、 ν : ポアソン比、である。

得られた実験結果を図2に示す。図2中、 B は無次元巻き角で、テープ巻付け角を β とするとき、

$$B = \beta \left(\frac{T}{6\mu U} \right)^{1/3} \dots\dots\dots (3)$$

で与えられる。

テープの曲げ剛性を考慮した無限幅フォイル軸受の理論解析としては、例えば、はく離境界条件を用いた解析⁽²⁾がある。図2中の破線(simplified separation point condition)(注: pointは以下本文および図中ではpt.と略記する)はその理論結果である。図2からわかるように、テープ曲げ剛性値 S が比較的小さいときは、実験値は理論結果とまずまずの一致を示すが、 S が大きい領域では、両者は定性的にも一致しなくなる。この、 S が大きい領域でのテープ浮上特性については、3章で理論的考察を加えることとする。

本研究の実験ではテープの実巻付け角は約180°で

図2 テープ浮上量特性

あり、無次元巻き角 B に換算すると 50 以上となる。このように巻き角が大きい場合は、理論的には、テープ浮上量は巻き角には依存しない。ちなみに、堀ら⁽⁸⁾は、テープ曲げ剛性が無視できるような場合を対象として理論解析を行い、 $B > 5$ であれば、無次元浮上特性量 K は B には依存しないとの結果を得ている。

本実験での図 2 の実験結果について、テープ浮上量と巻き角 B との関係をより明確にするため、 B に対して実験結果をプロットしなおしたものが図 3 である。図 3 を、各実験点の S の値に注意して詳細にみると、 $S < 0.3$ に対する結果は、 B の影響は少なく、ほぼ $K = 0.24 \sim 0.3$ のあたりに分布していることがわかる。 $K > 0.3$ となるのは $S > 0.3$ の実験条件に対応するものであって、これらの結果についても B の値の影響よりも、図 2 でみたように、 S の値による K への影響の結果とみたほうがよいと考えられる。

3. 理論的考察

3.1 基礎方程式とはく離境界条件による解析

解析の基礎となる方程式は文献(2)に示されているが、以下に簡単にそれらを再掲する。(図 4)

(1) レイノルズ方程式(無限幅・非圧縮性)

$$\frac{d}{d\theta} \left(h^3 \frac{dp}{d\theta} \right) = 6\mu RU \frac{dh}{d\theta} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 p : 圧力、 h : すきま、 θ : 周方向角度座標である。

(2) テープ(フォイル)微小部分に作用する力の半径方向の釣り合い

$$p - p_a = \kappa T - dQ/ds \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 p_a : 周囲圧力、 κ : テープ曲率、 Q : セン断力、 s : テープに沿って測った座標、である。

(3) 曲げモーメントとせん断力の関係

$$Q = dM/ds, \quad M = \kappa D \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 M : 曲げモーメント、である。

(4) テープ曲率

$$\kappa \cong \frac{1}{R} \left(1 - \frac{1}{R} \frac{d^2 h}{d\theta^2} \right) \quad (R \gg h) \quad \dots\dots\dots (7)$$

式(4)~(7)から、テープ浮上量分布を規定する基礎方程式が、無次元表示で、次のように求められる。

$$H^3 \frac{d^5 H}{d\phi^5} - B_s \left(H^3 \frac{d^3 H}{d\phi^3} + H - 1 \right) = 0 \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここに、無次元化は次式によって行っている。

$$\left. \begin{aligned} H &= \frac{h}{h_0}, & \phi &= \frac{R}{h_0} \left(\frac{6\mu U}{T} \right)^{1/3} \theta, \\ B_s &= \frac{Th_0^3}{D} \left(\frac{T}{6\mu U} \right)^{2/3} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (9)$$

B_s は、式(1)の K を用いれば、 S との間に

$$S = K^2 / B_s \quad \dots\dots\dots (10)$$

なる関係にある。

H が求まれば、圧力分布 P は

$$\begin{aligned} P &= (p - p_a) / (T/R) \\ &= 1 - \frac{1}{K} \left(\frac{d^2 H}{d\phi^2} - \frac{1}{B_s} \frac{d^4 H}{d\phi^4} \right) \quad \dots\dots\dots (11) \end{aligned}$$

と求まる。

なお、 h_0 は積分定数で、物理的には、前述のごとく、中央領域でのすきまの大きさに対応する。実際上問題になるのはこの h_0 の大きさであるが、 h_0 は入口側の条件のみによって決まるので、以下では特に記さない限り入口側のみに注目することとする。

式(8)を解くに際しての境界条件については、文献(2)では、入口側の圧力発生点は流れのはく離点で規定されるとし、次の条件を採用している。

(条件 1)

$$\left. \begin{aligned} \text{曲げモーメント消滅条件} &: M = 0 \\ \text{流れのはく離条件} &: h = 3h_0/2 \\ \text{圧力発生条件} &: p = p_a \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (12)$$

図 3 テープ巻き角の影響

図 4 フォイル軸受模式図

くるのは $S=S_c=0.5836$ ($B_s=0.1025$) のときで, $S > S_c$ ならばはく離点は巻き角点より内側に入る. このとき, 巻き角点からはく離点までの領域では浮上すきまは比較的小さい. はく離境界条件が正しければ, 理論的にははく離点が圧力発生点となり, それより上流側のすきま形状には関係しないはずである. しかし, はく離点と圧力発生点が厳密に一致するのではなく, 多少の誤差を伴うものであるならば, はく離点が巻き角点より内側に入った状態のほうがそのような誤差がより生じやすいと考えられる. そして, はく離点である $H=3/2$ の点より上流でも多少の圧力上昇がおこるものと思われる.

そこで, 理論的な根拠は乏しいが, 仮に次の境界条件を考えてみる.

(条件3) (tangency pt. condition)

巻き角点を圧力発生点とする. それより上流では式(19)が成立するものとし, 巻き角点で式(19)と連続させる.

一方, 一つの極限として, 無限遠方から圧力上昇が始まるとする Eshel-Elrod⁽¹⁾ の条件がある.

(条件4) (infinity pt. condition)

圧力発生点を無限遠方におく.

これらの条件による解を図2に, それぞれ, 一点鎖線および点線で示す. 条件3による解は $S > S_c$ の範囲で S の増加とともに K の値が増加するという実験結果の傾向を定性的には説明しているようである. S が十分大きくなったとき, 条件3の解は条件4の解に漸近する. 条件4の解は理論上可能な K の上限を与えるものと解釈できるが, 図2に示した実験結果とは一致しないようである.

図2において, 条件3の解をもう少し S の小さいほうへずらせば, 実験結果との一致はより良くなるように思える. これは圧力発生点を巻き角点より少し上流側に設定すればよいことを示唆している. しかし, 物理的な根拠をもってそのような圧力発生点を理論的に規定することは相当むずかしい問題であろうと思われる.

3・4 浮上量と圧力分布の理論結果の例 圧力分布とテープ浮上量の分布の計算結果の例を $S=0.3$ と $S=3.0$ の場合について示す. 数値計算の方法は文献(2)の場合と同様であり, その概要は付録に示す.

計算結果の表示にあたり, H および ϕ を用いると, これらは無次元化に際し, 代表長さとしてすきま h_0 を用いているので, 境界条件の相違による解の結果の

図7 浮上量と圧力分布の理論結果

差の定量的な比較をしにくい。そこで、改めて

$$H^* = KH = \frac{h}{R} \left(\frac{T}{6\mu U} \right)^{2/3} \dots\dots\dots (20)$$

$$\phi^* = K\phi = \left(\frac{T}{6\mu U} \right)^{2/3} \theta \dots\dots\dots (21)$$

を定義する。このときテープ漸近線は

$$H^* = H_a^* + \phi^{*2}/2 \dots\dots\dots (22)$$

となり、境界条件の違いによって距離 H_a^* の値が異なるほかは K の値によらないことになる。

図7はこのようにして求めた入口側および出口側の浮上量分布と圧力分布の計算結果の一例である。図7中、 ϕ^* は入口・出口側それぞれの巻き角点を原点としている。また小丸印は圧力発生・消滅点である。

なお、数値計算上は、入口側と出口側は独立であり、入口側・出口側で異なった境界条件による解を得ることもできる。逆にいえば、浮上特性量 K は入口側の境界条件によって決まるので、たとえ K の値が実験値と一致しても、その境界条件によって出口側の状態までも正しくとらえられているとは限らないことになる。

4. 結 言

本研究では、フォイル軸受におけるテープ浮上特性について、特にテープ曲げ剛性の影響に注目して実験的検討を行い、理論的考察を加えた。本研究で得られた主な成果は次のとおりである。

(1) テープ浮上量は無次元テープ曲げ剛性 S によって整理でき、 S が比較的小さい領域では、テープ浮上量の実験値ははく離境界条件を用いた理論解析結果と比較的良好一致した。

(2) 圧力発生・消滅点より外側の領域でのテープの曲げ変形を考慮に入れたはく離境界条件を導入した。また、テープ曲げ剛性が大きくなったとき、はく離点が巻き角点より内側に来ることを示し、これをもとに巻き角点条件の可能性を示した。

(3) さらに無限遠点条件を加え、テープ曲げ剛性値に応じて圧力発生点に関する境界条件を組合せるこ

とにより、実験結果の傾向を比較的良く説明できることを示した。

付録 数 値 計 算 手 法

本研究で用いた数値計算手法の概要は次のとおりである。

(1) 中央領域 中央領域では $H \cong 1$ となるので、それを考慮した漸近解析解⁽²⁾が成立するものとする。

(2) 入口領域 $B_s \geq 0.30700$ では入口側にはテープ波打ちがなく、 $H \leq 1.01$ となる領域を中央領域とし、それより外側では中央領域での漸近解と4階微分まで連続するとの条件のもとに基礎式(8)をRunge-Kutta-Gill法で数値積分する。

$B_s < 0.30700$ では入口側にもテープに波打ちが生じる。最初に $H=1$ となる点より内側を中央領域とし、それより外側では上と同じ手法で数値積分する。

(3) 出口領域 B_s のいかにかわらずテープに波打ちが生じる。その波打ちの程度は入口側に比べて大きいので、中央領域に対する漸近解としては基礎方程式の非線形性を部分的に考慮した第2次近似解〔文献(2)の式(18)〕を採用する。具体的には $H=1$ となる点のうち、出口端から数えて3番めの点より内側を中央領域とし、中央領域では上述の第2次近似解が成立するものとする。それより外側では入口側の場合と同様の手法で基礎方程式を数値積分する。

文 献

- (1) Eshel, A. and Elrod Jr., H. G., *Trans. ASME*, ser. F, 89-1 (1967), 92.
- (2) 森・ほか2名, 機論, 43-366 (昭52), 730.
- (3) 田中, 機論, 48-434, C (昭57), 1615.
- (4) 小野・水川, 機論, 47-415, C (昭56), 449.
- (5) Ma, J. T. S., *Trans. ASME*, Ser. D, 87-4, (1965), 837.
- (6) Licht, L., *Trans. ASME*, Ser. F, 90-1 (1968), 199.
- (7) 森・ほか2名, 機論, 37-295 (昭46), 602.
- (8) 堀・ほか3名, 機論, 42-359 (昭51), 2215.
- (9) 三輪・ほか3名, 精機学会秋季大会講演論文集, (昭58), 514.

討 論

〔質問〕 堀 幸 夫〔東京大学工学部〕

(1) レーザ光による浮上量測定とはどのような方法か。この場合、浮上量測定は間接的になると思われるが、測定精度はどのくらいか。また本実験における浮上量の絶対値はどのくらいか。

(2) 図3において、たとえば $S=0.01-0.03$ とあるが、 S が3倍程度変化しても同一の点で表されることがあるか。

(3) 実際の装置ではテープが走行していることが多いと思われるが、本研究の結果はこの場合にもあ

付図 1 レーザ光を用いた測定系の構成

ではまるか。

〔回答〕 (1) レーザ光による測定系の構成を付図 1 に示す。半導体レーザビームを細く絞り ($\sim \phi 0.01$), 測定する物体表面に照射する。物体の表面で反射・散乱した光の一部を結像レンズを通し光検出素子 (ここでは光ポジションセンサ) の受光面上に投影する。光検出素子は光束が受光面上のどの位置に入射しているかを電気出力する。被測定面が付図 1 の矢印方向に変位すると, 光検出素子上での像は付図 1 の矢印方向に移動するので, 光検出素子からの出力により被測定面の変位を知ることができる。なお, 回路により反射光量の検出と補正を行い, 物体の反射率とは無関係に変位を求めることができるようになっている。

測定精度については, 変位計そのものの測定誤差が

約 $\pm 0.3 \mu\text{m}$, 変位計の温度・時間に対する安定性 (ドリフト) による誤差が約 $\pm 1 \mu\text{m}$, 被測定物を載せる微動台の真直度に関する測定誤差が約 $\pm 0.15 \mu\text{m}$ であった。また, 本実験におけるテープ浮上量の絶対値は $2 \sim 20 \mu\text{m}$ であった。

(2) K を S と B の 2 変数の関数とみて結果を表示するに際し, 図 3 では特に B と K の関係を見るため S をパラメータとして扱った。各実験点に対して一つの S の値が対応するが, この S の値をいくつかの範囲に区分して示すこととした。 K は S に対して図 2 のようにふるまうので, S の値によっては, 図 3 の S の値の区域分けは粗すぎたかもしれない。しかし, より細かく区域分けしても記号が繁雑になり見づらくなると考え, 全体的な傾向をつかむため, 図 3 ではかなり大雑把な区域分けをして表示することとした。

(3) テープが走行する場合については, 張力の値としてテープの有効張力 ($= T - \sigma U^2$; σ は単位幅・単位弧長当たりのテープの質量で, σU^2 は遠心力を表す) を用いれば, テープ浮上特性はドラム回転の場合と等価になると考える。なお, VHS 方式の VTR の一例では, ドラム周速 5.8 m/s に対しテープ速度は $1.1 \sim 3.3 \text{ cm/s}$ であり, ドラム周速が速い場合もあるようである。