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

Simulation of Tape Flying Characteristics on VTR Drum Considering In-Plane Stress

米田 弘・沢田 武

キャノン(株)中央研究所, 厚木市森の里若宮 5-1 (☎243-01)

H. Yoneda and T. Sawada

Canon Res. Center, Canon Inc., 5-1, Morinosato-Wakamiya, Atsugi, Kanagawa, 243-01

A simulation study of the deformation of magnetic tape above the VTR drum using FEM has been carried out to investigate the tape flying characteristics. Reynolds' equation and the deformation equations of the tape are solved, taking into account the in-plane stress (i.e., geometrical nonlinearity). The validity of this simulation is checked by comparison with the experimental data. The following results are obtained by this simulation: 1) The flow of lubricant air from head window causes the tape to dip. 2) The dip enlarges above the rear of the window. 3) The dip becomes deep and long with increase of the length of the head window.

1. ま え が き

VTR のテープ・ドラム系におけるドラム全体のテープ浮上特性は、テープ・ヘッド間スペーシング、テープの耐久性、ドラムの回転ムラなどに関係し重要である。したがって、これらの系を設計するためには、テープ浮上現象のメカニズムを明らかにし、テープの浮上特性と諸因子との関係を把握する必要がある。

Greenberg¹⁾や小野ら²⁾は、テープ・ヘッド・ドラム系の浮上解析を行っているが、ドラムの存在を静圧空気軸受でおきかえている。坂口³⁾の報告は解析領域がヘッド近傍に限られており、テープの面内応力も無視している。Wolf⁴⁾はテープ周囲の境界条件を固定している。また、条件が VTR と大きく異なり実験との対応もない。児玉ら⁵⁾は有限幅フォイル軸受の解析を行っているが、巻きつけ角が極端に小さく構造も単純である。また、VTR 系ではテープの面内応力の効果が重要であるが、上記報告におけるこれの取扱い方は各々異なっている。

そこで、我々はテープの面内応力を考慮し、広い領域に適用できるテープ浮上特性の解析手法を開発することを目的とした。

本報告では、まずテープの面内応力を考慮したテープ

浮上解析の基礎方程式を導びき、有限要素法^{6), 8)}による計算手法を導入した。次に、本手法の結果を実験値と比較しその妥当性を検討した。さらに、本手法を用いてドラム全体におけるテープ浮上特性を解析した。

2. 解析モデル

検討用モデルを Fig. 1 に示す。同図 (a) は軸方向断面図であり、ドラムにはヘッド窓とヘッドを有する。テープは一端を固定し、他端に引張り荷重を与える。ヘッド及びドラムは図示の方向に回転する。同図 (b) は同モデルの上面図を示す。全体の系はテープ幅方向に対称である。ヘッド窓は図示の寸法 a , b をもつ長方形であり、ヘッドはその中央に位置する。

実際の VTR ドラムでは、ドラムは上下に分離されており、下ドラムが固定で上ドラムのみが回転する。また、

Fig. 1 Model for investigation.

テープはドラムの円周方向に対して角度をもって巻きつけられる。しかし、今回の検討では、本手法の妥当性の確認とテープ浮上特性の基本特性の考察に主眼をおき、以下のようにモデル化を行った。つまり、ドラムは全体が一体となって回転する。また、テープはドラムの円周方向に対して平行に巻きつけられる。

なお、図中に示した座標系 $X-Y-Z$ は全体座標系であり、以下において小文字で示す局所座標系 $x-y-z$ と区別する。局所座標系の x, y, z は各々テープの長さ方向、幅方向、及び法線方向にとる。また、 $x-y$ 座標の原点はテープがドラムに巻きついている領域の中心にとる。

3. 計算方法

3.1 基礎方程式

テープ浮上解析に用いる基礎方程式を以下に示す。

$$\frac{\partial}{\partial x} \cdot \sigma_x + \frac{\partial}{\partial y} \cdot \tau_{xy} + f_x = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \cdot \tau_{xy} + \frac{\partial}{\partial y} \cdot \sigma_y + f_y = 0 \quad (2)$$

$$D_x \cdot \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + D_y \cdot \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} + 2(D_1 + 2 \cdot D_{xy}) \cdot \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \cdot \partial y^2} - \left(\sigma_x \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \sigma_y \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + 2 \cdot \tau_{xy} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right) - (P - P_a) = 0 \quad (3)$$

$$\text{div}(h^3 \cdot P \cdot \text{grad } P) + 6 \cdot \lambda_a \cdot P_a \cdot \text{div}(h^2 \cdot \text{grad } P) - 6 \mu_a \cdot \text{div}(P \cdot h \cdot V) = 0 \quad (4)$$

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = [D_p] \cdot \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \\ \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} + \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right) \cdot \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right) \end{Bmatrix} \quad (5)$$

$$h = h_0 + w \quad (6)$$

ここで、 x, y, z は局所座標系であり、 u, v, w は各々その方向のテープ変位である。(1)~(3)式は各々 x, y, z 方向のテープの平衡式⁶⁾、(4)式はテープ・ドラム間及びテープ・ヘッド間の潤滑層内圧力 P に対する潤滑方程式⁷⁾である。ただし、定常状態とする。また、慣性などの運動に伴う項は無視した。(5)式はテープ面内の応力成分 $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ と変位の関係であり、2次までの項を考慮した⁶⁾。(6)式はテープ変位 w と潤滑層厚み h との関係を示す。以下、 f_x, f_y はテープの面内方向に加わる外力、 D_x, D_y, D_1, D_{xy} はテープの曲げ剛性を表す材料定数、 $[D_p]$ は面内方向の剛性を表す材料定数マトリックス、 P_a は大気圧、 μ_a, λ_a は各々空気の粘性率及び平均自由行程、 V は

Table 1. Parameters for calculation.

Drum radius	20 mm
Relative velocity	3.8 m/s
Winding angle	90 deg
Tape edge tension	12.25 N/m
Window dimension	1.0mm x 2.8mm
Head protrusion	23 μ m
Head configuration (Tape)	point
Young's elastic modulus	7.5 GPa
Poisson's ratio	0.35
Thickness	13 μ m
Width	8 mm
Length	50 mm
(Air)	
Ambient pressure	0.1013 MPa
Viscosity	18.09 μ Pa·s
Molecular mean free path	0.064 μ m

テープ・ドラム間の相対速度ベクトル、 h_0 はヘッド及びドラムの形状を定義する関数である。

ここで、未知数は $u, v, w, \sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}, h, P$ の8種類である。本解析では、 u, v, w, P を独立な未知数にとり、(1)~(6)式の連立方程式を有限要素法によって数値解法した^{6), 8)}。

3.2 定常解析モデルの考察

定常解析では、ドラムを固定してテープを走行させる場合を扱う。この定常モデルとドラムを回転させるモデルとの対応は、ドラムの回転に対して、全体座標系からみたドラム形状が変化しない場合、両者は等価であるが、ヘッドのようにドラム形状が全体座標系に対して移動する場合は、テープの方向をドラムと逆の向きにした場合が等価となる。

3.3 解析条件

Table 1 に解析に用いた値を示す。今回はドラム全体における浮上特性に注目するので、計算量を節約するためにヘッド形状を点でおきかえ、ヘッド・テープ間の潤滑効果は無視する。また、テープは $-x$ 方向に走行させる。

本解析ではテープの全体を解析領域とする。テープ周囲の境界条件は、Fig. 1(a)の左側端部で $u=w=0$ 、右側端部で $w=0$ 、他の端部で自由とし、すべての端部で P を大気圧に固定した。また、右端部には均一な引張り荷重を与えた。ヘッド窓内では、ヘッド中心位置の w をヘッド先端高さに固定し、窓内のすべてで P を大気圧に固定した。

4. 解析結果

4.1 本手法の妥当性確認

4.1.1 定性的確認

Fig. 2 は、ドラムを回転させる実験モデルにおいて、

テープの中央位置 ($x=0$) におけるドラム面からのテープ高さの時間変化を測定したものである。横軸の時間はヘッドが測定点にある時間を基準にとっており、ヘッドの x 方向位置と対応している。したがって、同図はヘッド部の存在に寄因するテープ変形を表している。

同図によると、テープはヘッドの前方で一度もり上がった後落ち込む。ヘッド前方のもり上りとヘッド突き出しによるもり上がりは後方へなびく。ヘッド後方でも落ち込みが生じ尾を引くが回復している。

Fig. 3 は、テープを走行させる計算モデルについて、本手法により計算したテープの浮上形状である。同図は実験結果と同じ特徴を有している。また、側端部の浮上分布から分かるように、全体としてのテープ高さは走行方向に減少する傾斜をもつ。

なお、テープの面内応力を無視した解析では、変形量が実際よりも大きく計算され、実験値と比較できるレベルではなかった。また、ヘッド後方の落ち込みが回復せず定性的にも妥当ではなかった。したがって、以下の議論は面内応力の考慮によって可能となったものである。

4.1.2 定量的確認

Fig. 4 に、本手法の計算で求めたテープ中心線上のテープ高さ分布を示す。計算値と実験値を定量的に比較するために、図中に示す3種類の評価量、すなわち、前落ち込み深さ D_b 、後落ち込み深さ D_f 、ひきずり長さ L_t を定義する。ただし、実験では絶対高さに誤差を生じやすいため相対値とした。

Fig. 5 に窓長さに対する評価量の依存性を示す。いずれの評価量も窓長さが大きいほど大きい。計算値と実験値を比較すると後落ち込み深さと引きずり長さは定量的にも良い一致を示している。しかし、前落ち込み深さでは計算の方が $2\sim 3\mu\text{m}$ 大きい。

この理由は、評価量を定義しているテープ上の位置が実験と計算とで異なることによる。つまり、前落ち込み前方のテープ高さは、テープ高さが走行方向に傾斜する

Fig. 2 Tape configuration (experiment).

Fig. 3 Tape configuration (calculation).

Fig. 4 Tape configuration ($y=0$, calculation).

Fig. 5 Effect of window length.

Fig. 6 Tape configuration (without window, calculation).

Fig. 7 Distribution of lubricant flow (calculation).

ため巻きつき中央の測定値よりもそれより右側で評価する計算値の方が大きい。一方、落ち込み部分のテープ高さは、ヘッド窓の影響を支配的に受けるためヘッド窓に対する相対位置でほぼ決まる。この結果、評価量を定義している各部のテープ高さのうち、前落ち込み前方の値のみで計算値が測定値より大きく評価され、Fig. 5(c)の差になって現れている。

4.2 解析結果の考察

Fig. 6 に、ヘッド窓をなくしヘッドのみとして解析したテープの浮上形状を示す。Fig. 3 と比較すると、ヘッド部の落ち込みがなく、テープ高さの走行方向への傾斜も小さい。

Fig. 7 は、窓がある場合のテープ・ドラム間の潤滑流量（質量）の分布である。図中の黒丸が表示位置であり線の長さと向きが流量の大きさと向きを表す。同図によると、潤滑流体である空気はヘッド窓から流出し、その後方で流量が減少している。このことは、ヘッド部の落

ち込みが後方へ広がる理由を示している。また、空気はテープ側端部からも少しずつ流出している。全体的には、流量はテープの走行方向に向かって順次減少している。

以上から、ヘッド窓がテープ落ち込みの原因であり、テープ側端部とヘッド窓からの空気の漏れによって、テープ全体の浮上分布が円周方向に傾斜することが分かる。

5. むすび

VTR ドラム系のテープ浮上特性を解析するために、テープの面内応力を考慮した解析手法を開発した。また、本手法による解析結果及び、実験結果との比較により以下のことがわかった。

- 1) テープ面内応力を考慮することにより、ドラム全体におけるテープの浮上特性を定量的に解析することが可能になった。
- 2) 潤滑流体がテープ側端部やヘッド窓から流出するため、テープ高さは走行方向に減少する傾斜をもつ。
- 3) ヘッド窓はテープ浮上分布に落ち込みをつくる。
- 4) 上記落ち込みは後方へ広がり、面内応力の効果によって回復する。
- 5) 上記落ち込みは、窓長さが大きいほど大きい。

なお、今回は検討用モデルについて解析したが、実機のように上下ドラムに分離した場合は現在検討中である。

謝 辞 本研究を行うに当たり、測定データを提供していただくとともに有益な助言をしていただいた当社製品技術研究所平田室長、長谷川氏、ならびに電子映像開発センター金田氏に深謝いたします。

文 献

- 1) H. J. Greenberg: *IBM J. Res. & Dev.*, **23**, 197 (1979).
- 2) 小野, 水川: 日本機械学会論文集, **C-47**, 449 (1981).
- 3) 坂口: 電子通信学会技術報告, **MR80-32** (1980).
- 4) B. Wolf, N. Deshpande and V. Castelli: *Trans. ASME, Ser. F*, **105**, 138 (1983).
- 5) 児玉, 道村, 小野: 日本潤滑学会第 31 期春期研究発表会予稿集, 37 (1987).
- 6) O. C. Zienkiewicz: *The Finite Element Method*, McGraw-Hill (1977).
- 7) A. Burgdorfer: *Trans. ASME, Ser. D*, **81**, 94 (1959).
- 8) 米田, 沢田: 日本応用磁気学会誌, **10**, 117 (1986).

1987 年 12 月 8 日受理, 1988 年 2 月 12 日採録