仮想可変ばね逐次近似法による VTR における テープの接触解析*

小野 京 右^{*1}, 高 月 宏 一^{*2}, 久 保 浩^{*3}

Numerical Analysis of the Contact Problem between the Magnetic Tape and Cylinder in a Video Tape Recorder

Kyosuke ONO, Koichi TAKATSUKI, and Hiroshi KUBO

The contact problem between the magnetic tape and cylinder in a video tape recorder (VTR) is numerically analyzed, based on the virtual variable stiffness spring (VVSS) model iteration method. A head is assumed to have a uniform contact pressure. Green's function in tape deflection is first verified by the experiment on a commercially available VTR tape. The numerical iteration method based on VVSS model is next described. From computer calculation, good convergent characteristics are shown for a wide range of iteration parameter values. Calculated results of the contact pressure and tape deflection around the head window are presented for various values of head protruding height. It is found that a fine division width less than $30\mu\text{m}$ is necessary in the transverse direction in order to get a smooth contact pressure distribution.

Key Words: Tribology, Elasticity, Contact Problem, Numerical Analysis, Magnetic Tape, Video Tape Recorder

1. ま え が き

テープ状媒体への磁気記録は、シリアルな情報の高速・高密度で安価な記録に適しているため、音声・画像・データなどの記録に広く用いられている。そして現在さらにその高密度化により、高性能・高品質・小形の装置の開発が進められている。磁気テープ記録において高密度化を図るには、ヘッドとテープの接触条件を均一に維持することが最も重要な条件のひとつであり、しかも両者の摩耗を防ぐため、その面圧は極力小さいことが望ましい。このため最近では、回転ヘッド近傍のテープとヘッドおよびシリンダとの接触状態を解析的に明らかにする研究が行われている。

酒井らは増分理論に基づき、VTR のヘッド近傍における平面テープの接触状態の解析を行っている⁽¹⁾。また山口らは NASTRAN を用いて平面テープを VTR シリンダに巻きつけたときのテープの変形を大変形効果をも考慮して解析している⁽²⁾。一方著者らは一様面圧を有する固定ヘッドの形状および回転ヘッド

の形状をそれぞれ平面テープおよび円筒面テープからの微小変形理論に基づいて解析した⁽³⁾。しかしここでは VTR シリンダにおけるヘッド設置窓近傍のテープとシリンダとの接触問題を考慮していなかった。そこですでにフレキシブルディスクにおけるヘッド・媒体インタフェース問題において著者が提案した仮想可変ばね逐次近似法を適用し、一様面圧ヘッドによる窓近傍のテープ変形特性を解析した⁽⁴⁾。しかし接触圧力分布の収束解はその変化が著しく解析領域の代表点はかなり細かくする必要があると判断された。

本論文は、上記既報(4)より解析領域の代表点を増すことによって、仮想可変ばね逐次近似法に基づいてテープ変形分布とともに、接触圧力も合理的な値が得られることを示したものである。

本論文では、まず既報(3)、(4)で用いたテープ変形のグリーン関数が市販の VTR テープの微小な変形特性を十分把握できることを示す。次に円筒面テープからの微小変形に関するグリーン関数を用いて外径 62 mm のシリンダの窓から一様面圧ヘッドを突出させたときのテープ変形分布および接触圧力分布を解析した結果を述べる。

* 昭和 62 年 3 月 14 日 関西支部第 62 期定時総会において講演、原稿受付 昭和 61 年 7 月 30 日。

*¹ 正員、東京工業大学 (〒152 東京都目黒区大岡山 2-12-1)。

*² 読売新聞社 (〒100 東京都千代田区大手町 1-7-1)。

*³ 三井物産(株) (〒100 東京都千代田区大手町 1-2-1)。

2. VTR テープに対するグリーン関数の妥当性

3 章では既報(3)で導出した円筒面テープからの微小変形に関するグリーン関数を用いるが、このグリーン関数が市販の厚さ約 $20\text{ }\mu\text{m}$ の VTR 用磁気テープの変形解析に適用できるか否かを調べるため、実験しやすい平面テープの集中力による変形特性を測定し解析解と比較した。集中力と集中力作用点の変位および集中力と大局的なテープ変形分布の測定法は既報(5)と同じである。集中力作用点近傍のミクロな変形分布は既報(6)で述べた方法と同様に曲率半径 21.3 mm の透明球面ヘッドを押し込み光干渉法で球面に対するテープの変形を測定した。磁気テープは幅 12.7 mm 、厚さ $20\text{ }\mu\text{m}$ で長手方向にはスパン 100 mm で空気軸受ガイドポストを支持している。磁気テープは市販品 A, B を選んだが、ここでは初期変形(カップリング)の比較的小さい A に対する測定結果を述べる。磁気テープの等価的なヤング率は厳密には長手方向と幅方向に異なりその値は不明であるが、解析では等方性と考え、 $E=4.41\text{ GPa}$ と 6.37 GPa の値を示す。

図 1 はテープの長手方向には中央、幅方向にはそれぞれ中央および縁から 2 mm 内側に集中力を作用させたときの集中力の大きさと集中力作用点の変位(押し込み量)との関係である。テープには図 1 中にモデル

的に示すようにカップリングがあるので、その凸面側、凹面側のどちらから集中力を作用させるかで特性が異なる。図 1 からわかるように凸面側からのほうが当然ながら変形しにくい、その差は図 1(a)の $T=77.2\text{ mN/mm}$ を除いてわずかである。図 1 から磁気テープの等価的なヤング率として平均値 $E=5.39\text{ GPa}$ とすればいずれの面側への変形にも適用できることが分る。

図 2 は突起をテープ中央および縁から 2 mm 内側に $50\text{ }\mu\text{m}$ だけ押し込んだときの大局的な変形分布である。初期変形の影響を除くためまず約 $10\text{ }\mu\text{m}$ 突起を押し込んだ状態でテープ変形分布を測定し、さらに $50\text{ }\mu\text{m}$ 押し込んだときの変形分布との差を実験値とした。長手方向に片側 10 mm にわたり、幅方向 1 mm 間隔で測定した結果を破線で示している。この変形は反射形の光センサで測定したので傾きの大きいテープ縁近傍や集中力作用点近傍は測定誤差の混入が考えられる。全体的に計算値との誤差は $\pm 3\text{ }\mu\text{m}$ 以下であり両者はほぼ一致しているといえる。

図 3 はテープ中央に曲率半径 21.3 mm の球面ヘッドを $50\text{ }\mu\text{m}$ 押し込んだときのヘッド頂点近傍の長手方向および幅方向の局所的なテープ変形である。実験値は 2 回の測定データを示している。長手方向の変形分布は実験値のほうが一様に $0.1\sim 0.2\text{ }\mu\text{m}$ 小さな値となっているが頂点近傍の微小突起の影響とも考えら

図 1 集中力と集中力作用点の変位に関する理論と実験の比較

(a) テープ中央位置 (b) 縁から 2 mm 内側の位置
図 2 集中力作用点で 50 μm 変位させたときのテープ変形分布に関する理論と実験の比較

れる。なお球面ヘッドを縁から 2 mm 内側に 50 μm 押し込むと点接触条件が成立しなくなるのでグリーン関数に対応するデータはとれなかった。

以上の実験結果と解析結果の比較から既報(3)で求めた集中力による変形分布は市販の VTR テープにも適用できることが示された。

3. 仮想可変ばね逐次近似法による テープの接触解析

3.1 理論解析法 ここでは図 4 に示すように、半径 r の円筒面に長さ $2a_1$ 、幅 $2c_1$ のく形窓があり、その中央に長さ $2a_2$ 、幅 $2c_2$ の一様面圧ヘッドが微小に突出して設置されているとき、長手方向に張力 T で巻きつけられた幅 b 、厚さ h の磁気テープの変形および磁気テープとヘッド、円筒面との接触圧力を解く。ヘッドの形状を与えてヘッド面上のテープの接触問題をも含めて解くことも可能であるが解析領域での分割数をかなり増す必要がある。テープ面の左下角に

図 3 テープ中央における集中力作用点の局所的変形分布に関する理論と実験の比較

原点を有する直交座標系 $O-x, y$ をとり $x=\xi$, $y=\eta$ の位置に与えた単位集中力に対する円筒面形状からの微小変形分布を求めると次式となる。

$$w_g = \sum_{m=1}^{\infty} \left[\frac{2 \sin \frac{m\pi\xi}{l}}{bl \left\{ D_1 \left(\frac{m\pi}{l} \right)^4 + \left(T - \frac{D_1}{r^2} \right) \left(\frac{m\pi}{l} \right)^2 + D_2 \right\}} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4 \sin \frac{m\pi\xi}{l} \cos \frac{n\pi\eta}{b} \cos \frac{n\pi y}{b}}{bl \left[D_1 \left\{ \left(\frac{m\pi}{l} \right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b} \right)^2 \right\}^2 + \left(T - \frac{D_1}{r^2} \right) \left(\frac{m\pi}{l} \right)^2 + D_2 \right]} \right] \\ \times \sin \frac{m\pi x}{l} + \sum_{m=1}^{\infty} (Y_{1m} e^{a_m y} \cos \beta_m y + Y_{2m} e^{-a_m y} \cos \beta_m y + Y_{3m} e^{a_m y} \sin \beta_m y - Y_{4m} e^{-a_m y} \sin \beta_m y) \sin \frac{m\pi x}{l} \quad (1)$$

ここで

$$\left. \begin{aligned} \alpha_m &= \frac{\sqrt{\left(\frac{m\pi}{l}\right)^4 + \left(\frac{T_0}{D_1} - \frac{1}{r^2}\right)\left(\frac{m\pi}{l}\right)^2 + \frac{D_2}{D_1}} + \left(\frac{m\pi}{l}\right)^2}{2}, \\ \beta_m &= \frac{\sqrt{\left(\frac{m\pi}{l}\right)^4 + \left(\frac{T_0}{D_1} - \frac{1}{r^2}\right)\left(\frac{m\pi}{l}\right)^2 + \frac{D_2}{D_1}} - \left(\frac{m\pi}{l}\right)^2}{2} \dots\dots\dots (2) \\ D_1 &= Eh^3/12(1-\nu^2) \\ D_2 &= Eh/r^2(1-\nu^2) \end{aligned} \right\}$$

で ν はポアソン比である。式(1)はテープの微小変形に関するグリーン関数で、 $r \rightarrow \infty$ とした場合について2章で実験的にその妥当性を確かめたものである。

式(1)を用いて図4のモデルにおけるテープの変形を解析する。式(1)は図4(b)のように $q_0 = T/r$ の一樣圧力が内側から作用した状態で $w_0 = 0$ となる。したがって窓とヘッドの一樣面圧によって生ずる変形は、 $-q_0$ が窓部 $2a_1 \times 2c_1$ の領域に、また p_0 が $2a_2 \times 2c_2$ の領域に作用したときの変形になる。

窓およびヘッドの中心の座標を (x_0, y_0) とすれば、 $-q_0, p_0$ による円筒面からの変形 w_0 は次式で与えられる。

$$w_0 = \int_{y_0-c_2}^{y_0+c_2} \int_{x_0-a_2}^{x_0+a_2} p_0 w_0 dx dy - \int_{y_0-c_1}^{y_0+c_1} \int_{x_0-a_1}^{x_0+a_1} q_0 w_0 dx dy \dots\dots\dots (3)$$

w_0 は窓の外側領域では一樣な圧力 q_0 が作用しているときの変形分布であり、したがって接触圧力が一樣に q_0 となるシリンダ形状に相当する。しかし半径 r の円筒との接触問題を解くことも興味深いので次に円筒との接触圧力による変形を考える。

図5(a)に示すようにテープ変形の解析領域をヘッ

ドの頂点の座標 (x_0, y_0) を中心にヘッド、窓によるテープの変形が及ぶと考えられる範囲を長手方向に分割幅 Δx_i で M 個、幅方向に分割幅 Δy_j で N 個に分割し、その分割線の交点を指標 (i, j) で表す。そしてテープの連続的な変形および接触圧力をこれら交点における変形 w_{ij} 、接触圧力 p_{ij} で近似的に表すことにする。今図5(b)に示すように各交点にその自然長が円筒表面となるようなこわさ k_{ij} の仮想的なばねを考え、そのばねの先端がテープと結合していると考える。このときテープに作用するこのばねの復元力は、

$$f_{ij} = -k_{ij} \cdot w_{ij} \dots\dots\dots (4)$$

となる。しかしテープは $q_0 = T/r$ の一樣面圧による点 (i, j) への集中力 $\Delta S_{ij} T/r$ によって変位零となっているのだから円筒面形状からのテープ変位に寄与する点 (i, j) における集中力 f'_{ij} は次式となる。

$$f'_{ij} = -k_{ij} \cdot w_{ij} - T/r \cdot \Delta S_{ij} \dots\dots\dots (5)$$

ここで ΔS_{ij} は点 (i, j) の集中力に寄与する分割面積である。また窓領域では $f'_{ij} = 0$ である。すべての代表点における f'_{ij} による変形をも考慮した点 (k, l) でのテープの変形は重ね合せの理から次式で表される。

(a) VTRのシリンダ、ヘッドおよびテープ

(b) テープに作用する圧力

図4 解析のモデル

(a) 解析領域の分割

(b) 仮想可変ばね

図5 解析領域の分割と仮想可変ばねモデル

$$w_{kl} = w_{0kl} + \sum_{i=1}^{2M+12N+1} \sum_{j=1}^{2M+12N+1} f_{ij} \cdot w_{g,ijkl} \quad \dots\dots\dots (6)$$

一方接触圧力 p_{ij} は次式で与えられる。

$$p_{ij} = f_{ij} / \Delta S_{ij} \quad \dots\dots\dots (7)$$

式(5)を式(6)へ代入すればテープ変位 w_{kl} に関する次の代数方程式をうる。

$$\sum_{i=1}^{2M+12N+1} \sum_{j=1}^{2M+12N+1} (k_{ij} \cdot w_{g,ijkl} + \delta_{ik} \cdot \delta_{jl}) w_{ij} \\ = -\frac{T}{r} \sum_{i=1}^{2M+12N+1} \sum_{j=1}^{2M+12N+1} \Delta S_{ij} w_{g,ijkl} + w_{0kl} \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$(k=1, 2, \dots, 2M+1, 1=1, 2, \dots, 2N+1)$$

代表点での k_{ij} は実際には接触点 ($w_{ij}=0$) で無限大、分離点で零である。そこで k_{ij} を適当な初期値から出発し以下のアルゴリズムでこの状態に近づけていく。

$$\left. \begin{aligned} w_{ij}^{(n)} > 0 & \quad k_{ij}^{(n+1)} = \alpha_s k_{ij}^{(n)} \\ w_{ij}^{(n)} \leq 0 & \quad k_{ij}^{(n+1)} = \alpha_c K_{ij}^{(n)} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここで n はくり返し回数を表す。また $\alpha_s \leq 1/2$, $\alpha_c \geq 2$ である。接触、分離領域がほぼ定まってくれば、 α_s は十分小さく、 α_c は十分大きくとったほうが収束性が早まるのでくり返し回数で変化させるのがよい。 α_s をかなり小さく、 α_c をかなり大きくとっても収束性がよい場合には、その極限として式(8)において、 $w_{ij} > 0$ のとき $k_{ij}=0$, $w_{ij} \leq 0$ のとき $k_{ij} w_{ij} = f_{ij}$, $w_{ij} (=f_{ij}/k_{ij}) \rightarrow 0$ において、分離点のテープ変位と接触点の接触力に関する代数方程式を解けばよい。

式(8)を解くにあたり、静的な接触問題でヘッドが一様なテープ巻きつけ領域にある場合には $x=x_0$ の直線に関して変形は対称となるので未知量を $x=x_0$ の片側領域に縮少できる。また以下に述べる場合のようにヘッドがテープ幅方向の中央にある場合には $y=y_0$ に関しても変形は対称となるので $1/4$ の領域を解析すればよい。

3.2 数値計算法と計算結果 各代表点におけるグリーン関数の値、すなわち影響係数の計算および w_0 の計算には、テープ長 $l=50$ mm, テープ幅 $b=12.7$ mm, テープ厚さ $h=20$ μ m, 円筒半径 $r=31$ mm, ヤング率 $E=5.39$ GPa, テープ張力 $T=77.2$ mN/mm, $a_1=2.7$ mm, $c_1=0.35$ mm, $a_2=1.75$ mm, $c_2=0.065$ mm の値を用いた。

接触問題としての解析領域は長手方向に ± 6 mm, 幅方向に全幅であるが、ヘッド頂点はテープ中央にあるとしてこの $1/4$ の領域を解析した。長手方向には 6 mm を 20 等分割し、幅方向には 6.35 mm を 15 個および 25 個に不等分割し、比較計算した。長手方向の分割間隔は $\Delta x_i = 0.3$ mm ($i=1 \sim 20$) であるが、幅方向の分割間隔は mm 単位で以下のとおりである。

15 分割 ($N=15$)

$$\begin{aligned} \Delta y_1 &= 3.3, \Delta y_2 = 1.5, \Delta y_3 = 0.7, \\ \Delta y_4 &= 0.25, \Delta y_5 = 0.1, \\ \Delta y_6 \sim \Delta y_{15} &= 0.05 \end{aligned}$$

25 分割 ($N=25$)

$$\begin{aligned} \Delta y_1 &= 3.55, \Delta y_2 = 1.12, \Delta y_3 = 0.56 \\ \Delta y_4 &= 0.28, \Delta y_5 = 0.14, \Delta y_6 = 0.07 \\ \Delta y_7 \sim \Delta y_{17} &= 0.035, \Delta y_{18} = 0.03375 \\ \Delta y_{19} &= 0.03125, \Delta y_{20} \sim \Delta y_{25} = 0.03 \end{aligned}$$

解の収束性はテープ変形 $w_{ij}^{(n)}$ および接触圧力 $p_{ij}^{(n)}$ についてそれぞれ次式で定義される誤差 WE および PE の値で評価した。

$$WE = \frac{1}{\sum_{i=1}^{2M+12N+1} \sum_{j=1}^{2M+12N+1}} |w_{ij}^{(n)} - w_{ij}^{(n-1)}| / \frac{1}{\sum_{i=1}^{2M+12N+1} \sum_{j=1}^{2M+12N+1}} |w_{ij}^{(n)}| \quad (10)$$

$$PE = \frac{1}{\sum_{i=1}^{2M+12N+1} \sum_{j=1}^{2M+12N+1}} |p_{ij}^{(n)} - p_{ij}^{(n-1)}| / \frac{1}{\sum_{i=1}^{2M+12N+1} \sum_{j=1}^{2M+12N+1}} |p_{ij}^{(n)}| \quad \dots\dots\dots (11)$$

以下ではまず、 α_s, α_c を逐次計算過程で一定値に保った場合の収束性について述べる。

図6は幅方向25分割モデルでヘッド面圧 $p_0=51.0$ kPa のときのくり返し回数 n と WE, PE の関係の代表例で、 k_{ij} の初期値 k および α_s, α_c の値の収束性に及ぼす影響を示している。この計算例では k の初期値 k が 4×10^{-3} N/mm で $\alpha_s=0.1$, $\alpha_c=10$ のときに収束性が最も良い結果となっているが、これらの値がかなり変わっても収束性に与える影響は比較的鈍感であることがわかる。また図6からもわかるが一般に PE より WE のほうが早く減少する。15分割の場合にも WE と PE が 10^{-7} 程度となるくり返し回数はほぼ同等であったが、くり返し回数が $n=10 \sim 20$ の領域で WE, PE の大きな変動がみられ、分割数の大きい方が収束性は向上するように判断された。

図7は25分割モデルにおいて $p_0=51.0$ kPa のとき、くり返し回数に対してヘッド頂点のテープ変位 $w_{M+1, N+1}$ および窓の前縁中央位置の接触圧力 P の値が一定値に収束していく様子である。また15分割モデルに対する同様の特性を図8に示す。

図7および図8の比較からテープ変位の収束性は一見15分割モデルのほうがよいが、接触圧力は25分割モデルのほうがよいことがわかる。またヘッド面圧が同じでも頂点のテープ変位は25分割モデルの方が 0.5μ m 弱大きくなっており、また接触圧力 P もやや大きくなっている。これは図9に示すように、分割数が少ないと接触圧力が激しく変化する解が得られることに起因しており、25分割モデルのほうが真値に近いと考えられる。

図9に15分割および25分割モデルにおけるテープ変形分布および接触圧力分布をヘッド頂点から長手方

 図 6 WE および PE の減少特性に及ぼす仮想ばねの初期値 k および α_s, α_c の影響

 図 7 テープ変位と接触圧力の収束特性 ($N=25$)

 図 8 テープ変位と接触圧力の収束特性 ($N=15$)

図 9 各分割数におけるテープ変形分布と接触圧力分布の計算結果例 ($p_0=52.0$ kPa)

向に 3.9 mm, 幅方向に約 0.5 mm の領域について示す。これから分割数による変形分布の差はほとんどみられないが, 接触圧力にはかなりの差がみられる。特に 15 分割の場合には窓の前縁近傍の接触圧力の変化が著しく, 分割数を増すと接触圧力の変化はなめらかとなり, 合理的な結果が得られる。また当然ではあるが, 窓部から十分離れた長手方向位置では接触圧力は $q_0 = T/r$ の一定値に収束している。

図 10 はヘッド面圧が $p_0=38.4$ kPa の場合の計算結果で, ヘッド頂点の突出量は約 $13\ \mu\text{m}$ となっている。この場合窓の縁部に局所的にヘッド面圧より大きい接触圧力が生じているが代表点ごとの接触圧力の変化が激しすぎるので, さらに分割数を増して計算しないと真の値か否か不明といえよう。一方ヘッド面圧が $p_0=76.2$ kPa の場合, ヘッド突出量は $40\ \mu\text{m}$ 強となり, 図 11 に示すその接触圧力からわかるようにテープは窓前縁には接触しなくなる。

以上の結果から仮想可変ばね逐次近似法を用いて必要に応じて分割数を多くすれば磁気テープとヘッドおよびシリンダ窓部の接触状態が解析できることが示された。接触と分離の境界領域では分割間隔をかなり細かくする必要があり幅方向の分割間隔が $30\ \mu\text{m}$ の解析結果から窓の縁近傍では $10\sim 20\ \mu\text{m}$ 程度の幅の分割が望ましいと予想される。なお本解析で得られたテープのヘッド面の変形分布から一様面圧ヘッドの形状

図 10 $p_0=38.4$ kPa の場合の w, p の計算結果 図 11 $p_0=76.2$ kPa の場合の接触圧力分布

が求められる。

4. 結 論

フレキシブルディスクにおけるヘッド・媒体インタフェース研究において考案した仮想可変ばね逐次近似法を VTR における磁気テープとヘッドおよびシリンダ窓部の接触解析に適用しその有効性を示した。解析の結果明らかになった本解析の主な特徴は以下のとおりである。

(1) 仮想可変ばねのこわさの初期値および各代表点の仮想ばねのこわさを増大または減少させていく係数の値には最適値が存在するが、その値の変化に対して解の収束性は比較的鈍感である。

(2) テープ変形および一様面圧ヘッド形状は比較

的分割数が少なくても正しい値が求められるが、接触圧力は問題に応じて分割間隔を細かく $30\text{ }\mu\text{m}$ 程度以下としないとなめらかに変化する分布が得られない。ただし分割数が少ない場合にも一定の解に収束する。

最後に本研究は財団法人赤井録音録画技術研究助成会の助成により行われたことを付記し、感謝の意を表する。

文 献

- (1) 酒井・ほか 3 名, 機講論, No. 850-2 (昭 60), 34.
- (2) 山口・野口, TV 学会全国大会予稿集, (昭 60), 199.
- (3) Ono, K., Ebihara, T., ASLE, SP-16, (1984), 97.
- (4) 小野・高月, 機講論, No. 850-2 (昭 60-8), 37.
- (5) 小野・ほか 2 名, 機論, 45-393, A (昭 54), 533.
- (6) 小野・ほか 3 名, 機論, 51-466, C (昭 60), 1389.

討 論

〔質問〕 酒 井 和 夫

((株)日立製作所機械研究所)

シリンダ窓部は、記録性能に対して重要な部分であり、ここでの接触状態を明らかにされたことに敬意を表する。

(1) 図 10 で、ピーク圧力が発生している節点と発生していない節点で、シリンダ面からの変位誤差はどの程度となっているか。

(2) $n=10\sim 20$ で WE, PE が大きく変動するのは、 α_s , α_c を一定としたことと関連があるのか。

(3) 均一面圧ヘッド形状は、単一曲率からどの程度ずれているか、お教え願いたい。

〔回答〕 (1) $10^{-3}\text{ }\mu\text{m}$ 以下の範囲で変位零に近い値となっている。

(2) ヘッドの押込量によって $n=10\sim 20$ で WE, PE が変動する場合としない場合があるので、 α_s , α_c を一定としたことと関連があるか否かわからない。この問題の場合は試みていないが、フレキシブルディスクの接触問題においてはある程度 WE, PE が減少したら $w_{ij}\leq 0$ では k_{ij} を十分大きな一定の値とし、 $w_{ij}>0$ の点では $k_{ij}=0$ と置く方法を取って収束性を向上させたことがある。

(3) 付図 1 は図 9 に対応する $p_0=51.0\text{ kPa}$ の場合についてヘッド頂点を原点にとりテープ長手方向および幅方向にそったテープ変形を示したものである。ヘッド頂点と隣り合う点の変位から求めた実効的な長手方向曲率半径 ρ_x , 幅方向曲率半径 ρ_y をそれぞれ○印および●印で示した。これから長手方向には頂点か

ら半値幅で約 0.7 mm 程度の範囲で曲率半径 26.4 mm となっており、それより大きい範囲では曲率半径が小さくなっていることがわかる。また一様面圧ヘッドの ρ_x は ρ_y の約 5 倍になっていることなどがわかる。

〔質問〕 浅 野 直 輝 (玉川大学工学部)

グリーン関数を用いる接触問題の解法は、接触問題に新しい解法を導入したことになり、大変意義深い研究として注目している。そこで、次の二点について質問させていただきたい。

(1) 解の収束・発散は仮想可変ばね定数 k_{ij} の初期値設定に依存するように思われる。常に安定的に計算可能か。また代表的な計算例について、CPU 時間はどのくらいかご教示願いたい。

付図 1 $p_0=51.0\text{ kPa}$ のとき (図 9 の場合) のヘッド頂点近傍の長手方向および幅方向のテープ変形分布

(2) 有益なグリーン関数を構築しているので、式(4)、(5)のばね定数 k_{ij} を用いなくて、式(7)の接触圧力 p_{ij} を未定係数にして圧力分布形状を X, Y 方向の二重フーリエ級数に展開する、いわゆる大久保の解法^(付1)を発展させた解析的な解法が可能と思われる。過去に検討した経験があればご教示願いたい。もしなければ、今後の課題としてご検討いただければありがたい。

〔回答〕 (1) 図6(b)、(c)および図7、8は仮想ばねの初期値 k をひとけたずつ変えた場合の収束性の変化の様子であるが大きいほうと小さいほうにその値をさらにひとけた変化させても若干収束性が悪くなる程度でその影響は鈍感である。 k をどの程度大きくまたは小さくすれば発散するかについては調べてい

ない。分離、接触に対応して k_{ij} を零および十分大きな値の2値に変化させる場合も含め、 k, a_s, a_c の値の収束性に及ぼす影響は今後さらに検討すべき問題と考えている。M 280-H による本手法の計算時間は $N=25$ の場合、グリーン関数の計算に約5分かかるがその結果を用いた接触問題の収束解は繰返し回数 $n=20$ 回で60秒程度である。グリーン関数は一度計算すればヘッド形状、ヘッド面圧等を変えて接触問題を解くことができる。

(2) 勉強不足でご指摘の解法は未検討である。その解法がかなり複雑な接触領域でもなめらかな圧力分布を求められる性質があれば今後検討してみたい。

(付1) 大久保, 機論, 18-65 (昭27), 58.