超音波振動ドラムによる摩擦軽減と記録再生実験

正会員 光 安 保[†], 正会員 関 口 卓 司[†]Reduction of Friction and Experimental Evaluation
of Ultrasonic Vibration DrumTamotsu Mitsuyasu[†] and Takuji Sekiguchi[†]

Abstract To record as much information as possible on a very small area, it is necessary to reduce the thickness of magnetic tape and smooth its surface. However, the smoothed tape surface can increase the friction between the tape and the fixed drum, and cause instability in running the tape. We have devised an ultrasonic vibration drum (USV drum) designed to reduce the contact area between the tape and the drum by generating infinitesimal ultrasonic vibration on the drum's surface. We performed recording/reproduction tests using the USV drum in the actual transport of a VHS video tape recorder. As a result of the experiment, we decreased the friction coefficient to less than one third, and we achieved stable tape running and excellent recording/reproduction characteristics.

1. ま え が き

ハイビジョンなどの情報量の増大に伴って、VTRにおいては高密度記録化が進められている。高密度化を図るために磁気テープでは、テープの薄型化や表面の平滑化などを進めている。

テープの表面が平滑化されると、記録再生を行うヘッドとテープのスペースが減少し、再生出力が増大し、ノイズが低減される。

例えば、テープ走行時に周波数特性を劣化させるスペーシング損失 L_s (dB) は

$$L_s = |20 \log(e^{-2\pi S_p / \lambda})| \quad (1)$$

S_p : テープヘッドのスペーシング量

λ : 記録波長

と表される。

最短記録波長を $0.5 \mu\text{m}$ とし、 $0.05 \mu\text{m}$ のスペーシングが生じるとすると、再生信号の振幅は約 5.5 dB 低下する。また上條¹⁾らにより、キャリヤ近傍ノイズのパワースペクトラムとテープ表面性のパワースペクトラムを比較した結果、近傍ノイズの原因がテープの表面性にあることが確かめられている。したがって、高密度化を図るには、テープ表面の平滑化が必要になる。しかし、テープの表面が平滑化されると、テープと固定のドラム部分での摩擦が増えて、テープテンシ

キーワード: 高密度記録テープ, 超音波振動, 摩擦係数, VTR, テープ走行系

1994 年 11 月 19 日, 日韓磁気記録シンポジウムで発表

1994 年 12 月 7 日受付, 1995 年 3 月 22 日最終受付

[†] NHK 放送技術研究所(〒157 東京都世田谷区砧 1-10-11, TEL 03-5494-2332)

[†] NHK Science and Technical Research Laboratories (1-10-11, Kinuta, Setagaya-ku, Tokyo 157, Japan)

ョンが増加し、テープの走行が不安定になったり、時にはテープがドラムに貼り付き、テープが走行停止することもある。

そこで我々は、ドラム表面を超音波振動させる USV (Ultrasonic Vibration = 超音波振動) ドラムを試作し、振動によりテープとドラムの接触面積を減らし、テープと固定ドラム部分での摩擦を減少させることを検討した。

2. テープとドラム間の摩擦のメカニズム

固体どうしが接触して滑る場合の摩擦のメカニズムとしては、一般に凹凸説と凝着説に分類される。凹凸説は、2つの物体の凹部と凸部が歯車のように噛み合い、一方が他方の面の隆起部分を乗り越えるときに必要な力を摩擦力とするのに対し、凝着説は接触している物体が一種の接着状態になっており、この接着状態を引きはがすときに必要な力を摩擦力とする説である。

ここで、Bowden²⁾らが金属について行った研究で、平滑な面どうしを滑らせる場合には、凝着による摩擦が支配的になるという実験結果から、テープとドラム間に発生する摩擦は、凝着による摩擦が支配的と考えられる。

凝着による摩擦とは、テープとドラム表面のミクロ的な凹凸部のうち、主として凸部で互いに押しつけられた状態で接触すると考えるものである。この凸部どうしの本当の接触面積は、見かけの接触面積の数百分の一から数万分の一しかないため、接触点での接触圧力は非常に高い値になる。この高い圧力と変形のため強い凝着(表面の原子間に発生する結合)が起こる。この状態で一方の物体がずべると、凝着部分あるいはその近傍の弱い断面が、せん断でちぎれる。このせん断でちぎれる力が摩擦力である。

凝着による摩擦力(F_a)は、以下のように表せる。

$$F_a = \tau S \quad (2)$$

τ : 材料のせん断に抗する強さ

S : 真実接触面積

したがって、摩擦力を軽減するには、真実接触面積を減少させることが必要になる。

摩擦力は、一般に摩擦係数と垂直荷重との積で表せる。この摩擦係数の値は、材料の組合せや面の清浄度、平滑さ、潤滑剤の有無などにより大幅に変わるため、定数とみることはできない。例えば、鉄と種々の材料との動摩擦係数を測定した C. L. Goodzeit ら³⁾によると、鉄とアルミニウムの動摩擦係数は 0.82 になり、鉄と鉄は 0.52、鉄とクロムは 0.53 になる。ま

た、円柱とテープの摩擦係数は、Howell⁴⁾らにより円柱の半径や円柱の入口側のテープ張力に関係し、半径が大きくなるに従い摩擦係数が増加することが確かめられている。

VTR テープ走行系においてテープと接触し、滑り摩擦を生じるのは、固定ドラムや傾斜ポスト、キャプスタン軸などの円柱である。このうちテープとの摩擦が最も大きくなるのは、固定ドラム部分と推測される。これは、

(1) テープの走行性を改善する処置を施したベース面よりも、テープ磁性面と接触する方が、摩擦は大きくなる。

(2) 円柱として最も半径が大きく、巻き付け角も大きい場合、傾斜ポストやキャプスタン軸などよりも摩擦が大きくなる。

と考えられるからである。また、回転ドラム部分と異なり、固定ドラム部分では、テープ浮上量が少なく、テープとは滑り摩擦が支配的になる。したがって、VTR テープ走行系では、固定ドラムとテープの摩擦を軽減することが非常に重要であると考えられる。

3. USV ドラムの構成と原理

試作した USV ドラムを写真 1 に、構成を図 1 に示す。このドラムは記録再生ヘッドを搭載した中ドラム部分のみが回転し、上・下のドラムは回転しない。超音波振動は、この上・下の固定ドラム部分にのみ与え、記録再生に影響のある中ドラム部分には与えない。振動を与えるアクチュエータには、固定ドラムの内周に接着されたリング状の圧電セラミックスを用いる。この圧電セラミックスは、事前に結晶に方向性をつける分極処理を施してある。

図 2 に微小振動発生メカニズムを示す。(a)に示

写真 1 USV ドラム
USV drum.

図 1 USV ドラムの構成
USV drum layout.

図 2 微小振動発生メカニズム
Mechanism to generate infinitesimal vibrations.

すように隣り合う区間が逆位相になるような方向に分極処理を施した圧電セラミックスをドラムに貼り付け、電圧を印加して歪みを発生させると、(b)に示すように、ドラム表面では、圧電セラミックスが膨らん

図 3 解析モデル
Analysis model.

だ部分は山になり、縮んだ部分は谷になるたわみが生じる。圧電セラミックスに印加する電圧の極性を反転すると(c)に示すようにドラム表面のたわみも反転する。そこで、(d)に示すように圧電セラミックスに交流電圧を印加すれば、ドラム表面には定在波の微小振動が発生する。

USV ドラムでは、振動の頂点でテープに接触するため、テープとドラムの真実の接触面積も減少して摩擦が減少する。また、ドラムを振動させることにより、テープとドラム間に作用する原子間力が弱くなる状態が周期的に作られ、凝着が起きにくくなり、摩擦が減少すると考えられる。

ここで、圧電セラミックス単体の伸び縮みによる凹凸量は非常に微小である。例えば、代表的な圧電セラミックス材料であるチタン酸バリウムの圧電定数は $150 \times 10^{-12}(\text{m/V})$ 程度で、100 V の電圧を印加しても、変位量はわずか $0.015 \mu\text{m}$ でしかない。そこで、USV ドラムではドラム表面での振動振幅を大きくするため、圧電セラミックスを共振させて用いている。ここで、ドラムに定在波振動を与える振動波は、図 2 の微小振動発生メカニズムで示したように、ドラムと圧電セラミックスが一体となって変位する屈曲振動(曲げ振動)になる。

共振周波数は、ドラムの屈曲振動をドラムと圧電セラミックスの組合せ梁の曲げ振動として扱い、微分方程式を解いて得られる⁵⁾。

モデル化したドラムと圧電セラミックスの組合せ梁を図 3 に示す。梁の中心軸に沿って x 軸をとり、梁の横方向のたわみを $y(x, t)$ 、材料のヤング率を $E(\text{kg/mm}^2)$ 、密度を $\rho(\text{kg/mm}^3)$ 、梁の断面積を $A(\text{mm}^2)$ 、断面 2 次モーメントを $I(\text{mm}^4)$ 、曲げ振動の波長を $\lambda_a(\text{mm})$ とすると、曲げモーメントとせん断力から運動方程式を求めると

図 4 振動振幅の周波数特性
Frequency characteristic of amplitude vibrations.

$$\frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial t^2} + \frac{EI}{\rho A} \frac{\partial^4 y(x, t)}{\partial x^4} = 0 \quad (3)$$

いま振動数を ω として、定在波振動を考慮して

$$y(x, t) = Y(x)(A \sin \omega t + B \cos \omega t) \quad (4)$$

と置き、一般解を解くと

$$Y(x) = C_1 \sin \frac{\lambda_a x}{\ell} + C_2 \cos \frac{\lambda_a x}{\ell} + C_3 \sinh \frac{\lambda_a x}{\ell} + C_4 \cosh \frac{\lambda_a x}{\ell} \quad (5)$$

ここで、 $\ell = \lambda_a / 2$ とする。

C_1, C_2, C_3, C_4 はいずれも梁の境界条件によって定まる積分定数である。

この積分定数を解くために、圧電セラミックスの分極を施した 1 区画を 1 つの単純支持梁と考え、各分極区画の端面(梁の両端)では、たわみと曲げモーメントはゼロになるから、固有振動数は

$$\omega = \frac{\pi^2}{\ell^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (6)$$

で表せる。

ここで、 λ_a を求めるために、VHS 式 VTR 用のドラム ($\phi 62 \text{ mm}$) を USV ドラムに置き換えると仮定し圧電セラミックスをドラム一周で 16 区画に分極すると、16 個の単純支持梁がドラム一周にわたって繋がることになる。したがって、振動の波長は 22.38 mm になる。この値を(6)式に代入し、共振周波数を求めると 45.5 kHz になる。

そこで、実際に 16 区画に分割して分極した圧電セラミックスを貼り合わせた VHS 式 VTR 用のドラムを製作し、ドラム表面での振動振幅を光学式の非接触変位計で計測し、周波数特性を測定した。

下ドラムを測定した結果を図 4 に示す。試作した下ドラムは、 42 kHz に共振点を持つことがわかる。共振周波数が計算値より小さくなるのは、ドラムの一部を VTR のベース面と固定しているため、剛性が上がり等価質量が増加したためと、圧電セラミックスとド

図 5 ドラム表面の振動の様子
Vibrations on the drum surface.

図 6 スペックルパターン干渉法の測定原理
Measuring principle of the speckle pattern.

ラム面との接着層の影響であると思われる。また、このドラムの機械的共振周波数を実測すると 3.92 kHz であった。したがって、圧電セラミックスの共振周波数 42 kHz と十分に離れているため、機械的な影響はないと考えられる。

次に、 42 kHz の共振周波数で下ドラムを振動させたときのドラム外周の振動振幅を連続的に非接触光学式変位計で測定した結果を図 5 に示す。測定点としては、ドラムの高さ方向での中央点で、テープ走行ドラム面 170° にわたって選択した。振動のピークはドラム半周で 8 点観察され、ドラム一周に換算すると分極数の 16 に一致する。

そこで振動モードと振動振幅を計測するために、電子式スペックルパターン干渉法を応用し、ドラム表面を観察した。スペックルパターンは、粗面物体にレーザ光を照射すると拡散反射光がランダムに干渉しあい現れる不規則で明瞭な斑点模様である。測定原理を図 6 に示す。図のように測定面と参照面のスペックルパ

(a) Measurement portion

(b) Upper drum

(c) Lower drum

図7 ドラム表面のスペックルパターン
Speckle patterns on the drum surface.

ターンを重ね合わせ、そのスペックルパターンが測定面が $\lambda_L/2$ (λ_L : レーザ光の波長 $0.78 \mu\text{m}$) 変位するごとに明暗が反転する特性を利用している。測定面の変位 Δx は $\Delta x = n \cdot \lambda_L/2$ (n は整数) で表され、変位・変形の等高線を干渉縞 (縞間隔: $\lambda_L/2$) としてリアルタイムで測定する。

図7にスペックルパターン干渉法で観察したドラム

図8 摩擦係数測定系
Friction coefficient measuring system.

を示す。使用しているレーザ光の波長が 780 nm であるため、縞間隔は $0.39 \mu\text{m}$ に相当する。(a)は観察したドラムの測定位置を示す。(b)は上ドラムの一部を拡大したもので、振動変位はドラム下端面で最大になり、およそ $2 \mu\text{m}$ になる。また、ドラムの下側の約 $2/3$ だけが振動していることがわかる。これは、ドラム内周に貼り合わせた圧電セラミックスの高さが、ドラムの下側から約 $2/3$ であることと、ドラムを固定している支持点がドラム下端から約 $2/3$ の位置にあるためと考えられる。さらに、この振動の節の位置は、ドラム内周に貼り合わせた圧電セラミックスの分極区間の端面と一致する。

(c)は、同様に下ドラムの一部を拡大したもので、上ドラムの場合と対称なパターンが観察される。この場合でも、振動部分は、ドラム内周に圧電セラミックスを貼り合わせた部分で、ドラムを固定している支持点のあるドラム上端から約 $2/3$ の位置の間が振動し、(b)と同様の振動モードを持つことがわかる。

これらの結果から、ドラム上の振動モードを見ると、1つの分極区間を圧電セラミックスとドラムの組合せ梁とおいた図3の解析結果とよく一致する。

4. 摩擦係数の測定

ドラム面におけるテープとの摩擦係数の算出には、オイラーのベルトの原理が適用できる。測定系を図8に示す。図で示したように、一端に重り (T_1) を取り付けたテープをドラムに巻き付け、他端でテープを引っ張ったときの引っ張り力 (テープテンション = T_2) を計測し、摩擦係数を算出する。

$$T_2 = T_1 e^{\mu \theta} \quad (\text{オイラーの式}) \quad (7)$$

θ : ドラム巻き付け角

μ : 摩擦係数

(a) Without drum vibration

(b) With drum vibration

(c) Relationship between vibration amplitude and friction coefficient

図 9 摩擦係数測定結果

Measurement examples of tape friction coefficient.

高密度記録に適した試作のメタル蒸着(ME)テープの摩擦係数を計測した結果を図 9 に示す。(a)はドラムを振動させないときのテープテンションを測定したデータで、50 g の重りを引っ張るのに 146 gf (1.43 N) の力が必要なことを示し、摩擦係数は 0.68 になる。(b)はドラム表面を微小振動させたときのテープ

(a) Humidity is 60%

(b) Humidity is 70%

図 10 摩擦係数と湿度の関係

Relationship between tape surface roughness and friction coefficient.

引っ張り力を測定したデータで、引っ張り力は 65 gf (0.64 N) になり、摩擦係数は 0.17 に減少する。(c)は、振動振幅と摩擦係数の関係を、メタル蒸着(ME)テープと VHS テープについて測定を行った結果を示す。横軸にドラムの振動振幅をとり、振幅ゼロは振動させない状態を示す。

ここで用いた ME テープと VHS テープの表面粗さは、それぞれ 2.5 nm と 8.3 nm である。

(c)より、ドラム表面の振動振幅が大きいほど、摩擦軽減効果が大きいことがわかる。また、表面性の良い ME テープの方が効果があることがわかる。

図 11 テープ浮上特性(ドラム入口側)
Tape flotation characteristics. (at drum entrance)

図 12 テープ浮上特性(ドラム出口側)
Tape flotation characteristics. (at drum exit)

次にテープの表面粗さの異なるテープを用いて摩擦係数を測定した。結果を図 10 に示す。(a)は湿度が 60%のとき、(b)は 70%のときの摩擦係数を示す。摩擦係数はテープの表面が平滑になるほど大きくなる傾向にあり、また湿度が 70%のときの摩擦係数は、60%のときの値の約 1.5 倍に増加していることがわかる。しかし、摩擦係数の軽減率は、テープの種類や環境条件により異なるが、ドラムを振動させることにより摩擦係数は大きく減少している。

これらの実験結果により、USV ドラムによる摩擦軽減効果が確認された。

5. ドラム振動が記録再生に及ぼす影響

USV ドラム表面を振動させたときに、記録再生にどのような影響を与えるかを実験により確認した。まず、USV ドラム上のテープの浮上特性を計測した。測定は小型の非接触の光学式変位計を用い、VHS テープ走行系に組み込んだドラムを実測した。

ドラム入口側のテープ浮上特性を図 11 に示し、出口側の浮上特性を図 12 に示す。また各々、(a)が振動を与えないとき、(b)が振動を与えたときの浮上量を示す。ドラム入口側で、上ドラムのテープ浮上量が固定ドラムにもかかわらずやや大きいのは、ドラムの組立精度誤差によると思われる。測定の結果、ドラム

図 13 中ドラムの振動振幅
Vibration amplitude of middle drum.

図 14 再生信号のスペクトラム解析(1)
Analysis of reproducing signal spectra (1).

入口・出口とも振動を与えると、振動振幅の最も大きくなるドラム端面でテープ浮上量が若干大きくなる傾向にある。これは端面でのテープ浮上量が振動振幅より小さくなり、テープが押し上げられたためと考えられる。しかし、ヘッド部分や振動振幅が小さい部分ではテープ浮上量の増加は見られず、良好な浮上特性が観察できた。

また、上下ドラムを振動させたとき、中ドラム部に振動が伝搬されているかどうかを確認するため、中ドラム部の振動振幅を、ドラム外周から非接触変位計で測定した。結果を図 13 に示す。図より上下ドラムに与えた振動周波数 42 kHz 付近でわずかなピークが確認できる。しかし、この時の振動振幅を変位量に換算すると 5 nm 以下であり、実用的には無視できる値である。

次に、USV ドラムで記録再生を行ったときのエンベロープの周波数解析を行った。実験では、5 MHz の単一周波数の正弦波形の信号を記録再生したときの、エンベロープの周波数解析により評価した。再生信号のスペクトラム解析の結果を図 14、図 15 に示

(a) Without drum vibration

(b) With drum vibration

図 15 再生信号のスペクトラム解析(2)
Analysis of reproducing signal spectra (2).

す。図 14 は、ドラムが振動することによりテープに振動が伝搬し、記録トラックに変動が生じるかを検証するために、加振周波数近傍の再生エンベロープのスペクトラム解析の結果を示したもので、記録時にのみドラムに振動を与え、再生時は振動させない場合のスペクトラムを示す。図より加振周波数のピークが見られないことから、USV ドラムの振動が、記録したトラックに変動を与えていないと思われる。

図 15 は、テープとヘッド間のスペース変動の有無を検証するために、記録信号 5 MHz 近傍のスペクトラム解析を行った結果を示しており、(a)はドラムを振動させないとき、(b)は記録再生時に振動させたときのスペクトラムを示す。図より、5 MHz のレベルはドラムに振動を与えても変化しておらず、テープとヘッド間のスペースに変化が生じていないことがわかる。

一方、キャリア近傍のサイドバンドのノイズを比較

図 16 試作テープ走行系
Experimental tape path.

表 1 テープ走行系での摩擦係数
Friction coefficient on the transport.

	non-vibration	vibration
entrance	22 gf	22 gf
exit	53 gf	28 gf
friction coefficient	0.280	0.077

すると、(b)の時に振動周波数成分のノイズのピークが観察される。しかし、ノイズのピーク値は、加振させないときが -58 dB、加振させたときが -60 dB になり、レベル的にはむしろ減少している。

これらの結果から、ドラム表面を振動させることによる記録再生への影響はないことが確認できた。

6. テープ走行系

USV ドラムを VHS 式 VTR に組み込み、VHS テープを用いたときの摩擦係数を測定した。テープ走行系を図 16 に示す。摩擦係数は、ドラム入口部 A と出口部 B でのテープテンションを測定し計算した。この場合、傾斜ポストも含めた摩擦係数が計算されるが、ドラムとポストの直径比は約 20 : 1 であり、Howell らの摩擦係数の性質から傾斜ポストの影響を無視できると判断した。結果を表 1 に示す。ドラム入口部では、テンション制御を行っているため、テープテンションは 22 gf と、振動の有無に関わらず一定の値を示す。出口部では、ドラムを振動させることによりテンションが大きく減少し、テンション値が 58 gf

から 28 gf に減少している。このときの摩擦係数は 1/3 以下になり、図 9 で示したドラム単体での摩擦係数の測定実験での摩擦係数軽減率とほぼ同じ値を示した。

これらの結果より、実際のテープ走行系においても、USV ドラムの摩擦軽減効果が確認できた。

7. む す び

テープとドラムの摩擦を軽減するために、ドラム表面を微小に振動させる USV ドラムを開発した。この USV ドラムでテープとの摩擦係数を測定した結果、テープの表面粗さの違いや湿度変化に対しても、摩擦軽減効果があることが確かめられた。

さらに、記録再生実験を行い、エンベロープ等を解析した結果、記録再生系に大きな悪影響を与えていないことを確かめた。さらに、USV ドラムを実際のテープ走行系に配置し、摩擦軽減実験を行った結果、摩擦係数は 1/3 以下になり、テープの貼り付きもなく、安定なテープ走行特性が得られた。

本研究を進めるにあたり、終始ご指導頂いた放送技術研究所記録・機構研究部 大島部長、阿部副部长、および大場技術局長に深く感謝いたします。また、実験に御協力頂いた記録・機構研究部の方々に感謝の意を表します。

【参 考 文 献】

- 1) 上條, 松井: “デジタル VTR におけるキャリア近傍ノイズの解析”, 信学技報, MR 92-82, pp. 1-8 (Feb. 1993)
- 2) F. P. Bowden, D. Tabor: “The Friction and Lubrication of Solids Part 1”, pp. 90-121, Oxford Univ. Press (1950)
- 3) C. L. Goodzeit, R. P. Hunnicutt, A. E. Roach: “Frictional Characteristics and Surface Damage of Thirty-Nine Different Elemental Metals in Sliding Contact With Iron”, Trans. of the ASME, 78, 8, pp. 1669-1676 (1956)
- 4) H. G. Howell: “The General Case of Friction of a String Round a Cylinder”, J. Text. Institute, 44, 8/9, pp. 359-362 (1953)
- 5) 入江: “機械振動通論”, 朝倉書店 (1974)

みつやす たもつ
光安 保 昭和 57 年、山梨大学工学部精密工学科卒業。同年、NHK に入局。以来、放送技術研究所、記録・機構研究部において、放送用 VTR などの記録機構の研究のほか、海底リモコン雲台、防振台などの取材機器の開発に従事。正会員。

せきぐち たくじ
関口 卓司 昭和 40 年、東京電機大学卒業。昭和 35 年、NHK に入局。テレビ運行部、TOC などを経て、49 年、同放送技術研究所に勤務。現在、同所記録・機構研究部主任研究員。テレビカメラ防振装置の開発、VTR の機構制御の研究に従事。正会員。