転がり・滑り往復運動下のトラクション特性*

加 藤 康 志 郎^{*1}

Traction Behavior of Traction Drive in Reciprocating Motion

Kohshiro KATO

The frequency responses and traction forces between the driver roller and the follower flat plate in the traction drive of reciprocating motions are studied experimentally. The traction oil Daphne 7074 and paraffinic mineral oil VG 32 are used. There is a marked discrepancy in the shape of the traction curves which are obtained from the increase and decrease of the relative velocity of the roller and the plate. The critical frequency, below which stable transmission could be performed, is presented theoretically. Maximum traction coefficients are obtained at the critical frequency and are influenced by the limiting shear stress of the lubricants and the surface roughness of the specimens.

Key Words: Tribology, Traction, Traction Coefficient, Asperity Interaction, Limiting Shear Stress, Critical Frequency, Reciprocating Motion

1. 緒 言

近年、工作機械や自動車の変速機構に低振動、低騒音のトラクションドライブの登載が試みられている。

これらトラクションドライブでは、ローラの運動は一定時間一方向への連続回転であり、潤滑状態は定常状態下に置かれる。そこでのトラクション力伝達のメカニズムは、潤滑油のせん断特性の解明と⁽¹⁾⁽²⁾、非ニュートン流弾性流体潤滑(EHL)理論の確立⁽³⁾の両面より明らかにされ、今日では、高圧下のトラクション力は、用いる潤滑油の限界せん断応力特性と運転条件から予測されている⁽⁴⁾。

一方、トラクションドライブを微小送りや往復運動機構に適用しようとするとき、運動は起動と停止を繰返し、界面は境界潤滑とEHLの間に置かれ、トラクション特性はEHL下のそれと異なったものとなるであろう。

非定常トラクション特性においても、定常トラクション特性と同様に、油膜形成状態や潤滑油の限界せん断応力特性からの研究が必要と考えられる。

しかし、このような観点からの油膜形成状態⁽⁵⁾⁽⁶⁾や

非定常トラクション特性に関する研究は極めて少ない。

西崎ら⁽⁷⁾⁽⁸⁾は純滑り往復運動下のトラクション特性について、油膜の直接観察を含めトラクション力の特異性を報告している。しかし、転がりと滑りを含む往復運動下のトラクション特性に関しては、高橋ら⁽⁹⁾の精密送り機構の研究で一部触れられているにすぎない。

本研究では、まず2種類の潤滑油と3種類の試料表面粗さを用いて、転がりと滑りを伴う微小往復運動における油膜形成状態とトラクション係数を求め、これと、二円筒試験より得られたEHL下の最大トラクション係数との比較を行い、非定常トラクション特性とそれに影響を及ぼすおもな因子を明らかにする。

ついで往復運動トラクションドライブにおける精密位置決めが可能な運転条件を求める。

2. 実験装置および実験方法

図1に、用いた装置の概要を示す。接触荷重は装置下部のばねを締付けることより、駆動側試験片(ローラ)と従動側試験片(プレート)に与えられる。

直流モータの回転は、偏心軸により正逆の微小回転運動に変換されローラに伝えられる。一方、プレート

* 原稿受付 平成6年4月6日。

*1 正員、鶴岡工業高等専門学校(〒997 鶴岡市井岡字沢田104)。

は、数個の小ローラに支えられた移動テーブルに取付けられており、移動が可能である。したがって、プレートとテーブルは一体となって、ローラとプレート間に生じたトラクション力により微小往復運動を行うことになる。実験は、所定の荷重のもと、ローラとテーブルの接触部に潤滑油を供給し、モータの回転速度を次第に高め、テーブルがローラに追従できなくなるまで行われる。

ローラの揺動角とテーブルの変位はそれぞれ非接触の変位計で、またテーブルの加速度は加速度計で測定される。油膜の形成状態の確認は図2の試料間電圧測定回路の出力を監視することで行った。この回路では、完全な油膜が形成され試料が分離すると、試料間電圧(E_c)は150 mV、油膜が切れ試料が完全に接触すると0 mVとなる。これらの値はサンプリングタイム0.5 msでデジタルレコーダに記録される。

ローラには軸受け鋼(SUJ 2)を、プレートには炭素鋼(S 45 C)を用いた。ローラは直径30 mm、幅6 mmとし、先端に7.5 mmのクラウニング半径を設けた。それぞれ、硬度はHV=780, 350である。

表面粗さは2面の複合粗さ $R [(R_{a1}^2 + R_{a2}^2)^{1/2}]$ で $R=0.02, 0.25, 1.30 \mu\text{m}$ の3種類とした。

テーブルの質量は1.1 kg、ローラの揺動による変位振幅は $A_R=1.45 \text{ mm}$ 一定とし、与えた圧力は平均ヘルツ圧力で0.52–1.25 GPa、周波数は0–25 Hz、温度

は $293 \pm 2 \text{ K}$ である。

潤滑油には合成トラクションオイル Daphne 7074 とパラフィン系鉱油 VG 32 を用いた。表1にその性状を示す。

3. 周波数特性

図3に、複合粗さ $R=0.02 \mu\text{m}$ における、平均ヘルツ圧力ごとの周波数の増加に対するテーブルの変位振幅(A_T)とローラの変位振幅(A_R)の比を示す。

周波数が低いとき、テーブルはローラに正しく追従し運動するが、周波数が高くなると、ある周波数において試料間に巨視的な滑りが発生し、テーブルの振幅はその後急減する。追従可能な周波数は接触圧力と

表1 潤滑油の性状

Oil	Kinematic Viscosity $\times 10^6 \text{ m}^2/\text{s}$	Viscosity Index	Density at 288K $\times 10^3 \text{ Kg/m}^3$
DN7074	at 313K 46.87 at 373K 6.63	91	0.9424
VG32	at 313K 31.04 at 373K 5.35	105	0.8626

図3 テーブルの周波数特性

図1 実験装置の概略図

図2 試料間電圧測定回路

図4 加速度、速度、試料間電圧の変化
(Daphne 7074, $R=0.02 \mu\text{m}$, 6.4 と 10.5 Hz)

もに増加する。

また同一荷重では、VG 32 に比べ Daphne 7074 のほうが追従可能な周波数も高く、その後の振幅の減少もおだやかである。

図 4 に、Daphne 7074 の $R=0.02\ \mu\text{m}$ 、平均ヘルツ圧力 $0.64\ \text{GPa}$ における、テーブルの振幅に変化の見られない領域と振幅が減少した領域 [図 3 の a と b] における速度、加速度、試料間電圧の一例を示す。

低周波数では、テーブルの加速度は正弦的な曲線を描く。ここではローラとテーブルの速度に相違は見られない。しかし、周波数の増加とともに加速度波形は頭打ちとなり台形波へと移行する。それに対応しテーブルの速度も曲線から直線へと変化する。

一方、試料間電圧 E_c はテーブル速度の増加とともに高くなり油膜の形成を示すが運動の両端では零に近い。

さらに周波数が高くなり、ローラにテーブルが追従できなくなると、ローラとテーブルの速度が等しくなる一瞬だけ高い電圧が認められ、巨視的滑りが存在する領域では零となる。巨視的な滑りの発生と同時に油膜は急速に破断されることを示している。

試料間電圧の最大値は Daphne 7074 のほうが VG 32 よりいく分高い。また、表面粗さの粗い他の 2 組の試料では、試料間電圧は用いた油にかかわらず本実験の範囲では常に零であった。

4. トラクション特性

テーブルを支える小ローラの転がり抵抗を無視すれば、ローラとテーブル間に生じたトラクション力 T は、

$$T = ma \dots\dots\dots (1)$$

となる。

ここで、 m はテーブルの質量、 a はテーブルの加速度である。

これより荷重を W とすれば、トラクション係数 μ は

$$\mu = \frac{T}{W} \dots\dots\dots (2)$$

となる。

図 5 に、図 3 の a, b における、滑り率とトラクション係数の関係を示す。滑り率 S は、 $S = \Delta u / u_R \times 100\%$ とした。ここで、 Δu はローラとテーブルの速度差で $\Delta u = u_R - u_T$ である。

周波数が低い ($6.4\ \text{Hz}$) ときのトラクション係数は、広く帯状に分布し、最大トラクション係数も小さく、二円筒試験で見られるような明りょうなトラクションカーブは得られなかった。しかし、周波数が高く巨視的滑りの認められる領域では、2 本のトラクションカ

図 5 滑り率とトラクション係数 (Daphne 7074)

図 6 滑り率とトラクション係数 (VG 32)

ーブとしてその特性が表れた。それらは、ローラとテーブルの速度差が減少 (①, ③) する過程、および、増加 (②, ④) する過程である。

西川ら⁽⁷⁾は、純滑り往復運動下のトラクション特性を調べ、相対速度差の減少過程と増加過程では、特性に相違があることを示し、これを閉じ込め膜の排出と関連づけ説明している。

転がりと滑りを伴う往復運動にも、油膜の形成と崩壊の立場から見れば、西川らの説明が適応できると考えられる。

図 6 に、VG 32, $R=0.02\ \mu\text{m}$ 、平均ヘルツ圧力 $0.64\ \text{GPa}$ [図 3 の c] におけるトラクションカーブを示す。ここでも 2 本の曲線が得られるが、トラクション係数は Daphne 7074 よりも小さい。また、トラクション係数は滑り率とともに増加し定値を示さず、突起干涉の割合が滑り率に比例し増加していることを示している。

トラクションカーブの立上がりこう配は、巨視的滑りの増加とともに小さくなる。ローラとテーブルの速度差が大きいほど滑り率が大きく算出されるためであ

ろう。

5. 最大トラクション係数

ここでは、2本のトラクションカーブが水平になった値、または $S=50\%$ の値の平均値を最大トラクション係数とし、その変化を調べよう。

図7に、Daphne 7074, $R=0.02\ \mu\text{m}$ における、接触圧力ごとの周波数に対する最大トラクション係数の変化を示す。最大トラクション係数は、テーブルがローラに追従している範囲では周波数とともに増加するが、巨視的滑りの発生と同時にほぼ一定値となる。これら一定となった値は、圧力の増加とともにある値に収束する傾向を示す。

図8に、Daphne 7074 と VG 32 のそれぞれ3種類の表面粗さにおける、接触圧力と定値となった最大トラクション係数の関係を示す。著者らの二円筒試験機⁽⁴⁾における転がり速度 $3.14\ \text{m/s}$ 、温度 $293\ \text{K}$ での最大トラクション係数も併せて示した。

二円筒試験での最大トラクション係数は、Daphne 7074 のほうが VG 32 より大きい。また、いずれもはじめ圧力とともに増加するが、高压領域ではほぼ一定値 ($\bar{\mu} \approx 0.1$ および $\bar{\mu} \approx 0.07$) となる。既報⁽⁴⁾で述べたように高压下のトラクション係数は油の限界せん断応力より定まる定値を示す。

一方、往復運動では、 $R=0.02\ \mu\text{m}$ の場合、最大トラクション係数は、二円筒に比べ低圧から大きな値を示すが、圧力の増加に伴い Daphne 7074, VG 32, それぞれ二円筒試験の最大トラクション係数に近づく。

図4に見るごとく、試料間電圧の最大値は加速度零で得られ、それ以外での試料間電圧は低く常に突起干渉の存在を示した。低圧では追従周波数も低く、油膜も薄いので、部分 EHL 下のトラクション力に突起干渉による摩擦力が加算され、その分トラクション係数

が大きく得られたと考えられる。また、圧力が増加し追従周波数も高くなれば、油膜も厚くなり、EHL 下のトラクション係数と一致するものと思われる。

複合粗さを $0.25, 1.30\ \mu\text{m}$ と大きくすれば、粗さに伴ったトラクション係数は突起干渉の影響を受け大きくなるが、やはり圧力の増加と共に減少する。

本実験での計算による油膜厚さは、Daphne 7074 よりも VG 32 のほうが薄く、およそ Daphne 7074 の $1/2$ であった。したがって、VG 32 を用いたほうが突起干渉の影響は大きいと考えられるが、得られたトラクション係数は、 $R=0.02, 0.25\ \mu\text{m}$ とともに Daphne 7074 より小さい。この傾向は二円筒試験における Daphne 7074 と VG 32 の最大トラクション係数の関係と一致する。

これより、これらの複合粗さでは、最大トラクション係数は突起干渉よりも潤滑油の限界せん断応力に大きく影響されるといえる。

しかし、複合粗さが $1.30\ \mu\text{m}$ にもなれば潤滑油の特性は無視され、Daphne 7074, VG 32 とともに同じ値となる。

図8 平均ヘルツ圧力とトラクション係数

図7 周波数と最大トラクション係数 (Daphne 7074)

図9 膜厚比 λ と最大トラクション係数

図9に膜厚比 $\lambda(=h_{\min}/R)$ と最大トラクション係数の関係を示す。 $h_{\min}$ の計算には Chittenden ら⁽¹⁰⁾ の式を用いた。図9より、 $\lambda > 1$ では潤滑油の限界せん断応力特性が支配的であり、 $\lambda < 1$ から突起干渉の影響が現れることがわかる。また、図9の λ とトラクション係数の関係は、Bair ら⁽¹¹⁾ の定常トラクションの結果とよく一致する。

6. 限界周波数

次に、テーブルがローラに精度よく追従できる周波数の上限を求めよう。

ローラの揺動変位 x_R は、 A を振幅、 ω を角周波数とすれば、

$$x_R = A \sin \omega t \quad \cdots \cdots (3)$$

と表せる。

低周波数の領域では、テーブルはローラに正確に追従していることより、テーブルの変位を x_R で近似できよう。これより、テーブルを駆動するトラクション力 T は、

$$T = mA\omega^2 \sin \omega t \quad \cdots \cdots (4)$$

となる。

一方、EHL 下の最大トラクション係数 $\mu_{\max}$ は

$$\mu_{\max} = m_L + \frac{\pi}{2p} \tau_0 \quad \cdots \cdots (5)$$

と表される⁽⁴⁾。ここで、 m_L は潤滑油の物質定数、 p は平均ヘルツ圧、 τ_0 は大気圧での限界せん断応力である。

さて、EHL 下の油膜の温度は、受けるせん断応力と滑り速度に比例し上昇する。上昇幅が大きいときは m_L 、 τ_0 ともに温度の影響を受け減少し、最大トラクション係数の低下を招く。しかし、Daphne 7074 を用いた二円筒試験での、最大トラクション係数時における油膜の温度上昇は、接触部の形状に左右されず、転がり速度 3.14 m/s、接触圧力 1.5 GPa、油温 313 K において、たかだか 10 K 程度であった⁽¹²⁾。また、本解析では、低周波数の、しかも巨視的滑りの発生以前を取扱うことより、油膜の温度上昇はさらに小さいと考えられる。

以上のことより、ここでは油膜の温度上昇を無視し、図8を等温下の実験結果と仮定する。

さらに、 $\lambda > 1$ では潤滑油の限界せん断応力特性が支配的であることより、プレートとローラ間の力の伝達はおもに部分 EHL 下の油膜のせん断抵抗によりなされると思われる。そこでのトラクション係数は、高圧下の二円筒試験で最大トラクション係数が定値となった値 $\bar{\mu}$ と同じと考えることができる。

図10 限界周波数の比較

したがって、圧力が十分に高いところでは、式(5)と図8より、

$$\mu_{\max} = m_L = \bar{\mu} \quad \cdots \cdots (6)$$

と近似される。

よって、荷重を W とすれば、加速度波形が頭打ちになる所のトラクション力 $T_{\max}$ は、

$$T_{\max} = \bar{\mu} W \quad \cdots \cdots (7)$$

となる。

式(4)と(7)より、テーブルがローラに精度よく追従できる周波数の上限(限界周波数 f_c)は、

$$f_c = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\bar{\mu} W}{Am}} \quad \cdots \cdots (8)$$

となる。

ここで実験結果と式(8)の比較を行う。図3における伝達精度99%の周波数を $f_{99\%}$ とし、これを精密位置決めが可能な周波数の上限、すなわち実験による限界周波数としよう。計算に用いた Daphne 7074 と VG 32 の $\bar{\mu}$ の値は、図8よりそれぞれ $\bar{\mu}=0.1$ 、 0.07 とした。

図10に二つの限界周波数 f_c と $f_{99\%}$ の関係を示す。 f_c と $f_{99\%}$ はよい一致を示した。これより、油の物質定数 m_L 、または、二円筒試験における最大トラクション係数が定値となった値 $\bar{\mu}$ が既知なら、式(8)は表面粗さに左右されない設計の基準となる限界周波数を与えることが明らかとなった。

さらに、逆にたどれば、往復運動の限界周波数より、油の限界せん断応力のパラメータの一つである物質定数 m_L を求めることもできよう。

7. 結 論

潤滑油に合成トラクション油とパラフィン系鉱油を用い、転がり・滑り往復運動下の非定常トラクション

特性を調べた結果、以下の結論を得た。

(1) 相対速度差零を境に、二つのトラクション特性が現れる。

(2) 巨視的滑りと同時に油膜の破断が進む。

(3) 最大トラクション係数は接触圧力の低い領域から大きな値を示し、膜厚比 $\lambda > 1$ では潤滑油の限界せん断応力に、 $\lambda < 1$ では突起干渉に大きく影響される。

(4) 高精度な伝達が可能な周波数は、潤滑油の物質定数 m_L にて決定され、伝達可能な周波数の上限は

$$f_c = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{m_L W}{Am}}$$

で与えられる。

最後に、本研究を遂行するにあたり、東北大学 加藤正名教授に有益な助言をいただいた。また、試験片の製作は富士通アイソテック(株)に、潤滑油は出光興産(株)営業研究所にそれぞれ協力いただいた。記して

謝意を表する。

文 献

- (1) Bair, S. and Winer, W.O., *Trans. ASME, J. Lubr. Technol.*, **101**(1979), 251.
- (2) Höglund, E. and Jacobson, B.O., *Trans. ASME, J. Tribol.*, **108**(1986), 571.
- (3) 加藤・加藤・井上, 機論, **55**-516, C(1989), 2168.
- (4) 加藤・加藤・井上, 機論, **58**-546, C(1992), 242.
- (5) Blok, H. and Koens, H.J., *Proc. Inst. Mech. Eng.*, **180**, 3B(1965), 221.
- (6) Petrousevitch, A.I., ほか3名, *Wear*, **19**(1972), 369.
- (7) 西崎・兼田, 機論, **58**-550, C(1992), 225.
- (8) 西崎・兼田, 機論, **59**-557, C(1993), 185.
- (9) 高橋・大塚・小野・白田・東福, 精密工学会誌, **54**-4(1988), 715.
- (10) Chittenden, R.J., Dowson, D., Dunn, J.F. and Taylor, C.M.A., *Proc. R. Soc., Ser. A.*, (1985), 397, 245.
- (11) Bair, S. and Winer, W.O., *Trans. ASME, J. Lubr. Technol.*, **104**(1982), 382.
- (12) 加藤・加藤・井上, 機論, **60**-571, C(1994), 1013.