

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 4 月 12 日現在

機関番号：13102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05758

研究課題名(和文)円弧溝付きディスクと球面ライダから構成された電気しゅう動接点の潤滑特性

研究課題名(英文)Lubrication Characteristics of Electric Sliding Contacts Consisting of Rotating Circular Grooved Disk and Stationary Rider With Spherical Surface

研究代表者

金子 覚 (Kaneko, Satoru)

長岡技術科学大学・工学研究科・教授

研究者番号：90161174

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、小型DCモータのブラシなどに広く使用されている電気しゅう動接点の性能向上を目指して、潤滑状態下で広範囲の運転条件で通電可能なしゅう動接点の形状や材料について提案した。その結果、安定した通電特性をもたらす、機械的損失である接点部の摩擦力を低減させるためには、運動面側に円弧溝を設けたディスクを、静止側にしゅう動面が球面形状のライダを組み合わせた接点が望ましいこと、その中でもディスク上の円弧溝幅を大きく、さらにディスク材料に通常のsolid金属より多孔質含油材料を用いた方が、より性能が向上することを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：The present study has been carried out to improve the performance characteristics of the electric sliding contacts operating under lubricated condition by a combination of disk with circular grooves and rider with a spherical surface. The results show that increasing the cross-sectional area of the circular grooves on the disk extends the operation condition yielding the metal contact to a region of higher sliding velocity and a lower applied load. These are attributable to the fact that a larger radius of circular groove enhances a leakage of oil lubricant from the contact region to the downstream region through the circular grooves and reduces the oil-film force in the clearance between the rider and disk. The results also show that sliding disks made of porous material used for conventional sintered metal bearings yield more stable current-carrying properties during long period than conventional solid disks.

研究分野：潤滑工学，機械力学

キーワード：電気しゅう動接点 球面ライダ 円弧溝付きディスク 通電特性 摩擦特性

1. 研究開始当初の背景

相対運動する物体間に電流を流す電気しゅう動接点は小型モータのブラシ等として、AV 機器, OA 機器の他, オートミラーやワイパなどの自動車用電装品に至るまで広く用いられている. 最近はこれら機器の小型化, 小電流化に伴い, 電気しゅう動接点の小型化や信頼性の向上が要求されてきている. 一般に, 電気しゅう動接点には高い通電性と機械的長寿命かという背反する事柄が要求されている. つまり, 機械的寿命を向上させるには, しゅう動部に潤滑膜を形成させてしゅう動に伴う摩擦力の低減や摩擦を回避することが考えられるが, 潤滑膜が厚くなればしゅう動面が分離され, 接点として必要な機能である通電性が失われることになる. トライボロジーの視点から通電性と高寿命を同時に満足できる潤滑状態を考慮すると, しゅう動面に流体膜と境界潤滑膜または金属接触部が混在するいわゆる混合潤滑状態であることが望ましい. これは金属接触部において通電を確保しつつ, 流体膜部での摩擦力抑制効果が期待できるためである. この混合潤滑状態をもたらすパラメータとして, しゅう動面形状やしゅう動面材料が考えられる. 従来の研究では, 実験的解析により, 電気しゅう動接点の通電特性や摩擦特性に及ぼすしゅう動面材料, 表面粗さ, 運転条件 (接触荷重, しゅう動速度), 潤滑剤の種類の影響が定性的に明らかにされている. しかし, 個々に有用なデータが提供されているものの, 通電性と高寿命を同時に満足できるしゅう動接点の設計指針が得られていないのが現状であると考えられる.

2. 研究の目的

本研究では, 小型 DC モータのブラシなどに広く使用されている電気しゅう動接点の性能向上を目指して, 潤滑状態下での広範囲の運転条件 (高いしゅう動速度, 低い押付け荷重の範囲まで) で通電を可能とするしゅう動面形状を提案することを目的とする. 具体的には運動面側に円弧を設けたディスクと静止側にしゅう動面が球面形状を有するライダの組み合わせからなる接点を用いて, ディスク表面の円弧溝幅, ライダしゅう動面の曲率半径が通電特性及び摩擦特性に及ぼす影響を実験的, 理論的に明らかにする.

3. 研究の方法

(1) 解析モデルと数値解析 Fig.1 に解析モデルを示す. しゅう動接点部は, しゅう動面が球面のライダと, 円周方向に円弧溝を設けた回転ディスク, それら二面間に満たされた潤滑油で構成される. 計算領域は扇形で定義し, ライダ表面全体とする. 座標系は円筒座標系を用い, ライダ中心位置 O_c (ディスクの回転中心点 O_d から距離 r_c に位置する) を原点として, ライダの半径方向を r , しゅう動

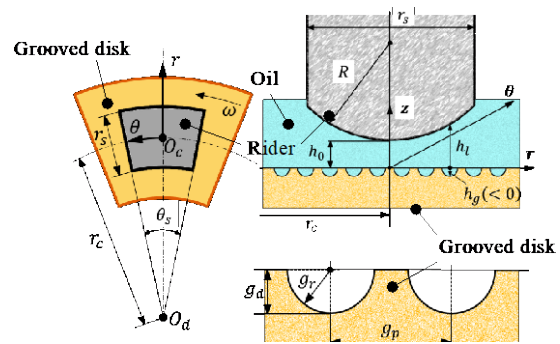


Fig.1 Analytical model and coordinate system

方向を θ , すきまの厚さ方向を z とする. 溝ディスクは点 O_d を中心として角速度 ω で回転している. 潤滑油は非圧縮性, 等粘度のニュートン流体として扱う. 接点部の油膜圧力は次の無次元レイノルズ方程式で支配されるものとする.

$$\frac{\partial}{\partial r} \left\{ (\hat{r}C_n + 1) \hat{h}^3 \frac{\partial \hat{p}}{\partial \hat{r}} \right\} + \frac{1}{A_r^2 (\hat{r}C_n + 1)} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\hat{h}^3 \frac{\partial \hat{p}}{\partial \theta} \right) = 6(\hat{r}C_n + 1) \frac{\partial \hat{h}}{\partial \theta} \quad (1)$$

ただし, 式(1)中の無次元変数は以下で定義される.

$$\begin{aligned} \hat{r} &= (r - r_c) / r_s, & \hat{\theta} &= \theta / \theta_s, & \hat{h}_0 &= h_0 / r_s, & \hat{R} &= R / r_s, & \hat{p} &= p / (\eta \omega / \theta_s) \\ A_r &= r_c \theta_s / r_s, & C_n &= r_s / r_c, & \hat{h} &= h / r_s = (h_l - h_g) / r_s = \hat{h}_l - \hat{h}_g, \\ \hat{h}_l &= \hat{h}_0 + \hat{R} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{\{(\hat{r}C_n + 1) \sin(\theta_s \hat{\theta})\}^2 + \{(\hat{r}C_n + 1) \cos(\theta_s \hat{\theta}) - 1\}^2}{(C_n \hat{R})^2}} \right] \\ \hat{h}_g &= -\hat{g}_d, & \hat{g}_d &= g_d / r_s = \sqrt{\hat{g}_r^2 - \hat{f}^2}, & \hat{g}_r &= g_r / r_s \end{aligned} \quad (2)$$

数値解析は, コントロールボリューム法を用いて基礎方程式を離散値化し, すきま内の無次元油膜圧力 \hat{p} を SOR 法による繰り返し計算で求める.

(2) 実験 実験には, Fig.2 に示すピン・オン・ディスク型の摩擦試験機を使用する. 移動側接点の溝ディスクと固定側接点のライダで構成されている. 板ばねの一端にはライダが取り付けられており, 他端は Z 軸ステージに固定されている. 接点部の荷重は, 板ばねを介してライダを回転ディスクに押し付けることで負荷される. 押付け荷重及び摩擦力は板ばねに取り付けたひずみゲージによって測定する. 導通状態については, スリッピングを介してライダとディスク間に開回路電圧 0.11V を印加し運転中の電圧変化 (接触電圧) により確認する. ライダはしゅう動面が曲率半径 $R (=19.05\text{mm})$ の球面形状を有しており, 半径方向幅 r_s が 5mm, 幅中央におけるしゅう動方向円弧長さ L_0 が 5mm [ライダ幅径比 $A_r (=r_c \theta_s / r_s) : 1.0$], ライダ表面粗さ $R_q [\mu\text{m}]$ は 0.066 である. ディスクには回転中心から $r = 5 \sim 25\text{mm}$ の範囲にピッチ $g_p = 500\mu\text{m}$ で 40 本の円弧溝が設けられている. ディスクは円

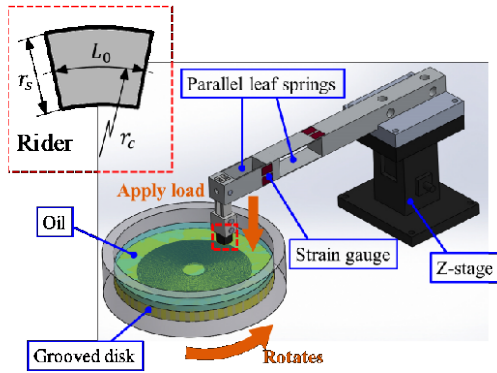


Fig.2 A schematic Illustration of friction tester

弧溝の半径 g_r の異なる 4 種類 [$\hat{g}_r=0.01, 0.02, 0.03, 0.04$] と溝無しディスク (Solid) [$\hat{g}_r=0$] を用意した。また、ディスクの表面粗さ $R_q[\mu\text{m}]$ はそれぞれ、0.553, 0.414, 0.144, 0.201, 0.372 である。ライダしゅう動部幅中央の位置はディスク中心から r_c に設定されており、しゅう動部は常時潤滑油 (粘度 $\eta \approx 291\text{mPa}\cdot\text{s}$; 25°C) で満たされている。運転条件はしゅう動速度 $N(=300\text{rpm})$, 押付荷重 $W(0.05\sim 2.0\text{N})$ であり、測定するデータは接触電圧、摩擦力である。さらに測定した接触電圧、摩擦力より分離度 τ , 摩擦係数 μ , 軸受特性数 $S_f[(\eta U_0 L_0 / A_r) / W]$, U_0 : ライダ中心での周速度 $= 2\pi r_c N / 60$ を算出した。分離度 τ は運転中の接触電圧を非接触時の印加電圧で除した値で定義し、 $\tau=1$ で接点部が常時非接触、 $\tau=0$ で常時接触と見なした。

(3) 解析条件 ディスクに設ける溝のピッチは $500\mu\text{m}(=r_s/N_p)$, N_p : 溝数) である。数値解析では、ライダの中心 O_c が溝部の幅中央に位置する場合で行う。最小すきまは、 O_c が位置する溝のエッジにおけるすきまとなる。溝ピッチを実験と一致させた場合、ライダ半径方向幅全体にわたって溝数は 10 本となる。ライダ曲率半径は 3.81 である。

4. 研究成果

(1) 球面ライダと円弧溝付き solid ディスクの組み合わせ Fig.3 は実験結果を示し、軸受特性数 S_f と分離度 τ , 摩擦係数 μ , 無次元摩擦力 $\hat{F}_{fx} [= F_{fx} / (\eta U_0 L_0 / A_r)]$ の関係を示す。横軸の軸受特性数 S_f について、この値が高いほど低荷重、高速度、低いほど高荷重、低速度の運転条件となる。本研究ではディスクとライダが接触し始める運転条件に着目しているので、 S_f 値が高い領域 (低荷重) から実験を行った。図中の塗りつぶされたシンボルは τ が 1 から減少し始めた点を示し、この点より右側が流体潤滑状態、左側が混合潤滑状態と考えられる。 \hat{g}_r が大きいほど、接触領域が S_f 値のより高いほうに移行し、低荷重、高速度での接触 (導通) が可能になり、電気しゅう動接点として使用可能な運転領域が拡大していること

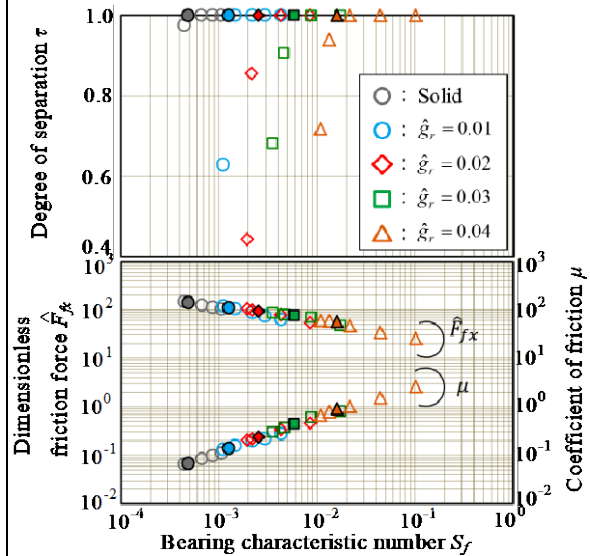


Fig.3 Effects of g_r on relationship between S_f and τ , μ , and \hat{F}_{fx} ; $\hat{R} = 3.81$

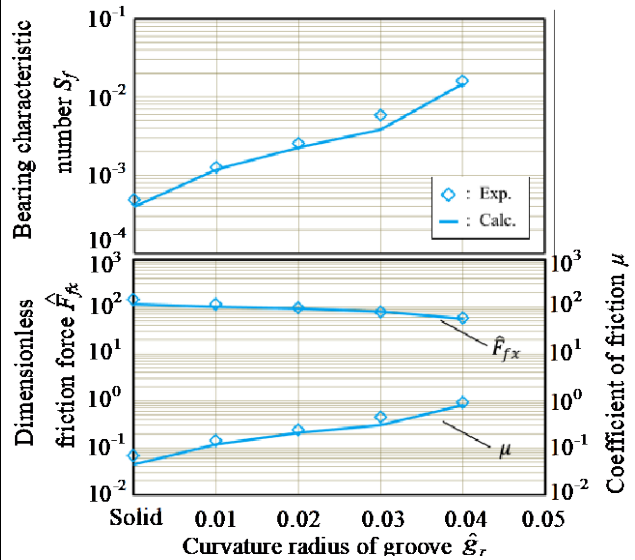


Fig.4 Effects of \hat{g}_r on S_f , μ and \hat{F}_{fx} , at beginning of contacts

がわかる。また、接触が始まる S_f 値における \hat{F}_{fx} は \hat{g}_r の大きいディスクを用いたほうが小さくなっていることがわかる。これは \hat{g}_r の大きい方が接点部に流入してきた潤滑油がより溝に沿ってしゅう動方向に流出され、油膜反力が低減するためだと考えられる。

Fig.4 に S_f 値を減少 (押し付け荷重を増加) させていき、ディスクとライダが接触し始めるときの軸受特性数 S_f , 摩擦係数 μ , 無次元摩擦力 \hat{F}_{fx} と円弧溝の半径 \hat{g}_r との関係を示す。図中のシンボルは実験値 (τ が 1 から減少し始める点に対応) を示す。実線は潤滑状態の指標となる膜厚比 $\Lambda(=h_{min}/\sigma_s)$ が 3 に対応する最小すきま h_{min} を用いた数値解析結果である。ライダとディスク表面の合成粗さ σ_s は実験値を用いて算出した。実験結果と数値解析結果は定性的、定量的にほぼ一致した。すなわち

\hat{g}_r が大きいほど接触し始める S_f 値が大きく、そのときの \hat{F}_k は小さくなる。この一致は、数値解析で用いた円弧溝の公称寸法と実験で用いた溝ディスクの円弧溝寸法がほぼ同等であったためだと考えられる。

以上の結果をまとめると、電気しゅう動接点の移動側接点に円弧溝付きディスクを用いた場合、円弧溝の半径が大きいほど軸受特性数が高い値(低荷重、高速)かつ低い摩擦力で接触し、導通可能領域が拡大する。この傾向は実験的、理論的解析の双方で定性的、定量的に一致した。

(2)球面ライダと円弧溝付き多孔質体ディスクの組み合わせ Solid ディスクと多孔質体ディスク (Porous ディスク) に対して、周期的に荷重の負荷と除荷を繰り返し、負荷時における通電性(分離度)と摩擦力の推移を調べた。負荷荷重 W と円弧溝幅 g_w をパラメータにした結果を、Fig.5, Fig.6 に示す。いずれも場合も、多孔質体ディスクの方が Solid ディスクよりも分離度が低く、摩擦力も低減していることがわかる。

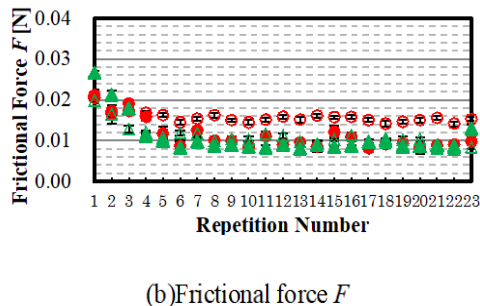
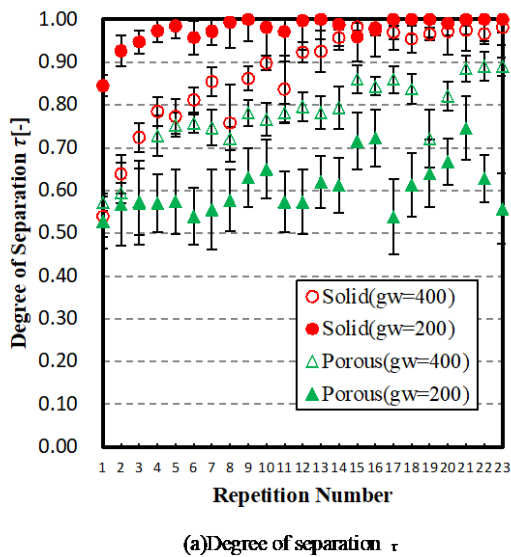
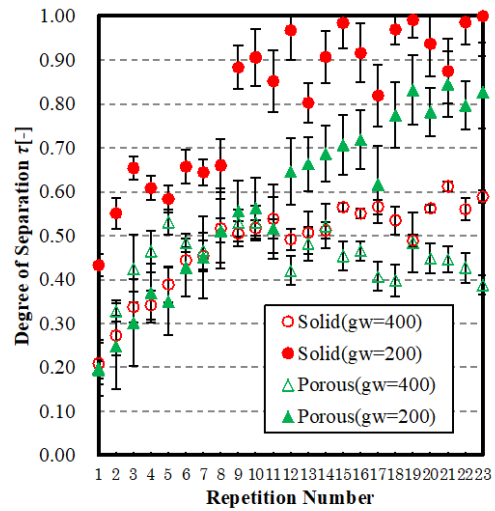
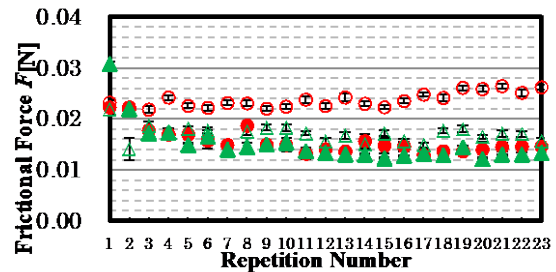


Fig.5 Change of degree of separation τ and frictional force F with repetition of applied load; $W=0.05N$



(a) Degree of separation τ



(b) Frictional force F

Fig.6 Change of degree of separation τ and frictional force F with repetition of applied load; $W=0.1N$

これより、電気しゅう動接点材料として、Solid ディスクよりも多孔質体ディスクの方が有利であることがわかる。今後は、さらなる性能向上のために、多孔質体ディスクの透過率、形状パラメータの影響について調査する必要があると考えられる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

Kaneko, S., Taura, H., Fukasawa, R. and Kanai, H., " Lubrication Characteristics of Electric Sliding Contacts Consisting of Rotating Circular Grooved Disk and Stationary Rider With Spherical Surface Under Lubricated Condition," Trans. ASME Journal of Tribology, 査読あり, Vol.138, No.1, 2016, pp.011705-011705-9. [DOI: 10.1115/1.4031393]

〔学会発表〕（計 2 件）

① 村上公仁, 金子 覚, 田浦裕生, 電気しゅう動接点におけるライダ表面に設けた溝が通電及び摩擦特性に及ぼす影響に関する実験的解析, 日本機械学会北陸信越支部第 54 期総会・講演会, 2017 年 3 月 9 日, 金沢大学工学部 (石川県)

② 畔柳健斗, 金子 覚, 田浦裕生, 円周方向溝付き多孔質体ディスクを用いた電気しゅう動接点のトライボロジー特性, 日本機械学会北陸信越支部第 55 期総会・講演会, 2018 年 3 月 3 日, 福井工業大学 (福井県)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

金子 覚 (KANeko, Satoru)
長岡技術科学大学・工学部・教授
研究者番号: 90161174

(2) 研究分担者

田浦 裕生 (TAURA, Hiroo)
長岡技術科学大学・工学部・准教授
研究者番号: 20334691