

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 9 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26630040

研究課題名(和文) ループ型カーボン繊維マイクロブラシによる軽量・低起動トルクすべり軸受の提案

研究課題名(英文) Proposal of looped carbon fiber bound brush sliding bearing with low weight and low starting torque

研究代表者

梅原 徳次 (UMEHARA, NORITSUGU)

名古屋大学・工学研究科・教授

研究者番号：70203586

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：ループ型カーボン繊維ブラシ(LCFB)の列を円環内面に組み合わせた金属軸とのすべり軸受を試作し、トルク及び負荷容量の評価を行い、LCFBによる軽量・低起動トルクすべり軸受の可能性を明らかにした。その結果、試作したLCFBすべり軸受のトルクを測定した結果、LCFBすべり軸受は起動トルクと定常トルクとの差異が少ない低起動トルク軸受であることが明らかになった。また、金属軸としてマイクロスプライン軸を用いることでLCFBすべり軸受に発生するトルクの数値依存性を減少することが可能であることを示した。更に、LCFBを構成するカーボンファイバー束の座屈荷重から、軸受の負荷容量の設計指針を提案した。

研究成果の概要(英文)：A novel lightweight and low starting torque bearing was proposed with looped carbon fibers brush (LCFB). LCFB showed that the static friction coefficient was nearly equal to the kinetic friction coefficient. By applying LCFB as a slide bearing, a ratio of starting torque to regular torque of LCFB slide bearing is 0.93~1.07 which is smaller than that of the slide bearing which showed 1.19~1.33. When micro-spline shaft is used as a mating material of LCFB slide bearing, the torque reduces because of decrease of real contact area between LCFB and mating materials. We also define the load capacity of LCFB slide bearing by using buckling load of a carbon fiber bundle to avoid overload state.

研究分野：トライボロジー

キーワード：工学 機械工学 トライボロジー

1. 研究開始当初の背景

研究代表者は、1998年以來、DLC膜やCNx膜等の硬質カーボン膜による超低摩擦現象の発現機構の研究を進めており、摩擦を減少させるための表面近傍の構造変化層や相手面への移着膜のせん断強度が超低摩擦実現のために重要であることを明らかにした。しかし、硬質カーボン膜は、弾性率も高いため、片当たりや異物の介在による応力集中時にはく離が生じ、荷重に対するロバスト性に乏しいという問題を有する。

一方、軟質ゴムの場合、荷重に対するロバスト性には優れるが、軟質なため真実接触面積が大きく、かつ凝着力も大きいため高摩擦となる。

そこで、研究代表者らは、2009年カーボン繊維を束ねた柔軟なカーボン繊維マイクロブラシを作成し、カーボン系材料であることによる低せん断強度と低凝着性と、ブラシ構造であることによる荷重に対するロバスト性を併せ持つ新しいしゅう動材料を提案するに至った(図1従来型ブラシ)。

従来型カーボン繊維マイクロブラシでは、その特異な静・動摩擦特性から研究し、バルクのアルミ合金同士の摩擦では静摩擦係数が動摩擦係数の約2倍となる無潤滑摩擦条件下で、カーボン繊維マイクロブラシの静・動摩擦係数がほぼ同じであり、すべり出し時の摩擦係数の増大が無い、転がり摩擦と同様の特異な摩擦特性を示すことを明らかにした。しかし、従来型ではカーボン繊維の端面縁部から摩耗が激しく問題であった。

2. 研究の目的

カーボン繊維の端面が出ない特異な静・動摩擦特性を保持しながら耐摩耗性が期待できるループ型カーボン繊維マイクロブラシ(図1ループ形ブラシ)を新たに提案し、ループ型カーボン繊維ブラシによる軽量・低起動トルクすべり軸受の可能性を検討する。

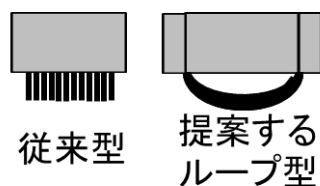


図1 ループ型カーボン繊維マイクロブラシ

3. 研究の方法

本研究では、カーボン繊維をループ型に束ねたループ型カーボン繊維マイクロブラシの摩擦材料としての可能性を明らかにするために以下の2点の研究を行った。

(1) ループ型カーボン繊維マイクロブラシを試作し、滑り出し時の真実接触面積と摩擦力の関係の解明し低静摩擦のための設計指針の提案を行う。

(2) ループ型カーボン繊維マイクロブラシ

ジャーナル軸受を試作し、軸受の特性からループ型カーボン繊維ブラシによる軽量・低起動トルクすべり軸受の可能性を検討した。

4. 研究成果

(1) ループ型カーボン繊維マイクロブラシを試作と滑り出し時の真実接触面積と摩擦力の関係の解明

硬質カーボン繊維を束ね、円筒に巻き付け、円筒を抜くことにより、突き出し長さの異なるループ状のカーボンマイクロブラシを創製した。その突き出し量のすべり出しの摩擦に及ぼす影響を明らかにするために、分担者である新田教授、月山助教により開発されたすべり出し時の真実接触面その場観察装置を用いてループ型カーボンファイバーブラシの突き出し量を2種類変えた試験片においてガラスプリズムとの間での摩擦力と真実接触面積に相当する接触長さの関係を明らかにした。得られた結果を図2に示す。図より、突き出し長さが長いほど接触長さとも摩擦力が大きくなり、接触長さとも摩擦力が比例関係にある事が明らかになった。これより、動き出し時の摩擦力を減少させるためには接触長さ(接触面積)を減少させる事が有効であるという設計指針が得られた。

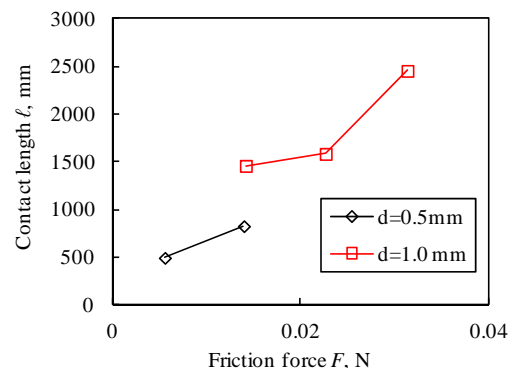


図2 ループ型カーボンファイバーブラシのすべり出し時の摩擦力とその時の接触長さの関係

この設計指針において摩擦力を減少させるためにはループ型カーボンファイバーブラシの相手面にテクスチャを付け見かけの接触面積及びすべり出し時の真実接触面積を減少させる事が有効と考えられる。そこで、研磨紙により種々の表面粗さのテクスチャを施したガラス面とループ型カーボンファイバーブラシのすべり出し時の摩擦力の計測を行った。表面粗さは摩擦方向と直角方向で中心線平均粗さ Ra の値は、領域1で0.022μm、領域2で0.025μm及び領域3で0.180μmであった。垂直荷重 W=0.7 N、摺動速度 V=2.0 mm/sとして摩擦試験を行った。ガラスの微小突起の高さ分布がGreenwood-Williamsonモデルに従うと仮定し、Raが自乗平均粗さ Rrmsと同じであると仮定し、荷重を加えた際のループ型カーボン

ファイバーブラシの真実接触面積を試算し、真実接触面積とすべり出し時の摩擦力の関係を明らかにした。得られた結果を図3に示す。図より、表面粗さ  $Ra$  が大きいほど真実接触面積の推定値が小さく、摩擦係数も小さいことが明らかとなった。本結果からループ型カーボンファイバーブラシを用いて低摩擦を得たい場合には相手面にテクスチャを施し真実接触面積を減少させることが実用的にも有効である事が明らかとなった。

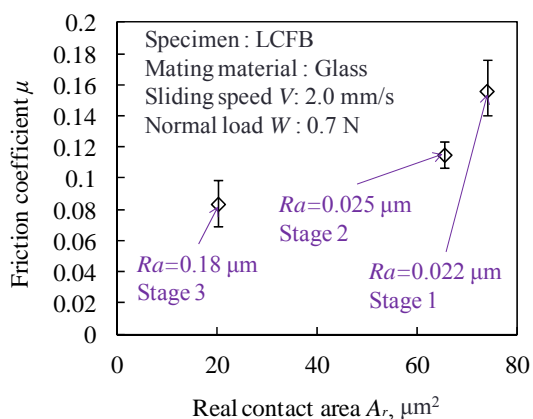


図3 ループ型カーボンファイバーブラシの試算した真実接触面積とすべり出し時の摩擦係数の関係

(2) ループ型カーボン繊維マイクロブラシジャーナル軸受の試作と軸受の特性の計測及びループ型カーボン繊維ブラシによる軽量・低起動トルクすべり軸受の可能性の検討

図4に試作したループ型カーボンファイバーブラシ(LCFB)すべり軸受けの外観を示す。軸受円筒部にはポリプラスチック製ジュラコンを用いた軸受には曲率半径2mmのLCFBが1周あたり10個を3列にわたって配置されており、計30個のLCFBが埋め込まれている。実験にはLCFBすべり軸受の性能比較対象として深溝玉軸受とすべり軸受も用いた。深溝玉軸受は呼び番号6208開放型単列深溝玉軸受である。また、すべり軸受の作製にはLCFBすべり軸受の円筒部と同様にポリプラスチック製ジュラコンを用いた。LCFBすべり軸受は内外径の等しい深溝玉軸受の50%程度の質量で作製できた。

軸受トルク測定の手相手材となる主軸には、通常の円柱軸と図5に示すマイクロスプライン軸の2種類を用いた。どちらの軸にも $\phi 40 \times 80$  mmのSUJ2鋼が用いられている。マイクロスプライン軸は円周方向5 degごとにR0.5の溝が掘ってある。

トルク測定装置には汎用旋盤を応用した軸受トルク測定の手相手材となる主軸は汎用旋盤のチャックに取り付けられる。その主軸に取り付けた軸受外周にはピアノ線が巻き付けられており、軸受はこのピアノ線を

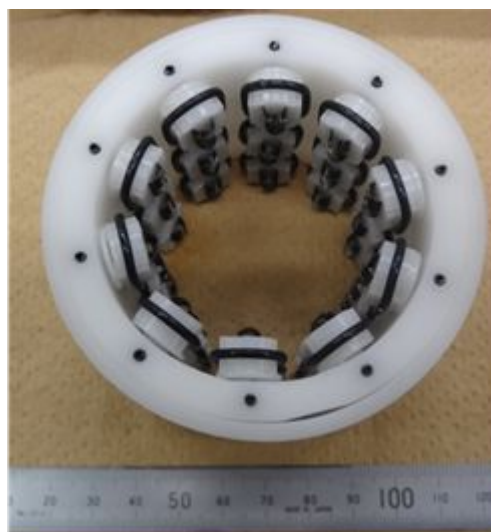


図4 試作したループ型カーボンファイバーブラシ(LCFB)すべり軸受



図5 マイクロスプライン軸

介してロードセルとつながっている。汎用旋盤主軸の回転により、主軸と軸受との間に摩擦力が生じ、ピアノ線が引っ張られる。そのピアノ線の張力をロードセルで測定し、軸受の外周半径をかけることでトルクの算出を行った。

LCFBすべり軸受については、軸受の自重と共に、1組0.2kgのリング状重りを最大2組軸受に取り付けることで軸受にラジアル荷重を加えた。他の軸受については自重のみに相当するラジアル荷重を加えて軸受のトルクを測定した。主軸の回転数  $n$  は3.2, 35, 63, 120 rpmの4種類に設定し、このうち主軸回転数  $n=3.2$  rpmについては汎用旋盤の回転数が対応していないため、外部のステッピングモータからベルトを介して主軸を回転させた。ロードセルによるトルク測定のサンプリング周波数は100 Hzである。測定されたトルクの主軸回転直後から0.5 sまでの最大値を起動トルク  $TS$ 、主軸回転後2.0 - 10.0 s間のトルクの平均値を定常トルク  $TR$  と定義した。

軸受に自重のみを加えた場合のLCFBすべり軸受および深溝玉軸受、すべり軸受の主軸の回転に伴い生じたトルク測定結果を図6と

図7に主軸回転速度3.2 rpmと主軸回転速度120 rpmの場合をそれぞれ示す。図6より、転がり摩擦がすべり摩擦よりも摩擦係数が小さいという一般的な傾向通り、すべり軸受のトルクは大きく、深溝玉軸受のトルクは最も小さい事が分かる。またLCFBすべり軸受のトルクは深溝玉軸受ほどの水準ではないものの、すべり軸受よりも小さいトルクを示している。

図6と図7を比較すると、マイクロスプライン軸を利用することで、LCFBすべり軸受に発生するトルクは速度依存性が小さくなった。その結果、主軸回転速度が大きいほどマイクロスプライン軸によるトルク低減効果は大きくなり、主軸回転速度n=120 rpmにおいては深溝玉軸受と同水準の低いトルクを示す事が明らかになった。

図8には各主軸回転速度における各軸受の起動トルクと定常トルクの比を示す。図より、LCFBすべり軸受の起動トルクと定常トルクの比は0.93-1.07程度、すべり軸受の起動トルクと定常トルクの比は1.19-1.33程度であり、全ての回転速度においてLCFBすべり軸受がすべり軸受よりも小さな値を示している事が分かる。また、深溝玉軸受の起動トルクと定常トルクの比は主軸回転速度を大きくすることで減少し、主軸回転速度n=120 rpmにおいて0.93と各軸受の中で最も小さな値を示した。一方でマイクロスプライン軸を用いたLCFBすべり軸受は、軸受の定常トルクにおけるトルク低減効果と相対的に、主軸回転速度が大きくなることで起動トルクと定常トルクの比が増加する事が明らかになった。

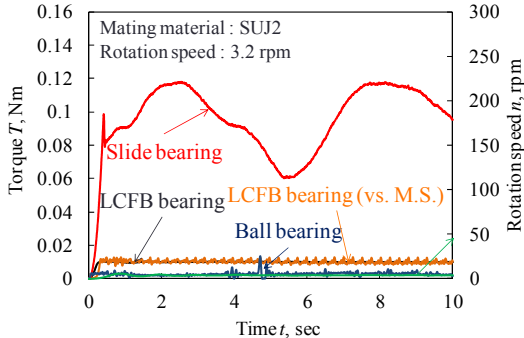


図6 すべり軸受の主軸の回転に伴い生じたトルク測定結果(回転速度3.2 rpmの場合)

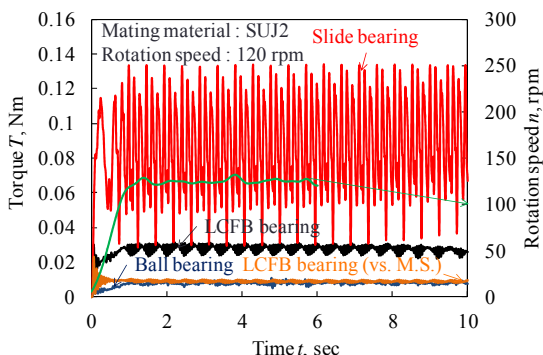


図7 すべり軸受の主軸の回転に伴い生じたトルク測定結果(回転速度120 rpmの場合)

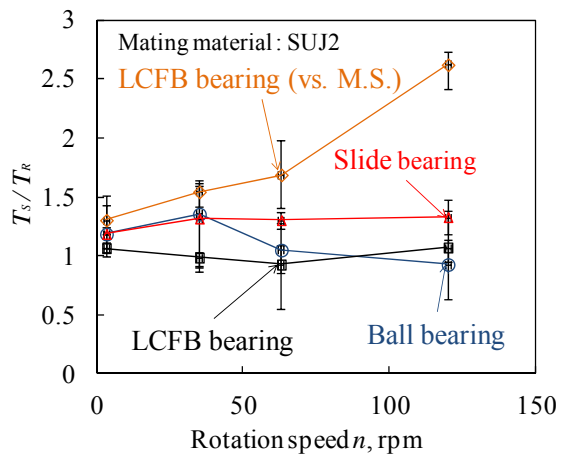


図8 各主軸回転速度における各軸受の起動トルクと定常トルクの比

相手面テクスチャによる摩擦低減効果を応用したマイクロスプライン軸は、LCFBすべり軸受に発生するトルクを低減し、特に主軸回転速度120 rpmにおいては、深溝玉軸受と同水準の低いトルクを示した。一方で、マイクロスプライン軸を用いた場合のLCFBすべり軸受は垂直荷重の増加によって、ファイバーの破断が起こる。ファイバーの破断はLCFBのループブラシ構造を損なうため、LCFBすべり軸受の耐久性を低下させる。したがって、LCFBすべり軸受の耐久性を確保するには、軸受に加わる垂直荷重からLCFBすべり軸受の設計指針を定める必要がある。

軸受内部の個々のLCFBが座屈を起こすことなくLCFBすべり軸受に加えることのできる荷重を負荷容量と定義し、これを算出することで、LCFBすべり軸受の設計指針の提案を行う。

カーボンファイバーの座屈荷重を用いて定義したLCFBすべり軸受の負荷容量の算出方法について説明する。まずはカーボンファイバーの座屈荷重を定式化するため、ループ構造のLCFBを図9のように2本の長柱でモデル化する。このときの長柱の座屈荷重 $P_{cr}$ は長柱の一端が固定端、一端が自由端であることから、次式で表される。

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{4\ell^2} \quad (1)$$

$E$ 、 $I$ はそれぞれLCFB作製に用いたカーボンファイバー束のヤング率と断面2次モーメントである。1個のLCFBを長柱2本で近似したため、LCFB1個あたりが支えられる荷重は式(1)の2倍の値であり、LCFBすべり軸受において主に荷重を支えるLCFBの個数を $m$ とすると、LCFBすべり軸受の負荷容量 $P$ は次式で表される。

$$P = m \frac{\pi^2 EI}{2\ell^2} \quad (2)$$

図10にLCFBの曲率半径に相当する長柱の突き出し長さ $\ell$ を変化させたときのLCFBす

べり軸受の負荷容量を示す。曲げ剛性  $EI$  はカーボンファイバー束の曲げ試験より実測し、実際に曲率半径 1, 2, 3 mm の LCFB を用いたすべり軸受を作成し、軸受にラジアル荷重を加えることでファイバーの座屈が起こるかを確認した。LCFB すべり軸受は図 10 中に緑線で示された負荷荷重曲線より概ね下の荷重領域で使用することを提案する。

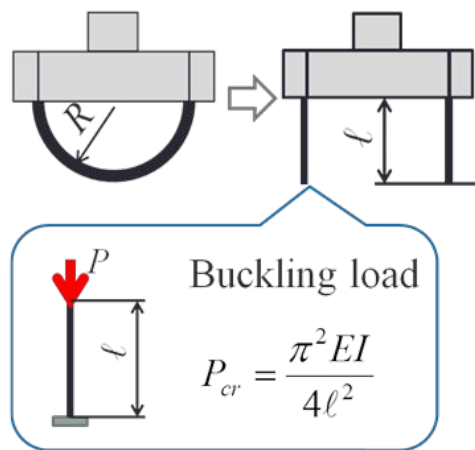


図 9 ループ型カーボンファイバーブラシ構造の 2 本の長柱によるモデル化

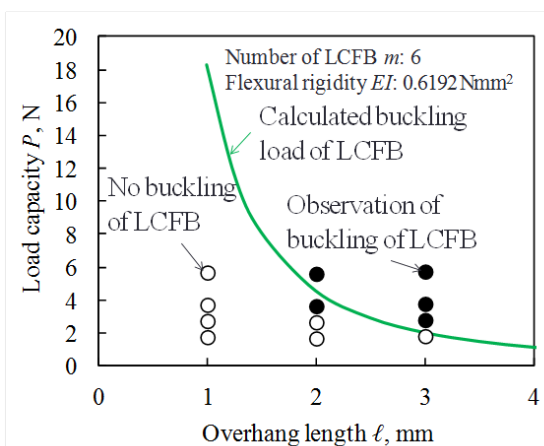


図 10 ループ型カーボンファイバーブラシ軸受における座屈モデルによる座屈荷重の推定値と実測値

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者, 研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 4 件)

Takuya Shitaka, Tsukasa Isogai, Noritsugu Umehara, Static and kinematic friction coefficients of carbon fiber bound brush against textured surface, Leeds Lyon Tribology Conference, (2016-9-6), Leeds, UK  
梅原徳次, 月山陽介, 新田勇, 村島基之,

上坂裕之, ループ型カーボンファイバーブラシによる軽量・低起動トルクすべり軸受の提案, 第 16 回 日本機械学会 機素潤滑設計部門講演会 (2016-4-18), 福井

Noritsugu Umehara, Tsukasa Isogai, Yuka Ohtsuka, Takayuki Tokoroyama, Static and Kinematic Friction Coefficients of Carbon Fiber Binded Brush and improvement of its wear resistance, 14<sup>th</sup> World Congress in Mechanism and Machine Science, (2015-10-25), Taipei, Taiwan  
Takuya Shitaka, Yosuke Tsukiyama, Isami Nitta, Noritsugu Umehara, Shingo Kawara, Hiroyuki Kousaka and Deng Xingrui, The Effect of Contact Length on Friction Force of Looped Carbon Fiber Brush When It Starts Sliding, 6<sup>th</sup> International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology, (2015-4-11), Naha, Japan

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等 なし

### 6. 研究組織

#### (1) 研究代表者

梅原 徳次 (UMEHARA NORITSUGU)  
 名古屋大学・大学院工学研究科・教授  
 研究者番号: 70203586

#### (2) 研究分担者

上坂 裕之 (KOUSAKA HIROYUKI)  
 岐阜大学・工学部・教授  
 研究者番号: 90362318

#### 野老山 貴行 (TOKOROYAMA TAKAYUKI)

秋田大学・大学院工学資源学研究科・准教授  
 研究者番号: 20432247

#### 新田 勇 (NITTA ISAMU)

新潟大学・自然科学系・教授  
 研究者番号: 30159082

#### 月山 陽介 (TSUKIYAMA YOUSUKE)

新潟大学・自然科学系・助教  
 研究者番号: 00533639

(3) 連携研究者 なし

(4)研究協力者 なし