

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 20 日現在

機関番号：13101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26820031

研究課題名(和文) 摩擦面の3次元ナノ形状その場観察装置の開発

研究課題名(英文) In-situ observation of 3 dimensional shape of friction interface

研究代表者

月山 陽介(Tsukiyama, Yosuke)

新潟大学・自然科学系・助教

研究者番号：00533639

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：精密位置決めや摩擦低減などの目的で機能性摩擦材料の開発が進んでおり、特に、自動車に実用化されているDLCや、カーボンナノチューブフォレストなどのカーボン系コーティングが注目されている。本課題では、そのような機能性摩擦材料における機能のさらなる向上を目的として、摩擦現象をより詳細に明らかにするために、摩擦面におけるナノレベルのその場計測装置の開発を行った。サンプルとして使用した高配向カーボンナノチューブ膜を用いて、表面が数nmの粗さから数10nmの粗さへの変化を敏感に検出することに成功した。

研究成果の概要(英文)：For friction reduction and precise positioning, functional friction materials have attracted many interests. (Especially, currently-used DLC coatings and carbon nanotube forests.) In this research, we developed in-situ observational technology for the purpose of understanding the detailed-frictional mechanism of those materials. We clarified that our device is able to observe nano-scale topographical change in frictional interface.

研究分野：トライボロジー

キーワード：マイクロナノトライボロジー 真実接触面観察 その場観察

1. 研究開始当初の背景

精密位置決めや摩擦低減などの目的で機能性表面の開発が進んでいる。特に、自動車に実用化されている DLC や、カーボンナノチューブフォレストなど、カーボン系コーティングに代表されるように、硬質な膜を下地の金属材料上に施し、低摩擦・耐摩耗などの機能を持たせる技術開発が進んでいる。一方で、このような材料は、ナノ構造を有していたり、極表面層に構造変化が生じたりと、ナノスケールの変化を伴った機能発現をするという特徴がある。摩耗と摩擦は密接な関係に有り、摩擦面形状が変化することによって、なじみが生じたり、また、摩擦面の微小な損傷が雪崩的に発生したりするため、摩擦面の損傷の様子や摩耗粉の成長の様子などをその場観察できる技術が求められている。しかし、摩擦振動や限られた視野などにより、技術的に困難な場合が多い。

2. 研究の目的

本課題では無潤滑で摩擦係数が大きい条件において、広視野レーザ顕微鏡を用いてナノレベルの表面形状の変化を捉えることができる技術の開発を行った。

3. 研究の方法

本研究では、広視野レーザ顕微鏡を用いた 2 光束干渉系を利用することにより、透明体と観察対象物間の摩擦力を負荷した状態における摩擦面の形状(接触面間距離)を明らかにする。具体的には、摩擦面間の距離を 0.5 ミクロン間隔で走査するレーザスポットによって計測する事によって摩擦面形状を計測した。

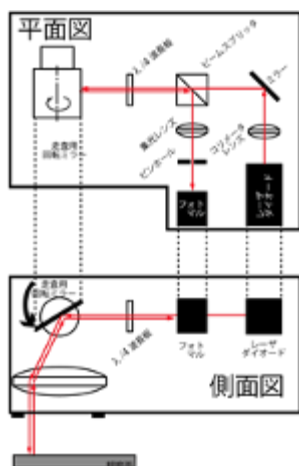


図 1 広視野レーザ顕微鏡を用いた実験装置の概略図

4. 研究成果

本研究では、広視野レーザ顕微鏡を用いて、ナノスケールの接触面間距離の観察を行った。その一例である干渉縞画像を図 2 に、その画像を解析して 3 次元形状を示したものを図 3 に示す。これらの図では、サブミクロン

の段差を有する接触面形状と、その接触面内における数 10nm の起伏形状が 3 次的に捉えられていることが分かる。使用したレーザの波長は 650nm であるため、干渉縞の明線(もしくは暗線)間の距離は、315nm となる。この干渉縞を等高線に見立てると、全体的に接触面間距離が傾斜をしつつ、サブミクロンの段差があることをわかる。ただし、3 次元画像では段差や起伏がわかりやすいように傾斜は補正して取り除いてある。

次にこの技術を用いて、ナノ構造を有する CNT 配向膜の接触面の形状を観察した。この材料は図 4 に示すように、CNT と相手面の間にナノ隙間が存在する。CNT については平均直径が 5nm である。CNT は鋼材を大幅にしのぐ比強度を有する革新的繊維材料である。この材料を垂直にブラシ上に並べた材料を用いて摩擦条件下における接触面観察を行った結果を図 5 に示す。

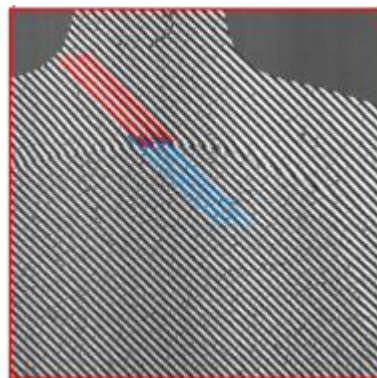


図 2 表面の干渉縞画像

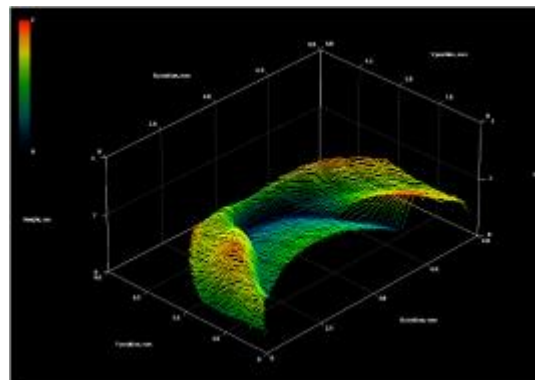


図 3 図 2 を解析して得られた 3 次元形状

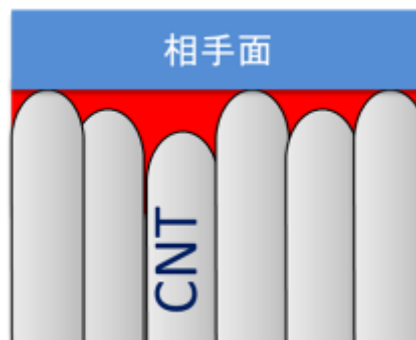


図 4 CNT 膜における接触面間距離の模式図

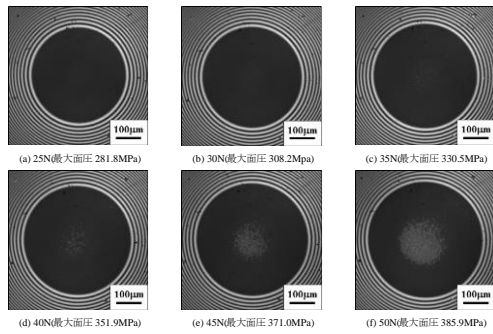


図5 接触面画像

図5は平凸レンズを押し当てた接触面をレンズ側から観察したものである。干渉縞(ニュートンリング)はレンズとCNTサンプルの間にあるギャップ(光路差)によって生じている。中心部の濃いグレーのエリアは接触部であり、低荷重条件では一様な輝度を有しており、高荷重条件では中心部の輝度が上昇していることが分かる。干渉縞の輝度は試験片と平凸レンズ間の距離によって式(1)から算出することができ、正弦波状に変化する。

$$I_i = f(d_i) = \frac{I_{max} - I_{min}}{2} \cos\left(\pi + \frac{4\pi}{\lambda} d_i\right) + \left(\frac{I_{max} - I_{min}}{2} + I_{min}\right)$$

(1)

ここで  $I_i$  は干渉縞の輝度、 $I_{max}$  は干渉縞の最大輝度、 $I_{min}$  は干渉縞の最小輝度、 $d_i$  は試験片と平凸レンズの距離、 $\lambda$  はレーザ波長を示している。輝度値が判明している場合、(1)式の逆関数によって、接触面間距離を定量的に評価でき、図6のように数十nmから数nmのギャップの存在が明らかとなった。

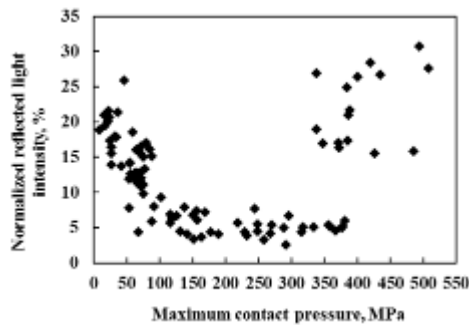


図6 接触面間距離と面圧の関係

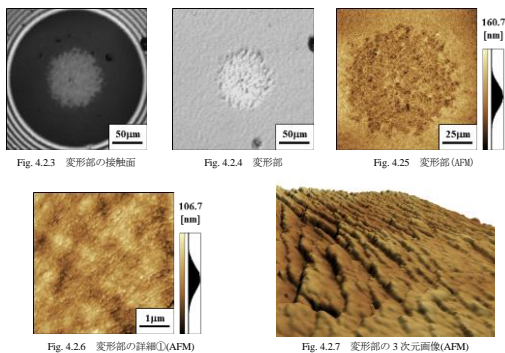


図7 CNTの傾倒による接触面形状の変化

また、高面圧を负荷した場合中央部では輝度の増加、すなわち平均ギャップが増加するが、これは図7のようにカーボンナノチューブの傾倒により表面形状の凹凸が大きくなっていることをとらえている。図の(d)は面圧の高いエリアにおいてCNTが倒れて凹凸が大きくなっていることを示している。変形が残存していることはAFM観察によっても粗さの増加として確かめられている。この現象は垂直荷重が30N以上の場合に生じることなど、荷重との関連性を見いだした。次に、垂直荷重を30Nにした状態で、接線力を负荷すると、図8に示すように接線力が2Nになった時点で、CNTの傾倒が生じて、ナノギャップが生じたと考えられる。さらに接線力を増加させるとすべりが生じ、摩擦面でCNTが傾倒している様子がAFM画像で明らかになった。

さらに、本計測手法による図9に示すような伝熱実験による接触熱抵抗の計測結果と照合し、CNT膜の接触面と接触熱抵抗を照合して、最適な設計に生かすことができる。すなわち、CNT膜の接触熱抵抗の低減効果は、接触面圧約50MPaで最大となるが、面圧がそれ以上になるか、もしくは一定の接線力が负荷すると接触面ではCNTの傾倒による凹凸が生じるため伝熱特性の悪化につながる事が判明した。

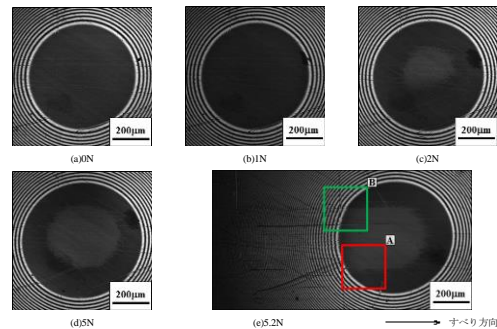


Fig. 4.28 水平荷重負荷時の観察結果(垂直荷重30N)

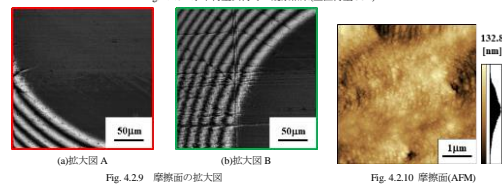


Fig. 4.29 摩擦面の拡大図

Fig. 4.2.10 摩擦面(AFM)

図8 接線力負荷時の接触面その場観察結果

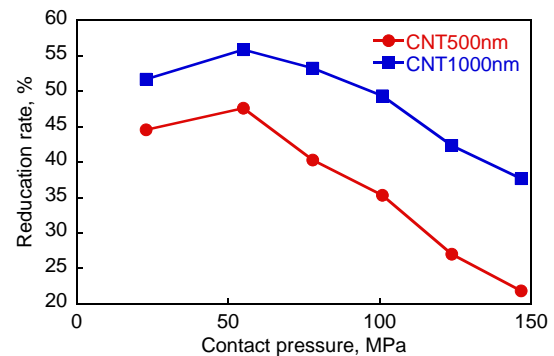


図9 接触熱抵抗低減率と接触面圧の関係

以上から、摩擦面のその場観察装置として広視野レーザ顕微鏡では、摩擦面の数 nm 程度の粗さの変化を感度良く計測することができた。このことは、摩擦面形状の変化や摩擦粉の成長に伴う表面間距離の変化などを数 nm の変化を取得できることを意味しており、摩擦・摩耗に関する諸現象の解明や伝熱に置ける接触面設計に効果的な計測技術の開発に成功した。

## 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 12 件)

1. 星野航, 川崎拓海, 後藤圭輝, 月山陽介, 新田勇, 高配向 CNT 膜の接触挙動が接触熱抵抗に及ぼす影響の解明, 2016 年度精密工学会北陸信越支部学術講演会, 2016 年 11 月 12 日, 新潟大学(新潟県新潟市)
2. 星野航, 川崎拓海, 後藤圭輝, 月山陽介, 新田勇, 高配向 CNT 膜の接触熱抵抗の変形挙動の関係の解明, トライボロジー会議 2016 秋 新潟, 2016 年 10 月 14 日, 朱鷺メッセ(新潟県新潟市)
3. 月山陽介, 福田直哉, 後藤圭輝, 川崎拓海, 佐藤真平, 新田勇, 高配向カーボンナノチューブ膜の接触熱抵抗の接触挙動の関係, 機械学会 2016 年度年次大会, 2016 年 9 月 12 日, 九州大学(福岡県福岡市)
4. Y. Tsukiyama, T. Kawasaki, I. Nitta, W. Norimatsu, M. Kusunoki, Contact thermal resistance of densely-packed VACNTs and deformation mechanics of CNTs, International Conference on Diamond and Carbon Materials, 2016 年 9 月 6 日, モンペリエ, フランス
5. 志鷹拓也, 梅原徳次, 上坂裕之, 村島基之, 新田勇, 月山陽介, ループ型カーボンファイバークラシによる軽量・低起動トルクすべり軸受けの提案, 第 16 回日本機械学会機素潤滑設計部門講演会, 2016 年 4 月 19 日, グランディア芳泉(福井県あわら市)
6. 星野航, 後藤圭輝, 月山陽介, 新田勇, TIM 利用のための高配向カーボンナノチューブ膜の変形挙動の解明, 第 16 回日本機械学会機素潤滑設計部門講演会, 2016 年 4 月 18 日, グランディア芳泉(福井県あわら市)
7. 後藤圭輝, 星野航, 月山陽介, 新田勇, 高配向カーボンナノチューブ膜のナノ接触挙動の解明, 日本機械学会 北陸信越支部第 53 期総会・講演会, 2016 年 3 月 5 日, 信州大学(長野県長野市)
8. 川崎拓海, 月山陽介, 新田勇, 高配向カーボンナノチューブ膜の接触条件が接触熱抵抗に及ぼす影響の解明, 日本機械学会 北陸信越支部 第 53 期総会・講演会, 2016 年 3

月 5 日, 信州大学(長野県長野市)

9. Isami Nitta, Yosuke Tsukiyama, Shunsuke Sakuma, Nanoscale Measurement of Whole Cylinder Surface Using a Wide Field-of-View Laser Interferometer, The 6th International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology, 2015 年 4 月 24 日, 沖縄コンベンションセンター(沖縄県宜野湾市)

10. Yosuke Tsukiyama, Naoya Fukuda, Isami Nitta, Relationship between Friction Force and Real Contact Area Observed by Laser Microscope with Wide Field of View, The 6th International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology, 2015 年 4 月 23 日, 沖縄コンベンションセンター(沖縄県宜野湾市)

11. 後藤圭輝, 福田直哉, 月山陽介, 新田勇, 乗松航, 楠美智子, 高配向カーボンナノチューブ膜の変形挙動に及ぼすチューブ長さの影響, 日本機械学会 2014 年度年次大会, 2014 年 9 月 8 日, 東京電機大学(東京都足立区)

12. 福田直哉, 後藤圭輝, 月山陽介, 新田勇, 乗松航, 楠美智子, 高配向カーボンナノチューブ膜の変形挙動の解明, トライボロジー会議 2014 春 東京, 2014 年 5 月 19 日, 国立オリンピック記念青少年総合センター(東京都渋谷区)

[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

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

月山 陽介(TSUKIYAMA, Yosuke)

新潟大学・自然科学系・助教

研究者番号: 00533639