

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月31日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560150

研究課題名（和文） 導電性複合炭素皮膜による電気接点の信頼性向上とエネルギー損失低減の基礎研究

研究課題名（英文） A Study for the improvements of reliability and energy efficiency of electrical contacts by metal-containing diamond-like carbon coatings

研究代表者

伊藤 耕祐（ITO, KOSUKE）

日本大学・工学部・准教授

研究者番号：40420004

研究成果の概要（和文）：

金属を含有する導電性複合炭素皮膜(Me-DLC)の特性を明らかにし、金属種の機械的性質と化学的安定性の重要性を示した。大気中で使用される摩擦システムに於いては、銅系の金属種が適していた。宇宙機器など真空中で使用される摩擦システムへのMe-DLC応用の可能性も示された。より安定した低摩擦・低摩耗を実現するためのMe-DLCの金属元素や相手材の選定、負荷荷重範囲など、システム設計に役立つ知見を得た。

研究成果の概要（英文）：

Properties of metal-containing DLCs were characterized, and the importance of mechanical properties and chemical stability of the metal species was shown. For tribo-systems to be operated in air, copper was suitable as the metal species. For those in vacuum, the possibility of Me-DLC was also shown. New findings on the selection of metal species and mating materials and the range of effective load that helps tribo-system design were obtained.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2011年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2012年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・設計工学・機械機能要素・トライボロジー

キーワード：薄膜、摩擦、摩耗

1. 研究開始当初の背景

CO₂の排出を抑制して地球環境を改善するため、電気自動車等のCO₂排出量の少ない電気機器の普及や、きめ細やかな電子制御によるエネルギー利用効率の改善が有効である。風力発電等の再生可能エネルギー技術の普及も重要な課題である。

電気自動車、風力発電機、人工衛星等は過

酷な振動条件下で使用されるため、電気接点の摩耗や酸化は重大な故障につながるが、その抑制技術は必ずしも十分とはいえない。例えば、振動等の相対運動条件下では、しばしば摩擦による化学反応（摩擦化学反応）や摩耗が起こる。摩擦化学反応によって摩耗粉が酸化されると絶縁体となり通電不良につながるが、その抑制技術の確立のためには、詳

細なメカニズムの解析と高度な材料技術が必要である。

申請者が研究中であった導電性を有する複合炭素コーティング(Me-DLC)では、摩擦に伴う酸化反応が抑制される場合があることが明らかになってきたため、接点材料としての応用が期待されていた。

2. 研究の目的

導電性を有する低摩擦耐摩耗の合金分散複合炭素コーティング(Me-DLC)を開発し、種々の摩擦条件下における特性や、実用性を有する使用条件範囲を明らかにする。加えて、良好な特性が発揮されるメカニズムを解析し、学術的な知見を得る。

3. 研究の方法

新たな Me-DLC コーティングを開発するため、金属種として合金を用いることによって、摩擦摩耗特性や電気伝導特性の最適化の幅を広げる。その合金の選定にあたり、特性の異なる純金属を含有する数種類の Me-DLC の摩擦摩耗特性と、それに及ぼす摩擦条件の影響を解析し、指針を得た。

上記指針にもとづき、新たな Me-DLC コーティングを開発し、種々の摩擦条件下において特性を解析しながら、最適な金属種や成膜条件の選定を試みた。

さらに、Me-DLC の宇宙機器への展開の可能性についても検討した。

4. 研究成果

(1) Me-DLC の特性

新たな Me-DLC の開発にあたり、適切な合金種を選定するため、Cu-DLC (Fig. 1) の摩擦摩耗特性を重点的に解析した。Ag-DLC についても実験を行い、比較検討を行った。

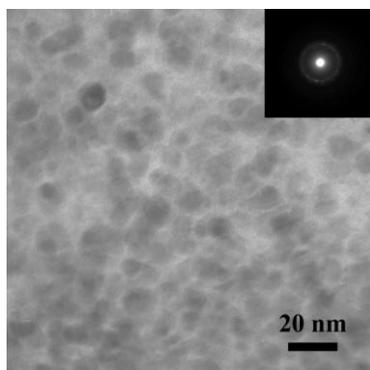
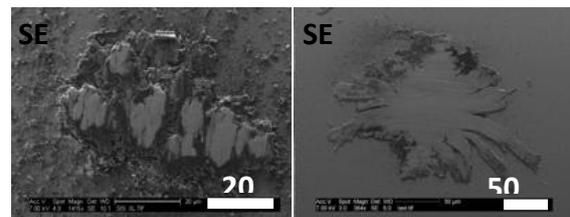


Fig.1 TEM image of the microstructure of Cu-DLC.

Cu-DLC プレートと鋼球の摩擦において相手材表面に摩擦生成膜(トライボ膜)が形成された。トライボ膜のナノ硬度は最大でも 2 GPa であり、Cu-DLC および相手材(スチール)と比較して大幅に低硬度であった。

トライボ膜は、Cu が優先的に相手材に移着することにより形成され、しかもそれは摩耗の初期段階において起きていることが明らかになった。そのトライボ膜の成長過程は、面圧によって大きく異なっていた (Fig. 2) が、膜の硬さにはほとんど影響しなかった。これは、金属種そのものの機械的性質が摩耗や電気伝導に大きく影響を及ぼすことを示唆している。



a) 0.5 GPa b) 1.4 GPa
Fig. 2 Cu-rich tribofilms on steel counterface after 2000 sliding cycles at different contact pressures.

また、Cu-DLC プレートと鋼球の摩擦係数は、約 0.15 で比較的安定しており、雰囲気中の酸素の有無にあまり影響を受けなかった (Fig. 3)。相手面に Cu を主成分とするトライボ膜が形成されたことにより少なくとも局部的に Cu 同士の接触が発生するため、真空中の摩擦係数は大気中よりも大幅に上昇したり不安定になることが予想されたが、その逆であった。これに対して、酸化されやすい銀を用いた Ag-DLC では、摩擦係数と電気伝導に対して、雰囲気中の酸素の影響が大きく、金属種の化学的安定性が重要であることが裏付けられた。

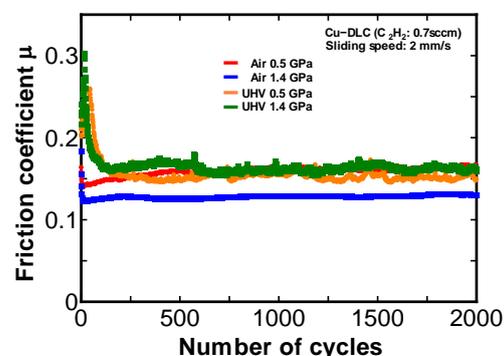


Fig. 3 The transition of friction coefficient of Cu-DLC in ambient/UHV condition.

Cu-DLC において Cu 含有量が多くなると、電気伝導特性は向上する一方で、(Cu は DLC に比べて柔らかいため) 膜全体の硬度が下がり往復摺動条件下における摩耗は増大した。また、微振動のような振幅が小さい摩擦条件下では、Cu-DLC と相手材 (スチール) とが接触面全体にわたって凝着し、Cu-DLC 膜の剥離が生じる傾向が見られた。これらのことから、電気伝導性を確保しつつ良好な摩擦摩耗特性を得るためには、含有させる金属の硬さと被膜と母材の密着性を向上させる必要がある。

(2) 新たな Me-DLC とその特性

上記の成果をふまえ、合金種として Cu-Zn 系を選択し、Cu50%Zn 合金を用いた場合について、Me-DLC 膜を成膜できる条件を見いだした。しかし、微振動摩擦条件下において相手材への凝着と膜の剥離が生じ、Cu-DLC と比較して劇的な特性の改善は見られなかった。成膜条件や成分の最適化が必要であるが、成膜には東北大学の装置を借用する必要があり、東日本大震災の影響で本研究期間においては十分なマシンタイムを確保できなかったため、今後も独自に改良を継続する。

(3) 宇宙機器への展開の可能性

銀は大気中で酸化されやすいため、大気中で使用される導電性摩擦材料として Ag-DLC は適さない。しかし、宇宙機器など真空中で使用されることを前提とした場合は、Ag の固体潤滑作用も期待できるため、相手材の影響を解析し、適用可能性を検討した。Ag-DLC の相手材が SUJ2 球の場合は負荷荷重が小さいほど摩擦係数は大きかったが (Fig. 4)、C2700 球を相手材とした場合は、負荷荷重の影響は小さくなり、安定した低摩擦 ($\mu < 0.25$) が得られた (Fig. 5)。

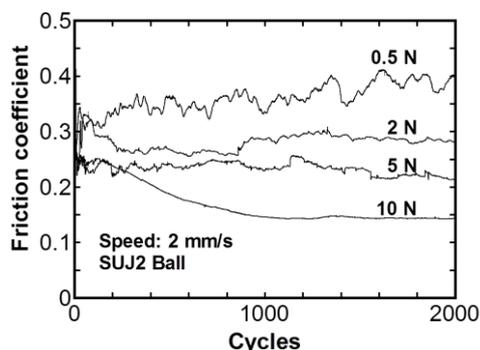


Fig. 4 Transition of friction coefficient between Ag-DLC and SUJ2 steel ball.

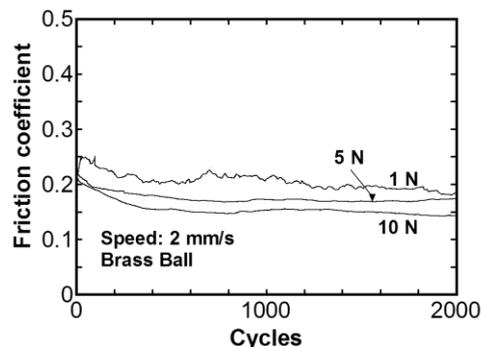


Fig. 5 Evolution of friction coefficient for Ag-DLC sliding against C2700 brass ball for different normal loads.

Cu-DLC と SUJ2 球を真空中で摩擦させると、安定した低摩擦 ($\mu < 0.2$) が得られ、負荷荷重を変えても摩擦係数の変化は小さかった。(Fig. 3)

これに対して、Cr-DLC と SUS440C 球を真空中で摩擦させた場合は、わずか 1 サイクル以内で摩擦係数は 0.4 以上となった。

一方で、DLC を SUS440C にコーティングする場合、Cr-DLC を中間層として用いると密着性が向上する。このような DLC コーティングを、SUS440C 球を相手材として真空中で往復動摩擦させた場合、16 サイクル後に摩擦係数 μ が 0.4 以上となった。これに対して、真空中での摩擦に先立って大気中で摩擦させた場合、真空中で $\mu < 0.4$ を維持できる摩擦サイクル数が 1000 サイクル以上に増加した。摩擦寿命は、大気中での摩擦回数が大きくなるほど長くなる傾向が見られた。いずれの場合も最大摩耗深さは $0.2 \mu\text{m}$ 以下であった。(Fig. 6)

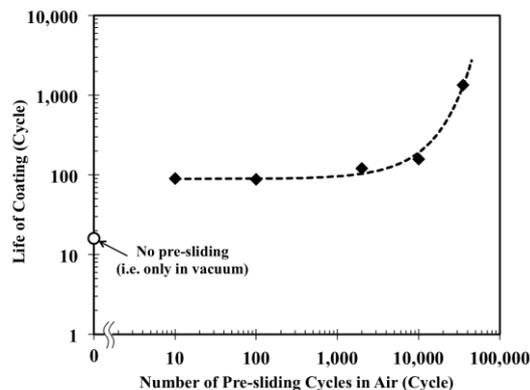


Fig. 6 Life of coating at various numbers of pre-sliding cycles.

以上より、宇宙機器など真空中で使用される摩擦システムへのMe-DLC応用の可能性が確認されると共に、より安定した低摩擦・低摩耗を実現するためのMe-DLCの金属元素や相手材の選定、負荷荷重範囲など、システム設計に役立つ知見を得ることができた。

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)

[学会発表] (計6件)

- (1) Kosuke Ito, Koji Matsumoto, Takanori Takeno, Junichi Takaku, and Koshi Adachi, The effect of pre-sliding in air on the tribological properties of DLC/Cr-DLC bi-gradient coating against stainless steel in vacuum, World Tribology Congress 2013, 8-13 September 2013, Torino, Italy.
- (2) Minoru Goto, Julien Fontaine, Sandrine Bec, Kosuke Ito, Takanori Takeno, and Hiroyuki Miki, Load-dependent friction behavior of metal diamondlike-carbon nano-composite coatings, World Tribology Congress 2013, 8-13 September 2013, Torino, Italy.
- (3) Minoru Goto, Julien Fontaine, Sandrine Bec, Kosuke Ito, Takanori Takeno, Maxime Ruet, Hiroyuki Miki, Michel Belin, Thierry Le Mogne, The role of tribofilm growth on the frictional behavior of copper-diamond-like carbon nanocomposite coating, 38th Leeds-Lyon Symposium on Tribology, 9 September 2011, Lyon, France.
- (4) Hiroyuki Miki, Toshifumi Sugawara, Maxime Ruet, Kosuke Ito, Takanori Takeno, Julien Fontaine, Michel Belin, Toshiyuki Takagi, Tribological behaviour of nanocluster silicon-containing diamond-like carbon coatings under different load conditions, 5th International Conference on Surfaces, Coatings and Nanostructured Materials, 18-21 October 2010, Reims, France.
- (5) Hiroyuki Miki, Toshifumi Sugawara, Maxime Ruet, Kosuke Ito, Takanori Takeno, Julien Fontaine, Michel Belin, Toshiyuki Takagi, Tribological Behaviour of Nanocluster Silicon-Containing Diamond-like Carbon Coatings under Different Load Conditions, Seventh International Conference on Flow Dynamics, Sendai, 1 November 2010, Sendai, Japan.
- (6) Julien Fontaine, Michel Belin, Toshiyuki Takagi, Hiroyuki Miki, Koshi Adachi, Takanori Takeno, Minoru Goto, Kosuke Ito, Tribological Behavior and Electrical Contact Resistance of Metal-Containing DLC Coating for electrically Conductive Tribo-Elements, IFS Collaborative Research Forum

(AFI/TFI-2010), 2 November 2010, Sendai, Japan.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

伊藤 耕祐 (Kosuke ITO)

日本大学工学部機械工学科・准教授

研究者番号：40420004