

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 1 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420085

研究課題名(和文)合金含有複合炭素皮膜(AMe-DLC)を用いた高機能接触表面の創成

研究課題名(英文)High performance tribological surface by AMe-DLC coating

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：微小振動条件下の電気接点において、摩擦化学反応により絶縁体の摩耗粉が生じ電気信号品質が低下する場合がある。DLCに金属ナノ粒子を添加した新たな接点材料を用いた接触要素等の種々の微小振動条件における試験結果を、縦軸を摩擦力の指標、横軸をすべり距離の指標として摩耗形態図を作成すると、ある大きさの定摩擦仕事線を境界として、シビア摩耗とマイルド摩耗に分類できることが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：In electrical contact elements that are used under micro-vibration conditions, non-conductive wear debris may be formed by tribo-chemical reaction at the contact interfaces, which deteriorate the signal quality. Micro-vibration tribo-tests were performed under various conditions with several electric tribo-elements with new metal-containing DLCs and metallic materials. The results were analyzed in detail and classified into two categories: severe or mild in wear and/or damage. The data of those two categories can be separated in a wear map if frictional force is plotted against sliding distance. Its borderline represents an iso-frictional work contour.

研究分野：tribology

キーワード：Wear Map DLC Cu-based materials

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。

申請者らが研究中であった導電性を有する複合炭素皮膜(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。

一方で、摩擦・摩耗現象に影響を及ぼす因子は多様であり、様々な振動条件下でこれらの材料を用いた摩擦要素が実用性を有するかを評価し、材料や設計を最適化する手法が確立されていなかった。

2. 研究の目的

金属ナノ粒子を分散させた複合炭素皮膜を用いて、電気伝導特性、機械的耐久性、化学的安定性に優れた電気接点を設計し最適化する手法を提案する。

3. 研究の方法

Fig. 1に示すBall-on-Plate型微小振動摩擦試験機を用いて種々の条件下で微小振動摩擦試験を行った。研究協力者より提供された種々の条件で製膜された金属含有複合炭素皮膜や実用接点材料を比較評価した。

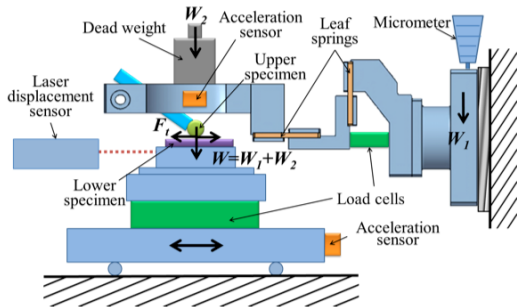


Fig. 1 Ball-on-Plate型微小振動摩擦試験機の模式図。

試験中は、垂直荷重・接線力・変位・加速度・電気抵抗を計測し、摺動状況をモニターすると共に摩擦係数を算出した。

試験後は、摩擦痕表面の顕微鏡観察やEDX分析等を実施した。また、1サイクル中の摩擦力と変位の関係から、ある瞬間の滑り形態

と、摩擦回数増加に伴う滑り形態の変化を解析した。これらの結果により、摩耗の形態や損傷のメカニズムを解析した。そして、損傷の程度をシビアとマイルドに大別し、種々の微振動条件においてどのような損傷が発生するかを分類する摩耗形態図を作成した。

4. 研究成果

(1) 種々の微小振動下における摩擦・摩耗現象の解析

種々の材質のBallとPlateについて、微小振動摩擦試験を行った場合の摩擦係数変化の一例をFig. 2に、その時の電気抵抗の変化をFig. 3に示す。同含有率によって、摩擦係数・電気抵抗の値やその変化のパターンが異なっていた。

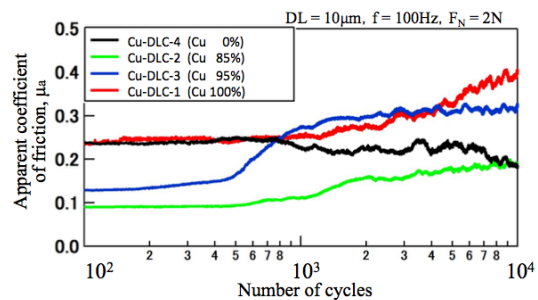


Fig. 2 種々の同含有率のCu-DLC板とSUJ2球の摩擦係数の変化。

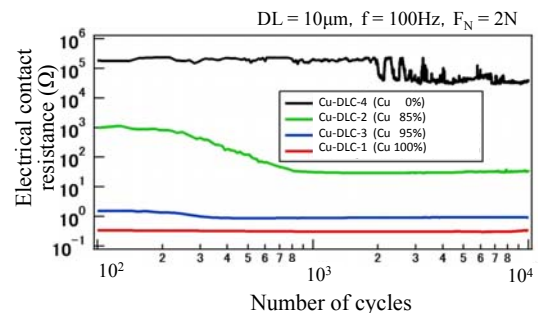


Fig. 3 種々の同含有率のCu-DLC板とSUJ2球の接触電気抵抗の変化。

次に、これらの微小振動摩擦試験後の摩擦痕表面を解析した(結果の一例をFig. 4およびFig. 5に示す)。ある条件において、Cu-DLC板の摩擦痕内部は、中心部を残して皮膜が剥離し、SUJ2球の摩擦痕側への移着が発生した。その主成分は、Cu-DLCに含まれていた銅であった。剥離部分には酸素が検出され、表面が酸化したことが示唆された。そのときの摩耗形態を模式的にFig. 6に示す。さらに試験を繰り返してゆくと、これらの現象は、種々のCu-DLCにおいて、多くの条件下で観察されたが、損傷がほとんど発生しないか非常に軽微な場合もあった。酸化摩耗粉の生成に伴う激しい損傷と、摩擦サイクル経過に伴う電気抵抗の変化にはある程度の相関が観測された。

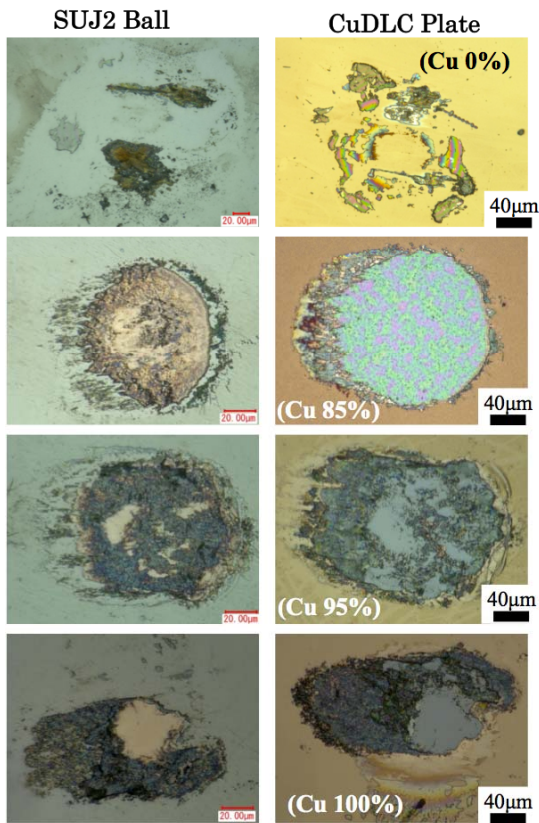


Fig. 4 摩耗痕の光学顕微鏡写真 (Fig. 3 の試験片).

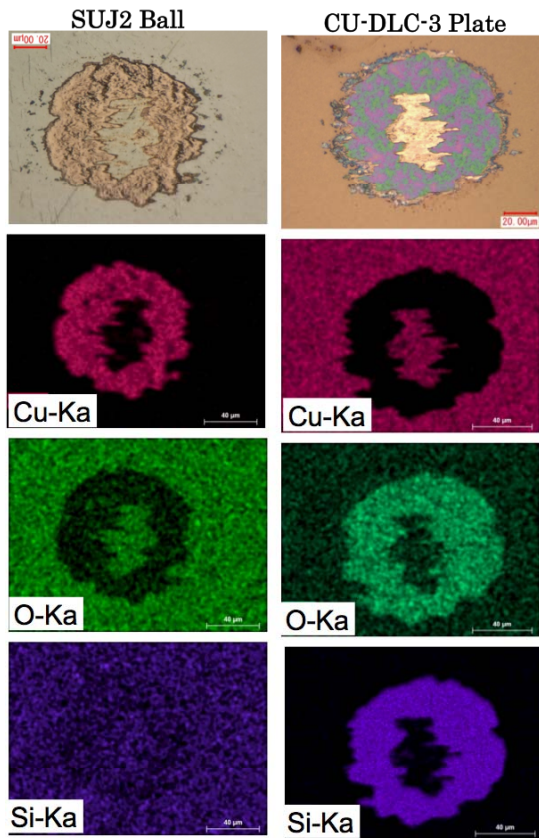


Fig. 5 Cu-DLC-3 (Cu 85%) の摩耗痕 EDX 分析例 (FN = 2 N, f = 100 Hz, 1000 cycles, DL = 10 μm、無通電).

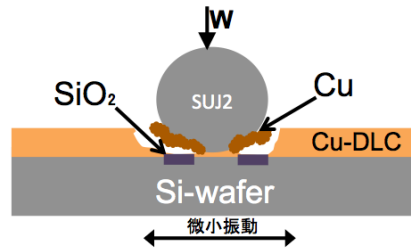


Fig. 6 摩耗形態の模式図(例) .

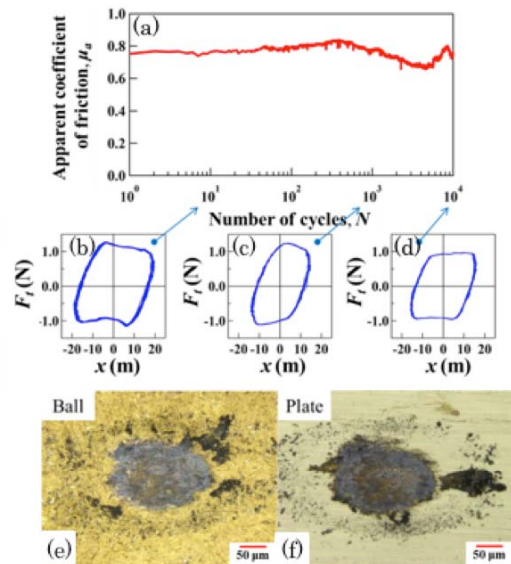


Fig. 7 (a) 摩擦係数, (b)-(d) F_t - x 線図, および(e)-(f) 摩耗痕の光学顕微鏡写真 ($f = 10$ Hz, $a_s = 50$ μm, $W = 1$ N, $N = 10^4$ cycles, C2600 黄銅板と黄銅球の摺動).

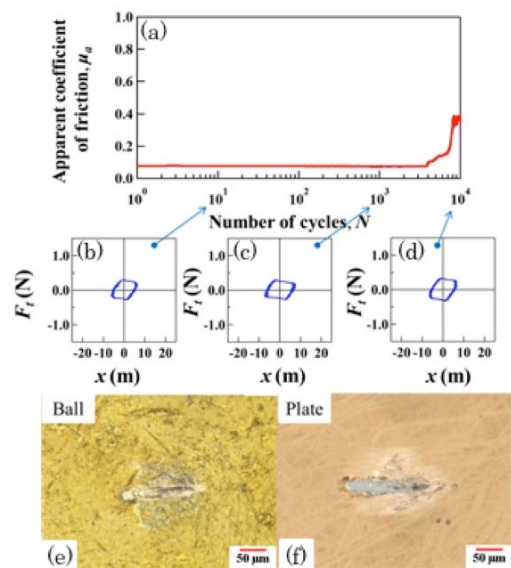


Fig. 7 (a) 摩擦係数, (b)-(d) F_t - x 線図, および(e)-(f) 摩耗痕の光学顕微鏡写真 ($f = 10$ Hz, $a_s = 20$ μm, $W = 1$ N, $N = 10^4$ cycles, Cu-DLC 板と C2600 黄銅球の摺動).

図には示していないが、摩擦回数を変えた場合の試験結果より、剥離・移着の発生・進展過程に関しても解析した。

実用電気接点材料として典型的な黄銅 (C2600) についても、同様の微小振動摩擦試験を行い、摩耗形態を解析した。軽微な損傷にとどまる条件と酸化摩耗粉の生成を伴う激しい損傷が発生する場合 (Fig. 6) に分類された。CuDLC 板も黄銅球を相手材として比較試験を行ったところ、安定した挙動を示す場合と、Fig. 7 に例を示すような摩擦係数の急上昇を伴い剥離が発生する場合に大別できた。

(2) 摩擦・摩耗形態の分類と摩耗形態図の作成

微小振動摩擦 (特に振幅の小さなフレットング領域) の滑り形態は、局所滑り、巨視的すべり、および両者間の遷移が起こる混合滑りに分類できる。接線力と変位の関係からそれらの分類を行った。

また、前述のような種々の条件下での摩耗または損傷の程度をマイルドとシビアに大別した。

次いで、これらの結果を1枚の図上で明示的に分類できないかを検討し、種々の縦軸・横軸で試行錯誤を重ねた。結果として縦軸に摩擦力を表すパラメータ $\mu_{af} \cdot W$ 、横軸にすべり距離を表すパラメータ $a \cdot N$ を取って、プロットしたところ、例えば黄銅同士の摺動の場合は Fig. 8、CuDLC 板と黄銅球の以下の摺動の場合は Fig. 9 の通り摩耗の程度が分類できることが明らかになった。すなわち、Cu-DLC 板 / 黄銅 (JIS C2600) 球では、摩擦仕事量が約 $3.0 \times 10^{-2} \text{ N} \cdot \text{m}$ 以上になると剥離損傷が発生する。また、黄銅 (JIS C2600) 板 / 球では、摩擦仕事量が約 $3.0 \times 10^{-2} \text{ N} \cdot \text{m}$ 以上になると接触面が黒く変色し、摩耗粉が飛散するなど激しい損傷が発生する。前者はバルク材、後者はコーティングであるため、損傷の形態は異なるものの、同程度の摩擦仕事で損傷の大小の分岐点があることが興味深い。黄銅と CuDLC に添加された純銅の強度がほぼ等しいことが関係していると考えられる。さらに、黄銅よりも強度の高いベリリウム銅合金同士でもいくつかの試験を実施したところ、分岐点となる摩擦仕事量が大いことも示唆されている。

(3) まとめ

微小振動条件下にさらされる電気接点を想定した条件において、摩擦化学反応によって生じる絶縁性の摩耗粉が電気信号伝達に及ぼす悪影響を未然に防ぐため、DLC に金属を含有した新たな接点材料を用いた接触要素を構築し、その実用性を評価する手法を研究した。

現状では、限定的な条件下における実験結果のみで設計や材料の良否を一面的に判断することがあり、実用において想定外のトラ

ブルに見舞われる場合があるが、本研究で見いだされた摩耗形態図を用いて評価すれば、いくつかの簡単な実験確認で設計条件の良否を判別することが可能である。さらに、改良仕様について同様の摩耗形態図を作成すれば、合否分岐点がどのように改善されたかも定量的に評価することができる。

本研究に用いた金属分散炭素皮膜は、まだ研究段階であり、実用接点材料を母材としたコーティング条件の開発途上にある。皮膜への合金元素の分散も試みたが、マシントイムの制約等により長時間の微小振動摩擦に耐えうる皮膜の開発には至らなかった。しかし、本研究の解析手法を用いて摩耗形態図を作成することにより、改良効果を定量的に評価し、効率的な改良が可能と考えられる。

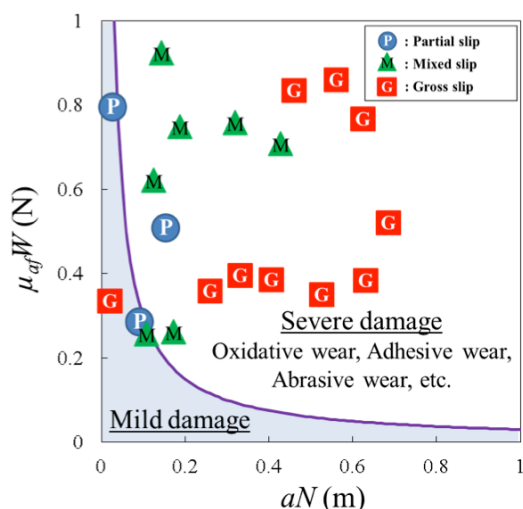


Fig. 8 C2600 黄銅同士の摩耗形態図.

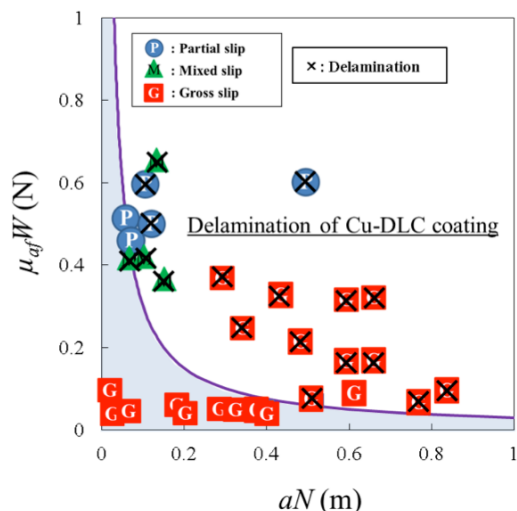


Fig. 9 Cu-DLC 板と C2600 球の摩耗形態図.

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 4 件)

- ① 増田 俊樹, 伊藤 耕祐, 微小振動条件下における銅系材料の接触要素の摩耗形態図, 機械学会東北支部第 52 期総会・講演会, 205, 2017 年 3 月 14 日, 東北大学(仙台).
- ② 増田 俊樹、大西 巧馬、伊藤 耕祐, 微小振動条件下における Cu-DLC プレートと SUJ2 ボール間の摩擦摩耗特性, 機械学会東北支部第 51 期総会・講演会, 205, 2016 年 3 月 11 日, 東北大学(仙台).
- ③ 増田 俊樹、大西 巧馬、伊藤 耕祐, 微小振動下における Si-wafer プレート/SUJ2 ボールの摩擦摩耗特性, 第 58 回日本大学工学部学術研究発表会, 2015 年 12 月 5 日, 日本大学(郡山).
- ④ 艾 東克隆, 大西 巧馬, 伊藤 耕祐, 微小振動下における CU-DLC プレート/SUJ2 ボールのトライボロジー特性及び電気伝導特性, 第 57 回日本大学工学部学術研究発表会, 2014 年 12 月 13 日, 日本大学(郡山).

6. 研究組織

(1) 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: 40240004

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

竹野 貴法 (TAKENO, Takanori)
三木 寛之 (MIKI, Hiroyuki)
小助川 博之 (KOSUKEGAWA, Hiroyuki)