

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 3 月 31 日現在

機関番号：32503

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2008～2012

課題番号：20246035

研究課題名（和文） 摩擦電磁気現象の根源的解明とトライボプラズマ応用技術の開発に関する研究

研究課題名（英文） Fundamental Clarification of Triboelectromagnetic Phenomena and Development of Triboplasma Application Technology

研究代表者

中山 景次（NAKAYAMA KLEIJI）

千葉工業大学・附属総合研究所・教授

研究者番号：60344230

研究成果の概要（和文）：

すべり接触面の内外に発生する摩擦電磁気現象を、トライボプラズマを中心に解明し、トライボプラズマ応用技術開発のための設計指針を提出した。乾燥摩擦下のすべり接触面内にプラズマが発生すると重要な発見を行い、油潤滑下のすべり接触面内からの光子放出は油中溶存気体分子の摩擦励起に基づくことを明らかとした。プラズマの温度計測に成功しトライボプラズマは非平衡の低温プラズマであること、また摺動面からの光子放出はプラズマ中の表面電子攻撃によることなどを明らかにし、さらにシミュレーション理論解析に成功して隙間内ポテンシャル分布と荷電粒子発生分布を明らかとした。油潤滑下においては、トライボプラズマが潤滑接触点後方隙間に発生する空洞中において電子なだれ現象で発生することを明らかとし、新しいモデルを提出した。応用技術開発に不可欠のプラズマ制御が磁場印可とトライボ材料の電気絶縁特性制御で可能であることを示した。

研究成果の概要（英文）：

Fundamental mechanism of the triboelectromagnetic phenomena was analyzed focusing on the triboplasma generation and the guideline to the development of the triboplasma application technology was proposed. It was found that the triboplasma is generated even inside the sliding contact, and the photon emission from the inside of sliding contact under oil lubrication was shown to be caused by the excitation of the dissolved gas molecules. The temperature rise of the triboplasma was successfully measured to give that the triboplasma is non-equilibrium low temperature plasma. The mechanism of photon emission from the sliding surface was analyzed to be caused by the attack of the electrons in the plasma, and the triboplasma generation was theoretically analyzed to give the potential and the charged particle distributions in the gap. Further, the mechanism of triboplasma generation under oil lubrication was clarified to be due to the electron avalanche process in the cavity formed in the rear gap of the sliding contact with a new model. It was proposed that triboplasma can be controlled by magnetic field application and control of the electric resistivity of tribomaterials.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	9,600,000	2,880,000	12,480,000
2009 年度	7,100,000	2,130,000	9,230,000
2010 年度	7,100,000	2,130,000	9,230,000
2011 年度	6,700,000	2,010,000	8,710,000
2012 年度	5,500,000	1,650,000	7,150,000
計	36,000,000	10,800,000	46,800,000

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：トライボロジー・プラズマ・電磁気・光子・電子

1. 研究開始当初の背景

トライボロジーの諸問題はこれまで摩擦熱による温度上昇にその原因が帰せられ、整理・解析されてきた。しかしながら、レンズやSiウエハの表面仕上げ、液晶のコーティング等を初めとする様々な超精密先端分野、ハードディスクの潤滑や様々な精密機械類の摺動接点等において摩擦熱では説明のできない不可解な摩擦・摩耗現象、トライボ物理・トライボ化学現象が観察されてきている。

これに対し、中山（研究代表者）等は、摩擦接点から放出される電子、次いでイオンさらに光子などのエネルギー性粒子放出現象を系統的に調べ、摩擦接点の近傍に摩擦帯電の高電界に起因した高エネルギーのプラズマ（トライボプラズマ）が発生しているという結論に達し、摩擦帯電、トライボエミッション、トライボプラズマ生起等を包含する摩擦電磁気という新しい概念を提出した。このプラズマは中山等により2001年に乾燥すべり下において、ついで2007年に油潤滑下で発見された。

この発見は砥粒研磨を初めとする様々な表面加工、様々な機械の摺動面に発生する物理・化学の諸現象をトライボプラズマの全く新しい視点より解析する必要があることを示している。トライボプラズマの観点からのトライボロジーの新領域が開拓される可能性もある。この研究成果は、世界的な規模で拡がりつつあり、我が国においても多方面において急速に関心が持たれつつある。この期において、この現象を産業界の技術革新にまで真に高めるためには、摩擦電磁気発生の根源となる機構を解明しつつ、トライボプラズマ応用技術開発に必要な基礎的知見を速やかに確立する必要がある。そのためには、摩擦接点の内部から外部にわたる摩擦電磁気計測技術開発を行いつつその発生機構と作用機構の根源的解明を行い、トライボプラズマ制御技術を開発しつつその応用技術の開発を急ぐ必要がある。

2. 研究の目的

本研究の目的は、摩擦電磁気学の新学問分野開拓と産業界におけるトライボプラズマに基づく技術革新を目指して、摩擦電磁気発生を根源的解明とトライボプラズマ応用技術の開発研究を行うことである。研究は摩擦接点の内部と外部の二つに大きく分け、面外を中心に展開する。

すべり接触面の内部では、粗さ隙間内プラ

ズマ現象、接触面内光子放出現象の原因究明、発生期の摩擦帯電現象に焦点を合わせ、あらゆる摩擦電磁気現象の根本原因である接触面内電磁気現象の本質究明を目指す。

接触面外の隙間では、トライボプラズマ温度、プラズマ荷電粒子による表面攻撃、隙間内電界分布、その攻撃による表面改質、油潤滑プラズマ発生などの物理現象の究明を目指す。平行して応用技術の開発に不可欠なプラズマ制御技術開発を目指す。さらにプラズマ機能性トライボマテリアル・油剤の開発を目指す。これらを総合して摩擦電磁気学の開拓と産業界の技術革新に向けた応用技術開発を目指す。

3. 研究の方法

摩擦電磁気現象の新計測技術を開発しつつその発生機構の解明を行い、プラズマの作用機構を多角的に究明し、応用技術の開発を行う。研究は大きく、1) 接触面内と2) 接触面外の二つに分けて展開する。この摩擦電磁気現象の根本原因は接触面内にあるが、ここでの電磁気現象は全く未踏の分野である。そこでの発生期の帯電現象、電位分布の新計測技術開発を行いつつ、面内プラズマ現象を明らかにし、摩擦電位・摩擦電磁気発生機構の究明を行う。これには多くの独創的なアイデアが求められる。接触面外においては発見したプラズマの周囲への作用を詳細に調べるとともに、プラズマ制御技術を開発しつつ、トライボプラズマ機能性潤滑剤の開発を中心とした応用技術の開発研究を行う。具体的な手法を以下に記述する。

(1) 接触面内

粗さの隙間内での面内プラズマ発生を究明しつつ、面内摩擦発光を電磁気発光、応力発光、温度発光から根源的に突き止める。さらに、電界発光(EL)特性を有する特殊な薄膜を用いて、摩擦面内発生期の摩擦電位を計測する技術開発を行う。これらを総合してすべり接触面内摩擦電磁気の発生機構と全体像を明らかにする。

(2) 接触面外

プラズマ温度分布を計測するとともに、接点の隙間に発生する電界強度分布を明らかにする。さらに、摺動接点の隙間内の高電界で加速された電子による摺動表面攻撃現象を明らかにする。ここでは、電子励起光子放出計測によるシミュレーション実験と合体したトライボルミネッセンス計測実験

とから表面励起機構を明らかにする。これらを総合して面外摩擦電磁気の作用機構と全体像を明らかにする。

プラズマの応用技術開発に不可欠の磁場の作用によるプラズマ制御技術開発研究を行うとともに、電気抵抗率可変材料によるプラズマ制御技術開発を行う。この両者よりプラズマ制御技術を開発する。

金属イオン・ドーピングによる各種電気抵抗率を有するダイヤモンド単結晶薄膜、ナノダイヤモンド薄膜、DLC膜を用いてのトライボプラズマの観点からの究極のトライボ制御マテリアル開発を行う。油にマイクロプラズマを作用させて油剤を改質する独特のシミュレーション装置を開発し、本装置を用いて油剤を改質し、油剤の劣化機構究明とプラズマ機能性油剤の開発を行う。これらを総合してトライボプラズマ応用技術を開発の設計指針を得る。

4. 研究成果

研究はすべり接触面内とすべり接触面外の二つに大きく分けて展開した。

(1) すべり接触面内

①粗さ隙間内プラズマ発生

プラズマが接触面をリング状に取り囲んで発生し、微弱ながら接触面内の微小な粗さの隙間でもプラズマが生起することを明らかにした。このことはパッシェンの法則に照らし合わせたとき、途方もなく強い電界が接触面内に発生していることを意味する。この面内プラズマの発生強度は面外プラズマを含めた総プラズマ発生強度の2%程度にすぎないが、その発生強度は摩耗が進行するにつれて隙間が増大する結果、急速に強くなることが明らかとなった。さらに、摩擦帯電、

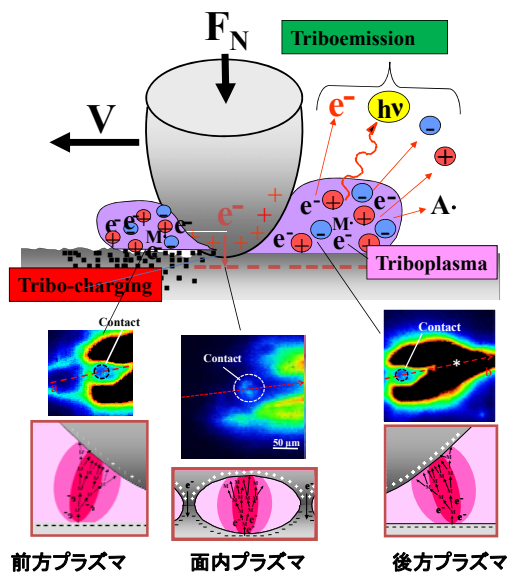


図1 トライボプラズマの発生場所

トライボエミッション、トライボプラズマの三者の相関関係を明らかにすることができ、プラズマが接触点前方に発生し、次いで接触面内に移り、最後に接触面の後方に移動することを明らかにすることができた(図1)。プラズマが後方のみではなく、前方、さらには接触点の内部でさえも発生することは驚きであり、今後、未解明の超潤滑膜形成機構究明と大きく関わっていくことになるであろう。

②光子放出

接触面内からはプラズマからの紫外光に加えて、可視光、赤外光も放出され、そのほとんどは可視光であった。油潤滑下においては、接触面内からの光子放出は溶存空気を除去すると消失することから、発光は溶存気体分子の摩擦励起によるものであることが明らかとなった。この成果は、潤滑油分子の励起機構を究明する上で重要な知見である。

③摩擦ポテンシャル分布計測

多結晶ダイヤモンド基板の上にp形とn形ドーピングダイヤモンドを接合したpn二層薄膜構造の耐摩耗性電界発光薄膜を作成することに成功し、電界発光特性を明らかにすることができた。この成果は今後、摩擦帯電電界発光計測に基づく摩擦起電ポテンシャル計測を可能とする重要技術開発につながるものであり、摩擦帯電分野に大きく貢献することになる。また、ピン・ディスク型摩擦試験機や管内絶縁体流れ装置にエレクトロメータを取り付けて、発生期の摩擦電流計測と摩擦電圧計測システムを構築し、摩擦電圧、摩擦電流計測を行い、これらの特性を明らかにした。

(2) すべり接触面外

①プラズマ温度計測

高感度赤外線カメラを用いて、トライボプラズマの温度計測に挑戦し、その温度分布を隙間の横方向からと接触面に垂直方向からの二方向から計測することに成功し、トライボプラズマの温度分布を明らかにした。その結果、プラズマ中の電子の温度は極めて高いが、イオン化した気体分子の温度上昇は1°C

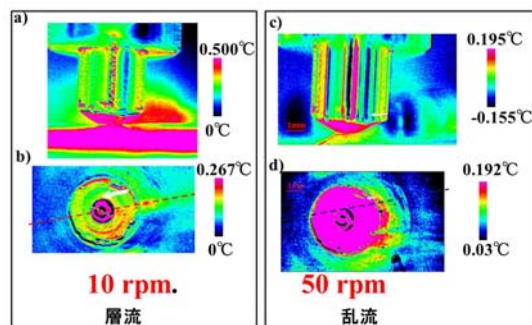


図2 トライボプラズマの温度分布

未満の低温であり、トライボプラズマは電子温度とイオン温度が大きく異なる非平衡の低温プラズマであることが明らかとなった。さらに温度分布の動画撮影に成功し、トライボプラズマが接触点より後方に低速では層流として摩擦トラックに沿って流れ、高速では乱流となって円周方向にシフトして流れることを見出した(図2)。トライボプラズマの温度が驚くほど低いという事実は、今後のトライボプラズマ応用技術開発にとって、摩擦温度上昇とは異なる観点からの技術開発に道を開くことになるであろう。

②プラズマ荷電粒子による表面攻撃

プラズマ励起により摺動面から放出される696 nmの可視光に着目して、荷電粒子による表面攻撃機構を解析した。カソードルミネッセンス装置内で電子線照射中に試料表面から放出される光子と摩擦面から放出された光子のスペクトルを比較した結果、696nm光子は摺動表面層に存在する Cr^{3+} イオンの電子による励起によって発生することが明らかとなった(図3)。このことは、これまで不明であった摩擦ともなう可視光放出がプラズマ中の荷電粒子作用によることを示すものであり、新たな摩擦の学問分野が開拓されていくであろう。

③トライボプラズマ発生機構

トライボプラズマ発生分布の空気圧依存特性をパッシェンの気体放電理論による解析に成功した。その結果、大気圧とその近傍の気体圧力ではプラズマ中心は摩擦トラックとプラズマリングの交点でグロー放電によって発生し、空気圧の低下につれてプラズマ中心は次第に摩擦トラックに直角方向の摩擦接触点の両脇に移行し、グロー放電からコロナ放電に変化することを明らかにした。この成果は、これまで不明であった固体潤滑材の化学摩擦機構究明がトライボプラズマの観点から解析する必要があることを示唆している。

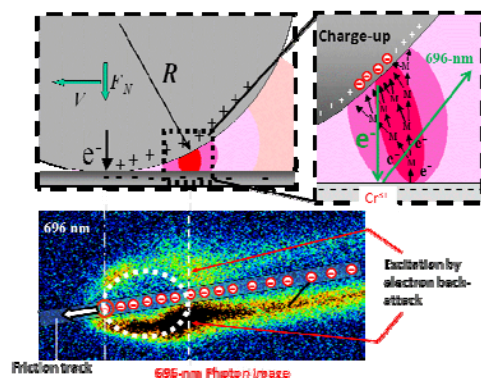


図3 電子攻撃による696-nm光放出

④プラズマシミュレーション理論解析

パーティクルインセル・モンテカルロ(PIC/MC)法を用いて、すべり接触面内のポテンシャル分布解析に成功し、さらに、気体分子や電子の衝突から純理論的にプラズマ中の e^- 、 N_2^+ 、 O_2^+ 、 O^- などのイオン、および $\text{N}\cdot$ 、 $\text{O}\cdot$ などのラジカルの二次元分布を求めることができた。その結果は実験で得られたプラズマ発生分布と完全に一致し、先に提出したパッシェン放電理論に基づくトライボプラズマ発生モデルの正しいことが証明された。この成果は、トライボプラズマの基礎研究と応用研究の展開に、PIC/MC法が強力な武器となることを意味する。

⑤トライボプラズマ制御技術

磁場印加によるプラズマ発生分布を調べる装置を構築し、本装置を用いて磁場印加によるトライボプラズマ制御技術開発のための基礎データを取得した。その結果、磁場印加によりプラズマ中の電子、正イオン、負イオンがローレンツ力を受け、プラズマ発生強度と発生分布が大きく影響を受ける重要な結果を得て、磁場印加によりトライボプラズマが制御できることが明らかとなった。また、ダイヤモンドライクカーボン(DLC)膜やダイヤモンド多結晶膜に水素やボロンなどの原子をドーピングさせることにより膜の電気抵抗率を変えることに成功し、これらの膜の電気抵抗率とプラズマ発生との関係を明らかにした。その結果、膜の電気抵抗率を変化させることによりプラズマ発生を制御できることが明らかとなった。これらの成果は、トライボプラズマ実用技術開発にとって不可欠の重要な技術へと展開していくことは疑いないであろう。

⑤プラズマ機能性トライボマテリアル・潤滑油剤の開発

絶縁体、半導体、伝導体について、摩擦電磁気発生との関係を乾燥摩擦下で調べ、絶縁体においてはトライボプラズマが尾を持ったリング状に発生し、金属やアモルファスカーボンなどの伝導体においては線状または点状にトライボプラズマが発生することが分かった。これらの成果はトライボプラズマ応用技術開発にとって有用な成果である。

トライボプラズマが油中接触点後方に線

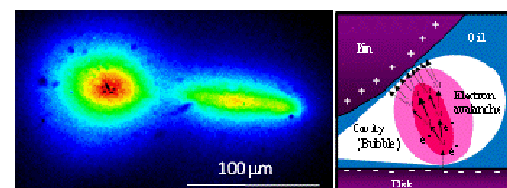


図4 油中トライボプラズマ像(左)とプラズマ発生機構

状に発生すること、油中においては後方の末広がりの負圧領域にキャビテーションが発生し、このキャビテーション中に摩擦帯電による高電界が発生し、これによる電子雪崩現象によりプラズマが発生することを明らかにし、油中プラズマ生起機構を提出した(図4)。これらの成果は、現実の多くの機器が油潤滑下で使用されていることを考えた場合、実用技術開発にとって極めて重要な知見であり、今後産業界においてトライボプラズマ応用技術開発が大きく開拓されていくであろう。

マイクロプラズマを油剤に照射するタイプのプラズマによる油剤改質シミュレータを設計・製作し、潤滑油種や潤滑グリースにマイクロプラズマを照射させて変質させ、変質油やグリースの化学分析と摩擦性能評価を行った。その結果、大気プラズマの作用により潤滑油剤が変質し、プラズマ重合が発生していること、熱反応に比べ生成物種が少ないこと等を明らかにすることができた。これらの成果は、今後のトライボプラズマ機能性潤滑技術開発にとって重要な知見である。

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 18 件)

- 1) Keiji Nakayama, "Simulation analysis of triboplasma generation using the particle-in-cell/Monte Carlo collision (PIC/MCC) method", J. Phys. D. Appl. Phys., 査読有, **45** (2012)495203(8pp)
- 2) Keiji Nakayama, "Effect of magnetic field on the plasma generated during a sliding contact", Journal of Physics : Conference Series, 査読有, **301** (2011)012069 (1-4).
- 3) H. Watanabe and S. Shikata, "Superlattice structures from diamond", Diamond and Related Materials, 査読有, **20**(2011)980-982.
- 4) Hitoshi Umezawa, Yukako Kato, Hideyuki Watanabe, Ashraf M.M. Omer, Hiroataka Yamaguchi, Shin-ichi Shikata, "Characterization of crystallographic defects in homoepitaxial diamond films by synchrotron X-ray topography and cathodoluminescence Original Research Article", Diamond and Related Materials, 査読有, **20**(2011)523-526.
- 5) Keiji Nakayama, "Mechanism of triboplasma generation in oil", Tribol Lett, 査読有, **41**(2011)345-351.
- 6) K. Nakayama, "Plasma generation through discharging of gas due to triboelectrification", Proc. of the XVIII Int. Conf. on Gas Discharges and Their Application, 査読有, (2010)414-417.
- 7) Z.B. Feng, A. Chayahara, H. Yamada, Y. Mokuno, N. Tsubouchi, S. Shikata, "Surface stress measurement with interference microscopy of thick homoepitaxial single-crystal diamond layers", Diamond and Related Materials, 査読有, **19**(2010)1453-1456.
- 8) F. Fujita, A. Kakimoto, J.H. Kaneko, N. Tsubouchi, Y. Mokuno, A. Chayahara, K. Sato, Y. Konno, A. Homma, S. Shikata, M. Furusaka, "Measurement of charge carrier's transportation in a large size self-standing CVD single crystal diamond film fabricated using lift-off method", Diamond and Related Materials, 査読有, **19**(2010)162-165.
- 9) Keiji Nakayama, "Triboplasma generation and triboluminescence: influence of stationary sliding partner", Tribology Letters, 査読有, **37**(2010)215-228.
- 10) N.T. Z.B. Feng, A. Chayahara, Y. Mokuno, H. Yamada, S. Shikata, "Raman spectra of a cross section of a

large single crystal diamond synthesized by using microwave plasma CVD", Diamond and Related Materials, 査読有, 19(2010)171-173.

- 11) T.Tsubouchi, Y.Mokuno, H.Yamaguchi, N. Tatsumi, A.Chayahara, S. Shikata, "Characterization of crystallinity of self-standing homoepitaxial diamond film", Diamond and Related Materials, 査読有, 18(2009)216-219.
- 12) C. Matta, O.L. Eryilmaz, M.I. De Barros Bouchet, A. Erdemir, J.M. Martin and K. Nakayama, "On the possible role of triboplasma in friction and wear of diamond-like carbon films in hydrogen-containing environments", 査読有, J. Phys. D: Appl. Phys, 42 (2009) 75307(1-8).

[学会発表] (計 28 件)

- 1) Keiji Nakayama and Fumio Yagasaki, "Temperature distribution of plasma generated in gap of sliding contact under dry sliding", 2012 Joint Tribology Conference, 2012.10.9, (10/8-10/10), Westin Denver Downtown, Denver, Colorado, USA.
- 2) 中山景次、矢ヶ崎文男 “高感度赤外線カメラによるトライボプラズマ温度計測とプラズマ流観測”, トライボロジー会議春東京 2012, 2012 年 5 月 16 日, 5/14-5/16), 国立オリンピック記念総合センター (東京) .
- 3) Keiji Nakayama, "Effect of magnetic field on triboplasma generation through discharging of air due to triboelectrification", 13th International Conference on Electrostatics, 11th

April 2011, Bangor University, Wales, UK.

- 4) Hideyuki Watanabe, " Synthesis of nitrogen-doped homoepitaxial single crystal diamond by microwave plasma-assisted chemical vapor deposition", Artificial atoms in diamond, 2010 年 11 月 13 日, Cambridge (USA) .
- 5) Z. Feng, A. Chayahara, Y. Mokuno, H.Yamada and S.Shikata, "Stress Analysis of Single Crystal CVD Diamond by Micro-Raman Spectroscopy", Int'l Conf. New Diamond and Nano Carbons, 2009. 06. 07, Michigan, USA.

[その他]
ホームページ等
なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中山景次 (NAKAYAMA KEIJI)
千葉工業大学・附属総合研究所・教授
研究者番号：60344230

(2) 研究分担者

鹿田真一 (SHIKATA SHINICHI)
独立行政法人産業技術総合研究所・ダイヤモンド研究ラボ・ラボ長
研究者番号：00415689

渡辺幸志 (WATANABE HIDEYUKI)

独立行政法人産業技術総合研究所・ダイヤモンド研究ラボ・主任研究員
研究者番号：50392684

(3) 連携研究者

徐超男 (JYO CHONAN)
独立行政法人産業技術総合研究所・生産研究センター・研究チーム長
研究者番号：826269924