

誘電体間の摩擦に伴う放電発光と帯電電位差

三浦 崇^{*1}, 塩田 忠^{**}, 中山 景次^{**}
科技団科技特^{*}, 工技院 機械技術研究所^{**}

1 はじめに

固体表面はそれだけをとっても理解が難しいことは知られているが、粒子線・電磁波を利用した表面分析法の確立や走査型プローブ顕微鏡のような表面観測装置の開発により静的な表面物質の解析は飛躍的に進歩してきたと思われる。しかし、表面間の摩擦というダイナミックプロセス中では、おそらく様々な物理・化学現象が複雑に連鎖して起きているため、その統括的な理解はおろか、あるひとつの現象を実験的に正確に捕らえることすら難しい。例えば古代より身近に知られていて、様々な所で実用化されているにもかかわらず本質は未だによく理解されていない現象に誘電体(絶縁体)の摩擦帯電(triboelectricity)現象があげられる。すなわち異なる2種類の物質(条件によっては同じ物質)を擦り合わせると双方が異極性に帯電する現象である。摩擦帯電に関する研究は様々な物質に対して試行錯誤的に正負どちらに帯電しやすいかを調べることで帯電列を導出することから始まった[1, 2]。現在では帯電、つまり電子の移動を説明するために、真実接触面積の増加による説、摩擦熱による熱電子放出現象による説、接点の結晶が歪むことや摩擦、crackが生成することで生じる圧電効果による説などがあげられている[3]。しかし、特に誘電体(絶縁体)の摩擦における電気現象の研究は明確な実験も理論も少なく、研究は不十分である。この摩擦帯電現象は本研究で述べる摩擦に伴う発光現象と深く関係しており、キーワードのひとつにあげられる[2]。

一方、摩擦面光放射についても興味深い現象として長年研究されてきた。誘電体単結晶やセラミックスなどを切断・破壊[4, 5]、変形[6, 7]、剥離[8]、摩擦[9, 10, 11]させたとき、すなわち固体に機械的エネルギーを付与したときに見られる発光現象はtriboluminescence[12]と総称され広く知られているが、摩擦発光現象もその中に含まれる。現在triboluminescenceのメカニズムとして、熱による光放射[13, 14]、欠陥生成と色中心からの発光[4, 5, 7, 9, 12]、帯電が引き起こす大気放電プラズマからの発光[8, 12, 15, 16, 17]の3点が考えられている。これはまた、地震との関連性まで指摘されている[18]。実際の摩擦ではこれらの現象は混在して起きており、また摩擦や破壊の条件、環境や雰囲気などによりどれが主体の現象になるかは変化すると考えられている。

我々はpin-on-disk法で、比較的軽荷重(1.1 N以下)、低速(16 cm/s以下)の摩擦条件にてダイヤモンド球面で各種セラミックス表面(disk)を大気中でスクラッチした時に発生する光のスペクトル計測を行い、波長300-400 nmの紫外線領域に多数の鋭いピークを観測した[15]。この紫外線放射の原因は大気絶縁破壊による放電(非平衡プラズマ)からの発光であることが分かり、軽荷重・低速であっても誘電体摩擦においては摩擦帯電および、放電による紫外線放射が重要であることを明らかにした。

¹E-mail: MIURA@MEL.GO.JP

このように pin-on-disk のような摩擦においては放電発光が摩擦点近傍で起きていることは明らかになったが、この放電は接点もしくはその周辺のどこで起きているかは分かっていなかった。我々は、大気中における摩擦-帯電-放電というダイナミックプロセスのメカニズムを研究するために、ダイヤモンド球面とサファイヤ平面の摩擦面における放射強度分布を計測した[16, 17]。その結果、摩擦接点において可視-近赤外の発光、すなわち摩擦熱による発光、およびディスクの摩擦を受けた沿線上の摩擦の直後と再接近するところに紫外線の発光が観測された。本研究では、紫外線の発光、すなわち放電現象はダイヤモンド球面とサファイヤ平面の間隙で起こっていることを示し、そして適当な放電モデルを導入して放電発光強度分布の解析することにより両面間に発生している電位差を導出することを行った。これまでに誘電体や金属などの摩擦帯電および摩擦放電後の帯電電位などを測定した例は数多くあるが、放電中の誘電体間の電位差、すなわちダイナミックプロセス中における誘電体間の帯電電位差の測定は初めてである。

大気中での誘電体間の摩擦は機械工学の分野におけるトライボロジーとも深く関係し、ダイナミックプロセス中での帯電障害[19]や利用、化学物質の変化[20, 21]など応用面においても重要である。熱化学反応や金属の焼付現象から摩擦熱の発生が重要視され、摩擦熱に関する研究は放射の分光計測などによって接点の温度の計測などが行われた[13, 14]。しかし、摩擦熱の発生よりも摩擦帯電・放電の発生が重要になると思われる誘電体間の摩擦や低荷重・低速の摩擦条件などにおいて静電気と化学反応の関連は重要である。近年、摩擦に伴う放電現象が潤滑剤の重合や酸化などの劣化現象に寄与している可能性が指摘されている[11, 22]。高エネルギー（紫外線）放射や摩擦帯電・放電現象を詳細に調べることで、摩擦面で起こっている様々な現象との関連性の解明が期待される。

2 実験結果と解析

2.1 光放射強度の摩擦速度と経過時間依存

我々の研究によって、ダイヤモンド球面と各種セラミック表面を摩擦したときの発光スペクトルから接点付近では放電が起きていることが確認された[15]。さらに、ダイヤモンド球面とサファイヤ平面の摩擦面の発光強度分布を測定することにより、放電は摩擦を受けたライン上の接点から少し離れた所において起こっていることが明らかになった[16, 17]。さて、放電個所に関しては2つの不明な点が挙げられる。第一に放電はダイヤモンド-サファイヤ面間の間隙で起こっているのか、もしくはサファイヤディスク面上のクラックなどで生じているのかという2つの可能性があること、第二に再摩擦の直前で放電が起こる理由についてである。この問題に対して、我々は摩擦速度依存性と摩擦を始めてからの時間経過に依存した連続測定を行った。

大気中で曲率半径 $200\mu\text{m}$ のダイヤモンド球面により 0.42 N の負荷条件によって摩擦速度を変えたときの発光分布を測定し、サファイヤディスク上の摩擦を受けたラインに沿った発光強度プロファイルを図1(a)に示す。3つのピークが観測されているが、左から α, β, γ と呼ぶことにする。ピーク β はダイヤモンドとサファイヤが接している点であり、可視-近赤外の波長を持つことから、摩擦熱による光放射であり、 α, γ 付近の発光は大気中放電による紫外線であることが分かっている[16, 17]。発光強度については、我々の過去の結果からも、摩擦速度に比例することが知られて

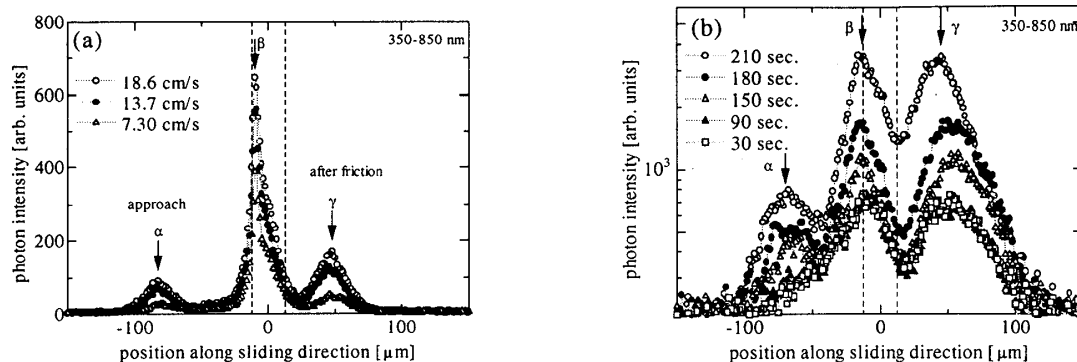


図 1: (a) ディスク上の摩擦トラックに沿った発光強度分布の摩擦速度依存性 (b) および、摩擦時間経過依存性: 横軸の原点は接点の中心を示し、点線で囲まれた領域は接触面を表す。

おり [15]、この結果もそれと同じ傾向を示している。ここで注目すべき点は、すべり速度が大きく変わっても放電の位置（ピーク α と γ ）に大きな変化がないということである。したがって放電現象の多くはディスク面上の crack などではなく、ダイヤモンド-サファイヤ面間のわずかな間隙で起こっていることが予想される。我々は次のような放電までの過程を考察した。摩擦によってサファイヤ平面（およびダイヤモンド球面）が帯電し、ディスクの回転で帯電面は移動する。この帯電によってダイヤモンドとサファイヤ面間に電位差が生じる。この電位差により空気の絶縁破壊が起こって放電し、窒素のプラズマ発光が観測される。このようなメカニズムを考えると理解しやすい。

摩擦の時間経過に依存した発光強度の変化を図 1(b) に示す。摩擦の初期段階においては、ピーク α は見られないことが分かる。そして連続摩擦の時間が経過するにつれてピーク α の強度が高まることが明らかになった。この結果から摩擦を受けた面の再接近時における放電は、ディスク上に残った電荷がダイヤモンド球面と再接近するときに表面電荷の高密度化と間隔の減少によって放電が引き起こされていると考えられる。

摩擦における放電発光位置測定、摩擦速度依存性および経過時間依存性を測定することで、ダイナミックプロセス中での摩擦-帯電-放電というサイクルが明確になった。放電はダイヤモンドとサファイヤのわずかな間隙で起こっており、これまでの誘電体間摩擦で観測された窒素放電プラズマによる発光は、この間隙において大気の絶縁破壊が起こっているためと考えられる。

2.2 摩擦放電における電位差の導出

一般に誘電体間の摩擦電気については定量的な測定が非常に難しいのだが、今回の発光強度の測定から、放電モデルを適用することでダイナミックプロセス中で発生している誘電体間の電位差を導き出すことを試みた。

摩擦が起こった直後の放電発光強度分布を示す摩擦中心からディスク回転方向の発光分布、すなわちピーク γ を含む領域の放射強度分布について研究した。データは光学フィルターを透して紫外線のみを測定した。使用したダイヤモンド球面の曲率半径、負荷、摩擦速度を表 1 に示す。な

先端曲率 [μm]	摩擦負荷 [N]	摩擦速度 [cm/s]	電位差 [V]
100	0.42	9.9	30
200	0.42	24	17
300	0.42	26	19
500	0.42	10	17

表 1: 大気の絶縁破壊モデルによる帯電電位差の計算結果

お、摩擦速度に対して発光のピーク位置の変化はほとんど無かった。摩擦直後のダイヤモンド球面-サファイヤ平面間の放電発光量を測定し、両面間に発生している電位差を2つのモデルをそれぞれ適用した場合について以下に述べる。

2.2.1 大気の絶縁破壊モデル

放電が初めて起こる電界強度、すなわち大気の絶縁破壊の電界強度 3×10^6 V/m とピーク γ の最大点の位置 (平面上で接点中心からの距離を l とする) におけるダイヤモンド-サファイヤ間の距離から少なくとも両面間に発生している電位差を求めることが出来る。ここでは位置 l にて平面に垂直な線が曲面と交差するまでの距離を両面間の間隙とし、その距離 D は $D = R - \sqrt{R^2 - l^2}$ で計算される。ここで R はダイヤモンド球面の曲率半径である。表 1 に計算結果を示す。大気の絶縁破壊が起こる最小の電界強度から計算したので、このそれぞれ数十 eV という値は必要最小限な電位差と言える。したがって、実際の摩擦-帯電-放電のダイナミックプロセスではこの値よりも高い電圧が生じている可能性がある。

2.2.2 平衡電位差による放電電流モデル

連続摩擦による摩擦-帯電-放電というダイナミックプロセスの平衡な状態を考える。ダイヤモンド-サファイヤ面間に平衡な状態として一定の電位差が生じており、摩擦後の両面間ではあらゆる所で放電は起きているが、間隙の距離に応じて放電電流量が異なるためにそれに比例した発光強度分布が生じていると仮定して、その電位差を導出する解析を行った。

平行電極間の電位差により電極を飛び出した電子が介在するガス分子と次々に衝突して新たな電子をたたき出し、電子なだれが生じて放電が起きている状態を考える。これは Townsend の放電開始理論における衝突電離の段階にあたる。衝突電離理論によると電極間の放電電流量 j は、

$$j = eZ_0 \exp(\alpha D) \quad (1)$$

と表すことが出来る。ここで e は電子の電荷量、 Z_0 は電極から放出される電子の数 (増幅前)、 α は電子の衝突電離係数である。 α は衝突相手であるガス分子の数密度に比例するので気圧 p に比例する。 α は電界強度 E により平均自由行程 (λ) 内の加速で得る電子の運動エネルギー、すなわち、 $E\lambda$ の関数になるはずである。 $\lambda \propto p^{-1}$ であるから、

$$\alpha = pf \left(\frac{E}{p} \right) \quad (2)$$

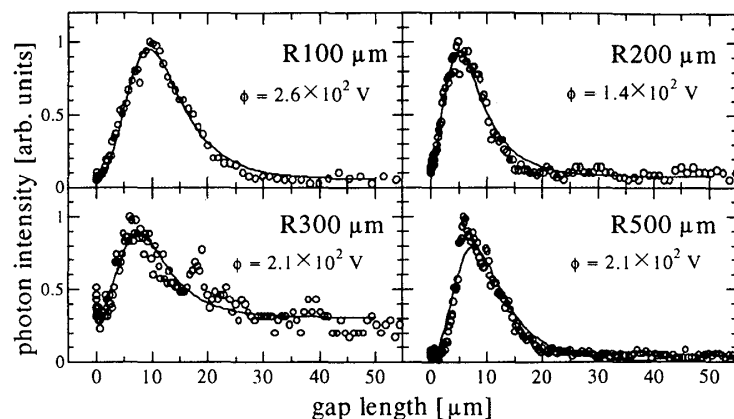


図 2: 電位差発生と放電電流の平衡モデルに基づく 2 面間の電位差導出

となる。現在、この α は次式でよく表されることが知られている [23]。

$$\alpha \simeq pA \exp\left(-B \frac{p}{E}\right) \quad (3)$$

ここで、 A, B はガスの種類に依存したパラメータである。衝突電離係数は様々なガスや電界強度で実験的によく研究されており、式 (3) は汎用性が高く、多くの実験結果を非常によく説明できることが分かっている。式 (1), (3) および電極間の電位差を $ED = \phi$ と置き換え、放電電流量 j は、

$$j \propto \exp\left\{pDA \exp\left(-\frac{BpD}{\phi}\right)\right\} \quad (4)$$

と表すことが出来る。

窒素放電プラズマからの発光量は、ガス分子の電離現象の量に比例し、すなわち電子なだれによって増幅した電子の量 j に比例すると仮定することで、発光強度分布に対して式 (4) を適用する。そこで、測定した平面上の摩擦点からの距離 l をダイヤモンド球面とサファイヤ平面の間隙の距離 D に変換して、発光強度を間隙 D に対してプロットし、式 (4) を最小二乗法でフィットすることでパラメータ ϕ 、すなわち放電領域にわたって発生する両面間の電位差を導出する解析を行った。式 (4) を適用するにあたって、パラメータ A, B には空気の場合の値、 $A = 14.6 \text{ cm}^{-1}$, $B = 365 \text{ V/cm} \cdot \text{mmHg}$ ($E/p = 150 - 600 \text{ V/cm} \cdot \text{mmHg}$) を用いた。

図 2 に間隙距離 D を横軸とした紫外線放射強度分布をプロットした。y 軸に対するオフセットパラメータを含めた式 (4) を実験値に最小二乗法でフィットした結果を図中の曲線で示した。単純なモデルにも関わらず高い一致を示した。それぞれの測定において 200 V 前後の電位差が導出された。よって、これまで計測できなかった摩擦・帯電・放電というダイナミックプロセス中に発生する両面間の平衡電位差 ϕ は、大気中の実験とこの解析方法によっておよそ 200 V と分かった。しかし、この値も 140-260 V とこの程度ばらついている。これは大気中の温度や湿度など、帯電保持力に大きな影響を及ぼす可能性がある条件のコントロールがよくないためではないかと考えられる。

3 まとめ

ダイヤモンド球面とサファイヤ平面との摩擦発光分布の摩擦速度依存性および経過時間依存性の測定により、摩擦に伴う放電現象は両面間の間隙で起こっている可能性が高いことが分かった。摩擦直後での放電発光の強度分布について、大気の絶縁破壊モデルと平衡電位差での放電電流モデルの2つのモデルをそれぞれ適用して解析することによって、ダイナミックプロセス中に両面間には少なくとも数十Vの電位差が発生しており、放電電流モデルによると、200 V程度の平衡電位差が生じていることが示唆された。本研究が、今後の誘電体間の摩擦現象における摩擦帯電メカニズムの研究へつながるような成果であることを期待している。

参考文献

- [1] J. Henniker, *Nature*, **196** (1962), 474.
- [2] G. R. Freeman, and N. H. March, *Mat. Sci. Technol.*, **15** (1999), 1454.
- [3] 静電気ハンドブック (静電気学会編); 静電気ハンドブック (高分子学会編) など
- [4] Y. Kawaguchi, *Phys. Rev. B*, **52** (1995), 9224.
- [5] 越水重臣, 大塚二郎, 精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (1998), pp. 329.
- [6] C. Xu and X. Zheng and M. Akiyama and K. Nonaka, *Appl. Phys. Lett.*, **76** (2000), 179.
- [7] N. Takada, S. Hieda, J. Sugiyama, R. Katoh, and N. Minami, *Synthetic Metals*, **111-112** (2000), 587.
- [8] M. Zhenyi, F. Jiawen and J. T. Dickinson, *J. Adhesion*, **25** (1988), 63.
- [9] J. T. Dickinson, L. Scuddiero, K. Yasuda, M. W. Kim, and S. C. Langford, *Tribology letters*, **3** (1997), 53.
- [10] K. Nakayama, and H. Hashimoto, *Tribology Transactions*, **38** (1995), 35.
- [11] K. Nakayama, and H. Hashimoto, *Tribology International*, **29** (1996), 385.
- [12] A. J. Walton, *Adv. Phys.*, **26** (1977), 887.
- [13] G. N. Chapman, and A. J. Walton, *J. Appl. Phys.*, **54** (1983), 6961.
- [14] T. Yamashita, K. Imasato, N. Haraguchi, and M. Nagashima, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **34** (1995), L1632.
- [15] T. Miura and K. Nakayama, *J. Appl. Phys.*, **88** (2000), 5444.
- [16] 三浦 崇, 塩田 忠, 中山 景次, 表面科学学会予稿集 2000 年, pp. 28.
- [17] T. Miura, T. Shiota, and K. Nakayama, unpublished.
- [18] 榎本祐嗣, 静電気学会誌, **15** (1991), 433.
- [19] Z. Feng, C. Shin, V. Gubbi, and F. Poon, *J. Appl. Phys.*, **85** (1999), 5615.
- [20] V. J. Novotny, and C. S. Bhatia, *J. Vac. Sci. Technol. A* **12** (1994), 2879.
- [21] C. S. Bhatia, *et. al*, *IEEE Trans. Magnet.*, **35** (1999), 910.
- [22] A. Sasaki, and S. Uchiyama, *Lubrication Engineering*, **55**, (1999) 14.; 佐々木 徹, トライボロジスト, **45** (2000), pp. 27.
- [23] 電離気体論 (電気学会), pp. 87. など