

絶縁体のすべり摩擦における気体放電

— 放電発光の時間計測 —

学習院大学 理学部¹ 三浦 崇², 榎戸 一樹, 橋本 麻衣, 荒川 一郎

1 はじめに

大気中での固体表面間の摩擦に伴う発光現象 [1] を研究するため、絶縁体間のすべり摩擦における接触付近での発光の分光測定と空間分布測定を行い、摩擦面の帯電に起因した気体放電が起きていることが明らかになった [2, 3]. 摩擦中の気体放電について詳しく研究するために、ダイヤモンドと水晶のすべり摩擦中の気体放電のスペクトルと空間分布の気体圧力依存性を測定した. 気体圧力が低くなるにつれて、発光分布は摩擦面より外側にも広がり [4], スペクトルではグロー放電に特有の輝線が相対的に増大した [5]. 低気圧下で広がったグロー放電分布に対して局所的な分光測定を行った結果、接触点から離れた水晶面上のやや暗い発光で負グローに見られる輝線の相対強度が高いことが分かり、放電発光の測定から帯電面の極性に関する情報が得られた [6].

このように、摩擦中では接触・摩擦による表面帯電と気体放電による電荷の消失が繰り返されるため、放電は断続的に起こっていることが予想できる. しかし、これまでの分光測定や空間分布測定では数秒以上の露光時間を必要としたため、放電発光の時間構造は不明であった. 本研究では、ダイヤモンドと水晶のすべり摩擦中に接触付近で発生する気体放電の発光時間と発生頻度について研究した.

2 実験方法

ダイヤモンドと水晶のすべり摩擦の実験は Pin-on-disk 法で行った [5]. ピンにはダイヤモンドスタイラス [7] (荷重のかかる方向を結晶の $\langle 001 \rangle$ 方向とし、先端を曲率半径 $500\ \mu\text{m}$ で球面加工したもの) を用いた. ディスクには両面を光学的平坦に研磨した水晶板 (z 軸カット, 直径 $50\ \text{mm}$, 厚さ $1\ \text{mm}$) を用いた. すべり速度と接触の荷重は一定とし、摩擦中に発生する放電発光は光電子増倍管 (PMT) で検出し、発光強度の時間変化はデジタルオシロスコープで計測した. 信号回路は $50\ \Omega$ インピーダンスで整合し、1 光子入射に対して観測されるパルスの時間幅は約 $3\ \text{ns}$ であった. PMT のバイアス電圧は定格 ($1250\ \text{V}$) より低く ($800\ \text{V}$) 設定し、放電のような多光子発光に対してのみ出力信号が得られるようにした. 摩擦は純度 99.999% の窒素またはアルゴン中で行った.

¹171-8588 東京都豊島区目白 1-5-1

²E-mail: takashi.miura@gakushuin.ac.jp

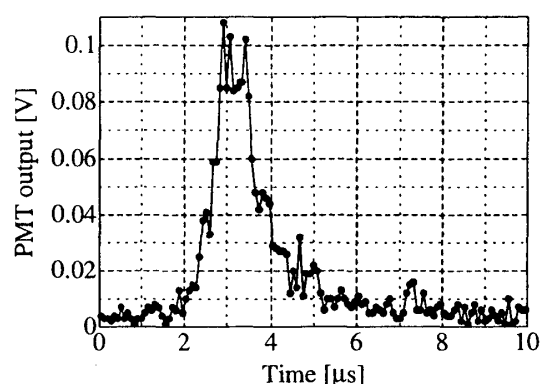


図 1: オシロスコープによる PMT 出力の時間変化の測定例. 雰囲気気体 N_2 1.2×10^3 Pa, すべり速度 15 mm/s, 接触荷重 20 mN.

3 結果と考察

PMT とオシロスコープによる放電発光強度の時間変化の測定例を図 1 に示す. 放電発光は図のようなパルスの繰り返しであり, すべり摩擦における放電発光は断続的に起こっていることが明確になった. パルスの時間幅や波高は一定ではなかったため, 無作為に放電波形を抽出し, その半値幅と波高 (最大値) の相関を解析した. 結果を図 2 に示す. 波高も時間幅も, それぞれ数桁にわたって広く分布したが, 両者の間には負の相関があった. これは, 個々のパルス放電が大体同じ発光量であったことを示しており, 表面帯電量が限界になると気体放電が発生して帯電が消失するサイクルが摩擦中に繰り返し起こることを示唆している.

発光時間について放電中の電子の移動速度から考察する. 以前に行った研究 [4] で, N_2 (2.1×10^4 Pa) 中の摩擦放電の発光分布にタウンゼント放電の理論を適用して得た電位差 (3.3×10^1 V) から, 発光強度の高い約 $10 \mu\text{m}$ のギャップの空間の電場は 3×10^6 V/m と計算される. 電場と気体圧力と電子の移動速度の関係は既に研究されており [8], このときの電子の移動速度は少なくとも 10^6 m/s と考えられる. したがって, 1つの電子から始まるなだれ (Avalanche) が $10 \mu\text{m}$ 進むのに要する時間は 10 ps 程度と計算される. また, 励起した N_2 の平均寿命は 4×10^{-8} s [9] であるが, 今回測定したパルス放電の発光時間はそれらよりも十分長く, 1つのパルス放電の中で, Avalanche が多数回起きていることになる. これはバロメーターライト (ガラス管内壁と水銀の摩擦に伴う放電発光) における発光時間 (半値幅 ~ 10 ns [10]) とは異なり, すべりの間, 電荷量を蓄積してから一度に放電する機構があると推測できる.

図 3 に示すように, 各気体圧力下で測定した発光時間をそれぞれ平均すると, 低気圧下では発光時間が長くなることが明らかになった. 低気圧下で放電分布が拡大しても, 空間のガス分子密度が低下すると電子の移動速度が増すので, Avalanche の性質では説明できない. 考えられる理由として, ガス分子密度が低いときは 1つの Avalanche で増幅する電子数が少ないためにパルス放電中の Avalanche 数が増加したことが挙げられる. また, 放電が広範囲に及んだため, 放電経路の異なるいくつかのパルス放電が重なり合っているとも考えられるが, この原因については, 発

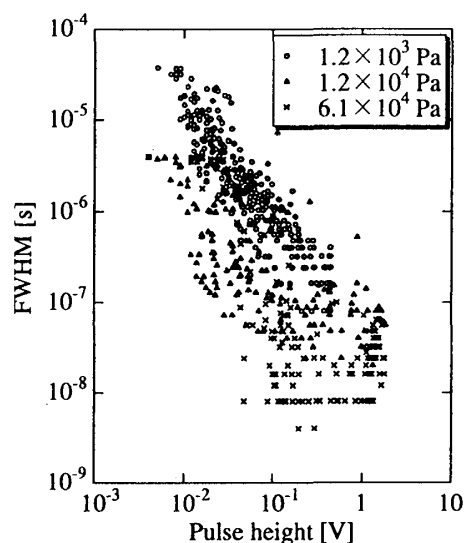


図 2: 放電パルスの波高と発光時間（半値幅）の相関図．窒素雰囲気中，接触荷重 20 mN，すべり速度 15 mm/s.

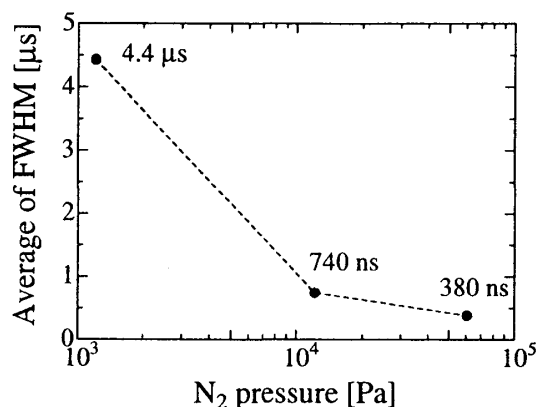


図 3: 図 2 に示した発光時間の平均の気体圧力依存性.

光強度変化の詳細な構造や放電空間分布の時間発展について研究を深める必要がある。

すべり摩擦中のパルス放電の発生頻度の時間変化を調べるために，マルチチャンネルスケーラーで摩擦中の放電回数を記録した．図 4 に，アルゴン中のダイヤモンドと水晶のすべり摩擦における結果を示す．すべり始めから放電は観測され，また，すべりを止めている間は放電が起きないが，再び摩擦するとすぐに放電が起きた．ダイヤモンドと水晶の摩擦では，すべり始めから放電が起きることが空間分布の測定から予想されていた [5] が，今回の結果で明確になった．ディスクが 1 回転するまでの放電頻度は 1 秒間に 10 回程度で，2 周目以降，すなわち繰り返し摩擦が始まると放電頻度が 20 回程度まで増加した．すべり速度は 1.5 mm/s であるから，1 回の放電が起きるすべり距離は平均で 100 μm 程度である．図 4 の右に同時に測定した，摩擦開始から 300 s 後の放電分布を示す．放電は接触点から水晶のすべり方向におよそ 300 μm の範囲で起きているので，ダイヤモンドとの接触で発生した水晶表面の帯電電荷はすぐに気体放電によって消失していることが推測される．

4 まとめ

光電子増倍管を用いた発光観測により，ダイヤモンドと水晶のすべり摩擦中に起きる放電発光は断続的なパルス放電であることが明らかになった．発光パルスの波高と発光時間はそれぞれ数桁にわたり分布したが，それらの間には負の相関があった．また，気体圧力が下がるにつれて，平均的に発光時間が長くなった．この原因は，広範囲に広がったグロー放電では複数の経路のパルス放電が重なりあって起きているためと推測できるが，詳細は不明である．すべり摩擦中の放電パルスの発生頻度の測定から，パルス放電はすべり始めからすぐに起きることが明らかになった．

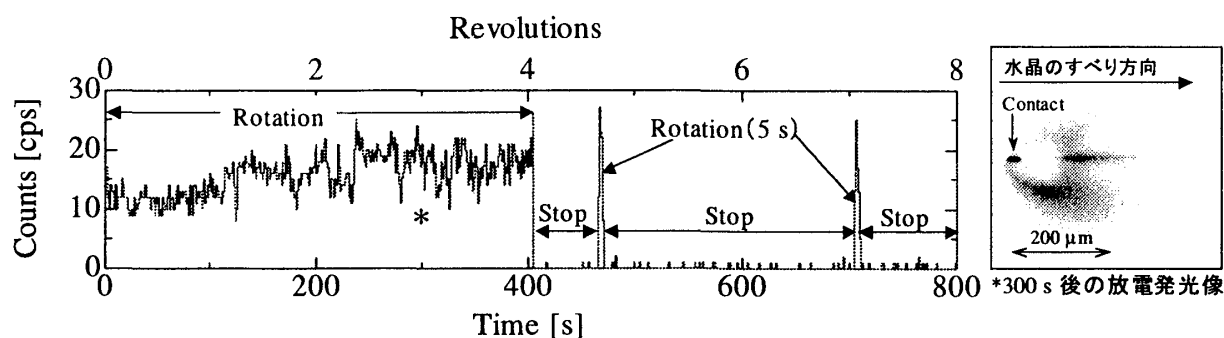


図 4: アルゴン 1.2×10^3 Pa 下でのダイヤモンドと水晶の摩擦中の放電パルス発生頻度. ディスクの回転数 0.01 rps, すべり速度 1.5 mm/s, 接触荷重 100 mN (平均接触応力 ~ 0.5 GPa). 放電頻度測定と同時に測定した摩擦開始後 300 s での放電発光像を右に示す. 露光時間 10 s.

また, 1 回の放電が起きるすべり距離の平均は, 接触点から放電が起きている領域の中心までの距離と同程度で, ダイヤモンドとの接触によって発生した水晶表面の電荷は, すべり後の放電によってすぐに消失していると予想される.

謝辞

本研究の一部は, 財団法人日本板硝子材料工学助成会, および, 財団法人旭硝子財団の援助を受けて行われた.

参考文献

- [1] A. J. Walton: Adv. Phys., **26**, p. 887 (1977).
- [2] T. Miura and K. Nakayama: J. Appl. Phys., **88**, p. 5444 (2000).
- [3] T. Miura and K. Nakayama: Appl. Phys. Lett., **78**, p. 2979 (2001).
- [4] T. Miura and I. Arakawa: J. Vac. Sco. Jpn., **45**, p. 428 (2002). (*in Japanese*).
- [5] T. Miura, E. Kazuki, N. Hirokawa and I. Arakawa: J. Vac. Sco. Jpn., **46**, p. 210 (2003). (*in Japanese*).
- [6] T. Miura, K. Enokido, N. Hirokawa and I. Arakawa: Appl. Sur. Sci. (2003). submitted.
- [7] S. Takeuchi, M. Murakawa, M. Mayuzumi and T. Kumagai: J. Jpn. Soc. Prec. Eng., **61**, p. 142 (1995). (*in Japanese*).
- [8] J. S. Chang, R. M. Hobson, 市川, 金田: “電離気体の原子・分子過程”, 東京電機大学出版局, Tokyo (2001). p309.
- [9] M. Capitelli, C. M. Ferreira, B. F. Gordiets and A. I. Osipov: “Plasma Kinetics in Atmospheric Gases”, Springer, Berlin (2000). p157.
- [10] R. Budakian, K. Weninger, R. A. Hiller and S. J. Putterman: Nature, **391**, p. 266 (1998).