

レーザーを用いたアーク放電の研究

米田研究室 宮崎涼

1. 序論

1.1 背景・目的

電気接点の問題に関して、開閉時に生じるアーク放電はしばしば取り上げられている。それは、アーク放電自体が高温であることから他の機器へダメージを与えてしまう可能性があるからである。

本研究では Warm dense matter 領域における電子の局在化状態に注目し、短パルスレーザーを陰極に照射することで放電経路内に金属-非金属転移を起こしアーク放電を遮断するというコンセプトのもと研究を進めている。

1.2 先行研究

実際に放電している陰極にレーザーを照射したときのアーク放電電流、および抵抗率を調べた先行研究のデータを載せる。

実験では、レーザーを陰極に照射したタイミングで電極に流れる

電流の値が減少し、抵抗率が大きくなったことが確認できた(図1)。しかし、この実験では陰極表面や近傍での状態は未解明であり、金属-非金属転移を用いた確固としたアーク放電の遮断技術のためには、陰極付近のより詳細な観察が必要となる。

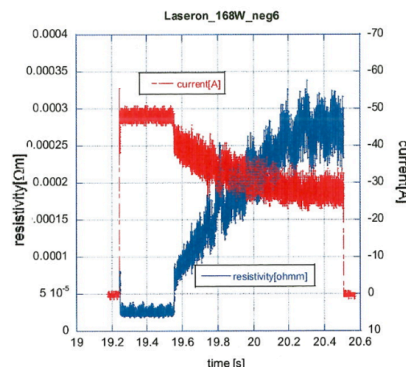


図1.レーザー照射後の電流・抵抗率の時間変化

2. 原理

2.1 アーク放電

アーク放電中に放電を維持し続ける電子の放出機構は他の放電現象と大きく異なり、熱電子の放出がその主たる原因である。

熱電子は陰極表面全体から放出されるのではなく、電極間距離が他の部分に比べ短くなる表面上の突起部から選択的に放出される。陰極表面を正面から観察すると、この突起が点状に見えることからアークスポットと呼ばれる。

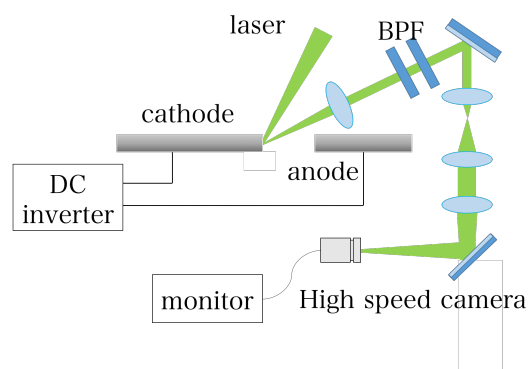


図 3. 陰極表面観測系

3. 陰極表面の観察

3.1 実験概要

アーク放電中は、アーク光自身が強い発光を示すため、アーク光よりも強い輝度の照明を照射して陰極表面をイメージングする必要がある。照明に使用する光源には、アーク光が広帯域に渡って強いスペクトル分布であるため（図 2）、アークのスペクトルが小さい領域の波長を選択し、そのスペクトル密度で勝る条件が必要となる。本実験では、波長 532nm のレーザーを照明用に用い、以下に示す実験系にて陰極表面を観察した（図 3）。

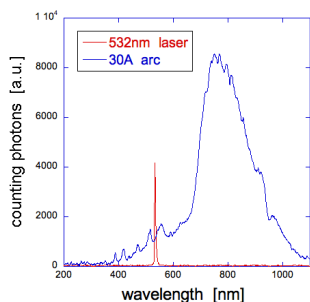


図 2. 測定したアーク光と照明用レーザーのスペクトル分布

また、観測系で使用した BPF は FWHM が 1nm の性能のもので 2 枚挿入しなければ、照明用のレーザーの輝度がアーク光(電流 30A)に対して、観測時に十分でなかった。

また、観測系の分解能は $50 \mu\text{m}$ 、さらに被写界深度は $100 \mu\text{m}$ であることを確認した。

3.2 観測結果・考察

実際に観測された陰極表面の様子は以下の様であった（図 4）。

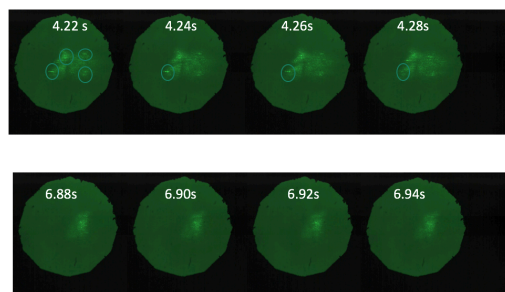


図 4. 観測された陰極表面の時間変化

放電後 4.22~4.28s の観察で、陰極

表面には他の部分に比べ輝度の高い点が存在した。これは表面に突起が存在し、照明用レーザーを窪んでいる部分より散乱光が強いためである。従って、この輝度の大きな部分はアークスポットである。

また、点の個数は時間経過とともにランダムに変化し、これは陰極表面の様子が放電により変化していたことを示している。

次に、放電後 6.88~6.94s 後の陰極表面を観測するとアークスポットの存在は確認できなかった。これは放電により陰極表面の観測位置が後退していったためである。従って、次の実験で陰極を横から観察し、蒸発速度を求めた。また、合わせて観測系内に存在するアークプラズマのレンズ効果を確認した。

4. 陰極横からの観察

4.1 実験概要

陰極の蒸発速度、および陰極近傍に存在するアークプラズマの観測系に及ぼすレンズ効果を評価するため次に示す実験系を組んだ。

屈折率変化を見るためマッハツェンダー干渉計を組み、片方の腕が陰極の前方に通るようにアライメントし

た。また、レンズ群に iris を挟むことで、スペーシャルフィルターの役割を持たせ、イメージに付加されるノイズを除去した。

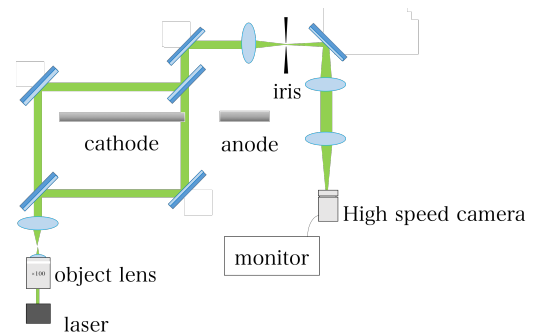


図 5. 横からの観察における観測系

4.2 観測結果・考察

測定した陰極の蒸発速度は以下の図より評価した。

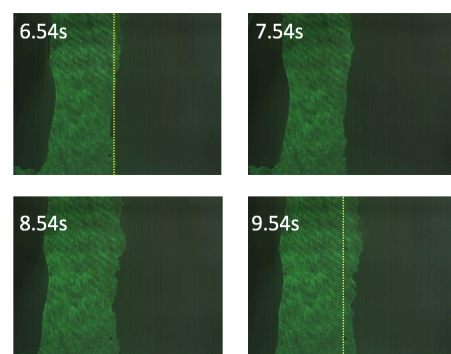


図 6. 陰極蒸発速度の評価

黄色い線を基準として陰極の蒸発速度を評価した。蒸発速度は $100 \mu / s$

であり、1s で $100\mu\text{m}$ 陰極が後退していることがわかった。

これより、先の観察されたイメージ（放電後 6.88~6.94s）にアークスポットが観察されていなかった原因に陰極が放電により後退していったことが影響していることがわかった。さらに観測系の被写界深度が $100\mu\text{m}$ であったことから今回の観測系では 1s 以内の観測で十分な S/N の画像が得られる。

また、次にアークプラズマが観測系に及ぼす影響についてマッハツェンダー干渉計で観測される干渉縞の評価をすることで定量的に求めた。以下に観測された干渉縞のプロファイルを載せる。

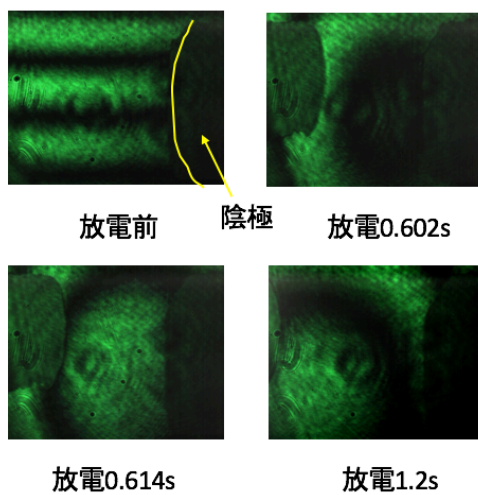


図 7. 観測された陰極近傍の干渉縞

放電前では暗線は 3 本あったが、放電を開始すると同じ領域内に観測される暗線は 2 本であった。これより、干渉縞のシフト量は 1 本分で、このシ

フト量から屈折率変化を算出すると、 $1+10^{-5}$ のオーダーで変化していることがわかった。これは空気の屈折率が $1+10^{-4}$ であることから無視できるほどのレンズ効果であったことが確認できた。

従って、本実験で観察された陰極表面のイメージにアークプラズマの影響は無視できる。

5. まとめ

本実験ではアーク放電中の陰極表面、およびその近傍の状態を見るために陰極正面から、および横からの観察をした。

この観測系では、陰極表面にアークスポットの複数存在を確認でき、アークスポットの時間変化を確認できた。

また、蒸発速度の算出から 1s 以内の範囲で表面の観察が可能ながわかった。

今後の展望では、作成した観測系を用いアーク放電中にレーザーを照射したときの陰極近傍の状態変化を観察する。また、アーク放電を遮断するため入射レーザーの条件を調べる。

参考文献

- ・ "Cathode, Phenomena, in, a, Vacuum, Discharge: Th Breakdown, the, Spark, and, the, Arc". NAUKA, Gennady, A., MESYATS
- ・ "Warm, Dense, Matter 物性", 米田仁紀, Institute for Laser Science, University of Electro-Communications, Chofu 182-8585, Japan