

ローソクの炎と電界・電流 Candle Flame and Electric Field · Electric Current

森 千鶴夫†
Chizuo MORI

Abstract Electric field was applied to candle flame and the electric current was measured. The flame flowed toward the negative electrode, which means that the flame has positive electric charge. When positive electric high voltage was applied to the upper electrode, the flame flowed toward the down side and violently swung, which implies the possibility to make the flame play a kind of dance. The ratio of the number of positive charge carrier in the flame to the number of carbon atoms and H₂ molecules in the flame was only $\sim 10^{-6}$. This small ratio seems to mean that bright soot particles in the flame have positive electric charge and one particle is composed of about 10^6 carbon atoms on the average.

1. はじめに

ある中学校で霧箱の実験を行なったときに、“アルファ線の飛跡が霧の筋となって見える原理は、飛行機雲ができる原理と同じである”と説明したところ、飛行機雲の中にイオンがあるのですか？との質問を受けた。“燃焼している炎には多くのイオンが含まれているので、飛行機の高温の排気ガスにはイオンが多く含まれています。また、排気ガスには多くの水蒸気が含まれていて、高空で急速に冷却されて過飽和状態になります。イオンは水蒸気を引きつける核となり水滴ができて飛行機雲が発生するのです。核となるのはイオンだけではなく、小さな煤（すす）なども核になります”と答えたが、燃焼している炎にはイオンが多く含まれていることを、ぜひ目で見るようにして生徒達にも納得してもらいたいと思った。

調べてみると、ローソクの炎に電界を印加して、炎が傾く実験がすでになされていて、炎にはイオンがあることを示すことが簡単にできる。しかし、その際に流れる電流に関する実験はなされていないようなので、測定してみると、若干新しいことが分かった。ここではそれらについて述べる。

なお、ローソクの炎に電荷が含まれていることは、箔検電器を使って容易に示すことができる¹⁾。また、ローソクに関しては、ファラデイの有名な「ローソクの科学」²⁾がある。これには上述のようなことは記されていないが、ローソクを用いた多くの優れた化学的なデモンストレーション実験が記述されている。

2. 燃焼におけるイオンの生成

高温のガス中にイオンが存在することはプラズマの生成としてよく知られている。生成のメカニズムは基本的には高温に基づく高エネルギー分子の衝突である。ローソクの炎は高温の物体（主として煤）から発せられる黒体輻射であり、その最高温度（ 1400°C ³⁾）においては、分子の平均エネルギーはわずか 0.14eV である。しかし、マックスウエル分布によれば、電離エネルギー（ $1\sim 2\text{eV}$ ）以上にも達する大きなエネルギーを持つ分子も極めてわずかながら存在し、電離している分子もある。イオンの存在割合を求める式もあるがあまり正確ではない。

3. 実験

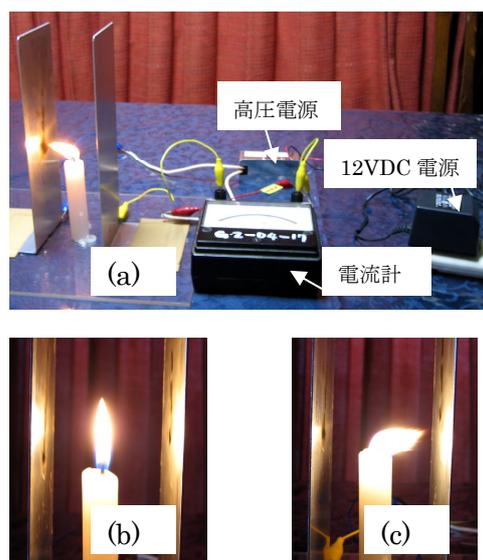


図1 (a) 実験装置、および右のアルミニウム電極に正の 3kV の電圧を印加した場合の炎の様子、(b) 電極に電圧を印加しない場合、(c) 左側の電極に正の電圧を印加した場合の炎の様子。

†愛知工業大学工学部電気学科 客員教授
〒595-0932 豊田市八草町八千草 1248

実験装置は図 1 (a) に示すように、絶縁性の高いアクリル樹脂板の上に、2 枚の L 字形アルミニウム板を約 5 cm 隔てて立て、中央に直径 1 cm のローソクを立てた。一方の電極に 2 M Ω の保護抵抗を通じて正の高電圧を印加し、他の電極に電流計を接続する。高電圧電源は、壊れたレーザープリンターに内蔵している高電圧発生器と高抵抗分圧器を組合せ、電圧を箔検電器で校正¹⁾して用いた。電流計として 0.9 μ A/div の検流計を用いたが、数 10 μ A 程度の電流が測定できる通常のテスターでもよい。ローソクに火を灯さない時には、高電圧を印加しても電流は全く流れない。

図 1 (a) は右の電極板に正の 3 kV の電圧を印加した場合で、炎は左に向いている。電圧がゼロの時には図 1 (b) に示すように、ローソクの炎はまっすぐ上に向っている。左側の電極に正の高電圧を印加すると図 1 (c) のように右に傾く。図 1 (a) および (c) を見ると、炎全体が傾くのであるから、炎すなわち光を発している実体はほとんど正の電荷を持っていることが分る。炎に中性のものが多ければこのように傾くことはないはずである。炎の実体は、パラフィンが高温で分解してできた煤(炭素原子の集まり)が熱せられて光り、炎の上部では酸素が十分に供給され、煤が燃焼して強く光っている。

印加電界と流れる電流の関係を図 2 に示す。電流は印加電界に対して急激に増加している。電子が炎から引き離されて正のイオンや煤との再結合が少なくなるためと思われる。

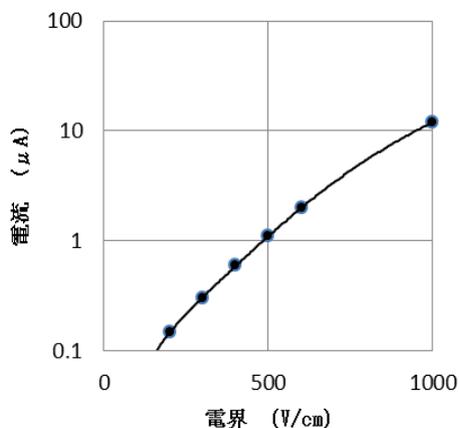


図 2 印加電界と電流の関係

中性の分子や煤が高温でイオン対などになった時の電子は、一部は再結合して分子や煤は中性になるであろう。しかし、光っている煤は全て正の電荷を持っている。他の電子は酸素などと結合して陰イオンとなり、あるいは電子のまま電極に流れているものと思われる。

電界を縦に印加すればどうであろうか。この実験は今まで行われていないようである。図 3 に実験の様子を示

す。図 3 (a) は電界を印加しない状態で、炎は上方に静かに立ち昇っている。(b) は上の金網の電極に 5 kV の正の電圧を印加した場合で、炎は下のほうへ向かって流れている。我々はふつう炎は上方に向かうものと思っているので、このように下に向かう様子はかなり異様な感じを受ける。しかも炎は下を向いているので、蠟を急激に溶かして気化させ着火して、激しく揺れ動くので、何となく恐ろしい気がする。一方、このような様子を見ると、適切なパルス状あるいは交流の高電圧を印加することによって、炎を回転させたりダンスさせたりするなどの演出に使えるのではないかと思われる。(c) は下の金網に正の電圧を印加した場合である。炎は上に向かって大きくなるのではないかと予想したが、電圧を印加しない場合の(a)よりも炎はやや小さく細くなる。炎が上に引っ張られるために、蠟を溶かす割合が少なくなためであろうし、正のイオンや煤の横方向への拡散が少なくなるためであろうかと思われる。興味ある現象である。

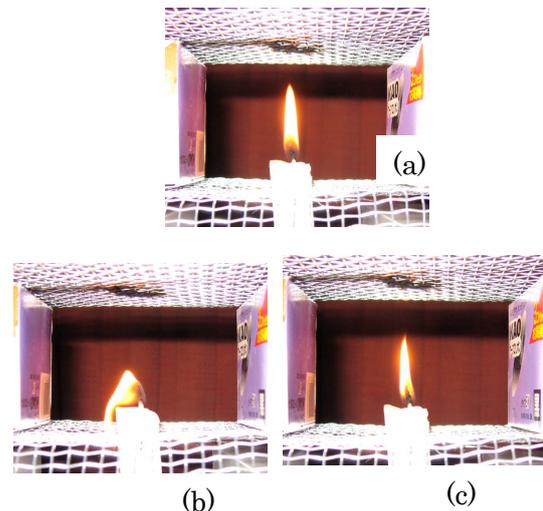


図 3 (a) 電圧を印加しない場合、(b) 上の金網に 5 kV の正の電圧を印加した場合、(c) 下の金網に正の電圧を印加した場合

4. 検討

このローソクの長さ 1 cm の質量は 0.79 g である。純粋なパラフィンとすれば、1 cm に含まれる CH₂ の分子の数は 3.4 $\times 10^{22}$ 個である。1 分間に 0.11 cm 燃焼するので 1 秒間に発生する CO₂ の数は 6 $\times 10^{19}$ 個である。これが全てイオンであるとすれば、電極に流れる電流は 10 アンペアにも達することになる。しかし、図 2 に示すように、1000 V/cm の印加電界の場合に流れる電流は 1.2 $\times 10^{-5}$ A に過ぎない。したがって電極に流入する正の素電荷の数は 1 秒間に 7.5 $\times 10^{13}$ 個である。図 1 (a)

や(c)に示すように、炎は真横に動いているのであるから、①炎は全て正の電荷を持っている。しかし、②燃焼する全体の分子の数に対する正の素電荷の数の割合は、わずかに 1.2×10^{-6} 程度 ($7.5 \times 10^{13} / 6 \times 10^{19}$) で、極めて少ない。この①と②の相違は多分、1個の正の素電荷を持つ煤の粒が平均 10^6 個程度の炭素原子が集まってできたものであるからであろうと思われる。あるいは、より多くの炭素原子からなる煤の粒が1個以上の正の素電荷を有している場合もあるかと思われる。

飛行機雲の中では、こんなに少ないイオン密度で水滴成長の核になりうるのであろうか？ これを考えるために、霧箱中のアルファ線は1気圧の気体の飛跡中にどれほどの密度のイオンを生成しているかを考える。6 MeVのアルファ線は1気圧の気体中でデルタ線の発生などにより、半径 $1 \sim 10 \mu\text{m}$ 、長さ約5cmの気体柱の中にイオンを発生させるとすれば、この気体柱の中の分子の数に対して、発生したイオンの数の比は $\sim 10^{-6}$ である。これは前述の炎の中の中性分子に対するイオンの割合とほぼ同じである。

ローソクの炎は磁場で曲がるかどうかを試してみたが、0.5テスラ程度の磁場では曲がらなかった。これは煤の流動速度が小さく、かつ質量が大きいためであろう。また、このとき横方向の電流はピコアンメータでも検出できず、ローソクで電磁流体発電 (MHD 発電) のデモンストレーション実験を行なうことは無理なようである。ただし、MHD 発電では、電離を良くするためにシードを微量入れるようであるが、ローソクの蠟にもあらかじめそのようなものを混ぜておくとより大きな電流の測定が可能かもしれないし、場合によっては炎の輝度や色を変えたユニークなローソクができるかもしれない。最近、三重県亀山市で金属粉を入れることにより、虹色の光を出すローソクができたということが新聞に出ていたが、光の強度が格段に強いローソクができたという話は聞かない。

非常に寒い冬の朝、外で息を口から吐き出しても白い霧ができる。息の中に多くのイオンがあるのではなく、空気中に存在するほこりが核となって液滴が成長するのだと言われている。実際、南極の越冬隊長の話では、南極のようにほこりがほとんど存在しない空気中では息が白くならないとのことである。このように考えると、飛行機雲の生成原因は霧箱の飛跡の生成原因と若干異なるところもあるが、イオンや煤のようなものが核となって液滴が成長しているという点において、霧箱の場合とほとんど同じであるといってもよい。

5. 結論

ローソクの炎に電界を印加して流れる電流を測定した。炎は負の電極に向かって動くので正の電荷を有していることが分かる。炎の上方に正の電圧を印加すると、炎

は下方に向き、激しく揺れる。適切なパルス状や交流の高電圧を印加すれば、炎のダンスなどの演出が可能であると思われる。

ローソクの炎の部分、すなわち光を出している煤のほとんどは正の電荷を有している。しかし、燃焼ガス分子全体の個数に対するこの荷電した煤の数の割合は 10^{-6} 程度で極めて小さい。一粒の煤は平均して約 10^6 個の炭素原子から成っていると考えられる。煤を構成する炭素原子の数を少なくすれば、炎の輝きが増すかもしれない。また、適当なシードを入れれば輝度を大きくすることができるかもしれない。

霧箱中の飛跡の霧の発生原因と飛行機雲の発生原因はおおむね同一であると言ってよい。ローソクの炎の電界による曲がりの実験そのものは簡単なもので、霧箱に關係した物理現象のデモンストレーション実験として、また、分子の数の計算や、電流の電荷担体の数の計算にも有用であると思われる。

謝辞

愛知工業大学工学部電気学科の鷲見哲雄教授および飯吉 僚 教授には種々便宜をはかって頂いた。感謝申し上げます。

文献

- 1) 森 千鶴夫：愛知工業大学研究報告、Vol. 46, pp255-258 (2011)
- 2) マイケル・ファラデー：“ローソクの科学” (三石 巖 訳)、(角川文庫、平成 17 年、52 版)
- 3) 国立天文台編：“理科年表、机上版 2002” (丸善) p410

(受理 平成 24 年 3 月 19 日)