

イオンクラフトの推力向上のための陰極設計指針

北海道札幌啓成高等学校 理数科 (2023年入学) 9班

小山内千夏 西田光汰 渡部煌正

Veer Prataap Singh (City Montessori School, Lucknow, India)

One type of aircraft that can float on ionic winds is called an ionocraft. The purpose of this research is to strengthen the ionic winds by determining the conditions in which they occur. In this study, we altered the mass or radius of the annular cathode and observed the resulting increase or decrease in ionic winds. As a result, the ionic winds became stronger near the 1.00 g cathode mass or 1.5 cm cathode radius and weaker when passing through the 1.00 g cathode mass or 1.5 cm cathode radius. Additionally, we calculated the heights at which the ionocraft can float using the ionic winds that we measured and found that it can float to a maximum height of 0.0348 cm. We also calculated the strength of the ionic winds needed to maintain a height of 0.150 m for 5 seconds and found that it requires a speed of about 27.9 m/s.

キーワード：イオン風、陰極の半径、陰極の質量、イオンクラフト

1. 序論

正負が異なる電極間でコロナ放電を起こすと発生する風のことを、イオン風と呼ぶ。上手く扱えば、タービンやプロペラに取って代わる新しい飛行方法の一つとなり得る。

このイオン風によって浮遊を可能とする装置は一般にイオンクラフトと呼ばれている。「無音作動、可動部品の少なさ（構造の単純化及び軽量化）、低重力環境でも作動する、環境に優しい」などの多くの利点がある反面、「推力の低さ、エネルギー効率、制御難度」などの多くの問題もある。まだ研究が初期段階の分野だ。

国際共同研究アカデミーに所属してインドの学生と共に研究している私達は、イオンクラフトの輸送面における応用に着目し、研究を進めることに決めた。

本研究の目的は、イオン風が発生する陰極の適切な条件を特定することと、特定された条件を用いてイオン風の強化することである。

また、共同研究者の Veer Prataap Singh 氏 (CMS, インド) はイオンクラフトの試作機を製作してその基本的な動作原理と特性を検証した後、イオンクラフトの将来的なデザイン案の製作を行った。本論文では、Veer 氏の研究内容についても紹介する。ただし、Veer 氏の研究内容については Instagram を用いての情報交換を通して得た情報であり、Veer 氏の論文を直接引用しているわけではない。

2. イオン風とは

電場によって加速された陽イオンが空気中の電気的に中性な分子（以降、中性分子と呼ぶ）に衝突し、その運動量を伝えることで発生する

空気の流れがイオン風である。

イオン風は主に次の 3 つの段階を通して発生する。

2.1 空気中の中性分子のイオン化

電極に高電圧（約 2000V 以上）をかけることで、中性分子の電子殻から電子が外れる。外れた電子は陽極に向かって移動する。一方、中性分子は電子を失ったことで陽イオンになる。

2.2 陽イオンの電場による加速

陽極と陰極の間には電場が発生している。電気力線は陽極から陰極に向かうため、2.1 で発生した陽イオンは電場により加速され、陰極へ移動する。

2.3 陽イオンと中性分子の衝突

電場により加速された陽イオンは、陰極へ移動する途中で中性分子と衝突する。衝突された中性分子は陽イオンから運動量を受け取り、同様に陰極へ移動する。この衝突によって運動量を得た中性分子の流れがイオン風である。

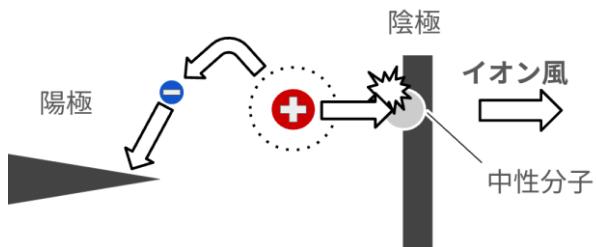


図 1 イオン風の発生原理

3. 実験準備

3.1 予備実験

イオン風が実際に発生するかを確認するため

に予備実験を行った。

1.5Vの乾電池を2つ用い、昇圧器とつないだ。昇圧器には陽極と陰極を導線でつないだ(図2)。陽極は鉄製の針を用いたトゲ電極で、陰極はアルミニウムで作成したコイル状のものだ。静電気の帶電を防ぐため、陰極と陽極を2cm離し、陰極から陽極の反対側に7cm離してティッシュをつるした(図3)。また、外部からの影響がなくするためにこの容器を透明な容器で覆った。その後、スイッチを作動させ、ティッシュはどのように動くかを観察した(図4)。

3.2 予備実験の結果

ティッシュが陰極方向に動いたことから、イオン風がこの実験装置で発生したと判断した。よって以後の実験でも同様の回路を用いることとした。この予備実験の中で、陰極の平面の陰極の面積や質量を変化させるとティッシュの傾きが大きくなり、イオン風が強く発生しているとわかったため、この2つをそれぞれ変えたときのイオン風の強さ比較することにした。また、イオン風の強さをより測定しやすくするため、陰極の形状はコイル状に限定し、そのコイルの半径または質量に対するイオン風の強さを測定した。イオン風の測定には市販の風速計を使用した。

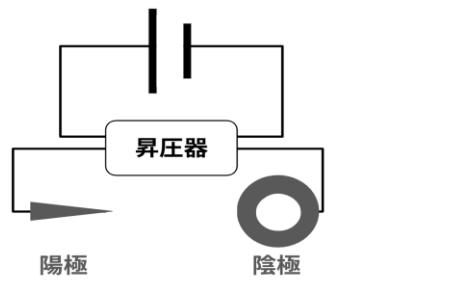


図2 回路模式図

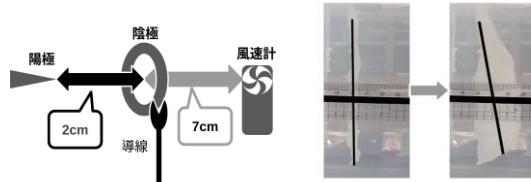


図3 装置模式図

図4 ティッシュを用いたイオン風の確認

3.3 実験方法

実験1ではコイル状の陰極の半径を変化させてイオン風の強さを計測した。実験2ではコイル状陰極の質量を変化させイオン風の強さを計測した。2つの実験では予備実験と同じ回路を組み、陰極の条件をそれぞれ変え、イオン風の

強さを計測した。陰極の半径、質量でそれぞれ5回ずつ実験を行い、それぞれ10秒間イオン風を発生させたときの風速の最大値をグラフとして出力し、イオン風の強さを比較する。それぞれの実験の間隔を1分間とし、回路を連続で作動させたことによる誤差を減らした。

4. 本実験

4.1 実験1 イオン風の強さと陰極の半径

実験1では予備実験と同じトゲ陽極、風速計、昇圧器、質量が一定かつ半径を変えた陰極を用いて実験した。陰極の質量は2.4gで統一し、実験を行った。半径は0.5cm, 1.0cm, 1.5cm, 2.0cm, 2.5cm, 3.0cm, 3.5cm, 4.0cm, 4.5cm, 5.0cmに変更した。試行回数はそれぞれ5回である。

4.2 実験2 イオン風の強さと陰極の質量

実験2では実験1(イオン風の強さとイオン局の半径)と同様に予備実験と同じ回路を用いて実験した。陰極は半径を1.25cmで統一した。陰極の質量は0.17gから1.99gまでの範囲で約0.10g間隔に変更して実験を行った。また結果が一部に偏ることを防ぐために、2.2g, 2.4g, 3.0g, 3.4gの陰極でも実験を行った。



図5 使用した陰極



図6 使用した陰極

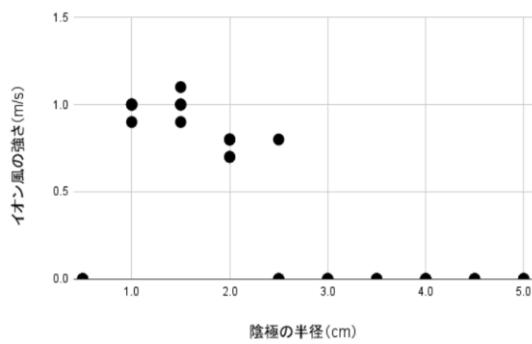
5. 結果

5.1 実験1(イオン風の強さと陰極の半径)結果

陰極の半径とイオン風の強さについて調べた実験1の結果を下のグラフ1にまとめた。縦軸がイオン風の強さ、横軸が陰極の半径を表している。

イオン風が最も強くなったのは、陰極の半径が1.5cmのときで、1.1m/sのイオン風を確認した。また、陰極の半径が0.0cmから1.0cmの間と2.5cmのときにイオン風の強さに大きな幅があることがわかった。しかし、これは風速計の性能が原因で、微弱な風を計測できないからだと考える。

グラフ1より、陰極の半径1.5cmに向かってイオン風が強くなり、陰極の半径1.5cmを超えるとイオン風が弱くなっていることがわかる。



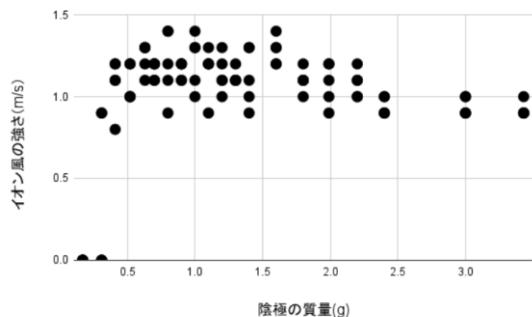
グラフ 1 陰極の半径とイオン風の強さの関係

5.2 実験 2(イオン風の強さと陰極の質量)の結果

陰極の質量とイオン風の強さについて調べた実験 2 の結果をグラフ 2 にまとめた。縦軸がイオン風の強さ、横軸が陰極の質量を表している。

イオン風が最も強くなったのは、陰極の質量が 0.80g、1.00g、1.60g のときで、1.4m/s のイオン風を確認した。また、陰極の質量が 0.31g のときにイオン風の強さに大きな幅があることがわかった。これも 5.1 と同様に風速計が原因だと考える。

グラフ 2 より、陰極の質量 1.00g に向かってイオン風が強くなり、陰極の質量 1.00g を超えると緩やかにイオン風が弱くなっていることがわかる。



グラフ 2 陰極の質量とイオン風の強さの関係

6. インドでの研究

インドの研究メンバーの Veer 氏の研究はイオンクラフトの試作機を製作し、その基本的な動作原理と特性を検証することを目的とした。

材料は以下の通りである

- ・昇圧器(20kV)
- ・タングステンワイヤー(直径:0.1mm)
- ・アルミニウム箔
- ・バルサ材

タングステンワイヤーとアルミニウム箔は10cm 間隔で配置し、3 点でバルサ材に固定し、一辺 30 cm の正三角形状にした(図 7)。昇圧器を接続し、イオン風の発生を確認した。

結果として、試作機はイオン風を発生させ、わずかに浮上または推進することを確認した。しかし、推力は小さく、消費電力も大きいため、効率改善が今後の課題である。

以下に今後の課題、及び将来的なデザイン(図 8)を提示する。

- ・軽量で丈夫なフレーム
- ・コンパクトな電源
- ・安定性の向上
- ・消費電力の低減
- ・発熱を抑える
- ・小型センサーなどの搭載



図 7 実際に制作した イオンクラフト



図 8 将来的なデザインのイオンクラフト

7. 浮遊高度の計算

イオン風を利用して物体を浮遊させる場面を設定して、基準面からの浮遊高度を計算した。また、一定の浮遊高度を得るために必要なイオン風の強さを計算した。以下を、求める値や実験の内容によって変更しない値とする。

ρ : 標準状態の空気密度 ($1.293[\text{kg}/\text{m}^3]$)

t : 浮遊時間 [sec.]

注 : 5 秒間浮遊する設定とした。

G : 重力加速度 ($[\text{m}/\text{sec.}^2]$)

以下を、求める値や実験の内容によってそれぞれ変更する値とする。

A : 準面に当たるイオン風の面積 [m^2]

注 : 浮遊した陰極の真下の基準面だけにイオン風が当たり、分散しないと考えた(図 9)。

v : イオン風の強さ [$\text{m}/\text{sec.}$]

M : 浮遊体の質量 [g]

H : 浮遊高度 [m]

このとき、計算式を式 1 のようにする。

$$\text{式 1)} \quad \frac{1}{2} \rho A v^3 t = MGH$$



図9 受風面積 A の取り方

7.1 計算1(イオン風の強さと陰極の半径)から

実験1(イオン風の強さと陰極の半径の長さ)で用いた陰極だけを浮遊させると考えた。実験1では陰極の質量を2.4gで統一しているので、浮遊体の質量Mは2.4gから変化しない。受風面積Aだけを変更して実験を行い、イオン風の強さvには実験1(イオン風の強さと陰極の半径)の測定値を用いて浮遊高度を計算する。計算式は式1を浮遊高度Hについて整理した以下の式2を用いる。

$$\text{式2)} H = \frac{\rho A v^3 t}{2 M g}$$

7.2 計算2(イオン風の強さと陰極の質量)から

実験2(イオン風の強さと陰極の質量)で用いた陰極だけを浮遊させると考えた。実験2では陰極の半径の長さを1.25cmで統一しているので、受風面積Aは $1.5625 \times 10^{-4} \text{m}^2$ から変更しない。浮遊体Mの質量だけを変更して実験を行い、イオン風の強さvには実験2(イオン風の強さと陰極の質量)の測定値を用いて浮遊高度Hを計算する。7.1と同様に、計算式は式1を浮遊高度Hについて整理した式2を用いる。

7.3 仮想の浮遊体の浮遊に必要なイオン風の強さについて

現実的な条件を設定した浮遊体が0.150mだけ浮遊する際に必要なイオン風の強さを計算する。ここでは、受風面積Aを0.0105m²浮遊体の質量Mを500gに設定した。この質量は、電源、昇圧器、陽極と陰極、それぞれをつなぐ導線の質量を含む。浮遊高度Hを0.150m、受風面積Aを0.0105m²、また浮遊体の質量Mを500gに設定しているので、それぞれ変更しない。浮遊高度Hの計算には式1をイオン風の強さについて整理した式3を用いる。また、3乗根を解くために「平方根・累乗根 - 高精度計算サイト」を使用した。

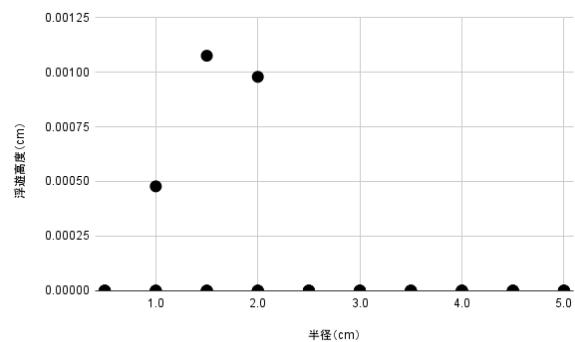
$$\text{式3)} v = \sqrt[3]{\frac{2 M G H}{\rho A t}}$$

8. 計算結果

8.1 実験1(半径について)の計算結果

イオン風の強さと陰極の半径について調べた実験1で測定したイオン風の強さとそれを用いて計算した浮遊高度Hをグラフ3にまとめた。横軸に陰極の半径rを、縦軸に浮遊高度Hを表した。

浮遊高度Hが最も高くなったのは、陰極の半径が1.5cmのときで浮遊高度Hは約0.00107cmだった。このときのイオン風の強さvは1.0m/sであった。

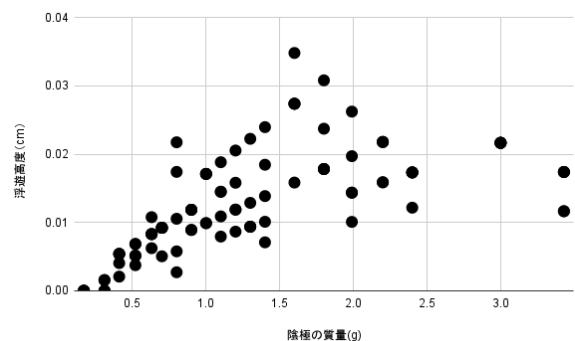


グラフ3 半径を変更したときの浮遊高度

8.2 実験2(質量について)の計算結果

陰極の質量とイオン風の強さについて調べた実験2で測定したイオン風の強さvとそれを用いて計算した浮遊高度Hをグラフ4にまとめた。横軸に陰極の質量を、縦軸に浮遊高度を表した。

浮遊高度Hが最も高くなったのは、陰極の質量Mが1.60gのときで浮遊高度Hは約0.0348cmだった。このときのイオン風の強さvは1.4m/sであった。



グラフ4 質量を変更したときの浮遊高度

8.3 仮想の浮遊体の浮遊に必要なイオン風の強さについての計算結果

現実的な条件を設定した浮遊体が浮遊するために必要なイオン風の強さを求める計算を行った。受風面積Aが0.0105cm²かつ質量Mが500gの浮遊体が浮遊高度H0.150mを浮遊時間tが5

秒間にすることを想定して計算を行った。その結果、必要なイオン風の強さ v は約 27.9m/s だった。

9. まとめ

9.1. 結論

陰極の質量と半径をそれぞれ変える実験を行った。実験から、陰極の質量 1.00g に向かってイオン風が強くなり、陰極の質量 1.00g を超えると緩やかにイオン風が弱くなっていくことと、陰極の半径 1.5cm に向かってイオン風が強くなり、陰極の半径 1.5cm を超えるとイオン風が弱くなっていくことがわかった。

本研究では目的であるイオン風が発生する際の陰極における適切な条件を特定することはできなかった。しかし、陰極の質量や半径に合わせてイオン風が 1 次関数的に強くなる、または弱くなるわけではないことから、電圧によって強いイオン風を発生させることに適した電極の質量と半径があるのではないかと予想する。高電圧を小さい電極に掛けると電極間に存在する空気中の中性分子がイオン化せずに、絶縁体破壊を起こしイオン風が発生しないためだ。

予想が正しければ、使用する電圧に合わせて調整することでイオン風の効率的な利用が可能になる。このとき、イオン風の強さに直接影響する要素は電圧の大きさであり、陰極の質量と半径は使用する電圧でのイオン風の発生を効率よく発生させるための要素であると言えるだろう。

9.2. 今後の展望

9.2.1 湿湿度の変化

今回の実験では温湿度の変化を考慮しなかった。温湿度を一定に保つことが困難であったこと、温湿度の変化がイオン風の強さに大きな影響を与えないと考えたことが理由である。しかし、江 松氏らの研究 (2) より「正放電の場合も、負放電の場合も、相対湿度を上昇させると、放電が抑制されること」と「正放電の場合も、負放電の場合も、温度の上昇により、放電が促進されること」がわかっている。また同論文より、温湿度の変化による放電の発生しやすさは無視できないものであると考えた。したがって、温湿度を記録して江 松氏らの結果と参照するなどして、温湿度の変化を考慮した実験を行うべきである。

9.2.2 仮想の浮遊体の浮遊高度の計算

7.3.3 (仮想の浮遊体の浮遊に必要なイオン

風の強さについての計算結果) では、インドの CMS が実際に作ったイオンクラフトの質量、制作予定のイオンクラフトの質量を考慮できていない。連絡不精のためである。今後、CMS に確認して計算したい。

また、実際に実験をして計算結果が正しいかは確認していない。そのため、計算結果が正しいかを確かめる実験を行う必要がある。

10. 謝辞

課題研究を進めるにあたって本校の中道先生、堀内先生をはじめとした多くの先生方にご助力いただきました。本当にありがとうございました。

また、CMS との共同研究に取り組むにあたって私達が所属していた国際共同研究アカデミーを運営してくださった先生方、一緒に研究をしてくださった CMS の Veer 氏らに御礼申し上げます。

11. 参考文献

- (1) 平方根・累乗根 - 高精度計算サイト
<https://keisan.casio.jp/exec/system/1260402326>
- (2) 江 松, 黃 敬郴, 星野 垣之 (2008), 温湿度のコロナ放電への影響及びコロナ放電の立ち上がり特性, 日本画像学会誌, 第 47 卷, 第 5 号 : 419-424 (2008)
- (3) 風力発電システム | 音声付き技術解説講座 | 公益社団法人 日本電気技術者協会
<https://www.jeea.or.jp/course/contents/03402/>