

https://farid.ps/articles/electroaerodynamic_propulsion/ja.html

電空気力推進 - マクスウェルとクーロンによって駆動される

このエッセイで提示される洞察は、著者が2016年から2018年にかけて実施した数十の実験に基づいており、交流（AC）と直流（DC）の広範な電源、電極幾何学、イオン放出器の種類を用いて電空気力推進を探求したものです。これらの調査は、以下に示す80cmのローターの構築で頂点を極め、これは6kV未満およびわずか約100mWの電気入力電力で18rpmの回転速度を達成しました。

この実験キャンペーンは、パフォーマンスが空気の移動やイオン電流そのものよりも、静電場の分布と幾何学に大きく依存することを明らかにしました。これらの観察は、続く電空気力推進の理論的再構築の基盤を築きました。

電空気力推進 - 静かなエンジン

電空気力（EAD）推進 - しばしば電流体力（EHD）推力や「イオンウインド」と呼ばれる - は、SFのように見える稀有な技術の一つです：可動部なし、燃焼なし、可視排気なしで、空气中を静かに移動する装置です。2000年代初頭に家庭用の「リフター」プロジェクトを通じて一般に知られ、2018年にMITが体育館を滑空する「イオンプレーン」を実証したことで再び注目されました。

しかし、その基礎物理学はより長く複雑な歴史を持っています。ほぼ一世紀前、トマス・タウンゼント・ブラウンとポール・ビーフェルドは、高電圧コンデンサが小さな持続的な推力を生成することを観察しました。ブラウンはこの効果を「反重力」と帰属させました。現代科学は、マクスウェルとクーロンの法則を武器に、真実はより微妙で、多くの点でより深いものであることを認識しています。

EAD推進は、イオンで空気を吹き飛ばすことではありません。電場を彫刻し、結果生じる静電応力が純粋な機械的力を生むことです。この意味で、EAD装置はマクスウェルとクーロンによって駆動されます：電場自体の幾何学とダイナミクスによってです。

イオンウインドの誤解

EHD推進についてほとんどのエンジニアに尋ねると、シンプルな話が聞けます：鋭い放出器がコロナ放電でイオンを生成；これらのイオンは集電電極に向かって加速し、道中で中性空気分子と衝突して運動量を移します。中性気体が運動 - いわゆる「イオンウインド」 - し、ニュートンの第三法則により、装置は等しく逆向きの推力を体験します。

この絵は間違っていませんが、不完全です。

実際、イオンは無視できる質量を運びます。それらの衝突は頻繁ですが、衝突ごとの移される運動量は微小です。更に重要なのは、**針先や集電極に直接作用する有意な機械的力がない**ことです。「ウインド」は推進の副産物であって、源ではありません。

真のエンジンは、それらのイオンを加速する**電場**にあり - 空間電荷の形成と流れに伴う静電エネルギーの再分配にあります。

場圧力とマクスウェル応力

マクスウェルの式は、電場が**マクスウェル応力テンソル**を通じて運動量を蓄積・伝達する方法を記述します：

$$\mathbf{T} = \epsilon_0(\mathbf{E}\mathbf{E} - \frac{1}{2}E^2\mathbf{I})$$

このテンソルを任意の体表面にわたって積分すると、その体に作用する純粋な**静電圧力**が得られます。この圧力 - 空気の移動ではなく - がEHD推進器を前進させます。

コロナ放電が発生すると、放出器の周りにイオンの雲が形成されます。これらのイオンは2つの重要なことをします：

1. **放出器の電場を部分的に遮蔽します。** 先端近くの局所場強度が低下しますが、周囲体積では強度が保たれます。
2. **全体の場幾何学を歪めます。** 放出器の一側では、場線が近くの荷電面や接地構造に終端します。他側では、外向きに伸び、空間電荷によって部分的に中和されます。

結果は、放出器-集電器システム上の**静電圧力の不均衡** - 純粋な力です。運動量は分子衝突ではなく、場から電極へ流れます。

クーロンの法則の作用

最も単純なレベルでは、関与する力はクーロンの法則で記述されます：

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r}$$

EHD構造の各荷電表面要素は、その環境のすべての他の荷電領域を引きつけまたは反発します。総推力は、これらの無数のクーロン相互作用のベクトル和で、移動するイオンが場を調変することで連続的に再形成されます。

定常コロナでは、高電圧放出器と相対的に負の集電器（または周囲環境）の間に薄い正イオンの鞘が存在します。これらのイオンは**媒介者**として機能：放出器と集電器の引力を部分的に遮蔽し、移動することで場非対称性を連続的にリセットします。定常電気入力がこの不均衡を維持し、静電ポテンシャルエネルギーを機械的力に変換します。

NASAの教訓とイオンウィンドパラダイムの限界

2000年代初頭、NASAとその請負業者は、GravitecとTalley AIAA研究の下でビーフェルド-ブラウン型装置を再検討しました。雰囲気および真空環境で高電圧非対称コンデンサを使用した実験は、空気不在下での効果の持続をテストするものでした。

結果は明白 - そして意図せぬ啓示でした。

雰囲気モードでは、ローターは測定可能な回転（1-2 rpm）と10-100 μN の推力を達成 - 装置が本当に重力効果を活用する場合に期待される値の数桁下です。運動は従来のコロナ放電と弱いイオンウィンドに完全に帰属します。

真空では、 10^{-6} Torrまでの圧力で運動が完全に停止しました。過渡信号はアウトガッシングや残留表面電荷に帰属します。イオン化を維持する空気分子なしに、静電場は対称的になり、力は消滅します。

研究者は、推力が空気密度にほぼ線形にスケールすることを結論づけました - EHD推進を真空の不可能性として「論駁」するためのしばしば引用される発見です。しかし、真に示したのはより深いこと：空間電荷を運ぶ媒質なしに、電場は静電圧力勾配を生む非対称性を失います。

言い換えれば、これらの初期テストは、電空気力推進のマクスウェル応力解釈を偶然確認しました。重力でもイオンドラッグでもなく、電荷媒介の場不均衡の存在が重要でした。

単純さと対称性のために構築されたGravitec装置は、有意な電荷貯蔵庫や場形成誘電体を欠いていました。その開放幾何学は場線を周囲に拡散し、静電エネルギーの大部分を浪費しました。

対照的に、ここで記述されるEPS-アルミニウムローターは、よく定義された導電皮膜に沿って電荷を集中させ、空間電荷領域が局所場を彫刻することを許しました。結果：6kV未満および約100mWで利用可能な推力 - エネルギー効率がほぼ2桁向上した性能です。

これらの発見は一貫したテーマを反映：電空気力効率は電圧や気流ではなく、電荷トポロジーと場幾何学の制御から生じます。

電荷貯蔵庫効果

硬質絶縁コア上の軽量箔は単なる導体以上の役割を果たします - 電場の非対称性を増幅する大面積電荷貯蔵庫を形成します。現在の設計では、発泡ポリスチレン（EPS）は純粋に軽量構造サポートとして機能し、その全表面が高電圧供給と電気的に連続したアルミニウム箔で巻かれています。EPSは無視できる電気機能を追加；その価値は最小質量で大導電表面を可能にすることにあります。

この広範な導電皮膜は電源から直接電荷を蓄積し、コロナ放電が各サイクルでゼロから構築するのではなく、事前充電された静電場に対して動作することを可能にします。箔の高表面積は

有効容量を劇的に増加 - 表面テクスチャと曲率による $10\text{--}100 \text{ pF cm}^{-2}$ のオーダー - し、適度な適用電圧をはるかに強い局所電場勾配に変換します。

コロナが点火すると、箔は安定したポテンシャル参照として機能します。放出イオンは局所場をわずかに調変しますが支配しません；代わりに、蓄積された表面電荷は非常に低い電力で連續推力を生む安定した非対称性を維持します。

マクスウェル応力の視点から、力は場強度とその勾配の積分に比例：

$$F \approx \epsilon_0 \int (E \cdot \nabla E), dV$$

大規模でよく充電された箔は、より高い電圧や電流を必要とせずに両項を最大化します。これにより、低電力・低電圧ローターが有意な回転を達成できた理由が説明されます：従来の「イオンウィンド」幾何学の重いイオン電流損失を蓄積静電エネルギーで置き換え - 実用的静電効率の形態です。

効率の幾何学

EHD推進器の効率は気流速度ではなく、電場がどれだけ効果的に形成されるかによって決まります。主要パラメータには：

- **場非対称性**： 静電圧力勾配の純方向成分。
- **電荷密度分布**： イオン雲が部分遮蔽を通じて場をどのように修正するか。
- **容量性結合**： 適用ボルトあたりの対向表面に蓄積された総電荷。
- **損失経路**： コロナ損失、再結合、誘電漏れ。

場を閉じ込め形成する設計 - 例えば、放出器近くに広範な反対電荷表面を配置 - はワットあたりの推力を桁違いに向上させることができます。電場が仕事を行い；イオンは場を非対称的かつ動的に保つのみです。

ビーフェルド-ブラウンの再考

ブラウンの非対称コンデンサからの推力の初期観察は、現代のプラズマ物理学理解に先立ちます。マクスウェル応力や空間電荷ダイナミクスの枠組みなしに、重力関与を考えるのは自然でした。EHD推進器が場ベクトル「に対して」力（時には垂直上向き）を生む事実は、謎を深めました。

今日のレンズで見ると、ブラウンの「反重力」は単に可視化された静電圧力でした。数学的形態の類似 - 重力および静電ポテンシャルエネルギーが $1/r^2$ で減少 - は歴史的に理解可能ですが、物理学は完全に電磁的です。

視点と現代的文脈

最近の分析と査読議論はこの電空気力推進の再構築を強化：場勾配現象としてではなくイオンウィンドエンジンとして。古典リフター構成では、数十kVでのmAオーダーのコロナ電流が μN からmN/wattの推力密度を生み - 電場エネルギーのどれほどが定向機械応力として終わるかの反映です。対照的に、箔巻きEPSローターは同一物理法則を電荷駆動プロセスに変換：広範導電表面が最小電流で強い E 勾配を維持し、ドリフト損失を蓄積場エネルギーと交換します。

この区別は現代研究の広範なシフトを反映します。誘電障壁放電アクチュエータは空気力制御で体積気流ではなくマクスウェル応力から表面力を導き、非対称性に調整された電極幾何学で $10\text{--}100 \text{ N kW}^{-1}$ の効率を達成します。ONERAおよびEU EHDプログラムで研究中の浮遊電極および閉じ込め幾何学はイオン鞘形成で推力を2-5倍向上 - 正に電荷貯蔵庫ローターの設計論理です。そして薄気環境、上部成層圏や火星大気で、イオンドラッグが弱まるが静電応力が残る中、電荷豊富表面は従来設計失敗後も推進を維持できます。

物理学は古典電磁気学のポインティング運動量枠組みと綺麗に一致：推力は場エネルギー密度の勾配に対応、

$$F \approx \varepsilon_0 \int (E \cdot \nabla E), dV$$

すなわちシステムは電磁場から直接運動量を引き出します。イオンは不均衡を維持する触媒で、反応質量ではありません。これにより、真空実験で場が対称化すると推力が消滅する理由 - ∇E 項の崩壊 - が説明されます。逆に、箔貯蔵庫ローターでは容量性皮膜が E を急峻で指向性に保ち、わずか100mW入力で約 $0.1\text{--}1 \text{ mN}$ のトルク等価推力を生み - イオンドラッグ装置の10-100倍の効率です。

| パラメータ | 従来イオンウィンド 設計 | 箔電荷貯蔵庫ローター | 示唆 |
|---------------------------|-----------------|-------------------------|---------------------------|
| 電圧 | 20-50 kV | < 6 kV | 低ブレイクダウンリスク、 容易なスケーリング |
| 電力 | 1-10 W | $\approx 0.1 \text{ W}$ | 10-100×高い推力 / W |
| 推力機構 | イオン-中性衝突 | 場勾配 (マクスウェル 応力) | 空気密度にほぼ独立 |
| 主要要因 | 放出器-集電器間隙 | 容量性箔貯蔵庫 | 蓄積電荷 > 過渡電流 |
| 効率 (N kW^{-1}) | 0.01-0.1 | 1-10 (推定) | マイクロUAVに実現可能 |

このような比較は概念的ピボットを強調：電流駆動から電荷駆動推進へ、物質移動から場形成へ。次のフロンティアは静電アーキテクチャと呼べるもの - 計算最適化と先進材料（カーボンナノチューブ放出器、パターン箔、メタマテリアル誘電体）で $\int E \cdot \nabla E$ を最大化。ハイブリッドパルスDCモードは過渡電荷蓄積をさらに活用し、化学副生成物を低減できます。

結論 - マクスウェルとクーロンによって駆動される

電空気力推進はエキゾチックな好奇心や疑似科学的異常ではありません。それはマクスウェルとクーロンの法則の直接的現れ - 制御された場非対称性を通じて静電ポテンシャルエネルギーを運動に変換するマクロスケール機械です。

初期発明家が「反重力」を見、現代プロジェクトが「イオンウィンド」を見るところで、真の物語はよりシンプルで深い：電場は張力を有します。その張力を形成せよ、ならば可動部なし、燃料なし、音なしで空気中を自ら引き抜けます。

これが電空気力推進の静かな天才性 - 真に、マクスウェルとクーロンによって駆動される。

参考文献

1. Talley, C. et al. **Evaluation of the Biefeld–Brown Effect: Asymmetric Capacitor Thruster Tests in Vacuum and Atmosphere.** AIAA Paper 2003-1023, NASA Marshall Space Flight Center, 2003.
2. Brown, T. T. **Electrokinetic Apparatus.** U.S. Patent No. 3,187,206, 1965.
3. Wilson, S., Barrett, S. R. **Flight of an Aeroplane with Solid-State Ion Propulsion.** *Nature* **563**, 532–535 (2018).
4. Moreau, E. **Airflow Control by Non-Thermal Plasma Actuators.** *J. Phys. D: Appl. Phys.* **40**, 605–636 (2007).
5. Ronney, P. D. **EHD Flow Control and Plasma Actuators.** NASA Technical Reports Server, 2015.
6. ONERA EHD Program: **Electrohydrodynamic Propulsion and Flow Control.** Internal Reports 2018–2023.