

電界共役流体に発生する衝突噴流とその流動モデル

1. はじめに

電界共役流体 (Electro-conjugate Fluid, ECF) は、誘電性液体の一種であり、直流高電圧を印加すると活発な流動を発生する機能性流体である。極微小な電極対を液中に挿入するだけで液圧源として利用できるため、マイクロアクチュエータなどの駆動源としての利用が期待されている。たとえば、これまでに ECF マイクロモータや ECF フレキシブルハンド、液体レートジャイロなどに応用され、優れた特性を示している。

本稿では、ECF の流動現象に着目し、流動の可視化に基づいた流動モデルの構築について解説する。

2. 衝突噴流現象

正負両方の電極が鋭利である対向棒電極に発生する ECF の流動を可視化した結果を図 1 に示す。ここで、電極の直径は 0.3mm、電極間距離は 2mm である。この結果より、1332V を印加した際は負電極から正電極方向への流動が発生するが、2664V を印加した際は正負両電極から流動が発生し、電極間で流れが衝突する衝突噴流が観測された。この衝突噴流は、印加電圧がおよそ 2kV 以上になると観測された。次項において、このような流動が発生する要因を考察するとともに、流動モデルを構築する。

3. 流動モデル

本研究において、ECF の流動は、鋭利な電極より電荷が注入され、その電荷がクーロン力により移動するのに伴い発生すると仮定した。つまり、ECF の流動の運動方程式は、

$$\rho \frac{DV}{Dt} = \rho f - \nabla p + \mu \nabla^2 V + qE \quad (1)$$

とあらわせる。ここで、 ρ は ECF の密度、 V は流速、 f は体積力、 p は圧力、 μ は粘性係数、 q は電荷密度、 E は電界である。

また、電荷の注入にしきい値電圧が存在し、このしきい値電圧が正負電極により異なることで、印加電圧により異なる特性の流動が生じると仮定した。つまり、電極先端から注入される電荷量は、

$$q^- = k^- (\phi - \phi_0^-) \quad (2)$$

$$q^+ = k^+ (\phi - \phi_0^+) \quad (3)$$

とあらわせる。ここで、 q^- 、 q^+ は注入される負および正の電荷密度、 ϕ は印加電圧、 ϕ_0^- 、 ϕ_0^+ は、電荷の注入に必要なしきい値電圧、 k^- 、 k^+ は、比

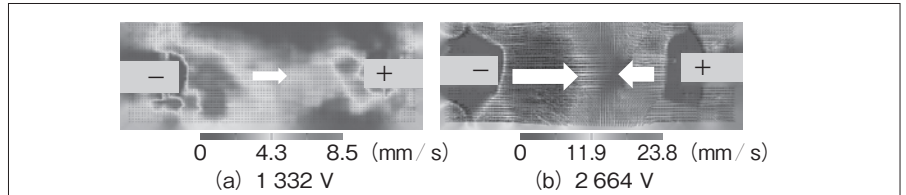


図 1 対向棒電極における可視化結果

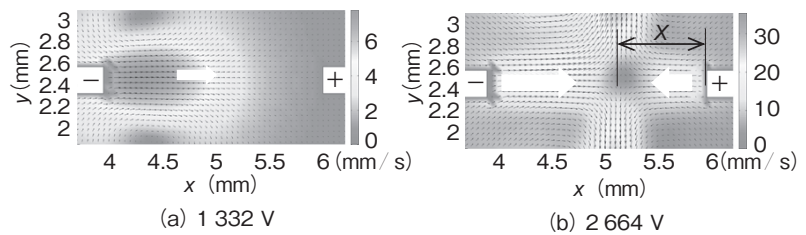


図 2 対向棒電極における数値解析結果

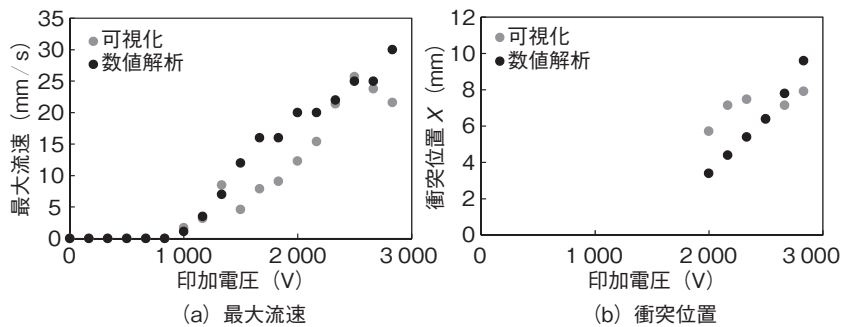


図 3 可視化と数値解析の比較

例定数である。

さらに、注入された電荷は、電界 E および流速 V の影響を受けて ECF 液中を移動すると仮定した。つまり、電流密度 j は、

$$j = q (\mu_i E + V) \quad (4)$$

と定義した。

以上に述べた ECF の流動モデルを用いて、可視化と同じ対向棒電極に関して印加電圧が 1332V および 2664V である際の流速分布を算出した。ただし簡単のため、数値解析は二次元で行った。この結果を図 2 に示す。図 1 の可視化結果と比較すると、それぞれの印加電圧において流速分布がよく一致していることがわかる。また、さまざまな印加電圧において流速分布内の最大流速および図 2 に示すような衝突噴流の衝突位置 X を測定した。その結果を図 3 に示す。これより、最大流速および衝突位置ともに可視化と数値解析の結果はよく一致していることがわかる。以上の結果より、本研究で提案した ECF の流動モデルは、実

現象とよく一致することを示した。

4. おわりに

以上、ECF の流動現象について概説したが、本研究は筆者が所属する慶應義塾大学大学院応用計算力学専修 (<http://www.apcom.st.keio.ac.jp/ja/>) に所属する教員の連携なくしては実施できなかった。もともと、筆者らは機械力学を基盤として ECF アクチュエータの研究に従事してきたため、流動の可視化や電磁気一流体の連成解析などのバックグラウンドを持ち合わせていなかった。応用計算力学専修は、流体の実験的解析や数値計算、分子動力学などの専門家が集まった緩やかながらも互いに補完し合う戦略的な連携組織であり、この連携が筆者らの研究シーズが短期間で成果を挙げられた要因のひとつである。今後も、専修組織を活用した多くのプロジェクトが行われることを期待したい。

(原稿受付 2011 年 12 月 22 日)

[竹村研治郎, 森 健人 慶應義塾大学]