

静電駆動マイクロステップモータの
電界解析による駆動力の算出

東京大学 生産技術研究所
3部 藤田研究室

飯塚 哲彦

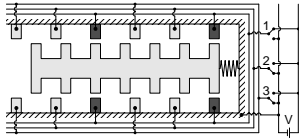
はじめに

ステップモータを小型化、かつ静電駆動にして、デバイスを作製、駆動実験を行っている。

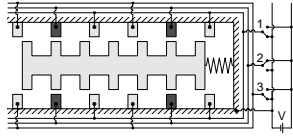
本発表では、駆動原理の概要を述べ、デバイスを単純化したモデルを作成し、静電駆動力を求めるため、MemsONEで電界解析を行った内容について報告する。

将来的な目的としては、得られた静電駆動力から、可動部の過渡的振動などダイナミクスをシミュレートすることが挙げられる。

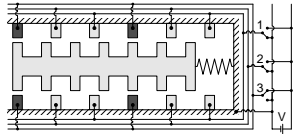
3相静電駆動ステップモータ駆動原理



1がオン、すなわち定電圧が印加される。内側の可動部の電極はGNDとなっており、これと外周のステータ電極が空隙を介して、コンデンサを形成し、静電引力が作用する。

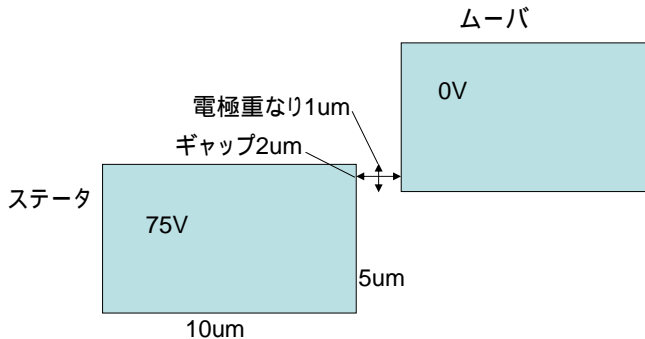


2がオン、内側のばね構造で支持された可動部が左へ移動する。図で上下同時に電圧を印加しているため、上下方向の静電引力が平衡しており、電極対が吸着しないようにしている。またばね支持構造を工夫することにより、横方向に動きやすく、上下方向に動きにくくすることもできる。



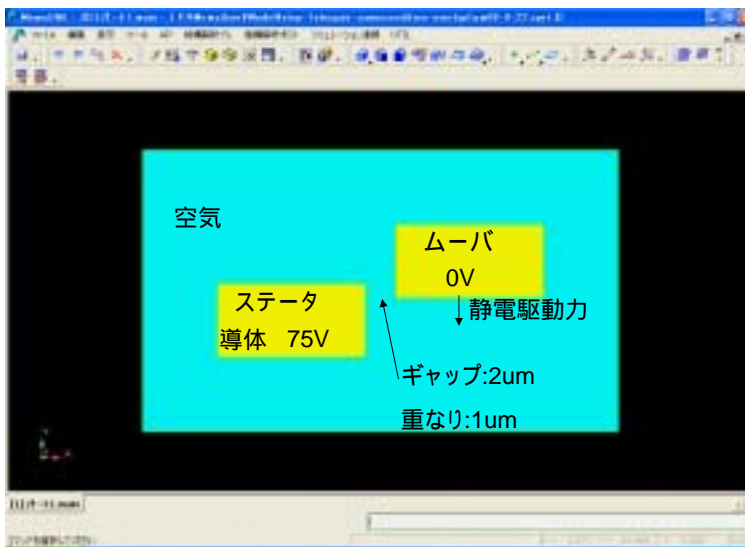
3がオン、さらに左へ移動する。ばねの復元力が静電駆動力より大きくなったときが変位の限界となる。電圧印加の順番を逆にすれば、右へ移動させることもできる。

静電吸引力が働く電極の動作



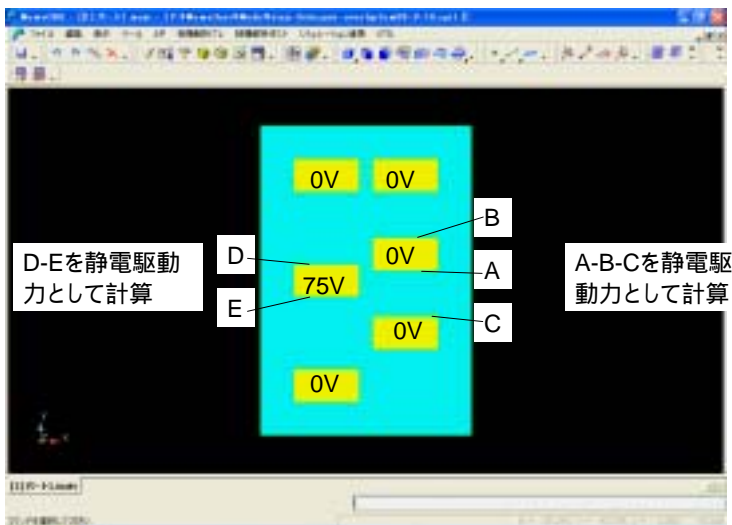
隣の電極がアラインしているときは、図のように、ギャップ距離2umのところ
が1um重なっている。ステータに電圧75V、ムーバに0Vが印加されると、静
電吸引力が働く。ムーバは、工夫により、下方向へ可動となっているので、
ステータとムーバの電極がアラインするまで、移動する。この際の、それぞ
れの電極の重なり、1, 2, 3, 4, 5umの配置モデルをMemsONEで作成し、
電界解析を行って、静電駆動力を求めた。

1 電極対モデル



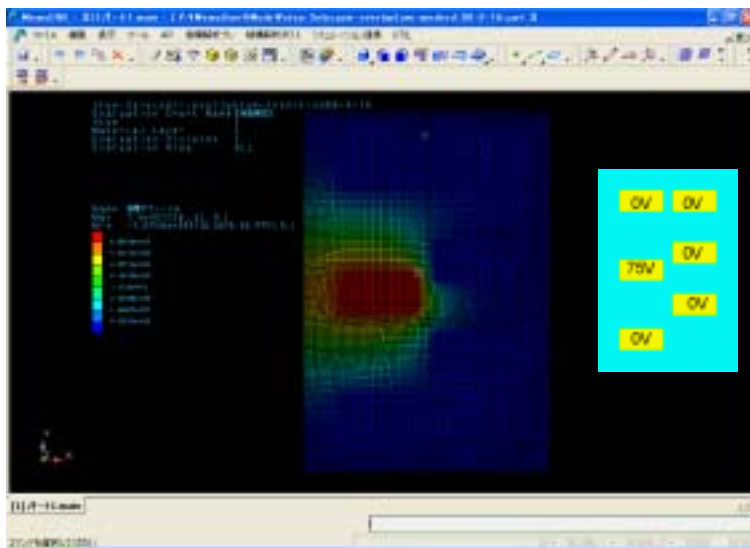
ムーバやステータの上辺、下辺それぞれのY方向成分の静電力を合計し、下辺ー上辺など差をとって、静電駆動力を求めた。シェルメッシュ:0.4。電極重なり1~5umでムーバの位置を変えたモデルをそれぞれ作成した。

3 電極対モデル

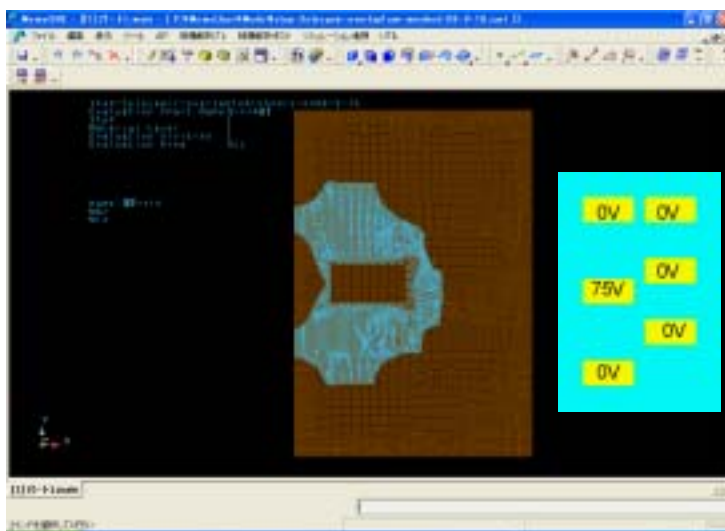


寸法、メッシュサイズ、ギャップ、重なりは、1電極モデルと同じ。75V印加したステータの右下に近隣のGNDとなっている導体の有無がモデルの相違している主な点である。

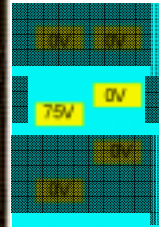
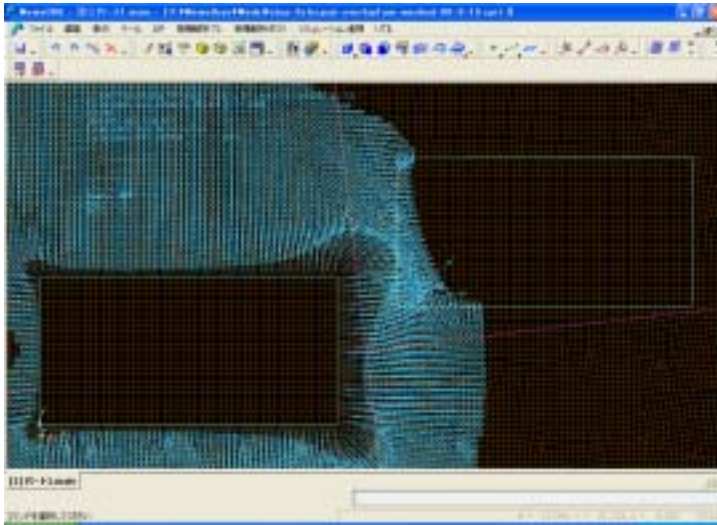
静電ポテンシャル、ノルム @ 3電極対モデル



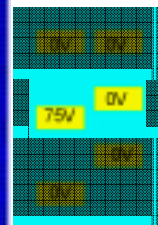
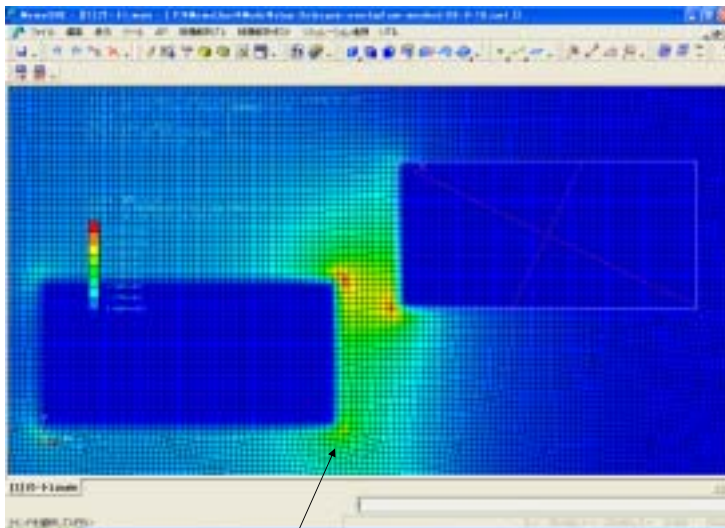
電界、ベクトル @ 3電極対モデル



電界、ベクトル、拡大図 @ 3電極対モデル

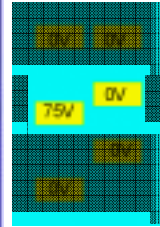
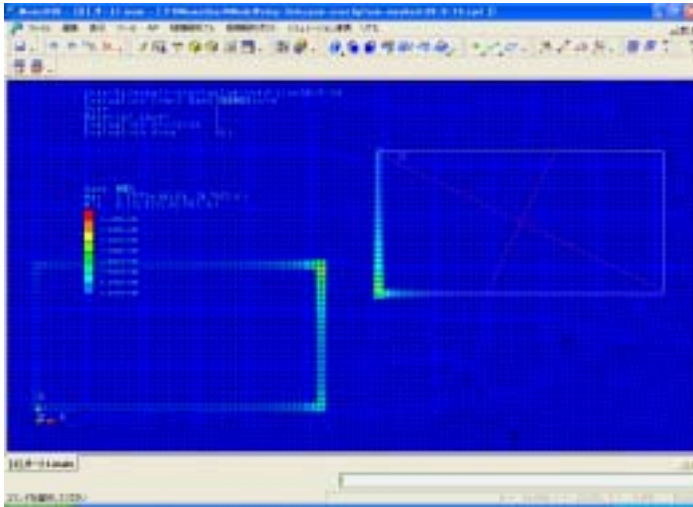


電界、ノルム、拡大図 @ 3電極対モデル



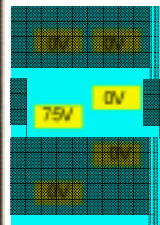
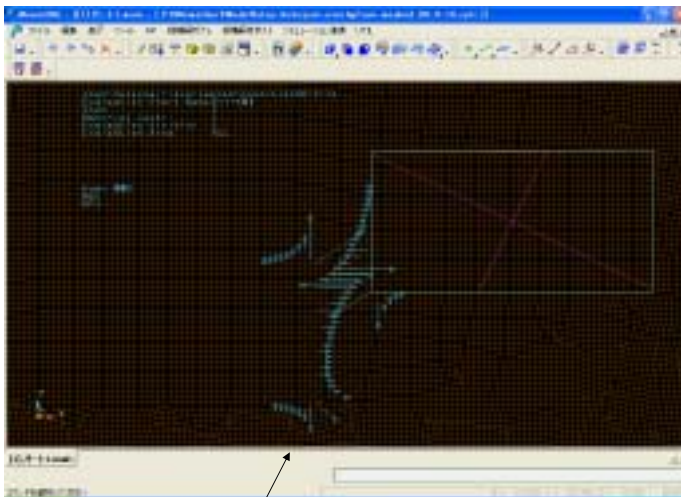
右下の導体の影響が見られる。

静電力、ノルム、拡大図 @ 3電極対モデル



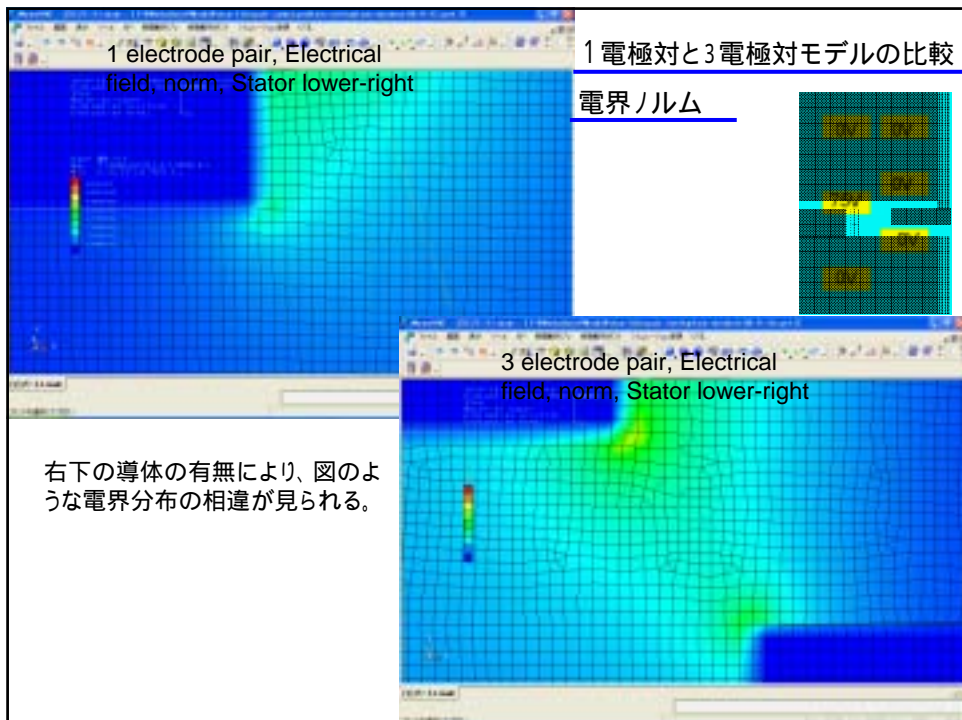
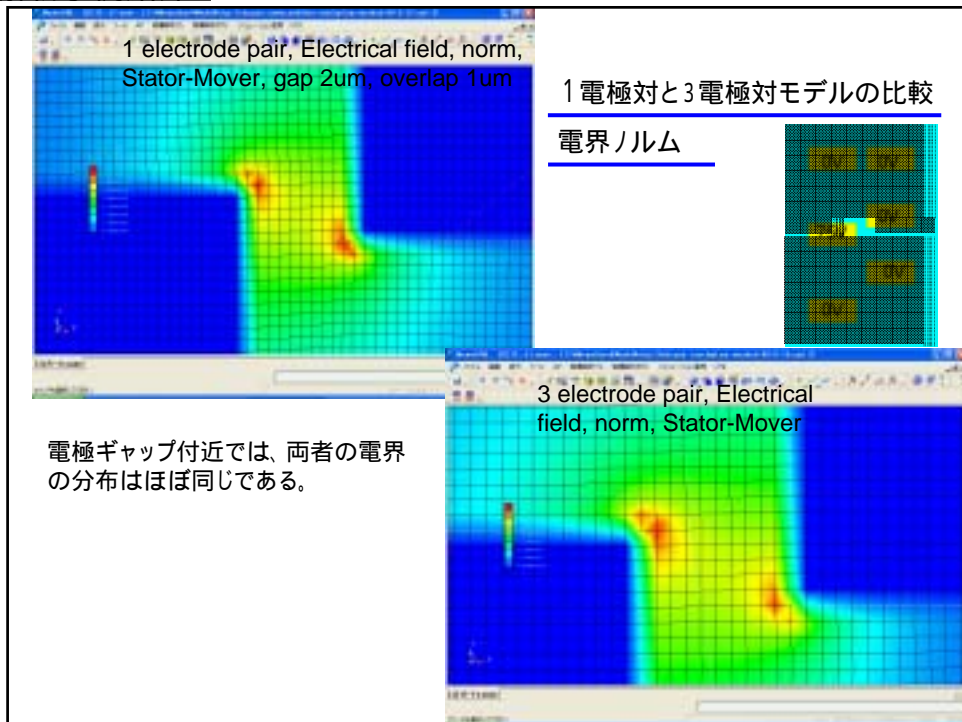
$F=qE$ で計算され、導体表面のみ静電力が生じている。

静電力、ベクトル、拡大図 @ 3電極対モデル



右下の導体の影響が見られる。

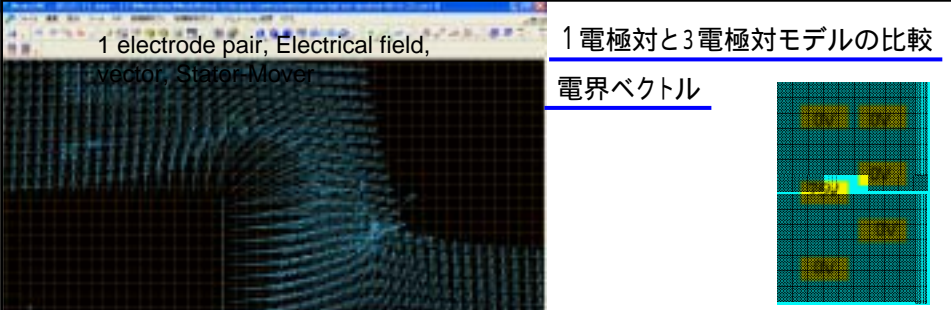
解析事例紹介2



解析事例紹介 2

1 electrode pair, Electrical field, vector, Stator-Mover

1 電極対と3電極対モデルの比較
電界ベクトル



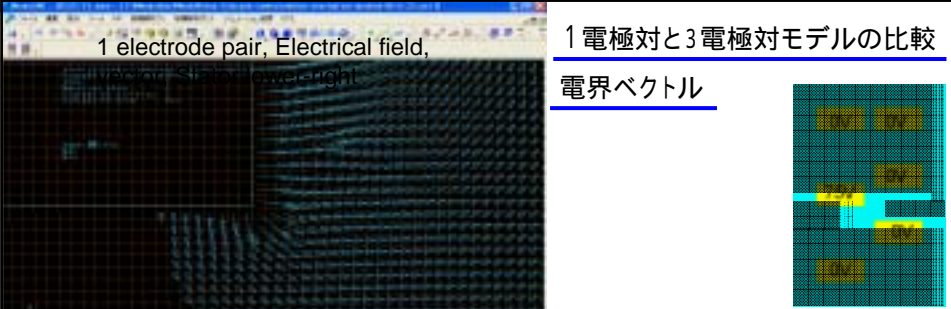
3 electrode pair, Electrical field, vector, Stator-Mover

1 電極対と3電極対モデルで、電界ベクトルの長さが違うが、値は同じである。自動スケールの倍率が違うためである。

The figure shows two side-by-side plots of electric field vectors. The left plot is for a 1-electrode pair model, showing a smooth, symmetric field distribution. The right plot is for a 3-electrode pair model, showing a more complex field distribution with a distinct region of higher field intensity on the right side. A small inset image shows a zoomed-in view of the field vectors, highlighting the differences in their lengths and directions between the two models.

1 electrode pair, Electrical field, vector, Stator-Mover-right

1 電極対と3電極対モデルの比較
電界ベクトル



3 electrode pair, Electrical field, vector, Stator-Mover-right

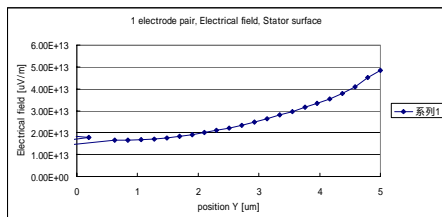
電界ベクトルの長さは、両者異なった自動スケールの倍率なので、強さは比較できない。3電極対モデルは右下導体の影響が見られる。

The figure shows two side-by-side plots of electric field vectors. The left plot is for a 1-electrode pair model, showing a smooth, symmetric field distribution. The right plot is for a 3-electrode pair model, showing a more complex field distribution with a distinct region of higher field intensity on the right side. A small inset image shows a zoomed-in view of the field vectors, highlighting the differences in their lengths and directions between the two models.

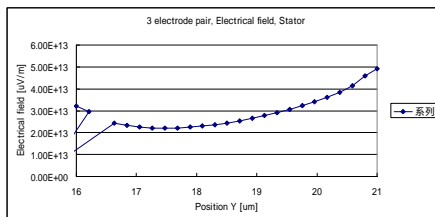
解析事例紹介 2

ステータの対向電極の辺近傍の電界(リスト出力)

1電極対モデル



3電極対モデル



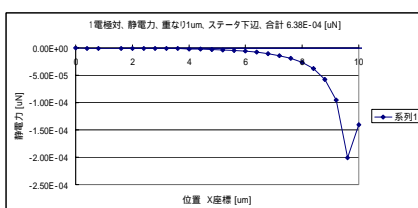
右下に導体がない。

右下に導体があるので、電界が少し高くなっている。

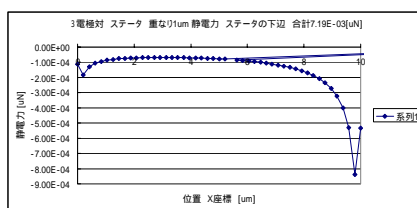
ステータとムーバが対向し、静電ギャップを形成しているところ。

ステータの下辺の静電力(リスト出力)

1電極対モデル



3電極対モデル



右下にGND導体がある3電極対モデルの方が、静電力の合計が

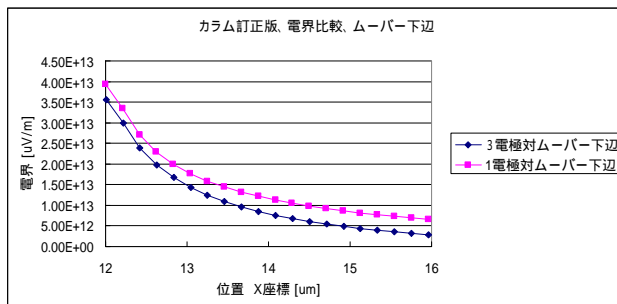
7.19E-03 [uN] @ 3電極対モデル、下向き

6.38E-04 [uN] @ 1電極対モデル、下向き

と大きくなっている。

ムーバの下辺の電界

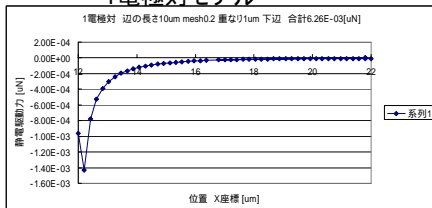
1電極対モデルの電界 > 3電極対モデルの電界



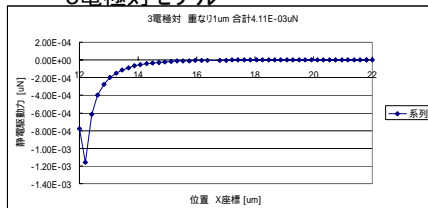
3電極対モデルは、右下にGND導体があるので、ステータからの電束が右下へ流入している分、1電極モデルより、小さいと考えられる。

ムーバ下辺の静電力

1電極対モデル



3電極対モデル



静電力の辺にそった合計の値

6.26E-03 [uN] @ 1電極対モデル

4.11E-03 [uN] @ 3電極対モデル

$F=q E$ より、静電力を求めており、前のスライドの電界の大小関係と適合する結果となった。

解析事例紹介 2

静電駆動力の計算について

重なり 1umの場合

3電極対モデル

$$F_A - F_B - F_C = 2.76 \text{ E } -03 \text{ [uN]}$$

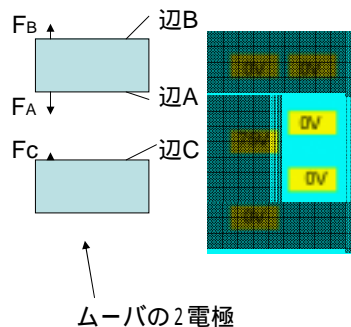
$$(F_A: 4.11\text{E-}03, F_B: 0.22\text{E-}03, F_C: 1.13\text{E-}03)$$

1電極対モデル

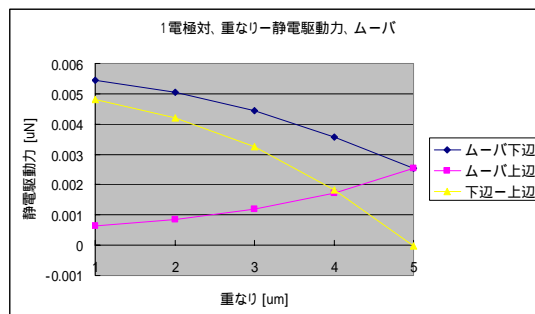
$$F_A - F_B = 5.52 \text{ E } -03 \text{ [uN]}$$

$$(F_A: 6.26\text{E-}03, F_B: 0.74\text{E-}03)$$

3電極対モデルで、 F_C の値がそれほど小さくないので、その分、合計値が小さくなっている。

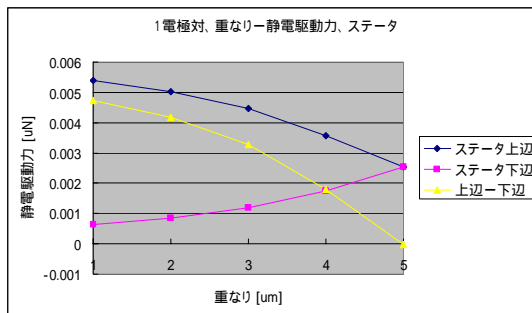


重なり—静電駆動力、1電極対モデル、ムーバ側



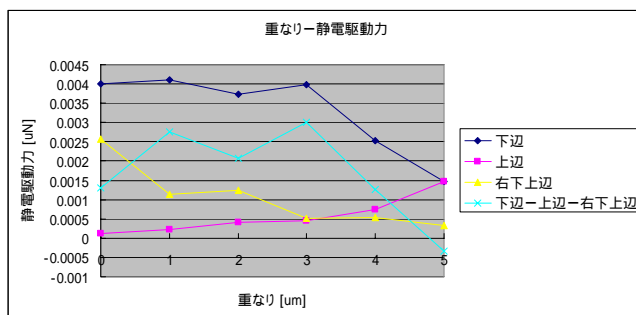
周囲に導体のないシンプルな1電極対モデルでは、静電駆動力が電極重なりに応じて、単調減少となり、重なり5um(電極対がアライン)で、静電駆動力がゼロとなっており、良好な結果となった。

重なりー静電駆動力、1電極対モデル、ステータ側



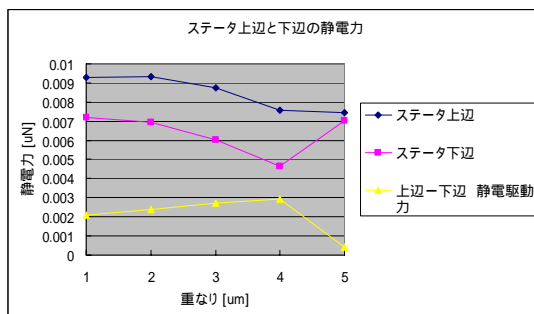
ステータ側の静電力は、180度回転対称なため、前のスライドのムーバの静電力の結果とほぼ同一となり、良好な結果となった。

重なりー静電駆動力、3電極対モデル、ムーバ側



3つ前のスライドでのFA-FB-FCを計算した。水色の線の静電駆動力の合計値が単調減少の予想に合致せず、上下している。重なり5umで、電極が完全にアラインしているとき、静電駆動力が完全にゼロになっていない。これは、右上導体の下辺の静電力を考慮すれば、上下の導体の位置が線対称なため、キャンセルし、ゼロになるであろうと思われる。

重なりー静電駆動力、3電極対モデル、ステータ側



作用反作用の原理より、ステータ側で、静電力の上辺ー下辺を計算しても、静電駆動力が得られると考えられる。しかし、重なり1~4umで、静電駆動力がわずかに増加しているのが、予想に反し、理解できない。メッシュサイズによっても、合計が若干変化するので、誤差と見られる。

まとめ

- ・ 1電極対モデルで、重なりー静電駆動力の良好なグラフが得られた。
- ・ 3電極対モデルでは、上下したり、右上がりの予想に合致しないグラフとなった。また、電極がアラインしているとき、静電駆動力が完全にゼロになっていない。これは、絶対値の小さな値とびが合計に含まれていることや、周囲に複数の電極がある(特に近隣の右下導体)、やや複雑なモデルのため、誤差が増しているかと推測される。
- ・ 重なり1umのときの静電駆動力を比較すると、
0.0045 uN @ 1電極対モデル
0.002 uN @ 3電極対モデル
と値の相違が見られる。

グラフのきれいさから、1電極対モデルを採用したい。しかし、3電極対モデルは実際の電極配置により近く、近隣の電極の存在を考慮している。よって、3電極対モデルについても、今後さらに計算を進めて、検討していく。