

JIEDI コードの高速化と遺伝アルゴリズムの適用

中村祐輔(九大・総理工), 中野正勝(産技高専), 山本直嗣(九大・総理工), 中島秀紀(九大・総理工)

1. 序論

イオンエンジンの寿命の制限要因の一つがグリッドの損耗であることが知られている⁽¹⁾. グリッドの損耗に影響するパラメータは, グリッドの形状や印加電圧であるが, これらのパラメータに関する明確な設計指針はない. そのため, これまで得られた経験や, 実験を行い, 試行錯誤的に決定されている⁽²⁾. そこで本研究では, 長寿命かつ一定量の推力が確保されたグリッドの設計を行うことのできるグリッド最適化ツールの開発を目的とする.

グリッドの寿命を実際に評価する場合, 数万時間を超える実時間寿命評価試験が必要となる. この問題を解決するために, 現在, 宇宙航空開発研究開発機構(JAXA)により, 寿命評価試験を数値解析によって支援するイオン加速グリッド耐久認定用数値解析 JIEDI(JAXA Ion Engine Development Initiative)コードの開発が行われている⁽³⁾. 本研究では, このコードを用いたグリッド最適化ツールの開発を行う. しかしながら, 最適化においては, 求解速度の向上が必要不可欠である⁽⁴⁾.

最適化のツールとして, 本研究では, 利用のしやすさや任意の最適化ができるという観点から遺伝アルゴリズムを用いた.

2. 求解速度の向上

2.1 計算体系

求解速度の向上に関しては, 本研究室で開発が行われている小型イオンエンジンに対して JIEDI コードを適用した. 本研究室では, 2 cm 級のマイクロ波放電式のイオンエンジンの開発が行われている. 以下にグリッドのパラメータと計算条件を示す.

表 1 グリッドパラメータ

	スクリーン	アクセル
開口率[%]	58.0	19.7
孔の直径[mm]	1.2	0.7
厚さ[mm]	0.3	
孔の間隔[mm]	1.5	
材質	CC	
グリッド間隔[mm]	0.2	
孔の数	91	

表 2 計算条件

推進剤	Xe
スクリーングリッド印加電圧[V]	1000
アクセルグリッド印加電圧[V]	-150
一孔当たりの電流[A]	1.319×10^{-4}
NP/H [$A/V^{3/2}$]	9.393×10^{-10}
上流領域長さ[mm]	1.2
下流領域長さ[mm]	3.27

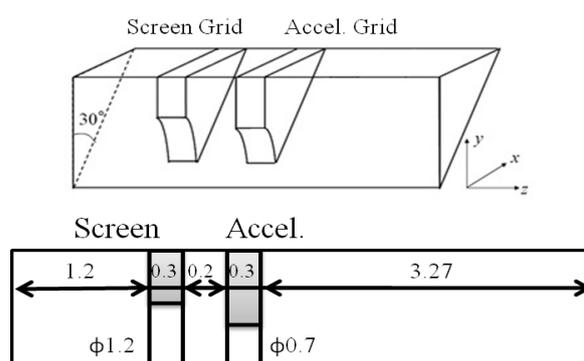


図 1 計算モデル

2.2 LU 分解の改善

JIEDI ツールの求解速度の向上のために, どの計算にどれくらいの時間を費やしているのか調査した. 図 2(a)に示すとおり, JIEDI コードにおいて計

算時間の 80% を占めている処理は電位計算を行うために用いられている LU 分解である。 JIEDI コードでは、ビーム軌道と電位分布が自己無傾着に決定されるまで電位計算とイオンビームの軌道計算を繰り返し行っている。この繰り返しの中で、従来の JIEDI コードでは、電位計算を行うたびに LU 分解を行っている。イオンビームの軌道計算により、イオン密度が更新されるため、(1)式に示すポアソン方程式の右辺項が毎回更新されるが、LU 分解の対象となる左辺項に関しては、グリッドの形状変化がない限り変化しない。そのため、繰り返し LU 分解を行うことは無駄な処理であり、LU 分解を行う回数を削減することで、求解速度の向上ができるのではないかと考えた。

そこで、この LU 分解の処理を初回のループのみ行い、LU 分解した行列を保存することで、それ以降のループでは保存した行列を読み込むことにより LU 分解の回数を削減することにした。変更前・変更後のコードで初期状態まで計算を行い、計算時間の比較を行った。結果を図 2(b)および表 3 に示す。LU 分解の改善により、計算全体に LU 分解の占める割合を 10% 程度に削減することができた。計算時間については、変更前の 1/10 程度まで削減することができた。この結果は、GA に JIEDI コードを組み込んで用いるのに十分な求解速度の向上がなされたと考えられる。この JIEDI コードを用いて、GA によるグリッド最適化を行う。

$$\nabla^2 \phi = -\frac{\rho_i - \rho_e}{\epsilon} \quad (1)$$

表 3 計算時間の比較

	変更前	変更後
計算時間[hours]	22.4	1.64

3.グリッドの最適化

3.1 遺伝アルゴリズム

遺伝アルゴリズム(GA : Genetic Algorithms)とは、生物の進化の原理に着想を得たアルゴリズムである⁽⁵⁾。GA のフローチャートを図 3 に示す。

GA による解探索は、個体と呼ばれる解の集合である母集団に対して、選択・交叉・突然変異と呼ばれる遺伝的操作を繰り返し適用することによって行われる。GA の特徴として、

- 1) 適応関数の値のみを用いる直接探索法である
- 2) 一点探索ではなく、多点探索である
- 3) 確率的オペレータを用いる探索である

という点が挙げられる⁽⁶⁾。このような特徴を持ち合わせているため、適応度を決める情報だけが必要とされ、定式化が困難な問題や性能が明確ではないものにも有効であるという利点をもつ。一方、多点探索であることによる計算負荷増大や確率に多く依存しているため、場合によっては時間をかけても良質な解が得られない場合があるという欠点をもつ。

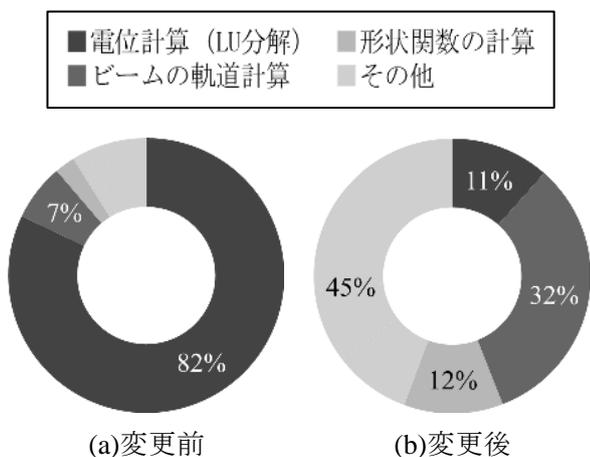


図 2 計算時間の比較

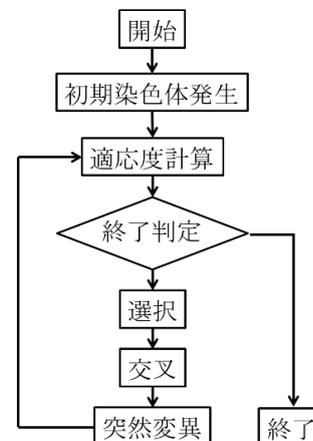


図 3 遺伝アルゴリズムフローチャート

3.2 遺伝アルゴリズムの設定

本研究で用いた遺伝アルゴリズムの設定を表 4 に示す.

表 4 GA 設定パラメータ

集団サイズ	8
遺伝子数	6 ($t_s, d_s, l_g, t_a, d_a, V_a$)
エンコード	実数
エリート保存数	1
適応関数	$fitness = \frac{f}{I_{adp}}$
選択手法	エリート選択 ルーレット選択
交叉率	【最大】75% 【最小】50%
突然変異率	【最大】40% 【最小】25%
計算終了条件	100 世代以内に 90%の遺伝子がエリートと一致

3.2.1 初期染色体の発生

集団サイズに関しては、計算の効率化の観点から決定した. 本研究においては、GA と JIEDI コードを組み合わせて用いるために MPI による並列化を行い、この計算を九州大学情報基盤研究開発センターにある高性能アプリケーションサーバ SR16000, “hakozaki” と称されるモデルで計算を行った. この利用させていただいた計算機の形態で、最大限効率的に並列計算を行うことができる条件が 8 並列であったため、本研究においては集団サイズを 8 と設定した. 本来ならば、予備実験等により慎重に設定しなければならないが、本研究においては、効率を重視した.

遺伝子数は 6 個とし、スクリーングリッド厚さ t_s 、スクリーングリッド孔径 d_s 、グリッド間距離 l_g 、アクセルグリッド厚さ t_a 、アクセルグリッド孔径 d_a 、アクセルグリッド印加電圧 V_a の 6 つのパラメータを GA によって最適化を行った. 各遺伝子の変化幅を表 5 に示す. この変化幅は、本研究室で開発が行われている小型イオンエンジンの値の近傍の範囲でかつ、JIEDI コードで計算が確実に行うことのできる範囲に設定した.

表 5 遺伝子の変化幅

変化幅
$0.20 < t_s[\text{mm}] < 1.0$
$0.80 < d_s[\text{mm}] < 1.6$
$0.20 < l_g[\text{mm}] < 1.0$
$0.20 < t_a[\text{mm}] < 1.0$
$0.60 < d_a[\text{mm}] < 1.2$
$-200 < V_a[\text{V}] < -100$

3.2.2 適応度計算

本研究では、JIEDI コードで得られた結果を用いて適応度の評価を行った.

適応度関数の与え方は、さまざまな方法が考えられるが、長寿命かつ一定量の推力が確保されたグリッドを設計するために、BOL 時のアクセルグリッドのスパッタ原子数 I_{adp} と、以下の式で導出される推力係数 f を用いて、適応度 $fitness$ を以下のように設定した.

$$fitness = \frac{f}{I_{adp}} \quad (2)$$

$$f = \frac{\sum J_i v_{i,z}}{\sum J_i v_i} \quad (3)$$

ここで、 J_i がイオンビーム電流、 v_i がイオンの速度を示す. (2)式より、推力係数を最大で、アクセルグリッドのスパッタ原子数が最少のもの、つまり推力があり、電子逆流の要因となるアクセルグリッドの損耗が最も少ないものが優秀な個体となるように設定した.

3.2.3 選択

本研究では、エリート選択とルーレット選択の 2 つの選択手法を組み合わせて用いた.

エリート選択とは、適応度が最も高い個体を一定数分だけ次世代に残す手法である. このエリート選択された個体は、交叉・突然変異の対象とせず、無条件で次世代に引き継がれる. 本計算においては、集団サイズが小さいため、エリート保存数を 1 と設定している.

ルーレット選択とは、適応度を基にルーレット盤における各個体の領域を決定し、そのルーレット盤を利用してランダムに個体を選択する手法である。この手法の特徴として、適合度の低い個体も選択される可能性も持つが、適合度の低いものほど選択されにくいという特徴を持つ。

本研究では、より良いものを次世代に残すことを最優先として、この2つの選択手法を用いた。

3.2.4 交叉

交叉は選択されたすべての個体に対し行うのではなく、交叉率によって定められた確率で適用される。この交叉率は、図4に示すように選択された個体のうち優秀な個体の適応度の値によって異なる。適応度の平均値と比較し、平均値以下であれば交叉率は最大となり、平均値以上であれば交叉率は線形に減少していき、適応度が最大で交叉率が最小になる。本研究においては、交叉の最大確率を75%、最小確率を50%と設定した。

交叉手法に関しては、以下の式を用いて行った。

$$v_c = v_{p1}a + v_{p2}(a - 1) \quad (4)$$

$$a = r + d(2r - 1) \quad (5)$$

ここで、 v_c は次世代の個体、 $v_{p1} \cdot v_{p2}$ は現世代の選択された個体、 a は(5)式で定義される $-d \sim 1+d$ の乱数、 r が $0 \sim 1$ の乱数であり、 d は次世代の染色体の発生幅を決定している。本計算では $d=0.25$ として交叉を行った⁽⁷⁾。

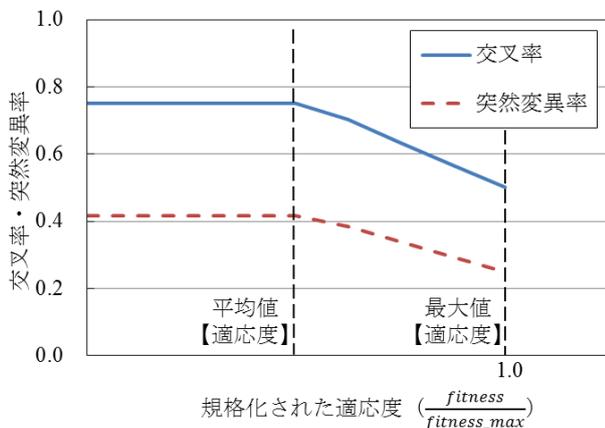


図4 交叉率・突然変異率の変化

3.2.5 突然変異

突然変異も交叉同様にすべての個体に対して行われるのではなく、図4に示す突然変異率によって定められた確率で適用される。本研究における突然変異の最大確率を40%程度、最小確率を25%に設定した。

突然変異は以下の式を用いて行った。

$$Value^{Mutated} = Value + s \cdot r \quad (6)$$

ここで、 $Value^{Mutated}$ は突然変異後の値、 $Value$ は突然変異前の値、 s はランダムに-1か1のどちらかの値をとり、 r が変異幅であり、 $0.001 \sim 0.5$ の乱数である⁽⁷⁾。

3.2.6 終了条件

本研究における計算終了条件を以下のように設定した。

- 1)100 世代以内に 90%の遺伝子がエリートの染色体と一致した場合。
- 2)エリートの染色体との一致の条件として、エリートの染色体との差が $\pm 0.1[\text{mm}]$ もしくは、 $\pm 10[\text{V}]$ 以内ならば同一と判定。

3.3 計算結果

前述した条件のもとで計算を行った結果を示す。本計算では、発生させた初期値に近いこともあり7世代で収束した。得られた結果と当研究室で開発が行われているグリッドのパラメータを表6に示す。表6より、GAによって決定されたグリッドパラメータは、当研究室で開発されているものとほとんど同じになった。しかし、アクセルグリッドの厚さは減少し、より大きな負の電圧が印加されるという違いが見られた。これらの違いがグリッドの寿命にどのような影響を及ぼしているのか確認するために、それぞれのパラメータで電子逆流が生じるまで計算を行った。それぞれのパラメータで電子逆流するまでの時間は、当研究室のグリッドで38000時間、GAによるグリッドで18000時間となった。

表6 グリッドパラメータの比較

	GA Model	Laboratory Model
t_s [mm]	0.30	0.30
d_s [mm]	1.20	1.20
l_g [mm]	0.20	0.20
t_a [mm]	0.20	0.30
d_a [mm]	0.70	0.70
V_a [V]	-170	-150

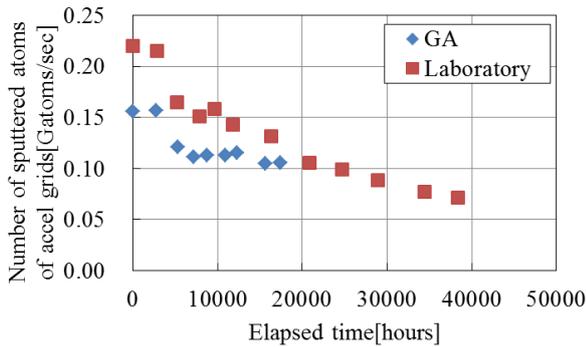


図5 電子逆流までのアクセラグリッドのスパッタ原子数の変化

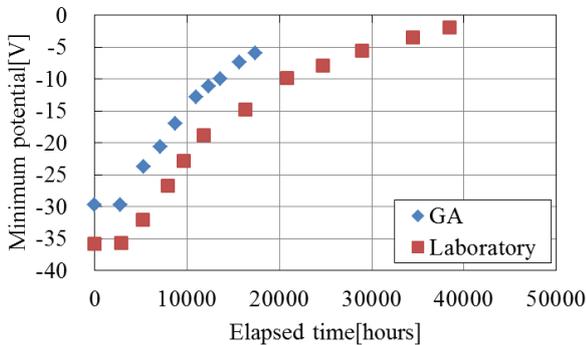


図6 電子逆流までの軸上最小電位の変化

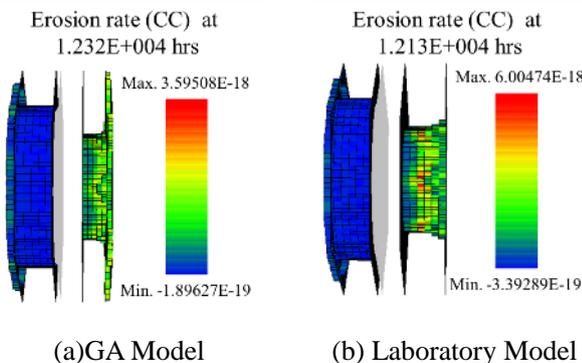


図7 グリッドの損耗状況の比較

図5に電子逆流までのアクセラグリッドのスパッタ原子数変化，図6に電子逆流までの軸上の最小電位の変化を示す．図5より，GAによるモデルのスパッタ原子数は，当研究室のものに比べ小さいため，適応度はGAによるモデルのほうが高いことがわかる．しかしながら図6より，動作開始時の軸上の電位に注目すると，アクセラグリッドの厚さが薄くなっている分，中心での電位の谷は浅くなっている．また，GAによるモデルは，スパッタ原子数が少ないにも関わらず，電位の上昇が当研究室のモデルと同程度の割合で生じていることがわかる．これは，当研究室のものより大きな負電圧が印加されることにより，アクセラグリッドの損耗が早い段階で生じたためと考えられる．図7に10000時間程度の損耗状況を示す．10000時間程度では，当研究室のモデルでは，アクセラの下流側の孔径が広がるように削れているのに対し，GAによるモデルでは，すでにアクセラグリッドの下流側の表面が削れていることがわかる．このように早い段階で，アクセラグリッドの損耗が生じたため，電子逆流が生じる時間が50%程度短くなったと考えられる．

以上の結果より，長寿命という観点では，GAによる最適化が行われていないことが明らかになった．このようになった原因として，動作開始時の値を用いて評価したため，グリッドの形状の変化やパラメータの変化を考慮できなかったと考えられる．そのため，動作開始時の値を用いて評価する場合，長寿命となるグリッドを設計することが難しいことが明らかになった．

4.結論

本研究では，長寿命かつ一定量の推力が確保されたグリッドの設計を行うために，グリッド最適化ツールの開発を行った．

JIEDI コードの求解速度の改善を行った結果，LU分解の処理を改善することにより，計算時間を従来の1/10程度に削減することができた．

グリッドの最適化については、遺伝アルゴリズムに JIEDI コードを組み込んだ最適化ツールを開発した。本研究においては、適応度を BOL での損耗率と推力係数を用いて最適化を行い、最適化されたことを確認した。しかしながら、寿命の評価を行った場合、遺伝アルゴリズムで最適化されたグリッドの寿命は 18000 時間だったのに対し、当研究室のグリッドは 38000 時間と倍以上となり、寿命に関して最適化できていないことが分かった。今後は、計算コストが大幅に上昇するが、電子逆流までの時間もしくはアクセルグリッド欠落までの時間のどちらか短い時間を寿命として、寿命を適応度関数に組み入れた最適化を行う必要があることが分かった。

5.謝辞

本研究を遂行するにあたり、イオンエンジン加速グリッドの耐久性を評価するための数値解析ツール(JIEDI ツール)、および JSPS 科研費、挑戦的萌芽研究(No.23656540)からの支援を受けた。ここに感謝の意を表す。また、九州大学情報基盤研究開発センターの計算機を利用させていただいた。ここに感謝の意を表す。

参考文献

(1) 細田聡史, 國中均, イオンエンジンに小惑星

探査「はやぶさ」の帰還運用, J. Plasma Fusion Res. Vol.87 No.5(2010), pp.282-292

- (2) 早川幸男, 北村正治, 宮崎勝弘, カスプ磁場型キセノンイオンエンジンの設計論, 航空宇宙技術研究所資料 751 号(2000)
- (3) 中野正勝, 梶村好宏, 船木一幸, JIEDI-1 の開発(イオンエンジングリッド損耗評価コードの改良), イオン加速グリッド耐久認定用数値解析 JIEDI(JAXA Ion Engine Development Initiatives)ツールの研究開発ワークショップ論文集(2010), pp.1-9
- (4) 船木一幸, 中野正勝, 中山宜典, 梶村好宏, JIEDI ツールの開発上の課題と 2007 年度の活動方針, イオン加速グリッド耐久認定用数値解析 JIEDI(JAXA Ion Engine Development Initiatives)ツールの研究開発ワークショップ 2006 年度報告書(2007), pp.75-81
- (5) 北野宏明, 遺伝的アルゴリズム, 人工知能学会誌 Vol.7 No.1(1992), pp.26-37
- (6) 花田良子, 遺伝的アルゴリズム, 関西大学理工学会 理工学と技術 Vol.15(2008), pp.13-19
- (7) Cody Coffman Farnell, PERFORMANCE AND LIFETIME SIMULATION OF ION THRUSTER OPTICS, Doctoral Thesis, The Colorado State University(2007)