

平成28年度 修士論文

クリーニング法を導入した GA 及び製作容易さを考慮した
設計法を用いた永久磁石同期電動機の回転子構造最適化

指導教員 石川 赴夫 教授

群馬大学大学院理工学府 理工学専攻
電子情報・数理教育プログラム

渡邊 大貴

目次

1. 序論
 - 1.1 研究背景
 - 1.2 研究目的
2. クリーニング法を導入した遺伝的アルゴリズム(GA)
 - 2.1 設計領域の概要
 - 2.2 遺伝的アルゴリズムについて
 - 2.3 材質クラスターとクリーニング法
 - 2.4 適応度関数について
3. 比較モデル
 - 3.1 比較モデルの概要
 - 3.2 比較モデルの特性
4. クリーニング法を導入した GA による最適化
 - 4.1 設計概要
 - 4.2 最適化設計(1 段階目)
 - 4.2.1 Randseed = 1 の場合の設計結果
 - 4.2.2 Randseed = 2 の場合の設計結果
 - 4.2.3 Randseed = 3 の場合の設計結果
 - 4.2.4 Randseed = 4 の場合の設計結果
 - 4.2.5 得られた設計結果に対する考察
 - 4.2.6 構造変遷への影響
 - 4.3 最適化設計(2 段階目)
 - 4.3.1 設計結果と考察
 - 4.3.2 プリウスモデルとの比較
 - 4.3.3 最適化終了の停止基準について
5. 製作容易さを考慮した設計結果
 - 5.1 設計概念について
 - 5.2 設計結果
6. 結論
7. 今後の課題
 - 謝辞
 - 参考文献

1 序論

1.1 研究背景

永久磁石同期電動機の歴史は 19 世紀ごろまで遡る。1820 年にエルステッドが電流の磁気作用を発見し、翌 1821 年にマイケル・ファラディがファラディのモータと呼ばれる世界初の電動機を作り上げた。程なくして 1832 年になるとヒポライト・ピクシーが、ファラディの電磁誘導の原理を活用して世界初の発電機を完成させ、発電機の歴史がスタートした。そして 21 世紀に入った今日、発電施設や産業施設に於ける発電設備としては勿論、震災時に活躍する携帯発電機や、ハイブリッドカーにも回生発電をする為に搭載されており、身近で且つ幅広い分野にとって重要な存在となっている。現代社会がこれから発展していく為にも、より優れた性能を発揮することができる発電機が求められており、その為にも発電機技術の発展は必要不可欠なものとなっている。

私が研究した内容は、埋込磁石発電機について「永久磁石使用量を抑え、且つ優れた発電特性を発揮することができる」回転子構造を設計するということである。この研究内容に関しては、環境志向が強くなってハイブリッドカーや電気自動車が本格的に台頭してきた近年、特に自動車業界からのニーズが高まっていると言える。様々な企業や教育機関にて、上記のことを達成する埋込磁石型同期発電機の回転子構造を得る為、様々な手段を用いて回転子構造の最適化が図られている。今から 20 年ほど前にトポロジー最適化手法が提案された[1], [2]。これらの論文の後にいくつかの論文が発表されている。例えば、Byun らは設計感度を用いたトポロジー最適化手法を提案した[3]。Im らは遺伝的アルゴリズム (GA) と結合した ON/OFF 感度法と呼ぶ局所最適化手法を提案した[4]。Wang らは永久磁石の磁化方向を考慮したトポロジー最適化手法で電気機器を設計した[5]。Shim らは磁気と温度解析を結合したトポロジー最適化手法を提案した[6]。Kim らはトポロジー最適化手法を用いて三次元の電気機器を設計した[7]。Choi らは局所最小化を避けるために GA と ON/OFF 感度法による方法を提案した [8]。Labbe らはトポロジー最適化手法における凸面改善のためにマッピング関数を考慮した[9]。Kikuchi らは磁性構造問題にトポロジー最適化手法を提案した[10]。高橋らは磁石の非線形性と回転を考慮した ON/OFF 法で IPM モータを設計した [11]。Park らはレベルセットに基づいたトポロジー最適化手法を提案した[12]。渡辺らは免疫アルゴリズムとマルチグリッド法を用いたトポロジー最適化手法を提案した[13]。分割されたデザイン領域を 1 セルずつ材質変更していく簡易な発見的探索アルゴリズムによって設計を行った。 [14]

当研究室では、他にも良い最適化方法が無いか考えたところ、私達は遺伝的アルゴリズム(GA)にクリーニング法という手段を導入した手法を考案するに至った。これまでに提案されてきた様々な最適化方法の多くは、既存の構造を用いたものであり、設計者が初期構造から生成できるわけではなかった。回転子構造の最適化をするにあたっては、既存形状に依存せずに白紙状態からの設計を行うことが重要だと考える。私達はクラスターという概念と、クリーニング法を導入した遺伝的アルゴリズム(GA)による回転子トポロジーの最適化を提案してきた[15][16][17]。この方法により、白紙状態からのトポロジー最適化が可能となり、且つ、設計領域内から不要な微小領域を取り除いたうえでの最適化も可能となる。更に、この最適化手法を用いるに際しては、クリーニング法の強度を変更したところ設計結果や性能などに対して、どのような影響が出るのかを調べる事が重要となっている。これについても本論文では考察を行う。

1.2 研究目的

- クリーニング法を導入した遺伝的アルゴリズム(GA)を用いて、白紙状態からの埋込磁石型同期発電機の回転子構造最適化を行い、クリーニング法の影響を強くしていった場合に於ける、設計結果や性能との係わりについて検討を行う。
- GA の設計結果を基に、製作容易さを考慮した回転子構造を提案し、これに基づいた再設計を行う。
- それぞれから得られた設計結果は、トヨタのプリウスに用いられている永久磁石同期発電機(PMSG)と比較する。

2 クリーニング法を導入した遺伝的アルゴリズム(GA)

2.1 設計領域の概要

Fig2.1 の赤い線で囲まれている部分に示されたように、設計領域は 1/8 回転子領域とする。残りの 7/8 の領域は、設計された 1/8 領域部分と対象になるようにして設計されることとなる。この設計領域を Fig2.2 に示されたように径方向、周方向に幾つかに分割すると設計領域内は幾つかのブロックで分けられるのだが、このブロックを「セル」と表現することとする。Fig2.2 に示される例は、設計領域を径方向に 10、周方向に 9 分割した場合のものであり、この場合に於けるセルの数は 90 個となる。

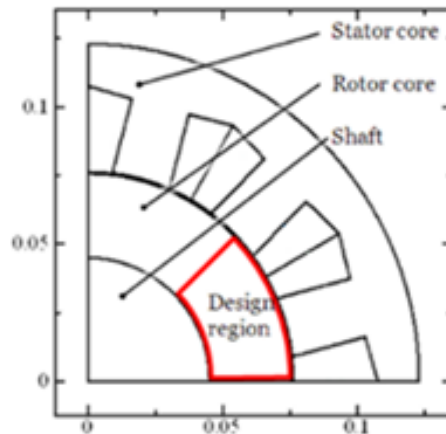


図 2.1 設計領域

Fig2.1 Image of design region

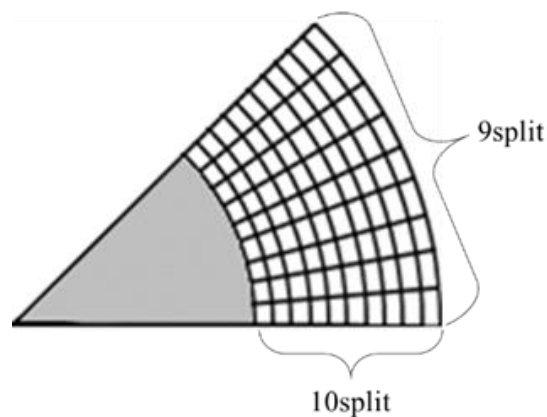


図 2.2 セルで分割された設計領域

Fig2.2 Design region divided by cell

2.2 遺伝的アルゴリズムについて

埋込磁石型同期電動機の回転子構造を最適化するにあたって焦点となっているのが、既存の構造に依存せずに白紙状態からの最適化を行うということであり、白紙状態からの最適化を行うのに相性の良い最適化方法が必要であった。そこで本論文では、遺伝的アルゴリズム (GA : Genetic algorithm) をベースとした最適化方法を用いた。この節では、この GA についての概要について説明する。

GA とは生物の進化過程を模擬した最適化プロセスの一つであり、最適化対象の設計状態が白紙の状態から、設定した評価関数に応じた様々な需要に対する最適化が可能となっている。これによって、既存の構成内容に依存しない最適化が可能となり、また、簡易的なアルゴリズムから成り立っているためプログラミングが容易という利点も持っている。GA に於けるプロセスの流れについては Fig2.3 のフローチャートに示される通りである。太枠内で囲まれた部分が、当研究室オリジナルの最適化プロセスとなっている。

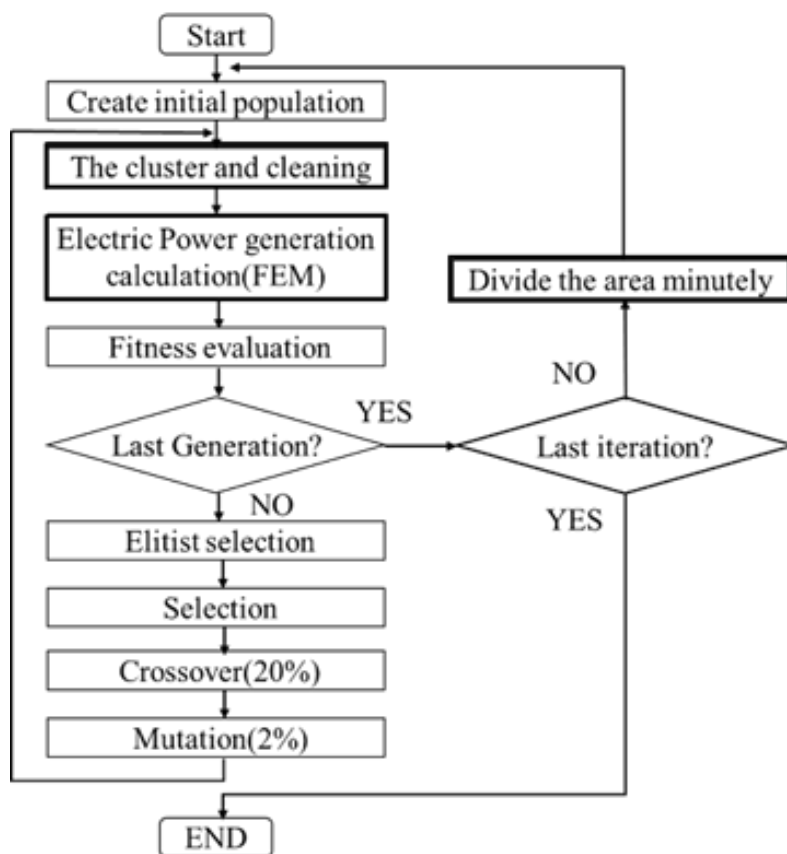


図 2.3 GA に於けるフローチャート

Fig2.3 Flowchart in GA

前頁の Fig2.1 に示したフローチャート内の各ブロックに於ける概要は以下の通りとなる。

Create initial population

GA 開始直後に、何もない白紙状態から初期集団形成が行われるが、それは Start 直後のこのブロックで行われることとなる。初期集団形成にて、何個の個体が生成されるかは設計者が任意で決めることになる。

The cluster and cleaning

この部分は当研究室オリジナルの最適化プロセスであり、通常の GA には含まれていない。個体形成が行われた後に、クリーニング法という最適化手法を用いて、設計状態の手直しを行うプロセスである。クリーニングについての細かい説明は後述の 2-3 で行う。

Electric power generation calculation

様々な設計結果がこのプロセスに至るまでに生成されているが、その設計結果に示される回転子構造が、どれだけの発電力を発揮することができるのかを算出するのがこのブロックになる。ここでは、生成されてきた回転子形状に対して FEM(有限要素法解析)を適用し、発揮することができる平均発電力を算出することになる。ここで求められた平均発電力は、生成された個体(設計結果)の評価をする上で重要なファクターとなる。

Fitness evaluation

このブロックでは、生成されてきた各々の個体がどれだけ優れているのかを、判断するプロセスとなっている。

Elitist selection & selection

このブロックでは評価の高かった個体を選択して、次世代へと継承させるというプロセスが踏まれる。また、エリート戦略の採用により、最高の評価を得た個体はそのまま次世代へと引き継がれる。

GA では最適化対象の個体情報をコード化して表現するのが一般的となっているが、このコードは染色体と呼ばれ N 個の遺伝子から成立している。本研究の場合では、この遺伝子の個数が回転子設計領域内に於けるセルの数と同じになり、どこの部分にどの材質が当て嵌められているのかを表すようになっている。ここで、回転子トポロジーの設計材質として用いられた空気、鉄、X 方向、Y 方向、R 方向それぞれに磁化された磁石領域をそれぞれ 0,1,2,3,4 として表現すると、その場合に於ける染色体は Fig2.4 に表すようになる。

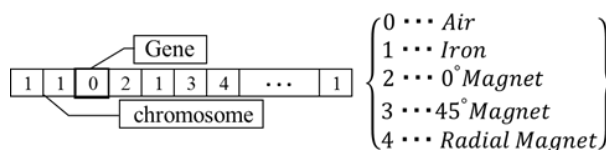


図 2.4 染色体の構成イメージ

Fig2.4 Construction image of chromosome

GA を開始すると、Fig2.4 のように表される染色体から成り立つ個体を、初期集団として幾つか生成する。この初期集団生成に当たっては乱数が用いられるのだが、各遺伝子に対して、乱数から選ばれた適当な材質を当て嵌めているだけなので、必然的に個体評価は低いものが多くなる。この初期個体集団を基として、次世代へと継承される個体が作られていくのだが、この過程では“選択”と“一様交叉”といったプロセスが踏まれる。まず“選択”に於いて個体集団の中から親となる個体を 2 つ選出し、次にその親となる個体を用いて Fig2.5 に表されるような“一様交叉”が行われる。0,1 から成るビット文字列のマスクを発生させ、0 がマスクに現れる確立を 20% とする。そして、マスクが 0 になった遺伝子座に於いて親の遺伝子の交換が発生し、子となる個体の新たな染色体が生成される。また、生成された子の各遺伝子に対して 2% の確立で Fig2.6 に示すような“突然変異”を行う。イレギュラーな要因を持たせることによって局所解に陥る可能性を抑えることが目的である。

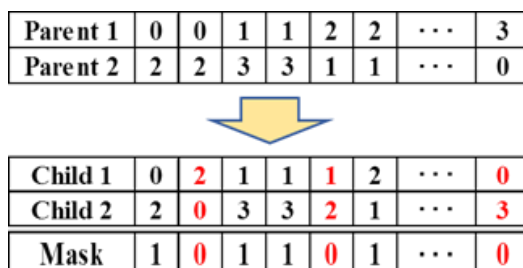


図 2.5 一様交叉のイメージ

Fig2.5 Image of uniformity crossover

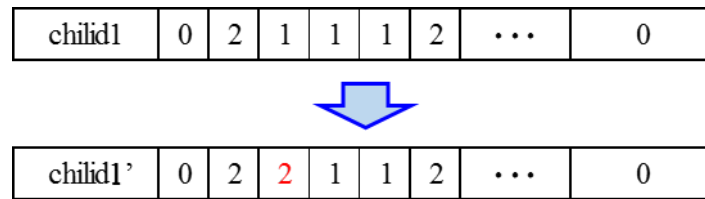


図 2.6 突然変異のイメージ

Fig2.6 Image of mutation

加えてエリート戦略の採用により、各世代に於いて最大適応度を記録した個体は次世代の個体集団へ継承されるようにしている。これらのプロセスを繰り返すことにより、個体集団全体で見た時の適応度は世代を重ねるごとに上昇していき、最適化結果が得られる。

2.3 材質クラスターとクリーニング法

この節では、材質クラスターとクリーニング法についての説明を行う。材質クラスターとは、回転子の設計領域内に於いて同材質で隣接しあっているセルの塊のことを指し、構成しているセルの数によって、そのクラスターの大きさが決まる。セルの辺同士が密着しているだけでなく、セルの角が接していれば同じクラスターとみなすことにしている。また、周期境界を挟んでセルが隣接している場合に於いても同クラスターとみなす。例として、以下の図 3.1 を用いて詳しい説明を行っていく。

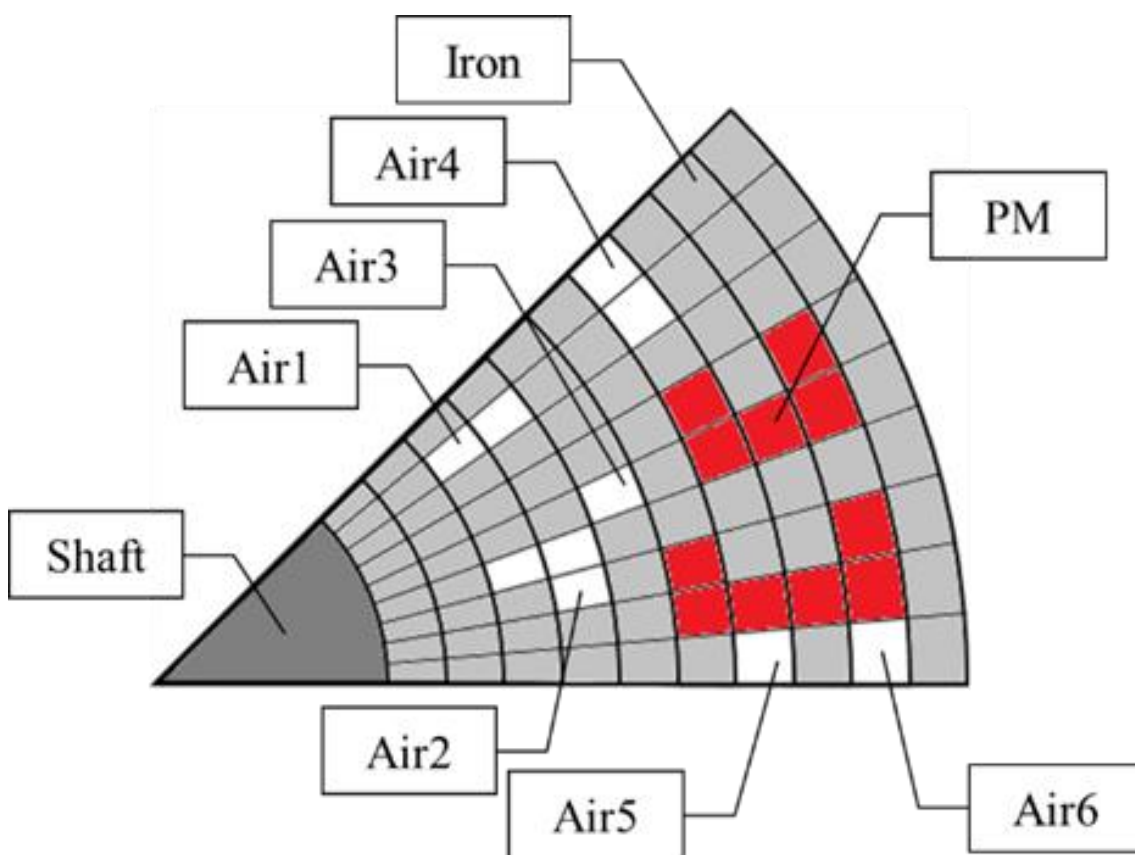


図 3.1 設計結果のイメージ(クリーニング法実行前)

Fig3.1 Image of design result (before cleaning method)

Fig3.1 に表された図の回転子領域内では、白色領域が空気領域を表しており、灰色領域が鉄領域を表しており、赤色領域は永久磁石領域を表しているものとする。この回転子に於いては鉄領域内に複数個の空気領域と永久磁石領域が存在している。Air1,6 は単独で成り立っている空気領域クラスターとなっていて、大きさはそれぞれ 2,1 となる。Air2,3 は、辺同士で密着しているわけではないも

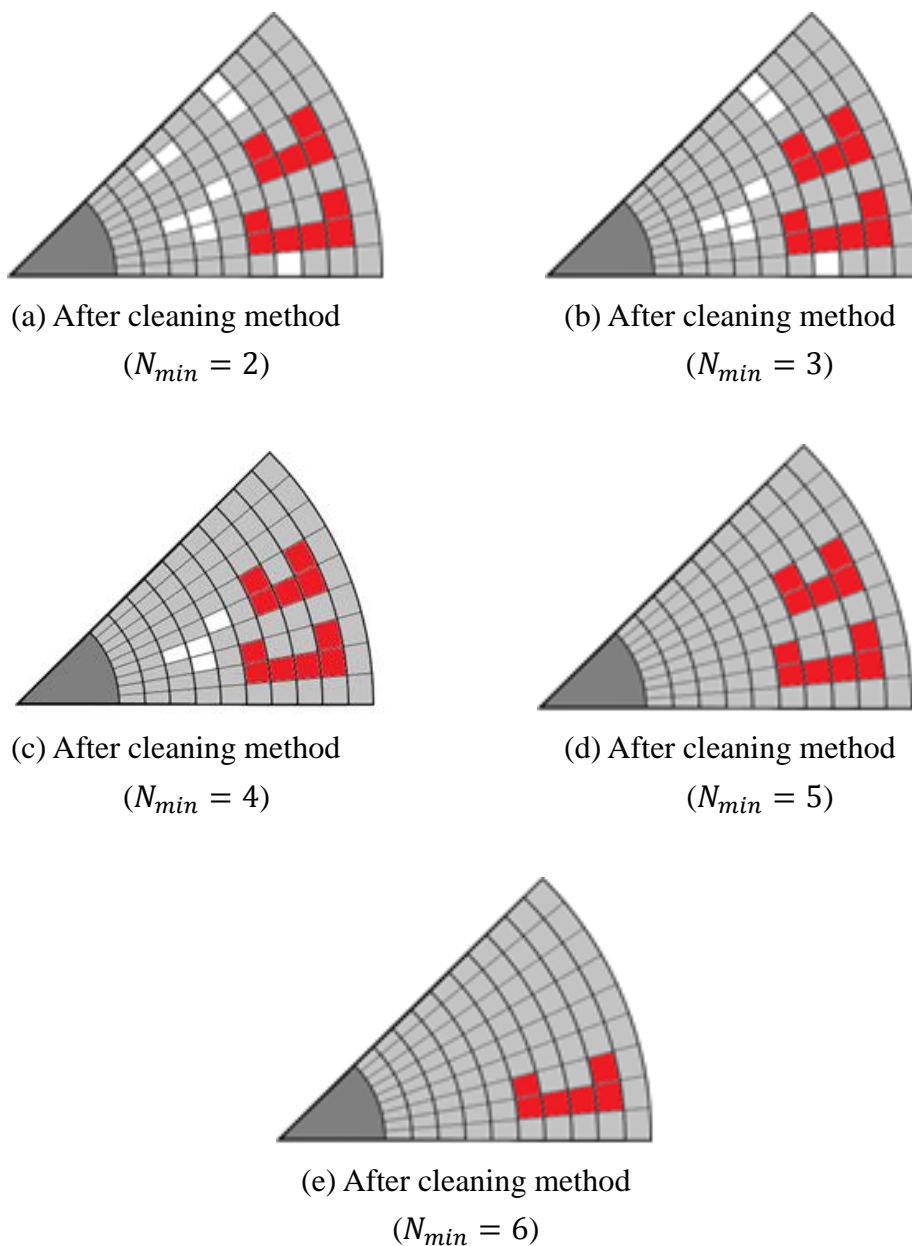


図 3.2 クリーニング処理の実行例

Fig3.2 Execution examples of cleaning method

この、セルの角に於いて互いに接しているため 1 つのクラスターとみなされ、大きさ 4 の空気領域クラスターとなる。そして、Air4,5 については一見互いに隣接していないように見えるが、この場合は周期境界を挟んで 1 つのクラスターとなっているため、大きさ 3 の空気領域クラスターとして扱われることとなる。このクラスターとその大きさの概念が、クリーニング処理を行う際に活用されることとなる。クリーニング法とは設定値 N_{min} 未満の大きさのクラスターに対して、周囲と同じ材質に変化させるといった処理を行うことである。Fig3.1 に於

いて N_{min} 値を 2~6 と設定してクリーニング処理を行った場合、処理後の各々の回転子トポロジーは Fig3.2(a) ~ (e)に示されるようになる。(a)の $N_{min} = 2$ の場合に於いてはクラスターの大きさが 1 しかない Air6 の空気領域クラスターが除去されて、周囲を囲っていた材質と同じになるように鉄領域へと変更している。(b)~(e)に示されているように、 N_{min} 値を大きくしていった場合についても同様に処理が行われていくが、 N_{min} 値の上昇によりクリーニング処理が行われる対象となるクラスターが次第に多くなっていく。そして(e)の $N_{min} = 6$ としてクリーニング処理を行った場合に於いては、最も大きい永久磁石クラスターを除いた全てのクラスターが鉄領域へと変更される。このクリーニング処理を行うことによって、設計領域内から微小領域を排除することができる。つまり、空気領域内にできた微小磁石領域や鉄領域、鉄領域内にできた微小磁石領域といったものを除去した設計を行うことが可能となる。今回は全ての設計材質に対して N_{min} 値を同じにしてクリーニング法を行ったが、材質ごとに異なる値を設定することも可能である。

2.4 適応度関数について

前節までで、どのようなメカニズムで GA とクリーニング法が進行するかを説明した。そして、最適化プロセス内で作られた個体は優れたものが選定されて次世代へと継承されていくという事についても説明したが、その為の個体評価は適応度関数と呼ばれる関数を用いて行われる。この節では、その適応度関数についての説明を行う。

研究目的として、永久磁石量を抑えた上で優れた発電電力を発揮することのできる回転子を得ることを挙げた。適応度関数は、そんな研究目的に準じて以下の式(1)のように設定した。

$$\text{Fitness} = \frac{P_{ave}}{1 + k V_{pm}/V_{rotor}} \quad (1)$$

(1)式左辺の Fitness が適応度関数となっている。右辺にも様々な項や係数があるが、 P_{ave} は平均発電電力、 V_{rotor} は回転子全体の体積、 V_{pm} は回転子中に用いられている永久磁石の体積、 k は磁石重み係数となっている。 k の値が大きいと、永久磁石量が多くなるほどに適応度関数値が下がるので、永久磁石量がより少ない設計結果が得られるようになる。今回の研究では、比較対象であるプリウスモデルの永久磁石使用量に近い結果が得られることが最も多かったため、 $K = 2.0$ の場合の設計結果を取り扱うこととする。

3 比較モデル

3.1 比較モデルの概要

クリーニング法を導入した GA を用いて最適化を行い，設計結果を得たらそれで終了というわけではない。用意した比較モデルとの比較を行うことにより，得られた設計結果がどのような特性を持っているのか，どれだけの性能を発揮することができるのかを観察し，更にいいモデルを得るためにどうすべきかを考察しなければならない。この節では，その比較モデルについての説明を行う。今回，比較モデルとして用いることにしたのはトヨタ自動車のハイブリッドカーである Prius(2010)に用いられている PMSG である。プリウスモデルの回転子構造は Fig3.1 に示したようになっている。尚，回転子領域内に於いて白色領域は空気領域を，灰色領域は鉄領域を，紫色領域は永久磁石領域を示す。詳細については次頁に続く。

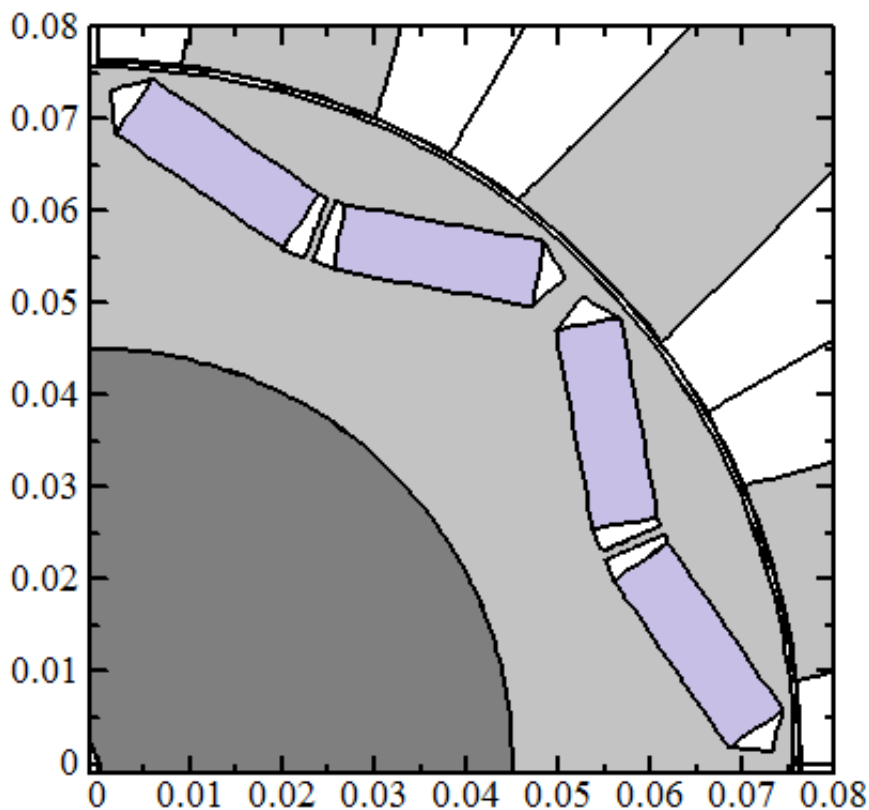


図 3.1 プリウスモデルの回転子構造イメージ

Fig3.1 Rotor structure image of Prius model

前頁の Fig3.1 にてプリウスモデルの回転子構造を示したが、設計材質に関しては非公開とのことだった為、永久磁石領域にて用いられている磁石は、一般的に広く用いられている Nd-Fe-B 磁石と仮定して扱った。また、銅線の太さは 3.73mm であり、ステータコアのコイル巻き数は 11 であった。主な寸法に関しては、回転子内径 45.00mm、回転子外径 75.65mm、固定子外径 76.35mm、固定子外径 123.00mm となっている。

また、比較モデルを用意したところで、それがどのような特性を持っていて、どれほどの性能を発揮することができるかが分からない限り、比較モデルとしては用いることができない。そこで、Fig3.1 に示されたプリウスモデルがどのような特性・性能を持っているのかを明らかにする必要がある。そこで、波形特性や平均電力の算出のために FEM(有限要素法解析)を用いることとする。FEM を用いる際に於いては、計算対象を幾つかのメッシュで分ける処理を行う必要性があり、その為には先ず、適切な数の内部接点を計算対象に割り振る必要がある。そこで、プリウスモデルには以下の Fig3.2 ように内部接点の割り振りをを行った。

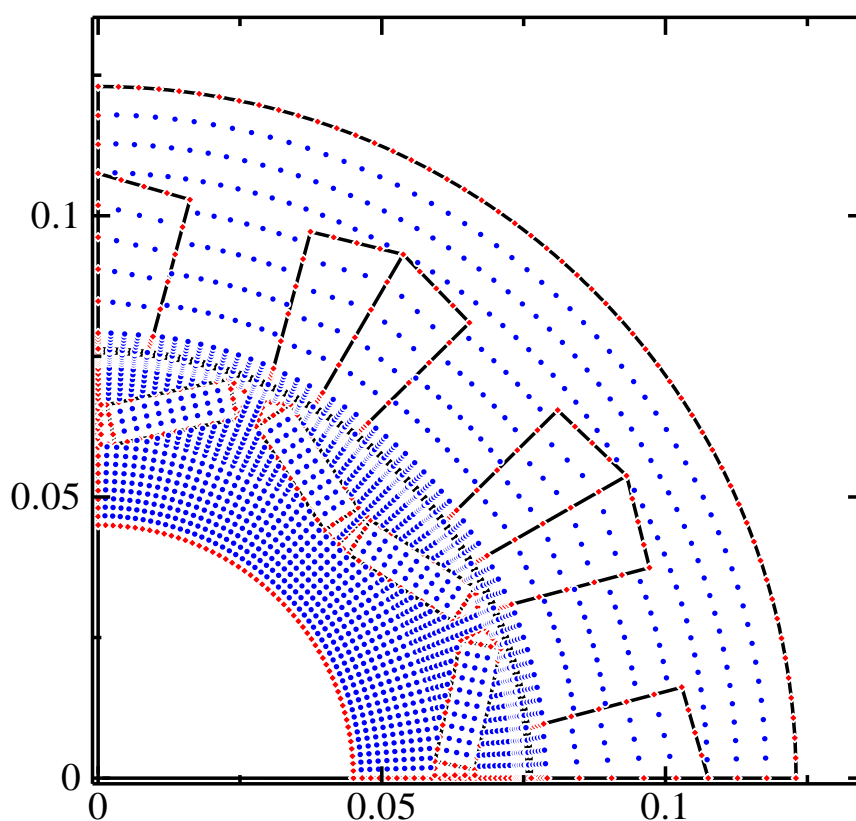


図 3.2 内部接点の割り振りイメージ
Fig3.2 Image of internal contacts allocations

割り振る内部接点をより細かく設定することにより、計算精度も上昇していくが、それに比例して計算時間も多くなるようになる。それらのことも考えた結果、今回は Fig3.2 の様に内部接点を割り振ることとした。計算結果に大きい影響を与える回転子構造部分は、固定子構造部分と比べるとやや細かく設定してある。また Fig3.3 は Fig3.2 のギャップ部分を中心に拡大したものである。これを見ると、ギャップ部分に於ける内部接点は 1 点だけに見えるが実は 4 点割り振られており、他の部分と比べると内部接点の割り振り密度が最も濃密な部分となっている。内部接点を基に生成され、計算に用いられるメッシュも必然的に非常に細かいものとなる。なぜ、ギャップ部分に於ける内部接点を細かくする必要があるのかというと、回転機の電磁解析するにあたり、ギャップ部分の磁束密度はコギングトルク特性の影響を強く受けるため、特に細かいメッシュを用いて計算する必要があるためである。

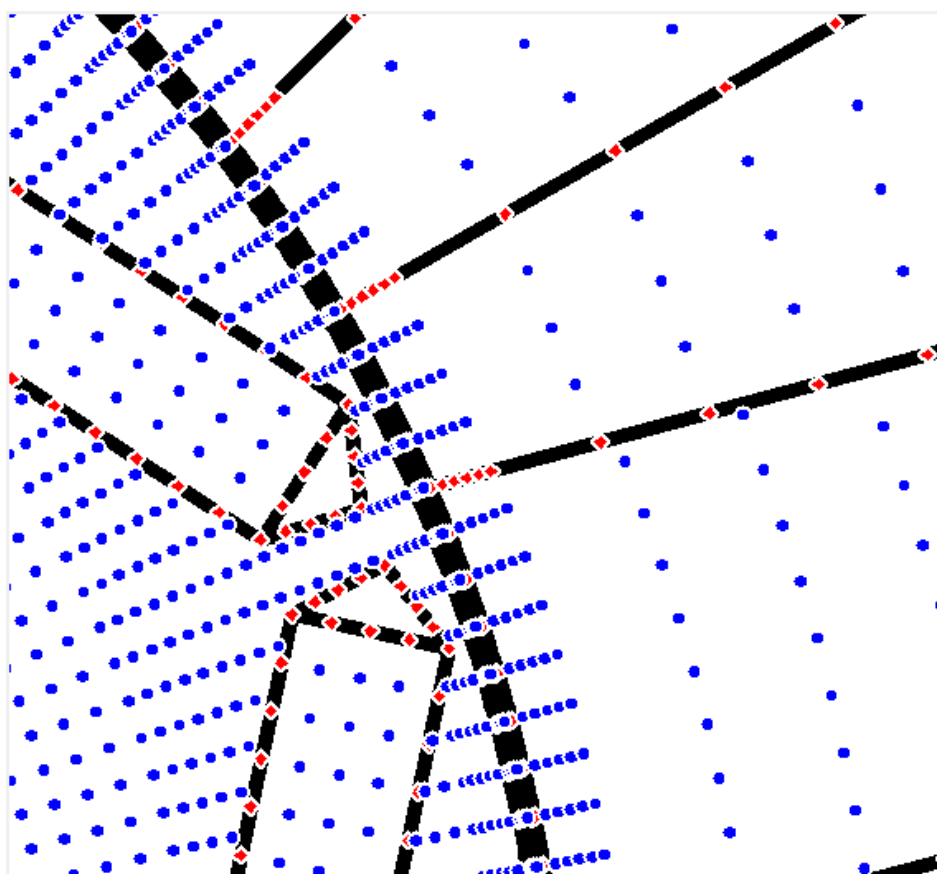


図 3.3 ギャップ部分に於ける内部接点の振り分け
Fig3.3 Allocation of internal contacts in the gap area

前頁までに、如何にして比較モデルに内部接点を割り振ったかを、説明したがそれを基にしてメッシュ描画を行った結果は以下の Fig3.4, Fig3.5 を示す。説明した通り、固定子部分よりも回転子部分の方がメッシュの描画されている密度が高く、それ以上に、ギャップ部分でのメッシュ描画密度が高くなっている。次の頁では、これを用いた計算結果について説明していく。

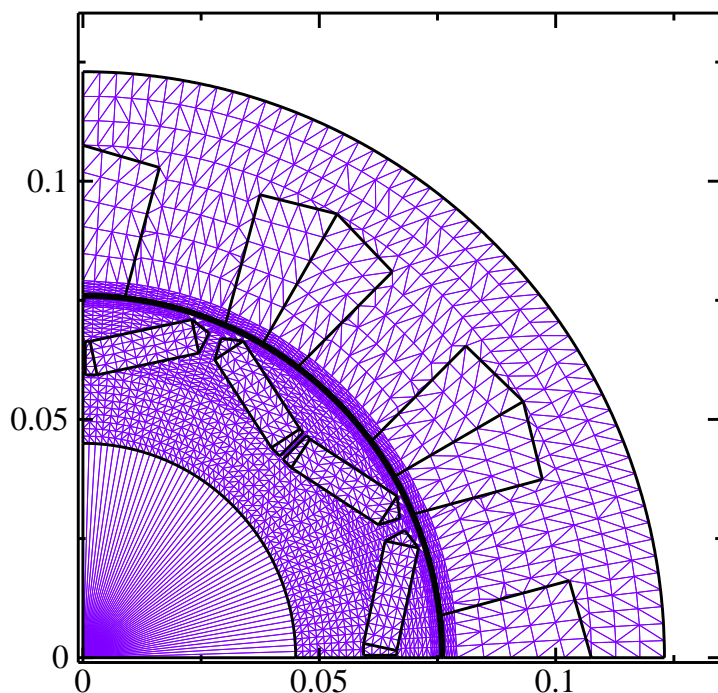


図 3.4 メッシュ描画イメージ

Fig3.4 Image of mesh drawing

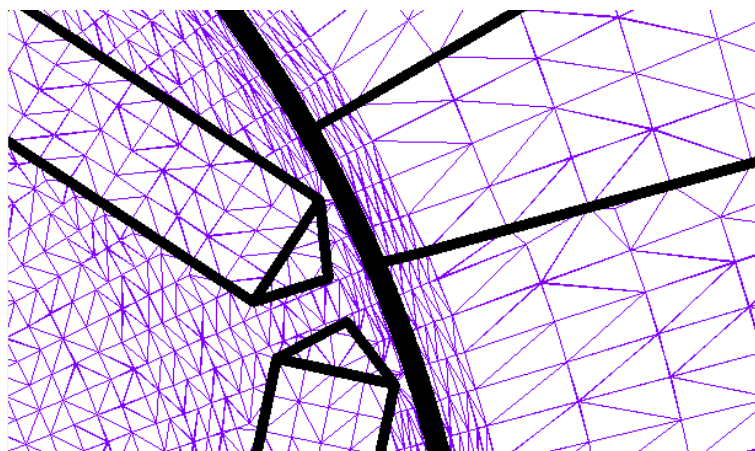


図 3.5 メッシュ描画イメージ(ギャップ部分)

Fig3.5 Image of mesh drawing (gap area)

3.2 比較モデルの特性

前頁の 3.1 では、比較モデルであるプリウスモデルの概要について説明し、また内部接点やメッシュ描画の役割について、イメージ図を用いて説明した。この節では、プリウスモデルにメッシュ描画をし、FEM を行った結果として得られた特性や性能について説明していく。また、有限要素法解析をするにあたって Microsoft 社の Visual C++ と、Intel 社の Fortran をツールとして用いた。

Prius2010 に用いられている PMSG はスロット数 12、極数 8 であり、また回転子内部の永久磁石領域の両端にはフラックスバリアとして空気領域が設けられていることが特徴として挙げられる。このフラックスバリアを設けることにより、回転子内部だけで磁束がループしてしまうことを防ぎ、固定子部分に於ける鎖交磁束量を増やして性能上昇を狙っているものと思われる。そのようなプリウスモデルにおける発電特性波形は以下に示す Fig3.6 の様になる。また、Fig3.6 に示される結果は電流位相が約 -25 deg のときに得られたものである。

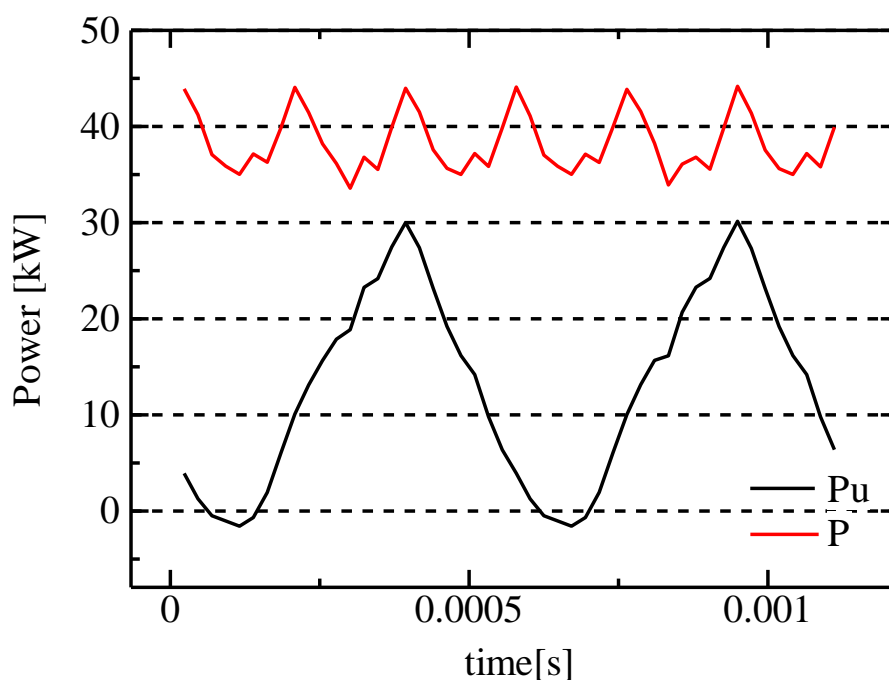


図 3.6 発電電力波形
Fig3.6 Output electric power

Fig3.6 に示された発電電力波形を得た時の諸設定は以下のようになっている。

PMSG の奥行き : 27.00mm

固定子電流値 I_e : 80A

回転数 : 13500min^{-1}

永久磁石使用量(1/8 領域) : 8.55cm^3

発電電力波形の黒い実線は U 相電力を示しており、赤い実線は出力発電電力を示している。この赤い実線が取る平均値が平均発電電力 P_{ave} として扱われ、Fig3.6 の場合では $P_{ave} = 38.7\text{kW}$ となる。これと上記の永久磁石使用量を適応度関数に代入して計算すると、 $\text{Fitness} = 26971$ となる。研究目的としては、クリーニング法を導入した GA による最適化を通して、この値以上の適応度関数を達成できる回転子を設計することを狙うこととなる。次に無負荷時の誘導電圧波形を以下の Fig3.7 に示す。

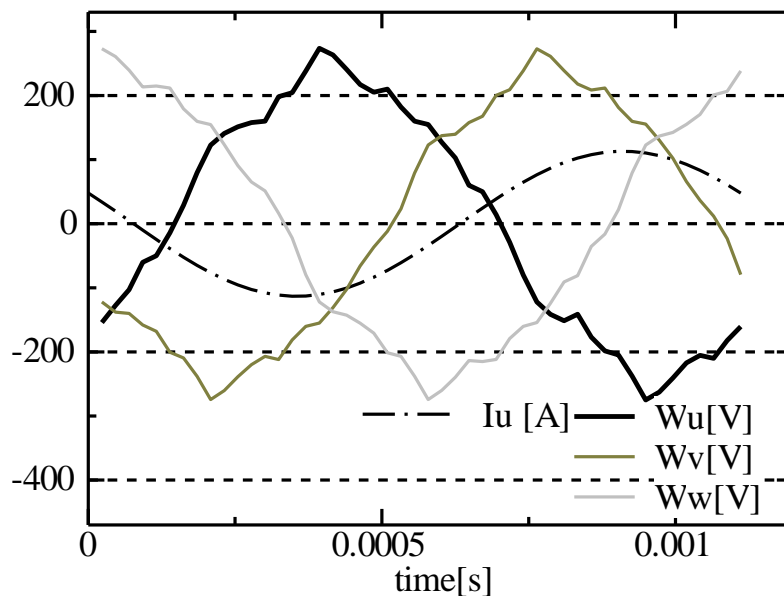


図 3.7 無負荷時の誘導電圧波形

Fig3.7 Electromotive force at no-load

無負荷時の誘導電圧波形については、後ほどの 4 章にて得られる最適化設計モデルとの出力特性比較の際に用いることとする。

尚、プリウスモデルの出力電力波形を得た際には電流位相を-25deg とした場合の波形を得たと書いたが、これは固定子電流 $I_e = 80A$ の場合に得られる平均発電電力が最大となるからである。電流位相値を-25 deg 以外として、平均電力値を算出すると以下に示す Fig3.8 と、Table3.1 のようになる。

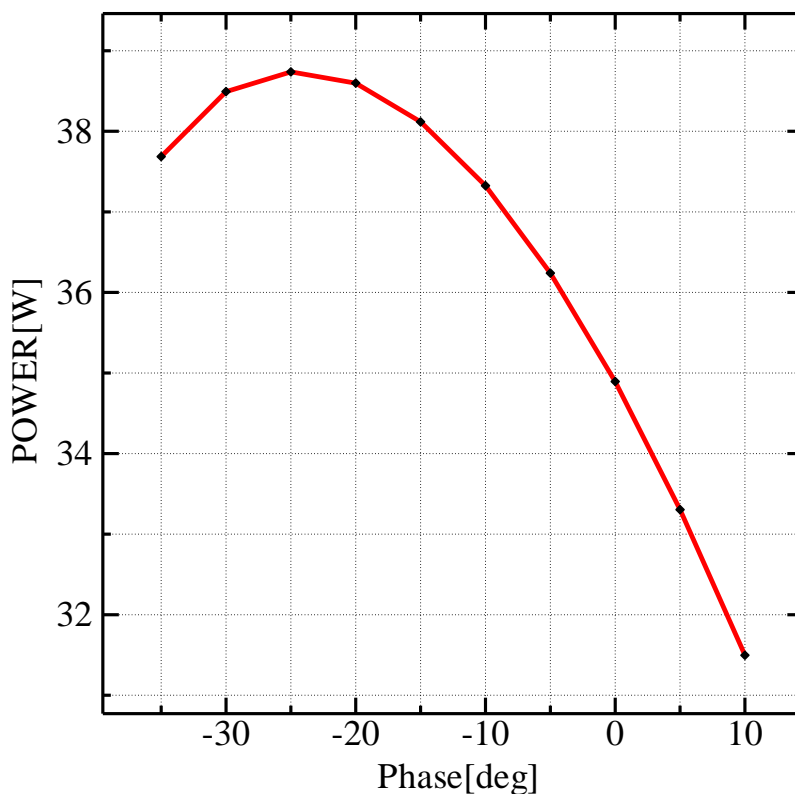


図 3.8 電流位相による出力電力の変化

Fig3.8 Transition of output power – current phase

表 3.1 各電流位相値に於ける出力電力値

Table3.1 Value of output power at each current phase value

Current phase	Output power	Current phase	Output power
-35deg	37.6867 kW	-10deg	37.3251 kW
-30deg	38.4927 kW	-5deg	36.2402 kW
-25deg	38.7377 kW	0deg	34.8939 kW
-20deg	38.5984 kW	5deg	33.3042 kW
-15deg	38.1173 kW	10deg	31.4968 kW

4 クリーニング法を導入した GA による最適化

4.1 設計概要

4章では、クリーニング法を導入した GA によって回転子構造を最適化した結果として、どのような設計結果を得ることができたか、そしてそれがどのような特性を示してどれだけの性能を発揮できるかについて、プリウスモデルとの比較をしながら、考察を行う。最初にあたるこの節では、最適化するにあたっての概要や細かい設定についての説明や確認を行う。設計対象の寸法、ステータ数や極数といった特徴、設計領域がどこを指すかなど、これまでに説明済みの内容に関しては前頁までを参照すること。

まず、設計材質について説明する。今回の最適化をするにあたって、5種類の設計材質を用意したことは2.2節にて説明した。空気領域、鉄領域、そして磁化方向の異なる3種類の永久磁石領域である。この3種類の磁石はX方向、Y方向、R方向磁化磁石としたが、其々の磁石の磁化方向は以下のFig4.1のようになる。

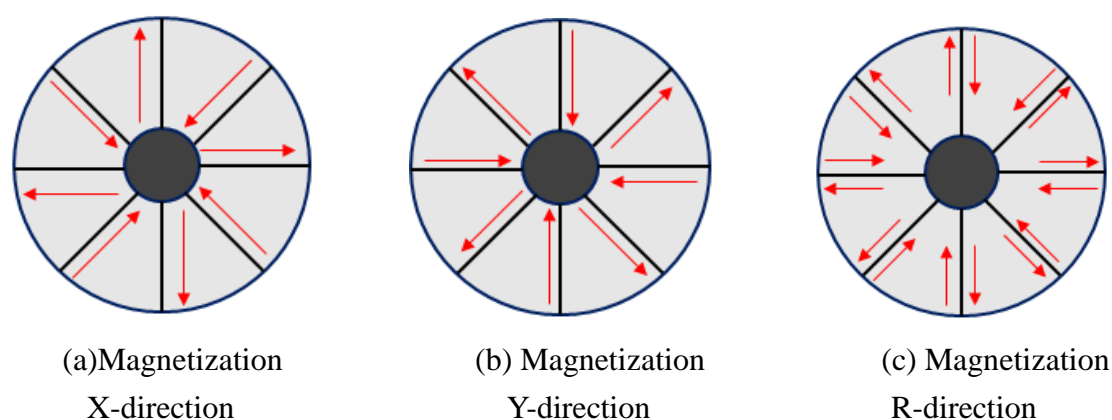


図 4.1 それぞれの磁石の磁化方向

Fig4.1 Each magnetization direction

そして、次節から示される最適設計結果の全ては、GA プロセス中での交叉確率、及び突然変異確率はそれぞれ 20%、2%で統一されていて、適応度関数中の磁石の重み係数 K も全て $K = 2.0$ で統一した。

4.2 最適化設計(1 段階目)

1 段階目での GA では，設計領域を径方向に 10，周方向に 9 分割し，90 個のセルで表現することとし，世代数は 300 と設定した。この条件で N_{min} 値，つまりクリーニング法の強度を 1~6 の間で変化させ，設計結果に対してどのような影響が現れるのかを観察していく。またサンプル数を多く取るため，GA 中にて個体形成や交叉・突然変異などをする際に用いられる乱数(Randseed)を 4 通り準備して最適化を行った。

4.2.1 Randseed = 1 の場合

この項では、擬似乱数 Randseed を 1 として最適化を行って得た設計結果について観察する。各 N_{min} 値に於ける設計結果は Fig4.2 (a) ~ (f) に示すとおりである。

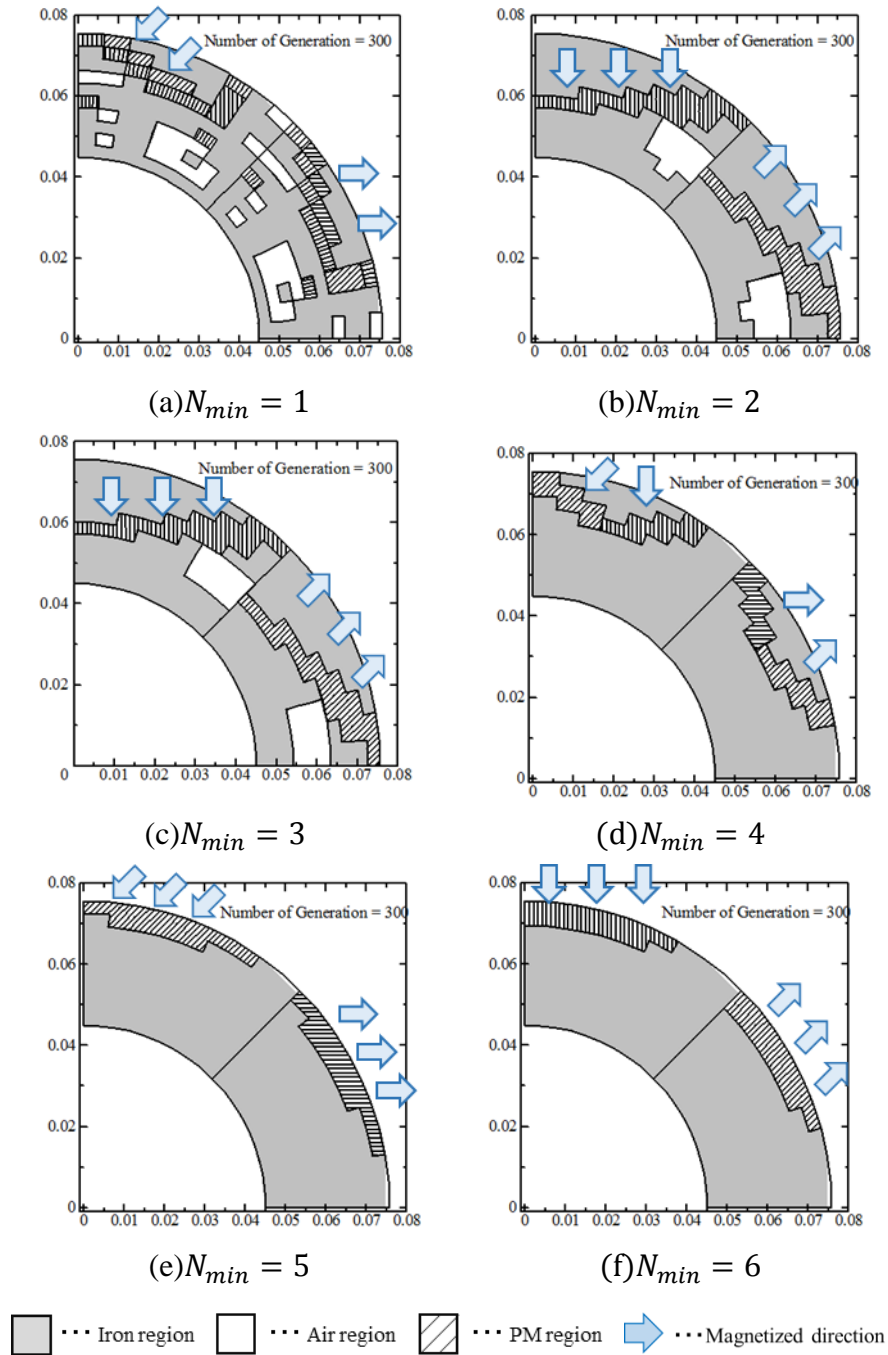


図 4.2 1 回目の GA で得られた設計結果(Randseed = 1)
 Fig4.2 Obtained design results at 1st GA (Randseed = 1)

前頁 Fig4.2 にて表したそれぞれの設計結果の性能, 及び適応度関数値の変遷はそれぞれ Table4.1, Fig4.3 に示すようになる。

表 4.1 各設計結果の持つパラメータ

Table4.1 Parameter in each design result

	$N_{min} = 1$	$N_{min} = 2$	$N_{min} = 3$	$N_{min} = 4$	$N_{min} = 5$	$N_{min} = 6$	Prius
$V_{pm}[cm^3]$	7.83	7.59	7.59	6.49	5.80	5.78	8.55
$P_{ave}[kW]$	37.6	42.5	42.6	39.7	31.1	32.7	38.7
Fitness	26831	30648	30722	29805	23981	25292	26971

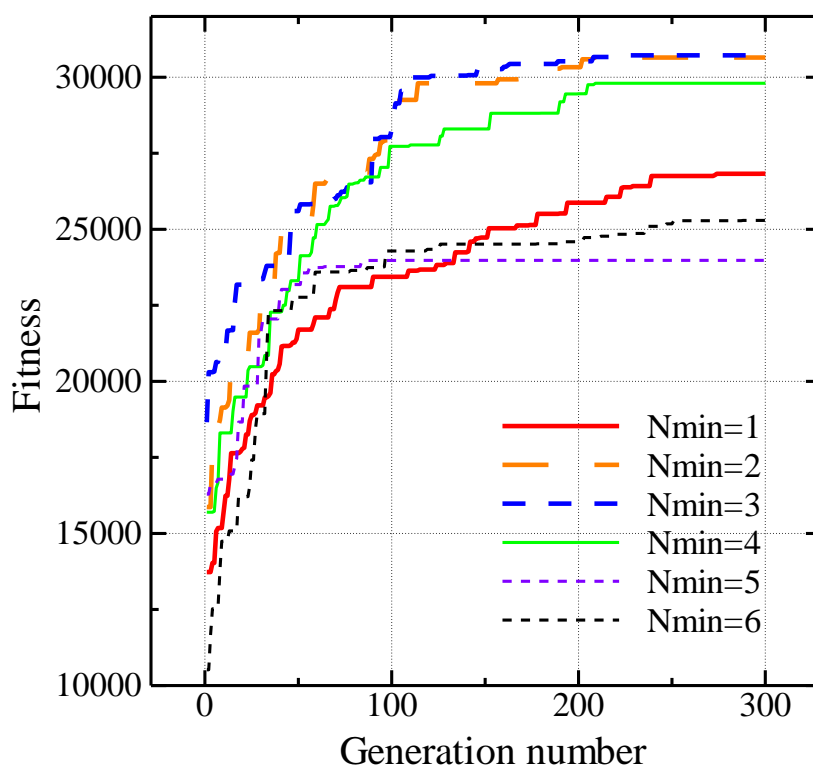


図 4.3 各々の N_{min} 値に於ける適応度関数値の変遷

Fig4.3 Transition of fitness function in each N_{min}

4.2.2 Randseed = 2 の場合

この項では、擬似乱数 Randseed を 2 として最適化を行って得た設計結果について観察する。各 N_{min} 値に於ける設計結果は Fig4.4 (a) ~ (f) に示すとおりである。

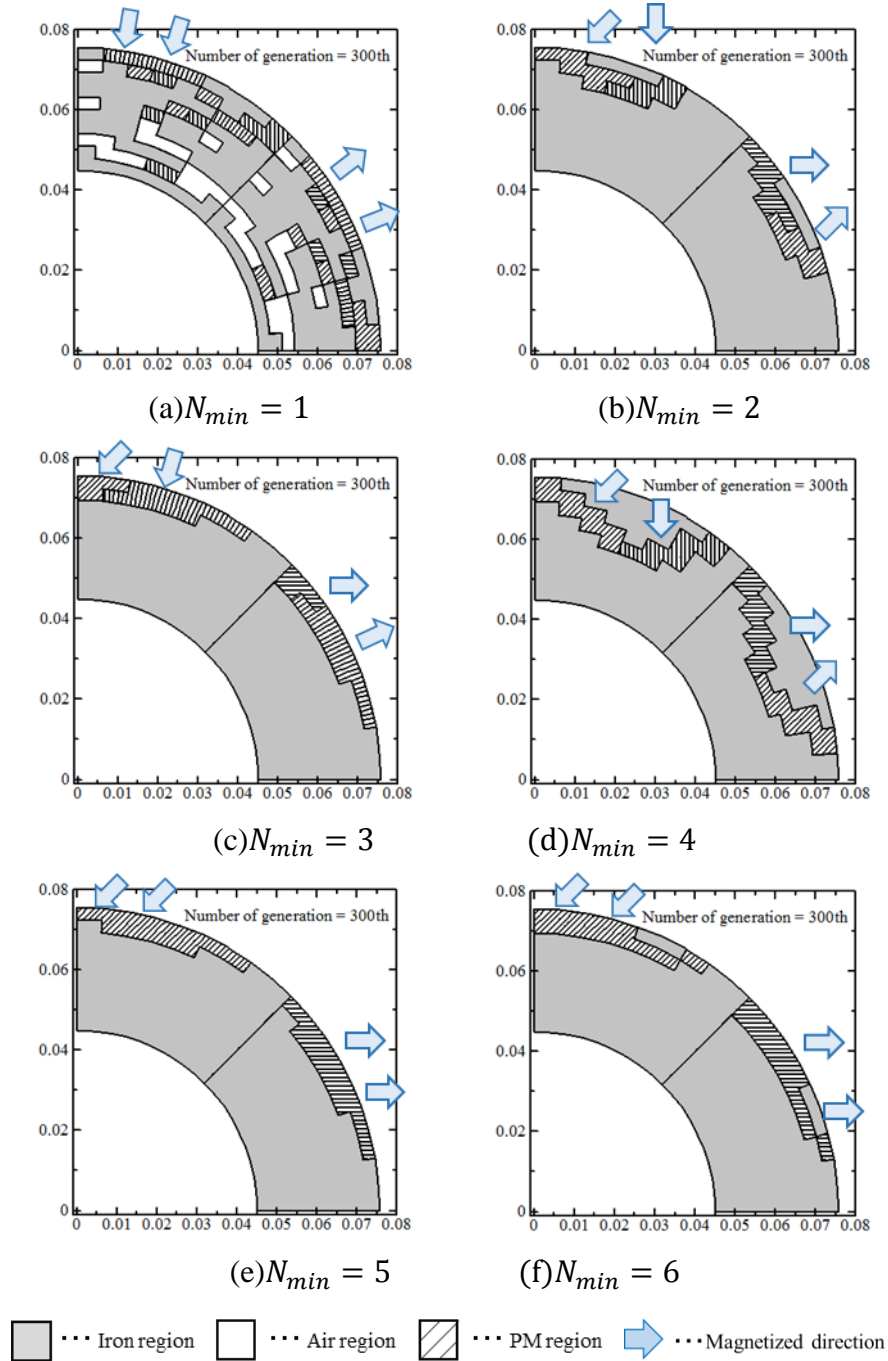


図 4.4 1 回目の GA で得られた設計結果(Randseed = 2)
 Fig4.4 Obtained design results at 1st GA (Randseed = 2)

前頁 Fig4.4 にて表したそれぞれの設計結果の性能, 及び適応度関数値の変遷はそれぞれ Table4.2, Fig4.5 に示すようになる。

表 4.2 各設計結果の持つパラメータ

Table4.2 Parameter in each design result

	$N_{min} = 1$	$N_{min} = 2$	$N_{min} = 3$	$N_{min} = 4$	$N_{min} = 5$	$N_{min} = 6$	Prius
$V_{pm}[cm^3]$	8.32	5.64	6.31	7.81	5.80	5.76	8.55
$P_{ave}[kW]$	35.3	35.8	34.8	41.3	31.1	31.3	38.7
Fitness	24774	27832	26337	29515	23981	24205	26971

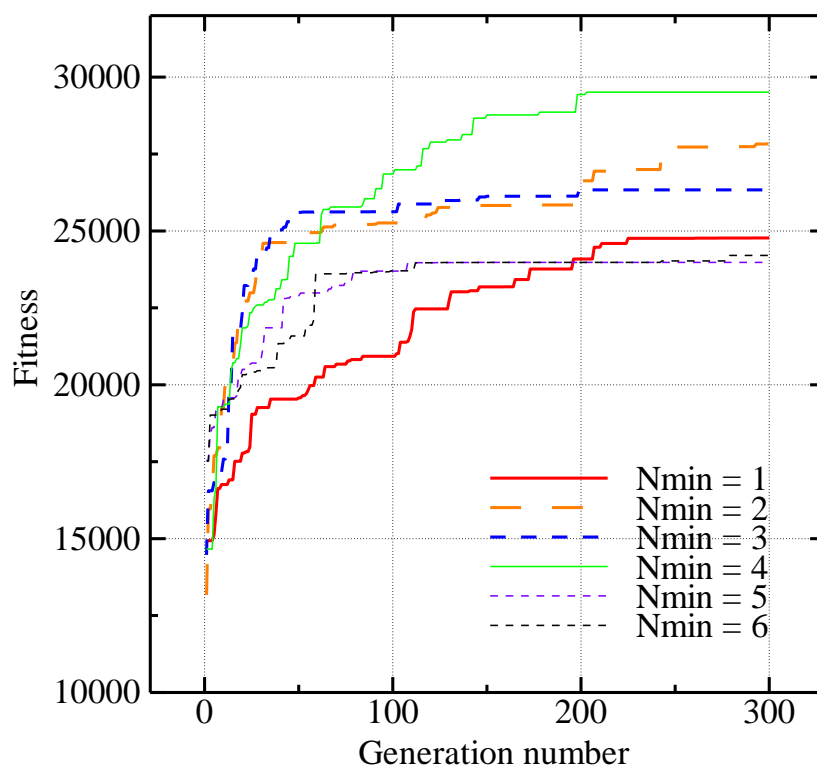


図 4.5 各々の N_{min} 値に於ける適応度関数値の変遷

Fig4.5 Transition of fitness function in each N_{min}

4.2.3 Randseed = 3 の場合

この項では、擬似乱数 Randseed を 3 として最適化を行って得た設計結果について観察する。各 N_{min} 値に於ける設計結果は Fig4.6 (a) ~ (f) に示すとおりである。

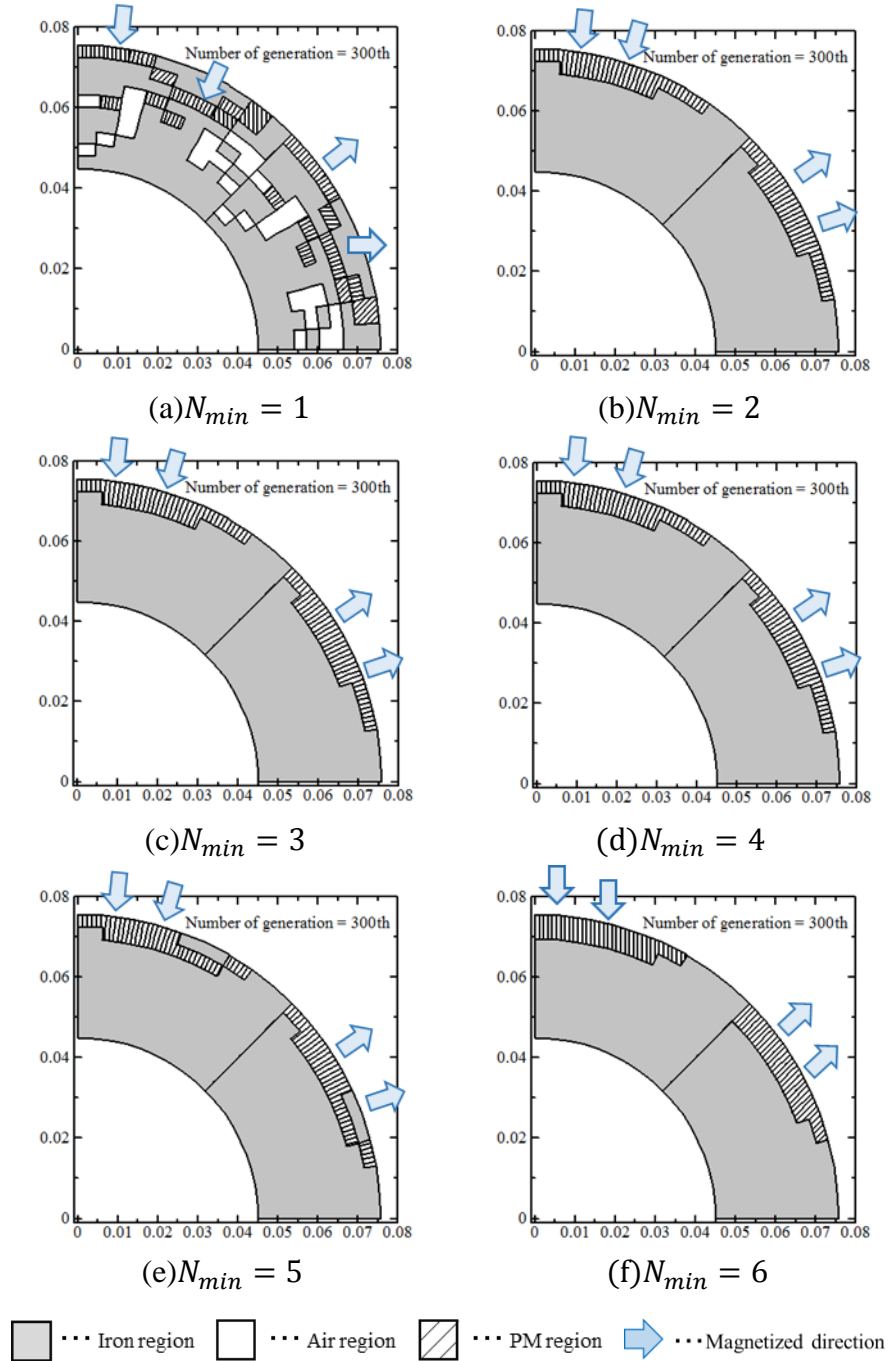


図 4.6 1 回目の GA で得られた設計結果(Randseed = 3)

Fig4.6 Obtained design results at 1st GA (Randseed = 3)

前頁 Fig4.6 にて表したそれぞれの設計結果の性能, 及び適応度関数値の変遷はそれぞれ Table4.3, Fig4.7 に示すようになる。

表 4.3 各設計結果の持つパラメータ

Table4.3 Parameter in each design result

	$N_{min} = 1$	$N_{min} = 2$	$N_{min} = 3$	$N_{min} = 4$	$N_{min} = 5$	$N_{min} = 6$	Prius
$V_{pm}[cm^3]$	6.52	5.80	5.80	5.80	5.24	5.78	8.55
$P_{ave}[kW]$	35.4	33.6	33.6	33.6	33.0	32.7	38.7
Fitness	26555	25966	25966	25966	26016	25292	26971

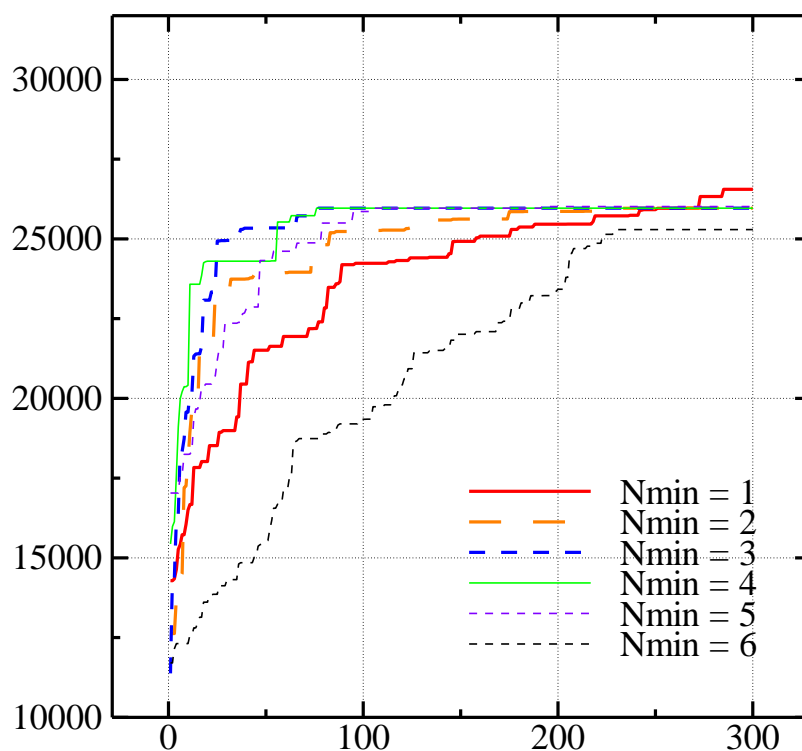


図 4.7 各々の N_{min} 値に於ける適応度関数値の変遷

Fig4.7 Transition of fitness function in each N_{min}

4.2.4 Randseed = 4 の場合

この項では、擬似乱数 Randseed を 4 として最適化を行って得た設計結果について観察する。各 N_{min} 値に於ける設計結果は Fig4.8 (a) ~ (f) に示すとおりである。

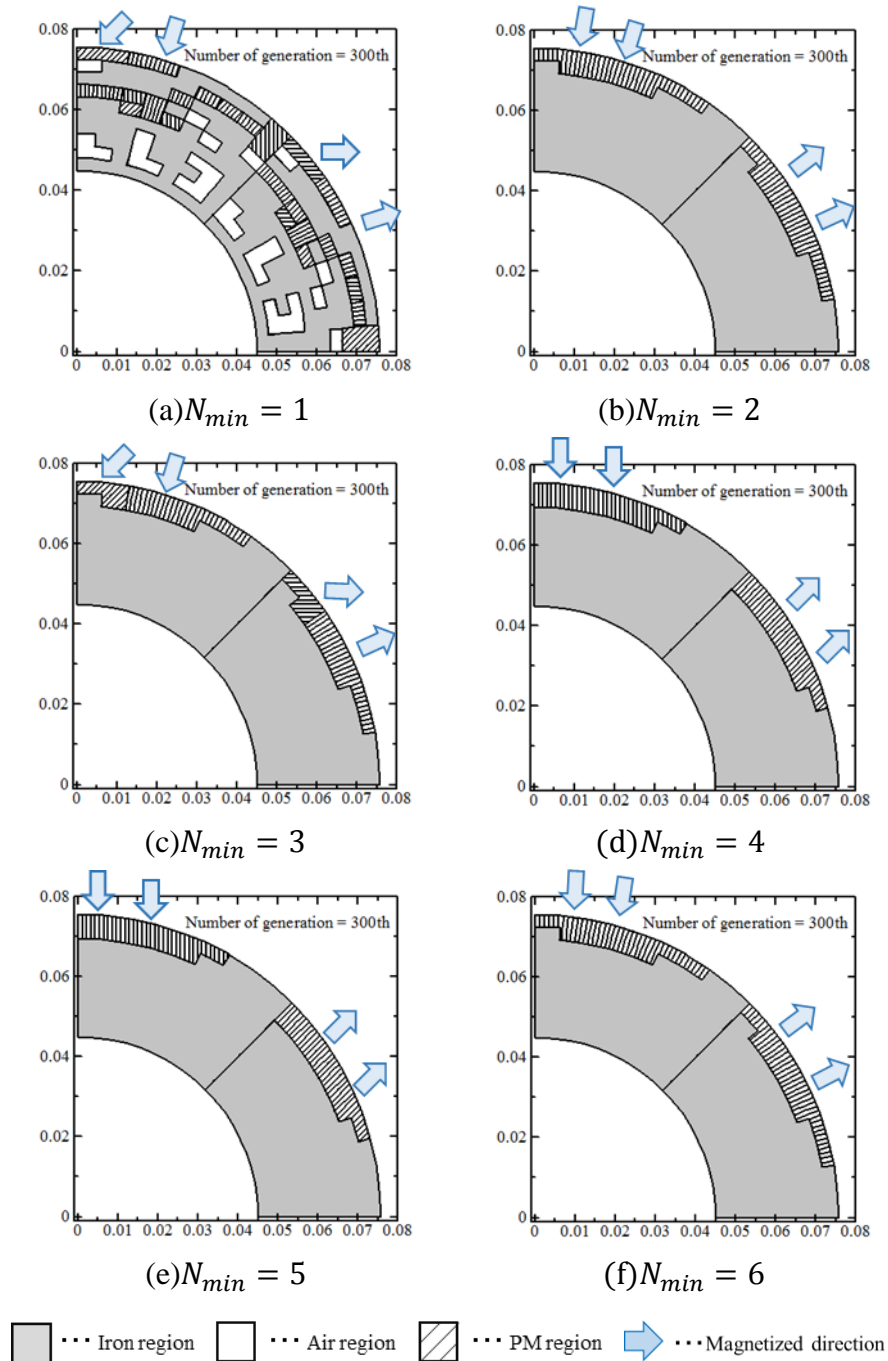


図 4.8 1 回目の GA で得られた設計結果(Randseed = 4)

Fig4.8 Obtained design results at 1st GA (Randseed = 4)

前頁 Fig4.8 にて表したそれぞれの設計結果の性能, 及び適応度関数値の変遷はそれぞれ Table4.4, Fig4.9 に示すようになる。

表 4.4 各設計結果の持つパラメータ

Table4.4 Parameter in each design result

	$N_{min} = 1$	$N_{min} = 2$	$N_{min} = 3$	$N_{min} = 4$	$N_{min} = 5$	$N_{min} = 6$	Prius
$V_{pm}[cm^3]$	8.93	5.80	5.80	5.78	5.78	5.80	8.55
$P_{ave}[kW]$	38.8	33.6	33.9	32.7	32.7	33.6	38.7
Fitness	26687	25966	26182	25292	25292	25966	26971

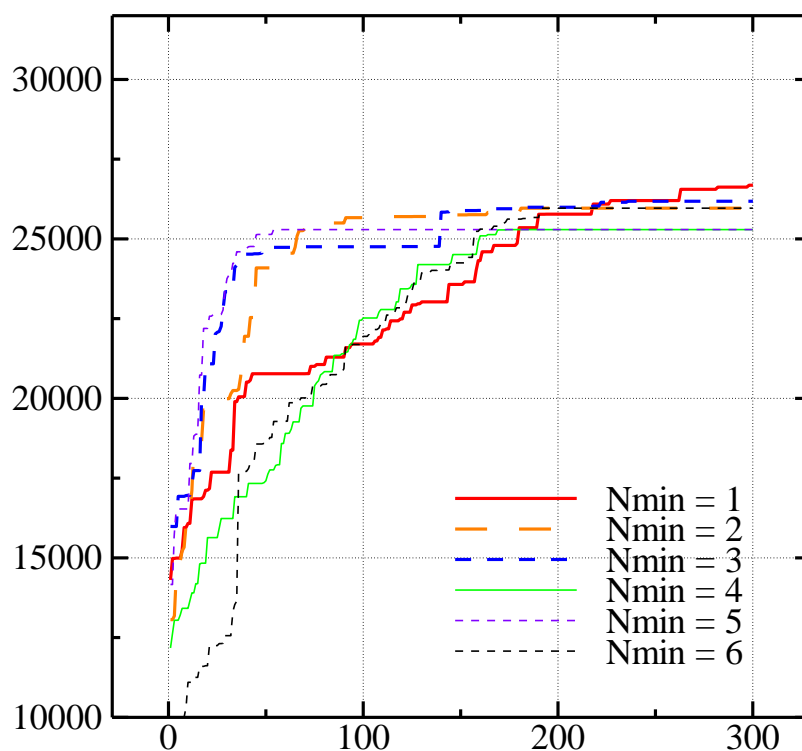


図 4.9 各々の N_{min} 値に於ける適応度関数値の変遷

Fig4.9 Transition of fitness function in each N_{min}

4.2.5 1段階目の最適化に対する考察

この節では、前節 4.2.4 までに掲載した 1 段階目の最適化を行った場合に得られた設計結果、及びそれらの持つ性能や、適応度関数の変遷過程に対しての考察を行っていく。

まずは、他の擬似乱数の場合と比較して高い適応度関数値を多く得られた $\text{Randseed} = 1$ の場合について考察を行う。 $\text{Randseed} = 1$ の場合では、 $N_{\min} = 2 \sim 4$ とした時に $N_{\min} = 1$ や $5, 6$ とした場合よりも大幅に高い適応度を達成していることが分かる。そして、その形状の多くは埋込磁石型の形状を成している。クリーニング法を用いて GA を行う際に適切な N_{\min} 値を設定することにより、不要な微小領域を迅速に排除しながら材質分布の最適化を行うことができるようになるため、最適解へ収束させるための計算回数を削減させることができ、300 世代分の計算で評価の高い個体が得られやすくなったと考えられる。 $N_{\min} = 5, 6$ とした場合、 $N_{\min} = 1 \sim 4$ の場合よりも早く適応度関数の小さい値に収束してしまっている。そして、その形状は表面磁石型となっていることがわかる。 N_{\min} 値を大きく設定しすぎることにより、GA 実行中にトポロジーの変遷方法が強く限定されてしまうようになり、早く収束しやすい一方で、適応度関数は上がりにくくなってしまふことが一因と考えられる。より詳しいことについては次節で説明する。Fig4.2(a)のように、 $N_{\min} = 1$ として最適化を行った場合、煩雑なトポロジーが得られた。 $N_{\min} = 1$ としてクリーニング処理を行わないで GA を行うことにより、材質分布を様々なパターンで細かく解析を行うことが必要となってしまう。結果として鉄心内に小さな磁石の領域が散らばった形状となっていることが分かる。クリーニング法を用いた GA によるトポロジー最適化が適切であったのかを判断するため、設計された回転子の磁石体積と出力電力をプリウスに用いられている PMSG のそれらと比較する。Table4.1 を見ると、 $N_{\min} = 2 \sim 4$ の場合にて、プリウスモデルよりも高い適応度関数を記録することに成功しているが、その中でも $N_{\min} = 2, 3$ の場合には特に優れた値を示しており、互角以上の平均発電力を発生しながら、永久磁石使用量を抑えることに成功したことが確認できた。

次に $\text{Randseed} = 2$ とした場合での結果について考察を行う。この場合に得られた最適設計結果は Fig4.4 に示すとおりであり、それらの持つ性能は Table4.2 のようになる。 $\text{Randseed} = 1$ の場合と同じように、 $N_{\min} = 1$ としてクリーニング処理を行わなかった場合は煩雑な設計結果が出力されている。しかし、 $N_{\min} = 2, 4$ とした場合には V 字磁石配置型の設計結果が得られており、このときにプリウスモデルを超える適応度関数を得ることができた。 $N_{\min} = 3, 5, 6$ の場合は表面磁石配置型の設計結果が得られていたが、この形状のときに得られた平均発電

力値は小さいものが多く、適応度関数値でもプリウスモデルに劣る結果となつてしまった。

次に $\text{Randseed}=3,4$ の場合について考察を行うが、この場合は Fig4.6, Fig4.8 に示されたように $N_{min} = 1$ の場合を除いては、どの N_{min} 値の場合でも似通ったような、あるいは全く同じ表面磁石配置型の回転子形状しか得ることができなかつた。何故、このような結果が出力される場合もあるのかについては、次頁の 4.2.6 項「構造変遷への影響」にて説明する。

4.2.6 構造変遷への影響

前項では、クリーニング法の強度が設計結果にどのように影響するかについて設計結果のみを使って考察を行ったが、この項では設計結果が得られるまでの回転子構造の変遷に焦点を当てて考察を行う。

前項に示された設計結果より、得られる回転子構造は Fig4.10 (a)~(c) のように3種類に大別されることが分かる。表面磁石配置型、V字磁石配置型、非対称な埋込磁石配置型の3つである。尚、この3つの回転子構造はそれぞれ $Randseed = 1$ の場合で $N_{min} = 3, 4, 6$ として得られた設計結果を例として扱い、性能は Table4.5 に再掲する。(a)タイプのような非対称な埋込磁石配置型は $Randseed = 1$ で $N_{min} = 2, 3$ の場合で観測できた。(b)タイプのようなV字磁石配置型については、 $N_{min} = 2 \sim 4$ の場合に見られることがあった。(c)タイプのような表面磁石配置型は、今回掲載した設計結果の中では最も多く観測された設計タイプだが、これは特に5,6などの N_{min} 値が大きい場合に見られやすかった。適応度関数の観点から比較すると、(a)タイプのものが最も優れていて、次いで(b), (c)タイプのモデルと続いていく。

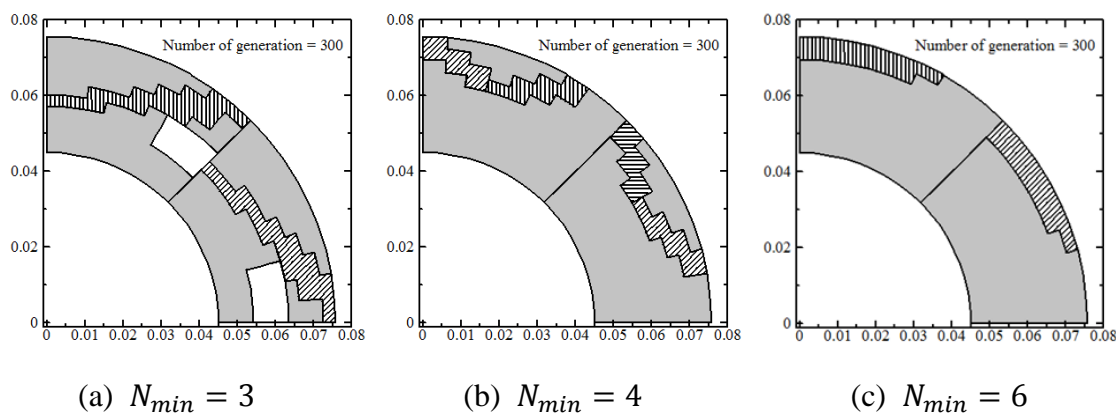


図 4.10 異なる N_{min} 値で得た設計結果($Randseed = 1$)

Fig4.10 Designed rotor structures for different N_{min} ($Randseed = 1$)

表 4.5 それぞれのタイプが持つパラメータ

Table4.5 Parameters of each types

	$N_{min} = 3$	$N_{min} = 4$	$N_{min} = 6$
$V_{pm}[cm^3]$	7.59	5.80	5.78
$P_{ave}[W]$	38.4	35.7	29.5
<i>Fitness</i>	27650	26824	22763

Fig4.10 のような各設計結果を得る際に、最初に生成される 1 世代目の設計状態を Fig4.11 に示す。 $N_{min} = 3$ の場合は、クリーニング処理の強度が弱い為、細かいクラスターも幾つか点在しているが、 $N_{min} = 4$ 以上の場合からは小さいクラスターが少なくなり、大きいクラスターのみで形状を構成する傾向が強くなる。特に $N_{min} = 6$ の場合、永久磁石領域のクラスターは大きいサイズのもの 1 つだけとなっている。尚、 $N_{min} = 3$ の場合では Fig4.11(b) に示す 40 個目の個体より、Fig4.11(a) に示す 33 個目の個体の適応度関数値が最も高いために、形状の変遷及び最終結果に影響を与えている。

次に、Fig4.11 (a),(c),(d) に示す第 1 世代の形状変遷を Fig4.12 に示す。Fig4.12 は、それぞれの N_{min} 値を用いて最適化設計を行った場合の、最終設計結果に近い形状を得るに至った世代を示したものである。 $N_{min} = 3$ の場合は 51 世代目、 $N_{min} = 4$ の場合は 46 世代目、 $N_{min} = 6$ の場合は 28 世代目となる。例外も一部あるが、50 世代目前後になると、設計結果に近い状態が得られ始め、100 世代目になる頃には最終結果とほぼ同様な設計結果が得られていた。Fig4.12 (a) に注目すると、特徴として、用いる永久磁石の磁化方向種類が 1 種類であること、回転子に対して斜めに切れ込みを入れたような永久磁石分布領域が挙げられる。

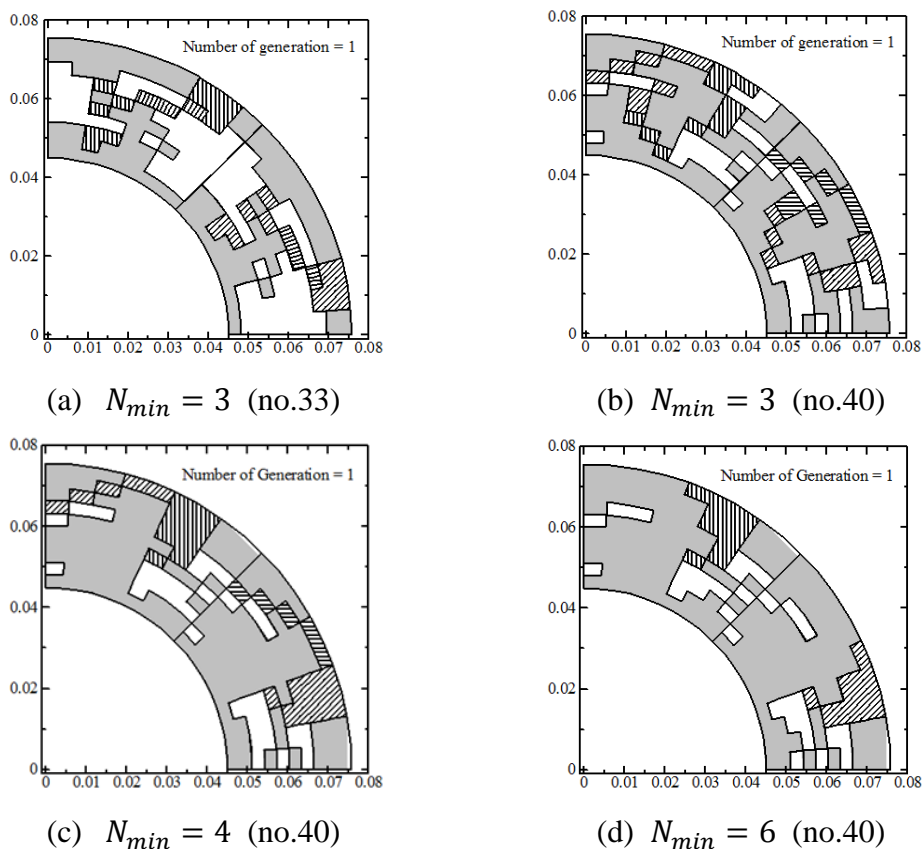


図 4.11 1 世代目での回転子構造

Fig4.11 Rotor structures at 1st generation

回転子形状の変遷について考察する。Fig4.11 (a)に示されているように、第 1 世代の形状では磁化方向の異なる 2 種類の永久磁石が分布し、且つ Fig4.11 (c), (d)と比べて内側に永久磁石領域が分布していることが目立つ。しかし、変遷していく過程によって使用量が少なかった方の永久磁石は淘汰され、同じ磁化方向を持つ永久磁石のみが残ってくる。切れ込みを入れたような永久磁石分布の仕方については、第 1 世代の形状が強く影響している。Fig4.11 (a)の $N_{min} = 3$ の場合では、第 1 世代の形状の時点で回転子内側に、表面に位置するものと同じような磁化方向磁石が分布している。この内側と表面側に分布している磁石が少しずつ繋がりながら、Fig4.12(a)の様な変遷を経て、Fig4.10(a)のような最終設計結果が得られた。 $N_{min} = 4$ の場合は、第 1 世代の時点で磁化方向の異なる 2 種類の永久磁石が分布しているが、これが Fig4.12 (b)のように変遷を遂げながら、永久磁石使用量を抑えるようにして、結果として Fig4.10 (b)が得られるようになる。最後に Fig4.11 (b)の $N_{min} = 6$ の場合については、第 1 世代の時点で同じ磁化方向の永久磁石しか用いておらず、且つ $N_{min} = 3$ の場合と異なり、内側へ永久磁石領域が切れ込むことも無い。その条件下で適応度関数に優れた設計を行おうとすると、磁束を効率よく得やすくする為、Fig4.12 (c)の様に変遷しながら、Fig4.10 (c)の表面磁石配置型の設計結果へと収束していったと考えられる。

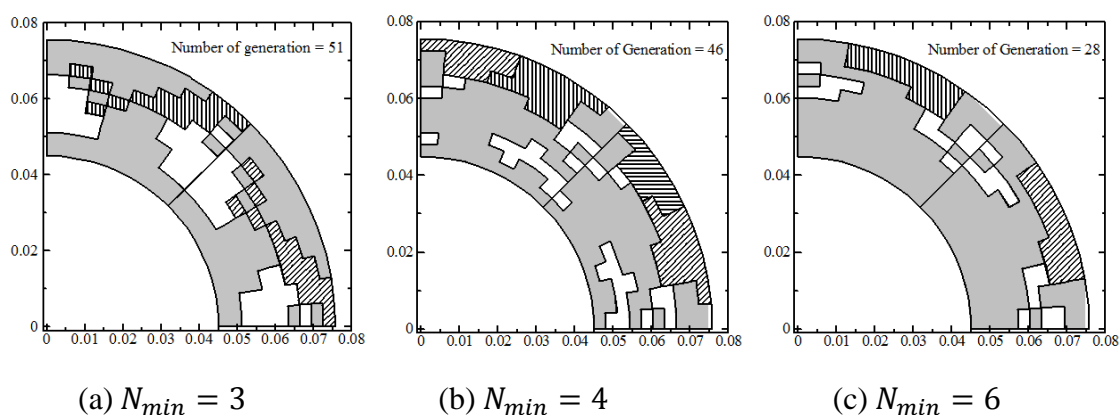


図 4.12 最終形状に近い形状になったときの回転子構造

Fig4.12 Rotor structures when similar shape to those shown in Fig2 is obtained

Randseed = 3 の場合については、このときに 1 世代目で生成された個体の材質分布は Fig4.13(a)に示したようなものが多く、どの N_{min} 値に於いても煩雑になりやすい傾向があった。尚、Fig4.13 に示される例は $N_{min} = 3$ の時のものである。使われている磁石種類に注目してみると、R 方向磁化磁石が使われている比率が非常に高く、設計結果を見ても R 方向磁化磁石を用いた表面磁石配置型が多かった。1 世代目の形状の影響から Fig4.10, Fig4.12 に示す(a),(b)タイプのような

変遷をすることができず，Fig4.13(b)のように消去法で(c)タイプのような変遷をしたものと考えられる。Randseed = 4 の場合でも，磁石材質の違いこそあれど1世代目で生成される形状や，そこからの変遷の仕方としては(c)タイプのようになっており，結果として表面磁石配置型が多くなったものと考えられる。

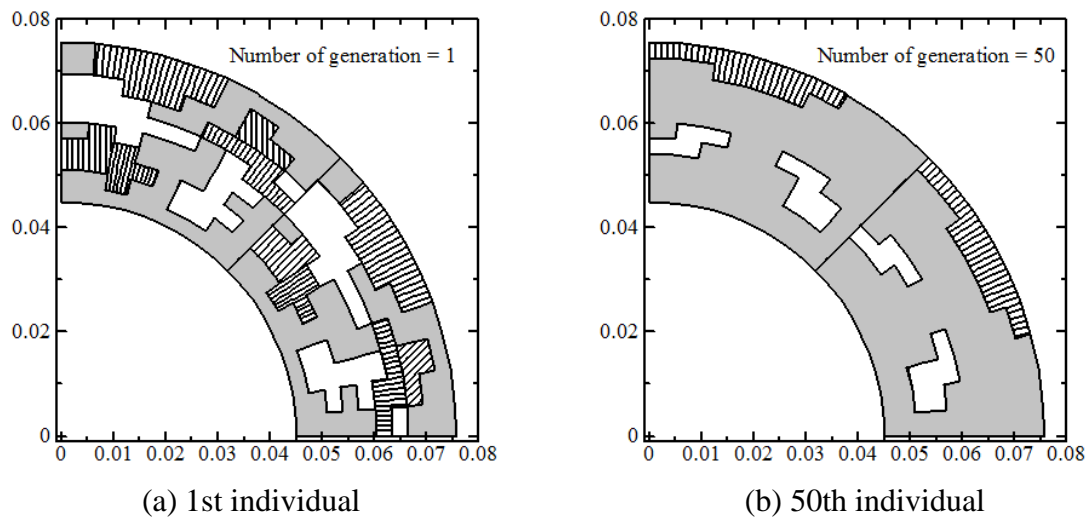


図 4.13 Randseed = 3 にて多く見られた変遷

Fig4.13 The transition which was seen many times in the case of Randseed = 3

4.3 最適化設計(2段階目)

4.3.1 設計結果と考察

1段階目の最適化は設計領域内のセル数を90個と設定し、世代数は300として行ったが、これはやや粗さが残した状態での設計となっていた。この節に於いては、更なる性能向上を図るために設計領域を微細化することにより、詳細な回転子トポロジーを得ることを目的とする。前節に於いて得られた最終世代のトポロジーを基として再度最適化を行っていくが、この2回目の最適化では、設計領域を径方向に30分割、周方向に27分割して810個のセルで表現することによって、より詳細な設計結果を得ることを狙う。尚、設計領域の微細化に伴って設計の幅が広がることが考えられるため、2回目のGAに於いては600世代に亘って最適化を行っていく。つまり、301~900世代目の回転子トポロジーを得ることになる。得られた設計結果は次頁のFig4.14(a)~(f)に示し、それらの持つ性能と適応度関数の変遷はTable4.6, Fig4.15に示す。なお2段階目の最適化は、最も得られた形状の種類も豊富で、優れた形状も多かったRandseed = 1の場合のみにて行っていく。

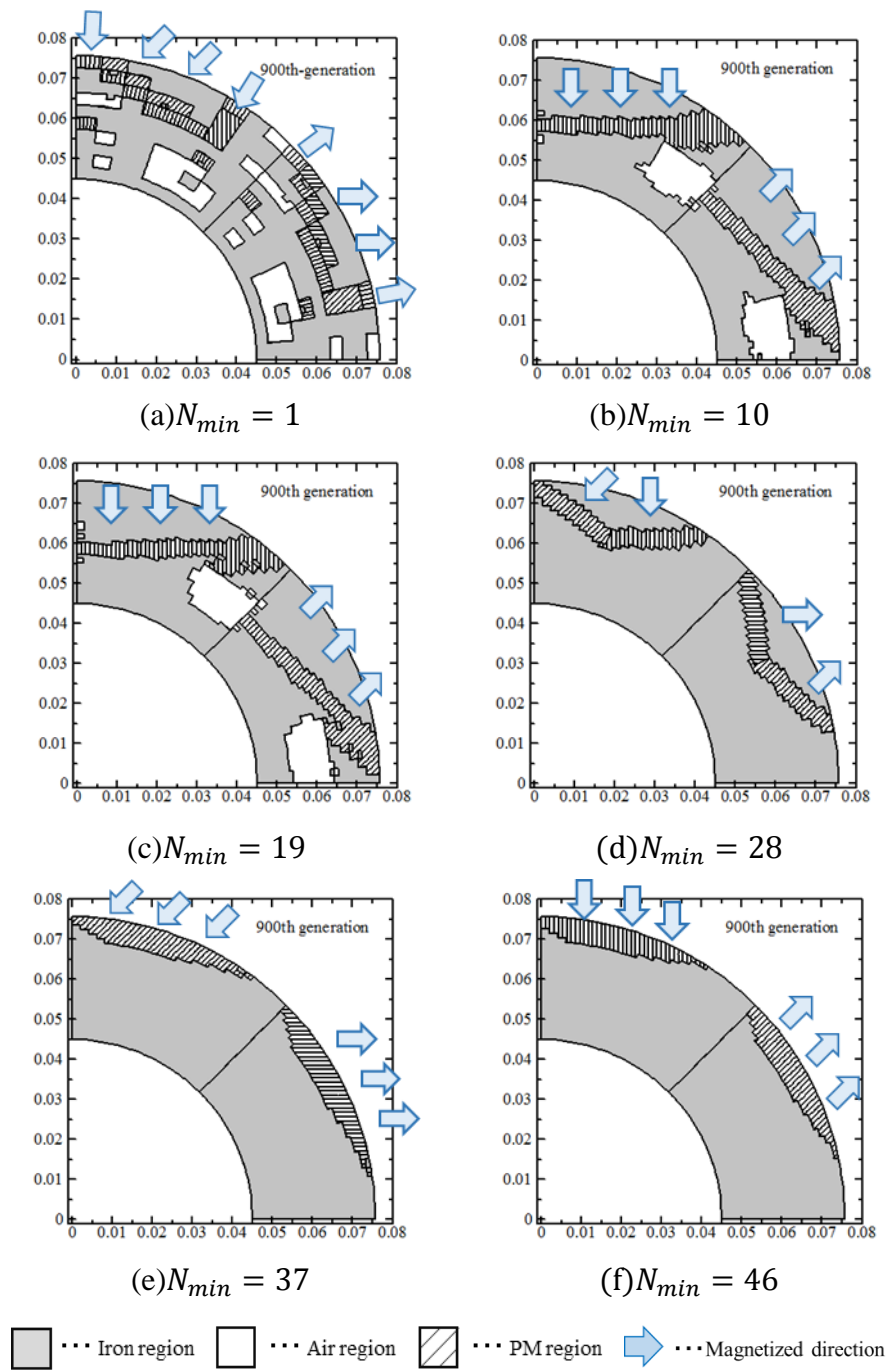


図 4.14 2 回目の GA で得られた設計結果
 Fig4.14 Obtained design results from 2nd GA

表 4.6 各設計結果の持つパラメータ

Table4.6 Parameter in each design result

	$N_{min} = 1$	$N_{min} = 2$	$N_{min} = 3$	$N_{min} = 4$	$N_{min} = 5$	$N_{min} = 6$	Prius
$V_{pm}[cm^3]$	7.73	7.11	6.69	5.60	5.63	5.33	8.55
$P_{ave}[kW]$	37.3	43.9	43.2	40.9	31.7	32.6	38.7
Fitness	26831	32188	32225	31820	24641	25620	26971

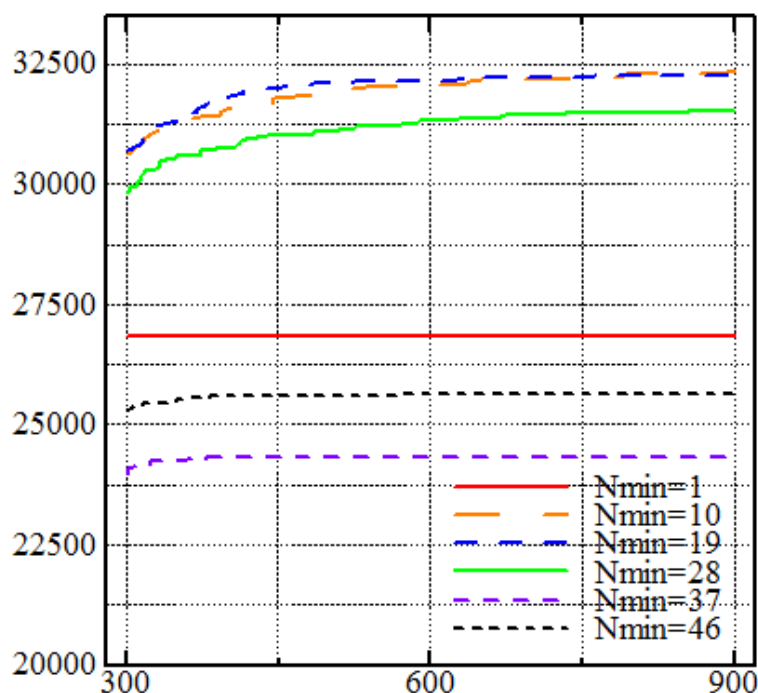


図 4.15 各々の N_{min} 値に於ける適応度関数値の変遷

Fig4.15 Transition of fitness function in each N_{min}

各設計結果を見ると 1 回目の GA 結果である 300 世代目のトポロジーを基として、再度最適化が行われていることが分かる。1 段階目の GA で得られた結果と 2 段階目の GA で得られた結果について、平均発電電力と永久磁石量を比較する。平均発電電力に関しては、改善された比率は良くても 1% 前後に収まっていた。このことから、発電量に関しては基のトポロジーがどのようなものであるかという方の影響が大きく、詳細設計をやり直したところで大きな改善は少ないと分かった。しかし、永久磁石使用量に関しては比較的大きな改善が見られ、 $N_{min} = 19$ の場合では発電量を 1% 上昇させながら 8.8% の永久磁石使用量の削減が見られた。詳細設計をすることによって、発電電力に寄与しない磁石領域を除去でき、形状をスムーズにすることができたためと考えられる。

4.3.2 プリウスモデルとの比較

これまでに、PMSGの回転子トポロジーの最適化を行ってきたが、この項では最も適応度が高かった $N_{min} = 3$ 、つまり2回目のGAでの $N_{min} = 19$ に於ける発電機特性をプリウスモデルの特性と比較する。2つの回転子構造を以下のFig4.16に再掲する。

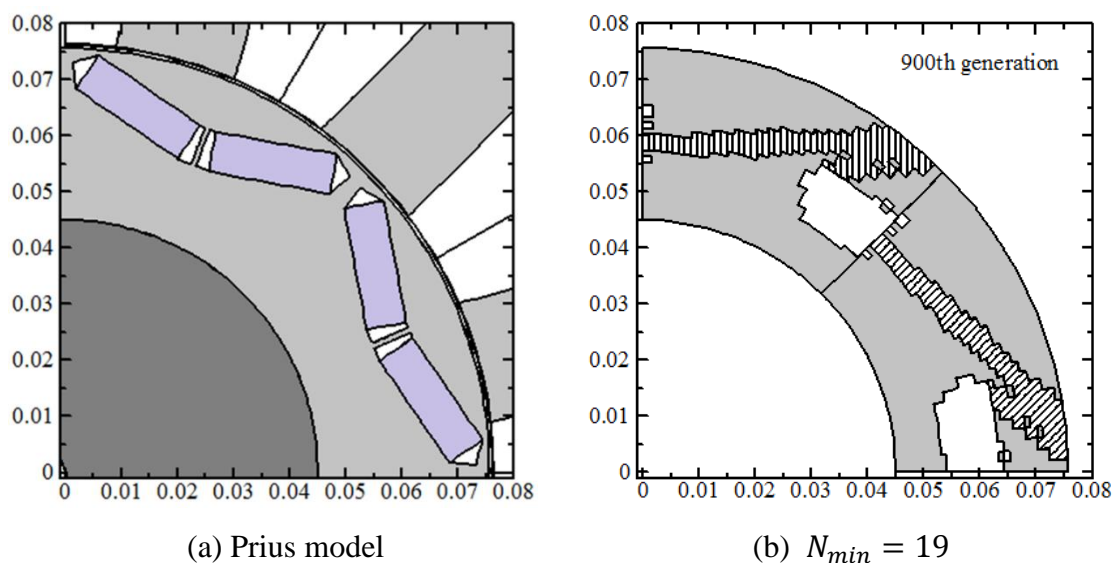


図 4.16 プリウスモデルと $N_{min} = 19$ モデルの比較

Fig4.16 Compare the Prius model and $N_{min} = 19$ model

表 4.7 プリウスモデルと $N_{min} = 19$ モデルのパラメータ比較

Table4.7 Compare the parameter which have Prius model and $N_{min} = 19$ model

	Prius	$N_{min} = 19$
$V_{pm}[\text{cm}^3]$	8.55	6.69
$P_{ave}[\text{kW}]$	38.7	43.2
Fitness	26971	32225

更に、それぞれの持つ発電電力波形を次頁の Fig4.17 にて示す。

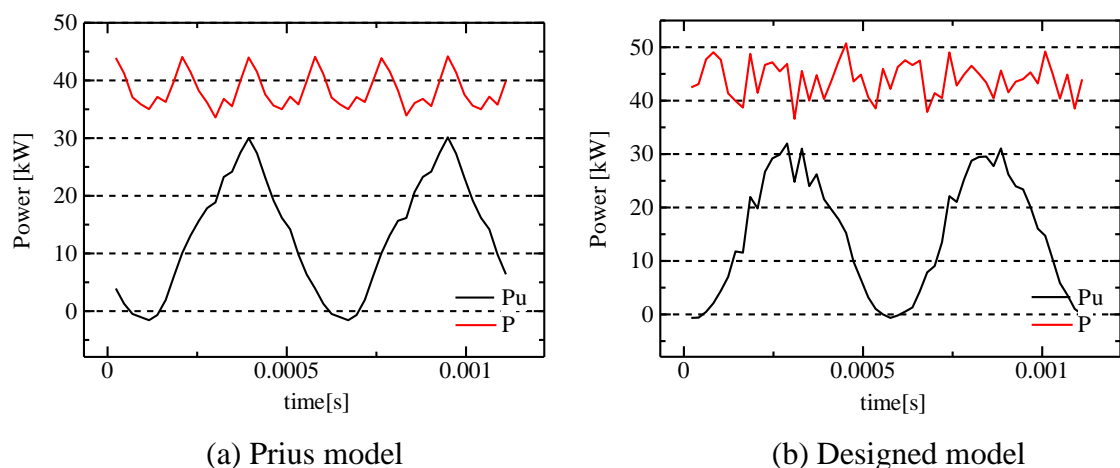


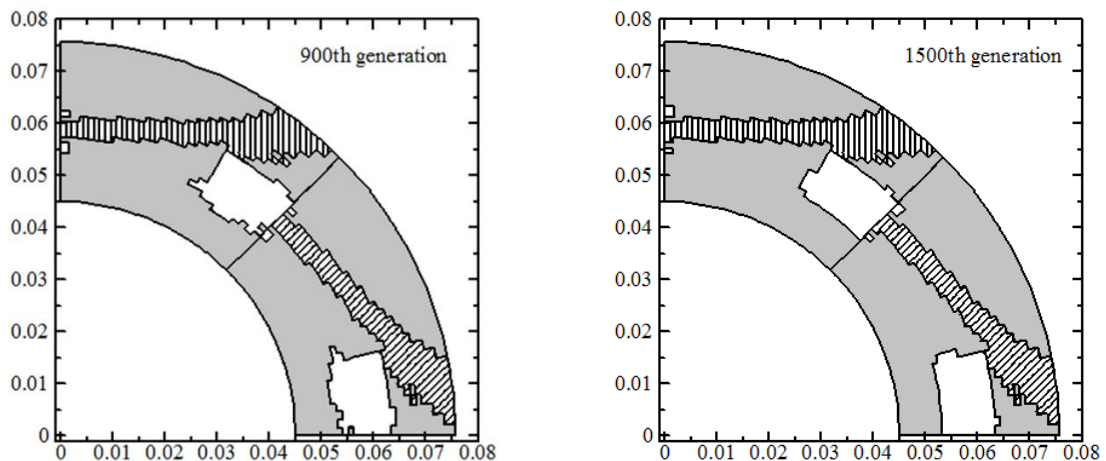
図 4.17 発電電力波形の比較
 Fig4.17 Comparison of output electric power

ここで、プリウスモデルでは、3相分の発電電力が最大になるように出力の正弦波電流の位相を選んだ場合の結果である。それに対して設計結果においては、1極内で対称としていないため、電流位相がほぼ0のとき発電電力が最大となっていた。設計機の平均発電電力が優れているのが確認できたが、電力リップに関してはプリウスモデルの電力波形が比較的安定しているのに対して、設計機では短い周期で多くのリップが発生していた。これに関してはやや複雑な回転子形状が影響しているものと考えられ、実際に発電機を製作するに当たっては製作容易さを考慮に入れた再設計が必要となるだろう。

4.3.3 最適化終了の停止基準について

1段階目の最適化で300世代分の最適化を行い、更にそこで得た設計結果を基にしてもう600世代分の最適化を行った。しかしこれに関して、これ以上の最適化を行う必要はあるのか、停止基準として900世代は正しいのかというご質問をたびたび頂いた。そこでこの項では、2段階目の最適化で行う世代数を大幅に増やし、1200世代分の最適化を行った結果について考察を行う。つまり、最終的に得られる設計結果は世代数にして300世代分 + 1200世代分で1500世代目の結果という事になる。尚、ここで比較のために扱うモデルは $\text{Randseed} = 1$, $N_{\min} = 10$ の場合での最適設計結果となる。

1500世代目の最適化を行った結果、以下 Fig4.18(b)に示すような設計結果が得られた。Fig4.18(a)は900世代までで最適化を行った場合での設計結果を再掲したものである。



(a) Individual of the 900th generation

(b) Individual of the 1500th generation

図 4.18 900 世代までの設計結果と 1500 世代までの設計結果の比較

Fig4.18 Comparison of design results in the 900 generation and 1500 generation

1500 世代目の設計結果の持つパラメータと、900 世代目の設計結果の持つパラメータを比較したところ設計領域内で使用される永久磁石使用量 V_{pm} は 7.11cm^3 から 7.10cm^3 へ僅かに減少し、平均発電力 P_{ave} は 43.9kW から 44.0kW へこれも僅かに改善された。適応度関数 Fitness は 32188 から 32379 へと改善され、改善率は約 0.59% であった。結論とすると、改善はされるものの改善の幅は非常に小さく、計算時間を 2 倍程まで掛けてまでやる必要性は極めて小さいものと考えられる。

5 製作容易さを考慮した設計

5.1 設計概念について

前節までで、クリーニング法を導入した GA を用いて回転子構造を最適化した結果、最終的には $\text{Randseed}=1$ で $N_{\min}=19$ の場合に、比較対象であるプリウスモデルよりも少ない永久磁石使用量で、高い平均発電力を発揮する設計結果を得ることができた。しかし、得られた設計結果そのままでは、細かい部分に於いてまだ複雑な設計が行われており、実際に製作をするにあたっては、より容易な設計構造へとコンバートする必要があるという判断に至った。この節では、如何にして製作容易さを考慮に入れた設計を行っていくのかについての概要を説明する。

製作容易さを考慮して設計を進めるとなると、設計領域内に存在していた永久磁石領域の形状を直方体や正方形などの単純な形状を使い、極力簡素に表現できるようにする必要がある。今回は、基の形状の永久磁石領域分布を 1 個の長方形で表現することとした。また、フラックスバリアの役割を果たしていたと思われる空気領域に関しては、今回は簡単のために四角形で表現することとした。イメージについては、以下の Fig5.1 に示すようになる。

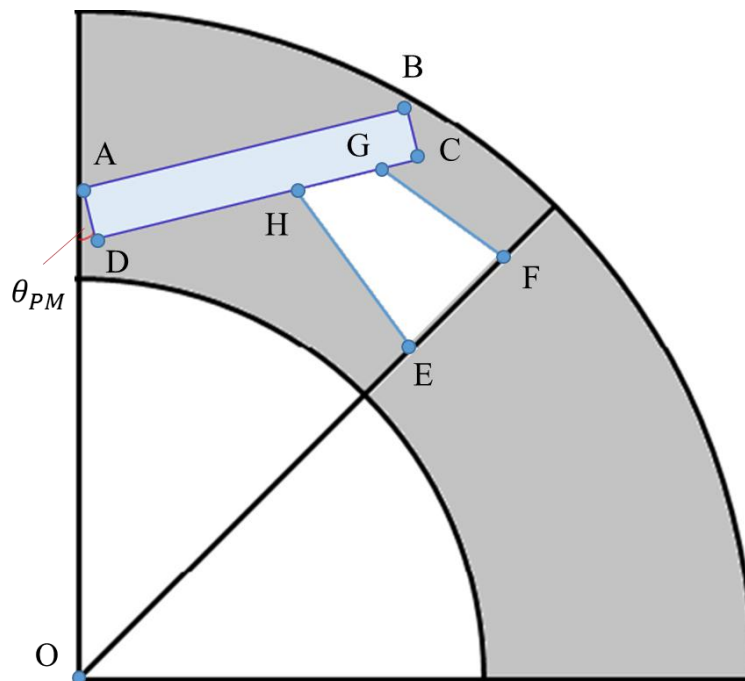


図 5.1 製作容易さを考慮した設計案

Fig5.1 Design proposal in consideration of ease of manufacture

前頁の Fig5.1 に示されたように、1 つずつ存在する永久磁石領域と空気領域は A~H の 8 つの点で座標を表現することとなり、A,B,C,D 点の 4 点が永久磁石領域の 4 隅を、そして E,F,G,H の 4 点が空気領域の 4 隅の座標を表現する。座標位置は計算で算出する必要があるが、その為のパラメータは以下のように定めた。尚、 r_X は点 X と原点 O の直線距離を示し、 θ_X は点 X 座標がどの角度に位置するのを示すものであり、他には S_{PM} が設計領域内の永久磁石使用量、 L_{PM} が永久磁石領域の長辺の長さ、 T_{PM} が永久磁石領域の短辺の長さ、 d_1 が点 C と点 G の距離、 d_2 が点 C と点 H の距離である。

Constant: $r_B, \theta_A, \theta_E, \theta_F, S_{PM}$

Variables: $r_A, r_E, r_F, \theta_B, d_1, d_2$

Dependence: $r_C, r_D, r_G, r_H, \theta_C, \theta_D, \theta_G, \theta_H, L_{PM}, T_{PM}$

定数が 5 つあるが、 r_B は比較対象のプリウスモデルと合わせるために 74.61mm とし、 S_{PM} もプリウスモデルに合わせて $3.14815cm^2$ とする。 $\theta_A, \theta_E, \theta_F$ はそれぞれ設計の簡単化のため $0^\circ, 45^\circ, 45^\circ$ とする。変数は 6 つあるが、これらの値を変更しながらプリウスモデルに勝る設計図を探索することとなる。残りの 10 個の数字は定数、及び変数に依存して導き出される数となっている。次に、どのようにして座標位置が導き出されるのかの導出式を以下に示す。尚、以下の導出式は $45^\circ \sim 90^\circ$ の領域にて用いられるものとし、設計上の諸条件は固定子電流 $I_e = 80A$ 、回転数 $13500min^{-1}$ とする。

$$x_A = r_A \cos \theta_A, y_A = r_A \sin \theta_A \quad (1)$$

$$x_B = r_B \cos \theta_B, y_B = r_B \sin \theta_B \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} x_C \\ y_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_{PM} & -\sin \theta_{PM} \\ \sin \theta_{PM} & \cos \theta_{PM} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_B - x_B \\ y_B - T_{PM} - y_B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_B \\ y_B \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$x_C = -\sin \theta_{PM}(-T_{PM}) + x_B$$

$$y_C = \cos \theta_{PM}(-T_{PM}) + y_B$$

$$T_{PM} = \frac{S_{PM}}{L_{PM}} \quad (4), L_{PM} = \sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} x_D \\ y_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_{PM} & -\sin\theta_{PM} \\ \sin\theta_{PM} & \cos\theta_{PM} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_A - x_A \\ y_A - T_{PM} - y_A \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_A \\ y_A \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$x_D = -\sin\theta_{PM}(-T_{PM}) + x_A$$

$$y_D = \cos\theta_{PM}(-T_{PM}) + y_A$$

$$x_E = r_E \cos\theta_E = \frac{r_E}{\sqrt{2}}, y_E = r_E \sin\theta_B = \frac{r_E}{\sqrt{2}} \quad (7)$$

$$x_F = r_F \cos\theta_F = \frac{r_F}{\sqrt{2}}, y_F = r_F \cos\theta_F = \frac{r_F}{\sqrt{2}} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} x_G \\ y_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta'_{PM} & -\sin\theta'_{PM} \\ \sin\theta'_{PM} & \cos\theta'_{PM} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c - x_c \\ y_c - d_1 - y_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$x_G = -\sin\theta'_{PM}(-d_1) + x_c$$

$$y_G = \cos\theta'_{PM}(-d_1) + y_c$$

$$\text{※ } \theta'_{PM} = 270^\circ + \theta_{PM}$$

$$\begin{bmatrix} x_H \\ y_H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta'_{PM} & -\sin\theta'_{PM} \\ \sin\theta'_{PM} & \cos\theta'_{PM} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c - x_c \\ y_c - d_2 - y_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$x_H = -\sin\theta'_{PM}(-d_2) + x_c$$

$$y_H = \cos\theta'_{PM}(-d_2) + y_c$$

次節では、ここで説明した概要にのっとして設計された回転子構造の持つ特性やパラメータを、プリウスモデルと比較する。

5.2 設計結果

この節では、製作容易さを考慮して得た設計モデルを示し、その回転子形状が持つパラメータや波形特性についてプリウスモデルと比較していく。前節にて紹介したように変数は6通りあるが、この変数群をそれぞれ $r_A = 57.5\text{mm}$, $\theta_B = 53.5^\circ$, $r_E = 55.0\text{mm}$, $r_F = 65.0\text{mm}$, $d_1 = 12.5\text{mm}$, $d_2 = 17.5\text{mm}$ とした場合に得られた Fig5.2 に示すような設計モデルにて、優れた結果を観測することができたため、このときのモデルをプリウスモデルと比較していく。

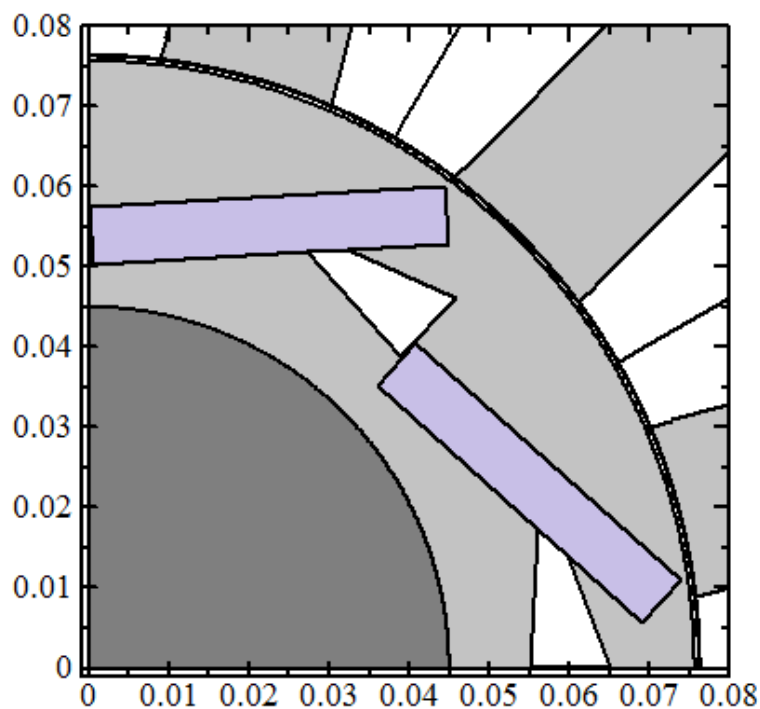


図 5.2 製作容易さを考慮した上での設計結果
Fig5.2 Design results with ease of manufacturing

回転子領域内にて、白色領域が空気領域を、灰色が鉄領域を、青色領域が永久磁石領域を表している。前節にて説明したとおり、設計領域内に直方体の永久磁石領域が1つ、フラックスバリアの役割をする四角柱の空気領域が1つ存在していることがわかる。尚、今回この設計結果を得るために、変数群の値を変更しながら各結果を観察する必要があったが、今回は手動で変更しながら結果を観察した。次の頁からは、プリウスモデルと設計モデルの持つそれぞれの波形特性を示し、これについての考察を行う。

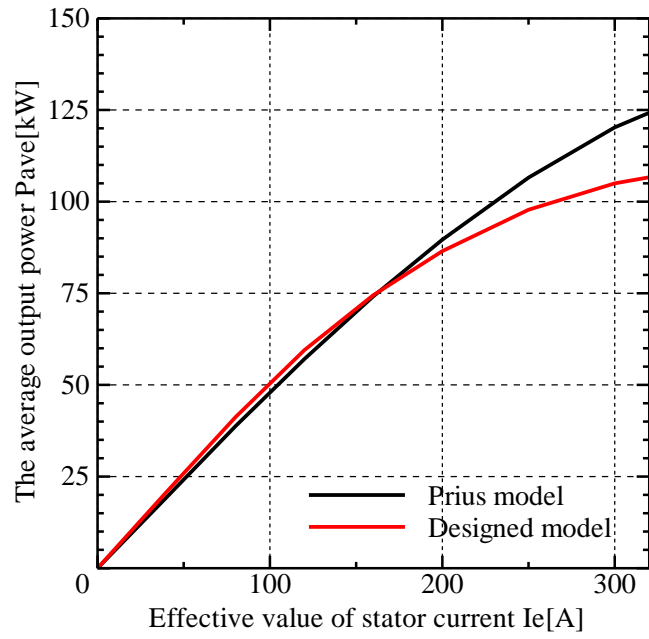


図 5.3 平均出力 P_{ave} -固定電流 I_e 特性の比較
 Fig5.3 Comparison of output power characteristics

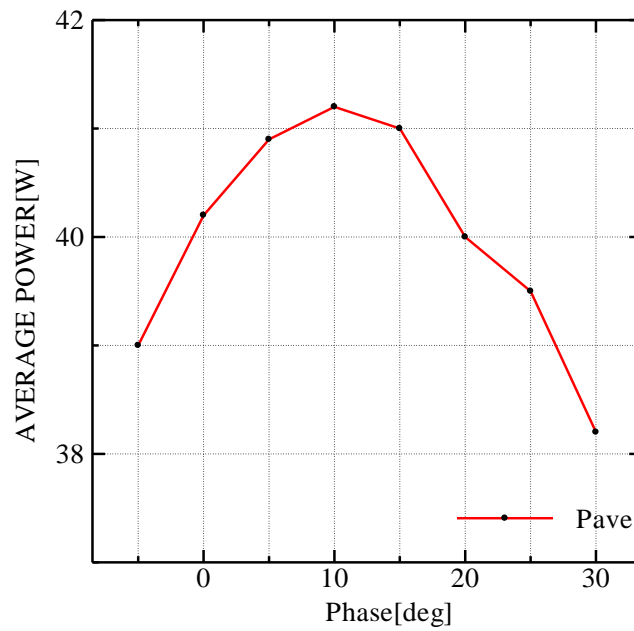
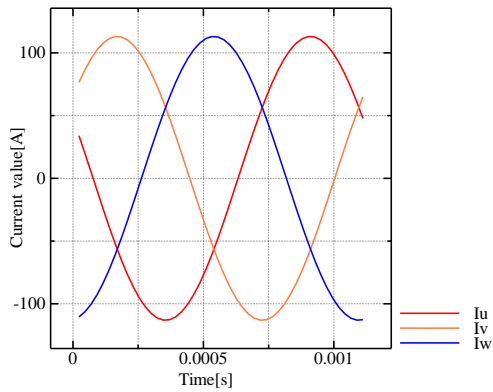
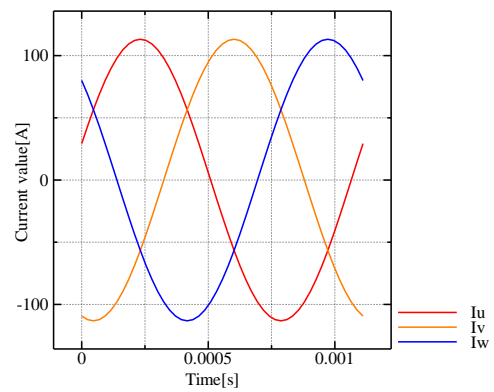


図 5.4 電流位相による出力電力の変化
 Fig5.4 Transition of output power by current phase



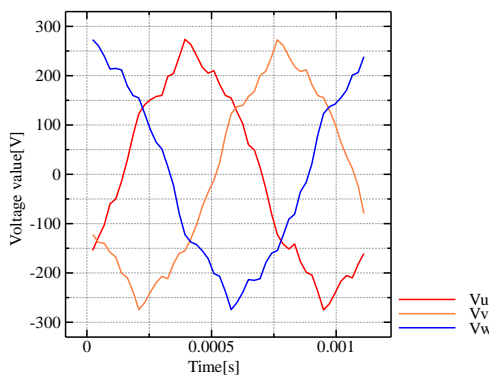
(a) Prius model



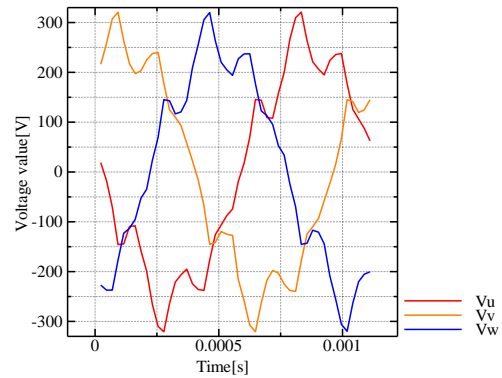
(b) Designed model

図 5.5 各相の電流波形特性

Fig5.5 Current waveform characteristics in each phase



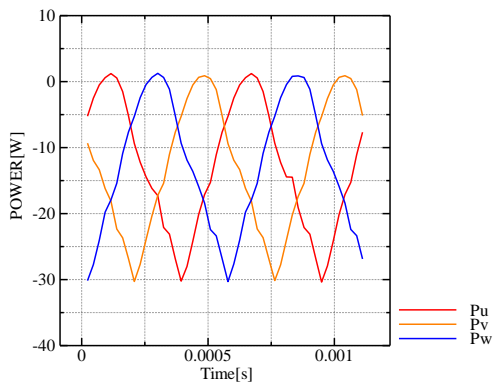
(a) Prius model



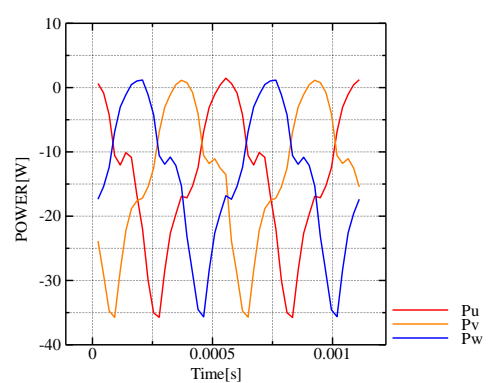
(b) Designed model

図 5.6 各相の電圧波形特性

Fig5.6 Voltage waveform characteristics in each phase



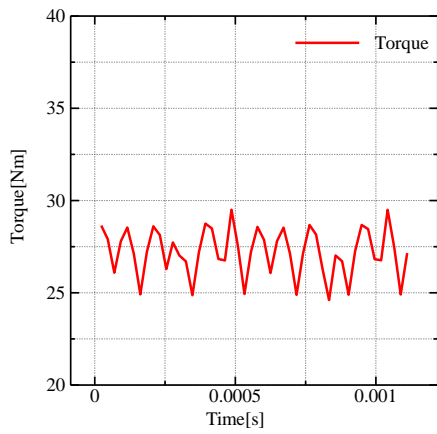
(a) Prius model



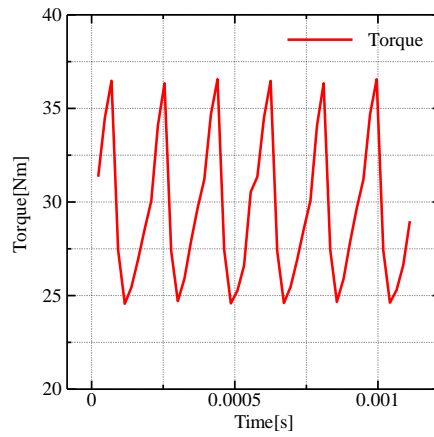
(b) Designed model

図 5.7 各相の電力波形特性

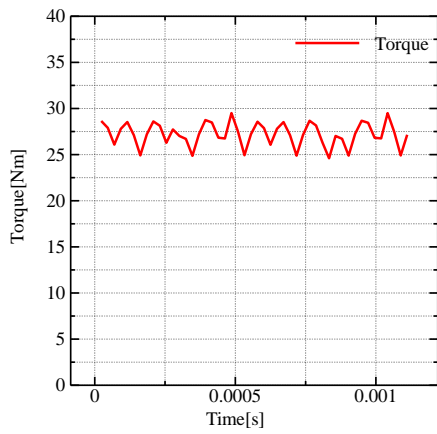
Fig5.7 Power waveform characteristics in each phase



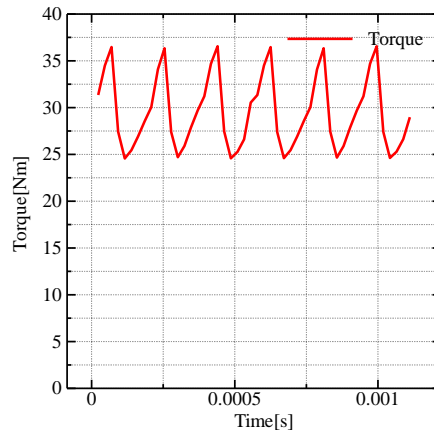
(a) Prius model



(b) Designed model



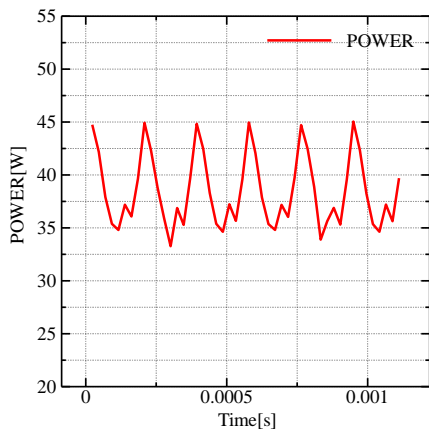
(c) Prius model
(Different ordinate value)



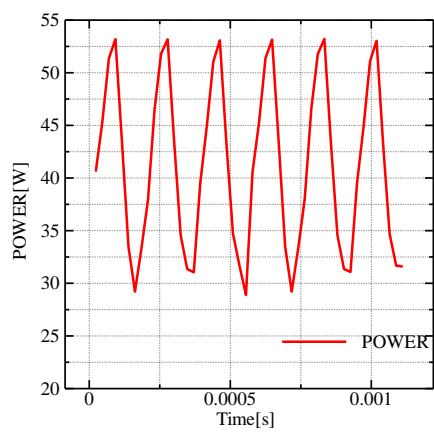
(d) Designed model
(Different ordinate value)

図 5.8 トルク波形特性

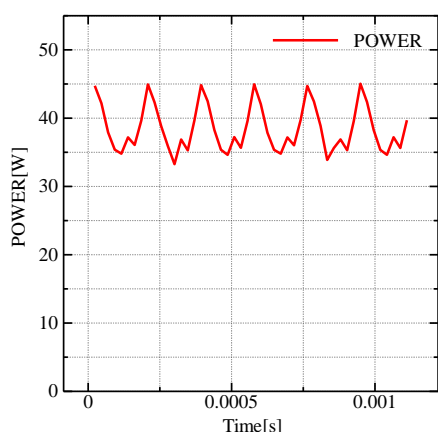
Fig5.8 Torque waveform characteristics



(a) Prius model

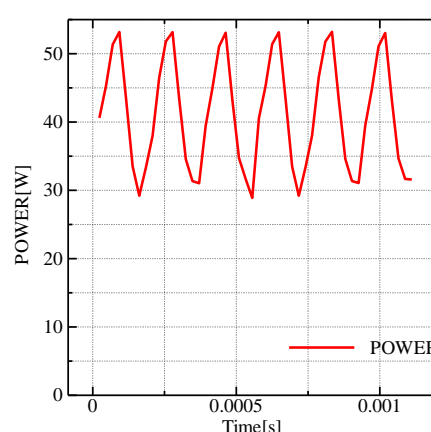


(b) Designed model



(c) Prius model

(Different ordinate value)



(d) Designed model

(Different ordinate value)

図 5.9 出力波形特性

Fig5.9 Output waveform characteristics

Fig5.4 に注目すると、永久磁石領域やフラックスバリア領域をうまく配分できたためか、得られる電圧値が大きくなっていることが分かる。すると必然的に、Fig5.5 に示したように各相の電力波形の振幅も大きくなった。しかし、Fig5.8 から分かるようにトルク脈動の幅は設計モデルの方が大きくなってしまい、プリウスモデルが 29.5Nm に対して、設計モデルでは 36.5Nm になってしまった。出力波形特性は Fig5.9 に示すとおり。結果としては、プリウスモデルと同等の永久磁石量という条件下で、位相角 10deg の時に平均発電力 P_{ave} を 41.2kW 発揮することができるモデルを設計することができ、プリウスモデルの 38.7kW と比較して、6.46%の改善に成功した。

尚、回転子全体での鉄の使用量は設計モデルのほうがプリウスモデルよりも 97.8g 少なかった為、それだけの軽量化に成功したことになる。これは、鉄の単位重量あたりの価格を¥22/kg と仮定すると、315,669 台のプリウスが生産された 2010 年では、年間約 68 万円の経費削減に成功することと同義である。

6 結論

・クリーニング法を導入した GA によって回転子構造の最適化を 2 段階に分けて行い、プリウスモデルと比較した。結果としては、2 段階目の最適化が終了した時点で永久磁石使用量 V_{pm} を 8.55 cm^3 から 6.69 cm^3 へと約 21.8% 抑えながら、平均発電電力 P_{ave} を 38.7kW から 43.2kW へと 11.6% 改善することに成功した。しかし、GA による設計結果では複雑な設計を行っている部位が設計領域内に多く見受けられたため、実際に製作を行う場合は、これを基に製作容易さを考慮した上で再設計を行う必要があった。

・クリーニング法の強度を 6 段階に分けて設計結果を得たところ、表面磁石配置型、V 字磁石配置型、非対称な埋込磁石配置型の 3 通りの設計結果に大別することができた。その中でも、 $N_{min} = 2\sim 4$ とした場合に見られることがあった非対称な埋込磁石配置型と、Prius モデルとも形状が良く似ている V 時磁石配置型は優れた特性を示しやすく、クリーニング法の強度を適切に調整して最適化を行うことにより、優れた設計結果を得られることが分かった。また、得られる回転子形状はクリーニング法の強度だけでなく、1 世代目でどのような形状の個体が生成されるのかにも大きい影響を受けることが分かった。

・製作容易さを考慮した設計により、設計領域内の永久磁石領域を 1 つの直方体で、フラックスバリアの役割を果たす空気領域を 1 つの四角柱で表現することとした。結果として、最も良い設計モデルでは、トルク脈動の幅が大きいという欠点などは抱えつつも、プリウスモデルと同じ永久磁石使用量で、平均電力 P_{ave} を 38.7kW から 41.2kW へと 6.46%の改善をすることに成功した。

7 今後の課題

製作容易さを考慮した設計モデルを設計する際に、6つあった変数群を何パターンか用いて設計を行ったが、これをより多くのパターンで設計を行えるようになれば、つまり全探索設計を行えるようになれば、今回掲載した設計結果より良いものが得られていた可能性が高い。今後の課題として、全探索設計を可能とする設計プログラムを完成させることを目指す。また、全探索設計によって2つ残ってしまった欠点、つまりトルク脈動が大きいという欠点と、200A以上の高電流領域にて平均発電力 P_{ave} が劣るようになるという点についても原因を究明し、解決を目指す。

謝辞

この研究を論文として形とすることが出来たのは、担当して頂いた石川 赴夫教授，栗田 伸幸准教授の熱心なご指導や，主査としてご指導頂いた橋本誠司教授，および副査としてご指導頂いた高橋俊樹准教授，そして議論を交わして多くのアドバイスをしてくださった石川研究室の皆様のおかげです。協力して頂いた皆様へ心からの感謝の気持ちと御礼を申し上げたく，謝辞にかえらせて頂きます。

参考文献

- [1] Z. Q. Zhu, D. Howe, and Z. P. Xia, "Prediction of open-circuit airgap field distribution in brushless machines having an inset permanent magnet rotor topology, " *IEEE Trans. on Magn.*, vol. 30, no. 1, pp. 98-107, 1994.
- [2] D. N. Dyck and D. A. Lowther, "Automated design of magnetic devices by optimizing material distribution, " *IEEE Trans. on Magn.*, vol. 32, no. 3, pp. 1188-1193, 1996.
- [3] J. K. Byun, S. Y. Hahn, and I. H. Park, "Topology optimization of electrical devices using mutual energy and sensitivity, " *IEEE Trans. on Magn.*, vol. 35, no. 5, pp. 3718-3720, 1999.
- [4] C. H. Im, H. K. Jun, and Y. J. Kim, "Hybrid genetic algorithm for electromagnetic topology optimization, " *IEEE Trans. on Magn.*, vol. 39, no. 5, pp. 2163-2169, 2003.
- [5] S. Wang, D. Youn, H. Moon, and J. Kang, "Topology optimization of electromagnetic systems considering magnetization direction, " *IEEE Trans. on Magn.*, vol. 41, no. 5, pp. 1808-1811, 2005.
- [6] H. Shim, S. Wang, and K. Hameyer, "Topology optimization of magneto thermal systems considering eddy current as Joule heat, " *IEEE Trans. on Magn.*, vol. 43, no. 4, pp. 1617-1620, 2007.
- [7] D. H. Kim, J. K. Sykulski, and D. A. Lowther, "The implications of the use of composite materials in electromagnetic device topology and shape optimization, " *IEEE Trans. on Magn.*, vol. 45, no. 3, pp. 1154-1157, 2009.
- [8] J. S. Choi and J. Yoo, "Structural topology optimization of magnetic actuators using Genetic algorithms and ON/OFF sensitivity, " *IEEE Trans. on Magn.*, vol. 45, no. 5, pp. 2276-2279, 2009.
- [9] T. Labbe and B. Dehez, "Convexity-oriented mapping method for the topology optimization of electromagnetic devices composed of iron and coils, " *IEEE Trans. on Magn.* vol. 46, no. 5, pp. 1177-1185, 2010.

- [10]J. Lee and N. Kikuchi, "Structural topology optimization of electrical machinery to maximize stiffness with body force distribution, " *IEEE Trans. on Magn.*, vol. 46, no. 10, pp. 3790-3794, 2010.
- [11]N. Takahashi, T. Yamada, and D. Miyagi, "Examination of optimal design of IPM motor using ON/OFF method, " *IEEE Trans. on Magn.*, vol. 46, no. 8, pp. 3149-3152, 2010.
- [12]S. Park and S. Min, "Design of magnetic actuator with nonlinear ferromagnetic materials using level-set based topology optimization, " *IEEE Trans. on Magn.*, vol. 46, no. 2, pp. 618-621, 2010.
- [13]K. Watanabe, F. Campelo, Y. Iijima, K. Kawano, T. Matsuo, T. Mifune, T., and H. Igarashi, "Optimization of inductors using Evolutionary algorithms and its experimental validation, " *IEEE Trans. on Magn.*, vol. 46, no. 8, pp. 3393-3396, 2010.
- [14] Ingo Hahn, "Heuristic Structural Optimization of the Permanent Magnets Used in a Surface Mounted Permanent-Magnet Synchronous Machine" *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, VOL. 48, NO. 1, JANUARY 2012
- [15] T. Ishikawa and K. Nakayama, "Topology optimization of rotor structure in brushless DC motor with concentrated windings using Genetic algorithm combined with cluster of material", *IEEE Trans. on Magn.*, vol.48, no.2, pp.899-902, 2012.
- [16] 渡邊 大貴 他"永久磁石同期発電機の回転子トポロジー最適化に於けるクリーニング法の有効性" 電気学会回転機研究会資料, RM-16-090, LD-16-098, HCA-16-057 (2016)
- [17] T.Ishikawa and T.Watanabe, "Effect of Cleaning Level on Topology Optimization of Permanent Magnet Synchronous Generator", The 19th International Conference on Electrical Machines and Systems, NOVEMBER 2016

本研究に関する発表論文

[1] 渡邊大貴, 石川赴夫, 栗田伸幸” 永久磁石同期発電機の回転子トポロジー最適化に於けるクリーニング法の有効性” 電気学会研究発表資料, RM-16-090, LD-16-098,HCA-16-057, 2016.08.05,大阪

[2] 渡邊大貴, 石川赴夫, 栗田伸幸” クリーニング法を用いた GA による永久磁石同期発電機の回転子設計の有用性” 電気学会産業応用部門大会研究発表資料, 2016.08.30, 前橋

[3]Taiki Watanabe, Takeo Ishikawa and Nobuyuki Kurita” Effect of Cleaning Level on Topology Optimization of Permanent Magnet Synchronous Generator”, The 19th International Conference on Electrical Machines and Systems, NOVEMBER 2016

[4] 渡邊大貴, 石川赴夫, 栗田伸幸”永久磁石同期発電機の回転子構造最適化に於けるクリーニング法の構造変遷への影響“ 電気学会研究発表資料 ,2016.03.02, 足利(発表予定)