進化型計算法による電力ケーブル接続部の電界最適化

学生員 米津 大吾* 正員 原 武久*
 非会員 島田 茂樹** 正員 鍛冶 幹雄**

Electric Field Optimization of the Power Cable Joint by Using Evolutionary Calculation Method

Daigo Yonetsu*, Student Member, Takehisa Hara*, Member

Shigeki Shimada**, Non-member, Mikio Kaji**, Member

This paper examines electric field optimizations at the joint of power cables by using evolution strategy((1+1)-ES, $(\mu+\lambda)$ -ES) and genetic algorithm which are so called evolutionary calculation method. The object of the paper is to minimize the electric field strength on the inner curved electrode under the constraint that the electric field strength along the interface between the two different insulators should be below the permissible value. The surface charge method that provides accurate solutions on the boundaries for the multi-layer substances with relatively small number of elements is employed for the calculation of the electric field distribution. Three evolutionary calculation methods are employed for the optimization method. Because these methods employ mutation and rearrangement(cross-over) processes, the shape design can be performed widely and locally. As a result, each method can reduce the electric field strength on the inner curved electrode while the electric field strength along the interface was kept below the permissible value. The search results of each optimization method were compared and found that the $(\mu+\lambda)$ -ES shows the best performance among the three methods.

キーワード：電力ケーブル接続部、最適電極設計、表面電荷法、進化戦略、遺伝的アルゴリズム

Keywords: power cable joint, optimum electrode design, surface charge method, evolution strategy, genetic algorithm

1. まえがき

電力ケーブル接続部の絶縁性を向上させるためには、絶縁ゴム-ポリエチレン界面の最大電界値を許容値以下に保つという制約条件の下で、内部電極表面の最大電界値を低減させることが重要となり^{(1),(2)}、その設計のためには数値電界計算法と最適化手法の適用が望ましいと考えられる。

電力ケーブル接続部の電界設計には、従来実験計画法^{(3),(4)}が用いられることが多いが、それらは構造上の因子にそれぞれ 2, 3 個の水準を設けて、複数箇所の電界を制限値以内に収めるような組み合わせを求めている。しかし、この方法では、わずかな計算回数で効率よく解が得られるものの、結果が設計変数の水準の選び方に依存するため厳密な最適解を得ることは難しい。

本論文では汎用的かつ厳密性の高い電界最適設計を試みた。電界の最適化手法は、降下法などの決定論的手法と直接

探索を行う確率論的手法とに分けられる。降下法を用いた最適化^{(5),(6)}では、目的関数の微係数を用いて形状修正が行われるため、確実に目的関数が減少し収束は速いとされている。しかし、得られる形状が初期形状に依存するため、必ずしも最適な形状が得られない可能性があり、また寸法等の制約条件を探索中に考慮することは難しい。一方、直接探索法は目的関数の微係数の計算を必要とせず、降下法に比べて収束性は悪いが、ランダム探索法であるため、大域的な最適解を得ることが可能である。また、目的関数に制約条件をペナルティ関数として組み入れることが容易である^{(7),(8)}。直接探索法の中でも遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithm, 以下 GA)や進化戦略(Evolution Strategy, 以下 ES)などの進化型計算法は設計変数の修正操作を組み換え(交叉)や突然変異で行うため、最適設計を大域的かつ局所的に行うことができる。

以上のことを考慮して、筆者らは進化型計算法を用いて電力ケーブル接続部の最適設計を行うことにした。また、 $(1+1)$ -ES⁽⁹⁾、 $(\mu+\lambda)$ -ES⁽¹⁰⁾、GA⁽¹¹⁾の 3 種類の進化型計算法で最適化を行い、その結果の比較、検討を行った。ES は突然変異が主な操作であり、ランダム性が強く、GA は組み換え(交叉)が主な操作であり、探索の収束性がよいと考えられる。

* 関西大学
 〒564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35
 Kansai University
 3-3-35, Yamate-cho, Suita, Osaka 564-8680
 ** 住友電工
 〒619-0237 京都府相楽郡精華町光台 1-7
 Sumitomo Electric Industries
 1-7, Hikaridai, Seika-cho, Saraku, Kyoto 619-0237

また、設計変数の変化はESの場合は連続的であるのに対し、GAでは離散的である。内部電極湾曲部の形状は複数(6個)の円弧で表現した^{(12),(13)}。電極を円弧で表現すると輪郭を滑らかに接合するための制約条件が複雑となる。このような場合において、設計変数の変動範囲や刻み幅等を同じとして、いずれの最適化手法が有効であるかを調べた。

2. 電力ケーブル接続部の電界解析

〈2・1〉 電力ケーブル接続部の構成 図1にSPJ(自己圧縮型ジョイント: Self-Pressurized Joint)⁽¹⁾と呼ばれる電力ケーブル接続部の構成を示す。CVケーブルの導体終端部が導体接続管により結合され、CVケーブルは絶縁ゴムの収縮力による界面圧力が加えられることで固定されている。このような電力ケーブル接続部の絶縁設計においては、内部電極湾曲部表面及び絶縁ゴム-ポリエチレン界面の電界値の低減が重要となる^{(1),(2)}。

〈2・2〉 解析モデル 図1のモデルの電界を求めるに当たり、軸対称性および左右の対称性を考慮して、図2に示す z - r 平面で電界計算を行う。設計変数は図2中の6つの円弧半径 $R_1 \sim R_6$ 及び幅 L_1, L_2 とした。なお、点 P_1 及び幅 L は固定した。角度 $\theta_1 \sim \theta_3$ は、内部電極湾曲部全体を滑らかに表現するために、各円弧の接合点 $P_2 \sim P_7$ で接線が連続となるように決めた。角度 $\theta_1 \sim \theta_3$ は以下になる。

$$\begin{cases} 0^\circ < \theta_1 = \cos^{-1} \left(\frac{R_1 - L_1}{R_1 - R_2} \right) < 90^\circ \\ 0^\circ < \theta_2 = \sin^{-1} \left(\frac{L_2 - R_4}{R_3 - R_4} \right) < 90^\circ \\ 0^\circ < \theta_3 = \sin^{-1} \left(\frac{L - L_1 - L_2}{R_6 - R_5} \right) < 90^\circ \end{cases} \quad (1)$$

図1 電力ケーブル接続部の構成
Fig. 1. A structure of power cable joint.

表1 境界の分割

Table 1. Division of boundaries.

	length [mm]	elements
inner curved electrode	0.25	$\cong 100$
natural boundary	0.50	17+35
rubber-polyethylene interface	0.50	240
rest boundary	1.25~2.50	305
whole boundary		$\cong 700$

図2 解析のための電力ケーブル接続部の断面図
Fig. 2. The cross section of power cable joint used for analysis.

なお、 $\theta_1 \sim \theta_3$ は $0^\circ \sim 90^\circ$ の範囲内であれば形状を作成することができず、(1)式を形状の制約条件とした。

電界計算は表面電荷法で行った。表面電荷法では、境界のみを分割すればよく、形状は内部電極や接地電極の湾曲部を円弧要素⁽¹⁴⁾、それ以外を直線要素で表現し、各要素において電荷密度は1次式で近似した。境界各部の分割の様子を表1に示す。要素分割は最適化の際に最大電界値が重要となる内部電極湾曲部及び絶縁ゴム-ポリエチレン界面を特に細かく分割した。また、自然境界条件として直線 $z=0, 280\text{mm}$ 上では法線方向電界が0となるように定式化した^{(15),(16)}。絶縁ゴム、ポリエチレンの比誘電率をそれぞれ2.5, 2.3、導体、ポリエチレンの半径をそれぞれ10.5mm, 19.0mmとした。

3. 各進化型計算法による電界最適化

〈3・1〉 最適化条件と制約条件 本論文では絶縁ゴム-ポリエチレン界面の界面方向電界最大値を許容値以下に保つという制約条件の下で、内部電極表面の最大電界値を最小にすることを目的としている。そこで、目的関数を以下のように与えた。

$$f = \begin{cases} E_{c_max} & (E_{i_max} \leq E_{i_per}) \\ E_{c_max} + 100(E_{i_max} - E_{i_per}) & (E_{i_max} > E_{i_per}) \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 E_{c_max} は計算過程の内部電極湾曲部の最大電界値、 E_{i_max} は絶縁ゴム-ポリエチレン界面の最大電界値、 E_{i_per} は界面電界の許容値である。(2)式より、許容値を超えたときは界面の最大電界値の増加分が加えられるため、内部電極湾曲部の最大電界値が低い場合でも次世代に残りにくくな

っている。また、形状作成上の制約条件は(1)式と各設計変数の変動範囲とした。なお、いずれの設計変数も変動範囲は0.50~20.98mmとした。

〈3・2〉 (1+1)-ES による電界最適化 (1+1)-ES は突然変異と自然淘汰が主な操作である。図 3 に最適化手順の流れ図を示し、以下に Step ごとの操作について説明する。

Step1: 初期形状の設定

初期形状には、内部電極湾曲部を 2 つの円弧で表現した場合($R_1=R_2=R_3=R_4$, $R_5=R_6$, $L_1=L_2$)において界面電界最大値がほぼ許容値となる形状を選んだ。

Step2, Step4: 目的関数の計算

表面電荷法で各部の電界を求めた後、(2)式を計算する。

Step3: 突然変異の実行

親個体ベクトルを x_p 、子個体ベクトルを x_c とすると、突然変異による子個体ベクトルを以下のように与えた。なお、親個体ベクトル、子個体ベクトルは各円弧の半径 $R_1 \sim R_6$ 、幅 L_1, L_2 で構成した。

$$x_c = x_p + N_g(0, \sigma^2) \quad (3)$$

ここで、 $N_g(0, \sigma^2)$ は平均 0、分散 σ^2 (標準偏差 σ) のそれぞれが

独立な 8 つの正規乱数からなる列ベクトルであり、各設計変数の修正量となる。修正量及び各設計変数は小数点 2 桁まで考慮した。なお、設計変数が形状の制約条件((1)式)を満たさない場合や変動範囲を超えた場合は(3)式を計算しなおす。

Step5: 自然淘汰の実行

子個体ベクトルにおいて Step4 で目的関数を計算し、親個体ベクトルと子個体ベクトルで目的関数が小さいほうを次の親個体ベクトルとする。

Step6: パラメータの変更

Step3 から Step5 を 80 (= 設計変数 $\times 10$) 回繰り返した後に子個体ベクトルの目的関数が親個体ベクトルの目的関数より小さくなる回数 m により標準偏差を次のように計算する。

$$\sigma = \begin{cases} 0.9 \times \sigma & (m < 16) \\ \sigma & (m = 16) \\ \sigma / 0.9 & (m > 16) \end{cases} \quad (4)$$

(4)式は m が大きいと探索範囲が広くなり、 m が小さいと探索範囲が狭くなることを表している。なお、 σ の初期値は 5.0 とした。

Step7: 終了条件

各設計変数は小数点 2 桁まで扱うので、探索範囲が $\pm 0.01\text{mm}$ 未満になるときを終了条件と考え、 σ が 5.0×10^{-3} 以下になったときに最適化を終了した。

以上で述べた(1+1)-ES により最適化を 5 回試みたときの目的関数が最も小さい場合(best)と最も大きい場合(worst)の最終的に得られた内部電極湾曲部、絶縁ゴム-ポリエチレン界面の電界分布をそれぞれ図 4、図 5 に示す。各図の内部電極湾曲部、絶縁ゴム-ポリエチレン界面の電界値は初期形状においてのそれぞれの最大値 E_{c0_max} , E_{i_per} で正規化している。内部電極湾曲部の電界は図 4 より、初期形状では局部的

図 3 (1+1)-ES による最適化手順

Fig. 3. Optimization procedure by (1+1)-ES.

図 4 内部電極湾曲部の電界分布((1+1)-ES)

Fig. 4. Electric field distribution on the inner curved electrode((1+1)-ES).

図5 絶縁ゴム-ポリエチレン界面の電界分布比較((1+1)-ES)
Fig. 5. Electric field distribution along the interface between insulation rubber and polyethylene((1+1)-ES).

図6 初期形状と比較した最適化後の電極形状((1+1)-ES)
Fig. 6. The optimum electrode shape compared with the initial shape((1+1)-ES).

に高くなっているが、最適化後はいずれの場合も全体的に
一様な分布に近づいているのが確認できた。最適化後の最
大電界値は best, worst でそれぞれ 0.820, 0.823 であった。図
5 より、絶縁ゴム-ポリエチレン界面の最大電界値は、い
ずれの場合もほぼ許容値 1.000(初期形状での値)となる
ことが確認できた。なお、電界分布はいずれも初期形状
と同様であった。図 6 に内部電極湾曲部の初期形状と最
適化後に得られた形状を示す。best, worst では輪郭の座
標位置は異なるが、上半分の曲率はほぼ同じとなってい
るのが確認できた。最適化過程における電界の計算回
数はいずれの場合も 5280 回であり、 σ は単調に減少す
るのみであった。計算時間は CPU: Intel Pentium III
800MHz, RAM: 1GB を搭載したパーソナルコンピュータ
において約 9.0 時間であった。

〈3・3〉 $(\mu+\lambda)$ -ES による電界最適化 $(\mu+\lambda)$ -ES は
(1+1)-ES と異なり、複数の親個体から複数の子個体
を作成するため、組み換え(交叉)が含まれる。図 7 に最
適化手順を示し、以下に Step ごとの操作について説明
する。

Step1: 初期個体(形状)群の発生

初期世代の親個体ベクトル(6 個)をランダムに発生さ
せる。なお、初期の親個体ベクトルはすべて(1)式や変動
範囲を

図7 $(\mu+\lambda)$ -ES による最適化手順
Fig. 7. Optimization procedure by $(\mu+\lambda)$ -ES.

満たす場合を選んだ。

Step2, Step6: 目的関数の計算

個体ごとに(1+1)-ES の Step2, Step4 と同じ操作を行う。

Step3: 組み換え(交叉)の実行

6 つの親個体から任意に 2 つの親個体ベクトルを選ぶ。各
親個体ベクトルを x_{p1} , x_{p2} とおくと、子個体ベクトル x_c は以
下のように与えた。

$$x_{c,i} = x_{p1,i} + r \times (x_{p2,i} - x_{p1,i}) \quad (i=1 \sim 8) \quad (5)$$

ここで、 r は 0~1 の一様乱数である。(5)式は 8 つの設計変
数ごとに 2 つの親個体の内分点を子個体を選ぶことを表して
いる。

Step4: 突然変異の実行

Step3 で生成された子個体ベクトルの各成分(設計変数)に
平均 0, 分散 σ^2 の正規乱数を加える。設計変数ごとの σ は
すべて同じとし、等方的突然変異とした。

Step5: 制約条件の判定

Step3, Step4 の操作で得られた子個体ベクトルが(1)式や変動範囲を満たさなければ Step3 に戻り、子個体ベクトルを作成し直す。

Step7: 選択(淘汰)の実行

親個体ベクトル(6 個)と Step3~Step6 で得られた子個体ベクトル(20 個)から目的関数が小さい順に 6 個体を親個体ベクトルとして保存する。

Step8: 終了条件

(1+1)-ES と同様に、突然変異の際の σ が 5.0×10^{-3} 以下になったときに最適化を終了した。なお、 σ の初期値は 5.0 とし、終了条件を満たさずに次世代に進むときは σ に 0.975 をかける。一般的に $(\mu+\lambda)$ -ES では σ の値は自動調整されるようになっている^{(9),(10)}が、本論文ではあらかじめ想定した計算回数(約 5400 回)で最適化を終了させるためにこのように設定した。

以上のように設定した $(\mu+\lambda)$ -ES により最適化を 5 回試みた中の best, worst の場合の内部電極湾曲部形状を図 8 に示す。内部電極湾曲部の電界分布及び絶縁ゴム-ポリエチレン界面の電界分布はいずれも(1+1)-ES による最適化後に得られたものとはほぼ同じであるため割愛する。なお、内部電極湾曲部の最大電界値は best, worst の場合でそれぞれ 0.820, 0.822 であり、差異は小さかった。最適化後の内部電極湾曲部は図 8 より、best, worst の座標位置は互いに近いものが得られた。最適化過程における電界の計算回数は best, worst いずれの場合も 5466 回であり、計算時間は約 9.3 時間であった。

〈3・4〉 GAによる電界最適化 本論文で用いた GA は単純 GA⁽¹¹⁾を若干改良したものであり、交叉と自然淘汰が主な操作となっている。GA による最適化手順を図 9 に示し、以下に Step ごとの操作について説明する。

Step1: 初期個体(形状)群の発生

初期世代の個体(80 個体)はランダムに発生させる。各個体

の遺伝子は 2 進数で表現した設計変数で構成しており、遺伝子型は Gray 符号を採用した。遺伝子長は 88 ビット(1 変数当たり 11 ビット)とし、各設計変数が 0.5~20.98mm の範囲を 0.01mm 間隔で $2048(=2^{11})$ 通りに変化するように設定した。なお、初期の個体はすべて(1)式や設計変数の変動範囲を満たす場合を選んだ。

Step2: 目的関数の計算

(1+1)-ES と同じ操作になるが、制約条件を満たさない個体は電界を計算せずに、目的関数を大きくして次世代に残

図 9 GA による最適化手順

Fig. 9. Optimization procedure by GA.

図 8 初期形状と比較した最適化後の電極形状($(\mu+\lambda)$ -ES)

Fig. 8. The optimum electrode shape compared with the initial shape($(\mu+\lambda)$ -ES).

図 10 初期形状と比較した最適化後の電極形状(GA)

Fig. 10. The optimum electrode shape compared with the initial shape(GA).

らないようにした。

Step3: 選択(淘汰)の実行

目的関数が小さい個体から順に 24 個体(30%)を保存する。

Step4: 組み換え(交叉)の実行

Step3 で保存した個体から任意に 2 つの個体を選び、一様交叉を行い、56 個体(70%)を生成する。

Step5: 突然変異の実行

Step4 で得られた各個体の遺伝子型の約 5%を反転させる。

Step6: 終了条件

(1+1)-ES, $(\mu+\lambda)$ -ES と電界の計算回数をほぼ同じにするために、電界の計算回数が 5400 回以上となった世代で最適化を終了した。

以上のように設定した GA による最適化を 5 回試みた中の best, worst の場合の内部電極湾曲部形状を図 10 に示す。内部電極湾曲部、絶縁ゴム-ポリエチレン界面の電界分布は (1+1)-ES による最適化後に得られたものと同様であるので割愛する。内部電極湾曲部の最大電界値は best, worst の場合でそれぞれ 0.822, 0.827 であった。図 10 より、最適化後に得られた電極の座標位置は異なるが、曲率は全体的にほぼ同じであった。最適化過程における電界の計算回数は best, worst それぞれ 5403 回, 5407 回であり、計算時間は約 9.3 時間であった。

4. 各進化型計算法の比較検討

〈4・1〉 設計変数の離散間隔が小さい場合 前章では各進化型計算法により得られた電極形状、各部の電界分布について述べたが、ここでは最適化後の結果を比較する。各手法で最終的に得られた結果を表 2 に示す。表 2 より、いず

れの手法とともに絶縁ゴム-ポリエチレン界面の最大電界値をほぼ許容値としながら、内部電極湾曲部の最大電界値を大幅に低減できることが確認できた。次に、全試行で得られた内部電極湾曲部の最大電界値を図 11 に示す。なお、絶縁ゴム-ポリエチレン界面の最大電界値はいずれもほぼ許容値となるので割愛する。図 11 より、進化戦略((1+1)-ES, $(\mu+\lambda)$ -ES) と GA を比べると、全体的に進化戦略の方が良好な結果となっており、組み換え(交叉)より突然変異が有効であると考えられる。しかし、(1+1)-ES の場合より $(\mu+\lambda)$ -ES の方が全体的に小さな値が得られていることから、局所的な探索を向上させるためには組み換え(交叉)も有効であると考えられる。

〈4・2〉 設計変数の離散間隔が大きい場合

〈4・1〉 節では 0.01mm 間隔で設計変数を変化させたが、各手法により得られる電界値や設計変数の差異は小さく、局所解に陥る場合は見受けられなかった。次に、小数点 2 桁(0.01mm 単位)まで考慮して電極を製作できない場合を想定して、各設計変数を 0.5mm 間隔で変化させた場合について、各手法による探索をそれぞれ 10 回ずつ試みた。なお、各設計変数は 0.5mm 間隔で 0.5~16.0mm の範囲を 32 通りに変化させた。(1+1)-ES, $(\mu+\lambda)$ -ES の終了条件は突然変異による変化量が $\pm 0.5\text{mm}$ 以下となる $\sigma < 0.25$ とした。この場合の電界の計算回数は約 1/3 と見積もることができるので、GA による最適化は電界の計算回数が 1800 回を超えた世代で終了とした。

最適化後に得られた結果を表 3、内部電極湾曲部の最大電界値を図 12 に示す。図 12 中の数字は探索結果が良好なものから順につけたものである。いずれの手法においても所期の条件を満たすように最適化が行われているが、進化戦略の方が GA より良好に探索できることが確認できた。次に、

表 2 各種最適化手法による探索結果の比較

Table 2. Comparison of search results obtained by each optimization method.

	(1+1)-ES		$(\mu+\lambda)$ -ES		GA	
	best	worst	best	worst	best	worst
inner curved electrode (E_{c_max} / E_{c0_max})	0.820	0.823	0.820	0.822	0.822	0.827
interface (E_{i_max} / E_{i_per})	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
iteration number	5280	5280	5466	5466	5403	5407

表 3 各種最適化手法による探索結果の比較(0.5mm 間隔)

Table 3. Comparison of search results obtained by each optimization method(intervals of 0.5mm).

	(1+1)-ES		$(\mu+\lambda)$ -ES		GA	
	best	worst	best	worst	best	worst
inner curved electrode (E_{c_max} / E_{c0_max})	0.829	0.845	0.829	0.844	0.829	0.870
interface (E_{i_max} / E_{i_per})	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
iteration number	1760	1760	1826	1826	1815	1805

図 11 最適化後の最大電界値の比較

Fig. 11. Comparison of the optimized maximum electric field.

図 12 最適化後の最大電界値の比較(0.5mm 間隔)

Fig. 12. Comparison of the optimized maximum electric field (intervals of 0.5mm).

図 13 反復回数に対する目的関数変化

Fig. 13. Objective function variation versus iteration number.

図 13 に各手法による best の場合の目的関数変化を示す。目的関数値 f は (1+1)-ES の初期形状での最大電界値 $E_{c0,max}$ で正規化している。図 13 より、いずれの手法ともに約 1800 回の電界計算で十分に収束していることが確認できた。中でも GA の場合が最も収束が速いと考えられる。各手法で得られた worst の場合は best の場合との差異が大きく、局所解に陥っていると考えられる。GA の場合ではほとんどが局所解に陥ったことになる。また、GA の worst は他の手法では見られなかった値を示しており、局所解が複数存在すると考えられる。以上より、組み換え(交叉)は局所的な探索性を向上させるが、割合が大きくなると局所解への収束性が強くなると考えられる。

5. まとめ

本論文では、表面電荷法と各種進化型計算法を用いた、電力ケーブル接続部の電界最適化に関する検討を行った。なお、最適化を行うに当たり、形状を作成するための制約条件が多く、局所解が複数存在する最適化問題であった。結果をまとめると以下ようになる。

- (i) 最適化手法に進化型計算法を用いることで、絶縁ゴム-ポリエチレン界面の最大電界値を許容値以下に維持しながら、内部電極湾曲部の電界が十分に低減できる電極形状を求めることができた。なお、内部電極湾曲部上の電界は一樣な分布に近づいていることが確認できた。
- (ii) 突然変異が主な操作である進化戦略 ((1+1)-ES, $(\mu+\lambda)$ -ES) と組み換え(交叉)が主な操作である GA による最適化後の結果を比較した。その結果、進化戦略の方が良好な結果が得られており、組み換え操作より突然変異が有効であると考えられる。ただし、(1+1)-ES より $(\mu+\lambda)$ -ES のほうが良好な結果となっていることから、組み換え操作を補助的に行うことも有効であると考えられる。
- (iii) 本論文で用いた $(\mu+\lambda)$ -ES は、突然変異の大きさを決め

る標準偏差をすべての設計変数で同じとすることで自動調整するためのパラメータの設定が不要となっている。このように簡略化して用いたにも関わらず、他の手法より全体的に良好な結果が得られており有効な方法であることが明らかとなった。

本論文では $(\mu+\lambda)$ -ES による探索結果が最も良好であったが、最適化の試行回数を増やせば (1+1)-ES の場合が良好になることも考えられる。しかし、(1+1)-ES の場合は形状修正が逐次的であるのに対し、 $(\mu+\lambda)$ -ES は並列処理が可能であり、大幅な計算時間の短縮が期待できるので、 $(\mu+\lambda)$ -ES が最も有効であると考えられる。最後に論文作成に当たり多大な協力を頂いた、関西大学工学部電気工学科専任講師安田陽氏、同大学大学院生岡本吉史氏に感謝します。

(平成 14 年 2 月 25 日受付, 平成 14 年 9 月 17 日再受付)

- (1) K. Fudamoto, S. Yamada, S. Narisada, H. Satoh, and K. Mizumami : "Development of Compact type Straight Through Joint for High Voltage XLPE Cable", *IEE Japan Electric Cable and Wire*, EC-99-5 (1999) (in Japanese)
 札本広治・山田茂勝・成定茂夫・佐藤 寛・水浪和人:「送電CVケーブル用コンパクト型ジョイントの開発」, 電気学会電線・ケーブル研究, EC-99-5 (1999)
- (2) T. Ito, S. Nakagawa, A. Kuwaki, T. Hashio, and T. Shiono : "Interfacial Phenomena in Composite Electrical Insulation -Evaluation of Directed Electrical Field Strength at Interfaces of the Prefabricated Joint Model-", *IEE Japan Electric Cable and Wire*, EC-99-2 (1999) (in Japanese)
 伊藤智典・中川信一・桑木亮仙・橋尾知容・塩野武男:「固体絶縁界面の電気特性-プレハブ形接続部箱模倣界面における電界方向の影響-」, 電気学会電線・ケーブル研究, EC-99-2 (1999)
- (3) 電磁界解析とその逆-最適化問題への応用調査専門委員会:「電磁界解析とその逆-最適化問題への応用」, 電気学会技術報告, 第611号 (1996)
- (4) 桑木亮仙・伊藤一己・新井敦宏:「CVケーブル用プレハブ接続部の界面絶縁設計に関する検討」, 電気学会誘電・絶縁材料研究, DEI-94-36 (1994)
- (5) H. Tsuboi and T. Misaki : "Optimization of Electrode and Insulator Contours by Using Newton Method", *IEE Japan*, Vol.106-A, No.7, pp.307-314 (1986-7) (in Japanese)
 坪井 始・美咲隆吉:「ニュートン法による電極形状および絶縁物形状の最適化」, 電学論誌 A, 106, 7, pp.307-314 (1986-7)
- (6) 西村健太郎・田中始男・坪井 始:「一様磁界発生用コイルの最適化」, 日本シミュレーション学会第19回計算電気・電子工学シンポジウム, 1-1-12 (1998)
- (7) Y. Hosokawa, S. Noguchi, and H. Yamashita : "Optimal Design for Permanent Magnet Motor", *IEE Japan Static Apparatus and Rotating Machinery*, SA-99-19, RM-99-73 (1999) (in Japanese)
 細川佳寛・野口 聡・山下英生:「永久磁石モータの最適化設計」, 電気学会静止器・回転機合同研究, SA-99-19, RM-99-73 (1999)
- (8) T. Ohnishi and N. Takahashi : "Investigation of Optimal Design of IPM Motor using Finite Elements and Optimization Technique", *IEE Japan*, Vol.121-D, No.3, pp.397-402 (2001-3) (in Japanese)
 大西拓馬・高橋則雄:「有限要素法と最適化手法を併用した IPM モータの設計法の検討」, 電学論誌 D, 121, 3, pp.397-402 (2001-3)
- (9) K. Preis, C. Magele, and O. Biro : "FEM AND EVOLUTION STRATEGIES IN THE OPTIMAL DESIGN OF ELECTROMAGNETIC DEVICES", *IEEE Transaction on Magnetics*, Vol.26, No.5, pp.2181-2183 (1990-9)
- (10) T. Nagao : Optimization Algorithms, Shokodo (2000) (in Japanese)
 長尾智晴:最適化アルゴリズム, 昭晃堂 (2000)
- (11) T. Agui and T. Nagao : Genetic Algorithm, Shokodo (1993) (in Japanese)
 安居院猛・長尾智晴:ジェネティックアルゴリズム, 昭晃堂 (1993)
- (12) D. Yonetsu, T. Hara, S. Shimada, and M. Kaji : "OPTIMUM ELECTRODE CONTOUR DESIGN AT THE JOINT OF POWER CABLES", Proceedings of The JSST 2000 International Conference on Modeling, Control and Computation in Simulation, pp.342-345 (2000)
- (13) D. Yonetsu, T. Hara, S. Shimada, and M. Kaji : "Examination of Electric Field Optimization at the Joint of Power Cables", *Simulation*, Vol.21, No.1, pp.51-56 (2002-3) (in Japanese)
 米津大吾・原 武久・島田茂樹・鍛冶幹雄:「電力ケーブル接続部の電界最適化の検討」, シミュレーション, 21, 1, pp.51-56 (2002-3)
- (14) S. Sato, H. Aoyagi, T. Sumikawa, and M. Honda : "High Speed Surface Charge Simulation Method", *IEE Japan*, Vol.101, No.9, pp.455-462 (1981-9) (in Japanese)
 里 周二・青柳浩邦・澄川俊雄・本多正巳:「高速表面電荷法」, 電学論誌 A, 101, 9, pp.455-462 (1981-9)
- (15) T. Kono and T. Takuma : Numerical Calculation Method of Electric Field, CORONA PUBLISHING (1980) (in Japanese)
 河野照哉・宅間 薫:数値電界計算法, コロナ社 (1980)
- (16) S. Sato, W. S. Zaengl, and A. Knecht : "A NUMERICAL ANALYSIS OF ACCUMULATED SURFACE CHARGE ON DC EPOXY RESIN SPACER", *IEEE Trans. on Electrical Insulation*, Vol.EI-22, No.3, pp.333-340 (1987-6)

米 津 大 吾

(学生員) 1975年6月28日生まれ。1998年3月関西大学工学部電気工学科卒業。2000年3月同大学大学院工学研究科博士課程前期課程修了。同年4月同大学大学院工学研究科博士課程後期課程入学, 現在に至る。電気機器の電界最適シミュレーションに関する研究に従事。

原 武 久

(正員) 1943年2月18日生まれ。1970年3月京都大学大学院工学研究科博士課程修了。同年4月京都大学工学部助手。1975年4月同助教授。1997年4月関西大学工学部教授, 現在に至る。工学博士。主として電気機器の設計・診断のための逆・最適シミュレーション, 有限要素法等による機器やプラズマの電磁界解析, 電力システムにおけるサージ過電圧の解析および絶縁設計等の研究に従事。1974年電気学会論文賞受賞。1993年日本シミュレーション学会論文賞受賞。日本シミュレーション学会, エネルギー・資源学会, 電気設備学会, 日本大気電気学会, 放電学会会員。

島 田 茂 樹

(非会員) 1995年京都大学工学部電子工学科卒業。1997年同大学大学院工学研究科修士課程修了。同年住友電気工業(株)に入社。現在CAE研究センター研究員。電力分野のシミュレーション, 切削加工プロセスのシミュレーション等の研究開発に従事。シミュレーション学会会員。

鍛 冶 幹 雄

(正員) 1971年京都大学理学部数学科卒業。同年住友電気工業(株)に入社。現在CAE研究センター, センター長。工学博士。電気電子分野の有限要素法, 電子材料開発プロセスシミュレーション, 分子設計シミュレーション, コンピュータ・グラフィックス, 研究開発基盤ネットワーク・システム等の研究開発に従事。IEEE, 応用物理学会, 日本物理学会, 日本シミュレーション学会, 日本応用数理学会会員。