

Simulated Annealing 法の多点探索型への改良と最適化例[†]

米津大吾*・吉田 誉*・原 武久*・島田茂樹**

ABSTRACT This paper proposes an effective modification of simulated annealing method. Simulated annealing method has the ability to avoid being trapped in a local minimum. However, simulated annealing method is a sequential search type optimization method and the search point may be moved away from the global minimum. And so, we modify simulated annealing method so that the search point is split into two search point when the objective function is made a change for the worse. Subsequently, multi search points exist on the search space and the searchable patterns are increasing. Firstly, we attempt the optimization of Schwefel function which has multi extreme values. As a result, this proposed method makes better results than the ordinary simulated annealing method. Next, we implement the electrode shape optimization for the reduction of electric field strength at power cable joint. The difference between the best result and the worst result in the case of the proposed method is smaller than that in the case of the ordinary simulated annealing method. Moreover, the proposed method makes better results than the ordinary simulated annealing method.

1. まえがき

焼きなまし法 (Simulated Annealing Method, 以下 SAM)^{1)~3)}は金属の焼きなまし過程を模擬した最適化及び探索のためのアルゴリズムである。SAMは降下法のように目的関数の勾配を用いず、乱数により探索方向を決定するため大域的に探索することが可能である。また、SAMでは目的関数の改悪方向への探索点の遷移をある確率で許容するため、探索点が局所的最適解に陥った場合でも回避できる可能性がある。SAMは探索回数を無限に取ることができれば、理論的に大域的最適解に収束することが保証されている⁴⁾。

しかし、実際の適用、例えば電気機器の電磁界最適設計を行う場合は探索回数を有限回に設定する必要があり、有限回で探索を収束させるために目的関数の改悪方向への探索点の遷移確率を決める温度の変化を大きくすることになる。つまり目的関数の改悪方向への探索点の遷移確率が低くなるのが早く、探索の初期段

階において大域的最適解付近に探索点がある場合でも探索点が局所的最適解付近に遷移し、局所的最適解付近から脱出できなくなる可能性がある。SAMは局所的最適解付近から脱出できる利点はあるが、大域的最適解付近から遠ざかる可能性も有している。

この問題を解消する方法として探索点発生個数を複数にする Parallel Simulated Annealing が提案されている⁵⁾。Parallel Simulated Annealingは新しい探索点を発生させる際に複数発生させ、目的関数が最小となる探索点を次の探索点とすることで状態空間の広範囲な探索を可能とした手法である。また、目的関数の改悪方向への遷移確率に依存する温度のスケジュール設計の困難さを解消する温度並列 SA についても提案されている⁶⁾。温度並列 SA は複数のプロセッサを用意し、プロセッサごとに異なる探索点と温度を担当させ、一定回数ごとに隣接する温度間で確率的に探索点を入れ替える方法であり、十分に時間をかけることで大域的最適解を得ることが保証される。同様な手法としてプロセッサごとに異なる探索幅を与え、一定期間ごとに探索幅の入れ替えを行う方法がある⁷⁾。他には、複数の SA を並列に実行し、一定期間ごとの SA の探索点の伝達時に遺伝的アルゴリズムの操作である遺伝的交叉を用いる方法⁸⁾などもあるが、これらの方法はいずれも同時に数十台のプロセッサを使うことが前提であり、単一プロセッサで実行する場合は計算時間がかかると考えら

Modification of Simulated Annealing to Multi-Point Search Type and Example of Optimization. By Daigo Yonetsu, Homare Yoshida, Takehisa Hara (Dept. of Electrical Engineering and Computer Science, Kansai University) and Shigeki Shimada (Analysis Technology Research Center, Sumitomo Electric Industries, Ltd.).

* 関西大学工学部先端情報電気工学科

** 住友電気工業(株)解析技術研究センター

† 2006年2月24日受付 2007年1月9日再受付

れる。筆者らは1回の解析に時間のかかる電磁界解析を必要とする電気機器の電磁界最適設計に応用することを考えており、探索点が少ない方が望ましい。また、筆者らがこれまでに通常のSAMにより行った電力ケーブル接続部の電界最適設計⁹⁾では探索の初期段階に最適と考えられる形状に近い形状が得られているにもかかわらず、改悪方向への遷移が起こり、局所的最適解付近への収束が見受けられたため、改悪方向への遷移時に注目しSAMを改良することを考えた。

そこで、筆者らは探索点が目的関数の改悪方向に遷移する際に遷移前の探索点も探索点として保存し、以降は並列的に複数の探索点で探索を行う方法にSAMを改良することにした(以下、この方法を多点探索型SAMと呼ぶ)。この方法により、一つの局所的最適解付近だけでなく、広い範囲を探索点が遷移することができ、複数の局所的最適解付近を探索でき、その結果大域的最適解を探索する可能性が向上すると考えられる。なお、計算時間が多くならないように最大探索点数は4とした。本論文ではまず最適化の代表的なテスト関数であるSchwefel関数^{10, 11)}の最小値探索を多点探索型SAMにより行い、通常のSAMとの比較を行った。次に、実際の電気機器の最適設計例として、電力ケーブル接続部の電界最適設計^{9, 12, 13)}を行い、本手法の有効性を検討した。

2. 多点探索型 Simulated Annealing 法

2.1 Simulated Annealing 法の手順

SAMは主に乱数による探索点(設計変数)の修正、目的関数の改悪方向への遷移の判定、温度の徐冷から構成されている。図1に通常のSAM^{2, 3)}の手順を示し、以下にStepごとの操作について説明する。

Step1: 初期条件の設定

設計変数の初期値 x^0 を設定して、目的関数 W_0 を計算する。計算した目的関数 W_0 を用いて、初期温度 T_0 を次式で与える。

$$T_0 = kW_0 \quad (1)$$

ここで、係数 k は本論文では0.01を与えた。また、設計変数の修正の際の刻み幅 Δx を設定する。

Step2: 設計変数の修正

次式により新しい設計変数 x^{n+1} を求め、目的関数 W^{n+1} を計算する。

$$x^{n+1} = x^n + \Delta x \times r \quad (2)$$

ここで、 r は $[-1, 1]$ の一様乱数から構成される列ベ

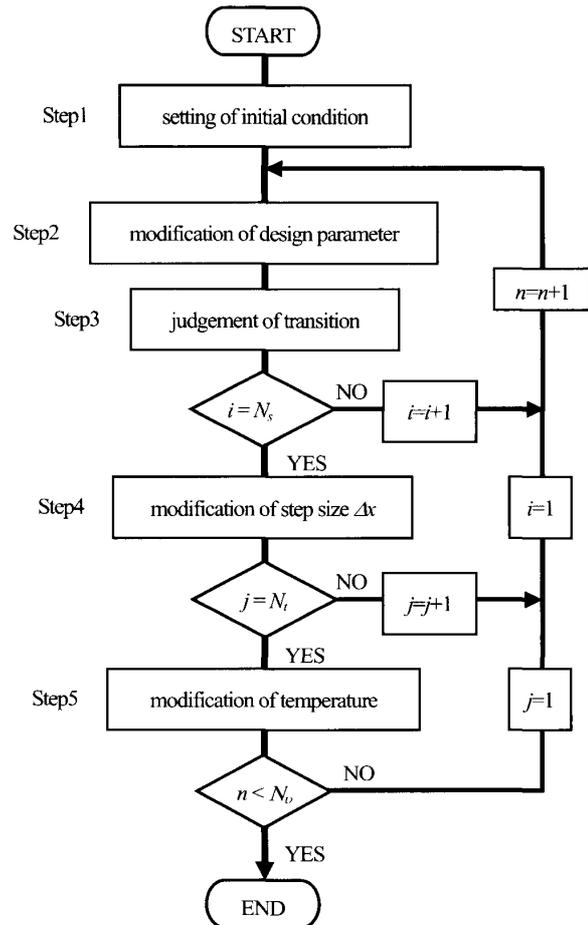


図1 最適化手順

クトルである。なお、設計変数に範囲などの制約条件がある場合は条件を満たすまで(2)式を計算し直す。

Step3: 遷移の判定

Step2で求めた目的関数 W^{n+1} と遷移前の目的関数 W^n を比較する。 $W^{n+1} < W^n$ であれば探索は成功であり、設計変数値、目的関数値を遷移前の値として更新する。 $W^{n+1} > W^n$ の場合、つまり目的関数値が改悪する場合でも、次式を満たした場合は探索が成功したとみなし、設計変数値、目的関数値を更新する。

$$p < e^{-\frac{W^{n+1} - W^n}{T}} \quad (3)$$

ここで、 p は $[0, 1]$ の一様乱数、 T は現在の温度である。(3)式より、温度 T が大きい場合や W^{n+1} 、 W^n の差が小さい場合は改悪方向に遷移する確率が大きくなることが確認できる。

Step4: 刻み幅 Δx の修正

Step2, Step3の操作を N_s 回行い、探索が成功した回数を u として、 N_s 回の反復ごとに刻み幅 Δx の修正係数 α 、刻み幅の修正式を次式で与える。

$$\alpha = \frac{u}{N_s - u} \quad (4)$$

$$\Delta x^{\text{new}} = \alpha \times \Delta x^{\text{old}} \quad (5)$$

ここで、 Δx^{new} は新しい刻み幅、 Δx^{old} はこれまでの刻み幅の値である。ただし、 Δx^{new} が急激に小さくなるのを防ぐため、 α に下限値を設けた。本論文では下限値を0.4とした。(4)式、(5)式より探索の成功回数が多い場合($u > N_s/2$)は刻み幅が大きくなり、少ない場合は刻み幅が小さくなる事が確認できる。

Step5: 温度 T の修正

($N_s \times N_t$)回ごとに温度 T を次式により修正する。

$$T^{\text{new}} = \eta \times T^{\text{old}} \quad (6)$$

ここで、 T^{new} は新しい温度、 T^{old} はこれまでの温度、 η は温度降下係数である。本論文では η は0.7とした。

探索の終了条件としては、刻み幅の大きさがある値以下になったときとする方法が良く用いられている^{2,3)}。本論文では許容時間以内に最適化を行うことを考えており、探索回数 n が $N_n (= 10000)$ となったときに最適化を終了した。

2.2 Simulated Annealing 法の問題点

図1に示したSAMでは探索の初期段階では刻み幅や温度が大きいため、探索点が遷移する範囲は広いと考えられる。しかし、探索回数が増えるにつれて温度が小さくなるため、目的関数の改悪方向への探索点の遷移が少なく、刻み幅が小さくなる。そのため探索点の遷移範囲は小さくなり、図2のような現象が起こることが考えられる。

図2は横軸を設計変数、縦軸を目的関数として探索点の遷移を示したものである。探索の初期段階において目的関数の改悪方向への遷移確率は高く、探索点Aから探索点Bに遷移する。次に探索点Cでは目的関数が改善されるため、探索点Bから探索点Cに遷移する。探索が進むにつれて温度が下がり、探索点Cから探索

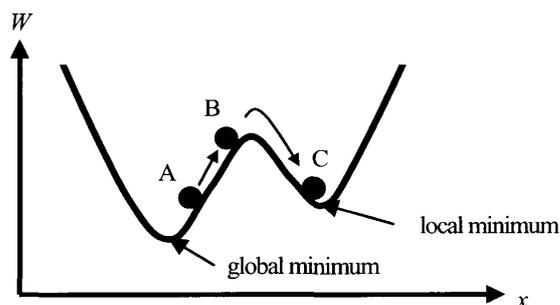
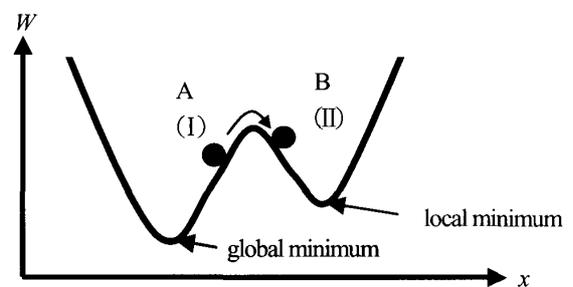


図2 SAにおける探索点の遷移

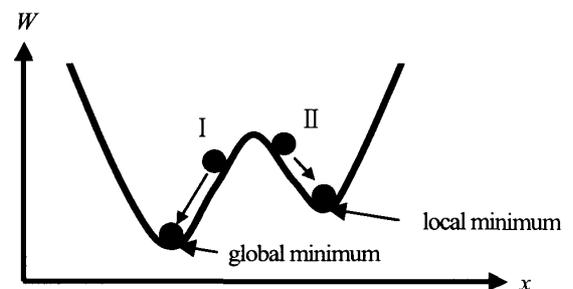
点Bへの遷移が許容されなくなり、探索点は局所的最適解付近に収束してしまうことになる。通常、SAMでは局所的最適解付近の探索点Cから探索点B、大域的最適解付近の探索点Aに遷移することが期待されるが、その逆が起こることも考えられる。

2.3 多点探索型への改良

2.2節で示したように通常のSAMでは大域的最適解付近から局所的最適解付近に遷移してしまう可能性がある。大域的最適解付近から遷移する可能性を小さくするために、図3のように考えた。図3(a)のように探索点Aから探索点Bへの遷移が許容されたとき、探索点Aを探索点I、探索点Bを探索点IIと設定する。以降は図3(b)のように探索点I、探索点IIそれぞれについて探索を行うことでいずれかの探索点が大域的最適解を求めることが期待できる。なお、探索点I、探索点IIのいずれかが目的関数の改悪方向への遷移を許容された場合は遷移先の探索点を探索点IIIに設定する。探索点は多いほうが大域的最適解を求めることが期待できるが、許容時間内での最適化を考えた場合には望ましくないため、探索点は最大4個(探索点I~探索点IV)とした。探索点が4個となって以降は通常のSAMと同じ遷移を行い、探索回数が N_t ごとに目的関数が小さい2個の探索点のみを保存し、保存した2個の探索点から



(a) Search point is split into two search point.



(b) Each search points converge to local minimum.

図3 探索点Aの探索点Bへの分裂

探索を再開する。アルゴリズム上の変更点は、図1に示した通常のSAMのStep3において目的関数の改善方向への遷移が許容された場合は探索点を最大4個まで増やす操作及び探索回数 n が N_v 回ごとに目的関数が小さい順に2個の探索点を選択する操作を追加することである。

3. 多点探索型SAMによる関数最小値探索の検討

3.1 評価関数と検討方法

本章では関数最小値探索において多点探索型SAMの有効性を検討することにした。そこで評価関数として、最適化の代表的なテスト関数である Schwefel 関数^{10, 11)}を用いた。Schwefel 関数を以下の式に示す。

$$f(x) = 418.98 \times n + \sum_{i=1}^n \left\{ -x_i \sin \sqrt{|x_i|} \right\} \quad (7)$$

また、制約条件は次式で与えた。なお、設計変数は小数点2桁までとして扱った。

$$-500 \leq x_i \leq 500 \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (8)$$

ここで、 n は設計変数の数である。 $n=2$ とした場合の Schwefel 関数の等高線図を図4に示す。図4のように Schwefel 関数は多峰性関数である。関数値の最小値は0であり、そのときの設計変数は $(x_1, x_2, \dots, x_n) = (420.97, 420.97, \dots, 420.97)$ である。

検討に際しては、 $n=2, 4, 8$ の場合を考え、多点探索型SAMによる最小値探索の試行回数を10000回として、通常のSAMで行った場合と比較した。いずれの

SAMにおいても、設計変数の初期値は $(x_1, x_2, \dots, x_n) = (-450.00, -450.00, \dots, -450.00)$ 、 Δx の初期値は500.00、 $N_s = 500$ 、 $N_i = 4$ とした。多点探索型SAMにおける N_i は2000とした。

3.2 Schwefel関数の最小値探索の結果比較

$n=2$ とした Schwefel 関数の最小値探索を通常のSAM、多点探索型SAMにより行った結果を図5に示す。図5中の ranking は通常のSAM、多点探索型SAMそれぞれによる試行を10000回行ったときの最終的に得られた関数値が小さい順に順位をつけたものである。図5中において、通常のSAMで関数値が急激に大きくなっているのは ranking が3805位のときであり、3804位では関数値1.5313、設計変数値は大域的最適解近傍の解である $(x_1, x_2) = (422.19, 424.23)$ が得られている。つまり、通常のSAMでは10000回の試行のうち3804回が最小値探索に成功したと考えられる。なお、通常のSAMにより小数点2桁で考えた場合の関数値が最小となる $(x_1, x_2) = (420.97, 420.97)$ が得られた回数は7回であった。同様に、多点探索型SAMで関数値が急激に大きくなっているのは ranking が4878位のときであり、4877位では関数値2.3442、設計変数値は大域的最適解近傍の解である $(x_1, x_2) = (419.45, 416.93)$ が得られている。つまり、多点探索型SAMでは10000回の試行のうち4877回が最小値探索に成功したと考えられる。このことより、 $n=2$ として Schwefel 関数の最小値探索を行った場合、多点探索型SAMのほうが通常のSAMより大域的最適解の探索確率が若干高いことが確認できた。なお、多点探索型SAMにより小数点2桁で考えた

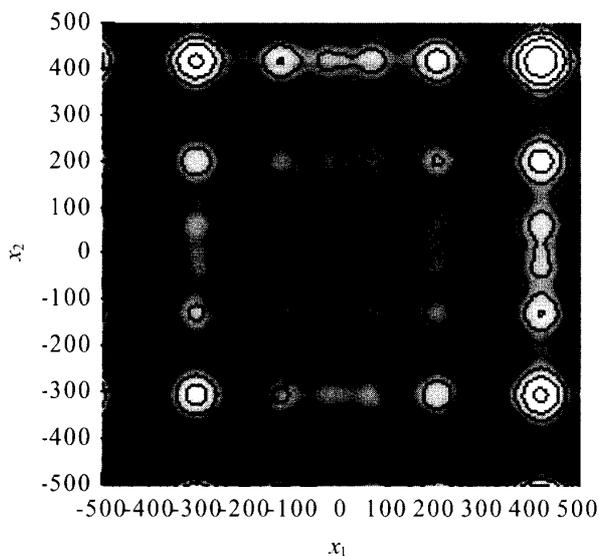


図4 Schwefel関数

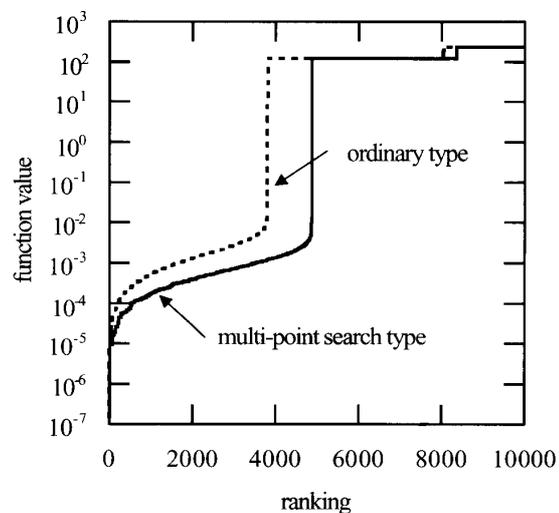


図5 最小値探索の結果比較 ($n=2$)

場合の関数値が最小となる $(x_1, x_2) = (420.97, 420.97)$ が得られた回数は19回であった。また、大域的最適解付近の解が得られたときの Schwefel 関数の計算回数は625 ~ 9998回であった。

図6に通常のSAMによる探索点の遷移(ranking = 3804位)、図7に多点探索型SAMによる探索点の遷移(ranking = 4877位)の様子を示す。図6、図7は図5において大域的最適解付近の解が得られたと判断した中で最も目的関数が高い場合である。図6、図7より、通常のSAM、多点探索型SAMともに大域的最適解付近がよく探索されていることが確認できる。なお、いずれも複数箇所の局所的最適解近傍が多く探索されて

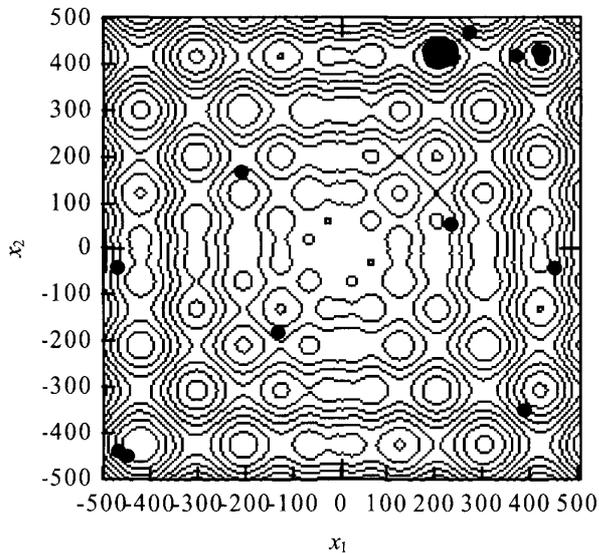


図6 探索点の遷移(通常のSAM)

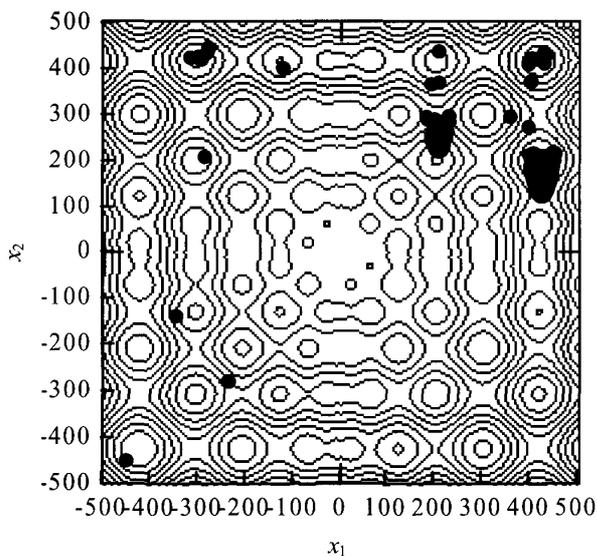


図7 探索点の遷移(多点探索型SAM)

いるが、多点探索型SAMのほうがより多くの局所的最適解近傍を探索していることが確認できる。この結果は、目的関数の改悪方向への遷移時に増加した探索点が別の局所的最適解を探索し得る可能性があることを示している。なお、図6に示した通常のSAMの結果における最終的な刻み幅 Δx は6.45、図7に示した多点探索型SAMの結果における最終的な刻み幅 Δx は10.30であり、探索範囲を考慮すると、探索は十分に収束したと考えられる。

次に、 $n=4$ とした Schwefel 関数の最小値探索を通常のSAM、多点探索型SAMにより行った結果を図8に示す。図8より、通常のSAMで大域的最適解近傍の解が得られていると考えられる ranking は935位までとなり、935位では関数値0.73964、設計変数値 $(x_1, x_2, x_3, x_4) = (421.07, 419.10, 421.99, 419.82)$ が得られている。一方、多点探索型SAMで大域的最適解近傍の解が得られていると考えられる ranking は2347位までとなり、2347位では関数値4.0141、設計変数値 $(x_1, x_2, x_3, x_4) = (423.13, 421.03, 419.91, 415.86)$ が得られている。このことより、 $n=4$ として Schwefel 関数の最小値探索を行った場合、多点探索型SAMのほうが通常のSAMより大域的最適解の探索確率が高いことが確認できた。なお、小数点2桁で考えた場合の関数値が最小となる $(x_1, x_2, x_3, x_4) = (420.97, 420.97, 420.97, 420.97)$ が得られた回数はいずれの手法ともに0回であった。また、多点探索型SAMにおいて、大域的最適解付近の解が得られたときの Schwefel 関数の計算回数は937 ~ 9997回であった。

次に、 $n=8$ とした Schwefel 関数の最小値探索を通常のSAM、多点探索型SAMにより行った結果を図9に

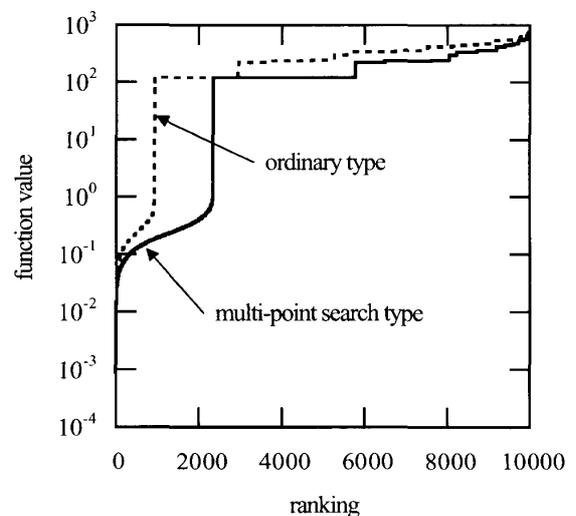


図8 最小値探索の結果比較 ($n=4$)

示す。図9は ranking が 20 位までのプロットとなっているが、通常の SAM, 多点探索型 SAM とともに探索が成功したと考えられる回数が少なく、その差異を見やすくするためである。図9より、通常の SAM で大域的最適解近傍の解が得られていると考えられる ranking は 2 位までとなり、2 位では関数値 4.4093, 設計変数値 $(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8) = (422.52, 419.50, 419.11, 422.20, 424.70, 424.04, 420.75, 422.38)$ が得られている。一方、多点探索型 SAM で大域的最適解近傍の解が得られていると考えられる ranking は 14 位までとなり、14 位では関数値 25.395, 設計変数値 $(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8) = (430.75, 419.54, 419.44, 424.20, 421.39, 421.57, 426.46, 413.19)$ が得られている。 $n = 8$ とした場合は通常の SAM, 多点探索型 SAM とともに大域的最適解が得られる確率はかなり小さくなるが、多点探索型 SAM のほうが良好な結果が期待できる。なお、小数点 2 桁で考えた場合の関数値が最小となる $(x_1, x_2, \dots, x_8) = (420.97, 420.97, \dots, 420.97)$ が得られた回数はいずれの手法ともに 0 回であった。また、多点探索型 SAM において、大域的最適解付近の解が得られたときの Schwefel 関数の計算回数は 4111 ~ 9517 回であった。

以上より、 $n = 2, 4, 8$ として最適化の代表的なテスト関数である Schwefel 関数の最小値探索を多点探索型 SAM により行った結果、通常の SAM より探索性能が向上することが確認できた。PSO による探索や大域的探索手法と局所的探索手法を組み合わせたハイブリッド手法、他の並列化 SA による結果^{7, 8, 10, 11)}と設計変数の数や探索回数などが異なるため比較することはできないが、本論文で提案する方法はアルゴリズムが容

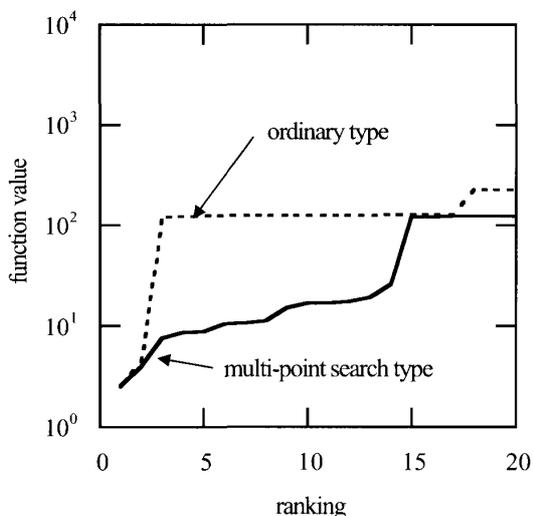


図9 最小値探索の結果比較 ($n = 8$)

易であり、探索回数が比較的少ない割に探索に成功することが確認できた。なお、探索回数は電気機器の電磁界最適設計に適用することを前提に設定している。また、設計変数を 10 個とした場合は同じ設定においては、大域的最適解付近の解を得ることはできなかった。探索回数を 20000 回とした場合、探索点数を 8 点 (探索回数は 10000 回) とした場合において試行回数 10000 回のうち、それぞれ 2 回、3 回大域的最適解付近の解を得ている。

4. 電力ケーブル接続部の電界最適設計の検討

4.1 解析モデルと設計変数の設定

前章では大域的最適解のわかる数学関数の最小値探索により多点探索型 SAM の有効性を検討したが、本章では実際の電気機器の最適設計例として、電力ケーブル接続部の電界最適設計^{12, 13)}を行い、多点探索型 SAM の有効性を検討することにした。

電界最適設計の対象とした電力ケーブル接続部を図 10 に示す。図 10 の電力ケーブル接続部は自己圧縮型ジョイント (SPJ: Self-Pressurized Joint)¹⁴⁾ であり、左右から挿入された 2 本の CV ケーブルを絶縁ゴムの収縮力により固定している。図 10 は軸対称及び左右対称な構造となっており、解析モデルは図 11 のように z - r 平面で考えることができる。なお、電界計算は軸対称表

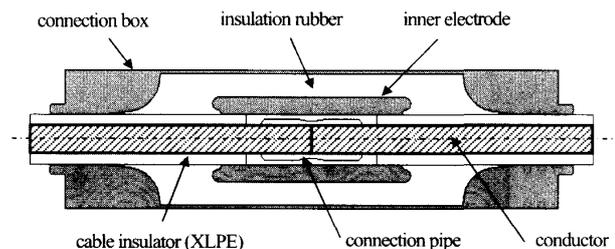


図 10 電力ケーブル接続部の構造

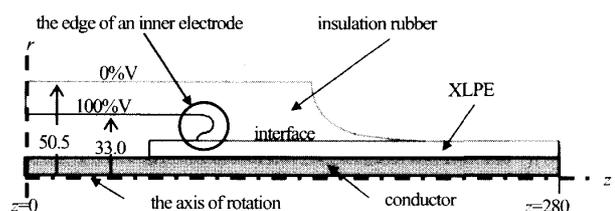


図 11 解析のための電力ケーブル接続部の断面図

面電荷法¹⁵⁾により行った。表面電荷法では、解析モデルの境界のみを分割すればよく、形状は直線要素で表現し、各要素において電荷密度は1次式で近似した。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。

電力ケーブル接続部の電界最適設計において重要な電極形状の設定を図12に示す。設計変数は図12中のz座標 $z_3 \sim z_6$ 、r座標 $r_2 \sim r_5$ とし、点 $P_1 \sim P_7$ を二次のリーゼンフェルトスプラインで補間することで電極形状を表現した。各設計変数の範囲は以下のよう

$$\begin{cases} 90 \leq z_i \leq 110 & (i=3 \sim 5) \\ 85 \leq z_6 \leq 110 \\ 19 < r_i \leq r_{i+1} \leq 33 & (i=2 \sim 5) \end{cases} \quad (9)$$

4.2 目的関数の設定

前節で示した電力ケーブル接続部の絶縁設計においては、絶縁ゴム-ポリエチレン界面の界面方向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。

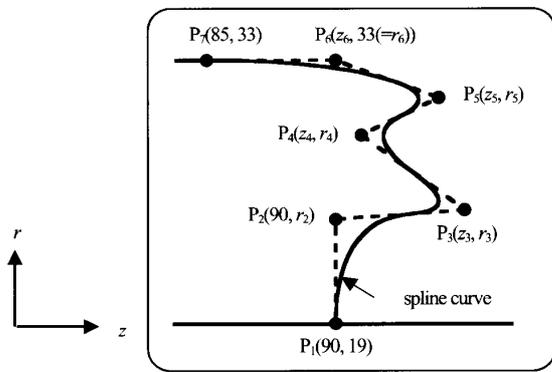


図12 リーゼンフェルトスプラインで構成した内部電極形状

$$f = \begin{cases} E_{c_max} & (E_{i_max} \leq E_{i_per}) \\ E_{c_max} + 100(E_{i_max} - E_{i_per}) & (E_{i_max} > E_{i_per}) \end{cases} \quad (10)$$

ここで、 E_{c_max} は計算過程の内部電極表面の最大電界値、 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。(10)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、内部電極表面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。

4.3 検討方法と検討結果

電力ケーブル接続部の電界最適設計を多点探索型SAM、通常のSAMによりそれぞれ10回試行し、多点探索型SAMの有効性を検討することにした。多点探索型SAM、通常のSAMにおいて、 Δx の初期値は10.00、 $N_s = 500$ 、 $N_t = 4$ とした。多点探索型SAMにおける N_t は2000とした。なお、設計変数の初期値は $(z_3, z_4, z_5, z_6, r_2, r_3, r_4, r_5) = (90.0, 90.0, 90.0, 90.0, 21.8, 24.6, 27.4, 30.2)$ とした。

多点探索型SAM、通常のSAMにより最終的に得られた各部の最大電界値を表1、内部電極表面の最大電界値を図13に示す。ここで、minは10回の最適設計

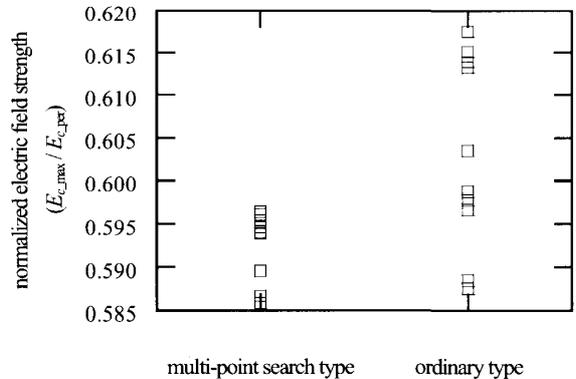


図13 最適設計後の最大電界値比較

表1 探索結果の比較

	multi-point search type		ordinary type	
	min	max	min	max
inner curved electrode (E_{c_max} / E_{c0_max})	0.586	0.596	0.588	0.617
interface (E_{i_max} / E_{i_per})	0.998	0.994	1.00	1.00
calculation number	39882	39926	10000	10000
calculation time[h]	10.7	10.7	2.59	2.60

において目的関数が最も小さくなった場合の結果であり, \max は目的関数が最も大きくなった場合の結果である. $E_{c,\max}$ は最終的に得られた内部電極表面の最大電界値, $E_{c,0,\max}$ は初期形状における内部電極表面の最大電界値, $E_{i,\max}$ は最終的に得られた絶縁ゴム-ポリエチレン界面の最大電界値, $E_{i,\text{per}}$ は絶縁ゴム-ポリエチレン界面の許容電界値である. calculation number は表面電荷法により電界を計算した回数である. 最適化計算は CPU : Pentium4 3.0GHz, RAM : 2.0GB のパーソナルコンピュータにより行った. 表1より, 多点探索型 SAM, 通常の SAM とともに制約条件である絶縁ゴム-ポリエチレン界面の最大電界値を許容値以下としながら, 内部電極表面の最大電界値は初期値よりも大幅に低減していることが確認できた. 図13より, 多点探索型 SAM, 通常の SAM で得られた内部電極表面の最大電界値を比較すると, 多点探索型 SAM の結果はすべて通常の SAM において目的関数が3番目に小さい結果よりも小さくなっていることが確認できた. 最小値は多点探索型 SAM において得られている. なお, 通常の SAM における最終的な刻み幅 Δx は $4.52 \times 10^{-3} \sim 8.91 \times 10^{-2}$, 多点探索型 SAM の場合は $8.20 \times 10^{-3} \sim 6.47 \times 10^{-2}$ であり, 探索範囲に比べて十分小さく, 探索は収束したと考えられる.

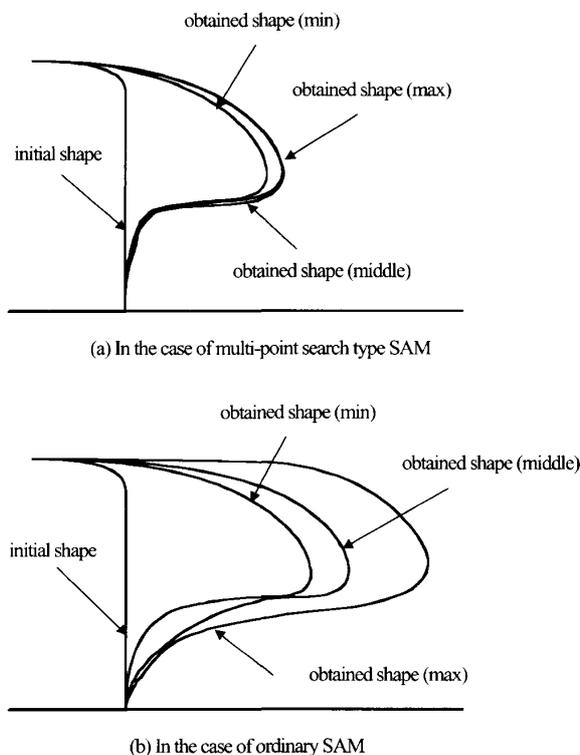


図14 最適設計後に得られた電極形状

次に多点探索型 SAM, 通常の SAM により得られた電極形状を図14に示す. 図中の middle は10回の最適設計において目的関数が5番目に小さくなった結果である. 図14より, 多点探索型 SAM においては, \max の場合においても, \min の場合の電極形状との差異が小さくなっている. 一方, 通常の SAM においては, 試行ごとに得られる電極形状の差異は大きくなっている. \max の場合の電極の座標位置が初期形状, 多点探索型 SAM の \min の場合に得られた形状の座標位置から最も離れている. しかし, 最適設計の過程(電界計算が2869回目)においては図15のように多点探索型 SAM の \min (best shape) の近くに電極の座標が得られており, その後は改悪方向への遷移が許容され, 最終形状に収束している. このような場合においても, 多点探索型 SAM の場合は改悪方向へ遷移する際に探索点の増加を行い, 2869回目の電極座標付近を詳細に探索できるため, \min と同等の結果が得られる可能性があると考えられる. なお, 図15中の数字は正規化電界値 $E_{c,\max}/E_{c,0,\max}$ である.

以上より, 電力ケーブル接続部の電界最適設計においても多点探索型 SAM のほうが通常の SAM よりも良好な結果が得られることが明らかとなった. なお, 多点探索型 SAM の電界の計算回数は通常の SAM の約4倍となっているため計算時間はかかっているが, 各探索点は独立に探索を行うため, MPI 等により4台の同じ仕様のパーソナルコンピュータで並列化することで, 通常の SAM と同程度の計算時間で計算することが期待できる. 設計変数の取り方, 電界計算回数をほぼ同じにして多目的評価型進化戦略で最適化を行った文献(13)の結果よりも評価値である内部電極表面の最大電界値は小さくなっている. また, 試行ごとに得られた電極形状の差異も小さく, 実際に製作する上で差はほとんどないと考えられる.

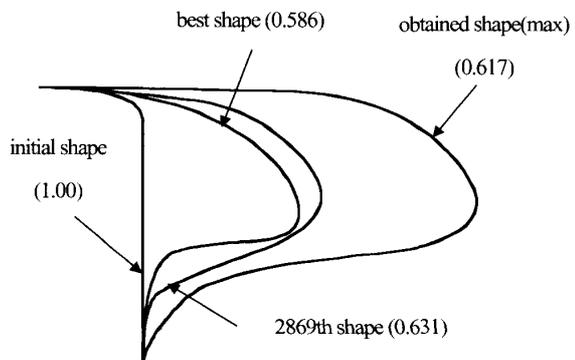


図15 電極形状の遷移

5. まとめ

大域的探索が可能とされているSAMの探索回数を有限回に設定することで大域的最適解から脱出する、あるいは局所解へ収束する確率が高くなる可能性があり、本論文では目的関数の改悪方向へ遷移する際に探索点を増加させる多点探索型SAMを考案し、最適化のテスト関数であるSchwefel関数の最小値探索、電力ケーブル接続部の電界最適設計により探索効率について検討を行った。結果をまとめると以下ようになる。

- (i) 最適化の代表的なテスト関数であるSchwefel関数の最小値探索を多点探索型SAM、通常のSAMにより行ったところ、いずれの設計変数の数においても多点探索型SAMのほうが大域的最適解の探索確率が高いことが確認できた。このことは設計変数が目的関数の改悪方向に遷移する際に探索点を増やすことで、大域的最適解を含む多くの局所最適解付近を詳細に探索できたためと考えられる。
- (ii) 電力ケーブル接続部の電界最適設計を多点探索型SAM、通常のSAMにより行ったところ、最適化条件である内部電極表面の最大電界値は多点探索型SAMのほうが全体的に小さくなることが確認できた。なお、いずれの探索においても制約条件である絶縁ゴム-ポリエチレン界面の最大電界値は許容値以下となっている。また、多点探索型SAMにより試行ごとに得られた電極形状の差異は小さくなっている。このことは目的関数の改悪方向に遷移する際に探索点を増やすことによって、通常のSAMのように最良解付近の形状から遷移する可能性が小さくなるためと考えられる。

このようにSAMを目的関数の改悪方向に遷移する際に探索点を増やす多点探索型に変更することで探索能力が向上することが明らかとなった。なお、探索点の個数が増えると計算時間が増えることになるが、並列化することで計算時間の増加を抑えることは可能である。よって使用するパーソナルコンピュータを増やしてPSOによる探索や大域的探索手法と局所的探索手法を組み合わせたハイブリッド手法、他の並列化SA^{7, 8, 10, 11)}と同様に探索点を多く取れば、計算時間をかけずに探索能力をさらに向上できると考えられる。今後は探索点数を増やしての最適化、他の電気機器の最適化での検討を行う予定である。

参考文献

- 1) S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt, Jr., and M. P. Vecchi: Optimization by Simulated Annealing, *Science*, **220**-4598, 671/680 (1983)
- 2) 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・回転機合同研究会資料, **SA-99-19**, **RM-99-73**, 33/38 (1999)
- 3) N. Takahashi, K. Ebihara, K. Yoshida, T. Nakata, K. Ohashi and K. Miyata: Investigation of Simulated Annealing Method and its Application to Optimal Design of Die Mold for Orientation of Magnetic Powder, *IEEE Transactions on Magnetics*, **32**-3, 1210/1213 (1996)
- 4) 川面恵司, 横山正明, 長谷川浩志: 最適化理論の基礎と応用—GAおよびMDOを中心に—, 78, コロナ社 (2000)
- 5) 森啓之, 武田康一: 並列型SA法による潮流特性を考慮した系統分割, 電気学会電力技術研究会資料, **PE-93-107**, 117/126 (1993)
- 6) 小西健三, 瀧和男, 木村宏一: 温度並列シミュレーテッド・アニーリング法とその評価, *情報処理学会誌*, **36**-4, 797/807 (1995)
- 7) 安藤景子, 三木光範, 廣安知之: 近傍並列シミュレーテッドアニーリング, *情報処理学会研究報告*, **2005-MPS-56**, 77/80 (2005)
- 8) 小椋真貴, 廣安知之, 三木光範, 角美智子, 岡本祐幸: 遺伝的交叉を用いた並列シミュレーテッドアニーリングの検討, *情報処理学会研究報告*, **2001-MPS-33**, 57/60 (2001)
- 9) 米津大吾, 吉田誉, 原武久, 島田茂樹: 電力ケーブル接続部の電極形状設計, 平成16年度(第22回)電気設備学会全国大会講演論文集, A-6, 11/12 (2004)
- 10) 山本宗義, 柳田将臣, 石亀篤司: Particle Swarm Optimizationを用いたキャパシタ最適配置による電圧無効電力制御に関する検討, 電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会資料, **PE-05-53**, **PSE-05-60**, 7/12 (2005)
- 11) 染谷博司, 山村雅幸: 探索オペレータの機能分担を考慮した進化的計算による関数最適化, *電気学会論文誌C*, **122**-3, 363/373 (2002)
- 12) 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, 51/56 (2002)
- 13) D. Yonetsu, T. Hara, S. Shimada and M. Kaji: Electrode Shape Design at the Power Cable Joint by Using $(\mu + \lambda)$ -ES Multi-Objective Evaluation, *IEE Japan*, **124-B-2**, 327/333 (2004)
- 14) 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・ケーブル研究会資料, **EC-99-5**, 25/29 (1999)
- 15) 河野照哉・宅間董: 数値電界計算法, 51/63, コロナ社 (1980)