

作業系統候補を利用した停電作業計画立案に関する研究

川原 耕治*

(平成22年9月17日受付)

Study on Making an Outage Work Planning by Using Candidates for Working System Configurations

Koji KAWAHARA

(Received Sept. 17, 2010)

Abstract

In order to secure the reliable electric power supply, it is necessary to undertake new extension, renewal and maintenance works of various power system apparatuses. These works generally deteriorate power supply reliability in system operations compared with normal operations without outage works. The most important thing is that outage works are appropriately executed with system configurations to avoid reducing supply reliability as much as possible. The author has so far proposed that it formulizes an outage work planning as a combinatorial optimization problem of the power system configuration, considering the minimization of power supply shortage over the whole period. The proposed system generates a huge number of candidates for working configurations satisfying various operational constraints in the process for solving the problem. This paper presents a method for making outage work planning with these candidates by using Particle Swarm Optimization (PSO) which is a kind of evolutionary computation methods. We also carried out numerical simulations to confirm the effectiveness of the proposed method.

Key Words: outage work planning, working configurations, particle swarm optimization (PSO)

1. はじめに

電力設備停止計画（以後、停止計画と呼ぶ）は、電力の安定供給を維持するため、日々行われている停電作業の開始日時と系統構成を決定する問題である。現状において電力会社では、停電作業の要求者が定めた日時に基づく作業の配置と常時系統をベースとした系統構成を選択することで停止計画を立案している。この立案された停止計画は、作業配置制約や同調制約などの制約を満たしているに過ぎず、供給信頼度がより高い停止計画を立案できる可能性がある。

これまで筆者は、この問題に対して組合せ問題をベース

とする2つのアプローチを試みている。1つは、供給信頼度を考慮した停電作業計画問題の定式化を行い、最適手法の適用を行うものである。2つめは常時系統をベースとして、予め用意された停電作業に対して種々の運用制約を考慮した系統構成を生成し、供給信頼度の高い系統構成を使ってスケジューリングを行うものである。前者のアプローチは、組合せ最適化問題となるため、生成される計画の優劣は数値化されるが、作業時の系統構成は考慮されていない。一方、後者のアプローチでは常時系統ベースで系統構成を生成しているため、通常利用される簡略化された縮約系統とは異なり、得られた系統構成はそのまま実運用で利用できる可能性が高い。しかしながら、莫大な数に上

* 広島工業大学工学部電気システム工学科

る系統構成候補を整理し、活用する方法を検討する必要がある。

そこで本研究では、後者の実規模系統をベースとして生成された作業系統候補を用いた作業計画立案を試みる。始めに問題を組み合わせ最適化問題として定式化を行った。次に、全ての組合せを列挙することは困難なため、進化型計算手法の一種である PSO (Particle Swarm Optimization) を用いた解法を提案する。最後に、提案手法の有効性を確認するため、シミュレーションを行ったので、これについて報告する。

2. 問題の定式化

2.1 目的関数

本研究では、供給信頼度を計画期間内の $N-2$ 供給支障電力の合計とし、次式に示すように組合せ最適化問題として定式化を行った。

$$f(x_d^k, p_d^k) = \min \sum_{d=1}^{MP} \sum_{i=1}^{MC} \sum_{j=1}^{MC} \sum_{b=1}^{MB} \omega_{bij}(x_d^k) \cdot L_{bd}(p_d^k) \quad (1)$$

ここで、

$$\omega_{bij}(x_d^k) = \begin{cases} 0 & \text{決定変数 } x_d^k \text{ において、想定事故 } i, j \text{ が同時に発生した時、母線で供給支障を発生しない場合} \\ 1 & \text{決定変数 } x_d^k \text{ において、想定事故 } i, j \text{ が同時に発生した時、母線で供給支障を発生する場合} \end{cases}$$

k : 負荷パターン ($k = 1, \dots, MK$), MK : 考慮する負荷パターン数, x_d^k : 決定変数 (電力設備の接続状態, 1 または 0), p_d^k : パラメータ (負荷および発電), $\omega_{bij}(x_d^k)$: 決定変数 x_d^k に依存する重み付け 0-1 変数, i : 想定事故ブランチ数 1, j : 想定事故ブランチ 2, MC : ブランチ数, b : 母線, MB : 母線数, L_{bd} : 母線 b の負荷量, d : 日付, MP : 計画期間

2.2 制約条件

(1) 需給均衡制約

電力は各時間断面で、発生と消費が同時に行われる必要がある。対象となる系統は貯蔵設備を考慮していないため、常に発電量は負荷の消費電力と設備損失分の合計でなければならない。

(2) 系統運用制約

電力系統を運用する上で常に満たすべき制約であり、定量的に説明のできる電気的な制約とヒューリスティックな制約がある。例えば、系統分離制約、短絡容量制約、設備容量制約、母線電圧制約などが前者に該当する。後者の制約は、系統構成の特殊事情を考慮するものであり、ループ

数制約や常時系統ベース制約を本研究では考慮している。系統構成を決定する際は、全ての系統運用制約を満たし、送電損失量も加味しながら供給信頼度の高い系統構成を選定する必要がある。

(3) 作業制約

作業制約は、作業を実施するに際して考慮すべき制約で、作業間に存在する同調、非同調、連続などの配置に関する制約に加え、各作業に動員可能な作業員を確保するための作業人数制約も考慮する。

3. 作業系統候補の生成

停止計画問題を系統構成の組合せ最適化問題として定式化したがる、全ての制約条件を無視した場合、設備数を n とすると系統構成数は 2^n で与えられる。実際には電力系統を構成する n が膨大な数であるので、全ての系統構成を生成し列挙することは実質不可能に近い。そこで本研究では、常時系統にハミング距離制約を定義することで作業系統候補の生成を行った。

3.1 作業系統候補の生成手順

支援システム^[1]における作業系統候補の生成手順を図 1 に示す。まず常時系統にハミング距離制約を用いて探索領域を定義する。続いて探索領域内に存在する全ての縮約系統に対して制約チェックを行う。次に、全ての制約を満たす縮約系統を基に詳細接続図を作成する。そして要求された停電設備の同時作業組合せを別に与えられた同時作業可能数の範囲内で全て列挙する。作業系統候補は詳細接続図上で作業対象設備を停止することで得ることができる。これを全ての縮約系統と作業組合せを用いて生成し、再び制約チェックを行い全ての制約を満たす作業系統候補を得

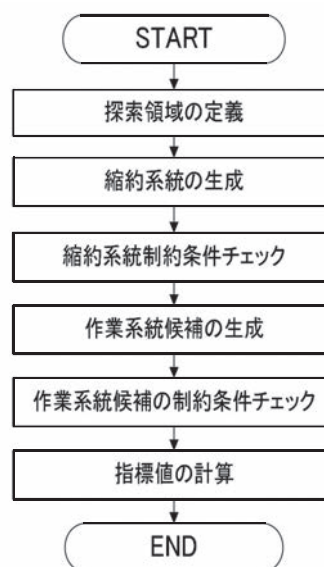


図 1 作業系統候補の生成手順

る。得られた各作業系統候補の指標値計算を行いランキン
グする。

3.2 シミュレーション

図2に示す109ノード357ブランチの実規模の系統を用
いて、計画期間10日、作業数5の条件でシミュレーシ
ョンを行った。この結果、生成された作業系統候補は1,566
件であり、プロトタイプシステムに実装された計画作成機
能（以後、既存の手法と呼ぶ）を用いて停止計画の作成を
行った。作成された中で、最も良かった停止計画の指標値
計算結果を表1に示す。既存の手法は、各日で供給信頼度
指標値が最小となる作業系統候補を選択しているため、計
画期間全体にわたって指標値を最小にする最適化は行われ
ていない。このため、既存の手法では作成されていない指
標値が良好な別の停止計画が存在する可能性が考えられ
る。そこで本研究では、PSOを用いた停止計画の立案を
試みる。

表1 指標値計算結果

供給信頼度指標	指標値[MW]
N-2供給支障電力	114303
N-1供給支障電力	884
N-2過負荷電力	55
N-1余裕電力	49036085
N-0余裕電力	482087
N-0送電損失	433.069

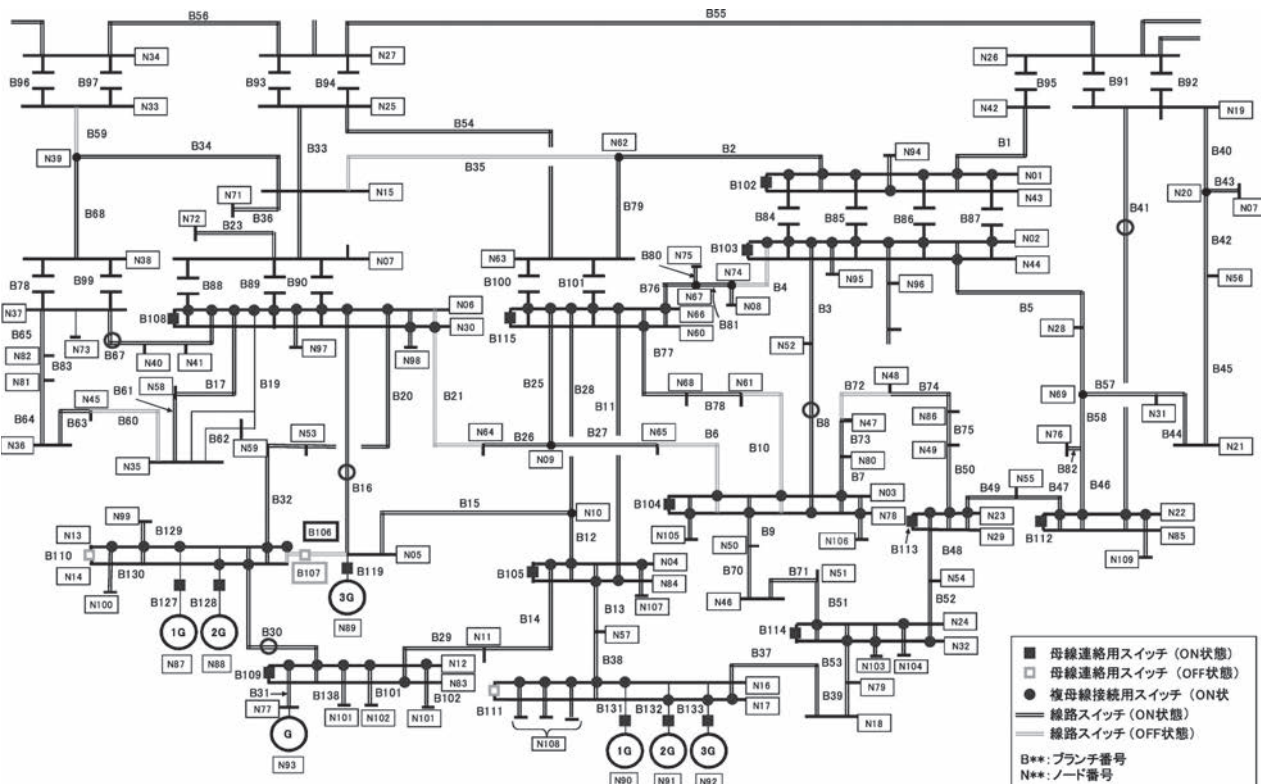


図2 適用系統

4. PSOを用いた停止計画の立案

4.1 PSOの概要

PSOは、鳥が餌を探索する過程を模擬したものであり、
複数の探索点（エージェント）が情報を共有しながら効率
的に良い解を探索する多点探索手法の1つである^{[2][3]}。
各エージェントは速度と位置を持ち、図3に示す処理手順
に従い位置情報を共有しながら評価と更新を繰り返し、探
索領域内の最適解に向かって移動する。以下に各エージェ
ントの速度と位置の更新式を示す。

$$v_i^{k+1} = w_i^k v_i^k + c_1 \text{rand}() (pbest_i^k - s_i^k) + c_2 \text{rand}() (gbest^k - s_i^k) \quad (2)$$

$$\text{where } |v_i^{k+1}| \leq V_{\max} \quad (3)$$

$$w = w_{\max} - \frac{w_{\max} - w_{\min}}{iter_{\max}} \cdot iter \quad (4)$$

$$s_i^{k+1} = s_i^k + v_i^{k+1} \quad (5)$$

ここで、 v_i^k : エージェント i の探索 k 回目の速度, $\text{rand}()$:
 $0 \sim 1$ までの一様乱数, s_i^k : エージェント i の探索 k 回目
の探索点, $pbest_i^k$: エージェント i の k 回目までの最良位置,
 $gbest^k$: k 回目までの群れ全体での最良位置, w : エージェ
ントの速度に対する重み関数, c_1, c_2 : 各項に対する重み
係数, V_{\max} : 速度の最大値, w_{\max} : 重みの初期値, w_{\min} :
重みの最終値, $iter_{\max}$: 最大探索回数, $iter$: 現在の探索
回数

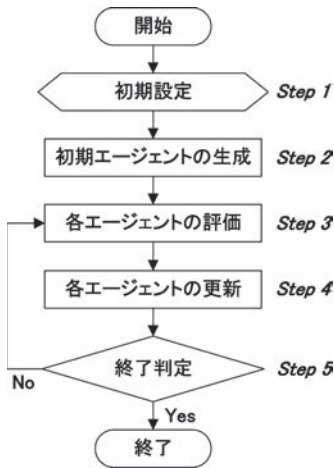
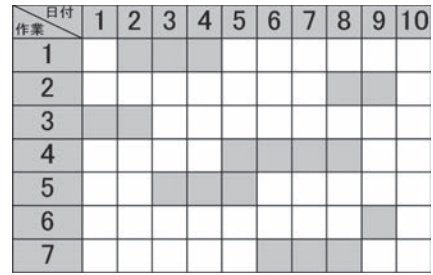


図3 PSOの処理手順



(a) ガントチャートの例



(b) (a)のエージェント表現

図4 エージェント表現の例

表2 PSOにより得られた停止計画の指標値計算結果

供給信頼度指標	指標値[MW]
N-2供給支障電力	114,303
N-1供給支障電力	884
N-2過負荷電力	0
N-1余裕電力	49,064,352
N-0余裕電力	482,365
N-0送電損失	431.894

4.2 停止計画への適用

(1) エージェントの表現

本研究で用いる PSO のエージェントは、作業数と各作業の開始日により表現した。例として、計画期間 10 日、作業数 7 の停止計画が図 4(a)のガントチャートで示された場合、エージェントは図 4(b)で表現される。これは左から順に各作業の開始日が表されており、作業 1 だと数値の 2、作業 2 だと数値の 8 と表現される。

(2) 評価方法

エージェントの優劣を判断するために次式を用いて評価値を計算する。

$$Evaluation = \sum_{i=1}^7 \frac{C_i}{1+S_i} \quad (6)$$

ここで、 S_1 : 制約違反度、 S_2 : N-2 供給支障電力、 S_3 : N-1 供給支障電力、 S_4 : N-1 過負荷電力、 S_5 : N-0 送電損失、 S_6 : N-1 余裕電力、 S_7 : N-0 余裕電力、 $C_1 \sim C_7$: 制約違反度と各指標値に対する重み付け変数

制約違反度は前述した 5 つの制約条件に対して重みを設け、制約を違反している場合にペナルティを与えるようにした。各指標値については、作成された停止計画に対応する作業系統候補を取り出して合計した値を用い、 $S_1 \sim S_7$ はそれぞれの指標値を正規化したものである。これは、計

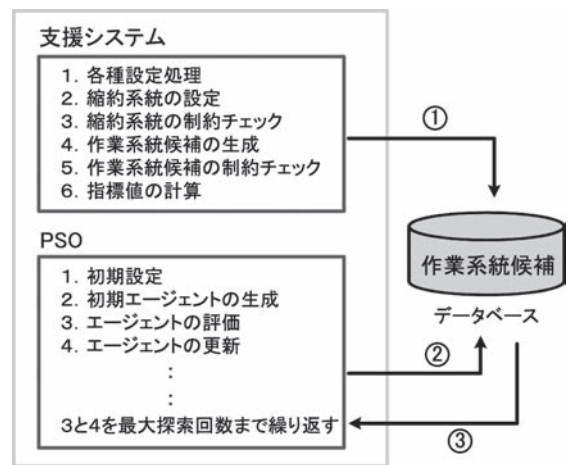


図5 提案システムの概要

画期間内の指標値が最良であれば 0 になり、最悪であれば 1 となることを意味する。従って、 $S_1 \sim S_7$ が 0 の時に評価値は最大となる。制約違反および各指標値に対する重み付け変数である $C_1 \sim C_7$ は、総和が 1 になるように予め設定しておく。

4.3 支援システムへの実装

PSO を支援システムへ実装した提案システムの概要を図 5 に示す。まずは、①支援システムにより作成された作業系統候補をデータベースに保存する。次に、② PSO の処理により作成された停止計画に対応する作業系統候補をデータベースに問い合わせる。そして、③データベースから取り出された作業系統候補を基に計画期間内の各指標値を計算しエージェントの評価をする。

4.4 PSOを用いたシミュレーション

(1) 適用条件

適用系統、計画期間、作業数は 3.2 節のシミュレーションと同様とし、本シミュレーションで用いた重み係数は、

$w_{\max}=0.9, w_{\min}=0.4, c_1=2.0, c_2=2.0, V_{\max}=2.0$ とし、エージェント数は100,最大探索回数は100の条件でシミュレーションを行った。

(2) 適用結果

PSOを用いた本シミュレーションより得られた停止計画の中で、最も良好だったものを表4第1列に示す。本シミュレーション結果と3.2節のシミュレーション結果を比較すると、N-2供給支障電力およびN-1供給支障電力は同様の結果となったが、その他の指標値についてはPSOを用いて作成された停止計画のほうが良好な結果となり、PSOの有効性が確認できた。

4.5 改良型 PSO

PSOには、全てのエージェントが共有情報に引き付けられた場合、局所解へ陥ってしまう可能性がある。このため、PSOに改良を加えた以下の手法を用いて、この問題の解決を図る。

(1) ランダム探索機能を付加した PSO^[4](RSPSO)

この手法は、PSOにおける速度の更新式(2)にランダムな探索域を加えた次式を用いる。これにより探索領域が拡大し、解の収束を改善することが期待できる。

$$v_i^{k+1} = w_i^k + c_1 \text{rand}() (pbest_i - s_i^k) + c_2 \text{rand}() (gbest - s_i^k) + c_3 N(0,1) \quad (7)$$

ここで、 c_3 : 乱数項における重み係数、 $N(0, 1)$: 平均0分散1の正規分布に従う乱数

(2) Evolutionary PSO⁽⁵⁾(EPSO)

この手法は、生物の進化を模倣した最適化手法である Evolution Strategy と PSO を組合せた手法である。EPSOの処理手順を図6に示す。エージェントの複製、突然変異および選択を繰り返す行ことで最適解の探索を行う。以下に示す式(8)から式(13)を用いたエージェント更新の際に、各重み係数および、群れ全体の共有情報である gbest に対して突然変異を行う。これにより、局所解へ陥ってしまった場合でもそこから脱出する効果が期待できる。

$$v_i^{k+1} = w_1^* v_i^k + w_2^* (pbest_i - s_i^k) + w_3^* (gbest - s_i^k) \quad (8)$$

where $|v_i^{k+1}| \leq V_{\max} \quad (9)$

$$w = w_{\max} - \frac{w_{\max} - w_{\min}}{iter_{\max}} \cdot iter \quad (10)$$

$$w_j^* = w_j + \tau N(0,1) \quad (11)$$

$$gbest^* = gbest + \tau' N(0,1) \quad (12)$$

$$s_i^{k+1} = s_i^k + v_i^{k+1} \quad (13)$$

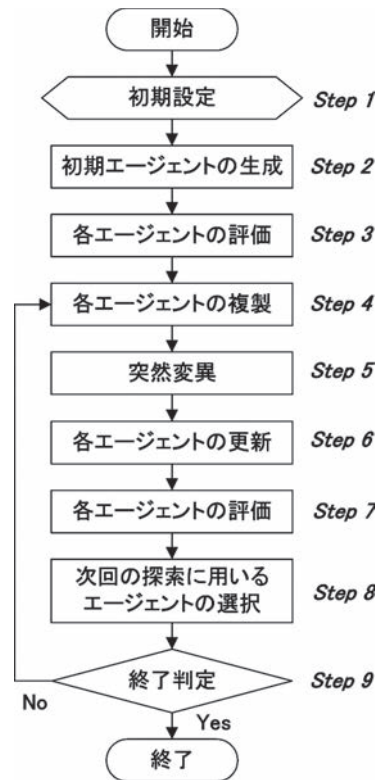


図6 EPSOの処理手順

表3 各 PSO 手法におけるパラメータ

	PSO	RSPSO	EPSO
エージェント数	100	100	50
複製数			2
重み係数	$W_{\max}=0.9$	$W_{\max}=0.9$	$W_{\max}=0.6$
	$W_{\min}=0.4$	$W_{\min}=0.4$	$W_{\min}=0.4$
	$C_1=2.0$	$C_1=2.0$	$W_2=0.5$
	$C_2=2.0$	$C_2=2.0$	$W_3=0.5$
		$C_3=2.0$	$\tau=1.0$
速度の最大値	$V_{\max}=2.0$		
評価関数の結合係数	$C_1=0.25, C_2=0.20, C_3=0.16, C_4=0.12, C_5=0.14, C_6=0.08, C_7=0.05$		
最大探索回数	100		
試行回数	20		

ここで、 w_1 : エージェント速度に対する重み係数、 w_2 : 各項に対する重み係数、 τ, τ' : 乱数に対する重み係数

4.6 シミュレーション

図2に示した109ノード357ブランチの系統を用いて、計画期間20日、作業数15の条件でシミュレーションを行った。PSO、改良型PSOであるEvolutionary PSO(以後、EPSOと呼ぶ)とランダム探索機能を付加したPSO(以後、RSPSOと呼ぶ)および既存の手法の各手法により得られた停止計画の評価値を比較した。また、各PSO手法のシミュレーションでは初期値のパターンを変えて20回試行した。表3に本シミュレーションで用いた各PSO手法の

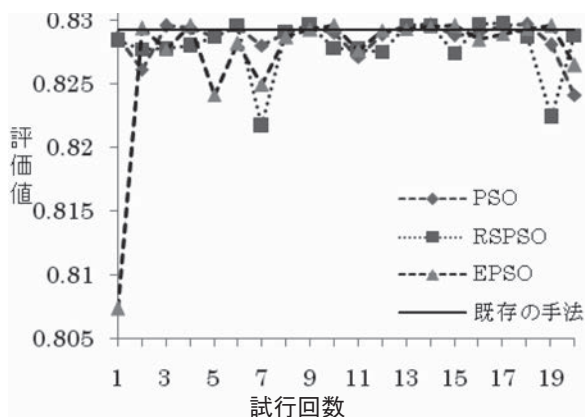


図7 各手法における評価値の比較

表4 PSOにより得られた停止計画の指標値計算結果

指標値[MW]	手法	PSO	RSPSO	EPSO	既存の手法
N-2供給支障電力		227,447	227,447	227,447	227,447
N-1供給支障電力		1,789	1,789	1,789	1,789
N-2過負荷電力		0	0	0	0
N-1余裕電力		98,766,246	98,765,984	98,750,510	98,736,346
N-0余裕電力		970,643	970,931	970,790	970,643
N-0送電損失		877.258	876.707	877.648	879.337
各手法の評価値		0.829692	0.829771	0.829286	0.829246

パラメータを示す。

図7は、各手法における評価値の比較を表している。RSPSOの試行回数17回目の時において、本シミュレーションでの最良値である0.829771を得ることができ、PSOでの最良の評価値である0.829692は試行回数14回目の時に得ることができた。EPSOでの最良の評価値である0.829562は試行回数4回目の時に得ることができ、既存の手法により得られた停止計画の評価値は0.829246となった。また、この時の各手法における指標値の比較を表した表4からも、既存の手法よりも各PSO手法の方が、良好な指標値を得ることができた。

以上の結果より、停止計画の立案において、今回用いた

PSOおよび改良型PSOの有効性が確認できた。

5. おわりに

本研究では、停止計画を組合せ最適化問題として捉え、定式化を行った。そして、PSOと改良型PSOおよび既存の手法を用いてシミュレーションを行い、PSOおよび改良型PSOの有効性を確認した。今後の課題は、実用化に向けて計画期間と作業数を増加させてシミュレーションを行い、手法の有効性を確認することである。

謝 辞

本研究は、中国電力(株)岡山制御所の朝原春海氏の協力の下で行われました。加えて、平成22年度大学院修士課程修了生(現(株)中電コンサルタント)弘中 弘君の多大な協力を得たことに対して感謝の意を表します。

文 献

- [1] 朝原春海：高供給信頼度系統構成を基礎とした停電作業計画支援システムに関する研究(2006-9)
- [2] 青木秀憲, 水谷芳史：「電力系統におけるPSOの解説とその応用」, 電学論B, Vol.126, No.3, pp.279-282 (2006)
- [3] 福山良和：「電力系統の無効電力配分計画問題へのPSOの適用比較検討」, 電学論B, Vol.124, No.5, pp.690-696 (2004)
- [4] 坊原尚記, 作田健, 香月智：「PSOに対するランダム探索機能付加効果に関する考察」, 土木学会, 第9回設計工学に関するシンポジウム講演論文集, pp.163-168 (2005)
- [5] Vladimiro Miranda: "Evolutionary Algorithms with Particle Swarm Movements", ISAP (2005)