

# 複数許容解を発見する改良 ABC アルゴリズム による大規模無線センサネットワークを対象 とした効果的フラディング手法

宇谷明秀<sup>†1</sup> 長島淳也<sup>†2</sup> 山本尚夫<sup>†1</sup>

無線センサネットワークでは、シンクから各センサ端末へのセンシング情報送信要求メッセージ等でフラディングが多用される。しかし、一般的なフラディングでは、全センサ端末が受信情報を転送(ロ-カルブロードキャスト)することになるため、センサ端末のそれぞれに多大な通信負荷が加わることになる。多くの場合、全センサ端末が受信情報を転送しなくても、または各センサ端末がその最大送信電力で受信情報を転送しなくても、ネットワークを構成する全センサ端末へ情報(メッセージ)を普及させることができる。本研究では大規模な無線センサネットワークを対象とした効果的なフラディング手法を提案する。この手法は高次元最適化問題に対する解探索性能に優れたABCアルゴリズムの改良法を1つの大域的最適解ではなく、異なる複数許容解を探索できるように拡張発展させた複数許容解探索型改良ABCアルゴリズムに基づくフラディング手法であり、本論文では詳細なる数値実験を通してその有効性を明らかにする。

## Effective Flooding Method Based on Advanced ABC Algorithm Detecting Plural Acceptable Solutions for Large Scale Sensor Networks

Akihide Utani<sup>†1</sup> Junya Nagashima<sup>†2</sup>  
and Hisao Yamamoto<sup>†1</sup>

In a wireless sensor network, flooding is required for the dissemination of queries and event announcements. The original flooding causes the overlap problems. In the original flooding, generally, all sensor nodes receiving a broadcast message forward it to its neighbors by the full forwarding power. For a dense wireless sensor network, the impact caused by the original flooding may be overwhelming. The original flooding may result in the reduced network lifetime. To obtain plural adjustment solutions on the forwarding power of each sensor node in a large scale and dense wireless sensor network, this paper proposes a new effective flooding method, i.e., a new query dissemination method based on the advanced ABC algorithm detecting plural acceptable solutions. By using the obtained plural adjustment solutions, the flexible operation according to the residual energy

of each sensor node can be realized. The proposed method is evaluated in detail by numerical experiments. In the experiments performed, the performances of the proposed method are compared with those of the existing ones to verify its effectiveness.

### 1. はじめに

東日本大震災以降、大規模領域の環境観測を容易に実現する手段として、無線センサネットワークへの関心が益々高まってきている。大規模な領域を観測する無線センサネットワークでは、一般にバッテリーなどの電源容量に制約のあるリソースで動作するセンサ端末を観測領域内に多数設置し、各センサの測定データをセンサ端末間の無線マルチホップ通信によってシンクまで転送することで、対象とする大規模領域の状態観測を実現する<sup>1)</sup>。よって、無線センサネットワークの有効運用期間の延長を実現するためには、各センサ端末の通信負荷の抑制が必要となる。

無線センサネットワークでは、シンクから各センサ端末へのセンシング情報送信要求メッセージ等でフラディングが多用される。しかし、一般的なフラディングでは、全センサ端末が受信情報を転送(ロ-カルブロードキャスト)することになるため、ネットワークを構成するセンサ端末のそれぞれに多大な通信負荷が加わることになる。特に電源容量に制約のあるセンサ端末群で構成される大規模で高密度な無線センサネットワークでは、フラディングによる負荷の影響は大きい。多くの場合、全センサ端末が受信情報を転送しなくても、または各センサ端末がその最大送信電力で受信情報を転送しなくても、ネットワークを構成する全センサ端末へ情報(メッセージ)を普及させることができる。

フラディングの効率化を実現するための方策として、既往の研究では事前に入手したセンサ端末群の観測領域内での位置情報をもとに、受信情報を転送(ロ-カルブロードキャスト)する端末(Forwarding Node; FN)を選定するための手法が数多く提案されている<sup>2)-4)</sup>。これらの研究では、各センサ端末が設定された一定の送信電力(最大送信電力が設定されることが多い)で受信情報を転送することを前提として、FN群が選定される。文献2)の手法は情報(メッセージ)普及の過程で、シンクからの情報を受信したセンサ端末群の中で次数(隣接端末数)の多いセンサ端末から順にFNとして選定していく手法であり、次数に基づくこの選定はネットワークを構成する全センサ端末に情報(メッセージ)が行き渡るまで繰り返される。文献3)の手法では無線センサネットワークをシンクを根とする木構造として捉え、情報(メッセージ)普及に関する各センサ端末の影響力値(各端末がFNに選定された場合の受信端末数の合計)を予測する。そして、全センサ端末に情報(メッセージ)が行き渡るまで、情報(メッセージ)普及の

<sup>†1</sup> 東京都市大学知識工学部  
Faculty of Knowledge Engineering, Tokyo City University.

<sup>†2</sup> 東京都市大学大学院工学研究科  
Graduate School of Engineering, Tokyo City University.

過程で逐次更新されるこの影響力値に基づいてFNを選定していく。文献4)の手法は粒子群最適化(Particle Swarm Optimization; PSO)法<sup>5),6)</sup>を組合せ最適化問題のために改良した離散型粒子群最適化(Discrete PSO; DPSO)法<sup>7)</sup>に基づく手法である。この手法では最少のFN群でネットワークを構成する全センサ端末に情報(メッセージ)が普及するように考案された目的関数に対する組合せ最適化問題を解くことによってFN群が決定される。文献2),3)の手法を適用した場合よりも良好な結果が得られことが確認されている<sup>4)</sup>。しかし、大規模で高密度な無線センサネットワークの有効運用期間の延長を考慮した場合、各センサ端末の負荷分散を実現する手法の開発が求められる。

著者らは既往の研究において、無線センサネットワークを構成する全センサ端末の送信電力に関する複数の解候補(複数の送信電力調整値候補セット)を提示するための手法として、PSO法に基づく発展手法(The PSO method for computing Plural Acceptable Solutions; PSO-PAS)を提案した<sup>8)</sup>。この手法(PSO-PAS)は1つの大域的最適解ではなく、複数の許容解を効率的に求める手法である。複数の送信電力調整値候補セットを提示し活用することで、ネットワークを構成する各センサ端末の消費電力を考慮した柔軟なネットワーク運用が可能となり、その有効運用期間を延長できることを確認している<sup>8)</sup>。しかし、PSO法は問題の高次元化に伴い解探索性能が低下することが指摘されている。大規模な工学設計問題、例えば数百次元の最適化問題を想定した場合、PSO法に基づく手法には限界がある(異なる複数許容解の発見が困難になる)と考えられる。

本研究ではPSO法よりも高次元(数百次元)の連続型多峰性関数の最適化問題に対する解探索性能に優れたABCアルゴリズム<sup>9)</sup>に着目した。著者らは既往の研究においてABCアルゴリズムの高度化法を提案し、その高次元最適化問題に対する有効性を検証している<sup>10)</sup>。本研究では既往の研究<sup>8)</sup>で想定したよりもさらに大規模な無線センサネットワークの有効運用期間の延長を目的として、多数(数百個)のセンサ端末の送信電力を調整(最適化)するための手法を提案する。この提案手法はABCアルゴリズムの高度化法<sup>10)</sup>を1つの大域的最適解ではなく、複数の許容解を探索できるように拡張発展させた複数許容解探索型改良ABCアルゴリズムに基づく手法である。本論文では、提案手法の大規模無線センサネットワークにおけるセンサ端末群の送信電力調整に対する有効性を既往の手法であるPSO-PASを適用した場合との比較を通して議論する。

## 2. ABCアルゴリズムに関する既往の研究

ABCアルゴリズムはPSO法と同様に確率論的な多点探索型の最適化手法である。以下では、ABCアルゴリズムの概要を示した後、文献10)の高度化法について述べる。

### 2.1 ABCアルゴリズムの概要

#### (1) employed beesによる解探索

各employed beeはある1つの探索点と関係づけられており、解探索の各過程で関係づ

けられた探索点の更新(より評価値の高い解の発見)を試みる。

#### (2) onlookersによる解探索

各探索点の目的関数値(評価値)から各探索点の適合度を計算し、計算した適合度から各探索点の相対価値確率を算出する。各onlookerは算出された各探索点の相対価値確率に基づくルレット選択によって、1つの探索点を選択し、選択したこの探索点の更新を試みる。onlookersによる解探索では相対的に価値の高い探索点の更新が繰り返し試みられることになる。

#### (3) scoutsによる解探索

上記(1),(2)の解探索において、ある設定した探索回数の中に一度も更新されなかった探索点が存在した場合、その探索点に関係づけられたemployed beeを一時的にscoutに変化させる。scoutは対応関係にあるこの探索点の位置を大きく移動させる。

### 2.2 ABCアルゴリズムの高度化法<sup>10)</sup>

#### (1) 適合度算出式に関する問題点と改善策

各探索点(探索過程の解候補)の評価指標である適合度は、対象とする問題ごとに設定された目標値を基準値として算出するべきである。しかし、ABCアルゴリズムでは問題ごとに設定された目標値ではなく、常に0を基準値として各探索点の適合度が算出される。よって、対象とする問題によってはonlookersによる探索点の選択が意図したようには行われず、更新すべき探索点の選択頻度が低下してしまう可能性がある。

改善策として著者らは次の適合度算出式を提案した。

$$fit_i = \begin{cases} \frac{1}{f(x_i) - f_{bound}}, & f(x_i) - f_{bound} \geq f_{accuracy} \\ \frac{1}{f_{accuracy}}, & f(x_i) - f_{bound} < f_{accuracy} \end{cases} \quad (i = 1, \dots, SN) \quad (1)$$

ただし、下付き $i \in \{1, 2, \dots, SN\}$ (探索点の総数)は探索点番号を表す。 $f_{bound}$ は設計条件を満たす許容解( $x^+$ )に対する許容限界値 $[f(x^+)]$ を意味し、 $f_{accuracy}$ の値としては許容限界値への目標とする収束精度の値を設定する。ここで、理想的には $f_{bound}$ の値として大域的最適解( $x^*$ )に対する目的関数値 $[f(x^*)]$ を設定したいところではあるが、多くの設計問題において大域的最適解( $x^*$ )は未知であり、実問題への適用においてそれは不可能である。また、様々な設計問題に適用するにあたり、設計条件を満たす許容解( $x^+$ )を明確に設定できないケースも想定される。このような場合は、事前の調査実験によって求められた準最適解などから $f_{bound}$ の値を設定することになる。

#### (2) onlookersの探索点選択方法の問題点と改善策

多くの局所解を有する多峰性関数の解探索過程において、ある探索点( $x_i$ )が大域的最適解(または許容解)とは大きく異なる局所解の近傍に更新され、他の探索点と比較

してその適合度が極端に高く評価された場合、この探索点( $x_i$ )の近傍に大域的最適解(または許容解)が存在しないにも関わらず、この探索点( $x_i$ )が集中的に選択されてしまう。実問題への応用を考慮した場合、一般にその目的関数は多数の局所解を有する高次元の多峰性関数であることが想定される。onlookersの探索点選択方法、特に探索の初期段階における選択方法には改善が必要である。

この問題点を改善するために、著者らは次の改善策を導入した。まず探索の前段階[段階1]では各探索点の適合度の値から適合度の高い探索点(上位点)を探索候補とする。そしてonlookersはこれら上位点の中からランダムに探索点を選択し、選択した探索点の更新を試みる。一方、解探索がある程度進んだ後[段階2]においては従来通り適合度に基づく相対価値確率に応じて探索点を選択し、選択した探索点の更新を試みる。段階1から段階2への切換のタイミングを判定するために次式を提案した。

$$f_{init} = \sum_{i=1}^{SN} f(x_i^1) / SN \quad (2)$$

$$f_{judge} = \frac{f_{init} - f(best)}{f_{init} - f_{bound}} \geq dr \quad (3)$$

ここで、 $f(best)$ は全体最良解( $best$ )に対する目的関数値を表し、 $f_{init}$ は探索の初期状態における全探索点の平均評価値を表す。 $dr$ は解への収束状況を判定するためのパラメータ( $0 < dr < 1$ )である。この改善策では、まず式(2)によって初期の探索点集団を評価し、次に式(3)を用いて目的関数値の改善度を評価する。アルゴリズムにおいては、段階1の最低繰返し回数( $T1_{min}$ )を設定し、この繰返し回数( $T1_{min}$ )に達した後、式(3)による判定を解探索の各過程で実行し、段階1から段階2への切換のタイミングを判断する。

### (3) 参照点の選択方法に関する問題点と改善策

employed bees及びonlookersの探索において、各探索点の更新候補点は、全探索点の中からランダムに選択された1つの探索点(これを参照点と呼ぶ)を用いて決定される。よって、解探索の過程で全探索点がある1つの局所解に収束してしまうという可能性は極めて小さいが、全探索点の中からランダムに参照点を選択して更新候補点を決定するため、探索点が更新されないケースが多発する可能性がある。

解(探索点)の更新頻度を向上させることを目的として著者らは参照点の選択方法を改善した。この改善策では、上記(2)で述べた段階1においては適合度上位個の探索点の中からランダムに参照点を選択し、段階2においては適合度に基づく相対価値確率に応じて参照点を選択する。従来のように全探索点の中からランダムに参照点を選択する場合と比較して各探索点の更新頻度(探索効率)の向上を期待することができる。

### (4) scoutsによる探索の問題点と改善策

scoutsは遺伝的アルゴリズムにおける突然変異に相当する役割を担っている。ABC

アルゴリズムではある探索点が設定された探索回数の間、連続して更新されなかった場合、その探索点を乱数によって生成した探索点と交換する。しかし、連続して更新されなかった回数が探索点の交換条件になっている点には問題がある。探索点が更新されないケースとして、その探索点が解探索過程で既に大域的最適解の近傍に位置しており、そのために更なる更新点の発見が困難になっているケースが考えられる。このような場合、その探索点を乱数によって生成した探索点と交換すべきではない。

ABCアルゴリズムは、そもそも全探索点がある1つの局所解に収束してしまう可能性がないという解探索特性を有している。またonlookersの探索点選択に関する改善策の導入によって、局所解近傍に位置する探索点の集中的な選択の可能性は低下し、大域的な解探索性能はより向上する。更にscoutsによる探索には探索点の交換条件に明らかな問題がある。以上の理由から高度化法<sup>10)</sup>においてはscoutsによる探索は必要ないと判断し、実行しないことにした。

## 3. 複数許容解探索型改良ABCアルゴリズム

本研究では、大規模工学設計問題(数百次元の工学設計問題)に対する実用手法として、文献10)のABCアルゴリズムの高度化法を異なる複数の許容解を求めることができるように拡張発展させた複数許容解探索型改良ABCアルゴリズムを提案する。以下では、複数の許容解を探索するために導入した複数コロニー-と各コロニー-を構成するemployed bees及びonlookersの解探索概要について述べる。

### 3.1 複数許容解探索の概要

欲する許容解の個数( $m$ )と同数の複数コロニー-を生成する。ここで、各コロニー-のサイズ及び探索点総数は事前情報が何もない場合は同サイズに設定する。

#### (1) employed bees及びonlookersの解探索概要

実際の蜜蜂群において、餌場の情報は同一コロニー-内で共有される。よって、本手法においても探索点に関する情報は同一コロニー-に属する探索群(employed bees, onlookers)内でのみ共有されるものとした。employed bees及びonlookersによる解探索はコロニー-ごとに実行される。具体的には、onlookersによる探索点の選択において、更新対象の探索点は2.2(2)に基づいて同一コロニー-内の探索点の中から選択される。またemployed bees及びonlookersによる探索点の更新において、各探索点の更新候補点を求める際の参照点は2.2(3)に基づいて同一コロニー-内の探索点の中から選択される。

#### (2) 競合探索(特別探索領域の設定)

上述したように基本的にはコロニー-ごとに独立に解探索を進めていくが、あるコロニー-に属する探索群が欲する許容解を発見した場合、他のコロニー-に属する探索群に明示的に別の異なる許容解を探索されるために、この発見された許容解の周囲にこのコロニー-の特別探索領域を設定する。本提案ではアルゴリズム設計上のパラメータと

して、欲する許容解への収束を判定するパラメータ( $q_{comp}$ )と特別探索領域を規定するパラメータ( $R_{spec}$ )を導入する。具体的には、並列に実行される各コロニ - の解探索の過程において、あるコロニ - の全体最良解( $best$ )が設計条件を満たす許容解( $x^+$ )よりも良好な解となり、かつ設定した繰返し回数( $q_{comp}>0$ )の間、要求した精度の範囲を超える大きな変更がなかった場合、ある一つの欲する許容解に収束したと判定し、この許容解の周囲( $R_{spec}>0$ )をこのコロニ - の特別探索領域として指定する。そして、この特別探索領域内に位置する他のコロニ - に属する探索点は、この特別探索領域を除いた解探索領域内に乱数によって生成した探索点と交換する。なお解探索の過程で、あるコロニ - に属する探索点の更新候補点が既に特別探索領域が設定されている別のコロニ - の特別探索領域内に位置する場合は、解が改善される場合であったとしても解(探索点)の更新は行わない。特別探索領域が設定されたコロニ - とは別のコロニ - に属する探索群は、特別探索領域を除いた解探索領域内を探索する。

#### 4. 大規模無線センサネットワークへの適用

本研究では複数許容解探索型改良ABCアルゴリズムを大規模無線センサネットワークにおけるセンサ端末群の送信電力調整問題に適用し、複数の送信電力調整候補セットを求める。以下では、送信電力調整問題への複数許容解探索型改良ABCアルゴリズムの適用法について述べた後、得られた複数の送信電力調整候補セットを示す。

##### 4.1 複数許容解探索型改良ABCアルゴリズムの送信電力調整問題への適用

###### (1) 実験環境と前提条件

実験環境として、標準化されつつある高性能GPS(Global Positioning System)を搭載した多数の固定センサ端末で構成される大規模で高密度な無線センサネットワークを想定する。高密度状態の無線センサネットワークにおいて通常のフラッシングを繰返し実行した場合、各センサ端末に多大な通信負荷が加わる。本研究では以下に示す前提条件のもとで複数許容解探索型改良ABCアルゴリズムを適用し、複数の送信電力調整候補セットを求める。

センサ端末群、及び各センサ端末が計測したデータを収集する1つのシンクを設置し終えた状態(この状態を初期状態と呼ぶ)において、シンクは位置情報送信要求メッセージを格納した制御パケット(ポップカウントパケット)を通常のフラッシングによってネットワーク全体に散布する。この制御パケットを受信した各センサ端末はポップカウントに基づく最短経路で自身の位置情報をシンクへ転送する。本研究では初期状態におけるシンクでの各センサ端末の位置情報取得を前提とし、センサ端末群の観測領域内での位置は既知であるものとしてその送信電力の調整を試みる。

###### (2) 設計変数と目的関数

本研究ではシンクからネットワーク全体への情報普及を効率的に行うために、対象

とする大規模無線センサネットワークを構成する各センサ端末の送信電力値を設計変数とした。

$$\mathbf{x} = (E_T(1), E_T(2), \dots, E_T(n_{total}))^T \quad (4)$$

ここで、 $E_T(i)$  ( $i = 1, \dots, n_{total}$ ) はセンサ端末( $i$ )の送信電力値、 $n_{total}$  はネットワークを構成するセンサ端末総数を表す。

次に目的関数の設定(定式化)について述べる。既往の研究の中にはネットワークを構成する全センサ端末への情報普及ではなく、できるだけ少ない転送端末(FN)群で、できるだけ多くのセンサ端末への情報普及を目的とした研究もある。文献11)の手法(Gossiping)はネットワークの有効運用期間の延長を第一として、そのためには運用精度の若干の低下は受け入れざるを得ないという発想のもとに提案された手法である。一般にフラッシングの効率化問題では「ネットワークを構成する全センサ端末への情報普及」と「そのネットワークを構成する各センサ端末の通信負荷の抑制」という相反する2つの目的を同時に実現することが要求される。この種の問題を最適化問題として扱う場合、一般的には解析対象を多目的最適化問題として定式化し、両目的に対する複数のパレト最適解を求める方向で研究が進められる。しかし、本研究では既往の研究8)と同様に、ネットワークを構成する全センサ端末への情報普及を前提とし、その前提のもとで各センサ端末の通信負荷を抑制することを目的とした。要するに、ネットワークの運用精度を低下させないことを前提とした上で、できるだけその有効運用期間を延長させることを考えた。目的関数を以下に示す。

$$f(\mathbf{x}) = \frac{S^{-(n_{total} - n_{receive})}}{\sum_{i=1}^n E_T(i)} \quad (5)$$

ここで、 $n_{receive}$  はシンクからの情報を受信できたセンサ端末数を表す。この目的関数には等比減少関数が導入されている。導入したこの等比減少関数の効果によって、ネットワークを構成する全センサ端末への情報普及を確実なものとし、その上で各センサ端末の送信電力を抑制する解を探索することが可能となる。なお、本研究において各センサ端末のパケットの送受信に関する電力消費量は文献12)に基づき算出している。概説すると、各センサ端末は無線送受信機の動作に $E_{elec}=50$ (nJ/bit)、送信機の信号増幅のために $\epsilon_{amp}=100$ (pJ/bit/m<sup>2</sup>)の電力を必要とする。また無線送信機の電力制御により、各センサ端末は送信距離に到達する最小の電力でパケットを送信できるものとする。 $k$ (bit)の情報を $d$ (m)の範囲にブロードキャストしたときの送信電力( $E_T$ )、 $k$ (bit)の情報を受信したときの受信電力( $E_R$ )は次式によって算出される。

$$\begin{aligned} E_T &= E_{elec} \times k + \epsilon_{amp} \times k \times d^2 \\ E_R &= E_{elec} \times k \end{aligned} \quad (6)$$

本研究では数百個のセンサ端末の送信電力調整に対する本提案の最初の評価実験として、式(6)で記述される理想的な通信環境のもとで本提案(本適用法)の有用性を検証する。

#### 4.2 実験設定

大規模で高密度な無線センサネットワークを用いて、観測領域内の状態を定期的にモニタリングする状況(観測領域内に配置したセンサ端末群の測定データを定期的にシンクで収集する状況)を想定した。実験の設定値を表1に示す。本実験では屋外における $500(m) \times 500(m)$ の領域を観測対象とし、各センサ端末の無線通信範囲は既往の研究8)との比較を考慮して設定した。また、センサ端末群は観測領域内にランダムに配置し、シンクは観測領域の縁(中央下)に設置した。図1はセンサ端末群を配置し終えた後の観測領域内におけるそれらの分布を表した図である。この図には各センサ端末の無線通信範囲を $150(m)$ に固定した場合の1つの最適な転送端末(FN)群が示されている。これは、本実験設定においてシンクからネットワーク全体への情報の普及を前提とした場合、最低でも図に示す7つのセンサ端末が受信情報を転送する必要があることを表している。

適用手法(複数許容解探索型改良ABCアルゴリズム)の本実験におけるパラメータの設定値を表2に示す。許容限界値( $f_{bound}$ )の値は文献4)の研究成果に基づいて、 $f_{bound} = 1/3.091mJ$ とした。この値( $1/3.091mJ$ )は各センサ端末の無線通信範囲を $150(m)$ に固定した場合の最適解、即ち最適な転送端末(FN)群(図1)に対する目的関数の値である。

表1 実験設定

Simulation size	$500(m) \times 500(m)$
Number of sensor nodes	400
Range of radio wave	$0(m) \sim 150(m)$

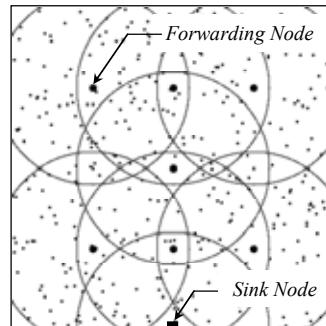


図1 センサ端末群の分布と最適な転送端末群

特別探索領域を規定するパラメータ( $R_{spec}$ )の値に関しては文献8)を参考に表2に示す2つの値で結果を比較することにした。比較対象手法であるPSO-PASを本実験に適用する際の集団サイズや総繰返し回数などは表2に示した値を設定しており、PSO-PASのアルゴリズム設計上のパラメータに関しては文献8)で用いられている値(良好な結果が得られる値)を採用している。なお、本実験においてシンクから散布される情報(メッセージ)のメッセージサイズは24B(バイト)、目的関数に導入した等比減少関数における $s$ の値は( $s =$ )1.5とした。

#### 4.3 実験結果及び考察

既往の手法<sup>2)~4),8)</sup>との比較を通して、本提案(適用法)の有用性を評価した。以下に示す評価結果の中で、文献2)の手法は“Greedy”、文献3)の手法は“*IUA*(Influence Update Algorithm)”、文献4)の手法は“*DPSO*”、文献8)の手法は“*PSO-PAS*”と表記されている。

実験結果の一覧を表3及び表4に示す。表中の総電力消費量とは、シンクからネットワーク全体への1回の情報散布で消費された全センサ端末の送受信電力量の合計を表す。表3には文献2)~4)の手法による結果に加えて、オリジナルフラッディング(単に“*Flooding*”と表記されている)の結果が整理されており、表4には本提案(適用法)による結果に加えて、既往の複数許容解探索手法(PSO-PAS)<sup>8)</sup>を適用した場合の結果が整理されている。ここで表4中のPAO-PASに関するパラメータ( $T_{spec}$ )は適用手法(複数許容解探索型改良ABCアルゴリズム)の $R_{spec}$ に相当するパラメータである<sup>8)</sup>。結果を考察すると、オリジナルフラッディングではネットワークを構成するセンサ端末群に多大な通信負荷が加わっている(表3)。それに対して、最適な(必要最少限の)転送端末(FN)群を選定できるDPSOでは、1回の情報散布において消費される総電力消費量を大幅に抑制することができる(表3)。本提案(適用法)ではこのDPSOを適用した場合より

表2 パラメータの設定値

$m$	3
each colony size( $N_g$ )	100
employed bees( $SN_g$ )	50% of colony size
onlookers( $N_g - SN_g$ )	50% of colony size
	$0.2 \times SN$
$dr$	0.9
$f_{bound}$	$1/3.091mJ$
$f_{accuracy}$	$1.0 \times 10^{-16}$
$T_{max}$	30000
$T_{min}$	$(T_{max}/2 =)15000$
$q_{comp}$	20
$R_{spec}$	15.0, 30.0

表3 結果一覧[無線通信範囲:150(m)]

Method	Total energy consumption
Flooding $FNs = 400$	176.640mJ
Greedy $FNs = 160$	72.960mJ
IUA $FNs = 15$	10.320mJ
DPSO $FNs = 7$	6.864mJ

表4 結果一覧[無線通信範囲:0(m) ~ 150(m)]  
 (50試行の最良値, 平均値, 最悪値)

Method		Total energy consumption		
		Best	Ave.	Worst
PSO-PAS ( $T_{max}=15.0$ )	Solution1	9.456mJ	9.555mJ	9.689mJ
	Solution2	9.591mJ	9.787mJ	9.878mJ
	Solution3	9.722mJ	9.818mJ	9.905mJ
PSO-PAS ( $T_{max}=30.0$ )	Solution1	9.483mJ	9.592mJ	9.729mJ
	Solution2	9.628mJ	9.819mJ	9.928mJ
	Solution3	9.790mJ	9.901mJ	9.997mJ
Proposal ( $R_{max}=15.0$ )	Solution1	6.192mJ	6.233mJ	6.242mJ
	Solution2	6.247mJ	6.254mJ	6.265mJ
	Solution3	6.251mJ	6.259mJ	6.268mJ
Proposal ( $R_{max}=30.0$ )	Solution1	6.231mJ	6.238mJ	6.245mJ
	Solution2	6.256mJ	6.265mJ	6.272mJ
	Solution3	6.267mJ	6.274mJ	6.288mJ

も総電力消費量を抑制した3つの送信電力調整値候補セットが得られている(表4)。PSO-PASを適用した場合, DPSOを適用した場合よりも総電力消費量を抑えた解(送信電力調整値候補セット)を得ることができなかった(表4)。大規模無線センサネットワークを対象にした高次元の送信電力調整問題(本実験においては計400のセンサ端末群の送信電力調整問題)に対して本適用法は優位であると言える。

## 5. おわりに

本研究では, ユビキタス情報化社会を進展させる重要なネットワーク技術である無線センサネットワークの有効運用期間の延長を目的とした設計問題の1つとして, 大規模な無線センサネットワークを構成する全センサ端末の送信電力を調整(最適化)する問題を取り上げた。本論文では, このような高次元の設計問題に対して実用的に用い

ることのできる手法として, ABCアルゴリズムの高度化法を1つの大域的最適解ではなく, 異なる複数の許容解を探索できるように拡張発展させた手法(複数許容解探索型改良ABCアルゴリズム)を提案し, 本手法を大規模無線センサネットワークにおけるセンサ端末群の送信電力調整問題(高次元の送信電力調整問題)に適用した場合の有効性を既往の手法を適用した場合との比較を通して検証した。実験結果より, 既往の手法を適用した場合よりも総電力消費量を抑制した複数の送信電力調整候補セットが得られることを確認した。しかし無線センサネットワークの実際の利用環境は本研究で想定したような理想的な通信環境にはない。今後は電波伝搬ロスなどを考慮し, 本提案(適用法)をさらに改善・発展させていく予定である。

## 参考文献

- 1) Akyildiz, I., Su, W., Sankarasubramaniam, Y. and Cayirci, E.: Wireless sensor networks: A survey, Computer Networks Journal (Elsevier), Vol.38, No.4, pp.393-422 (2002).
- 2) Adjih, C., Jacquet, P. and Viennot, L.: Computing connected dominated sets with multipoint relays, Technical Report 4597, INRIA, pp.1-16 (2002).
- 3) 牛腸, 宇谷, 山本: 無線センサネットワークにおけるフラッディングの効率化に関する一提案, 情報処理学会第71回全国大会講演論文集(3), pp.103-104 (2009).
- 4) Nagashima, J., Utani, A. and Yamamoto, H.: Efficient flooding method using discrete particle swarm optimization for long-term operation of sensor networks, ICIC Express Letters, Vol.3, No.3(B), pp.833-840 (2009).
- 5) Kennedy, J. and Eberhart, R. C.: Particle swarm optimization, Proc. IEEE International Conference on Neural Networks, pp.1942-1948 (1995).
- 6) Clerc, M. and Kennedy, J.: The particle swarm-explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space, IEEE Trans. Evol. Comput., Vol.6, No.1, pp.58-73 (2002).
- 7) Kennedy, J. and Eberhart, R. C.: A discrete binary version of the particle swarm algorithm, Proc. IEEE International Conference on Systems, Man & Cybernetics, pp.4104-4108 (1997).
- 8) 長島淳也, 宇谷明秀, 山本尚生: 複数許容解探索型粒子群最適化法の無線センサネットワークへの適用 - フラッディング効率化のための各センサノードの送信電力調整 -, 日本知能情報フアジイ学会誌, Vol.23, No.1, pp.65-77 (2011)
- 9) Karaboga, D. and Basturk, B.: On the performance of artificial bee colony (ABC) algorithm, Applied Soft Computing, Vol.8, pp.687-697 (2007).
- 10) 宇谷明秀, 長島淳也, 牛腸隆太, 山本尚生: Artificial Bee Colony(ABC)アルゴリズムの高次元問題に対する解探索性能の強化, 信学論(D), Vol.J94-D, No.2, pp.425-438, (2011).
- 11) Lin, M. J., Marzullo, K. and Masini, S.: Gossip versus deterministic flooding: Low message overhead and high reliability for broadcasting on small networks, DISC, pp.253-267 (2000).
- 12) Heinzelman, W. R., Chandrakasan, A. and Balakrishnan, H.: Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks, Proc. Hawaii International Conference on System Sciences, pp.3-005-3014 (2000).