

フェイズ毎の繰り返し回数と温度パラメータを考慮した WMN-SA の性能評価

坂本 真仁^{1,a)} 小田 哲也¹ 常 馨月¹ バロリ レオナルド^{2,b)} 池田 誠^{2,c)}

概要: 将来のユビキタスネットワークを実現する技術として、固定の有線ネットワークに依存せずに柔軟なネットワーク構成が可能な Wireless Mesh Networks (WMN) に注目が集まっている。我々はこれまでに、WMN のメッシュルータ配置最適化に Simulated Annealing (SA) を用いる WMN-SA を提案した。本稿では SA のパラメータ変化がシミュレーション結果にどのような影響を与えるのかを調べ、その評価を行う。シミュレーション結果から、フェイズ毎の繰り返し回数は多ければ多いほど良い解を導くことが明らかになった。温度パラメータが低いときでは、改悪する解を認めにくいため局所的最適解に陥りやすく、収束が速いという特徴がある。したがって 200 フェイズ以内で収束したと考えられる。

キーワード: 無線メッシュネットワーク, WMN-SA, フェイズ毎の繰り返し回数, SA 温度パラメータ

Performance Evaluation of WMN-SA Considering a Variety of Numbers of Iterations per Phase and SA Temperature Values

SHINJI SAKAMOTO^{1,a)} TETSUYA ODA¹ XINYUE CHANG¹ LEONARD BAROLLI^{2,b)} MAKOTO IKEDA^{2,c)}

Abstract: As one of technologies for implementing ubiquitous networks in the future, Wireless Mesh Network (WMN), which is not only independent on wired infrastructure but is also a lot more flexible, has attracted a great deal of research attention. We have already proposed a simulation system using Simulated Annealing (SA) for node placement problem in WMN, it is called WMN-SA. We evaluate the effects of a variety of SA parameters in our proposed system. From simulation results, we verified that for more iterations per phase, WMN-SA gets better solutions. When SA temperature is lower, WMN-SA converge faster than other cases, because WMN-SA does not accept bad solutions. In our simulations WMN-SA converged in 200 Phases.

Keywords: Wireless Mesh Network, WMN-SA, Iteration per Phase, SA Temperature

1. はじめに

将来のユビキタスネットワークを実現する技術として、固定の有線ネットワークに依存せずに柔軟なネットワーク

構成が可能な無線メッシュネットワーク (Wireless Mesh Networks: WMN [1][2][3][4]) に注目が集まっている。

WMN で使用するノードをメッシュノードと呼ぶ。本稿では、メッシュルータとメッシュクライアントという 2 つのタイプのメッシュノードを用いる。メッシュルータは、WMN を構成するためにマルチホップ機能を有している。マルチホップ機能を有することにより、各ルータクライアント間の通信距離を縮めることができる。

送受信に必要な最低電力は通信距離の 2 乗に比例して上昇することがわかっているため、通常のルータより少ない送信電力でカバレージを提供することができる。また、

¹ 福岡工業大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, Fukuoka Institute of Technology, Japan

² 福岡工業大学情報工学部
Department of Information Engineering, Fukuoka Institute of Technology, Japan

a) shinji.t.sakamoto@gmail.com

b) barolli@fit.ac.jp

c) makoto.ikd@acm.org

メッシュルータはネットワークを自己修復できるため、頑健性の高いネットワークを構築する事が可能である。

しかしながら、WMNは無線端末で構成されるため、メッシュルータの配置箇所はネットワーク全体の接続性に影響を与える。メッシュルータ配置を最適化することにより、ネットワークの様々な性能が向上するため、メッシュルータ配置問題はWMNにおける最も重要な最適化問題の一つである。ただし、メッシュルータ配置問題は分散型のミニサム基準の施設配置問題であり、いわゆるP-Median問題に属するため、NP困難である[5]。最適化のためには、ヒューリスティックな手法が有効であることがわかっており、我々のグループではSimulated Annealing (SA)を用いたメッシュルータ配置システムであるWMN-SAを実装している[6]。本稿では、WMN-SA SystemにおいてSAのパラメータ変化がシミュレーション結果にどのような影響を与えるのかを調べ、その評価を行う。

2. WMN

WMNはIEEE802.11sにより標準化が進められている[7]。無線アドホックメッシュは当初軍事用に開発され、20世紀末以降、戦場に近しい災害時の環境に应用することを目的として進歩を遂げた。WMN対応のメッシュルータは、米ストリックス・システムズ、米トロポス・ネットワークス、米ノーテル・ネットワークス等が以前から製品化している[8]。ある端末が故障や通信障害などで経路の寸断が発生しても継続的に接続・再構成を繰り返す。さらに自己組織化を図るネットワークで、目的の送信先に達するまでノードからノードへデータ転送を行う。また、ルータ同士が対等な立場で情報のやりとりを行うためWMNはP2P通信でネットワーク構築を行う無線アドホックネットワークの一種である。

WMNの各無線端末は自律的にマルチホップネットワークが構成できる。WMNでは、Infrastructure/Backbone (I/B) WMNというアーキテクチャが最も使用されている。このアーキテクチャは、他の既存の無線ネットワークの統合が可能である。本研究ではこのアーキテクチャについて検討する。I/B WMNはその役割によって、次の4種類のノードに分類される[9]。

MP (Mesh Point)

無線メッシュネットワークを構成するために必要なメッシュ機能を実装したノードであり、Station (STA)は收容しない。MPの機能はソフトウェアによって実現でき、PCや情報家電機器、AP、携帯端末に実装される。WMNのネットワーク内ではハブ・ブリッジのような役割をもつ。

MAP (Mesh Access Point)

MPの機能とAPの機能を実装したノードである。MAPは無線LANメッシュネットワークを構築する

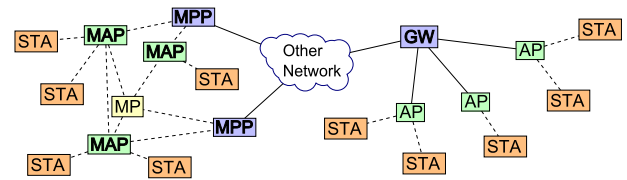


図1 WMN (左)と従来の無線ネットワーク (右)のイメージ図
Fig. 1 A comparison of WMN (left) and traditional wireless network (right).

だけでなく、メッシュ機能を実装していない無線LAN端末であるSTAからの接続を收容する機能も有しているノード。

MPP (Mesh Portal Point)

メッシュ機能と、無線LANメッシュネットワークから他のネットワーク等の異なる分散システムとの接続のためのゲートウェイ機能を実装したノード。

STA (Station)

メッシュ機能を有さない従来の無線LAN端末。

図1にWMNと従来の無線ネットワークの比較イメージを示す。図1に示した通り、ゲートウェイの役割を果たすMPPと外部ネットワーク以外の接続は全て無線で実現される。

従来のシングルホップの無線LANでは、ネットワーク全体を統括するゲートウェイが故障すると、無線LAN全体が動作不能というSPF (Single Point of Failure)に陥ることになっていた。しかし、WMNであれば自己修復機能を有するため信頼性は高い。外部ネットワークと接続できるMPPは複数設置することができるため、通常は1つのMPPを常時接続しておき、もう1つのMPPのゲートウェイ機能はウォームスタンバイ状態にしておくことで、SPFに陥ることがなく、ネットワークの信頼性の向上につながる。

さらに、WMNのネットワークはホモジニアスネットワークであるため機器管理は簡単である。以上のことから、メッシュルータをMP, MAP, MPPとして使用することが有効である。

2.1 メッシュルータ配置問題

メッシュルータ配置問題は以下のように定義できる。分散平面であるグリッド領域上で、任意の分布の固定のメッシュクライアントを考慮して、WMNのためのメトリックを最適化するためにメッシュルータの配置を最適化する。メッシュルータ配置問題は、分散型の施設配置問題に属する。メッシュルータ配置問題では、ノードはメッシュルータとメッシュクライアントであり、そのエッジをWMN内のリンクとする。目的関数として、WMNのネットワークの大きさと、カバーしているメッシュクライアント数を最

大化する。これにより、ネットワークにおける接続性の向上、ユーザカバレッジを最大化、エネルギー消費量の最小化、導入コストの最小化、スループットの最大化、通信遅延を最小化を実現することが期待できる [10][11].

2.2 メッシュルータ配置最適化

WMN の性能はメッシュルータの配置に依存するため、本研究では最適化のために接続性に着目したメッシュルータ配置を行う。WMN のネットワークが大きければ接続性も高くなる。そのため、WMN のネットワークの最大化を目的とする。この WMN のネットワークの成分をメッシュルータの連結成分である Component として扱う。Component が大きいほど通信範囲が広がるためメッシュクライアントの接続性が高くなる。最大の Component を Giant Component (GC) と呼び、Component が全て接続した状態であれば通信範囲が最大になる。そのため、メッシュルータ配置は目的関数として Size of GC (SGC) を第 1 条件とする。また、接続性を考慮するため、メッシュクライアントのカバーも Component の最大化をしつつ求めなければならない。そのため、Component によるメッシュクライアントのカバー数である Number of Covered Mesh Clients (NCMC) も目的関数とする。このとき、接続性の向上のため、WMN のネットワークの最大化が重要であるため、第 1 目的関数 f_1 を SGC、第 2 目的関数 f_2 を NCMC とする。この 2 つの目的関数を最大化するために階層最適化というアプローチを行う。このアプローチにおいて、 f_1 と f_2 の間にはパレート効率の関係があるため、 f_1 が f_2 を優越するように設定する。

3. SA

SA は最適化問題など NP 困難な問題に対して威力を発揮する確率的近似解法の一つであり、その原理は物理現象の焼き鈍し (Annealing) にヒントを得ている [12][13]。焼き鈍しの物理現象は高温物質の粒子が持つエネルギーは初めはランダムに広がり、エネルギーは散乱しているが、ゆっくりと温度を下げることによって粒子は並びが整った状態で、整列された基底状態、すなわちエネルギーの最も低い状態へと到達する。ここでのエネルギーを最適化のコストとして見立て SA は構成されている。

SA は理論的に最適解への確率的収束性が示されるといった非常に興味深い性質を持っている [14]。実際に近似度の高い解を得ることができ、効果的なメタヒューリスティクスの代表的な手法である。

SA のプロセスは解 S_n が与えられ、そのコストを $f(S_n)$ とする。次に解 S_n から近傍解 S_{n+1} が生成され、その解のコストを $f(S_{n+1})$ とする。ここで、近傍解 S_{n+1} のコスト $f(S_{n+1})$ が解 S_n のコスト $f(S_n)$ より改善されている場合、近傍解 S_{n+1} に移動する。改善されていない場合、解

Algorithm 1 : Pseudo-code of SA.

```

t := 0
Initialize T
s0 := Initial.Solution()
v0 := Evaluate(s0)
while (stopping condition not met) do
    while t mod MarkovChainLen = 0 do
        t := t+1
        s1 := Generate(s0,T) //Move
        v1 := Evaluate(s1)
        if Accept(v0,v1,T) then
            s0 := s1
            v0 := v1
        end if
    end while
    T := Update(T)
end while
return s0
    
```

S_n と近傍解 S_{n+1} のコストの差 $f(S_{n+1}) - f(S_n)$ とその時点での温度パラメータに対応する受理基準に基づく確率を用いて、近傍解 S_{n+1} への移動が否か決める。

現時点での解に対して同様な操作を反復し、解の系列が形成されていく。この反復の過程で徐々に温度パラメータを下げていくことにより、その解の系列は最小化されたコストへと変化していくプロセスとなる。

温度パラメータと解を受け入れる仕組みを導入することにより、近傍探索アルゴリズムにおける局所解への落ち込みを防ぐキックアップの役割を果たし、より良い解への探索を実現している。

SA は近傍探索アルゴリズムの特徴である反復を基調とし、改悪する解への移動を許すところが特徴である。したがって、その反復過程の実現は近傍探索を基盤にすることになり、解の移動に関しては、他の局所探索法などと同様な近傍を定義しなければならない。すなわち、SA を構成するには解表現、コスト関数、近傍構造、更には冷却スケジューリング、反復スケジューリングの定義が必要である。

SA アルゴリズムの擬似言語を Algorithm 1 に示す。SA は、理論的には無限に近い移動を繰り返すことにより、最適解に収束するアルゴリズムである。しかし、実際の適用において、無限に近い移動は困難な問題でしかない。そこで、実行時間内で実行が終了し、より最適解に近い解が求まるように、パラメータを調整し利用することとなる。すなわち、計算時間と解の質を鑑み、温度パラメータを有効に活用する必要がある。その際の冷却スケジューリングが重要になる。

4. メッシュルータ配置最適化への SA の適用

メッシュルータ配置問題は離散型の施設配置問題に属するため、NP 困難となる。そこで、メタヒューリスティック手法である SA を用いてメッシュルータ配置問題の最適化を図る [15]。本稿ではメッシュルータ配置のために設定

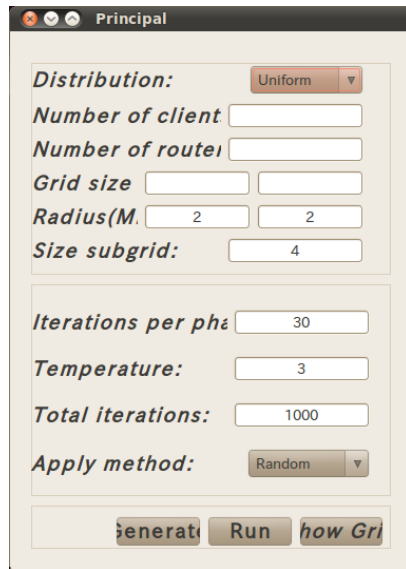


図 2 WMN-SA の GUI tool
Fig. 2 GUI tool for WMN-SA system.

する SA のパラメータであるフェイズ毎の繰り返し数と温度パラメータを考慮する。

本研究に用いる SA は多目的最適化を目的としているため、解の評価関数に重み付けを施す [16].

Component という用語は複雑ネットワークの分野からきている。SGC が最大になることが WMN を構築する際に最も重要な要件になる。

メッシュクライアントの配置分布は一様分布、正規分布、指数分布、ワイブル分布を考慮しシミュレーション開始時に配置する。

5. シミュレーション

5.1 シミュレーション設定

提案・実装したシミュレータを本稿では WMN-SA と呼ぶ。WMN-SA の GUI tool を図 2 に示す。メッシュルータの通信可能距離に関しては、WMN-SA 内において図 3 のように定める。本稿ではエリアサイズの $640\text{m} \times 640\text{m}$ を 32×32 セルで表すため、1セルあたりの面積は $20\text{m} \times 20\text{m}$ ($d = 20\text{m}$) であり、メッシュルータ 1 台の通信可能距離は 50m である。シミュレーションを行う際、同一の条件でサンプルを 10 個取得し、その結果の中央値を代表値として用いる。シミュレーション結果を計る指標として、SGC と NCMC の 2 種類を用いる。SGC は、各ルータ間の接続数の最大値を表し、NCMC は接続可能範囲に存在するメッシュクライアントのノード数を表している。WMN-SA において、SGC と NCMC はパレート効率性の関係にあるため、SGC が NCMC を優越するように設定した。

本稿でのシミュレーションに用いる入力パラメータを表 1 に示す。性能評価のために、フェイズ毎の繰り返し回数を 64, 128, 256, 512, 温度パラメータを 0, 1, 2, 3

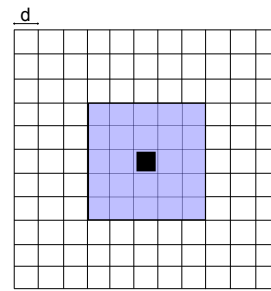


図 3 WMN-SA 内でのメッシュルータ 1 台の通信可能距離
Fig. 3 Communication distance for a mesh router in WMN-SA system.

表 1 入力パラメータ
Table 1 Input parameter.

パラメータ	入力値
クライアント分布	正規分布
エリアサイズ	$640\text{m} \times 640\text{m}$
メッシュルータ数	16
メッシュクライアント数	48
通信可能距離	50m
温度パラメータ	0, 1, 2, 3
フェイズ毎の繰り返し回数	64, 128, 256, 512

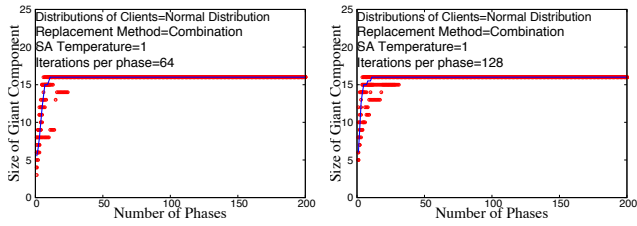
に設定する。フェイズ毎の繰り返し回数と温度パラメータで 4 種類の異なるパラメータによってシミュレーションを行う。

5.2 シミュレーション結果

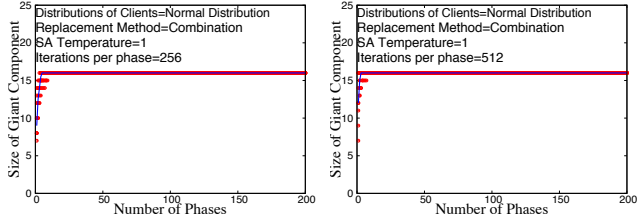
5.2.1 フェイズ毎の繰り返し回数による影響

フェイズ毎の繰り返し回数による影響のシミュレーション結果を図 4, 図 5, 図 6 に示す。図 4 と図 5 では 10 回のシミュレーション結果全てのサンプルをプロットし、それらの中央値を太線で表す。また図 6 では、それらの中央値のみを太線で表す。図 4 より、SGC は 50 フェイズ以内には全て最大値 ($\text{SGC}=16$) に達していることがわかる。図 5 より、フェイズ毎の繰り返し回数は多い方が結果が良いことがわかる。図 5(a) では、フェイズ毎の繰り返し回数が 64 のとき、200 フェイズでの NCMC の中央値は 44 となり、約 91.7% のクライアントカバー率となっている。また、図 5(b) より、フェイズ毎の繰り返し回数が 128 のとき、図 5(a) と比較すると大きな性能向上が見られる。さらに、図 5(c) における、フェイズ毎の繰り返し回数が 256 のときでは、更なる向上が見られる。そして、図 5(d) では、フェイズ毎の繰り返し回数が 512 のとき、200 フェイズでの NCMC の中央値は 46 である。これは約 95.8% のクライアントカバー率となり、同一のリソース条件における性能の向上が見られる。

図 6 よりフェイズ毎の繰り返し回数が多いほど、速い段階で最大値に達することがわかる。図 6(a) ではフェイズ数を 14 までしか表示していないが、それ以降は常に最大

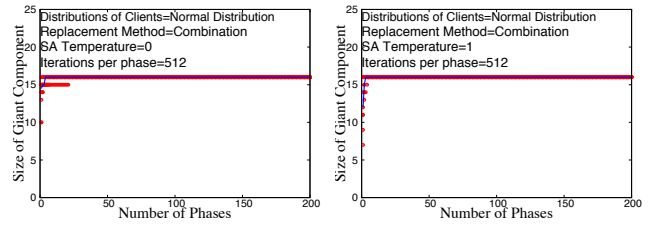


(a) 繰り返し回数 = 64 (b) 繰り返し回数 = 128

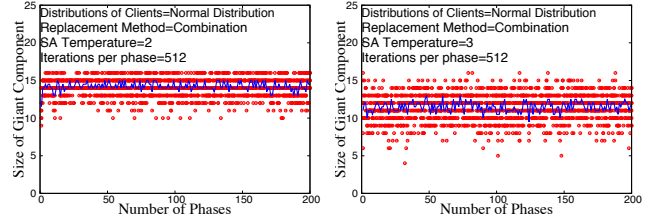


(c) 繰り返し回数 = 256 (d) 繰り返し回数 = 512

図 4 異なるフェイズ毎の繰り返し回数における SGC の変化
Fig. 4 SGC vs Phases for different iterations per phase.

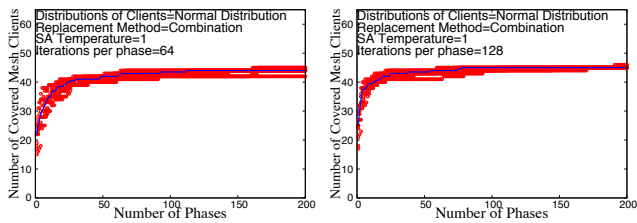


(a) 温度パラメータ = 0 (b) 温度パラメータ = 1

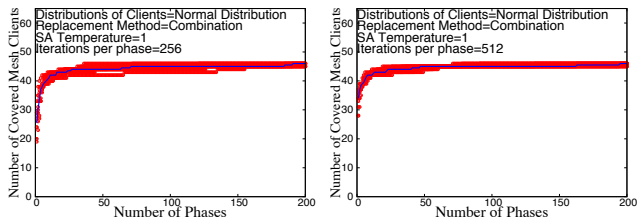


(c) 温度パラメータ = 2 (d) 温度パラメータ = 3

図 7 温度パラメータを変化させた場合の SGC の変化
Fig. 7 SGC vs Phases for different SA temperature values.

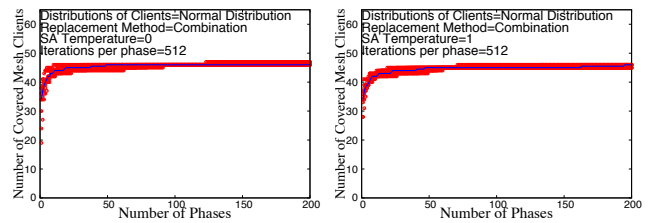


(a) 繰り返し回数 = 64 (b) 繰り返し回数 = 128

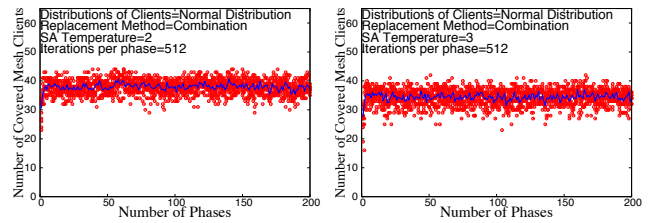


(c) 繰り返し回数 = 256 (d) 繰り返し回数 = 512

図 5 異なるフェイズ毎の繰り返し回数における NCMC の変化
Fig. 5 NCMC vs Phases for different iterations per phase.

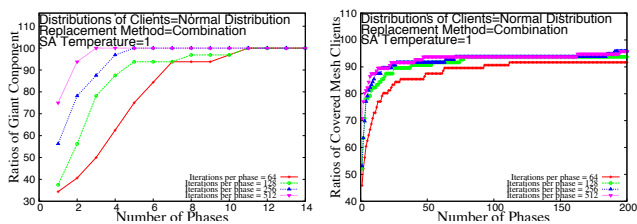


(a) 温度パラメータ = 0 (b) 温度パラメータ = 1



(c) 温度パラメータ = 2 (d) 温度パラメータ = 3

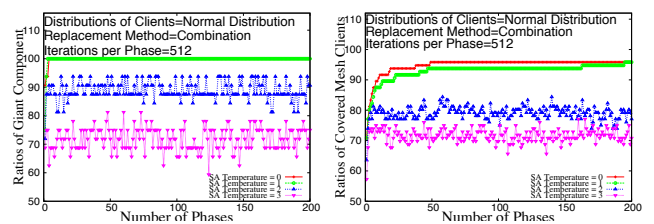
図 8 温度パラメータを変化させた場合の NCMC の変化
Fig. 8 NCMC vs Phases for different SA temperature values.



(a) SGC の最大率 (b) NCMC の最大率

図 6 4 種類のフェイズ毎の繰り返し回数の比較
Fig. 6 Comparison of 4 different values of iterations per phase.

値である。一方、図 6(b) が変化していることから、SGC が最大化した後も配置箇所の最適化が行われていることがわかる。図 6(b) から、それぞれのパラメータによる影響がよくわかる。フェイズ毎の繰り返し数が多いほど、より多くの解候補群を探索することができるため、良好な結果が得られたと考えられる。



(a) SGC の最大率 (b) NCMC の最大率

図 9 4 種類の温度パラメータの比較
Fig. 9 Comparison of 4 different SA temperature values.

5.2.2 温度パラメータによる影響

温度パラメータによる影響のシミュレーション結果を図 7、図 8、図 9 に示す。図 7(a) と図 7(b) では 10 回のシミュレーション結果全てのサンプルをプロットし、それらの中央値を太線で表す。また図 9 では、それらの中央値のみを太線で表す。図 7(a) と図 7(b) では速い段階で最大

値に収束し、非常に良好な結果が得られている。これに対して、図 7(c) と図 7(d) では、温度パラメータが大きいため、解が 200 フェイズでは収束せず悪い結果となった。

図 8(a) と図 8(b) では、非常に良好な解が得られている。これに対して、図 8(c) と図 8(d) より、温度パラメータが大ききとき、SGC と同様に NCMC も良好な解は得られていない。図 9 から温度パラメータ 0 が最も解の収束が速いことがわかる。図 9(a) より、温度パラメータが 2 以上のとき、収束が遅く 200 フェイズでは十分な収束が得られていないことがよくわかる。一方、図 9(b) では、温度パラメータが 1 でも 200 フェイズでの中央値は 0 の場合と同じく NCMC=95.8% であるため、探索の性能に差は見られない。

6. 考察

シミュレーション結果から、フェイズ毎の繰り返し数は解探索候補群が増えるため、多ければ多いほど良い結果を得られたと考えられる。また、温度パラメータにより SA は改悪する解も受け入れることで局所最適解を避け、大域的最適解を得ようとするものであるため、低ければ良いというものではない。温度パラメータが低いときでは、改悪する解を許容する確率も低いので、局所最適解に陥りやすく、収束が速いという特徴がある。したがって 200 フェイズ以内で収束したと考えられる。

7. むすび

本稿では、WMN のメッシュルータ配置最適化に SA を用いて行う WMN-SA のパラメータ変化がシミュレーション結果にどのような影響を与えるのかを調べ、その評価を行った。

シミュレーション結果から、フェイズ毎の繰り返し回数は多ければ多いほど良い解を導くことを明らかにした。温度パラメータに関しては、温度パラメータが 2, 3 のとき収束が遅いため、現状では低い方が有効であることを明らかにした。

今後は、提案手法を用いて様々なシナリオでの評価を行いたい。また、他のメッシュルータ配置手法との比較検証を行いたい。

謝辞 本研究の一部は日本学術振興会科研費の助成によって行われた。ここに謝意を記す。

参考文献

- [1] Akyildiz, I. F., Wang, X. and Wang, W.: Wireless mesh networks: a survey, *Computer Networks*, Vol. 47, No. 4, pp. 445–487 (2005).
- [2] Franklin, A. and Murthy, C.: Node Placement Algorithm for Deployment of Two-Tier Wireless Mesh Networks, *IEEE GLOBECOM-2007*, pp. 4823–4827 (2007).
- [3] Held, G.: *Wireless mesh networks*, Auerbach Publica-

- tions (2005).
- [4] Hoshi, T., Kumata, Y. and Koyama, A.: A Proposal and Evaluation of Access Point Allocation Algorithm for Wireless Mesh Networks, *Proc. of International Conference on Network-Based Information Systems (NBIS-2013)*, pp. 389–394 (2013).
- [5] Garey, M. and Johnson, D.: *Computers and Intractability; A Guide to the Theory of NP-Completeness*, W. H. Freeman & Co. New York, NY, USA (1979).
- [6] Sakamoto, S., Oda, T., Kulla, E., Ikeda, M., Barolli, L. and Xhafa, F.: Performance Analysis of WMNs Using Simulated Annealing Algorithm for Different Temperature Values, *Proc. of The 7th International Conference on Complex, Intelligent, and Software Intensive Systems (CISIS-2013)*, pp. 164–168 (2013).
- [7] Aoki, H., Takeda, S., Yagyu, K. and Yamada, A.: IEEE 802.11s wireless LAN mesh network technology, *NTT DoCoMo Technical Journal*, Vol. 8, No. 2, pp. 13–21 (2006).
- [8] 間瀬憲一, 阪田史郎: アドホック・メッシュネットワーク: ユビキタスネットワーク社会の実現に向けて, コロナ社 (2007).
- [9] 阪田史郎, 青木秀憲, 間瀬憲一: アドホックネットワークと無線 LAN メッシュネットワーク, 電子情報通信学会 (2006).
- [10] 柳浦睦憲, 茨木峻秀: 組み合わせ最適化-メタ戦略を中心として, 朝倉書店 (2001).
- [11] 河村直哉, 萬代雅希, 渡辺 尚: スマートアンテナを用いるアドホックネットワークのさらし端末問題への対処法について, 情報学研報, ITS-35, Vol. 2008, No. 107, pp. 33–38 (2008).
- [12] Kirkpatrick, S., Jr., D. G. and Vecchi, M. P.: Optimization by simulated annealing, *Science*, Vol. 220, No. 4598, pp. 671–680 (1983).
- [13] Van Laarhoven, P. J. and Aarts, E. H.: *Simulated annealing*, Springer (1987).
- [14] 相吉英太郎, 安田恵一郎: メタヒューリスティクスと応用, 電気学会 (2007).
- [15] Xhafa, F., Sanchez, C., Barolli, L. and Miho, R.: An annealing approach to router nodes placement problem in wireless mesh networks, *Proc. of International Conference on Complex, Intelligent and Software Intensive Systems (CISIS-2010)*, pp. 245–252 (2010).
- [16] Moghaddam, A., Amodeo, L. and Yalaoui, F.: Simulated annealing for a bi-objective scheduling problem with rejection: comparative study, *META* (2010).