

低管理コスト無線センサネットワークの シミュレーションによる消費電力評価

小島 祥平¹ 横谷 晟人^{1,a)} 吉廣 卓哉^{2,b)}

概要: 無線センサネットワークでは、現実的な低い管理コストで長期的に管理できることが求められる。我々はこのために、単三乾電池程度のバッテリーで駆動するセンサノードを想定し、定期的に行き得るだけ少数のセンサノードのバッテリーを交換することで継続的に維持できる、管理コストの低いセンサネットワークを提案している。提案手法では、受信ノード主導型 MAC プロトコルを想定し、配送木の葉ノードにおいてビーコンの送信を停止することにより、葉ノードの寿命を 10 年以上に延伸する。同時に、配送木において、バッテリー交換を要する中継ノード数をできるだけ少なくする。これにより、少数のノードのバッテリーを定期的に交換することで維持できる実用的なセンサネットワークの実現を目指す。しかし、これまでの消費電力の評価は、プロトコルの動作に基づいて解析的に実施するに留まっていた。本研究では、提案手法を Contiki OS に実装し、シミュレータ Cooja において実行することで、より現実に近く正確な消費電力の評価を行ったので、これを報告する。

1. はじめに

近年、無線通信技術の進歩や CPU の小型化、高性能化が進んでいる。これにより、無線通信機能を持った小型のセンサ端末を用いてネットワークを構成する、WSN (Wireless Sensor Network) の研究が進められている。WSN では、各センサ端末で得たデータを無線マルチホップ通信を用いて収集する。WSN は環境モニタリングやインフラ監視などで用いられることが想定されるため、扱われるデータのサイズは小さいことが多く、スループットは必ずしも高い必要はない。また、配置されるノードの数は多く、ノードを配置する場所も様々である。そのような環境では、ノードすべてに電源供給のための配線を行うことは現実的ではないため、WSN ではノードはバッテリー駆動を前提とすることが多い。しかし、バッテリー駆動を前提とするとノードの寿命を延ばすために通信などに必要となる電力を抑える必要がある。

このため、近年では、IEEE802.15.4[1] 等のセンサネットワーク向けの通信方式が標準化されてきた。これらの通信規格では、消費電力を抑えることにより、端末の長寿命化を図り、バッテリー駆動でも長期間の運用が可能となるよう

に設計されている。一方で、WSN が社会で安定して使用されるためには、一度敷設されたネットワークが 10 年以上は継続的に運用可能であることが望ましい。しかし現在の通信規格では、標準的な乾電池やボタン電池を用いた場合には、高々 1~2 年程度のノード寿命しか実現できず、10 年以上のノード寿命を達成することはできていない。そのため、WSN の長期的な実運用にあたっては定期的なバッテリーの交換が必要となるが、ノード数が多い場合に全ノードのバッテリーを定期的に交換するとそのコストは甚大になる。よって、WSN の実運用のためにはバッテリー交換などに掛かる管理コストを低減する必要がある。

現在、実用的な無線センサネットワークの構築に向けた、低消費電力な通信方式が数多く提案されている。その代表的な方法は MAC プロトコルの省電力化であり、送信ノード主導型の S-MAC[2] や X-MAC[3]、受信ノード主導型の RI-MAC[4] や RC-MAC[5] を含め、多数の提案がなされている。(詳しくはサーベイ論文 [6] を参照されたい。) これらは、フレームの送受信時を除いた時間を、受信可能状態で待機する代わりにできるだけスリープすることで消費電力を削減する。スリープにより大幅な消費電力の削減が可能になるが、送信端末と受信端末がタイミングを合わせて送受信を行う必要が出てくる。この送受信のタイミングの合わせ方により、送信端末がタイミングを合わせる送信ノード主導型と、受信端末がタイミングを合わせる受信ノード主導型の 2 種類に分類できる。一般には消費電力の

¹ 和歌山大学大学院システム工学研究科
930 Sakaedani, Wakayama, 640-8510, Japan

² 和歌山大学システム工学部
930 Sakaedani, Wakayama, 640-8510, Japan

a) s171059@sys.wakayama-u.ac.jp

b) tac@sys.wakayama-u.ac.jp

面からみると RI-MAC 等の受信ノード主導型の方が優れている。しかし、受信ノード主導型の MAC プロトコルでは、ブロードキャストがサポートされていないため、配送木（データの配送経路）を構築するには工夫が必要となる。

我々はこれまでに、RI-MAC を拡張した新たな低消費電力 MAC プロトコルと、この上位層で自律的に配送木を構築する経路制御プロトコルを組み合わせることで、低い管理コストで長期運用可能な現実的なセンサネットワークの実現を目指した通信方式を提案してきた [7]。具体的には、提案手法では、RI-MAC を拡張して動作状態を導入することで、効率的な配送木の構築と、低消費電力なデータ送信を両立する。「配送木構築状態」ではブロードキャストを可能にすることで効率的に配送木を構築し、「定常状態」では RI-MAC に基づいた消費電力の低い効率的なデータ集約を実現する。定常状態においては、葉ノードはデータフレームの受信が不要であることから、さらに消費電力を抑えて 10 年以上の長いノード寿命を実現する。複数の状態をシームレスに遷移させることで、RI-MAC による効率的なデータ通信性能を維持したままで、ノード故障などによるトポロジ変化時にも自律的に配送木を再構築できる。また、配送木の構築においては、バッテリー交換が必要な中継ノード数を低く抑えることで、管理コストの低いセンサネットワークを実現する。提案手法により、10 年以上にわたって、比較的少数のバッテリーを年に 1 度程度の頻度で交換することで維持できる、管理コストの低いセンサネットワークが実現できる。

しかし、これまでの研究成果 [7] では、消費電力の評価は、プロトコルの動作に基づいた解析的な試算にとどまっておき、動作実績に基づいた正確な評価はなされていなかった。本研究では、提案手法を contiki OS 上に実装し、Cooja シミュレータ上で動作させることにより、動作実績に基づいた、より正確な消費電力及び動作寿命の評価を行ったので、これを報告する。

本稿の構成を以下に示す。第 2 章では、我々が提案している管理コストの低い無線センサネットワークのアーキテクチャの概要を述べる。第 3 章では、本研究で実施したシミュレーション評価の方法と結果を述べ、最後に第 4 章でまとめる。

2. 提案中の低管理コスト無線センサネットワーク [7]

2.1 想定環境

本論文では、無線通信機能と何らかのセンサを搭載した多数のセンサノードから構成されるセンサネットワークを想定する。各センサノードは一定時間毎にセンシングにより生成した値を、ネットワーク内に複数存在するシンクノードのいずれかにマルチホップ通信を用いて転送する。

ノードの送信電力は一定であり、シンクノードまで複数の経路でデータを届けられる程度にはセンサが密に配置されていると仮定する。複数のシンクノードが存在しても良く、その場合にも提案手法の動作は何も変わらない。

本研究で考える管理コストは、定期的なバッテリー交換にかかるコストである。環境センシング等を目的として無線センサ端末を面的（或いは空間的）に配置し、これを例えば 10 年間維持管理したい場合、IEEE802.15.4[1] 等の標準化技術により運用すると、長くて概ね 1~2 年程度の寿命しかなく、定期的に全ての端末のバッテリーを交換する必要がある。これに対して我々の手法では、データ配送木の葉ノードがデータを受信する必要がないことを利用して寿命を大幅に延ばすことにより、データを中継するノードのみのバッテリーを定期的に交換することで、センサネットワークの長期間にわたる維持管理を実現する。文献 [7] の結果からは、比較的高密度に配置されたセンサネットワークにおいては、バッテリー交換を要するノードの数は面積に比例する結果が得られている。管理コストが低いセンサネットワークを実現するためには、提案手法における各ノードの消費電力及び寿命を正確に評価し把握することが肝要である。

2.2 受信ノード主導型 MAC プロトコル

提案 MAC プロトコルは受信ノード主導型 MAC プロトコルである RI-MAC[4] を基礎としている。本節では、基礎となる RI-MAC について簡単に述べておく。

RI-MAC では、各ノード n_r が定期的にビーコンをブロードキャストし、これを受信したノード n_s が n_r への送信フレームを持っていけば、バックオフ時間の待機の後、 n_r へのフレーム送信を行う。各ノードは定期的にウェイクとスリープを繰り返し、ウェイクしたタイミングでビーコンを送信する。しばらく受信を待ち受け、フレームが受信されなければ、再びスリープする。受信待受時間を削減できるため、送信データ量が少ない場合には大きな消費電力の削減を見込める。

2.3 MAC プロトコルの概要

我々が文献 [7] にて提案した手法は、RI-MAC を拡張し、定常的なデータ集約のみを行う「定常状態」と配送木の構築も行う「配送木構築状態」の 2 状態を区別することにより、効率的な配送木の構築と消費電力を抑えたデータ集約を兼ね備えた無線センサネットワークを実現する。RI-MAC と RC-MAC には、次のような特徴がある。

- (a) 受信ノード主導型 MAC プロトコルであるため、データを受信しない葉ノードにおいては受信動作を省くことが可能であり、さらなる消費電力の削減が見込める。
- (b) RC - MAC では、受信ノードによる送信ノードのスケジューリングとビーコン送信タイミングの調整によ

り、フレームが衝突せず、バックオフ時間を省いた効率的なデータ伝送を実現できる。

(a)はRI-MACとRC-MACに共通する特徴である。(b)はRC-MAC特有のもので、これによりRI-MACよりも更なる低消費電力化を図っている。特に(a)に関して、受信ノード主導型MACプロトコルでは、受信処理以外の消費電力を最適化しているが故に、受信にかかる定期的なビーコン送信とその後の受信待機が消費電力全体に占める割合が大きくなる。本論文では、この点に着目し、葉ノードにおいて受信のための処理を省くことで大幅な長寿命化を実現し、実運用にあたっての管理コストを低減する。

このために、各ノードは、効率的に配送木を構築する「配送木構築状態」と、配送木に沿って低い消費電力でデータを集約する「定常状態」の2状態を切り替えて動作する。配送木構築状態では、RI-MACを拡張してブロードキャスト通信を実現し、後述する経路制御プロトコルを用いて配送木を効率的に構築する。定常状態では、RI-MACの特徴を生かした消費電力の低いMACプロトコルを動作させる。特に、配送木の葉ノードではセンシングデータの受信が不要であることを利用して、通常のRI-MACよりもさらに消費電力を低減したMACプロトコルを実現する。

各ノードは、ネットワークの構築時だけでなく、ノード故障等によるトポロジの変化時にも、配送木構築状態になり配送木を再構築する。あるノードがトポロジの変化を検出すると、これを隣接ノードに順に伝えることで、ネットワーク上の全てのノードが配送木構築状態になり、協調して配送木を再構築したあと、配送木が収束すると定常状態に遷移する。このような動作の中では、ネットワーク上に異なる状態のノードが混在する時間帯があるが、このときにもRI-MACによる効率的な通信が維持されることが肝要である。提案プロトコルでは、いずれの状態でもRI-MACのデータ通信方式をサポートすることで、状態が異なるノードが混在する場合にも、データ集約の効率が維持されるようなプロトコル設計とした。

2.4 経路制御プロトコルの概要

配送木の構築は、配送木構築状態において実行される。この間に、各ノードは定期的にブロードキャストメッセージを送信することで隣接ノードと必要な情報を交換し、自律分散的に配送木を構築する。配送木が構築されると定常状態に遷移するが、その後でも、ノードの故障等によりトポロジが変化すると、提案手法ではネットワーク上の全てのノードが配送木構築状態になり、改めて適切な配送木が構築される。

配送木の構築にあたっては、バッテリー交換にかかる管理コストの最小化を目指す。ある配送木が構築されたとき、葉ノードはデータの受信が不要であるため、受信ノード主導型のMACプロトコルを用いると10年以上の寿命を確

保でき得るのに対して、中継ノードは長くても1~2年程度の寿命であることを想定する。このため、中継ノードは定期的なバッテリーの交換が必要であり、その分の管理コストがかかる。本論文では、中継ノードの数を少なくするような配送木の構築プロトコルを設計することで、バッテリー交換に要する管理コストを低減する。

経路制御プロトコルは、定期的に交換される制御メッセージにより、各ノードの次ホップノードを決定する。まず、全てのノードが、シンクノードまでの距離(ホップ数)を把握する。このために、定期的にブロードキャストする制御メッセージに、自分からシンクノードまでの距離を含める。この情報を隣接ノードと繰り返し交換することにより、全てのノードが、シンクノードまでの正しい距離を把握する。

次に、各ノードにおいて次ホップを決定することで、配送木が構築される。本論文では、ネットワークの管理コストを低減するために、中継ノード数が少ない配送木を構築する。これは、通信を一部のノードに集中させることで実現できる。そこで提案手法では、各ノードが、次ホップの候補の中で、配送木における子孫の数が最も大きいノードを次ホップとして選ぶ。各ノードがセンシングにより生成するデータ量が等しいと仮定すると、子孫数は、そのノードが中継しなければならないデータ量を表すため、子孫数が大きいノードを次ホップに選ぶことで、通信を一部のノードに集中させることになる。具体的には、各ノードが自分の子孫数を把握するために、配送木構築状態において定期的に送信する制御メッセージに、自分の(その時点で把握している)子孫数と次ホップを含める。各ノードは、自分を次ホップに選んでいるノード、つまり子ノードを全て把握でき、従って自分の子孫数の合計を把握できる。制御メッセージは定期的に送信されるため、十分な時間が経過すると各ノードの子孫数等の情報が行き渡り、配送木は収束する。

次ホップの候補を、シンクノードまでの距離が自分より1だけ小さいノードの集合とすると、配送経路長がシンクノードまでの距離と等しい配送木が効率的に構築できそうである。しかし提案手法では、中継ノード数をさらに減少させるために、自分と同じ距離のノードも候補に加える。この処理にあたっては、パケットがループしないように少し工夫が必要になるが、詳細は文献[7]に譲る。

2.5 これまでの評価結果

我々の先行研究[7]では、プロトコルの動作から解析的に消費電力量を求めることにより、ノード及びネットワークの寿命を推定した。単位時間あたりのノードの挙動を分析したうえで、起動時間、スリープ時間、送信時間、受信時間等の平均値を求め、ハードウェアとしてMICA2[9]を想定した場合の消費電力量を計算した。また、単位時間あ

E_{tx} : 送信電力はデータフレームの送信と制御メッセージの送信, ACK フレームの送信にかかる電力を合算したものである. データフレーム一回の送信にかかる電力は $l_{data}t_{tx}C_{txb}V$ であり, 制御メッセージ一回の送信にかかる電力は $l_{control}t_{tx}C_{txb}V$, ACK フレーム一回の送信にかかる電力は $l_{ack}t_{tx}C_{txb}V$ である. それぞれ t_{sim} 秒間に NUM_{dtx} 回, NUM_{ctx} 回, NUM_{atx} 回だけ消費されるので, 1 秒あたりの消費電力は, $E_{tx} = NUM_{dtx} \frac{l_{data}t_{tx}C_{txb}V}{t_{sim}} + NUM_{ctx} \frac{l_{control}t_{tx}C_{txb}V}{t_{sim}} + NUM_{atx} \frac{l_{ack}t_{tx}C_{txb}V}{t_{sim}}$ である.

E_{rx} : 受信電力も送信電力と同じようにデータフレームの受信と制御メッセージの受信, ACK フレームの受信にかかる電力を合算したものである. データフレーム一回の受信にかかる電力は $l_{data}t_{rx}C_{rxb}V$ であり, 制御メッセージ一回の受信にかかる電力は $l_{control}t_{rx}C_{rxb}V$, ACK フレーム一回の受信にかかる電力は $l_{ack}t_{rx}C_{rxb}V$ である. それぞれ t_{sim} 秒間に NUM_{drx} 回, NUM_{crx} 回, NUM_{arx} 回だけ消費されるので, 1 秒あたりの消費電力は, $E_{rx} = NUM_{drx} \frac{l_{data}t_{rx}C_{rxb}V}{t_{sim}} + NUM_{crx} \frac{l_{control}t_{rx}C_{rxb}V}{t_{sim}} + NUM_{arx} \frac{l_{ack}t_{rx}C_{rxb}V}{t_{sim}}$ である.

E_{listen} : t_{sim} 秒間でのウェイク時間は t_{wake} であり, その時の消費電力は $t_{wake}C_{listen}V$ である. そのため 1 秒あたりの消費電力は $E_{listen} = \frac{t_{wake}C_{listen}V}{1800}$ となる.

E_{sleep} : t_{sim} 秒間でのスリープ時間は t_{sleep} であり, その時の消費電力は $t_{sleep}C_{listen}V$ である. そのため 1 秒あたりの消費電力は $E_{sleep} = \frac{t_{sleep}C_{sleep}V}{1800}$ となる.

上記のように, シミュレーションにより測定された値を基に単位時間あたりの消費電力 E が計算される. 単位時間を 1 秒として表 1 と表 2 のパラメータを代入すると, E [mA 秒]を用いて, ノードの寿命 $t_{lifetime}$ [秒]は以下の式で表される.

$$t_{lifetime} = \frac{C_{batt}V}{E} \times 60 \times 60 \quad (2)$$

3.1.2 評価結果

センシング間隔を 5 分に設定した場合のノード寿命に関して, シミュレーションより算出した寿命と文献 [7] の方法で解析的に算出した寿命の比較を図 3 に示す. なお, シミュレーションにおいて構築された配送木を図 2 に, 構築された配送木中の葉ノード及び中継ノードにおいて計測された値の平均値を表 3 に示す. 葉ノードにおいては, 解析的な結果とシミュレーションによる結果の差は 1 割程度に抑えられており, 従来の寿命予測が概ね正しいことを示している. 一方で, 中継ノードにおいては 4 割程度と大きい差が見られた. これは, 解析では中継するパケットが全て 1 周期の中で 1 時点に集まることを想定していたが, シミュレーションでは時間的に分散して中継されたことにより, MAC プロトコルにおける受信待ち時間が増加したことや, 送信時のコンテンションとフレーム衝突による送受信待ち時間の増大が主な原因である.

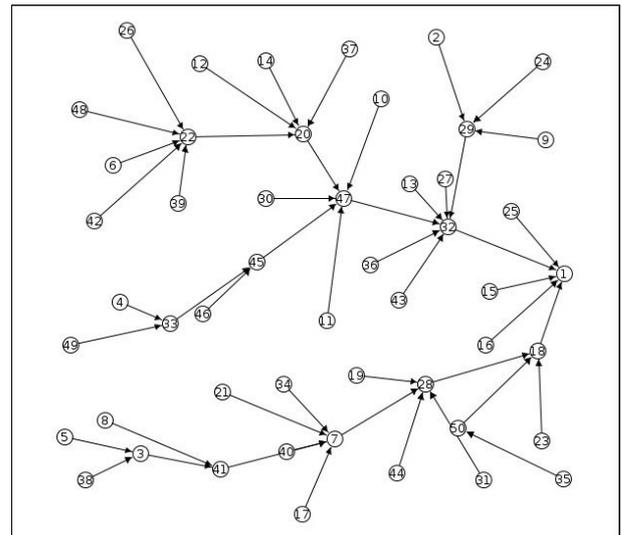


図 2 構築された配送木

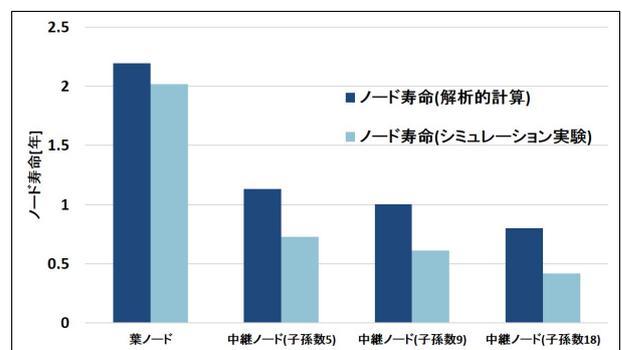


図 3 ノード寿命の比較

図 4 は, 提案手法の元になった RI-MAC のノード寿命を, 解析とシミュレーションにより推定した結果である. スリープ電流はセンサ端末により異なるため, 2 種類の値を比較しており, 例えば MICA2 は 0.03[mA], TelosB は 0.009[mA] である. いずれのスリープ電流でも, シミュレーションの方が寿命を短く推定しており, センシング周期が長いほど, その差が大きくなった. また, スリープ電流が寿命に及ぼす影響は比較的小さく, 送受信の通信電力の影響が大きいことがわかる.

図 5 は, 提案手法における中継ノードの寿命, 図 6 は, 葉ノードの寿命を示す. 中継ノードの場合には, センシング周期が大きくても解析値との寿命の比は変わらないが, 葉ノードの場合には, 周期が大きくなるとシミュレーションの推定寿命が大幅に落ち込むことがわかる.

4. おわりに

本研究では, 我々が提案してきた「低管理コスト無線センサネットワーク」をセンサ端末用 OS である Contiki OS 上に実装し, シミュレータ Cooja を用いて実行することで, 消費電力及びノードの寿命を評価した. シミュレーションを用いることにより, 従来の解析的な評価よりも正確に,

表 3 シミュレーションによって計測された数値

変数	意味	計測された値 (葉ノード)	計測された値 (中継ノード)		
			子孫数 5	子孫数 9	子孫数 18
NUM_{dtx}	データパケットの送信回数	6.83	38	61	125
NUM_{drrx}	データパケットの受信回数	0	30	54	104
NUM_{ctx}	制御メッセージの送信回数	0	45	45	45
NUM_{crx}	制御メッセージの受信回数	7.72	30	31	44
NUM_{atx}	ACK の送信回数	0	36	54	104
NUM_{arx}	ACK の受信回数	6	30	59	119
NUM_{data}	データの取得回数	5.97	6	6	6
t_{sleep}	スリープ時間	1791.45[秒]	1739.59[秒]	1724.63[秒]	1680.6[秒]
t_{wake}	ウェイク時間	8.55[秒]	69.4[秒]	75.37[秒]	119.39[秒]

消費電力及びノード寿命を推定することができる。評価の結果、シミュレータによる評価の方が、ノード寿命を短く推定することが明らかになった。主な原因は、フレーム送信時のコンテンションや衝突による影響と、パケットの発生が時間的にばらつくことによる受信待機時間の増加による影響であることも明らかになった。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 15H02691 の助成を受けたものである。ここに示して謝意を表す。

参考文献

- [1] IEEE802.15.4 Standard, <http://www.ieee802.org/15/pub/TG4.html>, 2011 (accessed at 6th May 2015).
- [2] W. Ye, J. Heidemann, and D. Estrin, "An Energy-efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks," In Proc. of the 21st Conference on Computer Communications (INFOCOM'02), 2002.
- [3] M. Buettner, G. Yee, E. Anderson, and R. Han, "X-MAC: A Short Preamble MAC Protocol for Duty-cycled Wireless Sensor Networks," In Proc. of the 4th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'06), 2006.
- [4] Y. Sum, O. Gurewits, and D. B. Johnson, "RI-MAC: A Receiver-initiated Asynchronous Duty Cycle MAC Protocol for Dynamic Traffic Loads in Wireless Sensor Networks," In Proc. of the 6th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'08), pp.1-14, 2008.
- [5] P. Huang, C. Wang, L. Xiao, "RC-MAC: A Receiver-Centric MAC Protocol for Event-Driven Wireless Sensor Networks," In Proc. of the 18th International Workshop on Quality of Service (IWQoS'10), 2010.
- [6] P. Huang, L. Xiao, M.W. Mutka, and N. Xi, "The Evolution of MAC Protocols in Wireless Sensor Networks: A Survey," IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 15, No.1, 2013.
- [7] 小島祥平, 吉廣卓哉, 受信ノード主導型 MAC プロトコルに基づいた管理コストが低い無線センサネットワーク, 情報処理学会論文誌, 57(2), 2016.
- [8] Contiki, <http://www.contiki-os.org/> (accessed at 1st Feb 2016).
- [9] J. L. Hill and D.E. Culler, "MICA: A Wireless Platform for Deeply Embedded Networks," IEEE Micro, Vol.22, No.6, pp.12-24, 2002.

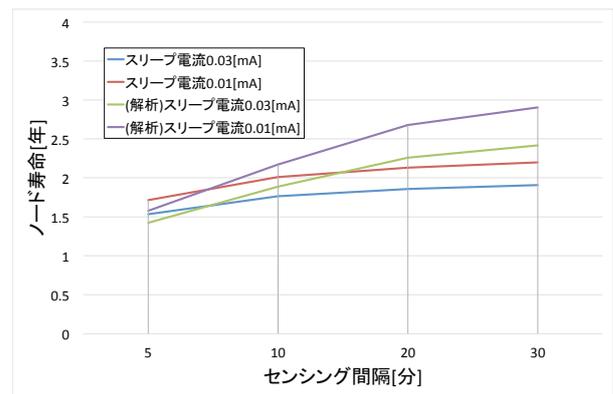


図 4 解析とシミュレーションの比較 (RI-MAC・葉ノード)

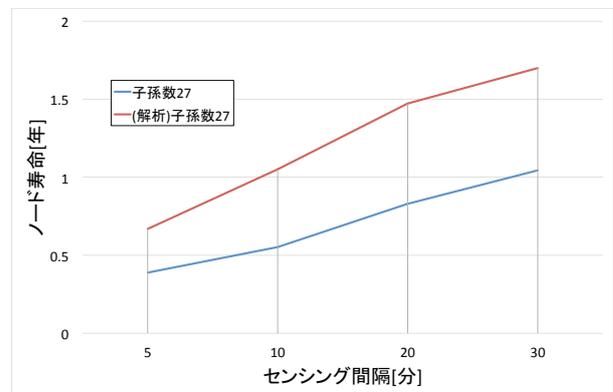


図 5 解析とシミュレーションの比較 (提案手法・中継ノード)

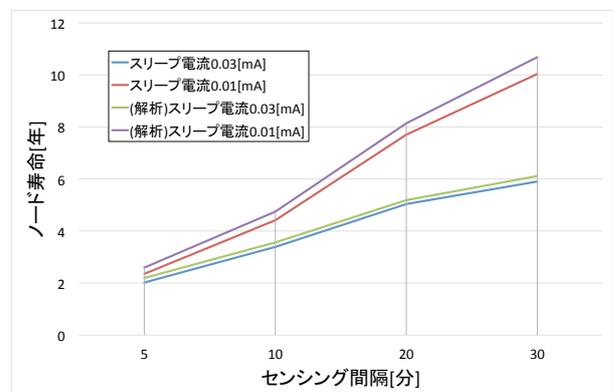


図 6 解析とシミュレーションの比較 (提案手法・葉ノード)