

センサネットワークの省電力化に関するトポロジー的考察

高 博昭^{†a)} 上原 秀幸^{††b)} 大平 孝^{††}

Energy-Efficiency of Sensor Networks in Terms of Network Topology

Hiroaki TAKA^{†a)}, Hideyuki UEAHARA^{††b)}, and Takashi OHIRA^{††}

あらまし これまで、センサネットワークにおいて消費電力削減を目的とした様々なルーチングプロトコルが提案されている。これらのプロトコルは、マルチホップ通信による送信距離の削減や、データ集約による通信データ量削減効果を高めるためなど、それぞれの設計思想に基づいてネットワークトポロジーを構成し、省電力化を実現している。しかし、実環境でセンサネットワークを運用する場合、センシングエリアサイズやノード数、データ集約効果の影響を考慮し、より省電力効果の高いトポロジーを選択する必要がある。本論文では、スター型、トリー型、チェーン型、クラスタ型のネットワークトポロジーに対して、データ集約を考慮した際の送受信時の消費電力の数理モデルを構築した。その結果、センシングエリアサイズや集約モデル係数 b に応じて適切なトポロジーが存在することを示した。

キーワード センサネットワーク, 省電力, ネットワークトポロジー, 集約モデル

1. ま え が き

無線センサネットワークは、無線センサノードにより様々な情報を収集することを目的としたネットワークであり、防犯・セキュリティ、災害予測、環境モニタリングなど様々な分野への利用が期待される [1]。無線センサノードはバッテリーで駆動するため、バッテリーの枯渇時には交換や充電が必要になる。しかし、ノード数が多い場合は人件費等のコスト面からバッテリー交換は困難であり、また、太陽光パネルなどの再充電を行う機構を利用する場合、ハードウェアコストの増加やノード配置の自由度の低下を招く。そのため、通信プロトコルによりソフトウェア的に消費電力を削減することは極めて重要である。

これまで、省電力化を図るために様々なルーチングプロトコルが提案されている。ルーチングプロトコルによって構築されるトポロジーは、PEGASIS [2] に代

表されるチェーン型や LEACH [3] をはじめとしたクラスタ型など多岐にわたる。これらのトポロジーでは、マルチホップ通信により直接通信を抑制したり、情報源符号化を想定したデータ集約などによりデータ量を削減することでネットワーク全体での省電力化を実現している。しかし、実際のデータ集約効果は観測対象や期間などにより異なる。また、ノードの新規参入や離脱等によりノード数やセンシングエリアサイズも変化するだろう。そのため、センサネットワークを運用する際は、センシングエリアサイズやノード数、データ集約効果の影響を考慮し、より省電力効果の高いトポロジーを選択する必要がある。

本論文では、データ収集型のセンサネットワークを想定し、ネットワークトポロジーの観点から省電力化について考察する。具体的には、スター型、トリー型、チェーン型、クラスタ型の4種類のトポロジーについて、データ受信、集約、送信による消費電力を数理的にモデル化する。そして、センシングエリアサイズ、ノード数、集約効果などを変化させた数値シミュレーションによって、ネットワークを運用する環境で最小の消費電力を実現する適切なトポロジーを示す。

2. システムモデル

本章では、想定するシステムモデルを説明する。ま

[†] 公立はこだて未来大学, 函館市

Future University Hakodate, Hakodate-shi, 041-8655 Japan

^{††} 豊橋技術科学大学電気・電子情報工学系, 豊橋市

Department of Electrical and Electronic Information Engineering, Toyohashi University of Technology, Toyohashi-shi, 441-8580 Japan

a) E-mail: h.taka@m.ieice.org

b) E-mail: huehara@m.ieice.org

ずスター型、トリー型、チェーン型、クラスタ型の4種類のトポロジーの特徴を述べる。次に受信、集約、送信時の消費電力を求めるための電力消費モデル、集約によるデータサイズを求めるための集約モデルについて説明する。

消費電力の評価を行うにあたり、本論文では以下の環境を想定する。

- トポロジー構成後の受信、集約、送信による消費電力のみ扱う。
- トポロジー構成のためのオーバーヘッド、パケットのオーバーヒアリング、MAC層でのアイドルリスニングによる消費電力は考慮しない。
- 伝送誤りやパケットロスとは考慮せず、データの再送は行わない。
- 伝搬損は距離減衰によるもののみとし、ノードは理想的な送信電力制御を行える。つまり受信電力は一定と仮定する。

実際のセンサノードは、送信電力制御が可能であってもその効果は限定的であるため、必ずしも受信電力が一定とはならない。しかし受信電力が一定であることを想定することは、送信電力制御によって無駄な電力消費が発生しない環境となり、本論文での解析結果は、各トポロジーの消費電力の下限値を示すこととなる。

2.1 想定トポロジー

図1に本論文で取り上げる各トポロジー、表1に各

トポロジーの特徴を示す。トリー型やチェーン型、クラスタ型トポロジーを構成するプロトコルは複数存在するが、ルーチングプロトコルについては議論しない。

2.1.1 スター型

スター型(図1(a))は、マルチホップ通信を行わずに各ノードから直接シンクまでデータ送信を行う。そのため、ホップ数は1であり、各ノードの平均送信距離は4種類のトポロジーの中で最も長くなる。また、各ノードでパケット受信及び集約を行わないため、ネットワーク全体でのデータ送受信量は四つのトポロジーの中で最も少なくなる。

2.1.2 トリー型

トリー型(図1(b))は、シンク(sink)を根とした木構造のネットワークトポロジーである。主にデータセントリックなルーチングプロトコル[4]~[6]では、このトリー型のトポロジーを構成していることが多い。これらのプロトコルでは、シンクノードからネットワーク全体にクエリを送信し、クエリに該当するデータをもつノードのみが送信を行う。本論文では、全てのノードに該当するクエリが既に送信されていると仮定する。葉ノードから順次データ送信を行い、中継ノードでデータ集約を行いながらシンクまで送信を行うものとする。トポロジーは最短経路木によって構成されているものとする。トリー型はスター型と比べ、ホップ数とデータ送受信量は多くなるが、マルチホップ通信を行うため各ノードの平均送信距離は短くなる。

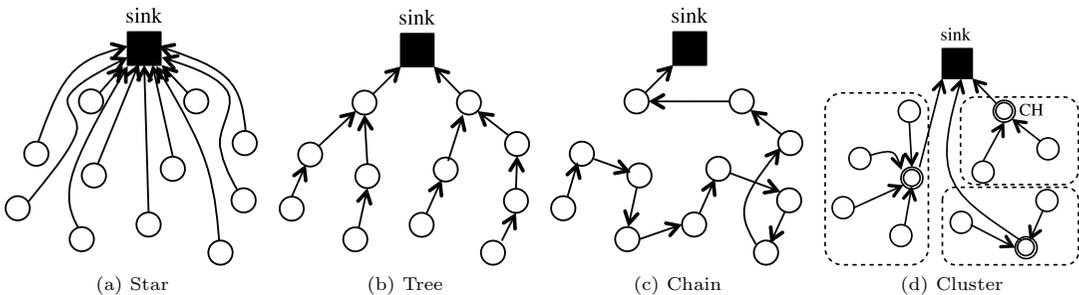


図1 想定するネットワークトポロジー
Fig.1 Network topology.

表1 各ネットワークトポロジーの特徴
Table 1 Characteristics of each network topology.

Topology	Number of hops	Transmission distance	Amount of data in sending and receiving
(a) Star	1	Longest	Smallest
(b) Tree	≥ 1	Shorter than Star	Larger than Star
(c) Chain	N	Shortest	Largest
(d) Cluster	2	Longer than Tree	Smaller than Tree

2.1.3 チェイン型

チェイン型 (図 1(c)) は、トリー型において子ノードの数を 1 に限定した深さ N のトポロジーに相当する。ここで、 N はネットワーク中の全ノード数である。トリー型と同様に、末端のノードからデータを送信し、中継ノードでは集約を行い次ホップのノードへ送信する。チェイン型を構成するプロトコルの代表例として PEGASIS [2] が挙げられる。本論文では、PEGASIS と同様にシンクノードから最も速いノードを始点ノードとし、巡回セールスマン問題を貪欲法 (greedy algorithm) で解くことによってチェインを構成する。つまり、始点ノードから各ノードを一度だけ通り、かつ総送信距離ができるだけ短くなるトポロジーを構成する。ほかにもチェインを構成するアルゴリズムを改良したプロトコルも存在する [7]。チェイン型は本論文で取り扱うトポロジーの中で最も平均送信距離が短くなる一方、ネットワーク全体のデータ送受信量は、4 種類のトポロジーの中で最大となる。

2.1.4 クラスタ型

クラスタ型 (図 1(d)) は、深さを 2 に限定した木構造のトポロジーであると定義する。ネットワーク全体を複数のクラスタと呼ばれる集団に分割し、各クラスタからクラスタヘッド (CH) を選択する。CH 以外のノードは自身の所属するクラスタの CH までデータを送信し、CH は受信データと自身のデータを集約してシンクまでデータを送信する。クラスタ型を構成するプロトコルとしては LEACH [3] が代表的である。LEACH では、CH を確率的に選択し、CH からの距離をもとにクラスタリングを行う。また、クラスタリングを行うためのアルゴリズムを改良したプロトコルも研究されている [8], [9]。クラスタ型は、マルチホップ通信を行うがホップ数を 2 に限定しているため、平均送信距離はトリー型よりも多くなるが、データ送受信量は少なくなる。

2.1.5 複 合 型

ここまでに挙げた 4 種類のトポロジー以外にも、これらの 4 種類の特徴を併せもつトポロジーを構成するプロトコルも数多く存在する。例えば、トリー型とクラスタ型を組み合わせたプロトコル [10]~[13] では、クラスタ間で木構造を構築し、多階層化することで消費電力の削減を図っている。チェイン型とトリー型を組み合わせたトポロジー [14], [15] は、1 本の長いチェインを構成するのではなく、複数本の短いチェインを構成し、それらを多階層化することによって主に遅延

時間の削減を実現している。チェイン型とクラスタ型を組み合わせたトポロジーを構成するプロトコルも存在しており、CFSASC [16] では CH 間でチェインを、文献 [17] ではクラスタ内に複数本のチェインを構成している。本論文では、これら複雑なトポロジーの基本構造となる図 1 に挙げた 4 種類のトポロジーに着目して解析を行う。

2.2 電力消費モデル

図 2 に電力消費のブロック図を示す。受信機では他ノードからパケットを受信したことによる消費電力が発生する。MPU では、受信パケットのヘッダ部分以外に含まれるデータと自身のデータを集約し、データサイズを削減する処理を行う際に消費電力が発生する。集約されたデータに新たにヘッダを付加してパケットを構成し、送信機で次のノードへ送信する。このとき送信機では、送信による消費電力が発生する。

あるノードが $i-1$ 個のノードからデータを受信し、自身のデータと合わせて i 個のノードのデータを集約して送信することを想定する。このとき、ノードが消費する消費電力 $E_n(i)$ は次式で表される [3]。

$$E_n(i) = E_R(l_r) + E_A(l_a) + E_T(l_t, d) \quad (1)$$

$$E_R(l_r) = l_r E_{elec} \quad (2)$$

$$E_A(l_a) = l_a E_{agg} \quad (3)$$

$$E_T(l_t, d) = \begin{cases} l_t (E_{elec} + \varepsilon_{fs} d^2) & (d < d_0) \\ l_t (E_{elec} + \varepsilon_{mp} d^4) & (d \geq d_0) \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 $E_R(l_r)$ 、 $E_A(l_a)$ 、 $E_T(l_t, d)$ はそれぞれ受信、集約、送信による消費電力である。 l_r 、 l_t はそれぞれ、受信、送信パケットサイズであり、 l_a は集約処理の対象となるデータサイズである。 E_{elec} は単位ビット当りの消費電力、 E_{agg} は単位ビット当りの集約による消費電力である。 ε_{fs} は自由空間伝搬損失係数、 ε_{mp} はマルチパス伝搬損失係数である。 $d_0 = \sqrt{\varepsilon_{fs}/\varepsilon_{mp}}$ である。

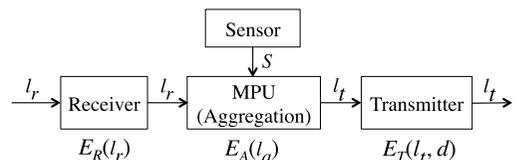


図 2 電力消費及び集約モデル
Fig. 2 Energy consumption and aggregation model.

2.3 集約モデル

i 個のノードのセンシングデータを集約した後のデータサイズ $z(i)$ は、文献 [18] より次のように定義されている。

$$z(i) = \begin{cases} 0 & (i = 0) \\ S & (i = 1) \\ S \left\{ 1 + \sum_{j=2}^i a \exp(-b \cdot j) \right\} & (i > 1) \end{cases} \quad (5)$$

S は 1 ノード当りのデータサイズである。 a , b は実環境データから結合エントロピー増加量を求め、その増加量を指数関数で近似した際の係数である。また、 a の値はノード数が 0 のときの結合エントロピー増加量の初期値、 b の値は結合エントロピー増加量の減衰項である。特に b はノード間のデータの類似性・相関性に関連しており、 b の値が大きければデータ間の類似性が高く、集約後のデータサイズが小さくなることを意味する。 $a = 0$ の場合は、集約後のデータサイズ $z(i)$ はノード数によらず S となり完全集約を表す。 $a = 1$, $b = 0$ の場合は、集約後のデータサイズ $z(i)$ は S のノード数倍となり、集約によってデータサイズが全く削減されない無集約の状態となる。

式 (5) を用いて、 l_r , l_a , l_t を表すと、

$$l_r = z(i-1) + H \quad (6)$$

$$l_a = z(i-1) + S \quad (7)$$

$$l_t = z(i) + H \quad (8)$$

となる。ここで、 H はパケットのヘッダサイズを表す。

3. 各トポロジーの消費電力

式 (1)~(8) をもとに、スター型、トリー型、チェーン型、クラスタ型におけるネットワーク全体の消費電力を求める。なお、送信距離は期待値で表すとともに、二乗則が成立する自由空間伝搬の場合についての式のみを示す。四乗則が成立するマルチパス伝搬環境においても同様の式展開となる。

3.1 スター型

スター型では、各ノードは直接シンクまでデータ送信を行い、他のノードからのデータは受信しない。したがって、 $i = 1$, $l_r = 0$ となり、式 (1) は次式のように変形される。

$$E_n(1) = S E_{agg} + (S + H)(E_{elec} + \varepsilon_{fs} \bar{d}^2) \quad (9)$$

ここで、 \bar{d} は送信距離の期待値であり、スター型の場合はシンクまでの送信距離の期待値を表す。ネットワーク中の全ノード数を N としたとき、スター型におけるネットワーク全体の消費電力 \hat{E}_{ST} は式 (9) の総和で与えられる。

$$\hat{E}_{ST} = \sum_{k=1}^N E_n(1) = N E_n(1) \quad (10)$$

3.2 トリー型

トリー型トポロジーは、完全 M 分木で構成されているものとし、木の深さは p_{max} であると仮定する（シンクの深さを 0 とする）。深さ p の位置にいるノードに着目する。このとき、深さ p より深い位置にいる全ノード数 N_1 は次式で与えられる。

$$N_1 = \sum_{q=p}^{p_{max}-1} M^{p_{max}-q} \quad (11)$$

また、この着目したノードと同じ深さにいるノード数 N_2 は次式で与えられる。

$$N_2 = M^p \quad (12)$$

式 (11), (12) より、深さ p の位置にいる全てのノードの消費電力 $E_l(p)$ は次式で表される。

$$\begin{aligned} E_l(p) &= N_2 E_n(N_1 + 1) \\ &= N_2 \left[\{z(N_1) + H\} E_{elec} \right. \\ &\quad \left. + \{z(N_1) + S\} E_{agg} \right. \\ &\quad \left. + \{z(N_1 + 1) + H\} (E_{elec} + \varepsilon_{fs} \bar{d}^2) \right] \quad (13) \end{aligned}$$

式 (13) において、 \bar{d} は親ノードまでの送信距離の期待値となる。したがって、トリー型におけるネットワーク全体の消費電力 \hat{E}_{TR} は式 (13) を用いて次式で表される。

$$\hat{E}_{TR} = \sum_{l=1}^{p_{max}} E_l(l) \quad (14)$$

3.3 チェーン型

チェーン型では、各ノードは一つの子ノードと一つの親ノードをもつため、 i ホップ目のノードは集約された $i-1$ 個のノードのデータを受信する。 i ホップ目のノードの消費電力は式 (1) と同様に表される。チェーン型において、 \bar{d} は次ホップまでの送信距離の期待値である。したがって、チェーン型におけるネットワー

ク全体の消費電力 \hat{E}_{CH} は次式で表される.

$$\hat{E}_{CH} = \sum_{k=1}^N E_n(k) \quad (15)$$

3.4 クラスタ型

ネットワーク中のクラスタヘッド数を k とし, 各クラスタにはクラスタヘッドを含め $\lceil \frac{N}{k} \rceil$ 個のノードが存在すると仮定する. したがって, 各クラスタには $\lceil \frac{N}{k} \rceil - 1$ 個のクラスタメンバが存在する.

クラスタメンバは, 自身のクラスタヘッドに対してデータを送信する. また他のノードのデータを受信する必要はない. そのため, 各クラスタメンバの消費電力 E_m は式 (9) と同様に

$$E_m = E_n(1) \quad (16)$$

となる. クラスタ型の場合, 式 (9) において \bar{d} はクラスタヘッドまでの送信距離の期待値である.

クラスタヘッドは, クラスタメンバから受信したデータと自身のデータを集約し, シンクにまで送信を行う必要がある. 各クラスタヘッドの消費電力 E_c は次式で表される.

$$\begin{aligned} E_c = & \left(\left\lceil \frac{N}{k} \right\rceil - 1 \right) (S + H) E_{elec} \\ & + \left\lceil \frac{N}{k} \right\rceil S E_{agg} \\ & + \left(z \left(\left\lceil \frac{N}{k} \right\rceil \right) + H \right) \left(E_{elec} + \varepsilon_{fs} \bar{d}_s^2 \right) \end{aligned} \quad (17)$$

式 (17) において, \bar{d}_s はシンクまでの距離の期待値を表す.

したがってクラスタ型におけるネットワーク全体の消費電力 \hat{E}_{CL} は式 (16), (17) を用いて次式で表される.

$$\hat{E}_{CL} = k \left\{ E_c + \left(\left\lceil \frac{N}{k} \right\rceil - 1 \right) E_m \right\} \quad (18)$$

4. シミュレーションによる評価と考察

4.1 シミュレーション環境

各トポロジーの消費電力を比較するために, C 言語によるシミュレーションを行った. シミュレーション諸元を表 2 に示す. シミュレーションでは, センシングエリアは正方形の形状とし, ノードはランダムに配置, シンクはエリア角に配置した. 本実験では, ノード数, センシングエリア一辺の長さ, 集約モデル係数

表 2 シミュレーション諸元
Table 2 Simulation parameters.

Number of nodes N	10~300
Sensing area size	$10 \times 10 \sim 300 \times 300 \text{ m}^2$
Position of the sink	(0,0)
E_{elec}	50 nJ/bit
ε_{fs}	10 pJ/bit/m ²
ε_{mp}	0.0013 pJ/bit/m ⁴
d_0	87.706 m
E_{agg}	5 nJ/bit
Size of data S	500 Bytes
Size of packet header H	25 Bytes
Aggregation model coefficients	$0 \leq a \leq 3$ $0 \leq b \leq 1.5$
Cluster-head probability p_H	(0, 1)

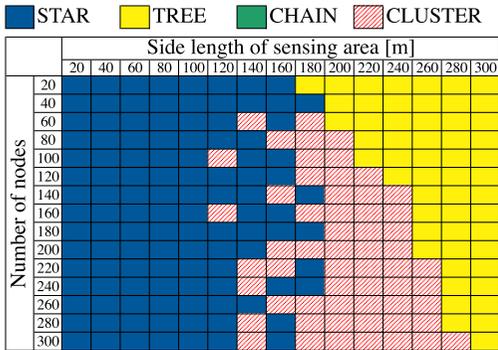
を変化させて実験を行った. ノード数及びエリア一辺の長さは, 10 刻みで, 10 から 300 の範囲で変化させる. 集約モデル係数については, 文献 [18] で求めた実環境の集約モデル係数をもとに範囲を決定した. 式 (5) において $a = 0$ の場合は完全集約となり, 観測値の平均値や最大値などの統計的な値を求めて送信する場合に相当する. $a = 1, b = 0$ の場合は無集約となり, 全てのノードの観測値を圧縮することなく, そのまま送信する場合に相当する. 電力消費係数などのパラメータは, 多くの文献で採用されている文献 [3] で示された係数を使用した.

クラスタ型については, クラスタヘッドの割合 p_H によってトポロジーが異なる. そのため, p_H を (0, 1) の範囲で 0.01 刻みで変化させ, 最も消費電力の低い結果をクラスタ型の消費電力とした.

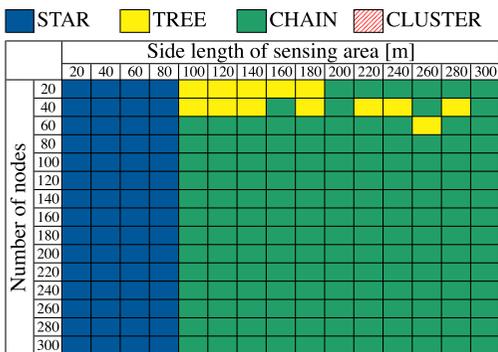
4.2 ノード数及びエリアサイズからの考察

図 3(a) に無集約のとき, 図 3(b) に完全集約のとき, 図 3(c) に一般的な集約のときの消費電力を最小にするトポロジーを示したカラーマップを示す. カラーマップではノード数及びエリア一辺の長さを 20 刻みで表示する. 横軸がエリア一辺の長さ, 縦軸がノード数を表しており, 色は該当するエリア一辺の長さとし, ノード数において, 最も消費電力が低いトポロジーを示している. なお図 3(c) の係数 $a = 1.4, b = 0.7$ は, 文献 [18] で導出した 10 月 22 日~28 日までの屋内気温から求めた係数 a, b の小数点第二位を四捨五入した値である.

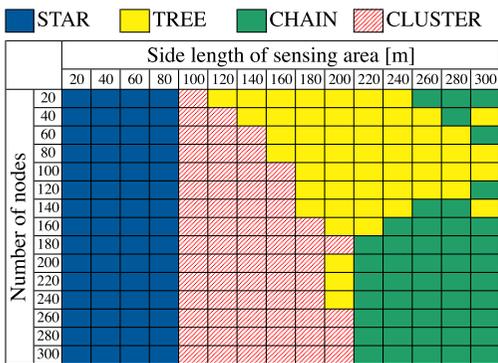
無集約 (図 3(a)) の場合, エリアサイズが小さいときには, データ受信及び集約による消費電力が相対的に大きくなるため, マルチホップ通信を行わないスター型が有利となるケースが多くなる. 一方, エリア



(a) 無集約 ($a = 1, b = 0$)
(a) No aggregation ($a = 1, b = 0$)



(b) 完全集約 ($a = 0$)
(b) Perfect aggregation ($a = 0$)



(c) 一般的な集約 ($a = 1.4, b = 0.7$)
(c) General aggregation ($a = 1.4, b = 0.7$)

図 3 省電力化を実現するトポロジー (ノード数, エリア一辺の長さを変化)

Fig. 3 Minimum energy consumption topology when varying the number of nodes and the side length of sensing area.

一辺の長さが 180 m 以上のとき, ノード数が少なくかつエリアサイズがより大きいときはトリー型, その逆ではクラスタ型の消費電力が低くなる傾向にある. 無

集約では, データ集約によってデータサイズが削減できないため, ホップ数が多いプロトコルでは不利である. トリー型とクラスタ型では, ホップ数はトリー型の方が多くなる. そのため, トリー型はノード数が少ない場合, クラスタ型ではノード数が多い場合に有利になったと考えられる. 一方, エリア一辺の長さが更に長くなれば, クラスタ型ではシンクまでの送信距離が遠くなる影響が大きく, 平均送信距離がより短いトリー型が有利となる.

完全集約 (図 3 (b)) の場合, エリアサイズが小さいときは無集約の場合と同様の理由で, スター型の消費電力が最も低くなる. 一方, エリア一辺の長さが 100 m 以上のとき, チェイン型の消費電力が最も低くなるが多くなる. 完全集約の場合, 集約後のデータサイズ及び受信データサイズは常に一定となり, そのサイズは S (500 バイト) となる. そのため, ネットワーク全体での受信データサイズはほぼ同じとなるため, トポロジー間で受信による消費電力に差はほとんどない. しかし, 送信距離はトポロジーによって異なり, 送信距離の期待値が最も短くなるチェイン型が有利となる. また, 特にノード数が少ない場合には, トリー型の消費電力が低くなる場合がある. これは, ノード配置によっては貪欲法によるチェイン構成では送信距離を十分に削減できないためだと推測される.

スター型では受信による消費電力は発生しない. 一方他のトポロジーはマルチホップ通信による送信電力削減が見込めるが受信による消費電力が発生する. そのためマルチホップを行うトポロジーにおける受信及び集約による消費電力よりも, 送信距離削減に伴う送信時の消費電力の削減が大きければ消費電力を最小にするトポロジーはスター型以外のトポロジーとなる. 図 3 (a) で 180 m, 図 3 (b) で 100 m あたりでトポロジーが切り換わるのは, マルチホップ通信を行うトポロジーの送信による消費電力がこの条件を満たすためである.

図 3 (c) の場合, エリア一辺の長さが 80 m 以下のとき, 完全集約のときと同様にスター型の消費電力が最も低くなる. エリア一辺の長さが 100 ~ 200 m ではノード数が少なくかつエリア一辺の長さが大きいときはトリー型, その逆ではクラスタ型の消費電力が低くなる傾向にある. これは無集約の場合 (図 3 (a)) でエリア一辺の長さが 180 m 以上の場合と同様の理由である. しかし送受信データサイズが無集約の場合と比べて小さくかつ一定の値に収束するため, 送受信データ

サイズの影響が無集約の場合より少なくなり、無集約の場合に比べてよりエリア一辺の長さが短いときにこの傾向が現れている。また 220 m 以上の場合は、ノード数が少ない場合はトリー型、ノード数が多い場合はチェーン型の消費電力が最も低くなる傾向にある。これはノード数が少ない場合はチェーン型では平均送信距離が長くなるためトリー型の方が消費電力の面では有利となり、ノード数が多くなれば平均送信距離の短くなるチェーン型が有利となるためである。

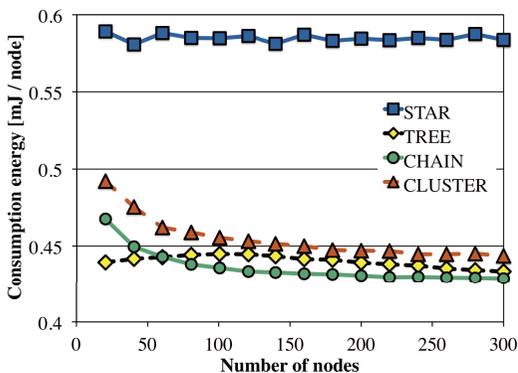
トポロジー間の消費電力の大小関係の比較及びエリアサイズやノード数に対する各トポロジーの消費電力の傾向を考察するために、ノード数またはエリア一辺の長さのみを変化させたときの評価を行った。先行研究で想定されている完全集約、ノード数 100, エリアサイズ 100×100 m を基準とし、図 4(a) に完全集約でエリア一辺の長さを 100 m に固定してノード数を

変化したときのトポロジーごとの消費電力、図 4(b) に完全集約でノード数を 100 に固定してエリア一辺の長さを変化させたときのトポロジーごとの消費電力を示す。

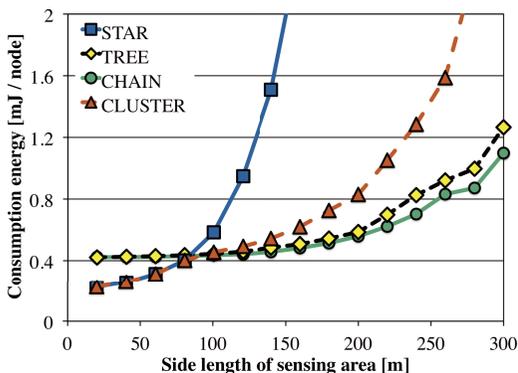
図 4 から、図 3 と同様にエリアサイズの影響が大きいことが分かる。また、チェーン型の消費電力が最も低くなるケースが多い、これはホップ数が多いため送信距離の期待値が短くなったためであると考えられる。一方で、図 4(a) でノード数が少ない場合、図 4(b) でエリアサイズが小さい場合は、チェーン型は必ずしも低消費電力とはならない。ノード数が少ない場合は、マルチホップ通信によって十分な送信距離削減効果が得られず、エリアサイズが小さい場合はマルチホップ通信によるデータ送受信量の増加の影響が大きいためと考えられる。スター型はマルチホップ通信を行わないため、エリア一辺の長さの影響が非常に大きく、ノード数の増加による送信距離削減効果が見込まれない。またスター型においては、受信による消費電力は発生せず、データ集約も行われなかったため各ノードの送信データサイズは等しい。したがってエリア一辺の長さを固定した図 4(a) では 1 ノード当りの消費電力はノード数によらず一定となり、ノード数を固定した図 4(b) ではエリア一辺の長さが増加するに伴い消費電力も急激に増加する。クラスタ型はホップ数は 2 となるため、マルチホップによって送信距離の削減が見込まれる。またノード数の増加によりノード密度が高くなることによっても送信距離が削減される。しかしチェーン型に比べるとホップ数が少ないため、送信距離削減効果はチェーン型に比べて小さくなる。そのためクラスタ型の消費電力はスター型よりも小さくかつチェーン型よりも大きくなり、図 4(a) ではノード数の増加に対して消費電力が減少傾向となる。同様にトリー型については、ホップ数はクラスタ型よりも多くチェーン型よりも少なくなる。そのためトリー型の消費電力は、クラスタ型よりも小さくかつチェーン型よりも大きくなり、ノード数の増加によって消費電力は減少傾向となる。

4.3 集約モデル係数からの考察

紙面の都合上、4 種類のトポロジー全てが含まれる結果として、図 5 にノード数 100, エリアの一辺の長さを 200 m に固定し、集約モデル係数 a, b を変化させたときのカラーマップを示す。図 5 で、横軸は係数 a , 縦軸は係数 b の値を表す。また図 3 と同様に、最も低消費電力を実現するトポロジーを色分けして表示



(a) エリア一辺の長さ = 100 m の場合
(a) The side length of sensing area = 100 m



(b) ノード数 $N = 100$ の場合
(b) The number of nodes $N = 100$

図 4 完全集約における消費電力の比較

Fig. 4 Comparing energy consumption in perfect aggregation scenario.

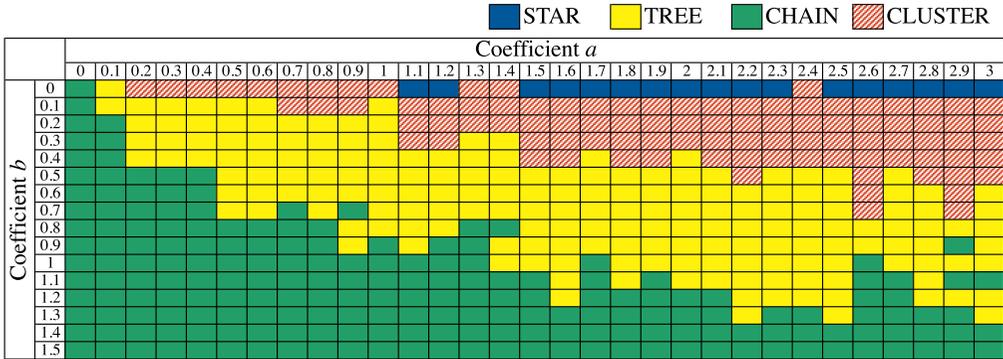


図5 集約モデル係数を変化させたときの省電力化を実現するトポロジー（ノード数 100, エリア一辺の長さ 200 m）

Fig. 5 Minimum energy consumption topology with the number of nodes = 100, side length of sensing area = 200 m when varying aggregation model coefficients.

している。

図5より、係数 b が結果に与える影響が大きいことが分かる。これは、 b は式 (5) の集約モデルにおいて指数部の係数であるためである。結果から、 b の値が小さい場合は、データ集約によって十分なデータ量削減効果が得られないため、データ受信による消費電力が大きくなる。したがって、受信データ量が少なくなるスター型やクラスタ型のホップ数が少ないトポロジーが有利な場合が多い。一方、 b の値が大きい場合は、データ集約によるデータ量削減効果が高くなり、受信による消費電力も低く抑えられる。そのため、平均送信距離が短くなるホップ数が多いトリー型、チェーン型のトポロジーが消費電力削減に有利になる。

4.4 シミュレーション結果のまとめ

シミュレーションの結果から、消費電力にはエリアサイズと集約モデル係数 b の影響が大きいことが分かった。エリアサイズが大きければ、ホップ数の多いトポロジーを選び、エリアサイズが小さい場合は、スター型等のホップ数の少ないトポロジーを選ぶことで低消費電力を実現できる。同様に集約モデル係数 b の値が小さい場合は、ホップ数の少ないトポロジー、 b の値が大きい場合はホップ数の多いトポロジーを選択すれば低消費電力を実現できる。

集約効果が小さく、センシングエリアが比較的大きい場合は、ノード数も消費電力に影響していることが分かった。ノード数が少ない場合は、ホップ数を重ねることによるデータ送受信量増加の影響が少なるが、ノード密度が低くなるためノード間距離が長くなり、マルチホップ通信を行うスター型以外のプロトコルで

は平均送信距離が長くなる。一方ノード数が多い場合は、マルチホップ通信によるデータ送受信量増加の影響が非常に大きくなるが、ノード密度が高くなるためスター型以外のプロトコルでは平均送信距離が短くなる。

なお本論文では基本的な4種類のトポロジーのみについて評価を行い、複合型については評価を行っていない。しかし複合型トポロジーは、局所的に見れば基本トポロジーを含んでいるとみなせる。そのため、複合型トポロジーの解析を簡単化する目的で本論文の結果が活用できると考えられる。例えば階層ごとに消費電力が最小となるようなトポロジーを探索し、ネットワーク全体でも消費電力が準最適となるような探索を行うために本論文の結果は有効である。

5. むすび

本論文では、データ収集型センサネットワークにおいて代表的なスター型、トリー型、チェーン型、クラスタ型の4種類のトポロジーについて、データ集約と送受信による消費電力の数理モデルを構築した。また、ネットワーク運用環境によって異なるデータ集約効果、ノード数、エリアサイズを考慮し、シミュレーションにより最も消費電力が少なくなるトポロジーを探索した。その結果、省電力を実現するためのトポロジーはエリアサイズ及び集約モデル係数 b の値に影響を受け、またセンシングエリアが一定以上の大きさではノード数の影響を受けることを示した。これらのパラメータはノードの参入や離脱、観測値の特性などにより変化することから、パラメータに合わせてトポロジーを決

定することによって、より効率的に省電力化を実現できるルーチングプロトコルの開発へつながる可能性がある。

謝辞 本研究の一部は、国立大学法人豊橋技術科学大学グローバル COE プログラム“インテリジェントセンシングのフロンティア”，日本学術振興会科学研究費補助金，基盤研究（C）21560397 の援助により行われた。関係者各位に深謝する。

文 献

- [1] I.F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, “A survey on sensor networks,” *IEEE Commun. Mag.*, vol.40, no.8, pp.102–114, Aug. 2002.
- [2] S. Lindsey, C. Raghavendra, and K.M. Sivalingam, “Data gathering algorithms in sensor networks using energy metrics,” *IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst.*, vol.13, no.9, pp.924–935, Sept. 2002.
- [3] W.B. Heinzelman, A.P. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, “An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol.1, no.4, pp.660–670, Oct. 2002.
- [4] C. Intanagonwiwat, R. Govindan, and D. Estrin, “Directed diffusion for wireless sensor networking,” *IEEE/ACM Trans. Netw.*, pp.2–16, Feb. 2003.
- [5] S. Madden, M.J. Franklin, J. Hellerstein, and W. Hong, “Tag: A tiny aggregation service for ad-hoc sensor networks,” *Proc. 5th symposium on Operating systems design and implementation (OSDI)*, vol.36, no.SI, pp.131–146, Dec. 2002.
- [6] M.A. Sharaf, J. Beaver, A. Labrinidis, and P.K. Chrysanthis, “Balancing energy efficiency and quality of aggregate data in sensor networks,” *VLDB Journal*, vol.13, no.4, pp.384–403, Dec. 2004.
- [7] W. Guo, W. Zhang, and G. Lu, “PEGASIS protocol in wireless sensor network based on an improved ant colony algorithm,” *Proc. Second International Workshop on Education Technology and Computer Science*, pp.106–109, March 2010.
- [8] O. Younis and S. Fahmy, “HEED: A hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks,” *IEEE Trans. Mobile Comput.*, vol.3, no.4, pp.366–379, Oct. 2004.
- [9] D. Maeda, H. Uehara, and M. Yokoyama, “Efficient clustering scheme considering non-uniform correlation distribution for ubiquitous sensor networks,” *IEICE Trans. Fundamentals*, vol.E90-A, no.7, pp.1344–1352, July 2007.
- [10] A. Manjeshwar and D.P. Agrawal, “TEEN: A routing protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks,” *Proc. 1st International Workshop on Parallel and Distributed Computing Issues in Wireless Networks and Mobile Computing*, pp.2009–2015, April 2001.
- [11] A. Manjeshwar and D.P. Agrawal, “APTEEN: A hybrid protocol for efficient routing and comprehensive information retrieval in wireless sensor networks,” *Proc. Internaional Parallel and Distributed Processing Symposium*, pp.195–202, Aug. 2002.
- [12] P. Ding, J. Holliday, and A. Celik, “Distributed energy-efficient hierarchical clustering for wireless sensor networks,” *IEEE International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS)*, eds. by P. Ding, J. Holliday, and A. Celik, *IEEE International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems*, pp.322–339, Marina Del Rey, CA, June 2005.
- [13] S.D. Muruganathan, D.C.F. Ma, R.I. Bhasin, and A.O. Fapojuwo, “A centralized energy-efficient routing protocol for wireless sensor networks,” *IEEE Commun. Mag.*, vol.43, no.3, pp.8–13, March 2005.
- [14] S.M. Jung, Y.J. Han, and T.M. Chung, “The concentric clustering scheme for efficient energy consumption in the PEGASIS,” *Proc. 9th International Conference on Advanced Communication Technology*, pp.260–265, Feb. 2007.
- [15] K.H. Chen, J.M. Huang, and C.C. Hsiao, “CHIRON: an energy-efficient chain-based hierarchical routing protocol in wireless sensor networks,” *Wireless Telecommunications Symposium (WTS)*, pp.1–5, April 2009.
- [16] H. Wu, Y. Ding, and Z. Zhong, “A chain-based fast data aggregation algorithm based on suppositional cells for wireless sensor,” *Proc. 2nd International Conference on Power Electronics and Intelligent Transportation System (PEITS)*, pp.106–109, Dec. 2009.
- [17] J.D. Yu, K.T. Kim, B.Y. Hung, and H.Y. Youn, “An energy efficient chain-based clustering routing protocol for wireless sensor networks,” *Proc. International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops*, pp.383–389, May 2009.
- [18] 高 博昭, 上原秀幸, 大平 孝, “結合エントロピーに基づくデータ集約モデルの導出と省電力センサネットワークへの適用,” *信学論 (B)*, vol.J95-B, no.2, pp.238–245, Feb. 2012.
(平成 24 年 10 月 31 日受付, 25 年 2 月 19 日再受付)



高 博昭 (正員)

平 19 豊橋技科大・工・情報卒。平 24 同大大学院博士課程了。博士(工学)。現在、公立はこだて未来大・特任研究員。主としてセンサネットワークに関する研究に従事。平 23 本会東海支部学生研究奨励賞受賞。



上原 秀幸 (正員：シニア会員)

平 4 慶大・理工・電気卒。平 9 同大学院博士課程了。博士(工学)。同年豊橋技科大・情報・助手。平 14 同講師。平 16 同助教授。平 18 同大・未来ビークルリサーチセンター・助教授。平 19 同准教授。現在、同大学院電気・電子情報工学系教授。

平 14～15 ATR 適応コミュニケーション研究所客員研究員。主として無線アクセス方式、マルチホップ通信の研究に従事。情報処理学会。IEEE。各会員。平 14, 平 18, 平 23, 平 24 本会通信ソサイエティ活動功労賞受賞。



大平 孝 (正員：シニア会員)

昭 58 阪大大学院博士課程了。博士(工学)。電電公社/NTT にて衛星さくら 4 号・きく 6 号・きく 8 号搭載 GaAsM-MIC の設計を担当。平 17 ATR 波動工学研究所長。現在、豊橋技術科学大学教授。昭 61 本会篠原賞。平 10 APMC

Japan Microwave Prize。平 16 本会エレクトロニクス賞。IEEE MTT-S Kansai Chapter Founder。IEEE MTT-S Nagoya Chapter Founder。EuMA Award Councilor。工博。IEEE Fellow。本会マイクロ波研究専門委員長。