

# LPWA 通信を利用する IoT プラットフォーム向けの 電力効率を考慮したゲートウェイ配置手法の検討

辻丸 勇樹<sup>1,a)</sup> 坂本 龍一<sup>1</sup> 近藤 正章<sup>1</sup> 中村 宏<sup>1</sup>

概要 : IoT における根幹技術のひとつであるワイヤレスセンサネットワーク (WSN) においては, センサノードがバッテリー駆動であるという制約からノードの省電力化が重要となる. 消費電力の大きな要因はデータの通信であることが知られており, 既存手法ではルーティング等を工夫することにより通信回数や距離を制御することで省電力化が図られてきた. 一方, IoT 向け LPWA の無線通信規格の一つである LoRaWAN では長距離通信が可能であるため, 1 ホップでゲートウェイへデータを送信することができる. その際通信距離が大きくなると通信時のセンサノードの消費電力が増大する. この問題に対処するため, 本稿では特に LPWA 通信規格のひとつである LoRaWAN に着目し, ゲートウェイの配置場所を最適化することで, センサノードの消費電力を平準化し, センサープラットフォームの寿命を向上させる手法を提案する.

## 1. はじめに

近年注目される IoT の根幹技術のひとつにワイヤレスセンサネットワーク (WSN) がある. これは多数の無線センサを環境に配置し, それらがセンシングおよびデータ通信を行うことで, 情報を集めるシステムである. WSN の応用範囲は非常に幅広い. たとえば, 屋内における応用であればスマートホームや工場内での機器監視等が挙げられる. また, 屋外であれば防災モニタリングや農業における環境モニタリングなどへの適用も盛んに行われている.

WSN で用いられるセンサノードは一般的にバッテリー駆動であるため, エネルギー消費を削減し, 動作時間を最大化させることが重要となる. 今後センサの数が爆発的に増加することが考えられるため, 設置後バッテリー交換が不要な程度にバッテリー寿命を向上させることは大きな課題である.

センサノードにおける電力消費の最大の要因は, データの通信にある. WSN の寿命を向上させる手法として, ルーティングによる通信制御 [1] やトポロジーコントロール [2] 等がしばしば用いられてきた. これらはメッシュ型のネットワークを想定したものである. メッシュ型ネットワークはエンドデバイスやゲートウェイ, ルータが網目状に接続され, 各端末がデータをバケツリレーのように中継してデータを収集するようなネットワークである. このよ

うな構成は, bluetooth や Wi-Fi 等の近・中距離通信規格を用いる際に効果的である.

一方, 近年のセンサノード向けの無線通信規格では低消費電力かつ長距離通信を実現した LPWA の通信規格が登場しており, ノードを中継せず 1 ホップで収集先ゲートウェイにデータを送信することが可能となっている. すなわち, ゲートウェイと複数センサノードが 1 対 N の関係で通信を行うようなスター型の WSN を構築することが可能となる. それらを用いることで既存手法と比べ通信の頻度を抑えることによる省電力化を見込むことができる.

いずれの WSN 型を用いる場合でも, ゲートウェイをどのように配置するかは, ネットワークの寿命を向上させる際に重要な要素となる. たとえば, ゲートウェイがセンサノードから遠く離れた場所に配置されてしまうと, 通信距離や中継ノード数が増大するため, データ通信時の電力が増大したり通信品質が低下してしまう可能性がある. また近年, ゲートウェイとして用いられるデバイスは必ずしも大規模なものではなく, 設置の容易なものが現れている. そのため, ゲートウェイの配置箇所はかつてより柔軟になっており, その最適配置を考える効果は高いと考えられる.

本稿では特に LPWA 通信規格の一つである LoRaWAN[6] を用いた場合を想定し, ネットワーク寿命の向上のために消費電力の観点においてゲートウェイの配置を最適化する手法を検討する. ここで, 最適なゲートウェイの配置とは, 最もエネルギー消費の大きなセンサノードの消費エネルギーを最小化するような配置を表す. ただし, ゲートウェイ

<sup>1</sup> 東京大学 大学院情報理工学系研究科  
Graduate School of Information Science and Technology,  
The University of Tokyo  
<sup>a)</sup> tsujimaru@hal.ipc.i.u-tokyo.ac.jp

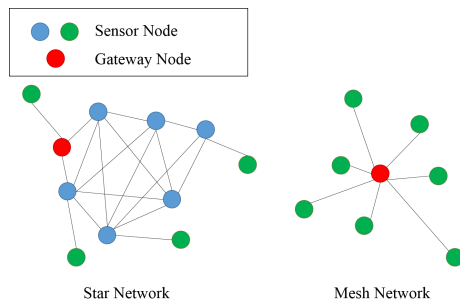


図 1 メッシュ型ネットワーク及びスター型ネットワーク

表 1 各種通信規格との比較 ([4] より一部抜粋)

	Range[m]	Data Rate[kbps]	Power
Bluetooth	50-150	1000	High
Wi-Fi	10-100	250	Moderate
Sigfox	30000	0.01-1	V-Low
LoRaWAN	2000-5000	0.3-5	Low

イの配置を求める問題は NP 困難であることが知られているため [3], 近似アルゴリズムにより近似解を得ることを目標とする。

## 2. 研究背景

### 2.1 LPWA

Low Power Wide Area (LPWA) とは、消費電力を抑え、かつ長距離通信を実現するための通信方式であり、今後の IoT での応用が期待されている。IoT においては、大量のセンサノードからデータを収集・解析し活用することが要求される。その際、多くのセンサノードとの通信が行える必要がある一方、一度に送受信されるデータや通信頻度は小さい場合が多い。したがって LPWA の通信方式は、通信速度は遅いものの、低消費電力かつ広域通信が可能であるような仕様となっている。実際の通信距離や電力消費量には文献によって異なるが、表 1 のように数 km から数十 km の通信が可能で、乾電池などの電源で数ヶ月から数年程度の稼動が可能であるとされている。これにより、小型 IoT デバイスなどに対しても、メッシュ型ではなくスター型ネットワークを構築することが可能となる。LPWA の代表的な例として、SIGFOX [5] や LoRaWAN [6] 等が挙げられる。本稿では、LPWA の中でも通信距離と消費電力に関して柔軟性のある LoRaWAN に注目して検討を行う。

### 2.2 LoRaWAN

LoRaWAN は IoT 向けの通信手法として注目されている技術である。Wi-Fi や Bluetooth 等の既存通信方式と比較した際の特長は、通信距離が長い (数 km ~ 数十 km) ながらも消費電力が小さい点である。そのため広域での応用、例えば農業や工場、スマートシティ等での利用が期待される。ただし通信速度は非常に遅いため、音声や映像を送信する目的には適さない。また、技術基準適合認証制度の関係で、日本国内では 4 秒間に 11byte しか送信できな

表 2 拡散率による受信感度, ビットレートの変化

拡散率	受信感度 [dBm]	bit rate [bit/s]
SF12	-137	250
SF11	-134.5	440
SF10	-132	980
SF9	-129	1760
SF8	-126	3125
SF7	-123	5470
SF6	-118	11000

いという制約がある。また、無線局の出力電力にも制限があり、国内では免許、登録なしの場合、20mW 以下となる。さらに LoRaWAN においては拡散率 (Spreading Factor) と呼ばれる値を変更することで、通信距離と通信速度に存在するトレードオフの関係を、ユーザ側が明示的に変えることができる。

拡散率とは、スペクトル拡散変調方式を用いた通信方式における、送信データ速度と拡散符号速度の比を表す値である。LoRaWAN では拡散率の値は 6 から 12 までが利用可能である。拡散率の値が大きくなればより長距離の通信が可能となるが、通信にかかる時間も増大する (表 2 参照) ため、より多くの電力を消費することになる。また同一チャネルに対して複数のデバイスから同時に通信が行われた場合でも、拡散率の値が違っていれば衝突せず通信を行うことができるため、センサノード数が膨大であっても正しく通信を行うことが可能である。したがって LoRaWAN におけるゲートウェイ配置箇所を定めるにあたっては、ユーザは配置箇所のみならず、センサノード毎にこの拡散率を適切な値に設定することが求められる。

### 2.3 関連研究

メッシュ型ネットワークに対しては、ゲートウェイ配置問題について考察を行う研究が多数存在する。ただし、目標として定められているのは必ずしも省電力化ではない。文献 [7] では、ゲートウェイの配置はあらかじめユーザが決定し、その後ルーティングを再帰的に求めることによって、不必要なゲートウェイを除去する手法が用いられている。文献 [8] では、配置するゲートウェイの個数を最小化することを目的に、支配集合問題の近似アルゴリズムを用いてセンサノードのクラスタリングを行っている。また、スループットの向上を目的とした手法として、粒子群最適化法を用いて解の探索を行う手法 [9] も存在する。同様に、レイテンシの最小化、すなわちセンサノードからゲートウェイまでのホップ数の総和を最小化させるようなゲートウェイ配置を、遺伝的アルゴリズムを用いて導出する手法も存在する [10]。なおこれらの手法は、配置されたノードのいずれかをゲートウェイと選定するような手法となっている。本稿では、あらかじめセンサノードの配置は与えた上で、ゲートウェイをそれとは別に配置することを考える。たとえば、水田にセンサノードを配置して環境モニタ

リングを行ったり、各家庭にスマートセンサを配置して使用電力を監視するような場合が想定できる。

省電力化の観点を持ち、かつノード配置とゲートウェイ配置を別にして論じているものもある。文献 [11] は、フィールドをグリッドに区切り、そのグリッドの中央にゲートウェイを配置するという制約を加えた上で、貪欲法を用いてゲートウェイ配置を決定している。

## 2.4 本研究の位置付け

前節で示した研究は、メッシュ型ネットワークを想定したものである。本稿で論じるスター型ネットワークは、メッシュ型ネットワークにおけるホップ数を 1 に制限したものであると考えられる。しかしながらスター型ネットワークにおけるゲートウェイ配置問題は、単にメッシュ型における配置問題の部分問題になるとは限らない。なぜなら、スター型ネットワークにおいてはホップ数が制限される代わりに、ノード間の通信距離とそれによる消費エネルギーの差異を考慮しなければならないからである。通信距離と消費エネルギー間にはトレードオフ関係が存在するため、適切な通信距離を設定することは重要となる。本研究においてはこのスター型ネットワークを対象に、特に LoRaWAN における拡散率等を考慮することで、通信距離と消費エネルギーのトレードオフを意識したゲートウェイ配置を求める。

## 3. 問題設定

### 3.1 ゲートウェイ配置問題

ゲートウェイ配置問題を、ここではセンサノードの位置と数、およびセンサノードのもつパラメータと、ゲートウェイの配置個数を入力として与えた際、ネットワーク寿命を最大化するようなゲートウェイ配置を出力する問題だと定義する。ネットワークの寿命を最大化する事とは、すなわち

$$\min \max_{i \in S} E(i) \quad (1)$$

$$\min \sum_{i \in S} E(i) \quad (2)$$

を実現するゲートウェイ配置を求めることである。 $E(i)$  はセンサノード  $i$  がゲートウェイへ通信する際の合計消費エネルギーを表す。また、 $S$  はセンサノードの集合を表す。(1) 式は、最も消費エネルギーの大きいセンサノードの消費エネルギーを最小化する事を、(2) 式は、ネットワーク内のセンサノードの消費エネルギーの総和を最小化する事を指す。

センサノードからゲートウェイへの通信時消費エネルギーの算出は、以下のように行う。まず通信可能距離については、次式で定義される自由空間伝搬損失  $L[dB]$  を元に算出する。

$$L = 20 \log\left(\frac{4\pi}{\lambda}\right) + 10n \log(d) \quad (3)$$

ここで、 $\lambda$  は波長を、 $d$  は距離を表す。また、 $n$  は伝達係数を表し、 $n = 2$  ならば障害物等のない理想空間を、 $n > 2$  ならば障害物等により信号が吸収される空間が仮定される。これにより求められた伝搬損失を元に、表 2 で示された受信感度を閾値とし、可能な限り小さな拡散率を選択する。なぜなら、表 2 によれば、拡散率が小さいほど通信時間が短くなり、通信に要するエネルギーが小さくなるためである。たとえば、表 3 に準じて  $n = 2.8$ 、通信距離  $d = 5000[m]$  の場合、式 3 により、 $L = 135.3[dB]$  となる。このとき、送信出力  $13[dBm]$  から  $L[dB]$  の値を減じた値  $L' = -122.3$  は表 2 の受信感度によれば、 $-118 < L' < -123$  を満たすため、拡散率  $SF = 7$  を選択する。

また、消費エネルギーについて議論する際、エネルギーを導出するためにはバッテリーの電圧降下等を考慮することになるが正確に導出することは困難であるため、代わりに消費電流量を用いて議論を行う。消費電流量は、文献 [12] に示されている次式通信時間  $T$  に、通信時電流を乗じたものとする。

$$T = T_{preamble} + T_{payload} \quad (4)$$

$$T_{preamble} = (n_{preamble} + 4.25)T_{sym} \quad (5)$$

$$T_{payload} = n_{payload}T_{sym} \quad (6)$$

$$T_{sym} = \frac{2^{SF}}{BW} \quad (7)$$

$$n_{payload} =$$

$$8 + \max\left(\left\lceil \frac{8PL - 4SF + 8 + CRC + H}{4(SF - DE)} \right\rceil \left(\frac{4}{CR}\right), 0\right) \quad (8)$$

ここで、 $T_{preamble}$ 、 $T_{payload}$  はそれぞれプリアンブルとペイロードの送信時間、 $n_{preamble}$ 、 $n_{payload}$  は送信シンボル数、 $T_{sym}$  は 1 シンボルの送信時間を表す。また  $PL$  はペイロード長 [byte]、 $CRC$  は巡回冗長検査、 $DE$  は補正項、 $H$  はヘッダー長、 $CR$  はコードレート、 $BW$  はバンド幅を表す。拡散率の変化により、 $T$  の値は図 2 のように変化する。ただし、 $PL$  を除く各パラメータは表 3 の値を仮定した。

また、同じゲートウェイに対して複数のセンサノードが同一のタイミング、同一チャネル、同一の拡散率で通信を行うと通信が衝突してしまうため、ひとつのゲートウェイに対して通信できるセンサノードの数は通信時間  $T$  に依存して限りが生じる。しかし、本稿では問題の簡単のため、ひとつのゲートウェイに対する通信可能センサノード数の上限は考慮しないものとする。

前途のとおり、ゲートウェイ配置を求める問題は NP 困難である。近似的に解を求める単純な手法のひとつとして、フィールドをグリッドにより分割し、ゲートウェイの配置候補箇所をグリッド中心点のみに制限した上で解を探索する事が考えられる。このような手法を用いた場合、その時間計算量は  $O(m^g s^n)$  となる。ただし  $m$  はグリッドの個数、 $g$  はゲートウェイ数、 $s$  は拡散率のパターン数、 $n$  は

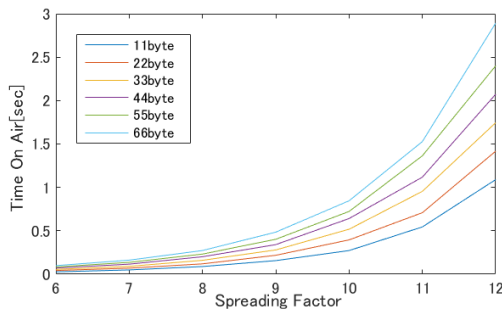


図 2 拡散率による通信時間の変化

センサノードの個数を表す。ゲートウェイ数またはセンサノード数が増えると計算時間が指数的に増加するため、現実的な解法ではない。本稿では、LPWA に適したゲートウェイ配置を考慮するための初期検討として複数種類の配置手法を実行し、その配置傾向を検討する。ただし、今回は拡散率の選択は消費エネルギーを小さくすることのみを目的に選択するため、拡散率は通信距離に対して一意に定まるものとする。

### 3.2 配置手法

実験においては次の3つの手法によりゲートウェイ配置を試みる。

- 無作為配置手法
- 均等配置手法
- k-means++法 [14]

以降で、これら3つの配置について説明する。

**無作為配置**：ゲートウェイの配置はランダムに行う。各センサノードは、最も消費電力の小さくなるゲートウェイへと通信を行う。

**均等配置**：フィールドをゲートウェイ数の数に応じたグリッド状に分割し、そのグリッド中央にゲートウェイを配置する。この手法においても、各センサノードは最も消費電力の小さいゲートウェイへと通信する。

**k-means++法**：これは非常にシンプルなクラスタリング手法でありながら、NP 困難な問題への近似解を導出する手法としてしばしば用いられる。本稿における k-means++法では以下のような処理を行う。

- (1) センサノードから無作為に1個選択し、それをクラスタ中心地の初期値とする。
  - (2) 残り  $k-1$  個のクラスタ中心地を、1 個目のクラスタ中心地からの距離に応じた確率によって他のセンサノードから選ぶ。
  - (3) 各センサを、最も近いクラスタに割り当てる。
  - (4) クラスタ中心地を、そのクラスタ内距離の和が最小となるような位置に移動する。
  - (5) (3) へ戻り処理を繰り返す。事前に指定した反復回数を迎えるか、クラスタ割り当てが変化しなくなったところで処理を終了する。
- (3) 以降は通常の k-means 法と同様だが、(1)(2) による初

表 3 parameter setting

parameter	Value
$BW$	$1.23 * 10^5$ [Hz]
$CR$	4/5
$PL$	11 [byte]
$n_{preamble}$	6
$H$	20
$CRC$	16
$DE$	2
current	38.6 [mA]
$n$	2.8
通信間隔	10 [min]
送信出力	13 dBm

表 4 実験設定

fieldsize	20 [km] * 20 [km]
ゲートウェイ数	4 個
センサノード数	1000 個

期化を行うことで、k-means 法の初期値依存性を解消している。この処理が終了した次点でのクラスタ中心地点をゲートウェイの配置とし、そのクラスタに属しているセンサノードは、当該ゲートウェイに対して通信を行うものとする。また、k-means++法での (3)(4) ステップの反復回数は 500 回と設定した。

## 4. 評価

### 4.1 評価概要

各配置手法によるゲートウェイ配置の傾向を確認するため、次のような実験を行った。まず、拡散率を考慮した省電力化の見込みを検討するため、ランダムに配置されたセンサノードの総消費電流量と最大消費電流量について、各手法毎に比較を行った。この実験においては、センサノード配置からゲートウェイ配置までを1試行とし、各手法について 1000 回の試行を行った上で結果を示している。また、LoRaWAN の拡散率の配分がどのように行われるかの傾向を把握するため、ランダムに配置されたセンサノードに対して k-means++法を実行した際の、ゲートウェイ配置およびその時のセンサノードの拡散率の分布を確認した。

さらに、実環境下で各手法がどの程度の効果を発揮するかを確認するため、日本国内の家屋の配置分布を参考にし、1家屋に1つセンサノードを配置するという仮定の下、ゲートウェイ配置および消費エネルギーの傾向を確認した。実験の際に利用したパラメータの値については表 3 および表 4 に示す。

### 4.2 実験結果

#### ランダムなセンサノード配置の場合

まず、ランダムに配置されたセンサノードに対して各ゲートウェイ配置手法を利用した場合での、センサノードの最大消費電流量および総消費電流量を比較したグラフを図 3

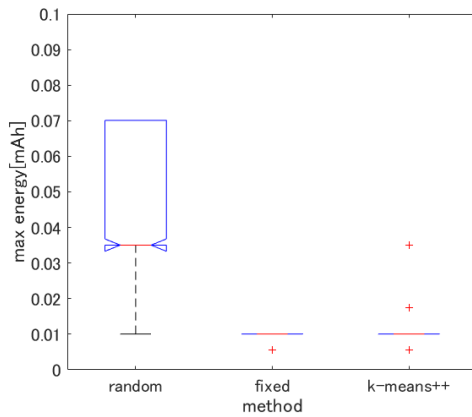


図 3 最大消費電流量 (ランダム配置)

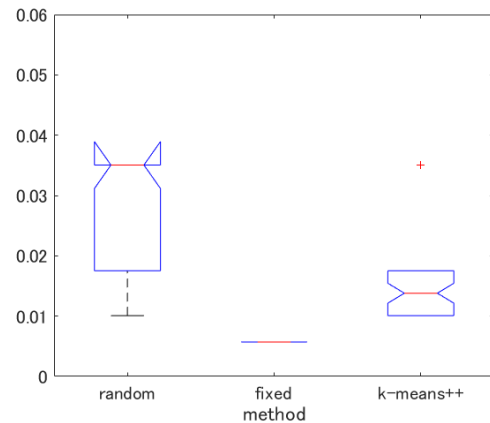


図 5 最大消費電流量 (石狩市)

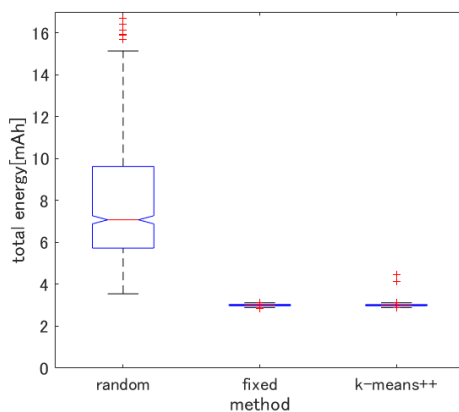


図 4 総消費電流量 (ランダム配置)

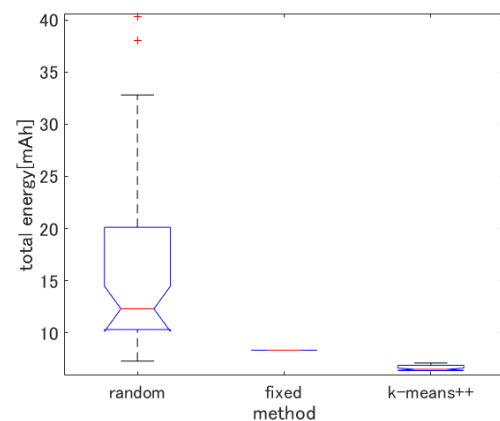


図 6 総消費電流量 (石狩市)

と図 4 に示す。図において、中央の赤線は中央値を表し、箱の上端、下端は第 3 四分位点  $Q_{3/4}$  および第 1 四分位点  $Q_{1/4}$  を表す。また黒線の上端と下端はそれぞれ最大値、最小値を表す。さらに閉区間  $[2.5Q_{1/4} - 1.5Q_{1/4}, 2.5Q_{3/4} - 1.5Q_{3/4}]$  の外にある値を外れ値としている。上側に大きく外れた値は、ゲートウェイへの通信ができないノードが存在する配置が行われたデータであるため、除外している。

次に、ランダムに配置されたセンサノードに対して、k-means++法によってセンサノードのクラスタリングを行った際のクラスタ中心位置 (ゲートウェイ位置) およびその時の拡散率の分布の例を図 7 から図 9 に示す。各クラスタの中心の近くにゲートウェイが配置され、またゲートウェイに近いほど拡散率の値が小さくなっていることがわかる。

#### 実環境に基づいたセンサノード配置の場合

国土交通省国土政策局が発行している位置情報ダウンロードサービス [15] の平面直角座標から北海道石狩市周辺の家屋位置情報を取得し、それをセンサノード配置箇所と仮定してゲートウェイ配置を試みた場合の最大消費電流量及び総消費電流量を図 5 と図 6 に示す。また、k-means++法によるゲートウェイ配置例を図 10 から図 12 に示す。この領域内に存在するセンサノード数は 30,510 個であり、領

域の大きさは約 20[km]\*20[km] である。ただし、計算量の関係のため、センサノードの数を均等に省き 3051 個とし、更に k-means++法の反復回数を 100 回に、配置手法毎の試行回数を 50 回としている。

## 5. 考察

フィールドに対して一様にセンサノードが配置されている場合、均等配置および k-means++法による配置において消費エネルギー削減の効果を確認した。均等配置と k-means++法を比較した場合、均等配置のほうが若干ではあるが総消費電流量と最大消費電流量がともに小さくなる結果になった。これはフィールド内センサノード配置の偏りがないため、クラスタリング手法が有効ではないためであると考えられる。また拡散率設定の効果については表 5 に見られるとおりであり、拡散率固定の場合と比べて最大消費電流量、総消費電流量ともに大きく改善される事が確認された。表 5 は、全センサノードが拡散率  $SF = 12$  固定で通信した場合と、各手法によって拡散率が調整された場合の最大消費電流量および総消費電流量を表にしたものである。配置手法を用いた場合の各項目の値は、図 3 および図 4 の値の平均をとったものである。

また、北海道の実際の家屋配置に対して同様の実験を



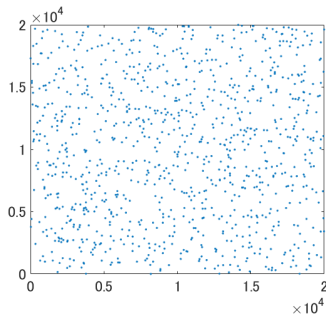


図 7 センサノード配置例 (ランダム配置)

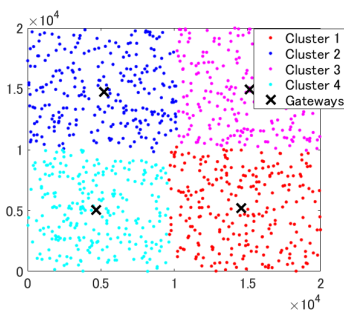


図 8 クラスタリング結果 (ランダム配置)

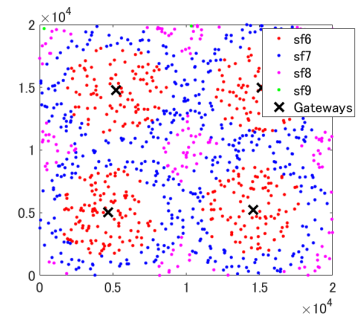


図 9 拡散率の分布 (ランダム配置)

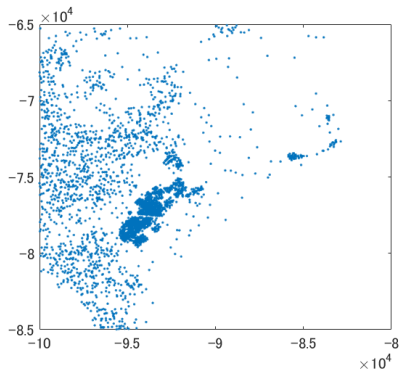


図 10 センサノード配置 (石狩市)

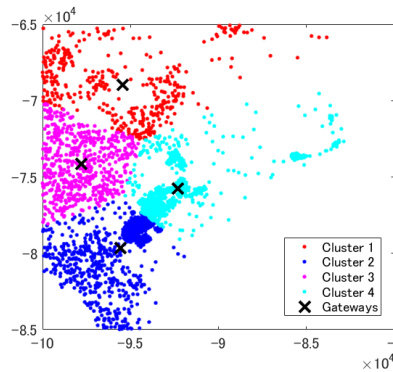


図 11 クラスタリング結果 (石狩市)

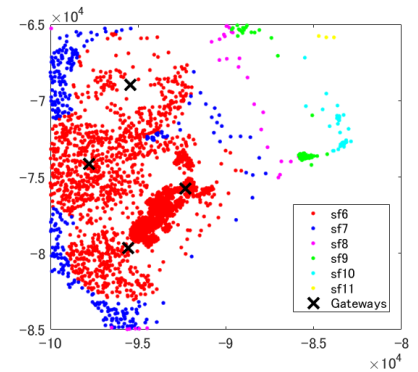


図 12 拡散率の分布 (石狩市)

行った場合には、総消費電流量において k-means++ 法による配置が最も効果的に省電力化を実現した。一方、最大消費電流量は均等配置の方が高い効果を示している。これはセンサノード配置が図左下の領域に偏っているため、距離の平均値を元にクラスタリングを行う k-means++ 法を利用した際、クラスターが左側に偏ったことが原因だと考えられる。ただし、本実験においては k-means++ 法の反復回数や、センサノード数を本来よりも削減したため、これらの削減を行わずに実験を行った場合、更なる改善が見込める可能性はある。

## 6. まとめ

本稿では、LPWA のひとつである LoRaWAN におけるゲートウェイの最適配置についての検討を行った。ランダムなセンサノード配置及び実際の家屋配置を基にしたセンサノード配置に対してゲートウェイ配置手法を実行した結果、特に k-means++ 法による配置手法によって、センサノードの消費エネルギーを削減できる可能性があることを示した。

今回は簡単のため拡散率の選定を、最も消費エネルギーを抑えられるという事のみを基準としたが、実環境における応用では、必ずしもエネルギーの観点のみから拡散率を設定できるとは限らない。たとえば、センサノードが非常に密集した場合、同じゲートウェイに同じ拡散率で通信しようとした場合に混信が生じるた可能性が生じるため、わざと異なる拡散率を利用することでそれを防ぐといった状況が考えられる。実際のところ、今回の実験設定のように

表 5 拡散率が固定の場合との比較

	max[mAh]	total[mAh]
random	0.0099	3.007
fixed	0.0475	7.223
k-means++	0.0101	3.007
SF12 固定	0.0701	70.10

1000 個を超えるセンサノードを数個のゲートウェイで管理するような場合、センサノードの通信頻度の多さによってはゲートウェイの受信チャネルが常に占有され、通信が正しく行えない状況が生まれる。したがって、今後は拡散率の選定方法や通信のスケジュール等をより精査する必要がある。

謝辞 本研究の一部は JSPS 科研費 16K12405 の助成によるものである。

## 参考文献

- [1] Tran Dinh Hieu, Le The Dung, Byung-Seo Kim: *Stability-Aware Geographic Routing in Energy Harvesting Wireless Sensor Networks*, Sensors 16(5): 696 (2016).
- [2] Xin Wang, Vijay S. Rao, R. Venkatesha Prasad, Ignas G. Niemegeers: *Choose wisely: Topology control in Energy-Harvesting wireless sensor networks*, CCNC 2016: 1054-1059.
- [3] Efrat, A., Har-Peled, S., and Mitchell, J. S. B.: *Approximation Algorithms for Two Optimal Location Problems in Sensor Networks*, In 2nd International Conference on Broadband Networks, BROADNETS 2005 (Vol. 2005, pp. 767-776).
- [4] Arpit Patel, Tushar A. Champaneria: *STUDY*

*AND COMPARISON OF VARIOUS INTERNET OF THINGS PROTOCOLS*, IJAERD 2015: 374-382.

- [5] SigFox [Online]. Available: <https://www.sigfox.com/en>, accessed Sep. 27 2017.
- [6] N. Sornin et al.: LoRa Specification 1.0, LoRa Alliance Std Spec., Jan. 2015; [www.lora-alliance.org](http://www.lora-alliance.org), accessed Sep. 27, 2017.
- [7] Akio Hada, Ryuji Tsuchiya: *A Metaheuristic Algorithm for Wireless Sensor Network Design in Railway Structures*, Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing (ISSNIP), 2009 5th International Conference on.
- [8] Bassam Aoun, Raouf Boutaba, Youssef Iraqi, Gary W. Kenward: *Gateway Placement Optimization in Wireless Mesh Networks With QoS Constraints*, IEEE Journal on Selected Areas in Communications 24(11): 2127-2136 (2006).
- [9] Vinh Trong Le, Nghia Huu Dinh, Nhu Gia Nguyen: *A novel PSO-based algorithm for gateway placement in wireless mesh networks*, 2011 IEEE 3rd International Conference on Communication Software and Networks(pp. 41-45).
- [10] Youssef, Waleed., Younis, Mohamed.: *Intelligent Gateways Placement for Reduced Data Latency in Wireless Sensor Networks*, Communications, 2007. ICC '07. IEEE International Conference on.
- [11] Ashraf, Usman.: *Energy-Aware Gateway Placement in Green Wireless Mesh Networks*, IEEE Communications Letters. 21. 1-1. 10.1109/LCOMM.2016.2618378.
- [12] AN1200.22 LoRa Modulation Basics: Semtech ; [www.semtech.com/images/datasheet/an1200.22.pdf](http://www.semtech.com/images/datasheet/an1200.22.pdf), accessed Oct. 4, 2017
- [13] Chao Yang, Wei Lou, Junmei Yao: *Energy-efficient gateway on-off switching scheme in cognitive radio based smart grid networks*, 2016 IEEE International Conference on Communications (ICC).
- [14] David Arthur, Sergei Vassilvitskii: *k-means++: the advantages of careful seeding*, SODA 2007: 1027-1035.
- [15] 国土交通省位置参照情報ダウンロードサービス <http://www.mlit.go.jp/kokudoseisaku/kokudojoho.html>, accessed Sep. 27, 2017.