

# LoRaWAN におけるネットワーク効率化のための ノードのグループ構成法と通信制御方式

手柴 瑞基 湯 素華 小花 貞夫

**概要**：省電力広域ネットワークの一つである LoRaWAN が IoT の通信手段として注目されている。LoRaWAN には距離に伴う送信時間の増大によるノード寿命の低下や、メッセージ衝突の頻発によるパケット到達率の低下といった課題がある。本稿では、課題解決のためノードや距離、バッテリー寿命などを考慮したノードのグループ構成方法と、その通信制御方式を提案する。ノードを効率的にグループ化することにより、全体として送信にかかる時間を削減し、周波数利用効率とエネルギー効率の向上を図る。評価結果から、LoRaWAN のオリジナル手法と比較して 5.8 倍から 8.3 倍ものノードを収容可能であること、また全体の消費電力量を平均 15.5%抑制できることを示した。

**キーワード**：LoRaWAN, LPWAN, グループ化, センサ, IoT

## Proposal on Node Grouping and Communication Control for Improving Network Efficiency of LoRaWAN

TESHIBA MIZUKI SUHUA TANG SADA OOBANA

### 1. はじめに

IoT 技術の発展に伴い、ネットワークに接続する端末が年々増加しており、その利用方法は田畑の水位の調査用センサー、水道やガスの検針のスマートメータ、煙探知機、人の検知センサーなど、多様化している。

こうした IoT センサでは低コストであるにもかかわらず、様々な環境下での利用が想定され、常時電源供給とは限らない。このような背景から、課題として、バッテリー寿命や物理的にアクセス困難な環境によるバッテリー寿命の延伸化、及びそれに伴う遠隔でのノード管理の必要性、さらに送信可能なデータサイズが小さいことや、ノード数の増加によるネットワークの混雑化などがある。そのため、バッテリー寿命の延伸、遠隔管理の効率化、ネットワーク効率の向上などが求められている。こうした課題解決策として、数 km の長距離をカバーできる無線通信方式である省電力広域ネットワーク(LPWAN: Low Power Wide Area Network)[1]が提案された。その代表例として、LoRaWAN (Long Range WAN) [2], Sigfox[3], LTE-M[4], Narrowband IoT(NB-IoT)[5], IEEE 802.11ah[6]などが挙げられる。これらはいずれも地理的に大規模なネットワーク構築を実現する技術であり、ノードの低コスト化や省電力化を目標としている。

LPWAN の中でも、LoRaWAN は最も注目されている技術の一つである。その理由として、利用する周波数帯は免許不要で利用可能な 920MHz 帯であることや、通信の仕様やバックエンドなどの規格及び仕様[7]を公開していること

が挙げられる。さらにノードのハードウェア仕様やプログラムの多くはオープンハードウェアやオープンソースコードとして公開されており、現在でも仕様の改定や開発は盛んに行われていることなどから、今度も発展が見込まれる。そこで、本稿では LoRaWAN に着目する。

LoRaWAN が通信可能な距離は都市部では 2km 程度から、見通しが良い場合だと 10km 以上にも及ぶ。しかし、距離が伸びるに伴い、通信ノード数は数千から数万にもなりうる。そのため、各ノードの通信時には、ノード数の増加とともに送信時の衝突が増え、パケット到達率が低下する。LoRaWAN には拡散係数(Spreading Factor: SF)と呼ばれるパラメータがあり、遠距離の場合には高い SF を設定することでメッセージの到達率を高めることができる。より遠距離に対応するため SF の値を大きくすると、必要となる通信時間が著しく増大してしまう。このため、ノード数に対するスケーラビリティ改善に関して様々な研究がなされているが、SF の特徴を踏まえた検討がされていないのが現状である。

本稿では、こうした SF の特徴を踏まえて、送信衝突を抑制し、周波数利用効率の向上、及び消費電力量を抑制しノード寿命を延伸するためのノードのグループ構成法とそれに基づく通信制御方式を提案する。

以降、第 2 章では LoRaWAN の仕組みの概要とその課題を述べ、3 章では関連研究を述べる。4 章では提案方式を述べ、5 章では提案方式の評価実験を述べる。また第 6 章ではその結果を考察し、第 7 章でまとめる。

## 2. LoRaWAN の仕組みと課題

LoRaWAN では、ノードはゲートウェイ (GW) を介してネットワークサーバ (NS) と通信を行う。この仕組みの概要を図 1 に示す。基本的にノードから GW への Uplink 通信が行われ、ノードの制御や情報の収集は NS が行う。ノードの制御には、起動するタイミングの通知やその他 Downlink 通信が必要な制御コマンドの送信などが含まれる。

LoRaWAN は物理層にて LoRa 変調という技術を利用して実現される無線通信技術である。この LoRa 変調は Semtech 社[8]によって開発された無線物理層規格であり、独自の CSS (Chirp Spread Spectrum) 変調方法である。LoRa が伝搬できる範囲と電力消費量は、主に拡散係数である SF, 帯域幅, 符号レート (Coding Rate: CR) により決定される。SF の値が大きいほど送信データレートは大きくなり、より多くの信号を送ることができる一方、送信時間と送信電力が増大する。また、帯域幅の値を大きくすると同時に通信できるデータ量を多く、もしくは同じデータ量を速く送信することができるが、ノイズ耐性には弱くなる。CR は誤り訂正機能を提供する。CR の値を小さくすると、比例してデータサイズが大きくなるため、その分送信にかかる時間も増加する。

LoRaWAN は LoRa Alliance[2]によって開発され、仕様が公開されているオープンプロトコルである。利用する周波数帯は、日本では免許不要で利用可能な 920MHz 帯が利用されている。利用される周波数は、ヨーロッパやアメリカなど、それぞれの国々で異なる。日本では一般社団法人電波産業 (ARIB) がこの周波数帯を利用する機器の通信の仕様などの標準規格を定めている[9]。ここでは、国内の電波事情に従って、送信電力を 13dBm に制限することや、チャンネル幅を 200kHz にすること、送信時間などが定められている。LoRa Alliance は Class という機器のクラスを定義しており、そのクラスは A, B, C の 3 種類に分けられている[7]。その特徴を表 1 にまとめる。クラス A はすべてのノードがサポートしなければならない基本的なクラスであり、最も消費電力は小さい。クラス B はビーコンと呼ばれる GW からの Downlink 通信のためのクラスである。クラス C は常時受信スロットを開くことでメッセージの受信がいつでも可能であるが、常時電力の供給を前提としているクラスである。センサなどの一般的な IoT 用途ではバッテリー動作を前提としており、クラス A が最も利用されると考えられる。

ノードは最も簡単な Pure ALOHA (又は unslotted ALOHA) というメディアアクセス制御に基づいて GW と通信する[7]。この Pure ALOHA では、各ノードが随時自由にメッセージを送信するため、ノード台数の増加に伴い急激に通信衝突が頻発し、メッセージの到達率が低下するというノード数のスケーラビリティの課題がある。また、到達率を高めるため、SF の適

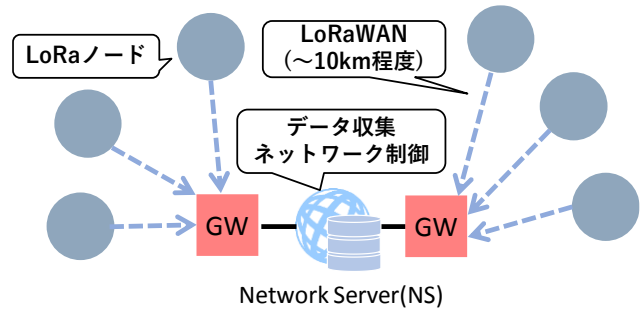


図 1 LoRaWAN の基本的な仕組み

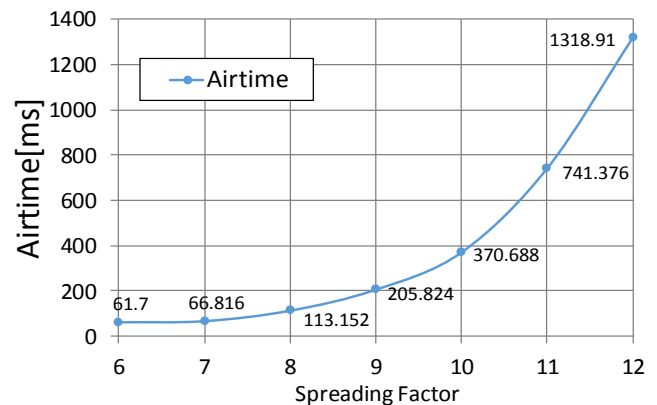


図 2 SF による通信時間の変化

表 1 LoRaWAN の各クラスとその特徴

Class	ノードの動作など	特徴
A	<ul style="list-style-type: none"> <li>全ての機器がサポートする</li> <li>任意のタイミングで Uplink 通信が発生</li> <li>通信時以外はスリープする</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>遅延大</li> <li>消費電力低</li> </ul>
B	<ul style="list-style-type: none"> <li>ビーコン送信のためのクラス</li> <li>ビーコン受信時に受信スロットを開くことが可能</li> <li>ネットワーク主導の通信が可能</li> </ul>	Downlink に対応
C	<ul style="list-style-type: none"> <li>受信スロットを常に開く</li> <li>常時データの送受信が可能</li> <li>常時電力供給可能なノードを想定</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>遅延小</li> <li>消費電力大</li> </ul>

切な値は GW とノード間の距離に応じて変化する。SF の値が大きくなるに伴い、通信時間が著しく増加するといった課題もある。図 2 に文献[10]の LoRa 変調の仕様に基づいて算出した SF による通信時間の変化を示す。これから、距離に応じて SF が大きくなると、通信時間の差が大きくなり、同じデータの送信回数、同じデータサイズの場合でも、送信にかかる時間には大きな差が生じる。この特徴を踏まえたグループ化による送信時間抑制の詳細を 4.2 節にて述べる。

以上から、LoRaWAN にはノード数に対するスケーラビリティと、SF の値によって変化する通信時間が、大きく異なるという課題があるということが分かった。

### 3. 関連研究

2章で述べたように、LoRaWANにはPure ALOHAというメディアアクセス制御が利用されている。こうしたメディアアクセス制御の一つに同一周波数を一定時間（スロット）分割して通信を行う時分割多元接続（TDMA）がある。文献[11]では、Pure ALOHAと比較して、TDMAを利用することによって各ノードの公平性とリソースの割当てが可能であることについて言及している。しかし、LoRaWANでは2章で述べたように、遠方ノードと近距離ノードの通信時間は、SFの設定によって大きく変化するため、全てのスロットを同一の長さ（時間）に設定するTDMAでは、高い通信効率は望めない。またその他のメディアアクセス制御に、通信時にネットワークが空き状態であるか確認するCSMA/CA方式がある。文献[12][13]では、LoRaWANで利用する欧州の周波数帯を定める欧州電気通信標準化機構（ETSI）が規定している、通信時にネットワークが空いていることを確認するLBT（Listen Before Talk）に従うため、CSMA/CA方式の導入を検討していた。しかしCSMA/CA方式ではノード数が増加するに従って、送信衝突が頻発し、結果として送信待機状態が長くなることや、再送回数の増加によって消費電力も増加する。一般的にバッテリーで駆動するノードでは、CSMA/CA方式の改善が必要である。

またLPWANにおいて、消費電力低減やネットワーク効率化のため、様々なグループ化についても検討されている。Dash7という電子タグであるアクティブRFID（Radio Frequency Identifier）を使用する通信プロトコル[14]は、産業向けIoTアプリケーション向けに設計されており、ホップ機能及びグループ化機能が導入されている。しかし、電子タグはLoRaWANのような数kmといった長距離には対応しておらず、またセンサ向けの利用は考えられていない。そのため、その仕組みをLoRaWANに適用するのは困難である。また、NB-IoTにおいて、あるノードの組をグループとし、ノード数、通信サイクルに従って動的に、グループ毎に通信可能時間を割り当て、無駄な通信時間を低減する研究がなされている[15]。しかし、距離などの実際の環境は考慮されておらず、通信到達率についても評価は行われていない。また、一般的なセンサのように、ノードの送信頻度が一樣に同じ条件の場合にはグループ化の有無に影響を受けないため、このグループ化は効果的ではない。さらにLoRaWANにおいても、一定の範囲内に複数のGWを設置し、より効果的にデータ収集するため、ユースケースやパケット送信頻度に基づくグループ化基準が研究されている[16]。しかし、複数GWを設置するため設置コストやその管理コストが増大する。また、ノード数の増加に対するスケラビリティや消費電力の評価は行われていない。

以上から、既存のメディアアクセス制御技術そのままではLoRaWANにおいて最適ではないことが分かり、特にTDMAにおいては時間スロットの割当てに改善の余地が

あることが分かった。さらに、既存のLPWANにおけるグループ化技術においても、LoRaWANの特徴を踏まえたグループ化、及び詳細な評価が必要である。

### 4. 提案方式

#### 4.1 概要

2章末尾で述べたように、LoRaWANにはノード数のスケラビリティ、及びSFによる通信時間が大きく異なるという課題がある。TDMAでは同一周波数を一定時間で分割するのに対し、提案手法では算出した各SFの値で必要となる通信時間に基づいて、同一周波数を異なる時間のスロットへ分割する。これにより、時間スロットの効率的な割り当てを可能にする。さらにSFによる通信時間の変化が顕著であることに着目して、複数ノードをグループ化し、グループ内のノードはGC（Group Coordinator）と呼ぶノードを経由して通信する。この詳細な仕組みは4.2節で述べる。

各グループのサイズ（粒度）は、GWとノードとの距離、ノード数、消費電力量に基づいて決定される。各グループには代表となるGCを一台割り当て、グループ内のノードはGCを経由して通信を行う。GCを含む各ノードは通信時以外においてスリープ状態になり、GC以外のグループ内ノードはGCにデータを転送する。こうして必要な動作のみを行うことで電力消費を抑制する。割当て時間になるとGCがまとめてGWにデータを送信する。

提案方式の概要フローを図3に示す。まず、ノードがGWにネットワーク参加通知を行う。このときの処理はNS上で行われ、グループ化処理を行った後、GCが決定される。決定されたGCへ通信可能時間などの割当て情報の通知を行い、通知はGCを介してグループ内ノードに転送される。各ノードは割り当てられた情報に従って以降の通信を行う。

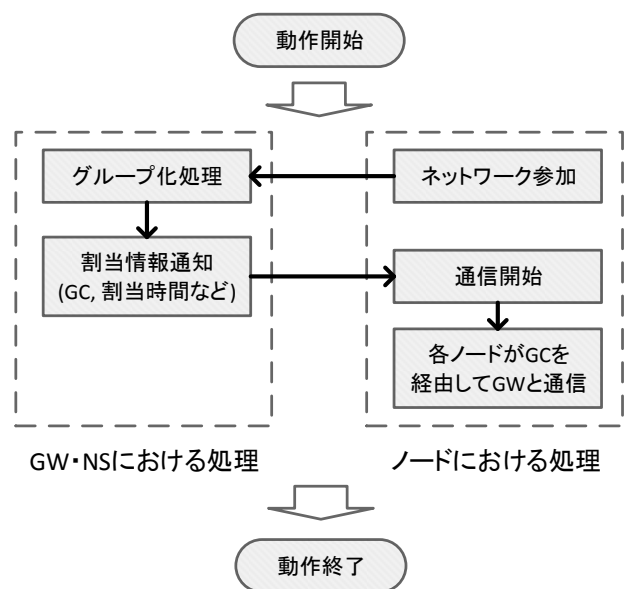


図1 提案手法の概要フロー

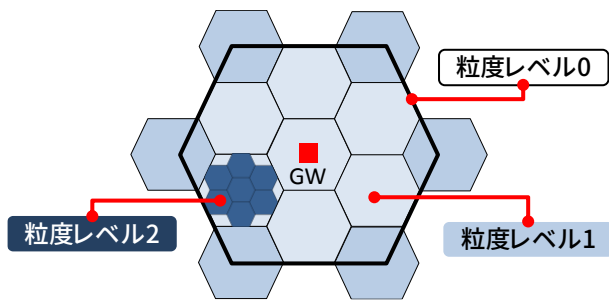


図4 グループ化の概要

#### 4.2 グループ構成法

4.1節で述べたように、各グループのサイズ(粒度)はGWとノードとの距離、ノード数、消費電力量に基づいてNSが決定する。提案方式におけるグループ化の概要を図4示す。図では円形を擬似的に六角グリッドのハニカム構造状に表しており、各六角形が一つのグループであることを示している。グループの粒度をレベルと呼び、このレベルが大きくなると、より小さいグループとなる。また、粒度レベル0はグループ化していない状態を表している。これから、全体を均一的にグループ化した場合のグループ数は、レベル0においては全体でグループ1個、レベル1は7個、レベル2は49個のように、 $7^{\text{level}}$ 個となる。なお、中心に位置するグループは、グループ内ノードがGWと直接通信を行う。そのため、中心のグループはレベル0と同様の動作を行う。

グループの最適なサイズ(粒度)はGWとノードとの距離、ノード数、消費電力量によって異なることが考えられる。そこで提案方式では、粒度レベル1におけるグループ単位で、そうしたトレードオフを考慮し、適切なレベルを決定する。例えば、図4に示しているように、ある範囲のみ粒度レベルは2、その他は粒度レベル1といった場合が考えられる。

グループ化によって、実際に通信時間を短縮しているイメージを図5に示す。図には例として3つのノードを示している。送信時間は図2に示した値を参照した。この場合、従来3つのノードはそれぞれ、SF=11, 10, 9の設定で送信しており、送信時間は合計1318msかかっていた。これらをSF=10の設定で3回、GCがまとめて送信することで、送信時間の合計を15%短縮できている。こうして同一時間に収容するノード数向上を実現する。

##### 4.2.1 消費電力量の計算

グループの粒度レベルの決定には、ネットワークにおける消費電力量の値を考慮に含む。ここでは、その算出に必要な計算式について示す。ネットワーク全体のノードの総消費電力量には送信電力、受信電力、スリープ電力を考慮する。ただし、GWは常時電源に接続されていると考えられるので今回は総消費電力には含まない。このとき消費電力量の計算の式は次式となる。

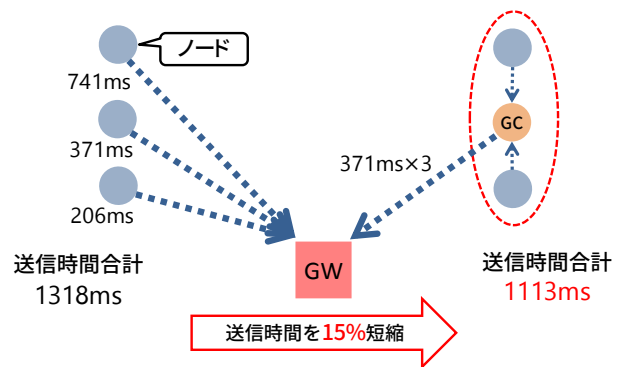


図5 通信時間比較例

$$E = E_t + E_r + E_s \quad (1)$$

$$E = T_t P_t + T_r P_r + T_s P_s \quad (2)$$

(1)の式における $E_t$ ,  $E_r$ ,  $E_s$ はそれぞれ送信、受信、スリープにかかる電力量を表している。(2)は(1)の式を変形した、電力量を時間と電力から求める式である。 $T_t$ は送信にかかる時間、 $P_t$ は送信にかかる電力であり、その積が送信電力量である。なお、送信電力 $P_t$ は送信出力によって変化する。同様に $T_r$ は受信にかかる時間、 $P_r$ は受信電力、 $T_s$ はスリープ時間、 $P_s$ はスリープにかかる電力である。

#### 4.3 通信制御手順

ノードはネットワークに参加後、所属するグループのGCを経由してGWと通信する。本節ではグループ内部、及びGCとGW間の通信制御手順を詳細に述べる。

##### 4.3.1 グループ内通信制御手順

図6にグループ内の通信制御手順を示す。まずノードはネットワーク参加時にGWに対して参加通知を行う。GWは参加通知を受け取ると、NSにデータを転送する。NSは現在のネットワーク状況を把握しており、それらに基づいて最適なグループ構成を決定する。グループ内に代表となるGCを、GWとの距離やバッテリー寿命などを考慮して決定、もしくは手動で設定する。必要な情報を、GCを経由して参加ノードに通知する。この情報には、所属するグループ、グループ内のGC、起動タイミング、通信割当時間、さらにGCの場合はグループ内ノードの起動タイミングが含まれている。グループ内ノードは、以降の通信はGCを経由して行う。また、GCはグループ内ノードの通信時に同タイミングで起動し、GCはグループ内ノードのメッセージの情報を一時的に保持し、割当時間になるとまとめてGWに送信を行う。なお、GWからのDownlink通信にはクラスBビーコンを利用する。

##### 4.3.2 GC-GW間通信制御手順

NSはグループ毎、つまりGC毎にネットワーク状況を考慮した異なる長さの時間スロットを割り当て、GCの起動タイミングを指定することにより、通信制御を行う。割り

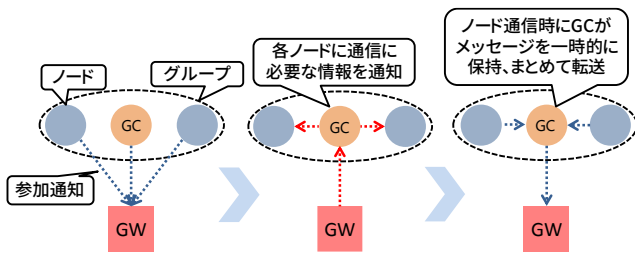


図6 グループ内通信制御手順概要

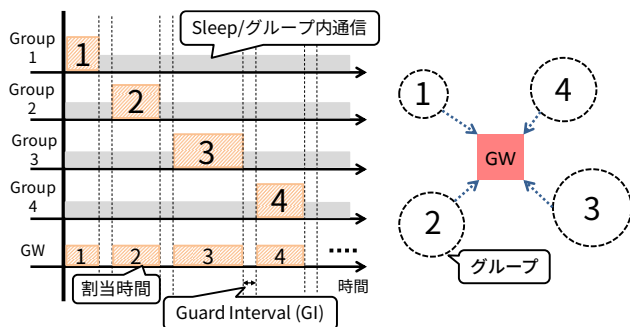


図7 CG-GW間通信制御手順概要

当てる時間スロットの長さは、GW と GC との距離によって求められる最適な SF の値において必要となる送信時間と、グループ内ノード数との積から算出する。GC と GW 間の通信制御手順の概要を図 7 に示す。割り当てる時間スロットの長さはグループ内のノード数、GW との距離に応じて変化し、それぞれのグループの通信時間の間には Guard Interval (GI) という間隔を設け、誤差などの時間のゆらぎをある程度許容できるようにする。十分な時間の GI を設けることで、ノード数が増加した場合でも、同一時間内に収容可能な範囲であれば安定した通信を提供できると考えられる。割り当てる時間が枯渇してしまった場合には通信不可となり、割り当てる全体の時間を増加させる必要がある。つまり、ノードの送信周期を伸ばすことによって、より多くのノードを収容することが必要となる。

## 5. 評価実験と結果

4 章にて述べた提案方式の有効性を評価する。本評価では、通信到達率を評価するため、ネットワークシミュレータ NS-3[17]に LoRaWAN を実装した文献[1]のシミュレータ、及び消費電力量と最大収容数を評価するため新たに作成した自作シミュレータを利用する。NS-3 シミュレータにおいて、周波数などのパラメータを修正し、さらに提案手法を実装するとともに、同一周波数を一定時間(スロット)分割して通信を行う TDMA を実装し比較する。また自作シミュレータへ LoRaWAN のオリジナル手法と提案方式を実装した。

表 2 最大収容数と通信到達率におけるシミュレーションパラメータ

項目	設定値等
マップ	半径 7500m の円状
GW の通信半径	7500m
周波数	920MHz
Bandwidth	125kHz
送信出力	13dBm
Preamble	8 symbols
Coding Rate	4/5
Payload	19byte (ヘッダ, CRC 含む)
SF(Spreading Factor)	7 - 12 (距離で可変)
送信時間	66.816ms - 1318.91ms (SF で可変)
シミュレーション時間	600s (10min.)
TDMA 割当時間	1350ms
Guard Interval	50ms, 100ms, 500ms, 1000ms

表 3 消費電力量におけるシミュレーションパラメータ

項目	設定値等
電圧	3.3V
送信出力	13dBm
送信電力 ( $P_t$ )	115.5mW
受信電力 ( $P_r$ )	35.64mW
スリープ電力 ( $P_s$ )	3.3nW
シミュレーション時間	600s

### 5.1 実験環境

LoRaWAN のオリジナル方式では、GW をマップの中央に一台、さらのノードをランダムに配置し、シミュレーション時間中に任意のタイミングで一度だけメッセージを GW に送信する。比較方式 (TDMA) では、オリジナル方式と同様の配置であることに加え、各ノードそれぞれに一定の時間スロットを割り当て、各ノード毎に起動タイミングを指定する。提案手法では、GW にマップの中央に一台、さらにノードは一様に配置後、シミュレーション時間中に一度だけ、グループ中央に位置が固定された GC を経由してメッセージを GW に送信する。

文献[9][10]、を参考に決定した最大収容数と通信到達率の条件を表 2、消費電力量の計算条件を表 3 に示す。送信電力は送信出力に基づいて算出されている。TDMA 割当時間は、最も大きい送信時間である 1318.91ms 以上となるように今回は 1350ms とした。

### 5.2 最大収容数の比較

最大収容数とは同一時間内に収容できる、もしくは通信可能なノード数の限界を意味している。ある一定の時間(シミュレーション時間)において、ノイズによってパケット

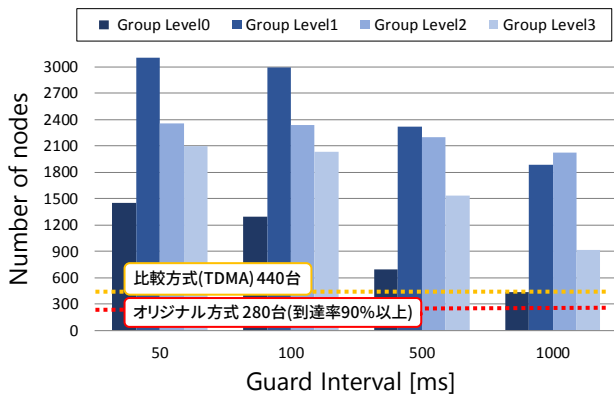


図 8 最大収容数の比較

到達時に復号できないといったチャネルエラーがない場合に、ノードが全体に均一に配置された場合の最大収容数について自作シミュレータを用いて評価を行った。

評価において、この最大収容数は、分割する全体時間、送信にかかる時間、グループ内のノード数と GC と GW の距離、グループ毎に設ける時間間隔 GI に基づいて算出される。簡素化した式を次に示す。

$$T_{whole} > \sum_{g=1}^{N_{Group}} \{ (N_{inGroup} \times T_{GC,Airtime}) + GI \} \quad (3)$$

$$n_{max} = N_{group} \times N_{inGroup} - 1 = N_{ED} - 1 \quad (4)$$

不等式(3)は各グループに割り当てた時間の合計と、ある一定時間を比較している。\$T\_{whole}\$は割り当てる全体時間であり、\$N\_{Group}\$はグループ数、\$N\_{inGroup}\$はグループ内部のノード数、\$T\_{GC,Airtime}\$はGCとGW間の通信時間である。この不等式(3)が真となる場合、式(4)に従って最大収容数が決定される。\$n\_{max}\$は最大収容数、\$N\_{ED}\$はノードの数を表しており、式(3)が真の場合におけるノード数-1が最大収容数となる。

最大収容数についての評価結果を図8に示す。縦軸はノード数、横軸はGIである。また、オリジナル方式は5.3節の通信到達率の結果から引用した。比較結果では、GIがいずれの値の場合においても提案手法はオリジナル方式と比較して最大収容数が大きくなっていることがわかる。さらに、TDMA方式との比較では、提案手法はGI=1,000[ms]の場合に同じ値となっているが、GI=50[ms], 100[ms], 500[ms]の場合はより多くのノードを収容できている。また、提案手法の各レベルを比較すると、レベル0が最も小さく、GI=50[ms], 100[ms], 500[ms]においてはレベル1が最も大きい結果となっている。今回シミュレーション時間は10分であり、この場合誤差などの時間のゆらぎとして500[ms], 1,000[ms]は十分な時間の長さであることから、比較結果から提案手法は十分有効であると言える。GI=500[ms]の場合には最大収容数がオリジナル方式の5.8倍、TDMA方式の3.7倍収容可能であることが確認できる。

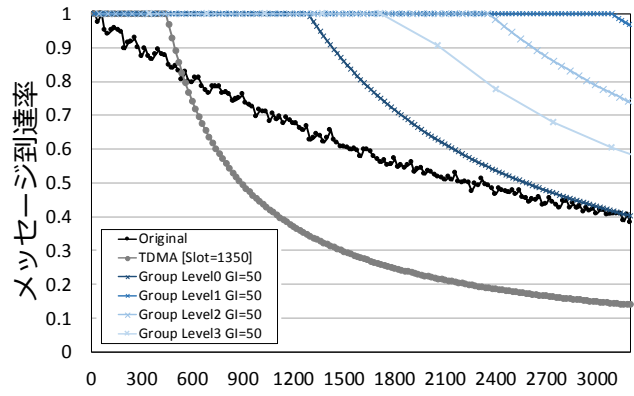


図 9 GI=50[ms]におけるメッセージ到達率の比較

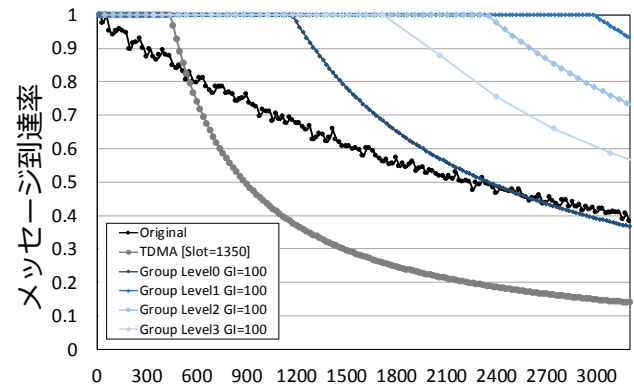


図 10 GI=100[ms]におけるメッセージ到達率の比較

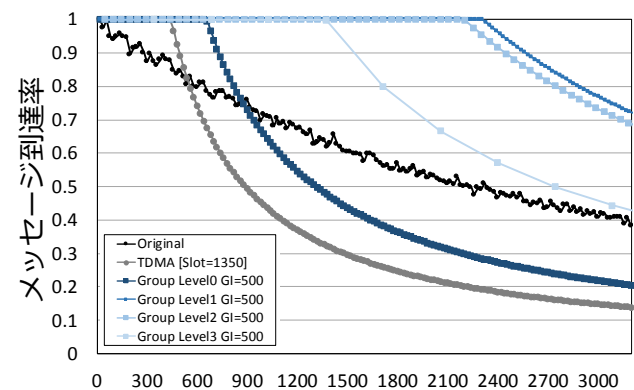


図 11 GI=500[ms]におけるメッセージ到達率の比較

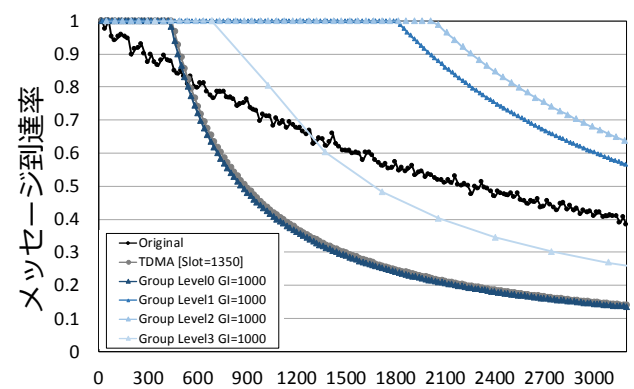


図 12 GI=1,000[ms]におけるメッセージ到達率の比較

### 5.3 通信到達率の評価

シミュレーション時間中に、ノードが全体に均一に配置された場合における、ノードから GW へのメッセージの到達率を評価した。図 9 から図 12 に、提案手法における各粒度レベル及び LoRaWAN のオリジナル方式、TDMA 方式のそれぞれのメッセージ到達率を示す。縦軸がメッセージの到達率、横軸がノード数である。均一にノードを配置し、それぞれ 7<sup>Level</sup> 個のノード以上ずつ増加させて検証した。まず各図に示すオリジナル方式では、多少のばらつきはあるものの、ノード数の増加によってほぼ線形に到達率が減少しており、到達率が 90%以上であるのは 280 台であった。また、TDMA 方式では 440 台までは到達率が 100%であるものの、それ以降は大きく減少していることがわかる。

各比較結果から、いずれの粒度レベル、及びいずれの GI の場合においても、提案オリジナル方式と TDMA 方式よりノード数に伴う到達率 100%の状態のノード数が大きいことが確認できる。図 9 の結果から、オリジナル方式の到達率が 90%以上のノード数が 280 台であるのに対して、粒度レベル 1 では 3,087 台まで到達率が 100%であった。これから、約 11 倍ものノード数を収容できる見込みがあることが確認できた。また図 11 の結果から、十分と考えられる GI=500[ms]の場合でも、提案手法が有効であることが確認できる。このとき、オリジナル方式と比較して、粒度レベル 1 は 8.3 倍、レベル 2 は 7.7 倍、レベル 3 は 3.5 倍、レベル 0 では 2.3 倍のノードの収容可能性があることが分かった。最後に、図 12 の結果では、到達率が 100%であることが確認できるノード数は、レベル 1 よりレベル 2 のほうが大きくなっている。これは図 8 に示した最大収容数の比較結果の GI=1,000[ms]の比較結果において、レベル 2 の収容台数がレベル 1 より大きくなったことが確かめられたことを示す。

### 5.4 消費電力量の評価

グループ化を行い、GC を経由して行う提案手法では、GC における消費電力の増大が考えられる、そこで、オリジナル方式と提案手法粒度レベル 1 から 3 において、ネットワーク全体での消費電力量、及び GC 一台あたりの消費電力量について、自作シミュレータを用いて評価した。この評価は 4.2.1 項で示した計算に基づいて行った。

図 13 にマップ全体に均一にノードが配置された場合において、ノード数の増加に伴うネットワーク全体の消費電力量の変化について評価を行った結果を示す。5.3 節の通信到達率の評価と同様、均一に配置するため 7<sup>Level</sup> 個以上のノード数について評価している。結果から、いずれもノード数の増加に伴い線形的に消費電力量が増加しているものの、その傾きにはわずかに差があることが確認できる。これからノード数によって消費電力量が最適となる提案手法の粒度レベルが存在する見込みがあることが確認できた。また、

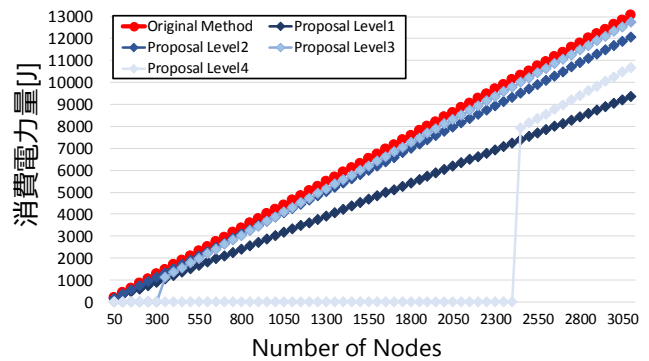


図 13 ノード数増加に伴うネットワーク全体の消費電力量の変化

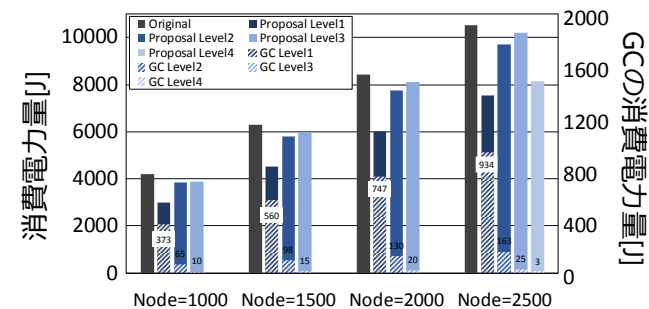


図 14 特定のノード数におけるネットワーク全体の消費電力量と GC 一台あたりの消費電力量の比較

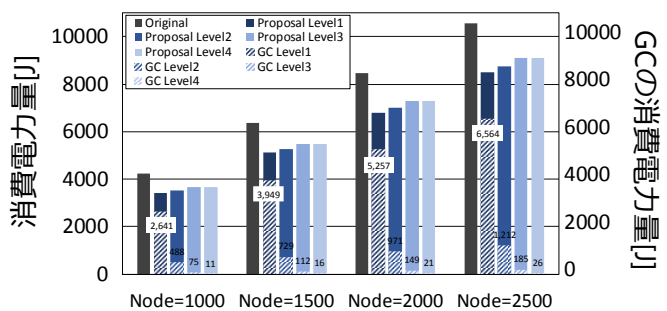


図 15 粒度レベル 1 の 1 つのグループにおける消費電力量と GC 一台あたりの消費電力量の比較

ネットワーク全体の消費電力量は提案手法の粒度レベル 1 が最も低くなったことが確認できる。また、粒度レベル 3 はオリジナル方式に近い消費電力となった。

図 13 の結果のうち、ノード数が 1,000, 1,500, 2,000, 2,500 の場合における全体の消費電力量と、それぞれの場合における GC 一台あたりの消費電力量の比較について図 14 に示す。GC 一台あたりの消費電力は右の縦軸であり、網掛けの棒グラフで示している。Node=2500 において、全体においてオリジナル手法より平均 15.5%抑えることができていた。また、粒度レベル 1 において、より抑えられていることが確認できる。しかし GC 一台あたりの消費電力量に着目すると、粒度レベル 1 が最も多くなっている。粒度レベルが大きくなると、GC 一台あたりの消費電力量は大幅に減少することが確認できる。

次に、全体に均一にノードが配置されない場合に対応す

るため、粒度レベル1における周囲6つのグループのうち1つの範囲に限定して消費電力量の評価を行った。その結果のうち、ノード数が1,000, 1,500, 2,000, 2,500にける評価結果、及びそれぞれの場合におけるGC一台あたりの消費電力量の評価結果を図14に示す。図13の結果と比較して、粒度レベル1とオリジナル手法の消費電力量の差は小さいものの、同様に粒度レベル1が最も小さくなっている。また、GC一台あたりの消費電力量は図13の結果と近い傾向が見られた。

## 6. 考察

図8に示した最大収容数の比較結果から、提案手法の粒度レベル1が最も収容できているが、GIが増加するに伴い収容できる数が大幅に減少している。これはGWと直接通信する中心のグループのノード数それぞれにGIを割り当てることから、GIの値が大きくなるに比例して収容数が大幅に減少してしまうことが原因だと考えられる。これから、レベル0は各ノードにGIを割り当てるため、最大収容数が最も小さくなっていると考えられる。同様にGCの数が多粒度レベル4の最大収容数は他の粒度レベルと比較して小さくなっている。さらに、GI=1,000[ms]ではレベル2の収容数がレベル1より大きくなっている。これは中心のグループはGWと直接通信するため、GIとノードに比例して消費する時間が大きくなるためだと考えられる。

メッセージ到達率について評価を行った図9から図12の結果から、グループ間にGIを設けることで十分に到達率が確保できていることが確認できた。提案手法の粒度レベル2が最もGIの影響が小さく、それ以外の粒度レベルでは影響が大きいことが読み取れた。これは、粒度レベル2は他の粒度レベルと比較してGIを割り当てるノード数が小さいことが原因だと考えられる。これは、粒度レベル1では中心となるGWと直接通信を行うグループ内のノード数が、粒度レベル3では全体のGCの数が大きくなるためだと考えられる。

さらに消費電力量の評価結果から、ネットワーク全体の消費電力量は、提案手法の各粒度レベルで抑えられることを示した。採用する粒度レベルの決定にはネットワーク全体の消費電力量とGC一台あたりの消費電力量のトレードオフを考慮することで、より効果的にグループ化可能であることが分かった。これから、ネットワーク全体のエネルギー効率を向上できることを示した。

## 7. まとめと今後の課題

本稿では、LoRaWANのネットワークの効率化を実現するため、ノードのグループ化に基づく新たなグループ構成法とその通信制御方式を提案し、実際にグループ化のサイズ(粒度)に伴う最大収容数、ノード数の増加に伴うメッセージの到達率と消費電力量について評価を行った。

最大収容数はLoRaWANのオリジナル方式と比較して、提案手法はGI=500[ms]の場合に5.8倍の収容可能性があることを示した。また、メッセージ到達率の評価結果から安定した通信の実現と、GI=50[ms]においては最大8.3倍もの収容可能性があることを示した。これから、同一周波数におけるネットワーク利用の効率化の実現可能であることを示した。さらに消費電力量の評価結果から、ネットワーク全体の消費電力量を平均15.5%抑制できることを示した。採用する粒度レベルの決定にはネットワーク全体の消費電力量とGC一台あたりの消費電力量のトレードオフを考慮することで、より効果的にグループ化可能であることが分かった。これから、ネットワーク全体のエネルギー効率を向上できることを示した。

今後は、ノードが均一に存在しない場合や、動的に端末の配置が変化する場合の評価を行っていく予定である。

## 参考文献

- [1] U. Raza, P. Kulkarni, M. Sooriyabandara, "Low Power Wide Area Networks: An Overview," IEEE Communications Surveys & Tutorials 19.2, pp.855-873, Jan. 2017.
- [2] LoRaAlliance™, <https://lora-alliance.org> (2018.09.27 現在).
- [3] Sigfox, <https://www.sigfox.com/> (2018.09.27 現在).
- [4] Nokia, "LTE - M: Optimizing LTE for the Internet of Things," 2015
- [5] Rapeepat Ratasuk, Benny Vejlgaard, Nitin Mangalvedhe, Amitava Ghosh, "NB-IoT system for M2M communication," WCNC, pp.1-5, Apr. 2016.
- [6] Weiping Sun, Munhwan Choi, Sunghyun Choi, "IEEE 802.11 ah: A long range 802.11 WLAN at sub 1 GHz," Journal of ICT Standardization 1.1 (2013), pp.83-108, May 2013.
- [7] LoRaAlliance™, LoRaWAN™ Specification V1.1, <https://lora-alliance.org/resource-hub/lorawantm-specification-v11>(2018.09.27 現在).
- [8] SEMETECH Corp., <https://www.semtech.com/>(2018.10.02 現在).
- [9] 一般社団法人 電波産業会 ARIB, 標準規格の入手について (STD-T108), [https://www.arib.or.jp/kikaku/kikaku\\_tushin/std-t108.html](https://www.arib.or.jp/kikaku/kikaku_tushin/std-t108.html)(2018.10.02 現在)
- [10] Semetech SX1261-SX1262 Product Datasheet, Semtech, 2017, [https://www.semtech.com/uploads/documents/DS\\_SX1261-2\\_V1.1.pdf](https://www.semtech.com/uploads/documents/DS_SX1261-2_V1.1.pdf) (2018.10.03 現在)
- [11] Ferran Adelantado, Xavier Vilajosana, Pere Tuset-Peiro, Borja Martinez, Joan Melia-Segui, Thomas Watteyne, "Understanding the limits of LoRaWAN," IEEE Communications magazine 55.9, pp.34-40, 2017.
- [12] Congduc Pham, "Investigating and experimenting CSMA channel access mechanisms for LoRa IoT networks," WCNC, 2018.
- [13] Thanh-Hai To, Andrzej Duda, "Simulation of LoRa in NS-3: Improving LoRa Performance with CSMA," IEEE ICC, 2018.
- [14] DASH7™ Alliance, <http://www.dash7-alliance.org>(2018.10.18 現在)
- [15] Xu, Shaoyi, Yang Liu, Weiliang Zhang, "Grouping-Based Discontinuous Reception for Massive Narrowband Internet of Things Systems," IEEE IoT Journal, pp.1561-1571, Jun. 2018.
- [16] Feltrin L, Buratti C, Vinciarelli E, De Bonis R, Verdone, "LoRaWAN: Evaluation of Link-and System-Level Performance," IEEE IoT Journal, Apr. 2018.
- [17] nsnam, ns-3 Network Simulator, <https://www.nsnam.org/>(2018.10.23 現在)
- [18] D. Magrin, M. Centenaro and L. Vangelista, "Performance evaluation of LoRa networks in a smart city scenario," IEEE ICC, Paris, 2017.