

# エネルギーハーベスティングを考慮した養殖魚モニタリング環境下における 情報転送方式の評価

## Evaluation of data forwarding methods for fish farm monitoring system with energy harvesting

小村 巧<sup>†</sup>谷口 義明<sup>‡,§</sup>

Takumi Komura

Yoshiaki Taniguchi

### 1. はじめに

近年、IoT (Internet of Things) 技術及びセンサネットワーク技術を養殖業・農業・畜産業などの第一次産業に応用する検討が盛んに行われている。例えば、農業では、安価で設置や使用が容易な、センサを搭載した小型モニタリングロボットを圃場に多数設置することで、温度・湿度・日照量などの情報をリアルタイムにモニタリングし、その情報を元に様々な作業を行うシステムが検討されている [1]。また、畜産業では、繁殖期の雄牛と他の雄牛の接近をセンサが検知した際に、自律的に適切な刺激を与えることで、雄牛同士の争いを防止する検討が行われている [2]。

我々の研究グループでは、養殖魚に取り付けることができるセンサ端末が将来的に低価格に普及することを想定し、養殖魚に装着したセンサから情報を収集する養殖魚モニタリングシステムを検討している [3-6]。養殖魚モニタリングシステムでは、生簀の中の全てあるいは一部の魚にセンサ端末が装着される。センサ端末で計測された情報は一度シンク端末に収集され、その後携帯電話網などを介してモニタリングサーバに送信される。この養殖魚モニタリングシステムにおいて、養殖魚は出荷までの数年間は生簀の中で生育される。養殖魚に取り付けられたセンサ端末が動作する際の電力は、センサ端末に取り付けられたバッテリーに依存している。バッテリーの残量が尽きた場合は、養殖魚のモニタリングを行うことが不可能になるため、バッテリーを交換する必要がある。しかし、交換にかかるコストの問題や交換を行う際に魚体が損傷する可能性があることから、センサ端末のバッテリーを交換することは望ましくない。そのため、センサ端末に取り付けられたバッテリーの長寿命化が重要な課題となっている。

本研究の目的は、養殖魚モニタリングシステムにエネルギーハーベスティングによる発電を導入することで、養殖魚に取り付けられたセンサ端末のバッテリーを充電できるようにし、センサ端末の長寿命化を狙うことである。発電素子としては、魚が遊泳する際に生じる振動をエネルギーに変換する振動発電機を想定する [7]。これにより、センサ端末のバッテリーを充電できるようになり、センサ端末及び養殖魚モニタリングシステム自

体の長寿命化が可能となると考えられる。本報告では、エネルギーハーベスティングによる発電を養殖魚モニタリングシステムに導入した場合のシステムの特性及び性能をコンピュータシミュレーションにて評価する。

以降の本稿の構成を以下に示す。第 2 章では、本研究に関する研究について記述する。第 3 章では、我々の研究グループで検討している養殖魚モニタリングシステムについて説明を行う。第 4 章では、本研究のコンピュータシミュレーションによって得られた、養殖魚モニタリングシステムの特性的評価結果について説明を行う。最後に、第 5 章では、本研究の結論及び今後の課題について述べる。

### 2. 関連研究

#### 2.1 魚類に取り付けるセンサ

バイオリギングなどの分野では魚類にデータロガーなどのセンサを取り付ける場合がある。これらの分野では野生生物の生態を明らかにすることが目的であり、センサを野生の魚類に取り付けることを想定している。ここで、小型端末で水中長距離通信と長寿命性を両立することは困難である。そのため、基本的に収集したデータは内部のストレージに保存されることが想定されており、水中通信機能を備えているものはない。データロガーは、後日、回収することが想定されている。一部の製品においては、センシング期間終了後に水上に浮上し、浮上後に無線を使った通信により自身の位置を知らせるものもある。

魚類の位置を測定し追跡するための、定期的に超音波信号を送信するピンガーと呼ばれる機器 [8] もある。ただし、この機器が送信する超音波信号は、ピンガーの位置を測定するためのものであり、通信を行うためのものではない。このピンガーは水中重量 1.6 g で電池寿命は 12 ヶ月である。水中で 500 m 程度、超音波信号を届けることができる。

#### 2.2 養殖魚モニタリングシステム

我々の研究グループでは、リアルタイムに養殖場内の魚からセンサ情報を収集する養殖魚モニタリングシステムに関する研究を行ってきた。文献 [3-5] では、水中音響通信技術を想定した養殖魚モニタリングシステムのための情報収集手法を提案している。具体的には、文献 [3] では、各センサ端末が、自己組織的な振る舞いにより自身のセンサ情報送信タイミングを決定するシングルホップ型のセンサ情報収集手法を提案している。この手法は、ノードの削除や追加などに対する環境変動に適用することが確認されている。また、文献 [4] では、制御パケットを用いることなくセンサ端末からシンク端末にシングルホップでセンサ情報を収集する手法を提案している。この手法は、制御パケットを使用しないことから、低価格化、低消費電力化

<sup>†</sup> 近畿大学大学院総合理工学研究科, Graduate School of Science and Engineering, Kindai University

<sup>‡</sup> 近畿大学理工学部情報学科, Faculty of Science and Engineering, Kindai University

<sup>§</sup> 近畿大学情報学研究所, Cyber Informatics Research Institute, Kindai University

が期待されている。さらに、文献 [5] では、通信距離が短い場合を想定し、マルチホップ型の情報収集手法を検討している。この手法は、魚が群れて移動することを利用した手法となっている。本研究では、この文献と同様の環境のシステムにエネルギーハーベスティングを導入することを検討する。

文献 [6] では、さらなる消費電力低減のために、センサ端末に取り付けた LED と生簀下部に設置した全方位カメラを用いた可視光通信によりセンサ情報を収集する手法を提案している。センサ端末には情報通信として LED のみを取り付けることを想定しているため、センサ情報の送信しかできないが、LED の消費電力は小さいことから、消費電力が大幅に抑えられると考えられる。また、カメラは複数のセンサ端末の LED を同時に撮影できることから、センサ端末同士で CSMA/CA のような多元接続制御を行う必要がなく、制御にかかわるオーバヘッドも抑えられることが期待される。

### 2.3 水中エネルギーハーベスティング

水中生物に取り付けた端末をエネルギーハーベスティングで得た電力にて動作させることを検討している研究は複数ある [7,9]。文献 [7] では、振動発電機を用いたデータロガーシステムのプロトタイプを開発し、外部電源の一つとして水生動物の振動エネルギーを利用することの可能性を検討している。この文献では、ブリの尾鰭に振動発電機を取り付け、尾鰭の振動を利用した発電を行うことで、3 軸加速度センサ、圧力・温度センサを搭載したデータロガーを動作させることを検討している。この文献で開発している振動発電機はおおよそ直径 14 mm、長さ 50 mm、重さ 16 g であり、実験ではこの振動発電機を 59.4 cm、2.5 kg のブリに取り付けている。

文献 [9] では、河川の窒素量を測定するために淡水のムール貝をセンサとして利用する検討が行われている。この文献では、ムール貝に取り付けた、ホールセンサ、小型無線機、マイクロコントローラを動作させる電力を、ガルバニック腐食を利用した発電で得ている。

## 3. 養殖魚モニタリングシステム

本章では、本研究で想定するシステムについて述べる。

### 3.1 生簀環境

本研究で想定する養殖魚モニタリングシステムの概要を図 1 に示す。本研究では 1 つの生簀を想定する。なお、マグロなどの養殖では、円柱状または直方体の生簀が用いられる。生簀の中には多数の養殖魚が回遊しており、そのうち  $N$  匹の個体にセンサ端末が装着されるものとする。また、生簀には 1 台あるいは数台のシンク端末が設置されるものとする。

### 3.2 センシングと通信モデル

センサ端末におけるセンシング周期を  $T$  とし、センサ端末は  $T$  秒ごとにセンサ情報を生成、送信する。センシングに必要な消費電流を  $I_{sensor}$  mA とする。

センサ端末には音響通信モジュールが装着されており、半径  $d$  m の範囲内に存在する他のセンサ端末及びシンク端末と通信が可能である。センサ端末がデータを送信する場合の消費電流を  $I_{trans}$  mA、受信する場合の消費電流を  $I_{recv}$  mA とする。センサ端末が他の端末に情報を送信する前及びセンサ端末が他のセンサ端末から情報を受信した後はセンサ情報に対し処理

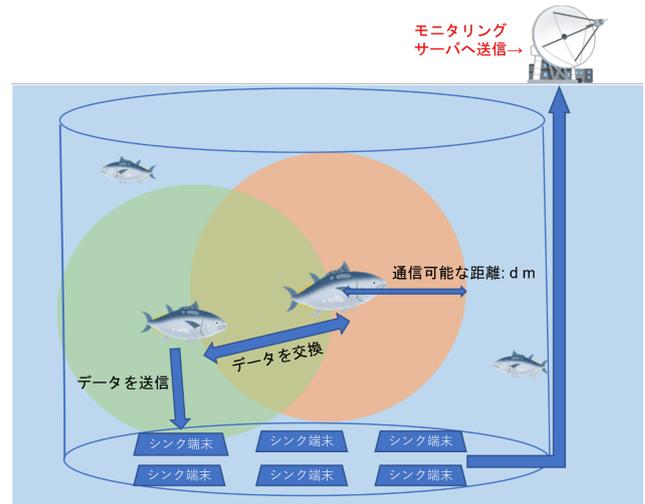


図 1 養殖魚モニタリングシステム

を行う。この処理にかかる消費電流は  $I_{processing}$  mA とする。なお、送信も受信もしていないときのセンサ端末の待機時の消費電流を  $I_{idle}$  mA とする。センサ端末の通信範囲内にシンク端末が存在する場合、センサ端末からシンク端末へとセンサ情報を送信することが可能である。シンク端末に集められたセンサ情報は、携帯回線などを利用しモニタリングサーバへ送信される。なお、ネットワーク中を流れるセンサ情報には寿命があり、端末が生成されてから  $T_{TTL}$  秒以上経過したセンサ情報を保持する場合、破棄するものとする。

### 3.3 バッテリーとエネルギーハーベスティングモデル

センサ端末にはバッテリー容量  $A_{max}$  mAh のバッテリーと  $H$  台の振動発電機が取り付けられているものとする。バッテリーはあらかじめ満充電されているものとする。前節で述べたように、センサ端末の処理に応じてバッテリー電力が消費されるバッテリー残量が尽きた場合、センサ端末は動作を停止する。

また、魚の移動速度に応じて振動発電機が発電しバッテリーを充電する。振動発電機発電量は、文献 [7,10] を参考に、 $1.08Hv_i$  mA/s とする。ここで、 $v_i$  はセンサ端末  $i$  の速さである。停止中のセンサ端末は、エネルギーハーベスティングによる発電によりバッテリー残量が  $X$  % 以上になった場合、動作を再開する。

## 4. シミュレーションによる評価

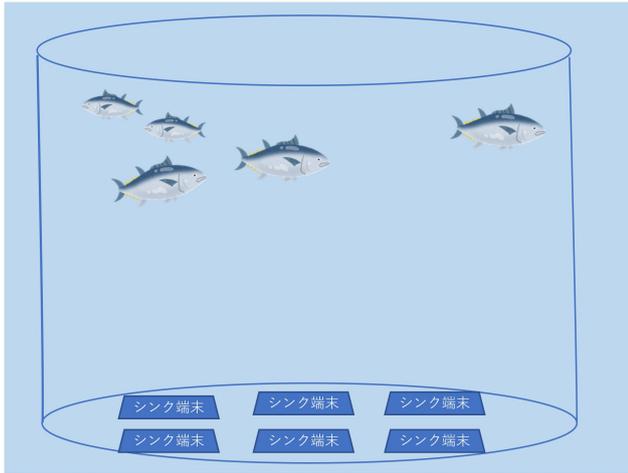
本章では、コンピュータシミュレーションによる評価について記述する。

### 4.1 評価条件

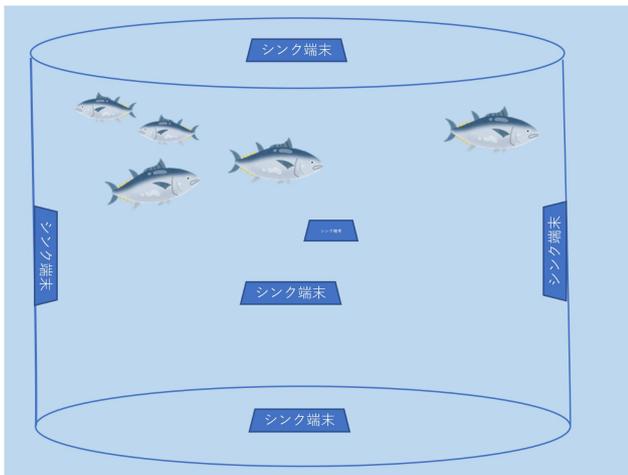
#### 4.1.1 生簀環境

本研究では、生簀の形状を半径 15 m、深さ 10 m の円柱状とした。センサ端末を装着する養殖魚の数を  $N = 100$  とした。また、シミュレーションにおける魚の移動モデルとしては、群れを形成する動物の動きを再現することができる Boids モデル [11] を用いる。本シミュレーションでの魚の移動速度  $v_i$  は、おおよそ 0.05 m/s から 3 m/s の間である。

本研究では図 2 のように生簀に 6 台のシンク端末が設置されるものとした。ここで、図 2(a) のように生簀の底部に均等に 6 台のシンク端末が設置されているパターンを B6 パター



(a) B6 パターン



(b) S6 パターン

図2 シンク端末の配置

表1 シミュレーションで使った消費電流の値

センサ端末が電力を消費する項目	消費電流 (mA)
待機電流 $I_{idle}$	0.01
データ処理 $I_{processing}$	1
センサ情報生成 $I_{sensor}$	0.48
データ受信 $I_{recv}$	0.05
データ送信 $I_{trans}$	0.45

ン、図2(b)のように円柱状の生簀に外接する長方体の各面中央にシンク端末が配置されているパターンをS6パターンと表記する。

#### 4.1.2 消費電力

表1は、本研究で行ったコンピュータシミュレーションで用いた消費電流の値をまとめた表である。送信も受信もしていない場合に消費される待機電流  $I_{idle}$  は0.01 mAとした。通信の前後に行う処理によって消費する電流  $I_{processing}$  はマイコン [12] を参考に1 mAとした。センサ情報を生成する際に消費される電流  $I_{sensor}$  は市販センサ [13] を参考に0.48 mAとした。他のセンサ端末からセンサ情報を受信するための消費電流  $I_{recv}$  は0.05 mAとし、他の端末にセンサ情報を送信

するための消費電流  $I_{trans}$  は水中トランシーバ [14] を参考に0.45 mAとした。なお、本研究では、簡単のため、データの処理、センサ情報生成、データの受信、送信にかかる時間をすべて0.5秒とした。また、バッテリー残量が尽きてから再開するまでに必要なバッテリー残量を  $X = 50\%$  とした。

#### 4.1.3 情報転送方式

本研究では養殖魚モニタリングシステムにおけるエネルギーハーベスティングの導入の基本的特性を評価するため、DTN (Delay/Disruption Tolerant Networking) のルーティング手法として最も単純な感染型ルーティング [15] および感染型ルーティングを少し変更した手法 [16] を用いる。

##### ● 全交換方式

感染型ルーティングと同じく、2つ端末が互いの通信範囲内に接近した時、端末が互いの通信範囲内に接近するとセンサ情報を交換する。全交換方式では通信範囲内に接近したすべての端末にセンサ情報を渡すため消費電力が増大すると考えられる。そのため、センサ情報の転送先を制限する以下の3つの方式を用いた場合の評価も行う。

##### ● 上部配送方式

2つ端末が互いの通信範囲内に接近した時、生簀内でより下に位置する端末が上に位置する端末に対してセンサ情報を送信する。

##### ● 下部配送方式

2つ端末が互いの通信範囲内に接近した時、生簀内でより上に位置する端末が下に位置する端末に対してセンサ情報を送信する。

##### ● ランダム配送方式

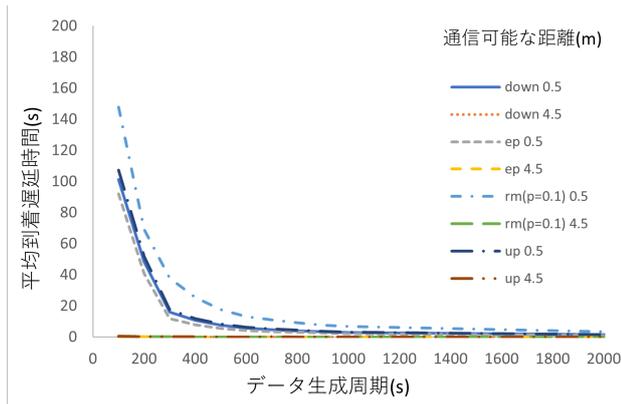
2つ端末が互いの通信範囲内に接近した時、確率  $P$  でセンサ情報を送信する。本研究では、確率を  $P = 0.1$  とした。

これらの情報転送方式を利用し、センサ端末間で情報の受け渡しを行う際、受け渡しを行う前にセンサ端末は自身が保持しているセンサ情報のダイジェスト情報の交換を行う。ダイジェスト情報は、センサ端末が保持しているセンサ情報のIDを想定する。受信したダイジェスト情報を元に、保持しているセンサ情報の中から送信対象を選択し送信を行う。このようにすることで送信されるセンサ情報の量を減らすことができる。また、シンク端末によりセンサ情報が収集された際には到達証明書を発行する。到達証明書は、センサ情報と同じ様にセンサ端末間で交換される。到達証明書を受信したセンサ端末は、対応しているセンサ情報をバッファに保持している場合、バッファから削除する。

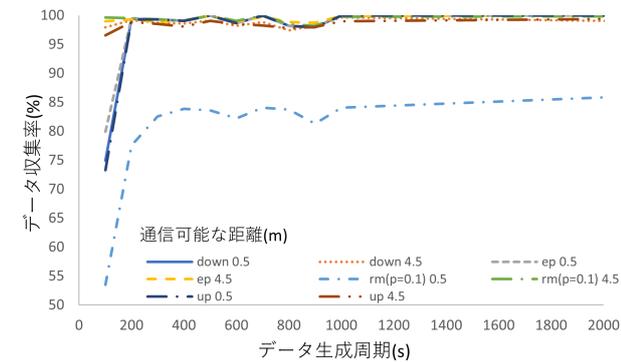
#### 4.1.4 評価指標

評価指標としては、データ収集率、平均到着遅延時間、総消費電力量の3種類を用いた。データ収集率は、センサ端末によって生成された全てのセンサ情報に対する、シンク端末によって収集されたセンサ情報数の割合である。平均到着遅延時間は、センサ情報がシンク端末に到着するまでに要した時間の平均値である。総消費電力量はすべてのセンサ端末が消費した電力量の合計値である。

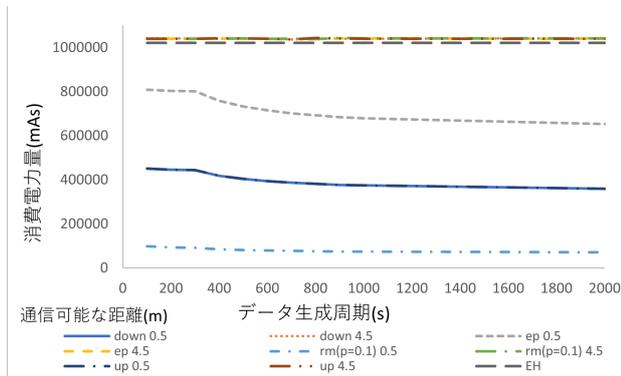
上記の条件で1ステップ0.5秒のシミュレーションを43200秒間行った。以降の結果は100回のシミュレーションの平均



(a) 平均到着遅延時間

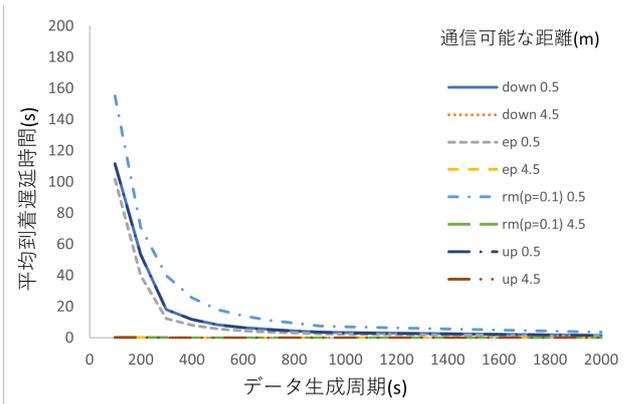


(b) データ収集率

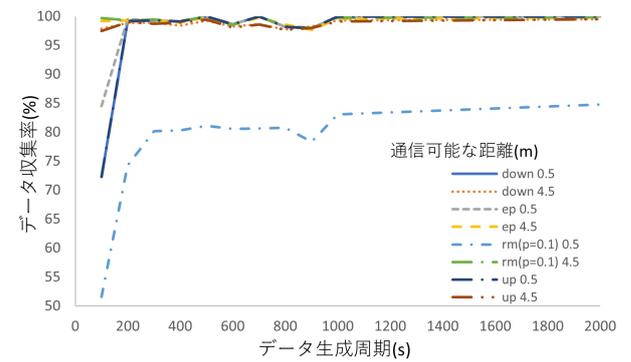


(c) 総消費電力量

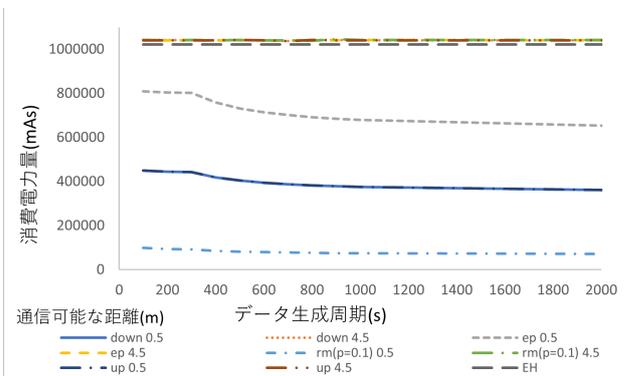
図3 シンク端末配置がB6パターンの時にデータ生成周期を変化させたときの評価結果



(a) 平均到着遅延時間



(b) データ収集率



(c) 総消費電力量

図4 シンク端末配置がS6パターンの時にデータ生成周期を変化させたときの評価結果

である。

## 4.2 シミュレーション結果

### 4.2.1 データ生成周期を変化させたときの評価

本節では、センサ情報を生成する周期  $T$  を 100 秒から 2000 秒の範囲で変化させた場合のシミュレーション結果を示す。センサ端末に搭載するバッテリー容量は水中トランシーバ [14] を参考に  $A_{max} = 560$  mAh とした。また、予備実験により生成されたセンサ情報が破棄されるまでの時間を様々に変えた場合の評価を行い、 $T_{TTL}$  を 300 秒以上に設定してもデータ収集性能に影響がなかったことから、 $T_{TTL} = 300$  秒とした。振動発電機の数  $H = 1$  台とした。

図3はシンク配置パターンがB6の場合に、図4はシンク配

置パターンがS6の場合に、データ生成周期を変化させたときの平均到着遅延時間、データ収集率、総消費電力量のグラフである。通信可能な距離が短い場合（通信可能距離  $d = 0.5$  m）と、ある程度長い場合（通信可能距離  $d = 5.0$  m）に各情報転送方式を利用した場合の結果を示している。

図3(a)、図4(a)より、各情報転送方式を比べた場合、平均到着遅延時間が最も大きい情報転送方式は、シンク端末の配置によらず、通信可能距離が短い場合のランダム配送方式であった。これは、通信可能距離が短い場合はセンサ情報の受け渡しを行う相手が少なくなるため、および、ランダム配送方式ではセンサ情報の受け渡しを行う場合は確率  $P$  で送信の可否を決定するため、通信候補に接近した場合においてもセンサ情報

の受け渡しを行うとは限らないためである。

一方、平均到着遅延時間が最も小さい情報転送方式は、通信可能な距離が長い場合の下部配送方式であった。下部配送方式は、生簀内でより上に位置する端末が下に位置する端末に対してセンサ情報を送信するため、シンク端末が設置されている生簀の下部の近傍に存在するセンサ端末にセンサ情報が集まりやすいからであると考えられる。

図 3(b)、図 4(b) より、各情報転送方式を比較した場合、最もデータ収集率が低かった情報転送方式は通信可能な距離が短い場合のランダム配送方式であった。また、他の情報転送方式においても通信可能な距離が短い場合かつデータ生成周期が  $T = 200$  秒以下の場合データ収集率が低くなった。これは、データ生成周期が短い場合はセンサ情報の通信を行う回数が増加し、バッテリーが枯渇することにより動作を停止するセンサ端末が増加するため、センサ情報の受け渡しが不可能になるからであると考えられる。

一方、データ生成周期が 1000 秒以上の場合で、最もデータ収集率が高かった情報転送方式は、通信可能な距離が短い場合の全交換方式、下部配送方式、上部配送方式であった。これは、データ生成周期が長くなるほど生成されたセンサ情報の種類が少なくなるため、通信可能な距離が短い場合においても、少ない回数の受け渡しでデータを収集することができるためである。また、通信可能な距離が短い場合は通信可能な距離が長い場合と比べ、通信の対象となるセンサ端末の数が少なくなるため、センサ端末間の通信によるバッテリーの枯渇により動作が停止してしまうことが少なくなるためでもある。

図 3(c)、図 4(c) に全体の総消費電力量を示す。図中、EH はエネルギーハーベスティングにより得られた電力量の総量である。センサ端末において最も電力量を消費する動作はセンサ情報を送信することである。そのため、通信可能な距離が短い場合にはセンサ情報の送信を行う回数が少ないため、エネルギーハーベスティングにより得られた電力量の総量よりも消費された電力量が少なくなっている。また、通信可能な距離が長い場合においてはエネルギーハーベスティングにより得られた電力量の総量よりも消費された電力量が多くなっている。本シミュレーションでは、初期状態においてバッテリーが満充電であることを想定しているため、その分、消費電力量の方が大きくなる。

#### 4.2.2 バッテリー容量を変化させたときの評価

本節では、バッテリー容量  $A_{\max}$  を 10 mAh から 1000 mAh に変化させたときのシミュレーション結果を示す。生成されたセンサ情報が破棄されるまでの時間を  $T_{\text{TTL}} = 300$  秒とし、センサ情報が生成される周期は  $T = 1800$  秒とした。

図 5 はシンク配置パターンが B6 の場合に、図 6 はシンク配置パターンが S6 の場合に、バッテリー容量を変化させたときの平均到着遅延時間、データ収集率、総消費電力量のグラフである。通信可能な距離が短い場合（通信可能距離  $d = 0.5$  m）と、ある程度長い場合（通信可能距離  $d = 5.0$  m）に各情報転送方式を利用した場合の結果を示している。

図 5(a)、図 6(a) より、各情報転送方式を比べた場合、平均到着遅延時間が最も大きい情報転送方式は、通信可能な距離が短い場合のランダム配送方式であった。これは、通信可能な距離が短い場合は、センサ情報の受け渡しを行う相手が少なくなるた

めであると考えられる。一方、平均到着遅延時間が最も小さい情報転送方式は、通信可能距離が長い場合の全交換方式であった。これは、全交換方式ではセンサ情報を通信可能な距離内に存在する全てのセンサ端末に送信するため、シンク端末がセンサ情報を収集できる機会が多くなるためである。

また、図 5(a)、図 6(a) より、どの方式でもバッテリー容量が大きくなるほど平均到着遅延時間が小さくなることからわかる。これは、バッテリー容量が小さい場合はバッテリー容量が大きい場合と比べ、センサ端末のバッテリーが枯渇しやすいためである。さらに、シンク配置パターンが S6 パターンの場合と B6 パターンの場合を比較した場合、S6 パターンの場合の方が平均到着遅延時間が短くなっている。これは、S6 パターンにおいてシンク端末は円柱状の生簀に外接する直方体の各面中央に配置されているため、B6 パターンと比べセンサ情報の収集が容易であることが理由として考えられる。

図 5(b)、図 6(b) より、各情報転送方式を比較した場合、最もデータ収集率が低かった情報転送方式は通信可能な距離が短い場合のランダム配送方式であった。これは、通信可能な距離が短い場合はセンサ情報の受け渡しを行う相手が少なくなるため、および、ランダム配送方式ではセンサ情報の受け渡しを行う場合は確率  $P$  で送信の可否を決定するため、通信候補に接近した場合においてもセンサ情報の受け渡しを行うとは限らないためである。一方、最もデータ収集率が高かった情報転送方式は全交換方式である。これは、全交換方式ではセンサ情報を通信可能な距離内に存在する全てのセンサ端末に送信するため、シンク端末がセンサ情報を収集できる機会が多くなるためである。

図 5(c)、図 6(c) に全体の総消費電力量を示す。前節の結果と同様に、通信可能な距離が短い場合にはセンサ情報の送信を行う回数が少ないため、エネルギーハーベスティングにより得られた電力量の総量よりも消費された電力量が少なくなっている。また、バッテリー容量が 100 mAh よりも多く通信可能な距離が長い場合、エネルギーハーベスティングにより得られた電力量の総量よりも消費された電力量が多くなっている。これは前節の評価と同様に、本シミュレーションでは、初期状態においてバッテリーが満充電であることを想定しているためである。

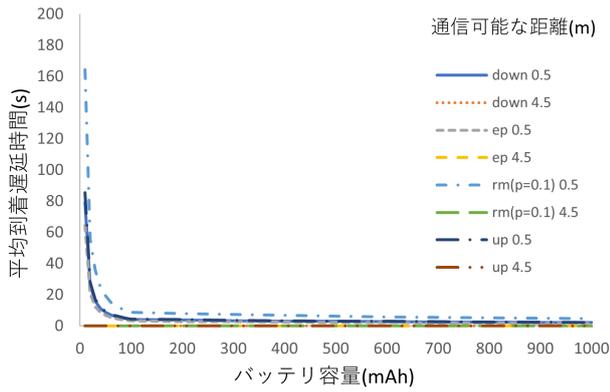
## 5. まとめと今後の課題

本研究では、エネルギーハーベスティングを考慮した養殖魚モニタリング環境下における情報転送方式の評価を行った。情報転送方式としては、全交換方式、上部配送方式、下部配送方式、ランダム配送方式の 4 つの方式を評価した。

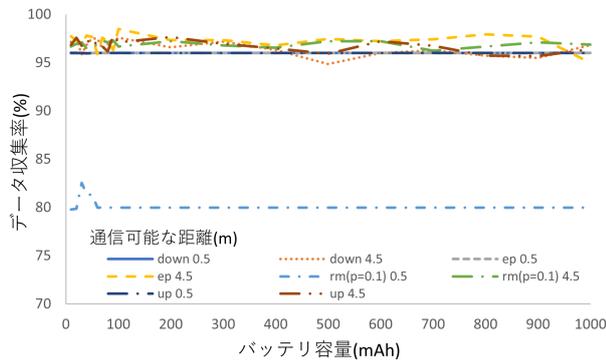
今後の課題としては、ランダム配送方式にてセンサ情報の受け渡しを行う確率を変化させた場合の評価や、今回評価した情報転送方式よりも性能の高い情報転送方式の考案などがあげられる。

## 謝辞

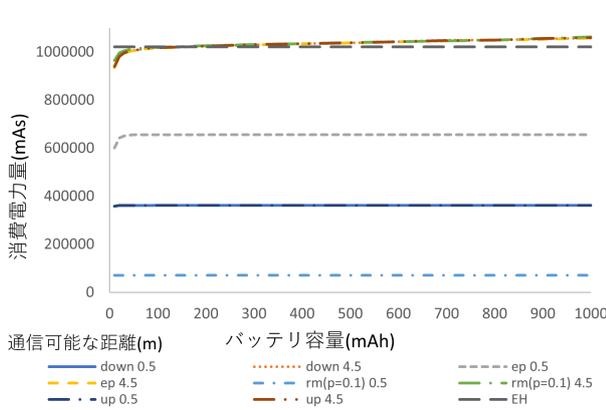
本研究の一部は科学研究費（課題番号 19K11934）の補助を受けている。ここに記して謝意を表す。



(a) 平均到着遅延時間



(b) データ収集率

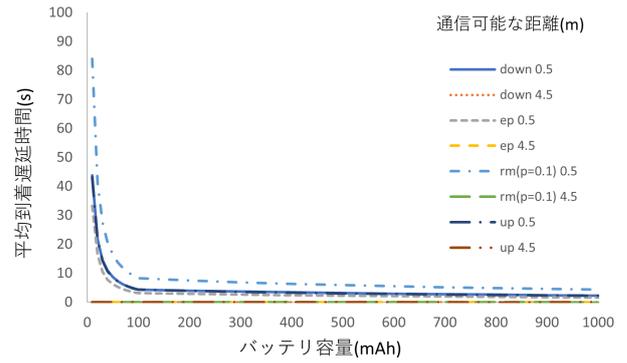


(c) 総消費電力量

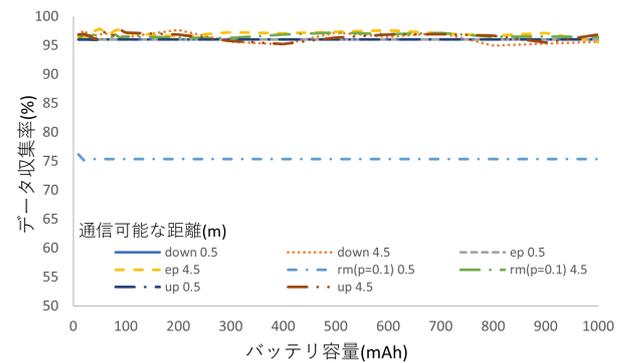
図5 シンク端末配置がB6パターンの時にバッテリー容量を変化させたときの評価結果

## 参考文献

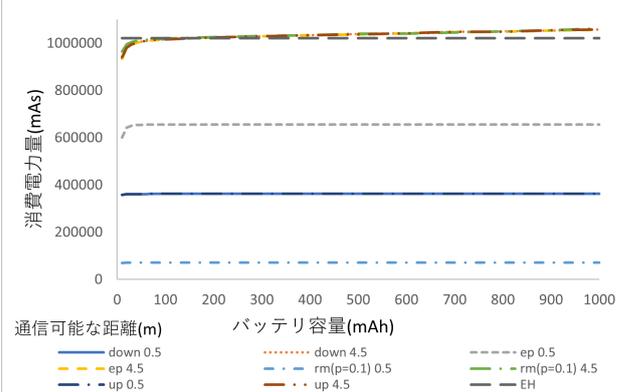
- [1] 深津時広, 平藤雅之, “圃場モニタリングのためのフィールドサーバの開発,” *農業情報研究*, vol. 12, no. 1, pp. 1–12, 2003.
- [2] T. Wark, C. Crossman, W. Hu, Y. Guo, P. Valencia, P. Sikka, P. Corke, C. Lee, J. Henshall, K. Prayaga, J. O’Grady, M. Reed, and A. Fisher, “The design and evaluation of a mobile sensor/actuator network for autonomous animal control,” in *Proceedings of the 2007 6th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks*, 2007, pp. 206–215.



(a) 平均到着遅延時間



(b) データ収集率



(c) 総消費電力量

図6 シンク端末配置がS6パターンの時にバッテリー容量を変化させたときの評価結果

- [3] Y. Taniguchi, “A desynchronization-based data gathering mechanism for a fish farm monitoring environment,” *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, vol. E100.A, no. 11, pp. 2547–2550, 2017.
- [4] K. Ishida, Y. Taniguchi, and N. Iguchi, “A method for gathering sensor data for fish-farm monitoring considering the transmission-range volume,” *IEICE Transactions on Information and Systems*, vol. E101-D, no. 3, pp. 808–811, Mar. 2018.
- [5] —, “A routing method for fish farm monitoring under short transmission range condition,” *IEICE Transactions on Information and Systems*, vol. E101-D, no. 3, pp. 808–811, Mar. 2018.

tions on Information and Systems, vol. E101-D, no. 8, pp. 2145–2149, Aug. 2018.

- [6] Y. Taniguchi, “A system for monitoring farmed fish via LED-based visible light communication,” *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, vol. 14, pp. 1725–1726, 2019.
- [7] T. Noda, J. Okuyama, Y. Kawabata, H. Mitamura, and N. Arai, “Harvesting energy from the oscillation of aquatic animals: testing a vibration-powered generator for bio-logging data logger systems,” *Journal of Advanced Marine Science and Technology Society*, vol. 20, no. 1-2, pp. 37–43, 2014.
- [8] 株式会社アクアサウンド, “GoldCode ピンガー,” [http://aqua-sound.com/products/goldcode\\_pinger.html](http://aqua-sound.com/products/goldcode_pinger.html).
- [9] H. F. Rezaei, A. Kruger, and C. Just, “An energy harvesting scheme for underwater sensor applications,” in *Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Electro/Information Technology*, 2012, pp. 1–4.
- [10] 岡野奨, 光永靖, 坂本亘, 熊井英水, “バイオテレメトリーによる養殖クロマグロの遊泳行動に関する研究,” *近畿大学農学部紀要*, no. 39, pp. 79–82, 2006.
- [11] C. W. Reynolds, “Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model,” in *Proceedings of the 14th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, vol. 21, no. 4, Aug. 1987, pp. 25–34.
- [12] Microship, “ATTINY212 - 8-bit AVR Microcontrollers,” <https://www.microchip.com/wwwproducts/en/ATTINY212>.
- [13] Maxim Integrated, “MAX6666 高精度 PWM 出力温度センサ,” <https://www.maximintegrated.com/jp/products/sensors/MAX6666.html>.
- [14] 山形カシオ, “Logosease — 製品情報,” <https://logosease.yamagata-casio.co.jp/product/>.
- [15] A. Vahdat, “Epidemic routing for partially-connected ad hoc networks,” *Technical Report, Duke University*, 2000.
- [16] 小村巧, 首藤誠陽, 谷口義明, “通信距離に制限のある養殖魚モニタリング環境下における情報転送方式の評価,” *電子情報通信学会関西支部 第25回学生会研究発表講演会論文集*, Mar. 2020.