

# 河川域におけるマルチホップLoRa伝送のための ドローンによる置局設計手法

梶田 宗吾<sup>1,a)</sup> 小倉 且也<sup>1</sup> 本田 美輝<sup>1</sup> 山田 遊馬<sup>1</sup> 山口 弘純<sup>1</sup> 東野 輝夫<sup>1</sup> 高井 峰生<sup>1,2</sup>

**概要:** 野生生態系を様々な側面からみえる化し、生態系サービスを定量化することで、経済的・学術的価値を向上させることへの期待が高まっている。現在、北海道大学が中心となり、鮭に装着したロガーで河川遡上行動をセンシングし、そのデータを河岸付近の陸上中継局を介してクラウドに集約する技術開発を行っている。同プロジェクトにおいて、我々の研究グループは中継局をどの地点に設置すべきかを電波伝搬の側面から検討している。本研究では、特に上流付近まで遡上した鮭の産卵行動などの貴重なセンシングデータの集約を、省電力で長距離通信が可能なLoRaのマルチホップ通信で実現するため、森林・河川域における植生や地形的起伏が電波伝搬に与える影響に関する基礎調査を実施している。また、置局に必要な現地で実施すべき通信特性調査には大きな労力を要するため、ドローンを用いた植生認識およびリンク測定実験を行い、その効率化を検討した。最後に、対象環境である北海道忠類川において、実際に基礎実験で得られた知見に基づいた置局設計を行い、マルチホップ伝送が可能であることを示した。

## 1. はじめに

人類は野生生態系から直接的・間接的に恩恵を享受することで生活を営んでおり、人間活動の持続性を保証するには生態系の機能保全が必要不可欠である。しかし、近年の人口増加やそれに伴う大規模開発などの影響により、野生生態系の機能が大きく低下していると言われている。生態系機能は生物多様性によって支えられているとされており、その保全を目的とし、我が国では生物多様性国家戦略 [1] を策定している。こうした動きの中で、生物多様性・生態系機能の必要性を社会に浸透させるため、人類が生態系から享受している恩恵を生態系サービスとみなし、その経済的価値を定量化することが求められている。また、この定量化の前提として、これまで困難であった森林・河川域などの電波不感地帯における野生生態系を、様々な側面からみえる化することに注目が集まっている。

これに対し、北海道大学が中心となり、川と海を行き来する鮭をみえる化対象のモデル生物とし、河川遡上時の鮭の行動情報をクラウドまで自動的に集約するシステムの構築を目的としたプロジェクトが実施されている [2]。我々の研究グループも同プロジェクトに参画し、システム構築



図 1 モニタリング対象の忠類川（北海道標津町）

技術開発のための研究を実施している。同プロジェクトでは、図 1 に示す北海道忠類川を遡上する鮭を対象とし、その行動情報をモニタリングおよび可視化することを目的としている。具体的には、図 2(a) のように鮭の背びれ部分にセンサ内蔵のロガー [3] を装着し、鮭の加速度、深度などの行動情報を収集・蓄積する。ロガーに蓄積された行動情報は、図 2(b) に示すように、鮭が陸上中継局との通信範囲に入った際に送信される。この送受信にはライセンス不要の 429MHz 帯を使用するが、その通信範囲は水深 1m 下で半径 8m の範囲であり、中継局は河川付近に設置する必要がある。しかし忠類川はその大半が LTE の不感地帯であり、陸上中継局からクラウドサーバまで集約するには、独自に無線通信システムを構築する必要がある。

しかし、人里離れた森林域・河川流域に、既設の通信インフラに依存しない独自の通信ネットワークを構築するに

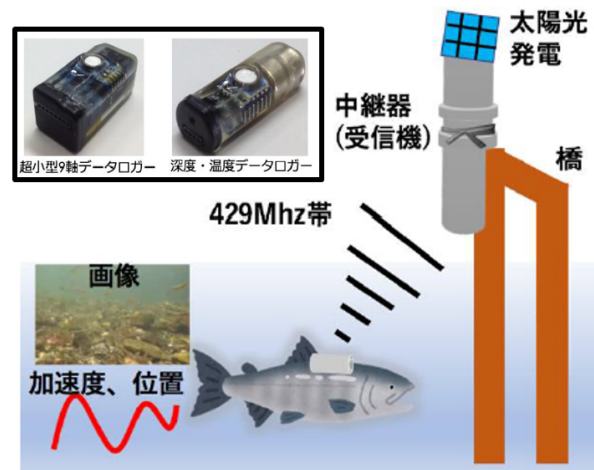
<sup>1</sup> 大阪大学大学院情報科学研究科  
Graduate School of Information Science and Technology,  
Osaka University

<sup>2</sup> カリフォルニア大学ロサンゼルス校  
University of California, Los Angeles

a) s-kajita@ist.osaka-u.ac.jp



(a) 鮭にロガーを装着した様子



(b) 鮭 (水中) から中継局へのデータ収集

図 2 鮭の行動情報モニタリング

は様々な困難が伴う。まず、鮭が遡上する河川域でセンシングを実施するためには、鮭が遡上する上流区域から LTE サービスエリアまでの数 km から 10km 程度のデータ通信を実現する必要がある。一方でそれらの領域では電力インフラはなく、人や車両が進입困難な領域がほとんどである。そういった厳しい制約下においては、なるべく低コストかつ長期にわたり維持管理がなくても持続可能なネットワークを構築することが求められる。

そこで本研究では、省電力で動作し広域をカバーすることが可能な LPWA (Low Power Wide Area) を用いて生態系モニタリング用ネットワークを構築するための検討を行う。LPWA の中でも、ライセンス不要な 920MHz 帯を利用する LoRa [4] を利用し、鮭の行動情報を前述の陸上中継局から携帯通信網の通信可能域までマルチホップで配送する LoRa システムの構築を目指す。

一般に、フィールドにおけるマルチホップネットワークを構築する場合、設置箇所の選択が極めて重要となる。特に、図 1 に示すような森林・河川域に中継局を設置する場合、地点間に存在する植生や地形的な起伏が電波伝搬に大きな影響を与えると想定される。また、伝搬損失量は植生の特徴 (樹木の高さ、密度、幹の太さ、葉の形状と密度など) にも依存し、リンク測定事例もほとんどなく十分な知見が得られていない。これに対し本研究では、そういった植生が LoRa の通信リンク性能に与える影響を、河川域に類似する環境および実際の河川域で調査し、置局設計のためのデータ収集を行っている。

忠類川での置局設計に向けた基礎調査として、大阪府の植生による減衰の影響下で見通しが無い環境において、LoRa のリンク測定実験を実施した。その結果、LoRa は見通し環境で最大 30km の通信が可能とされているものの、実験環境では約 1.8km 程度の通信距離に留まることを確認した。つまり、本研究が対象とする森林・河川域環境では

植生影響でその 5% 程度の通信距離と想定する必要があるという、中継局設置のための重要な指標が得られた。加えて、河川域における進入が困難な地点等ではその労力が非常に大きくなることが想定されるため、ドローンを活用したその効率化を検討している。ドローンに LoRa 無線通信モジュールを搭載した測定用プロトタイプを構築し忠類川においてリンク測定を実施した結果、設置位置の高さやアンテナ高といった垂直方向の置局調整に向けたリンク測定に対する労力削減への可能性を示せたと考えている。最後に、この結果に基づいた忠類川におけるマルチホップ LoRa 伝送の置局設計を行い、設計した置局予定地点間でリンク測定を実施している。

## 2. 関連研究

### 2.1 野生生態系モニタリング

野生生態系や動物の行動のモニタリングは従来広く研究されているが、近年の IoT ならびにセンシング技術の発展に伴いその高度化も加速しつつある。[5] では、動物福祉の観点から、スマートコンピューティングとセンシング技術の活用により、動物と人間のコミュニケーション・動物の行動やトラッキング・動物の健康状態・人の健康状態といった指標でモニタリングが実施されていることが示されている。[6] では、ワイヤレスセンサネットワークを活用した野生生態系モニタリングシステムが提案されている。また、野生生態系モニタリングにおいては、生態系を妨害することなくモニタリングを実現するため、ドローンの活用が期待されている [7]。例えば、[8] では、熱帯や極地の環境における野生動物のモニタリングにドローンを活用し、ドローンによる観測は従来の観測よりもより良質のデータを得ることができることを確認している。他にも、[9] では、ドローンと生物認識のための動画像処理 AI を併用した野生生態系モニタリングシステムが提案されている。い

ずれの研究においても、システムの維持コストや設置コストの低減が極めて重要であり、進入困難地域におけるモニタリングシステムの共通課題として認識されている。

## 2.2 LoRa ネットワーク

IoT (Internet of Things) の普及を背景に、省電力で動作する広域な無線通信システムとして LPWA 技術が近年注目を集めている。その中の一つである LoRa においても、キャパシティ評価 [10] やスケール評価 [11] が盛んに実施されている。[12] では、大学キャンパス全域を対象とした学生の健康状態のモニタリングを実施するために、LoRa の活用を検討している。[13] では、LoRa がスマートシティにおける基盤通信システムとして導入されたことを想定した場合、どの程度の端末密度で運用可能かを検証している。同実験の結果から、3.8 ヘクタールあたり 120 ノード程度で運用可能であることが確認されている。また、現在では IoT を前提としたスマートシティアプリケーションにおける LoRa の活用事例が多く見られるなか、[14] は郊外での LoRa の活用を検討している。同事例では、植生が LoRa の通信範囲を制限することから、それらを考慮した置局設計の重要性が述べられている。本研究においては、植生のみならず、地形的な起伏なども多い河川域ならびに森林域における置局が必要であり、それらを考慮した置局設計が必要であるとともに、進入困難地域におけるリンク測定についても検討している点が異なると考えられる。

## 3. 置局設計へ向けたリンク測定実験

植生と地形的な起伏を組み合わせた見通しのない環境下での LoRa の通信範囲を確認するため、大阪府吹田市にある万博記念公園、より対象環境に類似した山間部にある能勢ドローンフィールド、対象環境である忠類川の 3 種類の環境において、LoRa のリンク測定実験（電波強度測定ならびに通信実験）を実施した。

### 3.1 万博記念公園におけるリンク測定実験

万博記念公園で実施したリンク測定実験の測定環境を図 3 に示す。図 3(a) に示される通り、万博記念公園は外周道路に囲まれた楕円形に近い形状をしており、楕円形の長径にあたる距離は約 1.7km である。後述の山間部にある能勢ドローンフィールドと比較すると、園内は起伏の少ない地形であるものの、多くの木々が生えていることを活用し、植生や建造物による見通しのない環境下における LoRa の通信距離を確認する。

実験では 2 つの LoRa モジュールを用意し、2 台のノート PC にそれぞれ接続することで、送信機および受信機とした。送信機は東側の大きく開けた広場（図 3(a) 右側の赤いピンが示す場所）に固定し、図 3(c) のようにノート PC を手で持ち上げることでアンテナ高（約 1.5m）を確保

表 1 万博記念公園におけるリンク測定の結果（中央値）

Location	受信電波強度 (dBm, Median)
Point1	-114
Point2	-117.5
Point3	-123
Point4	-128
Point5	-132

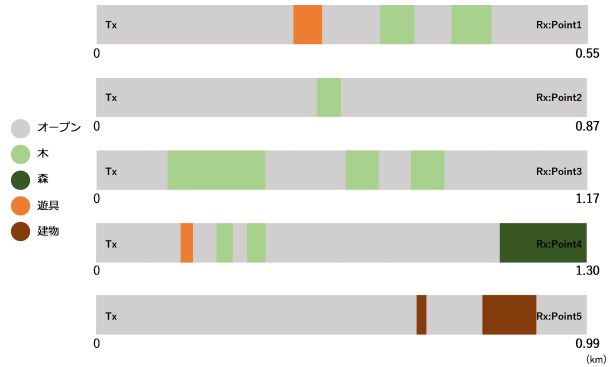
している。受信点は、受信機であるノート PC を携えて園内を歩いて回り、送信点からの距離はおおよそ等しいが、介在する遮蔽物が異なる 5 地点を選択し、観測した受信電波強度を比較することで、遮蔽物が電波伝搬および通信に与える影響を明らかにする。具体的には、図 3(a) の青いピンが示す 5 箇所を受信点とし、送信機と同様にノート PC を掲げることでアンテナ高（約 2m）を確保している。万博記念公園の俯瞰図から確かめた、送信点と各受信点の間の距離と介在する遮蔽物を図 3(b) に示す。確実に通信できることを確認するために Point1 を、建造物の影響を確認するために Point2 と Point5 を、植生の影響を確認するため Point3 と Point4 を選定した。また、Point1, Point2 および Point3 はおおよそ同一直線状に位置しているため、距離による減衰の傾向も観測できると考える。LoRa モジュールの通信パラメータとして、帯域幅 (bw) は 6.5kHz、拡散率 (sf) は 12 とした。これは最も通信距離が長くなる設定に相当する。

測定結果を図 4 および表 1 に示す。LoRa の受信電波強度は分散が非常に大きくなることから従来研究において言及されていることから、極端な外れ値を除外する目的で、各受信点における複数の受信電波強度の中央値を示した。この結果より、Point1 から Point3 へ受信点が送信点から遠ざかる方向へ移動するに従って、受信電波強度の減少トレンドを確認することができた。また、Point4 では、図 3(c) に示すように受信点付近が木々に囲まれている環境で植生影響があるものの、十分な受信電波強度で LoRa 通信が可能であることを確認することができた。一方で、Point5 では、大きな建造物の影にあたる部分に受信点が存在していることにより、Point4 より距離が短い経路にもかかわらず、大きな減衰が確認された。これらの結果から、本研究で対象とする森林・河川域での置局設計においては、木々の少ない河川上空などを利用することで、遮蔽物のできるだけ少ない伝搬経路を確保すべきだと考えられる。加えて、アンテナ高について、今回の測定実験においては手で持ち上げることで高さを確保したが、図 3(d) に示すように、地表付近で LoRa 端末を設置し測定を行った場合には、送受信を一度も確認することができなかった。これより、今後の測定実験や実際の設置においては、アンテナ高をできるだけ高く設置する方法の模索などが必要だと考える。

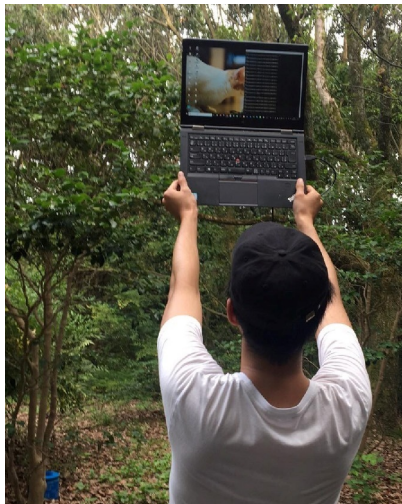




(a) 万博記念公園の俯瞰図と送受信点の位置



(b) 送受信点間の距離と遮蔽物



(c) 受信機側の測定風景 (Point4)



(d) 送信機側の測定風景 (送受信不可の場合)

図 3 万博記念公園でのリンク測定環境

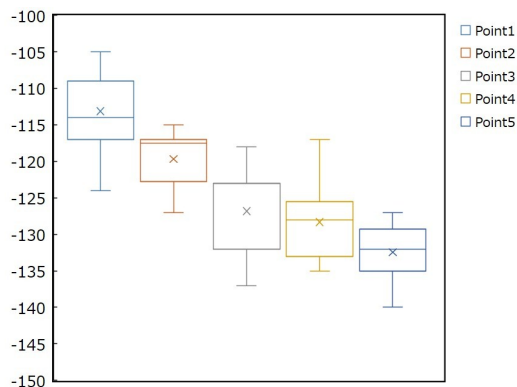


図 4 万博記念公園におけるリンク測定の結果

### 3.2 能勢ドローンフィールドにおけるリンク測定実験

万博記念公園における測定実験では、送受信機を掲げるように保持することでアンテナ高を確保した場合、全ての受信点で通信可能であり、減衰影響による LoRa の最大通信範囲を計測することができなかった。そこで、より対象環境と類似した山間部にある能勢ドローンフィールドにおいてリンク測定実験を実施し、植生と起伏の影響下にある場合での LoRa の通信範囲について、調査を実施した。

能勢ドローンフィールドにおけるリンク測定実験の測定

環境を図 5(a) に示す。測定環境は、図の上から下へ向かって下り坂となっており、車道の両側は樹木に囲われているため、地形の起伏が存在し樹木を介する見通しのない環境となっている。LoRa の送信機は図中上側の赤いピンの立っている地点に固定し、受信機は車両に搭載し送信機から離れる方向（下り坂を下るような標高が下がり、かつ遠ざかる方向）へ移動させることで、通信の状況を観察した。受信機は車内の助手席に座る人が保持するノート PC に接続されており、ダッシュボードの上に設置した。また、送信機は高さ約 80cm ほどの机の上に固定し測定している。万博記念公園における設定と同じく、LoRa モジュールの通信パラメータとして、帯域幅 (bw) は 6.5kHz、拡散率 (sf) は 12 とした。

この測定結果を図 5(b) に示す。縦軸は受信電波強度 (dBm) を表し、横軸は車両の移動に伴う時間変化を表している。車両が遠方に移動するに従い、受信電波強度が徐々に低下することを確認した。また、最大で約 1.8km の距離で、-139dBm の受信信号強度で通信できることを確認し、それ以降はパケットを受信することができなかった。これは、PER (Packet Error Ratio) が 1%未満時の受信電波強度の最小レベルが-142dBm 程度である [15] ことを考慮



すると、妥当な結果である。この結果から、おおよそ1～1.5kmの範囲で中継局を配置するようなマルチホップ伝送により、見通しがない電波不感地帯からでもデータ集約が可能であると考えられる。

### 3.3 忠類川におけるリンク測定実験

これらの実験に加えて、植生の有無による電波状況の変化を定量的に測定するため、忠類川において複数ドローンを活用したリンク測定実験を実施した。具体的には、送信機と受信機の距離を一定に保ちながら、それらの高度を変化させることで、植生を介在するもしくは介在しない環境を作り出し、リンク測定結果を比較した。ドローンを活用することにより、気温・湿度など周辺状況に近い環境において、アンテナ高度だけを変更することができ、結果として介在するオブジェクトの有無だけが異なる環境を作り出すことができる。

設計したリンク測定実験の環境を図6に示す。送信機側は受信機側よりも標高が高く、それぞれの地点周辺・地点間には高さ15m程の植生がある。図6(a)に示すように送信機と受信機の水平面座標は固定とし、図6(b)に示すように送信機となるドローンの高度を変化させながらリンク測定を実施した。前述の通り送信機と受信機の間には植生があるが、測定開始時は送信機が木々よりも十分に高いため、ドローン本体の影響を除けば見通しのある環境での測定結果となる。その後、送信機となるドローンの高度を徐々に下げていく中で、介在する植生や地形の起伏による減衰影響を受けることが予想され、それらの結果を比較することで影響を分析することが可能となる。受信機側のドローンは水平面座標・高度ともに固定としており、送受信機間の距離は送信機の高度の変化に合わせて544.00mから544.33mの間で変化するものの、この直線距離の差がRSSIに与える影響は非常に少ないと考える。

高精度な飛行が可能なドローン(DJI M600 [16])に、LoRaのモジュールとそれを制御するRaspberry Pi3、ならびにそれらを駆動するバッテリーを搭載することで、置局設計に利用可能な測定用プロトタイプドローンを作成した。図7に、ドローンに搭載したLoRaモジュールの様子を示している。ドローンに搭載されているGPSモジュールは羽より上側に出るよう設置されているが、これは羽の駆動部であるモータがノイズとなりGPSの値に影響するためだと言われており、これに倣って、LoRaモジュールのアンテナはできるだけモータから離れるようドローンの下部(垂直下向き)に搭載することとした。

忠類川におけるリンク測定実験の結果を図8に示す。この結果から、送信機側のドローンの高度を低くするにしたがって、RSSIの値が悪くなることが確認できる。送信機の高さを低くするにしたがい、起伏や植生影響で徐々にRSSI値が低くなるものの、送信機の高さが周辺の木々の

高さとはほど近い16mの時点で急激に減衰量が大きくなり、初めて-130dBmを観測している。結果として、十分に見通しがあると想定される送信機の高度が30m時点でのRSSI値と比較して、植生影響下の高度が8mの場合は30dB程度の減衰を確認した。

## 4. ドローンによる置局設計の効率化

3章で実施したようなリンク測定実験は、実際に置局する際に現地で必ず実施する必要があると考えられるものの、森林・河川域で進入が困難な地点ではその労力が非常に大きくなるのが想定される。この問題に対し、我々は、進入の困難性といった制約を受けないドローンを活用した置局設計の効率化を検討している。

3章で確認した通り、置局設計では送信機と受信機の間介在するオブジェクト(植生や建造物など)が与える影響が無視できない。そこで、我々はそういった影響の大きいと考えられるオブジェクトをより詳細に把握するため、ドローン空撮映像を用いた点群作成と得られた点群情報からオブジェクトを認識し切り出す技術を開発している[17]。忠類川においても同様に空撮画像を収集し、図9に示すように点群情報を作成した。こうした取り組みにより、事前にオブジェクトを把握することで、実際の環境でリンク測定を実施する前に、明らかに不要な設置候補点の除去や電波減衰量の予測が可能となると考える。

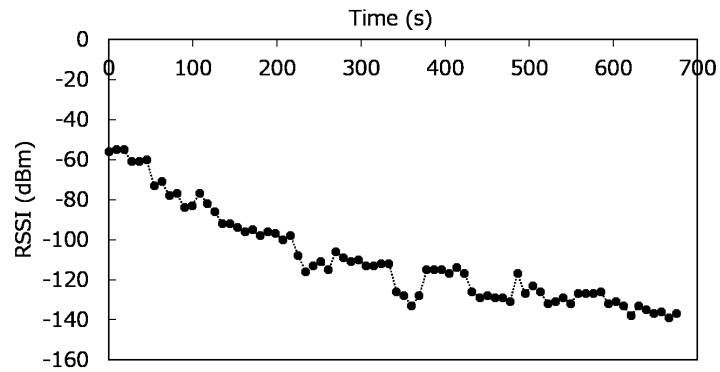
続いて、3.3節で構築した測定用プロトタイプドローンおよび実施したリンク測定実験に基づいて、置局設計における労力の削減に関する検討を行った。ドローンは、人間が陸路で進入困難な地点への進入を容易にする他にも、ホバリングにより任意の高さで静止することができることから、高さ方向への置局位置調節という点でも優れていると考えられる。3.3節での実験と同様に、ある地点におけるドローンの高度を変更することによるリンク性能の変化を確認し、LoRa中継機の設置位置やアンテナ高の調整へ向けた活用が期待できる。具体的には、図8で確認できるように、ドローンを活用することで受信電波強度の連続的な変化を記録し、最適な高さ(最もリンク性能の良い高さ)を確認することができる。このようにドローンの活用により、進入の困難さに関する制約の緩和や様々な調整項目の検証が容易になるといった、置局設計への活用で一定の目的が得られた。

## 5. 忠類川におけるLoRa中継局の置局設計

3章のリンク測定実験の結果から、1km～1.5km程度であれば見通しのない環境においてもLoRa伝送が可能であると想定し、忠類川においてマルチホップLoRa伝送へ向けた陸上中継局の置局設計を実施した。見通しのない環境におけるLoRaの通信範囲の制約だけでなく、万博記念公園における実験の結果よりアンテナ高を確保することが極

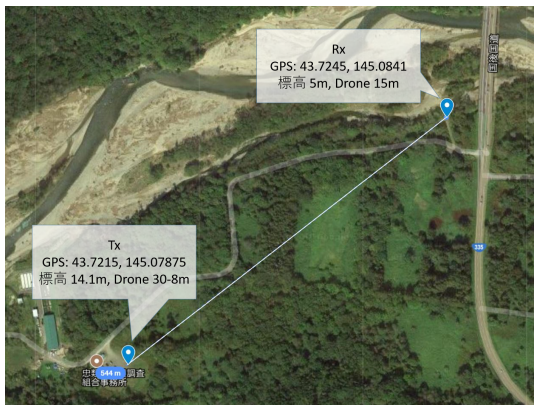


(a) 測定環境と車両の移動軌跡

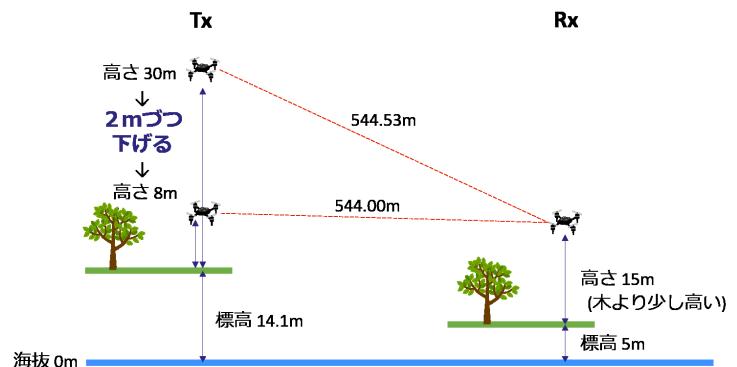


(b) 測定結果

図 5 能勢ドローンフィールドにおけるリンク測定実験



(a) 俯瞰図



(b) 断面図

図 6 忠類川における複数ドローンを活用したリンク測定環境



図 7 ドローンに搭載した LoRa モジュール

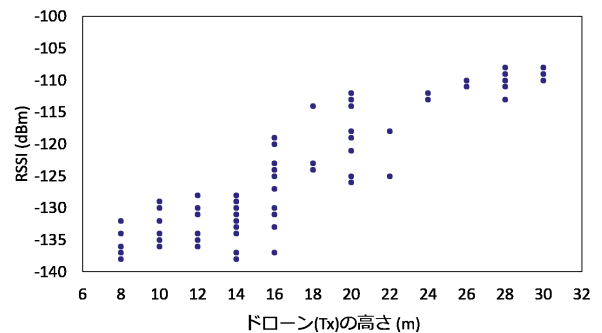


図 8 忠類川におけるリンク測定結果

めて重要であるという知見を踏まえ、河川域に自生している木々に LoRa 中継機を設置することを検討する。加えて、機器の設置・撤去の労力を考慮し、アクセスしやすい位置にあることも設置箇所の選定理由としている。上記を踏まえ、実際に北海道標津町忠類川を対象とした置局設計の結果を図 10 に示す。

最も上流にある Point4 から、最下流部の LTE サービスエリア内にある Point1 までのマルチホップデータ伝送が実現可能であることを確認する。図 1 に示したように、忠

類川の河川上は空間的に開けているものの大きいうねっているため、各置局候補点 (Point1~4) の間には植生を介在しており、見通しのない環境となっている。そのため、実際に LoRa 通信路を確立可能かを検証するため、忠類川へ赴き、選定した設置候補地点間で LoRa リンク測定を実施した。

図 11 に、忠類川で実施したリンク測定実験の様子を示す。置局設計時に考慮したように、アンテナ高を確保するため、LoRa 送受信機は木に括り付けることを想定している。実際の設置状況を想定した測定実験とするため、図 11(a) に示すように、約 3m 程の物干し竿の先端に LoRa の

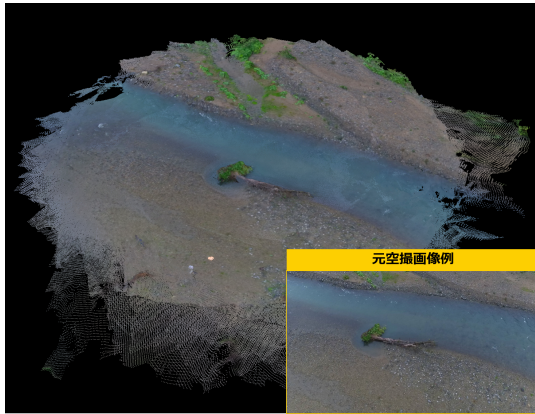


図 9 空撮画像と作成した点群



図 10 忠類川を対象とした置局設計の結果

送受信機を固定し測定を実施した。その測定実験の様子は図 11(b) に示す。各設置候補地点には、図 11(b) にあるような木々が存在する。

センシング・集約対象である鮭の行動情報のデータ量を考慮し、LoRa モジュールの通信パラメータは、中程度のビットレートとなる帯域幅 (bw) は 250kHz、拡散率 (sf) は 12 と設定し、リンク測定実験を行った。まずはじめに、最も上流部にある Point4 に送信機 (Tx) を設置し、受信機 (Rx) を Point3 から最下流の Point1 へ向けて順に移動させながら測定を実施した。その後、送信機を Point3、Point2 と順に下流側へ移動させながら、受信機も送信機の位置の変更に合わせて、より下流側の地点を順に測定する。こうして、設置候補地点の全組み合わせについて、上流から下流へ向けたリンク測定を実施した。

忠類川で実施したリンク測定の結果を表 2 に示す。隣接する設置候補地点との通信は、PER が 1%未満時の受信電波強度の最小レベルが -142dBm 程度だとすると、十分に可能であることを確認した。最も上流側である Point4 からは Point3 としか通信はできず、Point3 を経由するマルチホップ通信が必要であることを確認した。その一方で、Point3 からであれば、最も下流側の Point1 と直接通信が可能であることが確認できた。また、Point3-Point2、Point3-Point1、Point2-Point1 のリンクについては、RSSI の観点から、通信距離が最も長い Point3-Point1 の伝送路が最も良好であることを確認した。これは、Point2 が忠類川の大きなうねりの窪みになっていることが原因で、電波伝搬環境として厳しい地点であることが理由であると考えられる。こういったより詳細な減衰影響の理解へ向けた調

表 2 忠類川におけるリンク測定の結果

RSSI (dBm)		Rx		
		Point3	Point2	Point1
Tx	Point4	-115.0	x	x
	Point3	-	-114.2	-100.8
	Point2	-	-	-104.9

査は今後も引き続き実施が必要だが、基礎調査に基づいて設定した、見通しのない河川域における LoRa の通信範囲に関する指標は、忠類川での置局設計において有益に機能した。

## 6. まとめ

本研究では、省電力で動作し広域をカバーすることが可能な LPWA (Low Power Wide Area) 技術である 920MHz 帯 LoRa を利用し、鮭の行動情報を陸上中継局から携帯通信網の通信可能域までマルチホップ伝送するシステムの構築を目指している。この目的に対し、マルチホップネットワークを構築するにはその設置箇所の選択が極めて重要であることから、対象とする忠類川において置局設計を実施するための基礎検討として、樹木や地形の起伏による電波伝搬の影響を確認した。大阪府の万博記念公園ならびに能勢ドローンフィールドで、植生による減衰影響下で見通しが環境において LoRa のリンク測定を実施した結果、最大で約 1.8km 程度の通信範囲を確認し、通信距離が大幅に抑制されることが示された。この指標に基づいて、実際に忠類川で置局設計を実施し、選定された設置候補地点においてリンク測定を行ったところ、隣接地点間では十分に通信可能であり、マルチホップ伝送が可能であることが確認された。また、置局設計や設置時の労力削減の検討として、近年様々な分野での利活用が期待されているドローンをを用いたリンク測定実験を行っている。具体的には、LoRa モジュールを搭載した測定用プロトタイプドローンを試作し、ドローンの高度を変えながら連続的にリンク測定実験を実施することで、その適用可能性を検討した。これにより、設置候補点に無線機のアンテナを搭載したドローンをホバリングさせて実際のリンク性能試験を実施することで、多くの置局候補点で効率的なリンク性能試験が実施可能となり、置局設計に関わる労力を大幅に削減することが可能になる。また、同時に、受信電力測定とドローンの飛行制御と連動させることでアンテナ高や角度の調整を実現し、これまでの手作業によるアンテナ設置時の労力削減できる可能性もあると考えている。

## 謝辞

本研究開発は総務省 SCOPE (受付番号 175001002: 森林・河川等電波不感地帯における野生生態系の見える化) ならびに JSPS 科研費 JP17J05148 の助成を受けたものです。





図 11 忠類川で実施した LoRa リンク測定

### 参考文献

- [1] 環境省: 生物多様性国家戦略 2012-2020, [http://www.biodic.go.jp/biodiversity/about/initiatives/files/2012-2020/01\\_honbun.pdf](http://www.biodic.go.jp/biodiversity/about/initiatives/files/2012-2020/01_honbun.pdf).
- [2] 宮下和士: 「森林・河川等電波不感地帯における野生生態系の見える化」の概要. [http://www.soumu.go.jp/main\\_content/000530692.pdf](http://www.soumu.go.jp/main_content/000530692.pdf).
- [3] Biologger: Biologging Solutions Inc., <https://biologging-solutions.com/>.
- [4] LoRa: LoRa Alliance, <https://www.lora-alliance.org/>.
- [5] Jukan, A., Masip-Bruin, X. and Amla, N.: Smart Computing and Sensing Technologies for Animal Welfare: A Systematic Review, *ACM Comput. Surv.*, Vol. 50, No. 1, pp. 10:1–10:27 (2017).
- [6] Dyo, V., Ellwood, S. A., Macdonald, D. W., Markham, A., Mascolo, C., Pásztor, B., Scellato, S., Trigoni, N., Wohlers, R. and Yousef, K.: Evolution and Sustainability of a Wildlife Monitoring Sensor Network, *Proceedings of the 8th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, SenSys '10, New York, NY, USA, ACM, pp. 127–140 (2010).
- [7] Julie, L., Jonathan, L., Jean, S., Philippe, L. and Cdric, V.: Are unmanned aircraft systems (UASs) the future of wildlife monitoring? A review of accomplishments and challenges, *Mammal Review*, Vol. 45, No. 4, pp. 239–252.
- [8] Hodgson, J. C., Baylis, S. M., Mott, R., Herrod, A. and Clarke, R. H.: Precision wildlife monitoring using unmanned aerial vehicles, *Scientific Reports*, Vol. 6 (2016).
- [9] Gonzalez, L. F., Montes, G. A., Puig, E., Johnson, S., Mengersen, K. and Gaston, K. J.: Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) and Artificial Intelligence Revolutionizing Wildlife Monitoring and Conservation, *Sensors*, Vol. 16, No. 1 (2016).
- [10] Mikhaylov, K., Petajaejaervi, J. and Haenninen, T.: Analysis of Capacity and Scalability of the LoRa Low Power Wide Area Network Technology, *European Wireless 2016; 22th European Wireless Conference*, pp. 1–6 (2016).
- [11] Wixted, A. J., Kinnaird, P., Larijani, H., Tait, A., Ahmadinia, A. and Strachan, N.: Evaluation of LoRa and LoRaWAN for wireless sensor networks, *2016 IEEE SENSORS*, pp. 1–3 (2016).
- [12] Petajrvi, J., Mikhaylov, K., Hmlinen, M. and Inatti, J.: Evaluation of LoRa LPWAN technology for remote health and wellbeing monitoring, *2016 10th International Symposium on Medical Information and Communication Technology (ISMICT)*, pp. 1–5 (2016).
- [13] Bor, M. C., Roedig, U., Voigt, T. and Alonso, J. M.: Do LoRa Low-Power Wide-Area Networks Scale?, *Proceedings of the 19th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems*, MSWiM '16, New York, NY, USA, ACM, pp. 59–67 (2016).
- [14] Iova, O., Murphy, A. L., Picco, G. P., Ghio, L., Molteni, D., Ossi, F. and Cagnacci, F.: LoRa from the City to the Mountains: Exploration of Hardware and Environmental Factors, *Proceedings of the 2017 International Conference on Embedded Wireless Systems and Networks*, USA, pp. 317–322 (2017).
- [15] EASEL: LoRa モジュール ES920LRB. <http://easel5.com/>.
- [16] DJI: MATRICE 600 Pro, <https://www.dji.com/jp/matrice600-pro>.
- [17] 小倉且也, 山田遊馬, 梶田宗吾, 山口弘純, 東野輝夫, 高井峰生: 複数の立体物で構成された三次元点群の切り分け手法の検討, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO 2018) シンポジウム, pp. 236 – 246 (2018).