

## 製品紹介

ローカル 5G システムによる  
洋上 IoT 実現のための実証

藤田 正人\*      三塚 正博\*      鈴木 裕介\*  
富山 徹\*\*      重見 明弘\*\*\*      小林 真也\*\*\*\*

## Demonstration of Local 5G Systems to Realize Offshore IoT

Masato Fujita, Masahiro Mitsuzuka, Yusuke Suzuki,  
Toru Tomiyama, Akihiro Shigemi  
and Shinya Kobayashi

当社は、2020 年度よりローカル 5G を用いたシステム構築事業に取り組んでいる。この度、ローカル 5G の実証実験およびユースケース開拓の機会として、2020 年 3 月に総務省で実施された“令和 2 年度予算 IoT の安心・安全かつ適正な利用環境の構築”に係る提案の公募に、愛媛大学、愛媛県、及び株式会社 NTT ドコモとのコンソーシアムで参加し、採択された。本稿では、ローカル 5G システムを通信インフラとした高画質な映像伝送の成功、および洋上における電波伝搬に関して得られた知見について紹介する。なお、Sub6 帯・Stand Alone 構成のローカル 5G システムによる洋上での実験試験免許取得は、国内初の事例となった。

We have been working on a project to build a system using Local 5G since FY2020. As an opportunity to conduct demonstration experiments and develop use cases for Local 5G, a consortium with Ehime University, Ehime Prefecture, NTT DOCOMO, Inc., and ourselves was organized and participated in “Appeal for Proposals for Establishment of Safe, Secure, and Proper Usage Environment of IoT under FY2020 Budget” conducted by the Ministry of Internal Affairs and Communications in March 2020, and the proposal was adopted. In this paper, the success of the high-quality video transmission using the Local 5G system as the communication infrastructure and the knowledge obtained about the radio wave propagation at the offshore are introduced. This is the first time in Japan that a Local 5G system with Sub6 band and Stand-Alone configuration has been licensed for experimental testing at the offshore.

## 1. はじめに

本実証実験で取り扱う遊魚三次元位置測定装置<sup>\*1</sup> (以下、遊魚測定装置)とは、愛媛大学理工学研究科小林真也教授の研究室で開発中のシステムである。遊魚測定装置は、ある特定のルールで水中に配置した複数のカメラで撮影した魚の映像により、魚数や魚の位置、活性状態等を解析するものである。これらの情報を把握することで、魚の出荷管理や給餌の

最適化、魚病対策など、漁業への応用が期待される。遊魚測定装置で正確な解析を行うためには、高画質の映像が不可欠で、安定した高い通信品質と大きな通信帯域が必要となる。本実証実験では、生け簀に設置されたカメラ映像を遊魚測定装置に無線伝送する通信インフラとして、ローカル 5G システムを利用する(図 1)。キャリア通信のユースケースはイン

<sup>\*1</sup> 遊魚三次元位置測定装置：愛媛大学 理工学研究科の小林真也教授が発明したシステムで、養殖用水槽や生け簀で飼育中の養殖魚を遊泳状態のまま、水中三次元空間内で、その位置を三次元位置座標として求められる装置(2020 年 3 月特許出願)。遊魚の位置座標を取得することで、対象領域の遊魚の動きを把握、魚数や活性状態を類推することができる。

\* ワイヤレス研究所

\*\* 営業企画部

\*\*\* 支店統括部 広島支店 四国営業所

\*\*\*\* 愛媛大学

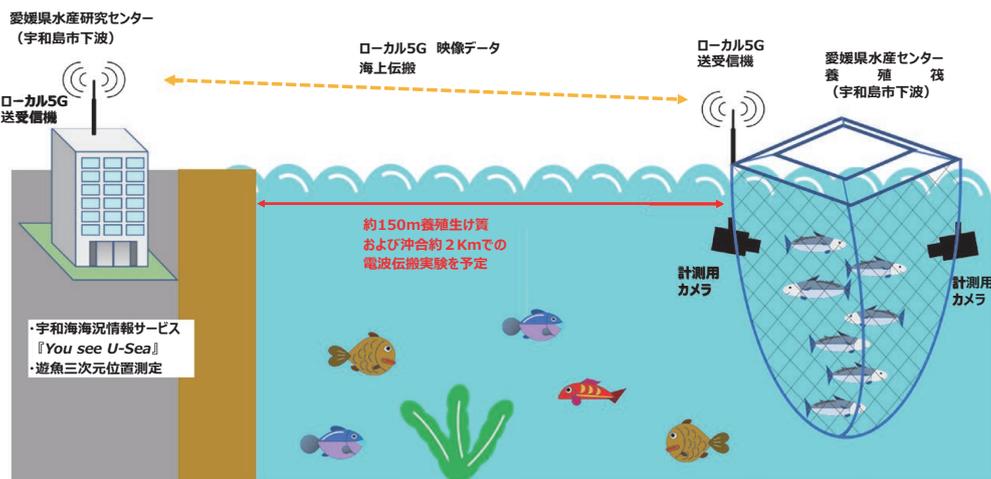


図1 実証システム概要

ターネット閲覧や動画の視聴が大部分であり、Downlink (基地局から端末方向への通信) 主体の通信であると考えられる。一方、ローカル 5G システムにおける主要なユースケースは、映像伝送のような Uplink (端末から基地局方向への通信) 主体の通信であることが想定される。

## 2. 実証の目的

当社は、コンソーシアムの中でローカル 5G システムの提供・構築を担う。また、本実証実験において当社が目的とするのは、以下の2点である。

- ・洋上における電波伝搬特性の知見  
 沖合での長距離通信試験、及び生け簀上での定点観測を実施することにより、ローカル 5G システムを陸上-洋上間で利用する場合における電波伝搬特性 (通信距離、海上反射、波浪、潮位変動による電波伝搬の変動など) の知見を得ることで、洋上での常用的利用の観点からその有効性や利用条件、制約を明らかにし、洋上における無線回線設計手法を確立すること。

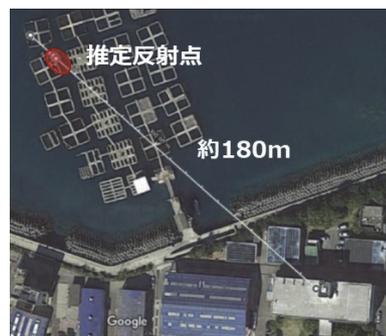
- ・洋上通信における映像伝送の実証  
 洋上での無線回線設計手法を踏まえた機器設定やアンテナ選定などを行い、本実証実験環境において遊魚測定装置に有用な映像を、ローカル 5G システムにより伝送できることを実証する。

## 3. 試験環境

### 3.1 機器設置場所

本実証実験は、愛媛県宇和島市郊外、宇和海の入江に位置する愛媛県水産研究センターで実施した (写真1)。黒潮が常に流れ込む宇和海は潮流が速く、干満差は最大で2m 近くに達し、天候によっては荒い海況となる。

写真2 に基地局、及び送受信端末の設置状況を示す。a) は送受信端末から基地局、b) は基地局から送



画像 ©2020 Google、画像 ©2020 Maxar Technologies、Planet.com、地図データ ©2020

写真1 実証環境全体図



a) 送受信端末から基地局 b) 基地局から送受信端末方向

写真2 見通し環境

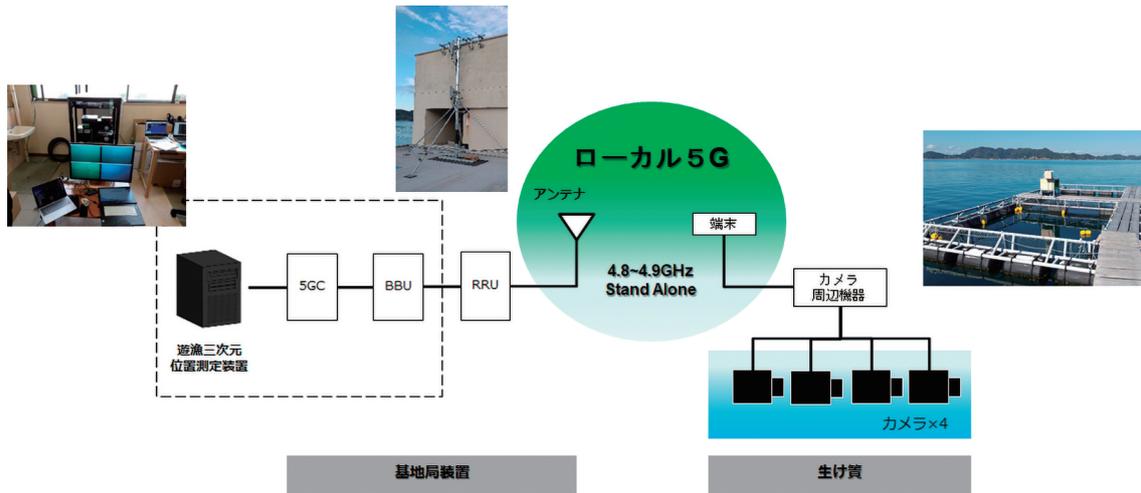


図2 システム構成

受信端末方向への見通しでおよそ180 mとなる。

### 3.2 システム構成

図2にローカル5G実験システムの全体構成を示す。生け簀内の水中カメラ映像は、同じく生け簀に設置された送受信端末から、水産研究センター本館屋上に設置した基地局に伝送される。基地局側で受信した映像情報は、遊漁測定装置へと有線で受け渡す構成となっている。なお、ローカル5Gシステムは、Sub6帯<sup>\*2</sup>(4.8~4.9GHz)の周波数帯でStand Alone<sup>\*3</sup>構成とした。

本システムを構成する機器は以下の通りである。

#### ■基地局装置(陸上側)

5GC<sup>\*4</sup>装置、BBU<sup>\*5</sup>装置、RRU<sup>\*6</sup>および送受信アンテナと遊漁測定装置より構成される。5GC、BBU、および遊漁測定装置は水産研究センター建物内に、RRUと送受信アンテナは建物屋上に設置した。

#### ■カメラおよび送受信端末(生け簀側)

ローカル5G用の送受信端末と、映像受信機など

\*2 Sub6帯：5Gで使用可能な6GHz未満の周波数帯で他に28GHz周辺のミリ波帯がある。なおローカル5GのSub6では4.6~4.9GHzが使用可能。

\*3 Stand Alone(SA)：5Gの新しい技術のみで構成する単独型のシステム構成。Non Stand Alone(NSA)は4G LTEと5Gの基地局構成を組み合わせた非単独の構成。

\*4 5GC(5th Generation Core network)：5Gの呼制御を行うコアネットワークシステム

\*5 BBU(Base Band Unit)：5Gの無線信号処理を行う装置

\*6 RRU(Remote Radio Unit)：5Gの無線装置



写真3 生け簀カメラ設置環境

のカメラ周辺機器より構成される。送受信端末とカメラ周辺機器は作業棚に設置し、4台のカメラは約5m四方の生け簀内の四隅に水深およそ3mまで沈めて設置した。写真3に生け簀側の設置環境を示す。

## 4. 洋上における電波伝搬特性の確認

### 4.1 洋上での長距離電波伝搬試験

洋上での電波伝搬は、図3のようにアンテナ間を直進して到来する直接波と、海面で一旦反射して到来する反射波が受信側で合成される2波モデル<sup>\*7</sup>となる。直接波と反射波の位相が同位相であれば強め合い、逆位相であれば打ち消しあうので、図4の青線のように受信電力(RSRP<sup>\*8</sup>)が距離によって変動する。なお、反射波の振幅が大きいほど受信電力の変動幅が大きくなり、周波数が高いほど波長が短く

\*7 2波モデル：アンテナからの直接波と海面からの反射波が合成される伝搬モデルのこと。

\*8 RSRP(Reference Signals Received Power)：5G通信における基準信号の受信電力を示す。

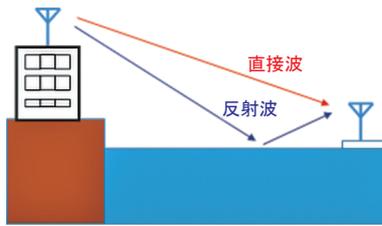


図3 洋上移動通信における直接波と反射波

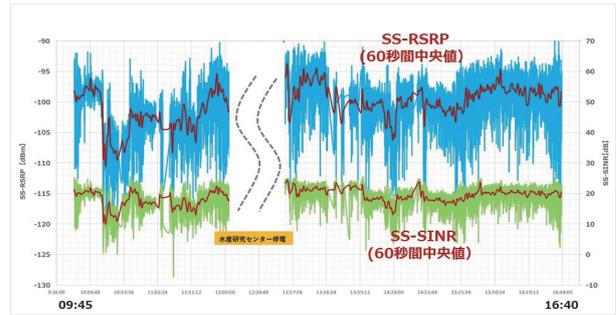


図6 RSRPの長時間観測結果

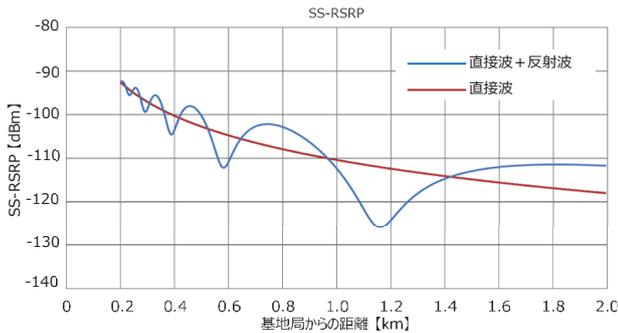


図4 2波モデルのRSRP(シミュレーション)

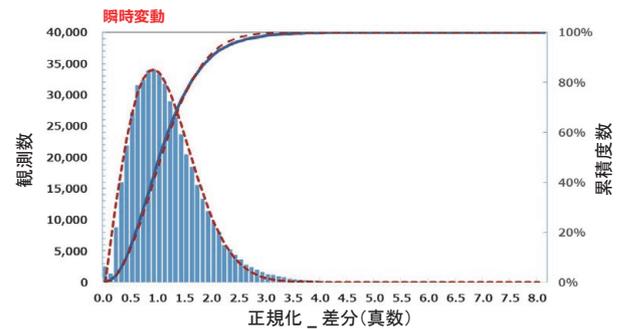


図7 60秒中央値と観測値の差分分布(RSRP)

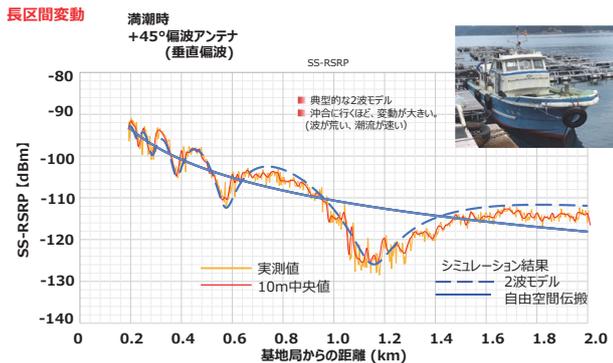


図5 送受信間距離とRSRP

海が荒れている場合、波頭が生じることにより海面反射は鏡面反射だけでなく、凸凹のある粗面の反射となる。粗面の反射点は常に瞬時的に変動しており、この変動と共に粗面反射波の電界強度や直接波との位相関係も変動する。このため、受信点での粗面反射波は、変動の激しい不規則な反射波(散乱波)として受信される。なお、この散乱波の受信電界分布はレイリー分布となることが知られている<sup>(1)</sup>。図7は、長時間観測より60秒間隔の中央値と観測値の正規化した差分分布である。瞬時変動特有のレイリー分布形状となっており、波浪による粗面反射波が生じていたことが確認できる。

送受信端末を設置した生け簀は、風や海面の変動を吸収し、上下・左右・前後に緩やかに動いている。このため、受信電界も緩やかに変動する。ちょうど長区間の中央値が変動する短区間変動と同じ状況となる。陸上移動通信の短区間変動は、dB正規分布となることが知られている<sup>(2)-(4)</sup>。図8は、60秒間隔の中央値と30分間隔の中央値との差分分布を示す。dB正規分布の形状を示しており、短区間変動に相当する緩やかな変動が生じていることが確認できる。

#### 4.3 アンテナ偏波面と生け簀上のRSRP分布

図9に、基地局側のアンテナに垂直偏波アンテナ

なるため、受信電力の変動数(起伏の数)が多くなる。洋上に浮かぶ生け簀上の通信では、海面からの反射波に留意する必要がある。

宇和海の沖合2km地点から、基地局に向かって船で移動しながらRSRPの測定を行い、送受信間距離とRSRPの関係を観測した(図5)。この結果は2波モデルそのものであり、予めシミュレーションした結果と概ね一致している事が確認できた。

#### 4.2 生け簀上での定点観測

生け簀上のカメラ設置ポイントにおいて定点観測を行い、波浪や潮位の変化とRSRPの関係を確認した。RSRPの長時間観測結果(約7時間)を図6に示す。

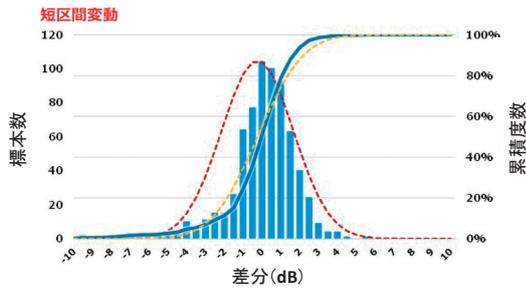


図8 60秒中央値と30分間中央値の差分分布 (RSRP)

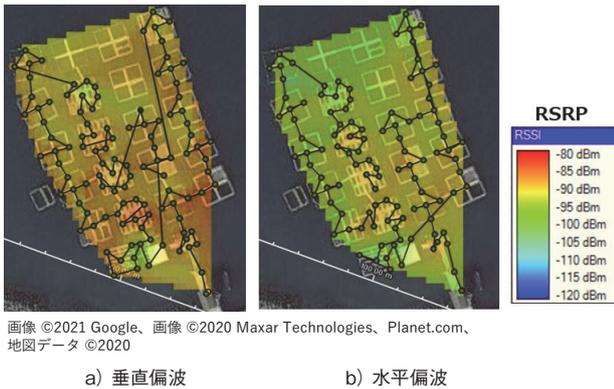


図9 生け簀上のヒートマップ

と水平偏波アンテナを使用した場合の、生け簀上の RSRP 分布 (ヒートマップ) 比較を示す。垂直偏波と水平偏波では海面反射 (鏡面反射) の特性が異なっており、反射減衰量の大きな垂直偏波の方が生け簀全般に渡って変動幅が少なく、良好に受信されていることが確認できる。

#### 4.4 洋上における電波伝搬の特性確認結果

洋上に浮かぶ生け簀上での通信は、停船状態の洋上移動通信 (船舶通信) と言える。基地局 (本館屋上) - 受信端末 (生け簀) 間の電波伝搬は見通し環境であるにも関わらず、洋上移動通信特有と言える海面反射や潮位変動、波浪による乱反射などが、電波伝搬特性上の独立した変動として現れて、重なり合っていることが観測された。観測された変動は、陸上移動通信の電波伝搬と同様に以下の3つの変動特性 (要因) に分類して整理することができる。

- ・ 長区間変動 (距離特性)
- ・ 短区間変動 (緩やかな変動)
- ・ 瞬時変動 (激しい変動, レイリー/ライスフェージング)

一般的な陸上移動通信と今回観測された洋上移動通信の変動特性 (要因) の比較を表1に示す。

長区間変動, 短区間変動, 及び瞬時変動が確認・

表1 洋上移動通信の変動特性 (要因)

項目	陸上移動通信	洋上移動通信
長区間変動	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 距離特性 (変動)</li> <li>● 伝搬モデル (計算式) ✓ 泰式 など (市街地の状況等により異なる。)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 距離特性 (変動)</li> <li>● 伝搬モデル ✓ 2波モデル・潮位 (鏡面反射)</li> </ul>
短区間変動 (緩やかな変動)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 場所的変動</li> <li>● 変動要因: 建物や地形の遮蔽等</li> <li>● 対数 (dB) 正規分布</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 場所的変動</li> <li>● 変動要因: 生質自体の揺らぎ (上下・左右・前後)</li> <li>● 対数 (dB) 正規分布</li> </ul>
瞬時変動 (激しい変動)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● マルチパスフェージング (レイリーフェージング)</li> <li>● 変動要因: 建物、移動体などの反射・回折</li> <li>● レイリー分布</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● マルチパスフェージング (ライス/レイリーフェージング)</li> <li>● 変動要因: (激しい)波動 (粗面反射)</li> <li>● レイリー分布</li> </ul>

分類されたことにより、陸上移動通信と同様の無線回線設計手法が使用可能となる。但し、洋上移動通信の無線回線設計には、以下を留意する必要がある。

- ・ 伝搬モデル (長区間) はアンテナの海面反射係数を考慮した2波モデルを使用すること。
- ・ マージン設定値となる短区間変動, 瞬時変動の変動幅は陸上移動通信とは異なること。

## 5. 映像伝送の実証

### 5.1 映像伝送試験

前項の伝搬試験結果から、生け簀内に設置されたカメラの映像を伝送するために必要な無線通信設定を検討した。遊魚測定装置に必要なカメラの台数は、三次元的な観測のため最低でも3台以上、詳細なデータを取得しようとした場合には6台の使用が望ましい。生け簀を泳ぐ魚の種類と体長、遊泳速度により個々の魚を識別し、移動遊泳ベクトルを求めるためには毎秒10フレーム以上の動画像を用いる必要がある。本実証実験では4台のカメラを海中に設置し、カメラの映像を Full-HD 画質、毎秒30フレームで映像を伝送することを目標とした。必要な伝送速度は約28Mbpsであるが、一般的な公衆LTE回線のUplink実行速度では不足、あるいは安定した映像伝送が難しい。一方、無線回線を専有できるローカル5Gでは、この伝送速度以上で常時安定した通信を行うこと (可用性を確保すること) が可能である。

生け簀からカメラ映像を伝送する場合の無線回線では、陸上移動通信とは異なる変動特性を考慮し、マージンとして織り込んでおく必要がある。本実証実験においても、BBUやRRUの機器設定、アンテナ

ナの偏波面等を調整するなど、パラメータの最適化を行った。

遊魚測定装置から生け簀内のカメラにネットワーク経由でアクセスする際に、いわゆる NAT<sup>\*9</sup> 越えの問題がある。図 2 において、送受信端末は NAT 装置として機能するため、端末を境界点として以下の 2 つのネットワークセグメントに分割される。

① WAN 側ネットワークセグメント(ローカル 5G システム側)

② ローカルネットワークセグメント(カメラ側)

通常のインターネット接続でも見られるこのセグメントの分割において、②側から①側への通信に特別な設定は必要ない。しかし、①側に設置された遊魚測定装置から②側にある各カメラへ通信を開始することは、本実証実験のシステム構成におけるネットワークの仕様上そのままではできない。このように NAT に起因する通信の一方通行を解決することを NAT 越えという。NAT 越えにはいくつかの手法が考えられるが、本実証実験では送受信端末にポートフォワーディング<sup>\*10</sup> 設定を追加することにより、NAT 越えを実現している。

なお、実証実験委託における取り決めにより、本稿での詳細な機器設定情報の開示は控えている。

## 5.2 映像伝送試験結果

満潮時、干潮時を含む長時間の映像伝送試験において、通信帯域の大きな変動や瞬断は確認されず、当社が構築したローカル 5G システムを介して高画質な映像を安定して伝送することができた(写真 4)。生け簀内の水中カメラから遊魚測定装置



写真 4 生け簀内のカメラ映像

\*9 NAT(Network Address Translation):プライベート IP アドレスをグローバル IP アドレスに変換する技術

\*10 ポートフォワーディング:特定のポート番号宛てに届いたパケットをあらかじめ設定しておいた LAN 側の機器に転送する機能

へ送られた映像は、魚数カウント・活性状態など遊魚測定装置の解析に有用なレベルであった。

## 6. む す び

本実証実験を通じて、システムの有用性を確認した。同時に洋上生け簀上における電波伝搬特性のデータ取得に成功し、無線回線設計手法を確立するための貴重な知見を得られた。

ここで得られた知見は、ローカル 5G システムの用途として、洋上での使用を目的としたユースケースを広げ、様々な分野の IoT 化の促進に活用していく。

当社のローカル 5G システムへの取り組みは、機器・システムの開発だけでなく、ユーザーの視点に立ったコンサルティングサービス<sup>(5)</sup>やアプリケーション展開まで、トータルソリューションを提供していく。

## 謝 辞

本稿発表に際し、本件実証実験を主導して頂いた愛媛大学小林教授ならびにコンソーシアムメンバーの皆様、ご支援いただいた総務省および四国総合通信局のご担当者様、その他ご協力いただいた皆様に感謝御礼申し上げます。

## 文 献

- (1) YK-004 無線通信の電波伝搬:移動伝搬理解とシミュレーション技法の壺  
[http://www.radio3.ee.ucc.ac.jp/ronbun/TR-YK-004\\_Propagation.pdf](http://www.radio3.ee.ucc.ac.jp/ronbun/TR-YK-004_Propagation.pdf)
- (2) 電波伝搬ハンドブック(1999 細矢良雄他, リアライズ社)
- (3) デジタル移動通信の電波伝搬基礎(2016 改訂版 唐沢好男, コロナ社)
- (4) 無線通信の電波伝搬(1992 進士昌明, 電子情報通信学会)
- (5) 電気興業プレスリリース, [https://www.denkikogyo.co.jp/topics/pdf/release\\_201023.pdf](https://www.denkikogyo.co.jp/topics/pdf/release_201023.pdf)

## 付 録

本実証実験についてのメディア報道実績を表 2 に示す

表 2 メディア報道実績

テレビ	NHK 松山放送局	2020 年 10 月 27 日
テレビ	あいテレビ	2020 年 10 月 27 日
テレビ	テレビ愛媛	2020 年 10 月 28 日
テレビ	NHK 松山放送局	2020 年 11 月 13 日
テレビ	あいテレビ	2020 年 11 月 18 日
テレビ	愛媛朝日放送	2020 年 11 月 19 日
テレビ	南海放送	2020 年 11 月 20 日
テレビ	NHK 松山放送局	2020 年 12 月 16 日
新聞	日刊水産経済新聞	2020 年 7 月 21 日
新聞	愛媛新聞	2020 年 10 月 28 日
新聞	日刊工業新聞	2020 年 10 月 30 日
新聞	日本経済新聞	2020 年 12 月 2 日
新聞	毎日新聞	2020 年 12 月 31 日
新聞	電波新聞	2021 年 2 月 2 日
新聞	水産タイムス	2021 年 2 月 8 日
新聞	水産新聞	2021 年 2 月 8 日
雑誌	愛媛経済レポート	2021 年 2 月 1 日号
雑誌	養殖ビジネス	2021 年 4 月号

## 協力・監修

### 小林 真也 工学博士(大阪大学)

国立大学法人愛媛大学 大学院理工学研究科電子情報工学専攻 兼 南予水産研究センター 教授  
 1991年3月大阪大学 大学院 工学研究科 通信工学専攻 博士後期課程修了 工学博士号取得。  
 主な研究分野は分散処理システム。  
 金沢大学ほか多数の学校法人での教員活動を歴任。  
 1999年4月愛媛大学助教授に就任。  
 2004年4月同教授に就任。  
 2018年4月より現職。  
 電子情報通信学会, 情報処理学会など多数の学会で活動中。  
 2017年6月総務省 情報通信月間 情報通信月間推進協議会会長表彰 情報通信功績賞  
 2019年1月総務省 5G 利用アイデアコンテスト 総務大臣賞受賞。  
 2019年6月総務省 令和元年度「電波の日・情報通信月間」四国総合通信局長表彰。  
 2020年4月総務省公募「令和2年度予算 IoT の安心・安全かつ適正な利用環境の構築 (IoT 利用環境の適正な運用及び整備等に資するガイドライン等策

定)」に愛媛県・株式会社 NTT ドコモ・電気興業株式会社とのコンソーシアムで参加し、採択される。テーマ名「洋上を現場とする IoT 機器・サービス実現のための電波特性試験調査」。本実証実験において、全国で初の洋上におけるローカル 5G 実験局免許を受ける。

☆☆



**藤田 正人**  
 平成 13 年入社  
 ワイヤレス研究所  
 ローカル 5G システム開発に従事  
 電子情報通信学会会員



**三塚 正博**  
 平成 31 年入社  
 ワイヤレス研究所  
 ローカル 5G システムの開発に従事



**鈴木 裕介**  
 令和 2 年入社  
 ワイヤレス研究所  
 移動通信アンテナ開発及びローカル 5G システムの開発に従事



**富山 徹**  
 令和元年入社  
 営業企画部



**重見 明弘**  
 令和元年入社  
 支店統括部 広島支店 四国営業所



**小林 真也**  
 愛媛大学  
 電子情報通信学会・IEEE 会員  
 教授・博士(工学)