

5Gの発展に向けた実証実験の取組み

ネットワークイノベーション研究所

ぎしやま 岸山	よしひさ 祥久	きたやま 来山	だいすけ 大祐
すやま 須山	さとし 聡	ほかぞの 外園	ゆうき 悠貴

5Gはすでに世界的に商用導入が開始され、今後は2020年代における5Gのさらなる発展としての5G evolutionの研究開発が必要である。本稿では、5G evolutionにおける重要課題の1つである「ミリ波無線技術のさらなる発展」に関連する3つの実証実験の取組みについて内容を解説する。

1. まえがき

第5世代移動通信システム（5G）はすでに世界的に商用導入が開始され、ドコモでも2020年3月より商用サービスを開始している。その一方で、5Gに対する課題や、5Gへのさらなる期待も見出されており、2020年代における5Gのさらなる技術発展に向けた研究開発が必要である。ドコモでは、2017年頃から5Gの高度化（5G evolution）および6Gに向けた要求条件の検討を開始し [1]、2020年1月には、6Gに向けた技術コンセプト（ホワイトペーパー）を公開した [2]。さらに、5G evolutionに向けた実証実験についても、いくつかの取組みを進めている。本稿では、5G evolutionにおける重要課題の1つで

ある「ミリ波^{*1}無線技術のさらなる発展」に向けた取組みとして、5Gの周波数帯である28GHz帯を用いた伝送実験、具体的には、メタサーフェス^{*2}反射板によるカバレッジ改善実験 [3] [4]、東海道新幹線における5G高速移動実験 [5] [6]、および、水中ドローンを活用した漁場遠隔監視の実証実験 [7] [8] について解説する。

2. メタサーフェス反射板によるカバレッジ改善実験

ミリ波では、基地局（BS：Base Station）アンテナから移動局（MS：Mobile Station）が見通し外となる建物、樹木などの遮蔽物の陰をどのようにエ

©2020 NTT DOCOMO, INC.

本誌掲載記事の無断転載を禁じます。

本誌に掲載されている社名、製品およびソフトウェア、サービスなどの名称は、各社の商標または登録商標。

*1 ミリ波：周波数帯域の区分の1つ。30GHzから300GHzの周波数であり、5Gの周波数である28GHz帯を含めて慣習的にミリ波と呼ぶ。

*2 メタサーフェス：波長に対して小さい構造体を周期配置して任意の誘電率・透磁率を実現する人工媒質（メタマテリアル（*3参照））の一種で、構造体の周期配置を2次元とした人工表面技術。

リア化するかが課題となる。見通し外環境のエリア化および通信品質の改善に向けて、波長よりも小さい構造体を周期的に配置することにより構成されるメタマテリアル^{*3}／メタサーフェス技術が昨今注目されている [9]。この技術を反射板に適用する事により、反射波の伝搬方向およびビーム幅^{*4}を、反射板の設置方向／サイズによらず自由に設計可能となるため、ビル壁面などに設置し特定の方向に反射波を誘導できる。そこで、実環境において本技術の実証実験を行った。

2.1 実験概要

本実験では、文献 [10] と同じBS（エリクソン製）およびMS（インテル製）のビームフォーミング^{*5}を実装した28GHz帯5G伝送実験装置を用いた。CC（Component Carrier）^{*6}当りの実効帯域幅は90MHzであり、27.5GHzから27.9GHzにおいて4CCのキャリアアグリゲーション（CA：Carrier Aggregation）^{*7}を行った。上下サブフレーム^{*8}の時間比率は1：1とした。

メタサーフェス反射板の概念と本実験で用いたメタサーフェス反射板を図1に示す。本メタサーフェス反射板の製造はMetawave Corporationに協力いただいた。本メタサーフェスの単位セル^{*9}構造は基

板表面にパッチタイプの金属がパターン化されて貼り付けられており、裏面は一面金属で覆われている。裏面メタルを含む金属パッチの構造により共振周波数が決定され、この共振周波数の周辺で反射波の位相が大きく変化する。そのため、エリア構築をしたい周波数に対応した共振周波数を有する金属パッチパターンを中心に、基板内でパッチサイズを分布させる事により任意の反射波面を設計できる。

実験環境およびメタサーフェス反射板の入射／反射設計角度を図2に示す。東京都お台場地区の東京国際交流館屋上（設置高：37.4m）にBSアンテナを設置して実験を行った。本建物正面の道路は設置建物自身が遮蔽となって通信品質が劣化してしまうため、BSから見通しとなる位置にメタサーフェス反射板を設置し、メタサーフェス反射板からの反射波により建物正面道路に5Gエリアを構築する事を検証した。本検証で用いたメタサーフェス反射板は、垂直方向の入射角／反射角が約50度／30度となるように設計されており、メタサーフェス反射板の設置高は3.4mとした。また、十分な電力の反射波を形成するため、反射板のサイズは80×80cmとしているが、入射波を平面波^{*10}と仮定した場合、本開口面積では非常に狭いビーム（半値角^{*11}：約2～3度）が形成され構築エリアが細くなってしまうため、反

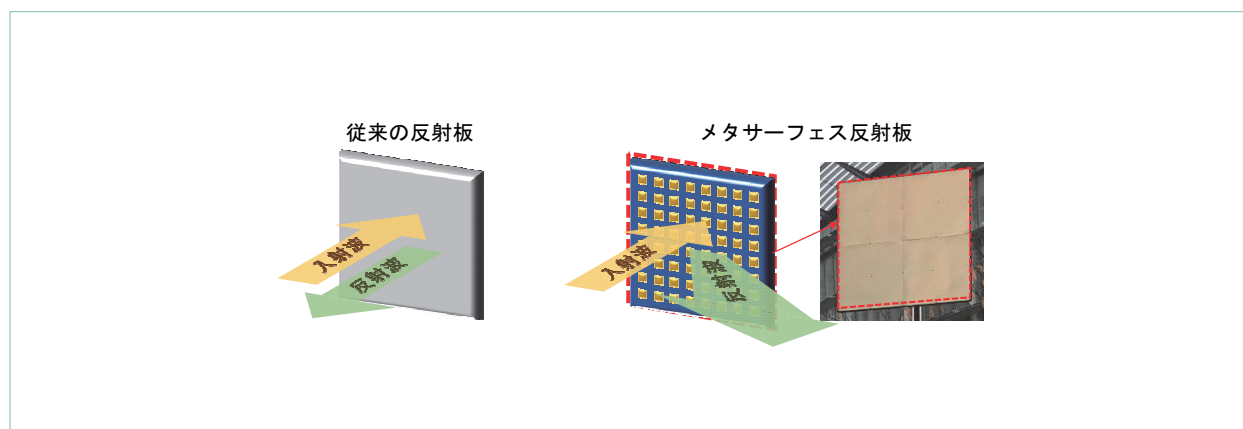


図1 従来の反射板とメタサーフェス反射板の概念図および本実験で用いたメタサーフェス反射板

*3 メタマテリアル：電磁波に対して自然界の物質にはない振舞いをする人工物質のこと。
 *4 ビーム幅：アンテナの最大利得から-3dB以内の利得をもつアンテナの放射角度。
 *5 ビームフォーミング：複数のアンテナの位相の制御によってアンテナに指向性パターンを形成し、特定方向に対するアンテナ

利得を増加／減少させる技術。
 *6 CC：CA（*7参照）において複数用いる周波数ブロックの1つひとつを表す用語。
 *7 キャリアアグリゲーション（CA）：複数の周波数ブロックを束ねることで広帯域化し、高速通信を可能にする技術。

射角だけでなく、反射波のビーム半値角も18度となるようにメタサーフェス反射板を設計している。

2.2 実験結果

MS車両を交流館前にて走行させて測定した受信

電力（BRSRP（Beam Reference Signal Received Power）*12）および下りリンク（DL：Downlink）のスループット特性の分布を図3に示す。メタサーフェス反射板を設置しない場合、建物正面は見通し外となるため、BRSRPは-70dBm（decibels

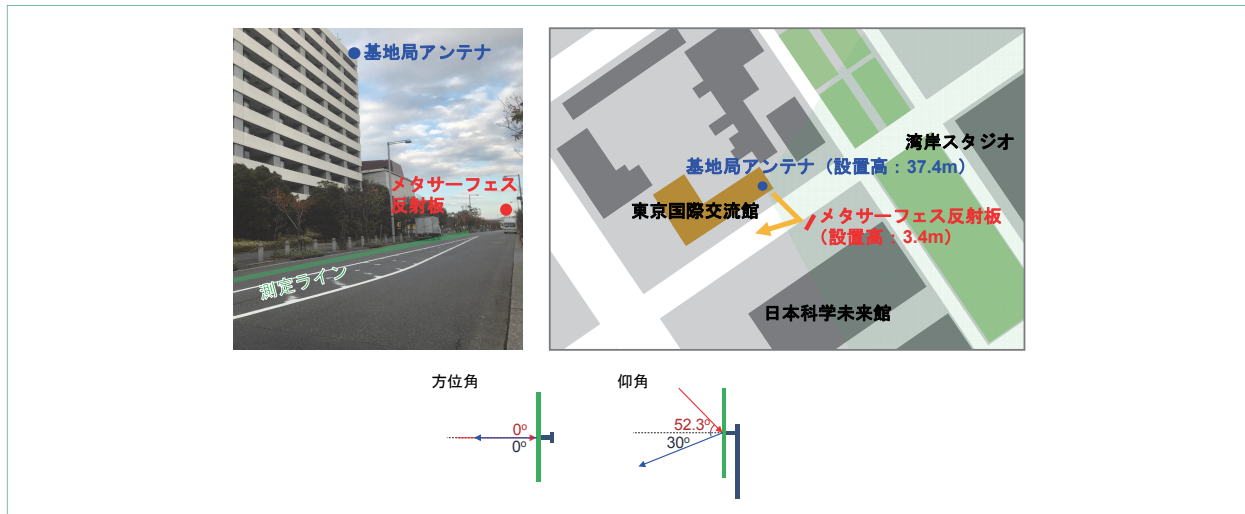


図2 メタサーフェス反射板の実験環境および反射板の入射／反射設計角度

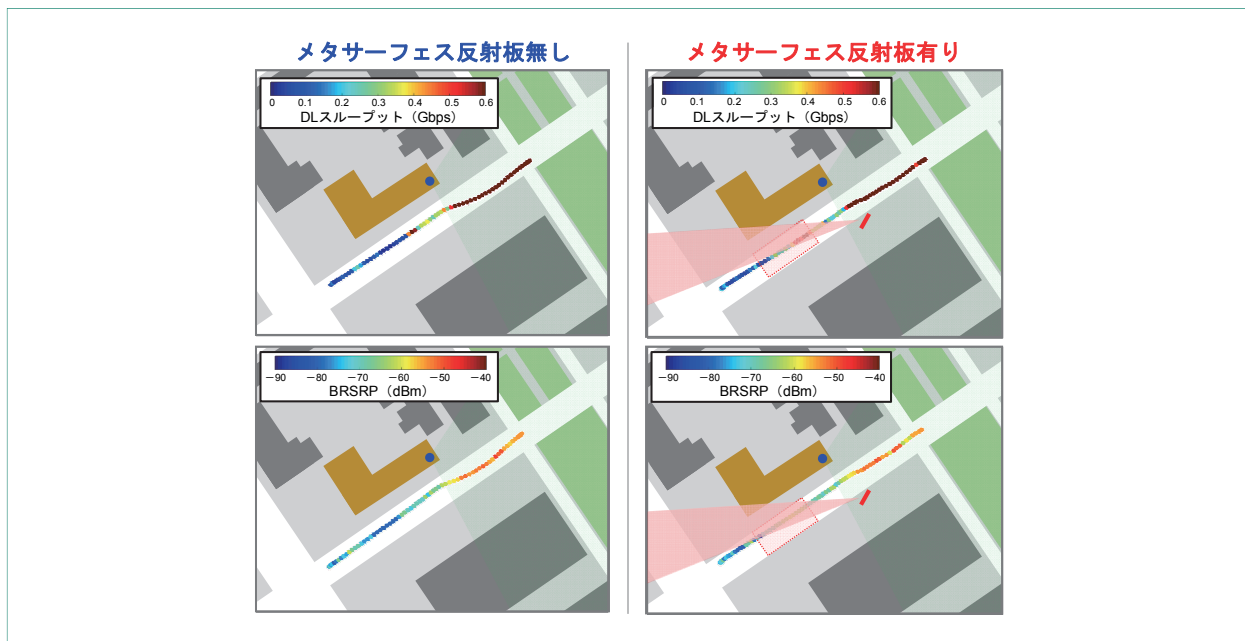


図3 受信電力およびDLスループットの分布

*8 サブフレーム：時間領域の無線リソースの単位であり、複数のOFDMシンボルから構成される。
 *9 セル：移動通信ネットワークのサービスエリアを構成するエリア分割の単位。
 *10 平面波：伝搬方向に垂直な平面内で電磁界の振幅と位相が一定となる電磁波のこと。

*11 半値角：アンテナから放射されている電力がその最大値から半分になるまでの角度範囲。指向性の鋭さを表す。
 *12 BRSRP：ビーム単位でのRSRP。RSRPとは移動端末で測定される参照信号の受信レベル。

milli)*¹³以下のレベルで推移しており、見通しエリア (> -50dBm) に比べて受信電力が大きく低下している。一方、メタサーフェス反射板を設置した場合、反射波によって建物正面に28GHz帯の電波が届くことによってBRSRPが改善し、スループット特性も向上していることが分かる。

MS車両の走行距離に対するBRSRPおよびDLスループットの変動特性を図4に示す。メタサーフェス反射板の設置により、建物正面エリアに相当する走行距離40mから75mまでの範囲にわたってBRSRPが向上しており、最大で約15dBの改善を確認した。また、スループットについても、同様の範囲で改善が見られ、最大で約500Mbpsの向上（反射板無：60Mbps ⇒ 反射板有：560Mbps）を実現できた。

3. 東海道新幹線における5G高速移動実験

ドコモは、5G evolutionに向けて、高速鉄道など

の高速移動環境においても、28GHzなどの高周波数帯を用いた高速通信が安定して提供できるように検討を進めている。低周波数帯に比べて高周波数帯ではドップラー周波数シフト*¹⁴が高くなり、加えて、新幹線などの高速鉄道環境では高速移動にともなうドップラー周波数シフトがさらに増大するため、特性劣化が懸念される。そこで、JR東海と共同で、ビーム追従機能を有した28GHz帯5G実験装置と東海道新幹線を時速283kmで走行するN700S確認試験車をそれぞれ用いて、2019年8月から9月に静岡県新富士駅付近で伝送実験を実施した。

3.1 実験概要

実験では東海道新幹線沿線に3台の5G実験用BSを、線路から約100m離れた道路に設置した。詳細な配置図を図5に示す。また、MSはN700S確認試験車内の客席の窓ガラス近傍に配置した。BS2とBS3の間となる約1,000~1,100m付近には樹木と河川があり、この周辺をMSが通過する際には見通し外環境とな

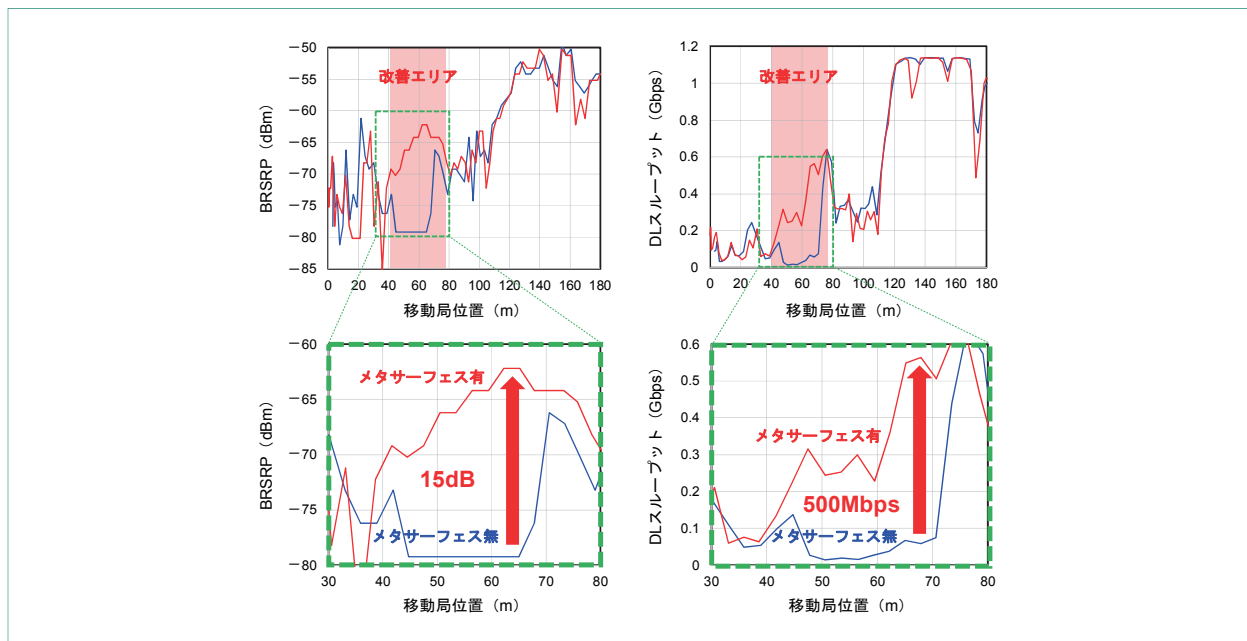


図4 受信電力およびDLスループットの変動特性

*13 dBm：電力P [mW] とすると $10\log(P)$ とした時の値。1mWを基準としたときの相対値（1mW = 0dBm）。

*14 ドップラー周波数シフト：ドップラー効果によって生じる搬送波周波数のずれ。

る。28GHz帯5G実験装置の帯域幅は700MHzであり、DLにおける最大データレートは3.3Gbpsとなる。各BSには48素子のアレーアンテナ*15が2つ、MSには32素子のアレーアンテナが2つ搭載され、それぞれビーム生成を行う。受信電力を最大にするBSおよびMSのビーム候補の組合せを10msごとに選択し、

ビーム追従を実現する。

3.2 実験結果

1回の走行において測定されたDLのスループット特性を図6に示す。約180m地点よりスループットが測定され、BS1の正面では最大約320Mbpsを達成し

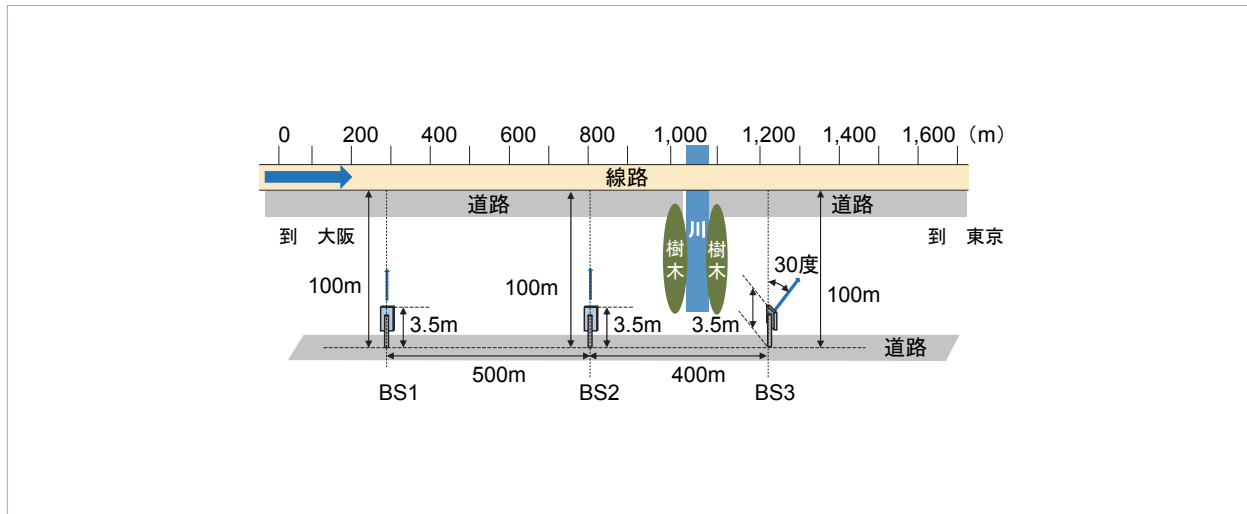


図5 BSの配置

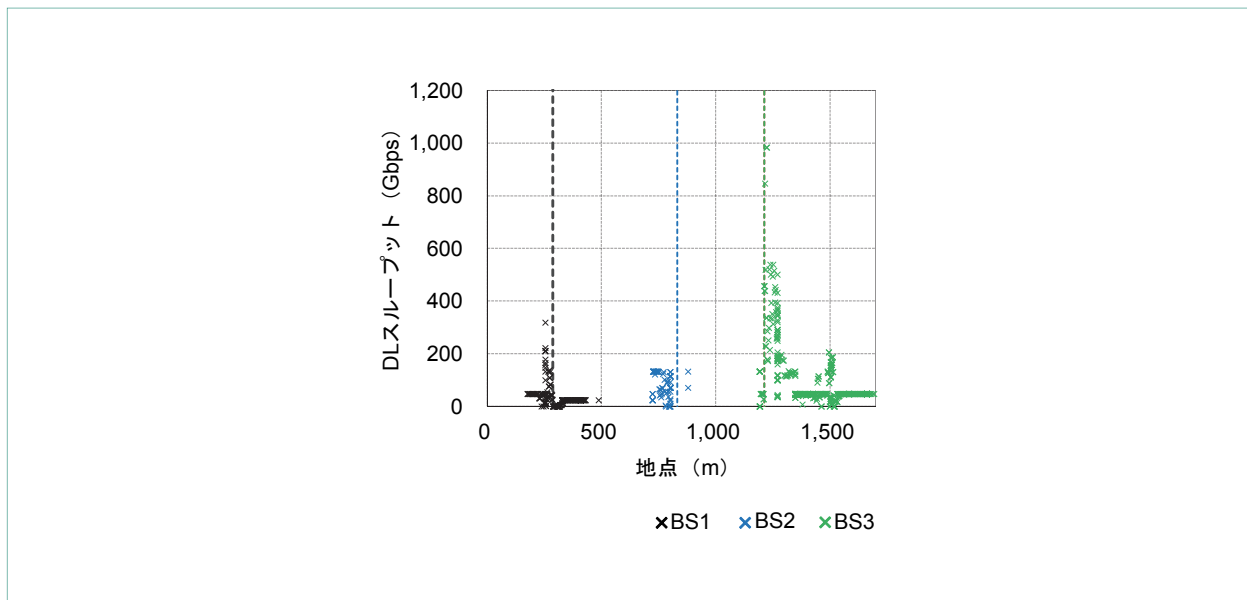


図6 DLスループット特性

*15 アレーアンテナ：複数のアンテナ素子を配列したアンテナのこと。

た。BS2では最大約170Mbpsのスループットが観測され、BS3の正面方向において最大980Mbpsのスループットが測定された後、1,700m付近まで50～200Mbpsが観測された。また、複数回の走行実験で得られた、MS移動速度別のDLスループットの累積分布関数（CDF：Cumulative Distribution Function）^{*16}特性を図7に示す。ただし、時速0～20kmのスループットは東海道新幹線沿線に平行な道路を車で走行したときの結果である。MSの移動速度が高くなるとスループットが劣化しており、これはドップラー周波数シフトが増大したためと考えられる。時速283kmの走行時におけるスループットの中央値^{*17}は約130Mbps、最大値は1.3Gbpsであり、高速移動鉄道環境においてもビーム追従ができれば28GHz帯を用いて1Gbpsを超える通信が可能であることが確認できた。

4. 水中ドローンを活用した漁場遠隔監視の実証実験

5G evolutionおよび6Gに向けた1つのチャレンジが、空・海・宇宙も視野に入れたカバレッジ拡張で

ある [2]。これによって、さらなる人・物の活動環境の拡大と新規産業の創出が期待できる。その中の「海」のユースケース例として、ドコモでは、5Gによる水中ドローンを活用した漁場遠隔監視の実証実験を東京大学と共同で行った [11]。

4.1 実験概要

実験構成を図8に示す。具体的には、海上に停泊させた小型船舶にMSを設置し、MS装置に有線で接続した水中ドローンをカキ養殖場のある海中へ入れる。水中ドローンのカメラで撮影した海中のフルHD映像を、陸上のBSに向けてULで無線伝送しつつ、並行してタイムラグのない水中ドローンの操縦信号をBSからMSに向けてDLで無線伝送する。船舶は、カキ養殖場のいかだ設置場所に合わせて基地局からおよそ150m離れた地点に停泊させた。なお、本実験では、2章の実験で用いたものと同じ28GHz帯5G伝送実験装置を用いた。

実験は広島県江田島市のやながわ水産で実施した。陸地に設置したBSと船舶に搭載したMSを陸地から撮影した様子を写真1に示す。実験時における陸地の海面からの高さは約3.0mであり、BSのアンテナ

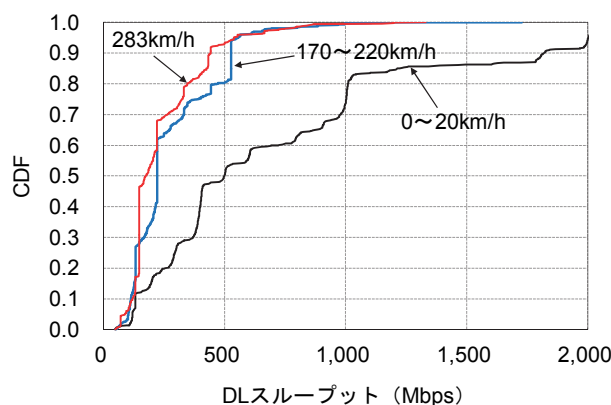


図7 MS移動速度別のDLスループットのCDF

*16 累積分布関数（CDF）：確率変数がある値以下をとる確率を表したもの。

*17 中央値：有限個のデータを小さい順（または大きい順）に並べたとき、真ん中に位置する値のこと。

高を約1.7m, 機械チルト*18を0度とした。一方, MSを船舶から撮影した様子を写真2に示す。MSのアンテナ高は約1.0m, 海面からは約2.0mとなるように調整した。水中ドローンは^{しんてき}臻迪日本株式会社のPowerRay [12] を利用した。

4.2 実験結果

本実験では, 5Gの産業利用における通信速度と通信の安定度とのトレードオフを考慮した評価をするため, 目標BLER (Block Error Rate)*19を0.1% (安定性重視) および10% (通信速度重視) に設定

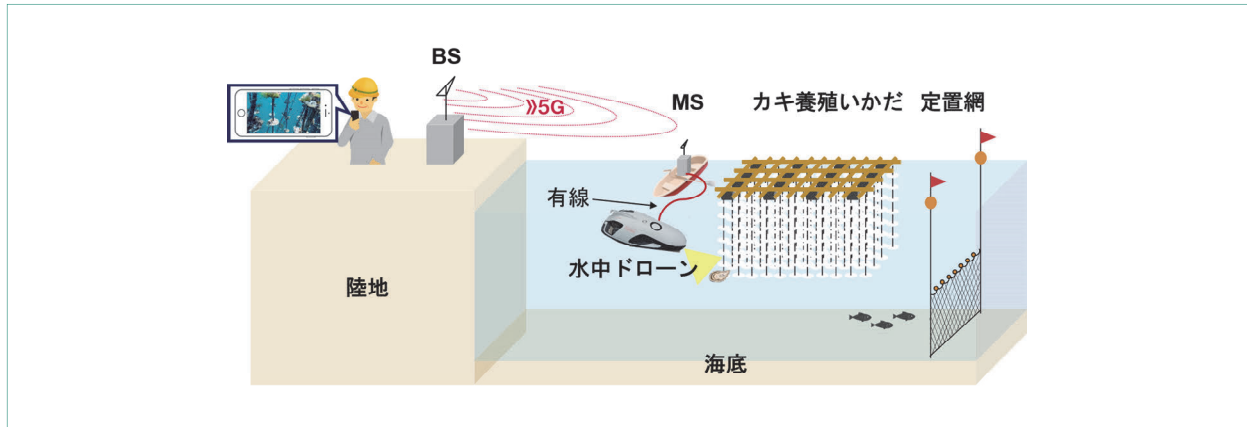


図8 漁場遠隔監視の実験構成



写真1 陸地に設置した5G基地局と船舶に搭載した5G移動局

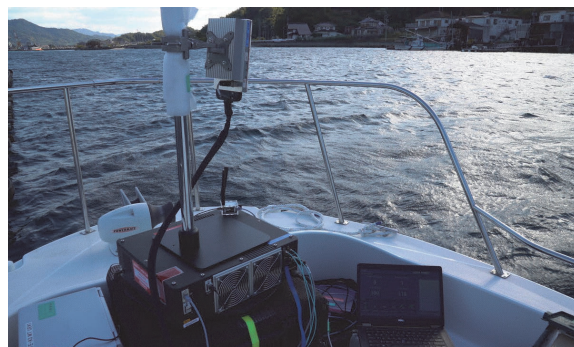


写真2 船舶のデッキ上の5G移動局

*18 チルト：アンテナから放射される電波の、最大放射方向の垂直面内における傾き角。

*19 BLER：送信データのブロック単位での誤り率。

して実験を行った。DLスループットのCDF特性を図9(a)に示し、下りMCS (Modulation and Coding Scheme) *20のCDFを図9(b)に示す。図より、DLスループットの変動は目標BLERを0.1%に固定した場合の方が小さいことがわかる。これは、船舶の揺れに対し情報誤りを抑えるために、MCSを低くする制御が行われるためである。一方、目標BLERが10%の場合、比較的高いMCSが選択されやすく、より良好なスループットが得られている。機体制御に必要な小容量のデータ伝送には、DLスループット特

性に対し数%オーダーの通信速度しか必要ないため、基本的には目標BLERを下げて通信の安定性を優先した方が望ましいと考えられるが、本実験の場合においては、目標BLERが10%のときであっても再送によってパケットロス*21が生じなかったため低遅延な機体制御が十分に可能であった。

目標BLERを0.1%および10%に設定した場合におけるULスループットのCDF特性を図10(a)に、上りMCSのCDFを図10(b)に示す。図より、ULスループットの変動は目標BLERを0.1%および10%に設定した

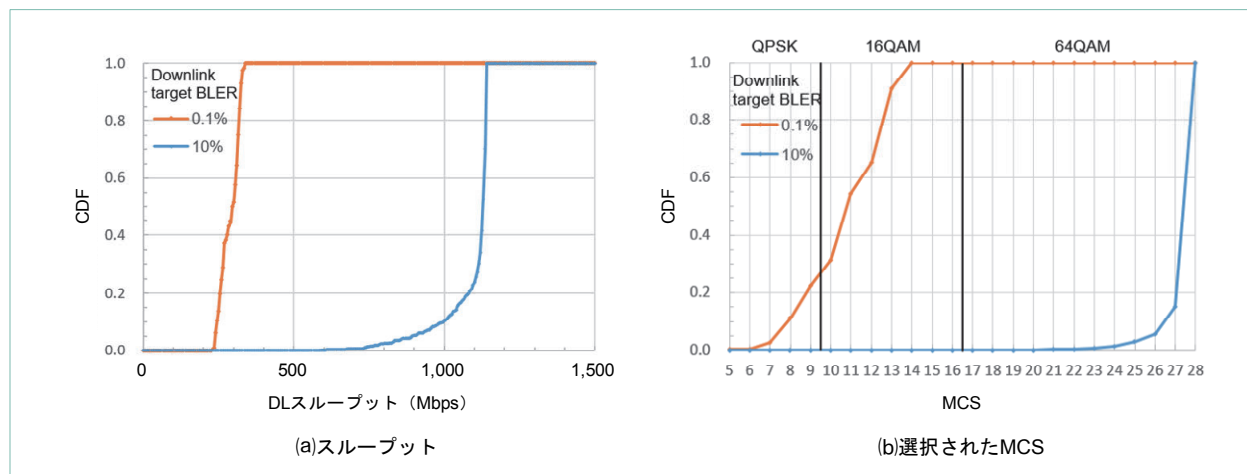


図9 目標BLERごとの下りリンクCDF特性

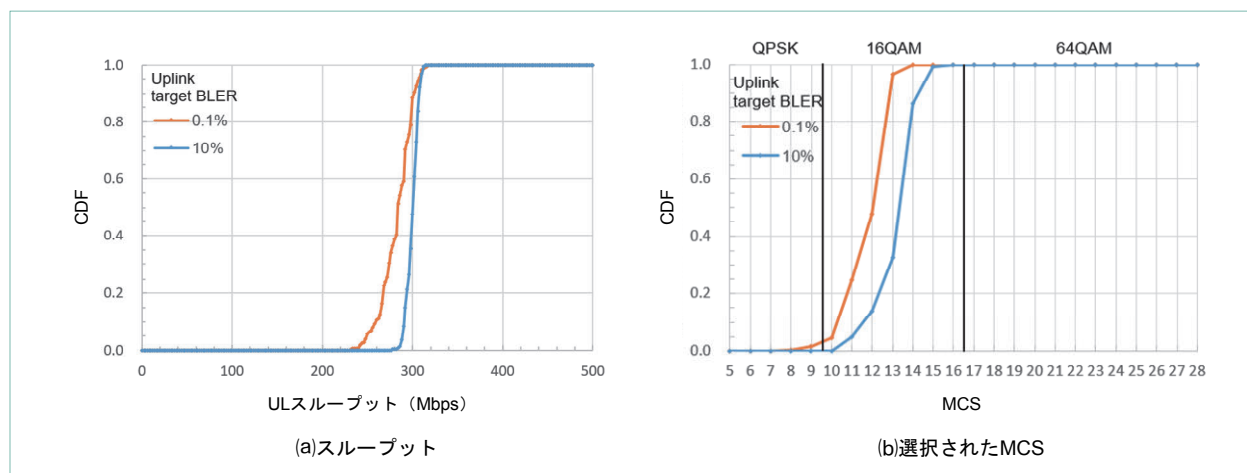


図10 目標BLERごとの上りリンクCDF特性

*20 MCS：適応変調を行う際にあらかじめ決めておく変調方式と符号化率の組合せ。

*21 パケットロス：情報誤りの発生や輻輳などにより、誤りのないデータパケットが宛先に届かないこと。

場合で大きな差はないものの、目標BLERが10%の場合の方がやや高いスループットが得られた。下りに比較して差が生じていない理由としては、本実験構成および実験装置において、上りでは高いMCSを選択するための十分な信号対雑音比（SNR：Signal-to-Noise Ratio）*22が得られなかったためだと考えられる。

上下リンクの目標BLERを10%に設定した場合において、水中ドローンで撮影したカキ養殖場の映像におけるキャプチャ画像を図11に示す。ユーザはフルHD映像を通じて高精細に海中の様子を確認しながら、タイムラグのない水中ドローンの操作を行うことができた。

5. あとがき

本稿では、5G evolutionにおける重要課題の1つである「ミリ波技術のさらなる発展」に向けた取組みとして、5Gの周波数帯である28GHz帯を用いた伝送実験、具体的には、メタサーフェス反射板によるカバレッジ改善実験、東海道新幹線における5G高速移動実験、および、水中ドローンを活用した漁

場遠隔監視の実証実験について解説した。今後も、5G evolutionにおいて、非陸上へのカバレッジ拡張や産業向けの高信頼・低遅延通信（URLLC：Ultra-Reliable and Low Latency Communications）機能の拡張などが標準化で検討されており、ドコモではこれら無線技術の実証実験に継続的に取り組んでいく予定である。

文献

- [1] 岸山 祥久：“Beyond 5G無線アクセス技術の初期考察,” 信学ソ大BS-2-2, Sep. 2017.
- [2] NTTドコモ：“ホワイトペーパー：5Gの高度化と6G,” Jan. 2020.
- [3] NTTドコモ報道発表資料：“世界初、メタマテリアル技術を適用した反射板による、28GHz帯の5Gエリア拡大の実証実験に成功,” Dec. 2018.
- [4] D. Kitayama, D. Kurita, K. Miyachi, Y. Kishiyama, S. Itoh and T. Tachizawa, “5G Radio Access Experiments on Coverage Expansion Using Metasurface Reflector at 28 GHz,” 2019 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC), pp.435-437, 2019.
- [5] NTTドコモ報道発表資料：“東海道新幹線における5G無線通信実験について,” Sep. 2019.
- [6] 野中 信秀, 村岡 一志, 奥山 達樹, 須山 聡, 奥村 幸彦, 浅井 孝浩, 松村 善洋：“新幹線を用いた高速移動



図11 5Gで伝送されたカキ養殖場の映像

*22 信号対雑音比（SNR）：雑音の電力に対する所望信号の電力の比。

- 環境における28GHz帯5G伝送実験,” 信学技報, RCS2019-264, Dec. 2019.
- [7] NTTドコモ報道発表資料: “5Gと水中ドローンを活用した漁場遠隔監視の実証実験に成功,” Nov. 2019.
- [8] 外園 悠貴, 南田 智昭, 油川 雄司, 杜 平, 中尾 彰宏: “5Gにおける28GHz帯を用いた水中ドローン遠隔制御実験,” 信学技報, NS2019-241, Mar. 2020.
- [9] M. D. Renzo, M. Debbah, D. Phan-Huy, A. Zappone, M. Alouini, C. Yuen, V. Sciancalepore, G. C. Alexandropoulos, J. Hoydis, H. Gacanin, J. Rosny, A. Bounceur, G. Lerosey and M. Fink: “Smart radio environments empowered by reconfigurable AI meta-surfaces: an idea whose time has come,” EURASIP Journal on Wireless Commun. and Networking 2019, No.129, May 2019.
- [10] D. Kurita, K. Tateishi, D. Kitayama, A. Harada, Y. Kishiyama, H. Murai, S. Itoh, A. Simonsson, and P. Okvist: “Indoor and Field Experiments on 5G Radio Access for 28-GHz Band Using Distributed MIMO and Beamforming,” IEICE Trans. Commun., Vol.E102-B, No.8, Aug. 2019.
- [11] 中尾 彰宏: “最新情報通信技術が切り開くDXによる地域創生,” 本誌, Vol.28, No.2, pp.4-7, Jul. 2020.
- [12] 臻迪日本株式会社: “PowerRay.”
<https://www.powervision.me/jp/product/powerray>
(available at Aug.2020).