

FTTHを代替する60GHz無線によるFWA

2024年7月19日

日本ケーブルラボ

本日の内容

1. 日本ケーブルラボ技術委員会における検討の背景
2. IEEE 802.11無線規格と802.11ad/ayの概要
3. 無線伝送性能評価結果
4. IPマルチキャストへの対応
5. ISP要求仕様への対応
6. まとめ

本日の内容

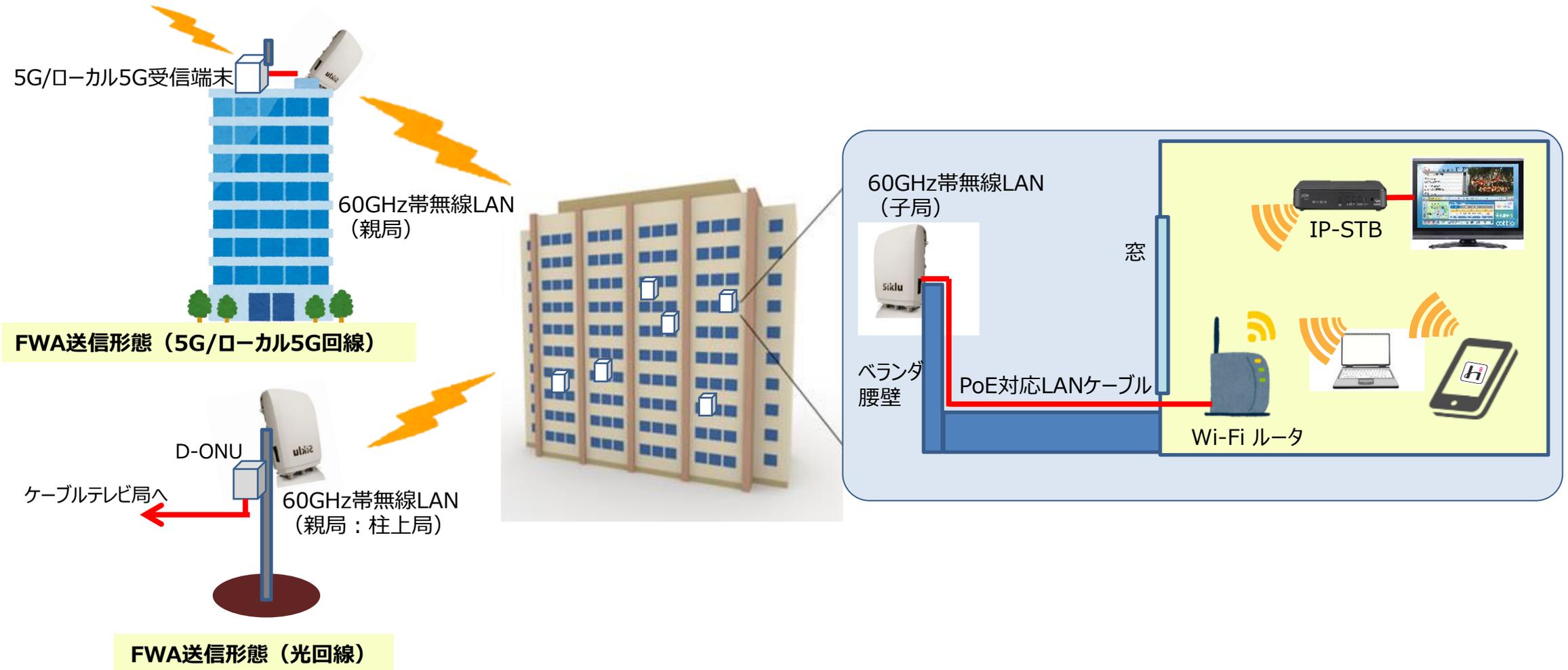
1. 日本ケーブルラボ技術委員会における検討の背景
2. IEEE 802.11無線規格と802.11ad/ayの概要
3. 無線伝送性能評価結果
4. IPマルチキャストへの対応
5. ISP要求仕様への対応
6. まとめ

日本ケーブルラボ技術委員会における検討の背景

- 日本ケーブルラボ技術委員会では、コスト等の理由で光ケーブルの敷設が困難なケースでの代替手段として固定無線アクセス(FWA : Fixed Wireless Access)の利用を検討
- 代表的なFWAとしてローカル5Gがあるが、基地局設備はいまだに高額であり、一定の加入者が見込まれない地域ではコスト回収が困難と見込まれる
- 5GではMBS(Multicast-Broadcast Services)の規格が策定され、IP放送に利用できる可能性もあるが、製品化の動向は見通せない
- ローカル5Gより安価なFWAソリューションとして、60GHz帯無線システム(802.11ad/ay)の評価を実施
- 想定されるユースケース
 - 光化が困難な集合住宅における高速インターネット通信の提供、IP放送の提供
 - 地理的・地形的にケーブルサービス提供が困難な地域へのサービス延伸（川越え等）

60GHz無線システムのFWAとしてのユースケース

- 光化が困難な集合住宅における高速インターネット通信の提供、IP放送の提供
- ケーブルテレビ局と60GHz親局との通信は、PONまたは5G/ローカル5Gによる接続
- ローカル5Gとは異なり、無線局免許は不要



本日の内容

1. 日本ケーブルラボ技術委員会における検討の背景
- 2. IEEE 802.11無線規格と802.11ad/ayの概要**
3. 無線伝送性能評価結果
4. IPマルチキャストへの対応
5. ISP要求仕様への対応
6. まとめ

IEEE 802.11無線LAN規格と60GHz無線

| 規格名 | 802.11a | 802.11b | 802.11g | 802.11n (Wi-Fi4) | 802.11ac (Wi-Fi5) | 802.11ax (Wi-Fi6/6E) | 802.11be (Wi-Fi7) | 802.11ad | 802.11ay | 802.11af | 802.11ah (Wi-Fi HaLow) |
|----------------|---------|---------|---------|---------------------|----------------------|------------------------------------|-------------------------|------------------|------------------------|---------------------------|------------------------------|
| 策定年月 | 1999.10 | 1999.10 | 2003.6 | 2009.9 | 2014.1 | 2021.2 | 2022.11 draft ver.3 | 2013.1 2016改定 | 2021.7 | 2014.2 | 2016 |
| 周波数帯 | 5GHz | 2.4GHz | 2.4GHz | 2.4/5GHz | 5GHz | 2.4/5/6GHz (6GHzは Wi-Fi6Eのみ) | 2.4/5/6GHz | 60GHz | 60GHz | VHF/UHF (ホワイトス ペース) | Sub1GHz (日 本:920MHz) |
| 変調方式 | OFDM | DSSS | OFDM | OFDM | OFDM | OFDMA | OFDMA | シングルキャリア | シングルキャリア /OFDM (OP) | OFDM(BPSK- 256QAM) | OFDM |
| CH幅 | 20MHz | 20MHz | 20MHz | 20/40MHz | 20/40/80/160 MHz | 20/40/80/ 160MHz | 20/40/80/ 160/320MHz | 2.16GHz | 2.16GHz | 6/7/8MHz | 1~16MHz |
| 最高速度 | 54Mbps | 11Mbps | 54Mbps | 600Mbps | 6.9Gbps | 9.6Gbps | 30Gbps以上 (予定) | 4.6Gbps | 277.2Gbps | 26.7Mbps (6MHz幅) | 86.7Mbps (Short-GI) |
| 空間多重 (MIMO) | なし | なし | なし | 1~4 | 1~8 | 1~8 | 1~16 | なし | 1~8 (日本:4) | 1-4 | 1(~4) |
| 通信距離 | 100m | 100m | 100m | 100m | 100m | 100m | 100m | 10m~ 数百m | 300m~ 1000m | 100~500m | 1km |

60GHz無線

60GHz無線システム (802.11ad/ay) 概要

802.11ad

- 2012年に標準化
- WiGig(Wireless Gigabit)とも称され、60GHz前後のミリ波帯の電波を利用して、最高7Gbpsの高速データ伝送を可能とする。
- 当初は、同じ室内で見通しの効く10m程度までの距離を接続する用途を想定
- その後、ビームフォーミングアンテナにより特定の方向との間で最大1kmを超える距離の伝送を可能とした

802.11ay

- 802.11ayは、IEEE 802.11adの後継規格として2021年に標準化
- 802.11adの無線通信方式にチャンネルボンディングとSU-MIMO (Single User-Multiple Input Multiple Output) を加えることで、11adから大幅な高速化を実現
 - 日本の周波数割り当てでは、チャンネルボンディングは最大4チャンネル
 - MIMO (空間ストリーム数) は1~8
- MCSに64QAMを追加。チャンネル・1ストリームあたりの最高速度はMCS21 (n/2 64QM Rate 7/8)のShort GIの時で、8662.5Mbps。
これに、チャンネルボンディング数4、MIMO数8 (8ストリーム) を適用すると、802.11ayのSCモードでの規格上の最高速度277.2Gbpsとなる

MCS : Modulation and Coding Scheme (変調符号化指数)

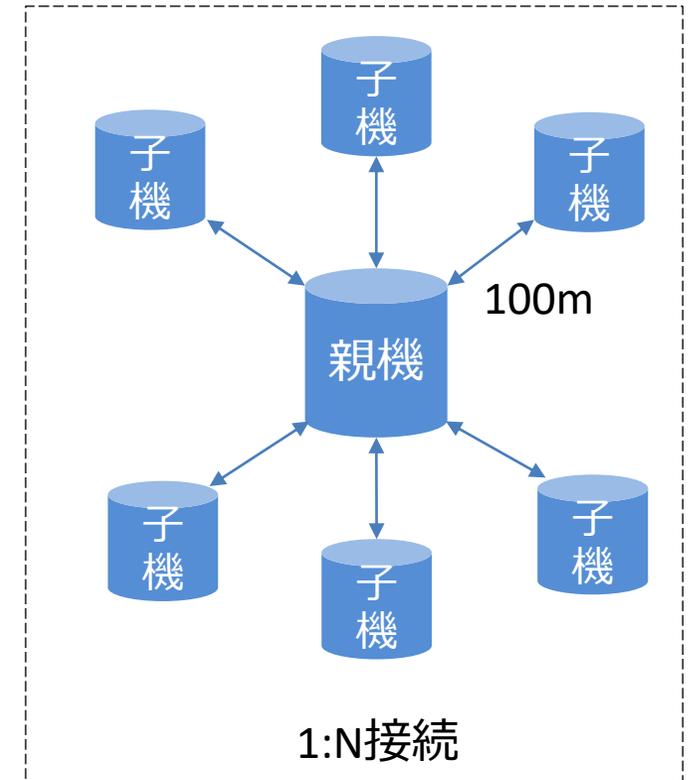
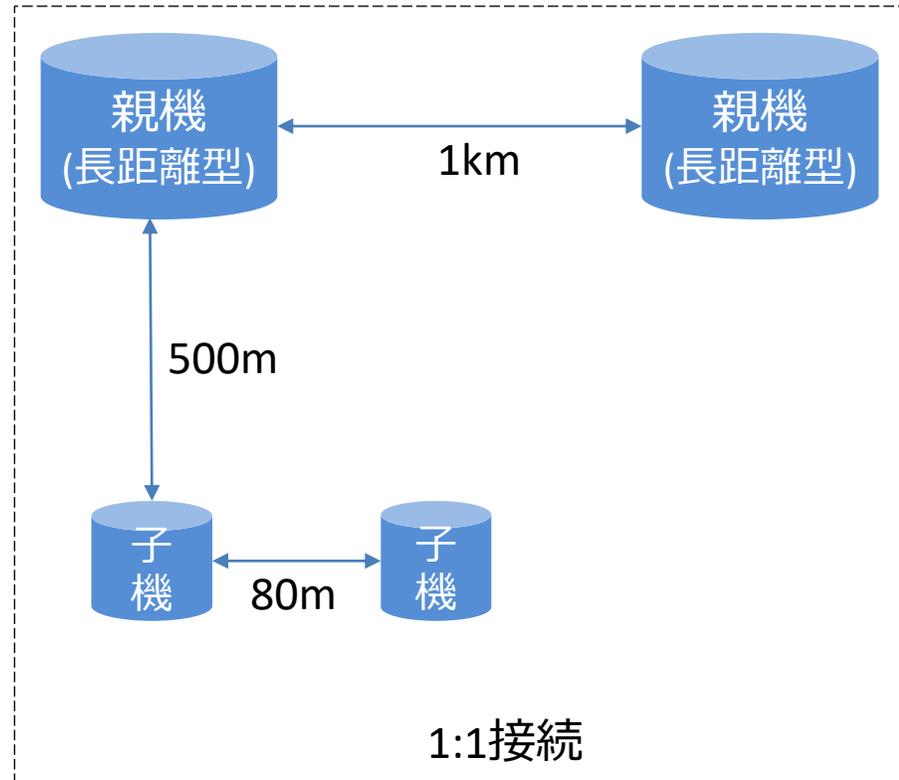
出典 : <https://businessnetwork.jp/article/8712/>等

802.11ad 諸元

| 項目 | 規格 | 詳細 |
|---------------|--|--|
| 無線周波数帯域 | 57.0～66.0GHz (日本) | |
| 周波数配置 | 2.16GHz帯域幅4波 (詳細はスライド8) | |
| 変調方式 | シングルキャリア(SC) (OFDMは2016の改定で廃止) | |
| MCS | 制御ch: (MCS0) $\pi/2$ -DBPSK R1/2 SC: (MCS1) $\pi/2$ -BPSK R1/2～(MCS12) $\pi/2$ -16QAM R 3/4 | スライド10: シングルキャリア(SC)のMCS (11ad) |
| 最大伝送速度 (Mbps) | SC: 4620Mbps (MCS12) (ヘッダー等を含む) | |
| 誤り訂正符号 | LDPC | |
| アクセス多重 | TDD (下りTDMA/上りTDMA) | フレーム構造はスライド9 |
| アクセス制御 | Directional MAC Protocol | |
| アンテナ | BF (Beam Forming)によるアンテナ指向性制御 | SLS (Sector Level Sweep)と呼ばれるプロトコルを用いてセクター内を水平方向にスイープし、子機への指向方向を確定する |

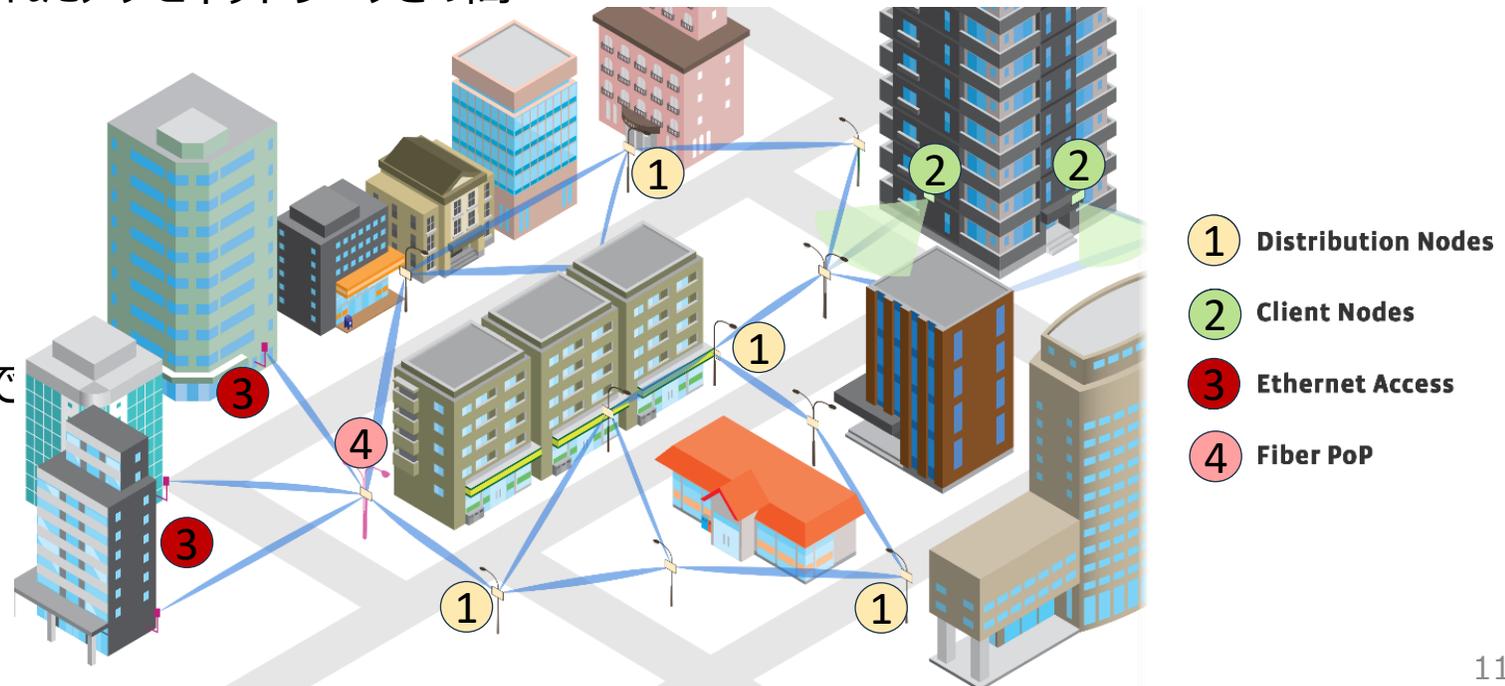
60GHz無線システム(11ad/ay)の接続形態

- 接続形態は1:1と1:Nがあり、伝送距離や接続形態により利用する機材を選択する必要がある
- 1:N構成装置の場合の伝送距離は数百メートル
- 長距離型(1:1接続)では伝送距離1km超
- 上り下りTDD (時分割Duplex)
- 最大実効スループット: 上り下り合計3800Mbps/セクター(MCS12)
- 無線局免許は不要



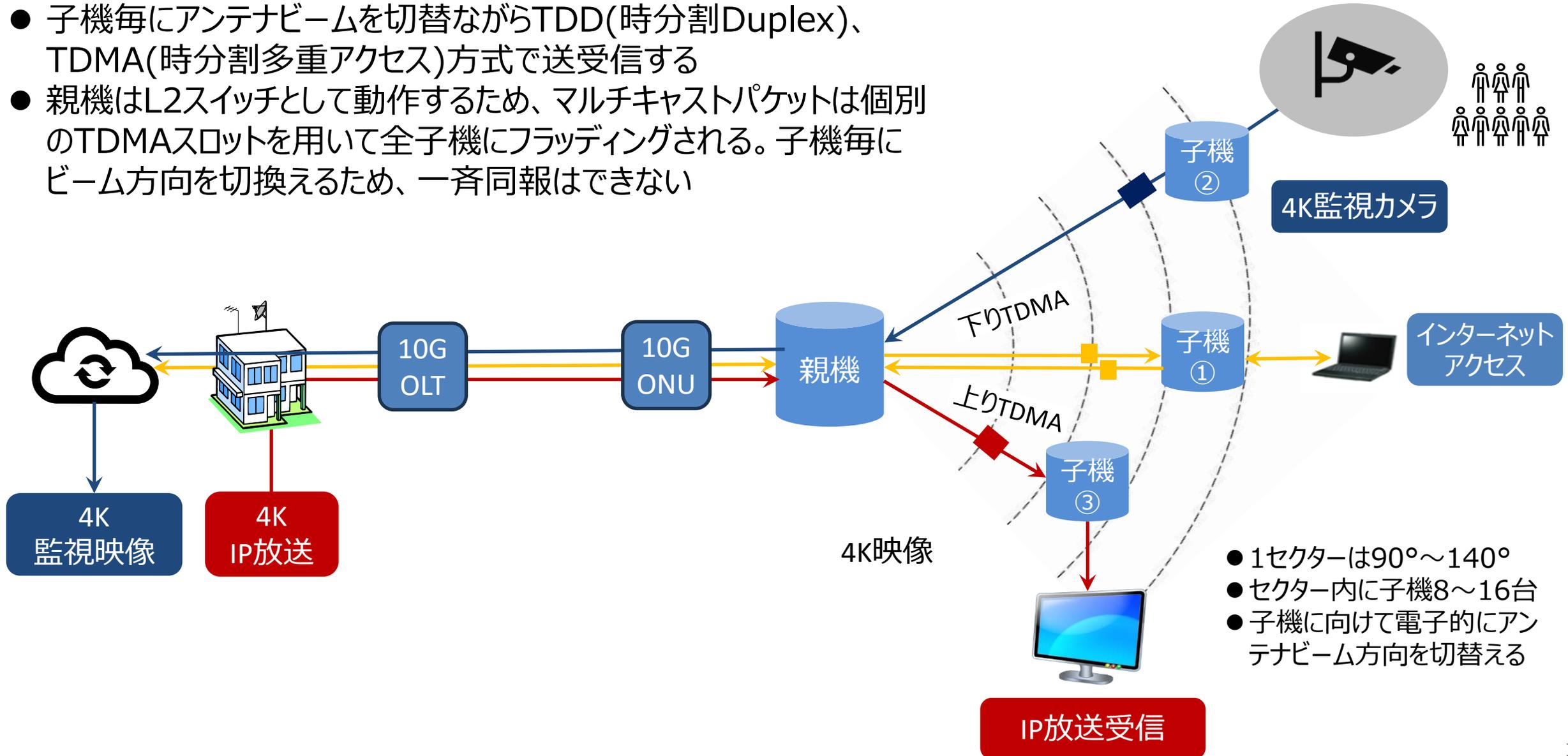
IEEE 802.11ayの拡張 : Terragraph

- Terragraphは、旧Facebook（現Meta社）が2016年に立ち上げたプロジェクト
- IEEE 802.11ay規格をベースとした技術仕様を策定
- 1Gbps超のマルチホップ通信が可能な無線機をビルの屋上や街灯等に設置し、光ファイバーを使わずにギガビットネットワークの構築が可能
- 主な特徴は、
 - 高速インターネット接続を可能にする 60GHzマルチノード ワイヤレス ソフトウェア デファインド ネットワーク (SDN)
 - 光ファイバーネットワークを増強および拡張するように設計された分散レベルネットワーク
 - 各ノードはL3ルータであり、ノードは、Open/R プロトコルによって提供されるルーティング情報を使用して、Terragraphネットワーク内および接続されたアクセネットワークとの間のトラフィックをルーティング
 - MACレイヤーはIEEE標準から大幅にスリム化
 - 無線機は、水平面と垂直面で電子的に操作可能なアンテナを使用 (Beamforming)
 - 街灯などの設備に、200~250m間隔で Distribution Node (DN)を設置し、加入者宅内のClient Node (CN)と接続



60GHz無線システム：指向性アンテナを用いるTDMAの特徴

- 子機毎にアンテナビームを切替ながらTDD(時分割Duplex)、TDMA(時分割多重アクセス)方式で送受信する
- 親機はL2スイッチとして動作するため、マルチキャストパケットは個別のTDMAスロットを用いて全子機にフラッディングされる。子機毎にビーム方向を切替えるため、一斉同報はできない



- 1セクターは90°~140°
- セクター内に子機8~16台
- 子機に向けて電子的にアンテナビーム方向を切替える

本日の内容

1. 日本ケーブルラボ技術委員会における検討の背景
2. IEEE 802.11無線規格と802.11ad/ayの概要
- 3. 無線伝送性能評価結果**
4. IPマルチキャストへの対応
5. ISP要求仕様への対応
6. まとめ

60GHz無線システム 無線伝送性能評価試験

- 60GHz無線システムをFWAとして利用する場合、ビーム指向性を考慮した親機と子局の配置が重要となる。
- 親機から見た子機の角度による無線性能の変動を評価するために、無線性能測定試験を実施
- 無線機のアンテナ指向性の範囲は機種により
 - 水平方向： $90^{\circ}(\pm 45^{\circ}) \sim 140^{\circ}(\pm 70^{\circ})$
 - 垂直方向： $\pm 15^{\circ}$ 、 $\pm 20^{\circ}(-10\text{dB})$ 等
- 試験では、立体駐車場を集合住宅と見立て、子機を1～3階に、親機を建物正面に配置した
- 測定項目
 - 親機・子機が取得するRSSI、MCS、PER、Beam Index
 - iperfによるスループットと遅延時間



試験結果

- 自動送信電力制御があるため、今回の親機-子機距離および角度範囲ではいずれの点でもFWAとして利用可能と判断
 - 距離15m点でのスループット中間値は800Mbps程度、ビーム端等の条件が悪い子機位置で300Mbps

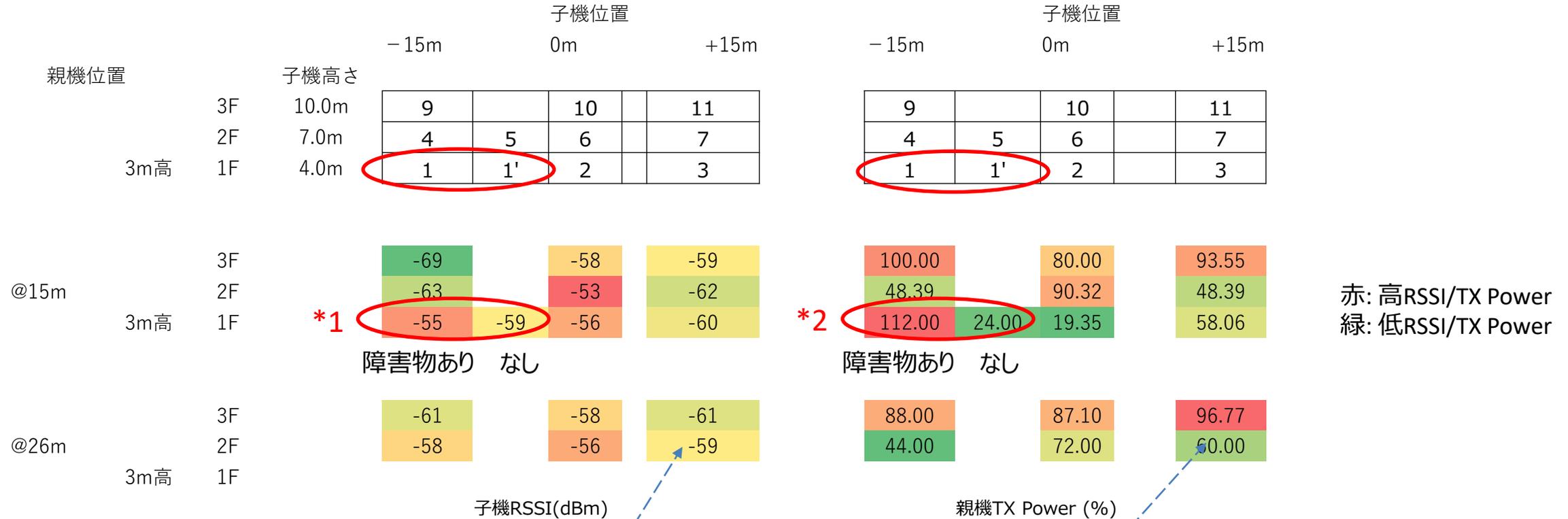
- 親機・子機の設置場所毎の子機RSSIと親機送信出力の関係（スライド13）
 - セル色は、RSSI/送信出力が高い程赤、低い程緑。
 - ビームの中心付近のRSSIが高く(赤)、周辺部で低くなる(緑)傾向

- 障害物がある場合でも送信パワーが自動調整され、400Mbps以上のスループットを確認
 - 位置[1]目前に盆栽、位置[1']障害物なし
 - $RSSI [1] = -55dBm > RSSI [1'] = -59dBm$
 - [1]より[1']のRSSIが高いのは送信電力自動調整の結果([1]の親機送信出力は非常に高値)

- 子機/親機のMCSは子機移動後、時間が経過するにつれて変化
 - 一定時間経過後、MCS=7で安定
 - その後、iperf試験を開始するとMCS=12（仕様上の最高MCS）に変化し、TX Powerが増加
Terragraph仕様では、トラフィック有無及びBLERによりMCS(⇒スループット)と送信電力を最適化

測定結果の例：子機RSSIと親機TX Power

- 障害物がない場所[1']よりもある場所[1]におけるRSSIが高いのは自動電力制御のため



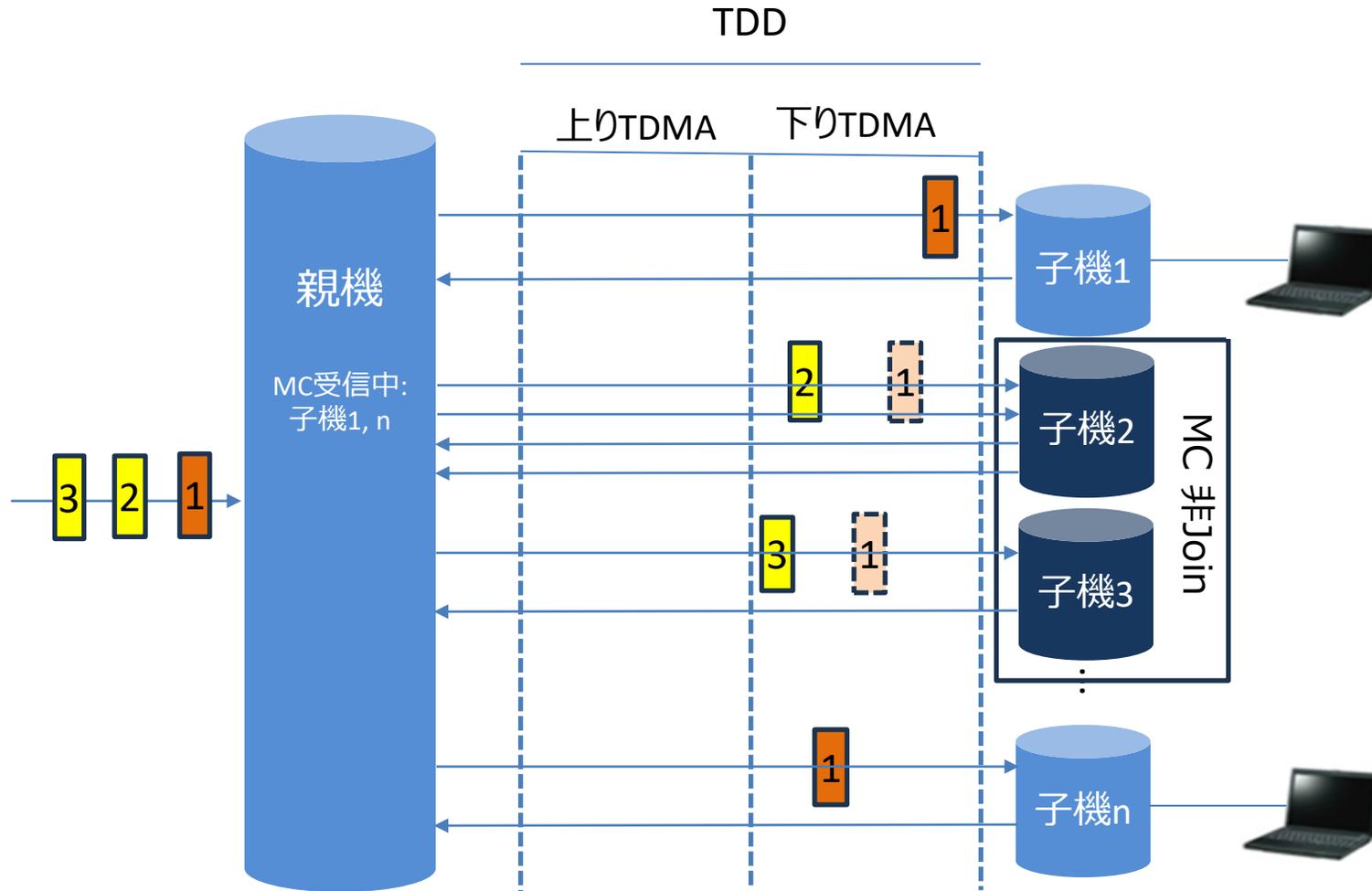
親機
管理画面

| LINK STATUS | | | | | | | |
|---------------|------|-----|--------------------------|--------------|-----|-------------|-------------|
| Link Name | RSSI | MCS | Channel | Tx Power (%) | PER | RX Beam Idx | TX Beam Idx |
| ● CATV-CN-POP | -59 | 12 | 4 (64800 MHz) @ 2160 MHz | 60.00 | 12 | 53 | 51 |

本日の内容

1. 日本ケーブルラボ技術委員会における検討の背景
2. IEEE 802.11無線規格と802.11ad/ayの概要
3. 無線伝送性能評価結果
- 4. IPマルチキャストへの対応**
5. ISP要求仕様への対応
6. まとめ

60GHz無線システム IPマルチキャストへの対応



UC : ユニキャスト
MC : マルチキャスト

1 L3 snoopingにより
配信停止

➤ 親機にL3機能はなく、L2スイッチとして動作するため、マルチキャスト(MC)パケットはMCにjoinしていない子機を含む全子機に配信(フラッディング)

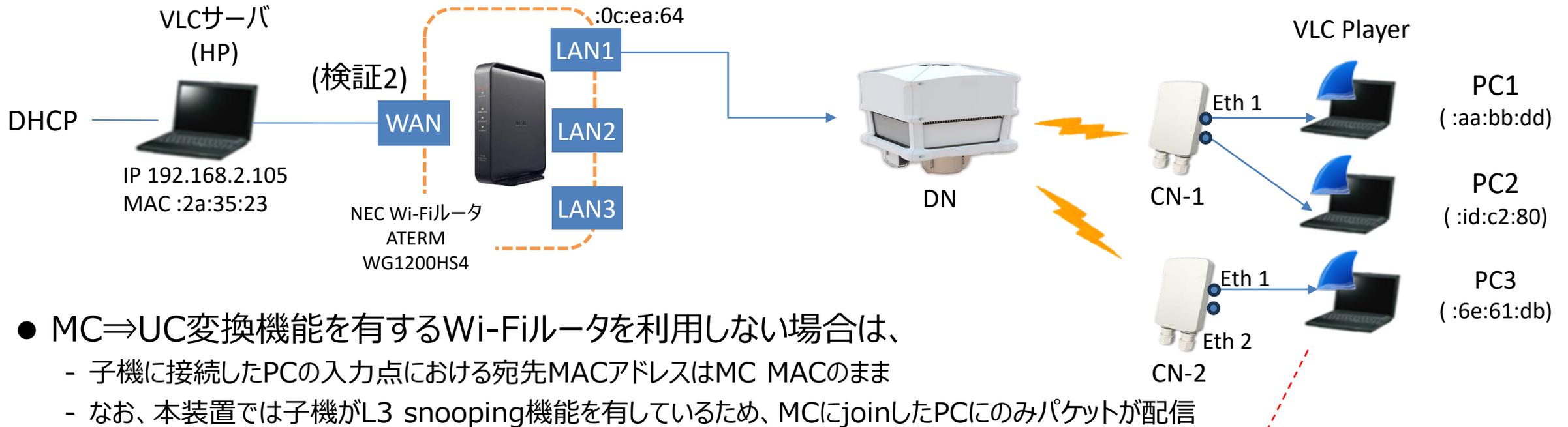
➤ この時、子機毎にビーム方向を切換えながら子機数分のTDMAスロットを占有するため、帯域利用効率が低下



➤ 親機にL3機能(snooping)を付加し、MCにjoinしている子機にのみマルチキャストパケットを配信することにより帯域利用効率の改善が可能

Wi-Fiルータによるユニキャスト変換試験

- 親機前段にMC⇒UC変換機能を有するWi-Fiルータを配置し、UC変換の効果を検証した
 - 親機入力点で、MCパケットが子機配下のPCのMACアドレスを宛先とするUCに変換されたことを確認
 - 子機出力点の宛先MACアドレスは、それぞれの配下のPCのMACアドレスであることを確認



- MC⇒UC変換機能を有するWi-Fiルータを利用しない場合は、
 - 子機に接続したPCの入力点における宛先MACアドレスはMC MACのまま
 - なお、本装置では子機がL3 snooping機能を有しているため、MCにjoinしたPCにのみパケットが配信

| | | | Src MAC | Src IP | Dst MAC | Dst IP |
|------|-----|-----|---------------------------------------|---------------|----------------------------------|-----------|
| CN-1 | PC1 | UDP | NECPlatf_0c:ea:64 (xx:xx:xx:0c:ea:64) | 192.168.2.105 | PC1_aa:bb:dd (xx:xx:xx:aa:bb:dd) | 232.1.1.1 |
| | PC2 | UDP | NECPlatf_0c:ea:64 (xx:xx:xx:0c:ea:64) | 192.168.2.105 | PC2_1d:c2:80 (xx:xx:xx:1d:c2:80) | 232.1.1.1 |
| CN-2 | PC3 | UDP | NECPlatf_0c:ea:64 (xx:xx:xx:0c:ea:64) | 192.168.2.105 | PC3_6e:61:db (xx:xx:xx:6e:61:db) | 232.1.1.1 |

本日の内容

1. 日本ケーブルラボ技術委員会における検討の背景
2. IEEE 802.11無線規格と802.11ad/ayの概要
3. 無線伝送性能評価結果
4. IPマルチキャストへの対応
5. ISP要求仕様への対応
6. まとめ

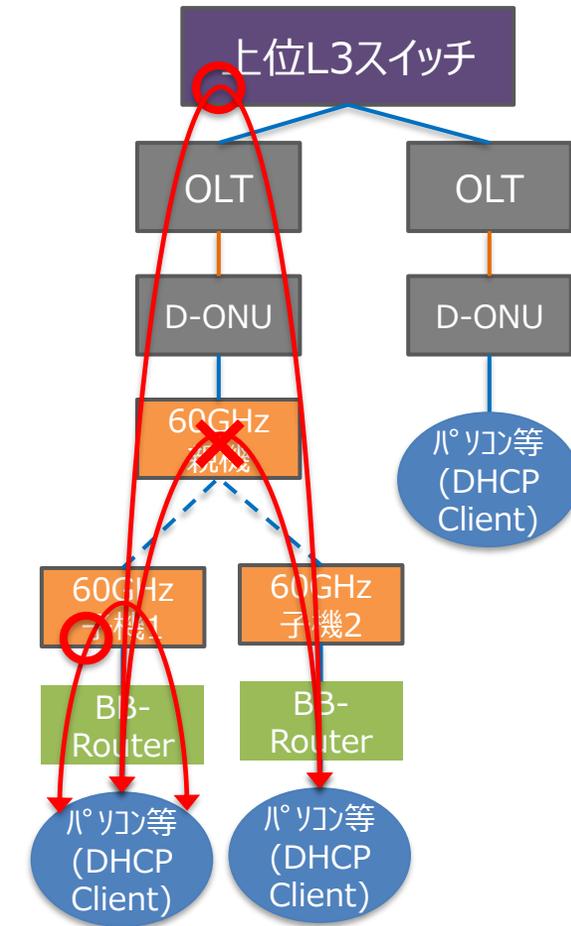
ISP要求仕様への対応

必須要件(MUST)

- トラヒック・セグメンテーション (右図)
 - ・ 異なる子機配下の端末間の通信を遮断する
 - ・ 汎用的なLANスイッチではPrivate VLAN等の呼び方で実装。ACL(Access Control List)で実装する場合もあり。
- IPアドレスからのユーザ・トレース
 - ・ 警察や裁判所から照会が届いた場合の対応に必要
 - ・ DHCPサーバでは棟単位 (ONU-MACアドレス、CPE-MACアドレスが判明)、
 - ・ 集合住宅親機でMacTable監視 (60GHz子機MACアドレス、CPE-MACアドレス、が判明) など

推奨要件(Should)

- QoS(DSCP)
 - ・ プライマリ電話を提供する場合は必須
 - ・ IP放送の優先度確保
- VLAN(IEEE802.1q)
 - ・ QoSの前提として必須
 - ・ 子機間通信の遮断(トラヒックセグメンテーション)にも利用可能
- IGMP/MLD snooping
 - ・ IP放送提供時には必要な機能



本日の内容

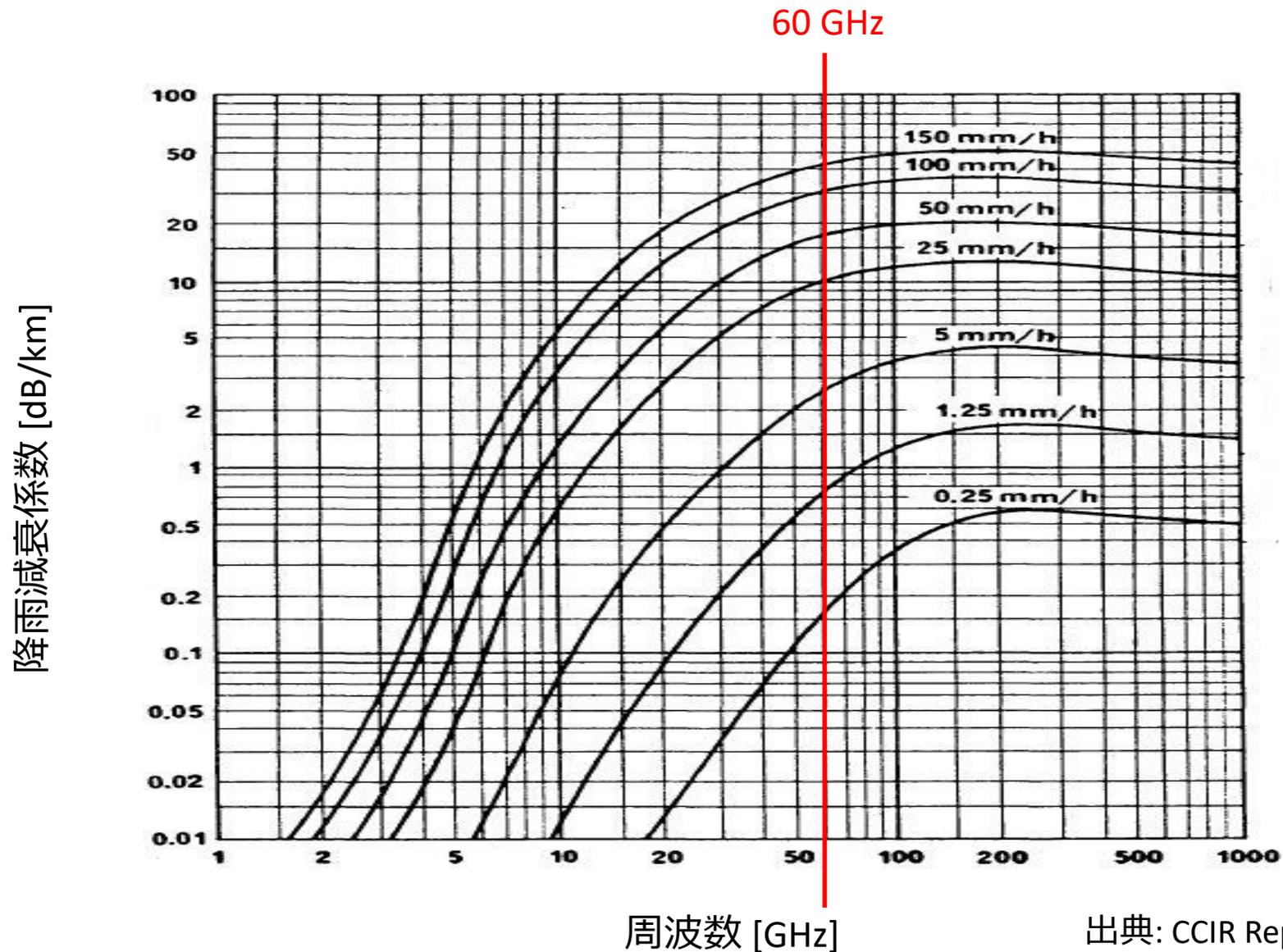
1. 日本ケーブルラボ技術委員会における検討の背景
2. IEEE 802.11無線規格と802.11ad/ayの概要
3. 無線伝送性能評価結果
4. IPマルチキャストへの対応
5. ISP要求仕様への対応
6. まとめ

まとめ

- 60GHz帯無線システム(802.11ad/ay)は数10m程度の距離では、数百Mbpsのスループットが得られ、FWAとして十分利用可能である。
- 一方、日本で購入可能な60GHz無線親機は、いずれもL3機能を有さないL2スイッチとなっているため、親機もしくはその前段装置においてL3 snoopingを行い、MCフレームを、joinしている子機の固有MACアドレスを有するUCフレームに変換することが帯域確保上安全である。
- ISP要求仕様への対応では、特にトラヒックセグメンテーションによる子機間通信の遮断が重要。60GHz親機の設定またはVLANでの対応が必要。
- 日本ケーブルラボにおける今後の作業として、以下を予定
 - より長距離や降雨時等における無線測定を行って60GHz無線システムの実用性を検証
 - IP放送を提供可能な装置機能や構成について検討

以下、参考資料

降雨減衰の影響

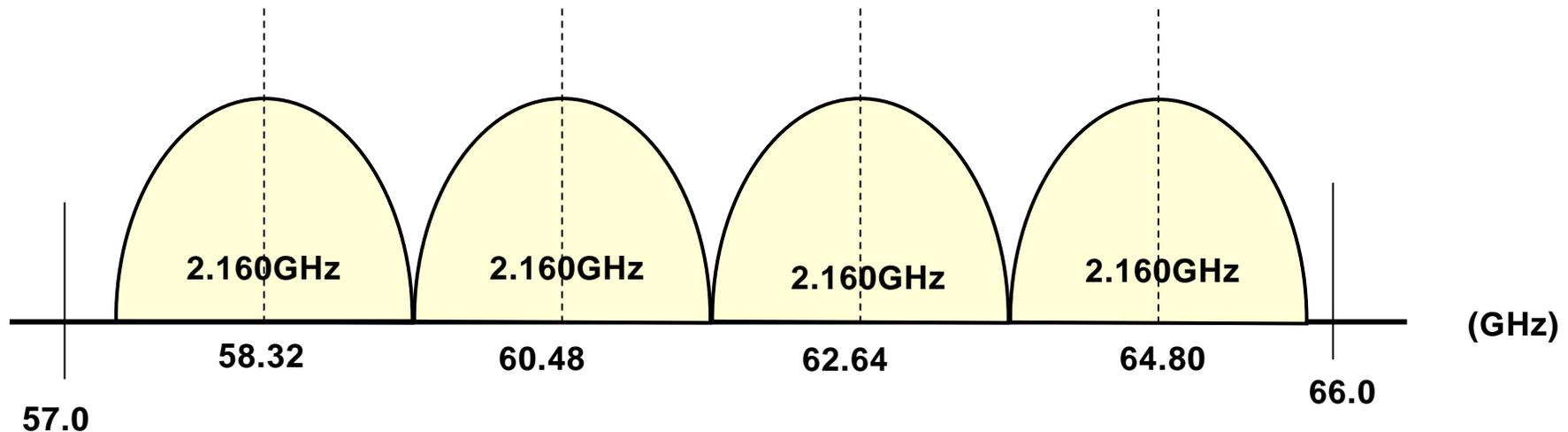


出典: CCIR Report 721-3 (1990)

802.11adの周波数割り当てとチャンネル配置



(a)周波数割当



(b)チャンネル配置

主要国における60GHz帯の周波数割当とIEEE802.ad / WiGigのチャンネル配置

802.11ad Single Carrier (SC) modeのフレーム構成

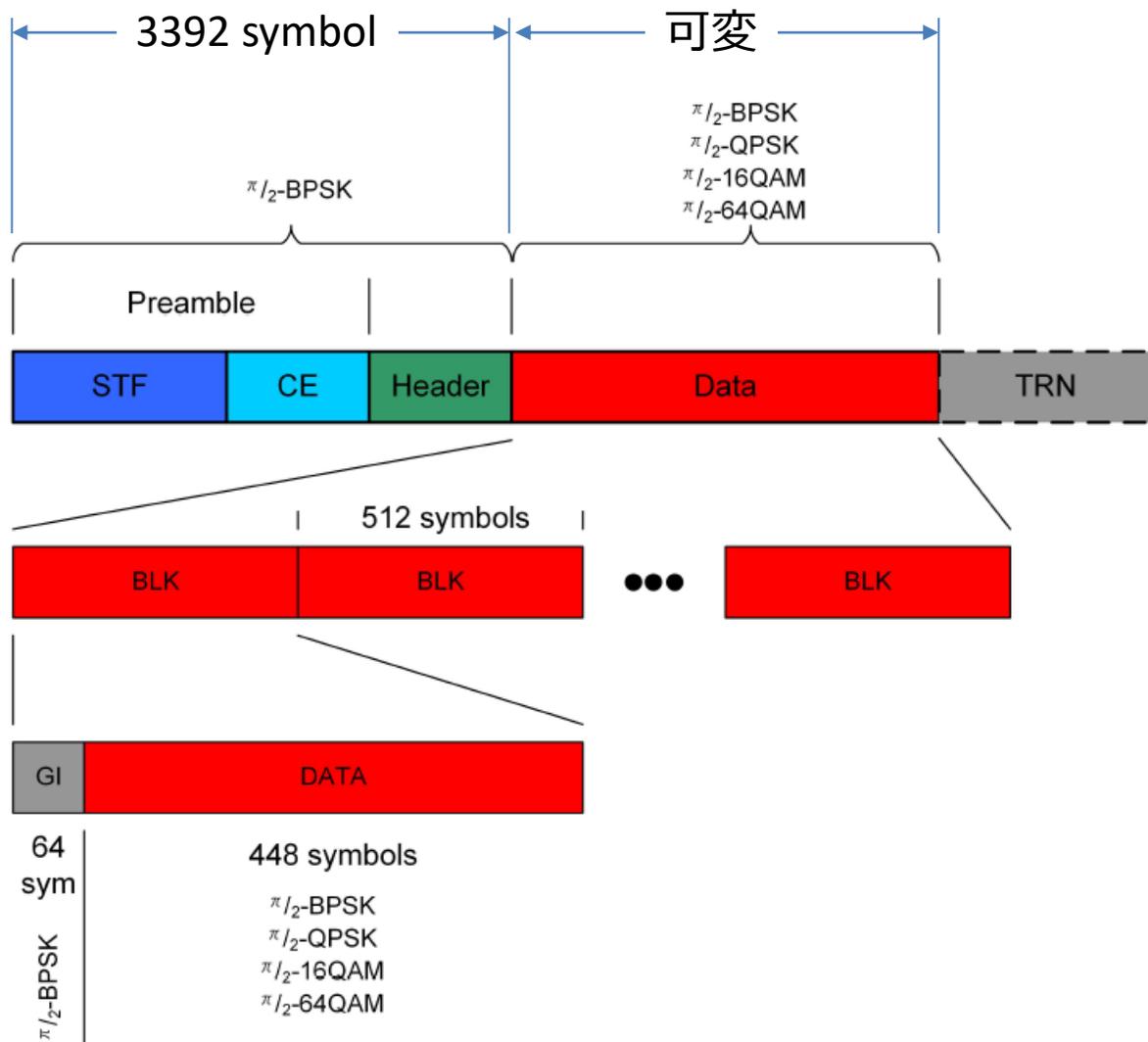


Figure 3-9: SC PHY data blocks: A data block is made up of 512 symbols (64 GI + 448 data).

- 11ad (Single Carrier mode)のフレームは3392シンボルの preamble/header部と可変長のDataフィールド、TRN (ビームおよびフォーミングのためのトレーニング信号) より構成
- Dataフィールドのシンボルレートは1,760[Msym/s]
- GIを考慮するとデータ部分シンボルレートは
 $1,760 \times (448/512) = 1,760 \times 0.875$
 $= 1,540[\text{Gsym/s}]$
- スライド9のData Rateは上記シンボルレート(1,540Msym/s)にシンボル当たりのビット数とCode Rate(誤り訂正用符号化率)をかけた値
 (MCS12の場合 : $1,540 * 4 * (3/4) = 4,620 \text{ Mbps}$)。
- 一方、カタログ上のデータ伝送速度はスライド10の80% (MCS12で3.8~3.6Gbps)となっている。Preamble/header分を除いたDataフィールドの実効的な伝送レートとなっていると思われる

802.11ad MCS (SC mode)と伝送レート

変調シンボル当たりのビット数
[bit/symbol]

通信路符号化率(R)

フレーム内のDataフィールドの送信時間
に対応する瞬間的なビットレートを示す

| MCS Index | Modulation | N _{CBPS} | Repetition | Code Rate | Data Rate(Mbps) |
|-----------|------------|-------------------|------------|-----------|-----------------|
| MCS-1 | π/2 BPSK | 1 | 2 | 1/2 | 385 |
| MCS-2 | π/2 BPSK | 1 | 1 | 1/2 | 770 |
| MCS-3 | π/2 BPSK | 1 | 1 | 5/8 | 962.5 |
| MCS-4 | π/2 BPSK | 1 | 1 | 3/4 | 1155 |
| MCS-5 | π/2 BPSK | 1 | 1 | 13/16 | 1251.25 |
| MCS-6 | π/2 QPSK | 2 | 1 | 1/2 | 1540 |
| MCS-7 | π/2 QPSK | 2 | 1 | 5/8 | 1925 |
| MCS-8 | π/2 QPSK | 2 | 1 | 3/4 | 2310 |
| MCS-9 | π/2 QPSK | 2 | 1 | 13/16 | 2502.5 |
| MCS-10 | π/2 16QAM | 4 | 1 | 1/2 | 3080 |
| MCS-11 | π/2 16QAM | 4 | 1 | 5/8 | 3850 |
| MCS-12 | π/2 16QAM | 4 | 1 | 3/4 | 4620 |

データ伝送のシンボルレート
=1540 [Msym/s]

Data Rate [Mbps]
= NCBPS × R × 1540 [Msym/s]

実効的なデータレートは
3800Mbps程度

ご清聴ありがとうございました



一般社団法人 日本ケーブルラボ

【住所】〒103-0025 東京都中央区日本橋茅場町3-4-2 KDX茅場町ビル3F

【電話】03-5614-6100

【交通】東京メトロ東西線、日比谷線「茅場町」駅より徒歩2分（日比谷線2番出口）