平成 28 年度　修士論文

MPEG-DASH を用いた 8K 放送番組再送信プラットフォームにおける映像配信品質に関する検討

早稲田大学大学院　基幹理工学研究科　情報理工・情報通信専攻

5115F053 – 6

原田　臨太朗

指導　甲藤 二郎　教授

2017 年 1 月 30 日

指導教授印	受付印

目次

第 1 章　序論 3

1.1　はじめに 3
1.2　研究目的 4
1.3　本論文の構成 4

第 2 章　関連技術 6

2.1　放送・通信連携プラットフォーム 6
2.2　映像配信技術 6
2.2.1　MPEG-DASH 6
2.2.2　ON-OFF Cycles 9
2.3　無線通信技術：デジタル変調 11
2.3.1　デジタル変調の基礎 11
2.3.2　ASK 13
2.3.3　PSK 13
2.3.4　QAM 15
2.3.5　OFDM 15
2.4　無線通信技術：IEEE802.11 (Wi-Fi) 16
2.4.1　CSMA/CA 16
2.4.2　IEEE802.11b/g/a 18
2.4.3　IEEE802.11n/ac 18
2.5　映像圧縮符号化技術：H.265/HEVC 21
2.6　映像走査技術 22
2.6.1　インタレース方式 22
2.6.2　プログレッシブ方式 23
2.7　映像品質評価技術 24
2.7.1　客観画質評価技術 24
2.7.2　主観画質評価技術 25

第 3 章　8K 映像に対応した放送・通信連携プラットフォームの提案 29

3.1　提案プラットフォームの概要 29
3.2　提案プラットフォームの詳細 30

第 4 章　配信品質に関する検討 32
4.1　配信品質に関するモデルの構築 32
4.1.1　再生バッファ制御に着目した複数端末への映像配信に関するモデル 32
4.1.2　可用帯域に関するモデル 36
4.1.3　提案プラットフォームにおける配信品質に関するモデル 37
4.2　実機実験 38
4.2.1　実験環境および評価指標 38
4.2.2　実験シナリオ 40
4.2.3　モデルの検証および配信品質の評価 42
第 5 章　映像品質に関する検討 51
5.1　評価対象映像 51
5.2　客観画質評価 52
5.3　主観画質評価 54
5.3.1　実験環境および評価指標 54
5.3.2　実験結果および考察 55
第 6 章　総括 57
6.1　まとめ 57
6.2　今後の展望 57
謝辞 58
参考文献 59
発表文献 62

第1章　　序論

1.1 はじめに

日本では，2018 年に放送衛星（Broadcasting Satellite; BS）を用いた 8K 映像の実用放送が開始される予定である[4]．8K 映像は，3300 万の画素（水平方向 7680 画素×垂直方向 4320 画素）を持つ超高精細映像[2]であり，この画素数は現行の地上波放送映像の 16 倍にものぼる．2016 年 8 月には日本放送協会（NHK）により 8K 映像の BS 試験放送が開始される[3]など，実用放送に向けた研究開発が進められている．

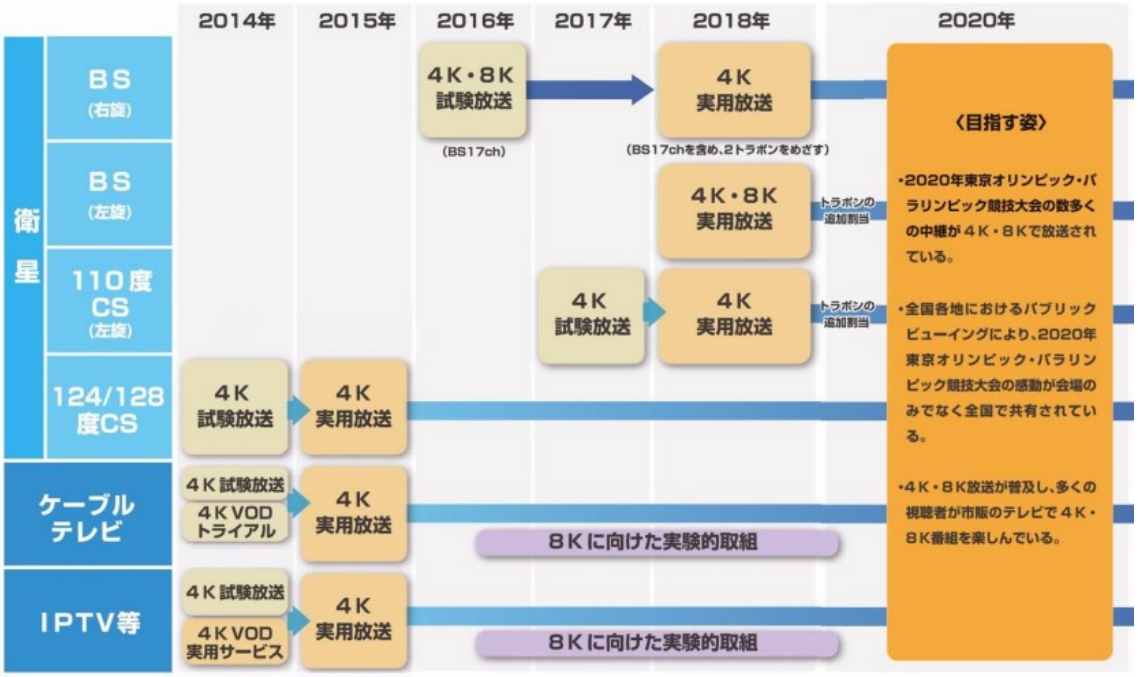


図 1.1 4K/8K 映像の実用放送に向けた取り組み[1]

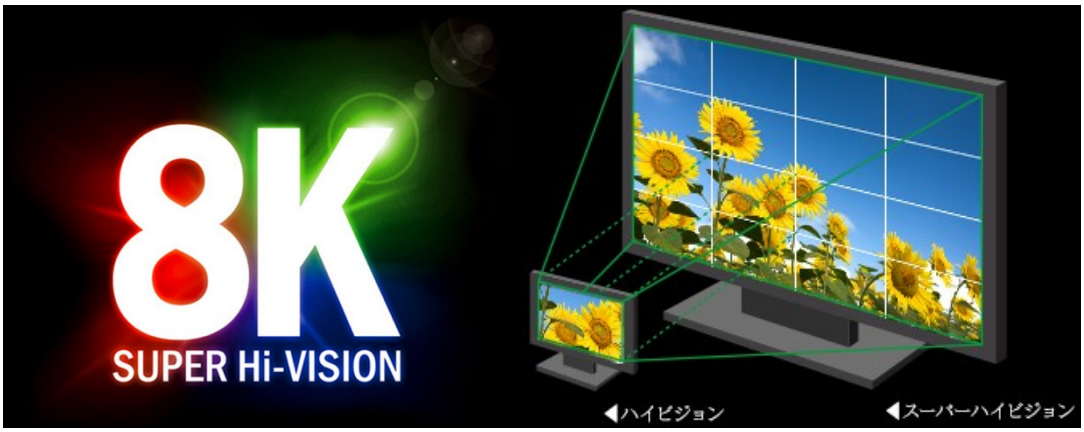


図 1.2 8K スーパーハイビジョン[2]

また，放送番組の視聴環境の多様化に向けた研究開発・実用化も進められている．その例として，放送局が提供するオンデマンドサービス（Video On Demand; VOD）や NHK Hybridcast [4]に代表されるような放送と通信を連携させたプラットフォームなどが挙げられる．このようなサービスやプラットフォームを実現するには，テレビ受信機以外の端末（ラップトップやタブレットなど）にも放送番組やそれに関連した映像コンテンツを配信せねばならない．



図 1.3 NHK Hybridcast [4]

本研究では，上記 2 点を踏まえ，超高精細映像である 8K 放送番組の視聴環境の多様化に向けた取り組みの一貫として，8K 映像に対応した放送・通信連携プラットフォームの一例を提案し，そのプラットフォームを用いる際の映像配信品質について検討する．

1.2 研究目的

本研究の目的は，次に述べる 3 点である．まず，8K 映像に対応した放送・通信連携プラットフォームの一例を提案する．このプラットフォームは，テレビ受信機が放送波によって受信した 8K 放送番組を同一屋内にあるモバイル端末に再送信する（詳細は第 3 章に記載する）．次に，この提案プラットフォームを用いて 8K 放送番組がテレビ受信機からモバイル端末に再送信される際の配信品質に関するモデルを構築し，実機実験によりそのモデルの妥当性を検証すると同時に配信品質を評価する．最後に，提案プラットフォームにおける映像品質を評価する．

1.3 本論文の構成

本論文は，全 6 章で構成されている．

第 1 章では，8K 映像の実用放送や放送番組の視聴環境の多様化に関する研究背景と本研究の目的について述べた．

第 2 章では，本研究に関連する技術について説明する．

第 3 章では，本研究で提案する，8K 映像に対応した放送・通信連携プラットフォームの一例の詳細について紹介する．

第 4 章では, 提案プラットフォームにおいて 8K 放送番組をテレビ受信機からモバイル端末へ再送信する部分に着目し，その際の配信品質に関するモデルの構築・検証および配信品質の評価を行う．

第 5 章では，提案プラットフォームにおける映像品質を評価する．

最後の第 6 章では，本研究の総括を行う．

第2章　　関連技術

2.1 放送・通信連携プラットフォーム

放送・通信連携プラットフォームは，放送と通信（インターネットなど）を連携させることで新しい放送サービスを提供するためのプラットフォームである. 代表例として, 2013年9月にNHKによって実用化されたNHK Hybridcast [4]が挙げられる. 実用化以降, NHK Hybridcast をプラットフォームとした多様なサービス・機能が提供されている．例えば，放送番組を視聴しながらニュースをチェックできるサービス“NHK NEWS WEB”や，放送番組と連携して放送中に出てきた専門用語の解説を表示できる機能などが提供されている. また，セカンドスクリーン展開として，スマートフォンやタブレットといったモバイル端末を用いて放送番組に参加したり，放送番組に関連した情報をモバイル端末に表示したりといった機能も提供されている．現在ではこれらに加え，8K 映像の実用放送への対応やより幅広いサービスの提供に向けた研究開発が進められている[5].

放送・通信連携プラットフォームは，日本だけでなく海外でも研究開発や実用化が進んでいる[6]．例えば，ドイツやフランスなどでは Hybrid broadcast broadband TV (HbbTV) [7]，イギリスでは YouView [8]が実用化されており，今後も世界的に放送サービスの多様化に向けた研究開発や実用化が進んでいくと期待される.

2.2 映像配信技術

近年，モバイルネットワークにおける映像配信サービスの需要が急増している．具体的には，2020 年のモバイルネットワークの通信量は 2015 年のそれの約 10 倍であり，かつその約 75%は映像配信サービスによるものであると推測されている[9]．本節では，インターネットなどの通信ネットワークを用いた映像配信技術として，MPEG’s Dynamic Adaptive Streaming over HTTP (MPEG-DASH) [10]と ON-OFF Cycles [11]の 2 点について述べる.

2.2.1　MPEG-DASH

MPEG-DASH [10]は，HyperText Transfer Protocol (HTTP)を用いた映像配信規格の 1 つである. 従来, 映像配信には専用のプロトコルである Real-time Transport Protocol (RTP) / Real-time Transport Control Protocol (RTCP)が用いられてきたが，HTTP を用いればRTP/RTCP 用のサーバが不要であることや Web ベースの映像配信（Web サーバに保管された映像コンテンツをクライアント上の Web アプリケーションによって取得し, 視聴する）

が可能になり，コストや利便性の面で優れているため，近年では映像配信にも Web ページと同様に HTTP が用いられる．MPEG-DASH は，HTTP を用いた映像配信に，通信品質の変動に応じて配信する映像コンテンツのビットレートを動的に変化させる「適応レート制御」を組み込んだ規格である．この適応レート制御を実現するため，MPEG-DASH では映像コンテンツを階層構造で定義している．具体的には，1 つの映像コンテンツは複数の異なるビットレート（「レプリゼンテーション」と呼ばれる）で階層的に圧縮符号化され，さらに数秒ごとの断片（「セグメント」と呼ばれる）に分割される．このような階層構造は，Media Presentation Description (MPD) と呼ばれる Extensible Markup Language (XML)形式のファイルで定義され，クライアントはこの MPD を参照することによって通信品質の変動に応じたビットレートの映像コンテンツの取得が可能となる．このような MPEG-DASH におけるサーバ･クライアントの状態および動作を図 2.1 [10]に，MPEG-DASH を用いた適応レート制御の様子を図 2.2 [10]に示す．

ここで，MPD に記述される MPEG-DASH のコンテンツ階層構造の詳細を図 2.3 [10]に示す．MPD は，複数の「ピリオド」（分割された映像コンテンツの開始時間や時間間隔などを記述）から構成され，ピリオドは複数の「アダプテーションセット」（映像・音声の複数のビットレートや種類を記述）から構成される．また，アダプテーションセットは複数のレプリゼンテーションから構成される．さらに，レプリゼンテーションは複数のセグメントからなる．各々のセグメントには Uniform Resource Locator (URL)が割り当てられている．クライアントはまず MPD を解析し，得られた情報と通信品質をもとにレプリゼンテーションを選ぶ．レプリゼンテーションに含まれているセグメントの URL を参照すれば，適切なセグメントをサーバに要求できる．

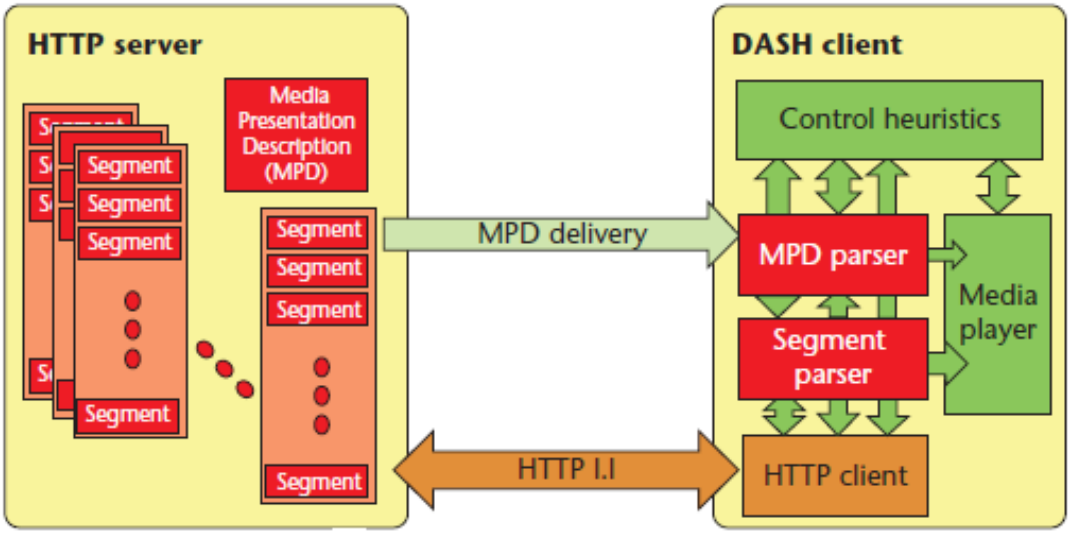


図2.1 MPEG-DASHにおけるサーバ・クライアントの状態および動作[10]

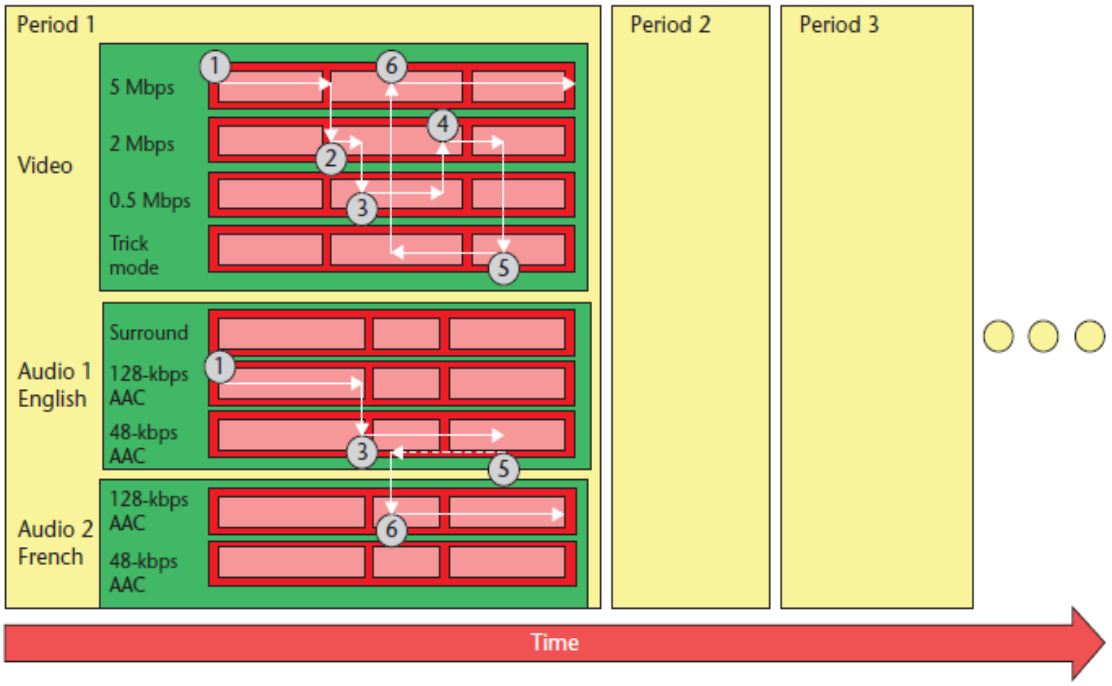


図2.2 MPEG-DASHを用いた適応レート制御の様子[10]

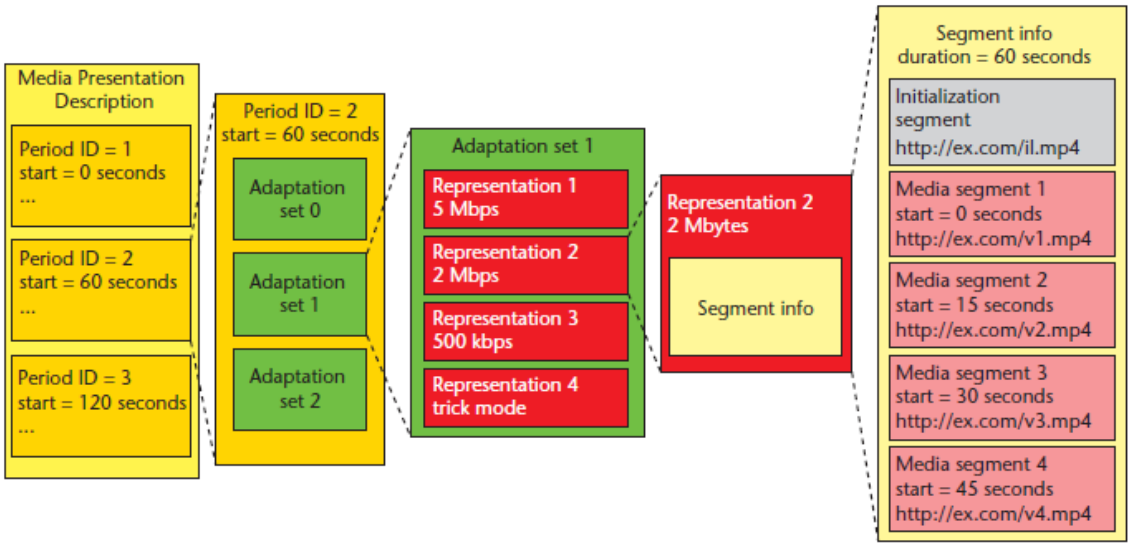


図 2.3 MPEG-DASH で定義されるコンテンツ階層構造の詳細[10]

本研究では，MPEG-DASH のメカニズムを JavaScript によって実装した DASH-JS [12]を用いている．DASH-JS は，HyperText Markup Language 5 (HTML5) [13]を利用して Web ブラウザベースに実装されており, Google Chrome ブラウザが提供する Media Source API [14]を用いて動作する．これにより，クライアントは Google Chrome ブラウザを通して MPEG-DASH によって配信される映像コンテンツの視聴が可能となる．

MPEG-DASH の他にも，Apple 社の開発した HTTP Live Streaming [15]や Microsoft 社の開発した Smooth Streaming [16]など, 適応レート制御を実現する映像配信規格は存在

するが，国際標準化されている MPEG-DASH は YouTube [17]や Netflix [18]などの映像配信サービスで利用されているだけでなく，NHK Hybridcast や HbbTV といった放送・通信連携プラットフォームにも採用されている[19].

2.2.2 ON-OFF Cycles

ON-OFF Cycles [11]は，映像配信中のクライアント上の再生バッファ制御方式の 1 つである．映像配信中にクライアントがサーバから映像コンテンツを取得する際のスループットが変動すると，配信品質に影響を与える．特に，スループットが映像コンテンツの再生速度を下回ると配信映像の再生は中断してしまう．したがって，クライアントは再生中断が発生しないように十分な量の映像コンテンツを予め取得しておかねばならない．しかし，予め大量の映像コンテンツを取得すると帯域を浪費することになる．例えば，YouTube 上の 60%の映像コンテンツは，全体の 20%の再生が完了するまでにクライアントユーザが視聴をやめてしまい，これが通信トラフィック全体の 25～39%を無駄にしている．再生バッファ制御は，前述したような映像コンテンツの再生中断の回避や帯域浪費の防止など，多様な用途に有効な解決策を与える．本項ではその一例として，ON-OFF Cycles について説明する．

ON-OFF Cycles では，映像コンテンツをサーバから「取得しながら再生」する期間を ON-period，コンテンツを「取得せずに再生のみ」を行う期間を OFF-period と定義している．これらの 2 状態を踏まえ，ON-OFF Cycles には No ON-OFF Cycles，Short ON-OFF Cycles，Long ON-OFF Cycles の 3 種類が存在する．No ON-OFF Cycles では，クライアントは映像コンテンツを配信開始時に全て取得し，再生バッファに貯蓄する方式である．Short ON-OFF Cycles では，ON-period と OFF-period を短い周期で繰り返すことによって再生バッファに一定の映像データ（クライアント上に取得済みで，かつまだ再生していない映像）を維持することが可能である．Long ON-OFF Cycles では，Short ON-OFF Cycles よりも ON-period と OFF-period を長い周期で繰り返すことによって，一度に多量の映像データを取得するが，非通信時間（OFFperiod）を長くすることを可能にしている．

ここで, Short ON-OFF Cycles と Long ON-OFF Cycles の 2 点について詳しく説明する．

Short ON-OFF Cycles では，クライアントはまず再生バッファサイズが十分な大きさ（B[s]と定義する）になるまでサーバから映像データを取得する．その後は，映像データの取得間隔（これを「ペーシング遅延」と呼ぶ）を計算し，このペーシング遅延に基づくタイミングで映像データを取得する. 具体的には, N個の断片に分割された映像コンテンツ（この断片のことを「チャンク」と呼ぶこととする）を$(c_1, c_2, \dots, c_N)$，チャンクc_i $(1 \le i \le N)$の再生期間をd_i [sec]，クライアントがチャンクc_iを取得するのにかかる時間をε_i [sec]と定義するとき，ペーシング遅延δ_i [sec]は式(2.1) [11]によって導かれる．

$$\delta_i = max\{d_i - \varepsilon_i, \delta_{min}\} \tag{2.1}$$

ここで，δ_{min}は予め定義されたペーシング遅延の最小値である．ペーシング遅延δ_iはクライアントがチャンクc_iを取得し終わった時点で計算され，クライアントはチャンクc_iを取得し終わった時点からδ_i [sec]経過するまでは OFF-period となりチャンクの取得は行わず，チャンクc_iを取得し終わった時点からδ_i [sec]経過すると ON-period となり，次のチャンクc_{i+1}の取得を開始する．これを$i = N$まで（またはクライアントが映像の視聴を中断するまで）繰り返す．Short ON-OFF Cycles を用いて映像コンテンツの取得を行う場合，クライアント上の再生バッファサイズは図 2.4 [11]のような挙動を示すため，“Zippy Pacing”とも呼ばれる．

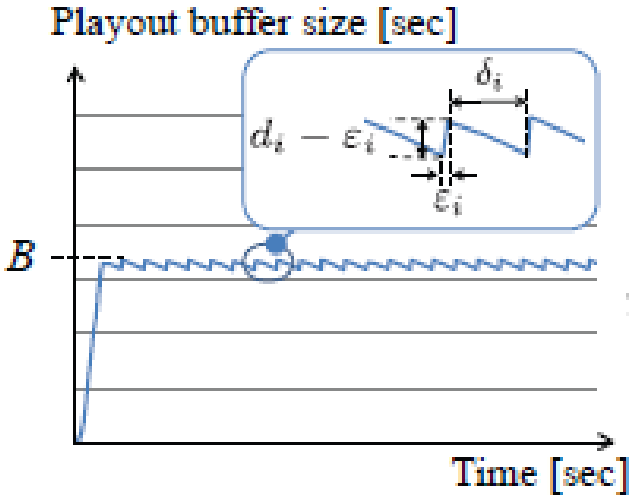


図 2.4 Short ON-OFF Cycles におけるクライアント上の再生バッファサイズの挙動[11]

一方，Long ON-OFF Cycles では，クライアント上の再生バッファサイズの挙動は図 2.5 [11]のようになる（この挙動がノコギリの歯の形のように見えることから，“Sawtooth Pacing”とも呼ばれる）．図 2.5 において，T_{high}，T_{low}はそれぞれ再生バッファサイズの最大値および最小値を表している．Long ON-OFF Cycles では，クライアントは映像コンテンツの取得を開始すると再生バッファに映像データを蓄積させていき（すなわち，再生バッファサイズを 0 [sec]から増加させていき），再生バッファサイズがT_{start} [sec]に達すると映像再生を開始する．その後 ON-period となり，映像データを取得しながら再生する．次に，再生バッファサイズがT_{high} [sec]に達すると，クライアントは一旦新たな映像データの取得をやめて OFF-period に移行し，再生バッファサイズがT_{low} [sec]に減少するまで映像再生のみを行う．再生バッファサイズがT_{low} [sec]まで減少すると，クライアントは再び ON-period に移行し，新たな映像データの取得と映像再生を同時に行う．以降，まだサーバから取得していない映像データがなくなるまで（またはクライアントが映像の視聴を中断するまで）同様に ON-period と OFF-period を繰り返す．

2.2.1 項で述べた DASH-JS では，再生バッファサイズの最大値と最小値を用いて ON-period と OFF-period を切り替えながら映像取得・再生を行う（デフォルト設定では Long ON-OFF Cycles が採用されている）．

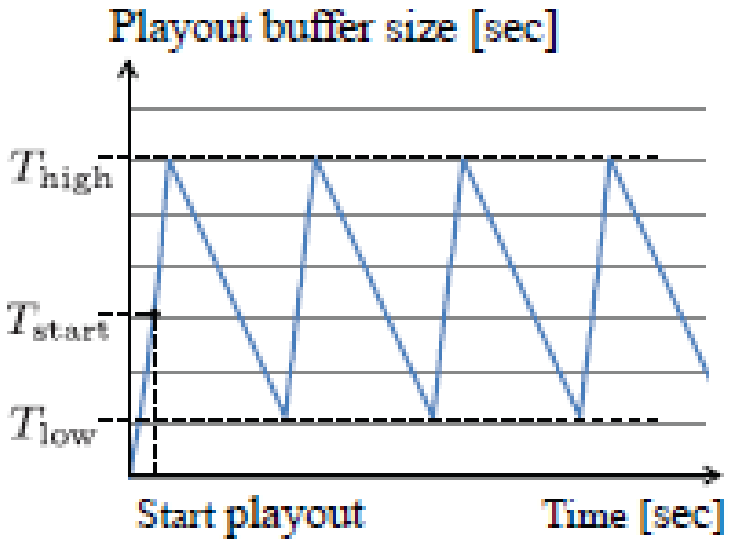


図 2.5 Long ON-OFF Cycles におけるクライアント上の再生バッファサイズの挙動[11]

2.3 無線通信技術：デジタル変調

現在, Wi-Fi や Bluetooth など様々な無線通信規格が世の中のあらゆる場面で広く活用されている．こういった無線通信規格による情報伝送を支える技術の 1 つに変調がある．変調とは，伝送したい情報信号を電波に載せて伝送できる形に変換する信号処理のことである．コンピュータが処理ややりとりをする情報はデジタルである他，日本では放送などにおいてもデジタル化が進んでいるため，本節では変調の中でもデジタル信号の変調（デジタル変調）[20]に焦点を絞って述べる．

2.3.1 デジタル変調の基礎

伝送したいデジタル信号を載せる電波 $c(t)$ （これを「搬送波」と呼ぶ）を，式(2.2) [20]のように表す．

$$c(t) = \cos 2\pi f_c t \tag{2.2}$$

式(2.2)において，t は時間，π は円周率，f_c は搬送波周波数を意味している．デジタル変調では，伝送したいデジタル信号を搬送波の振幅，周波数，位相のいずれかに対応させていく．その一般形を式(2.3) [20]に示す．

$$s(t) = a_m(t)\cos\left[2\pi\{f_c + f_m(t)\}t + \phi_m(t)\right] \tag{2.3}$$

式(2.3)において，$a_m(t)$，$f_m(t)$，$\phi_m(t)$ は，それぞれ伝送したいデジタル信号に対応した値を持つ振幅，周波数，位相である．基本的なデジタル変調方式として，伝送したいデジタ

ル信号を振幅 $a_m(t)$ に対応させる Amplitude Shift Keying (ASK)，周波数 $f_m(t)$ に対応させる Frequency Shift Keying (FSK), 位相 $\phi_m(t)$ に対応させる Phase Shift Keying (PSK)の他，振幅 $a_m(t)$ と位相 $\phi_m(t)$ の両方に対応させる Quadrature Amplitude Modulation (QAM)などがある．

また，式(2.3)に示す信号 $s(t)$ のうち，周波数 $f_m(t)$ に伝送したいデジタル信号を対応させない場合（すなわち，振幅 $a_m(t)$ または位相 $\phi_m(t)$ のいずれかに伝送したいデジタル信号を対応させる場合）は，複素指数関数を用いることで，伝送したいデジタル信号に関する部分と搬送波の部分を分離して考えることができる．具体的には，式(2.4) [20]のように表現する．

$$s(t) = a_m(t)\cos\{2\pi f_c t + \phi_m(t)\} = \mathrm{Re}\left\{a_m(t)e^{j\phi_m(t)}e^{j2\pi f_c t}\right\} \tag{2.4}$$

式(2.4)において, 伝送したいデジタル信号に関する部分を $a_m(t)e^{j\phi_m(t)} = z(t)$ とすると, 図 2.6 [20]に示す通り， $z(t)$ は複素平面上のベクトルとして表現される．

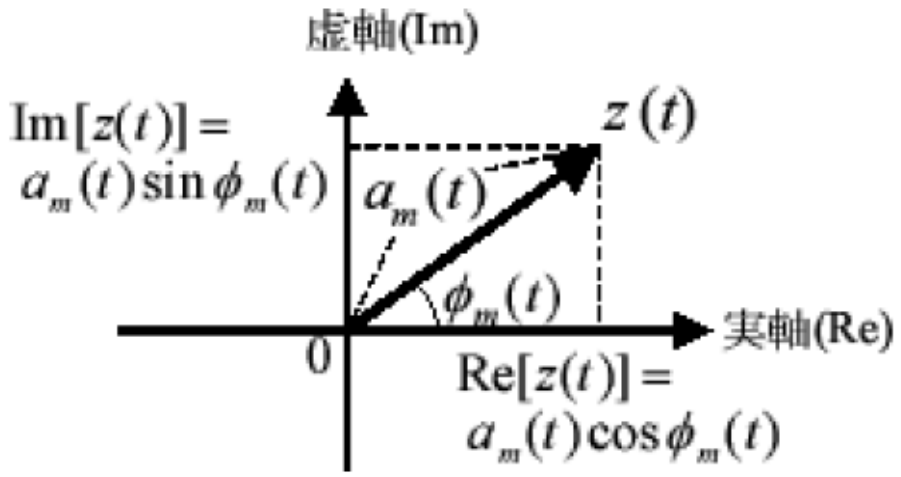


図 2.6 信号 $z(t)$ のベクトル表現[20]

伝送したいデジタル信号によって搬送波の振幅 $a_m(t)$ または位相 $\phi_m(t)$ が変化し，その結果として生成されるベクトル $z(t)$ の終点（これを「信号点」と呼ぶ）を複素平面上にマッピングしたものを「信号空間ダイヤグラム」または「コンスタレーション」と呼ぶ．

また，式(2.4)に示す信号 $s(t)$ は，式(2.5) [20]のように表現することができる．

$$\begin{aligned} s(t) &= a_m(t)\cos\{2\pi f_c t + \phi_m(t)\} \\ &= a_m(t)\cos\phi_m(t)\cos 2\pi f_c t - a_m(t)\sin\phi_m(t)\sin 2\pi f_c t \\ &= \mathrm{Re}\{z(t)\}\cos 2\pi f_c t - \mathrm{Im}\{z(t)\}\sin 2\pi f_c t \end{aligned} \tag{2.5}$$

式(2.5)は, 式(2.4)に示す信号 $s(t)$ が, 直交する（すなわち, 復調時に分離することができる）搬送波 $\cos 2\pi f_c t$ および $\sin 2\pi f_c t$ のそれぞれの振幅に $z(t)$ の実数部分 $\mathrm{Re}\{z(t)\}$, 虚数部分 $\mathrm{Im}\{z(t)\}$ を対応させて合成した信号とみなせることを意味している．ここで, $\cos 2\pi f_c t$ を含む項を「同

相成分（Inphase component）」，$\sin 2\pi f_c t$ を含む項を「直交成分（Quadrature component）」と呼ぶ.

2.3.2 ASK

ASK [20]では，伝送したいデジタル信号を搬送波の振幅 $a_m(t)$ に対応させる．具体的には，伝送したいデジタル信号が“0”の場合に $a_m(t) = A$ ，“1”の場合に $a_m(t) = 0$ とする．このようにデジタル信号を振幅 $a_m(t)$ に対応させることで，図 2.7 [20]のような信号空間ダイヤグラムが得られる．

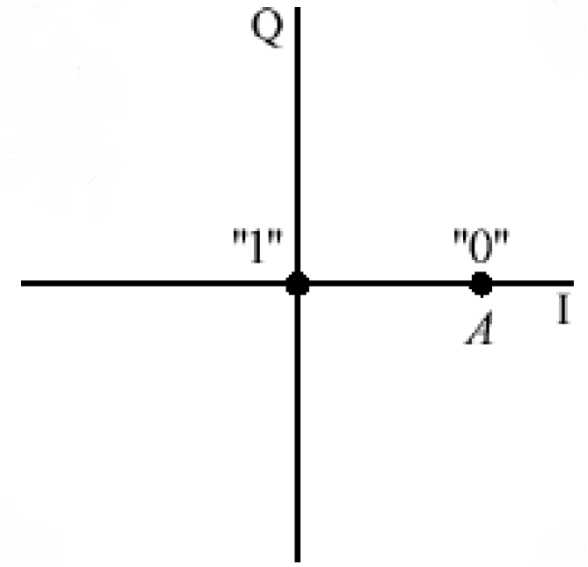


図 2.7 ASK における信号空間ダイヤグラム[20]

2.3.3 PSK

PSK [20]では, 伝送したいデジタル信号を搬送波の位相 $\phi_m(t)$ に対応させる. 具体的には, 例えば伝送したいデジタル信号を 1 桁ずつ 2 種類の位相に対応させる Binary PSK (BPSK) では，伝送したいデジタル信号が“0”の場合に $\phi_m(t) = 0$ ，“1”の場合に $\phi_m(t) = \pi$ とする．このようにデジタル信号を位相 $\phi_m(t)$ に対応させることで，図 2.8 [20]のような信号空間ダイヤグラムが得られる．

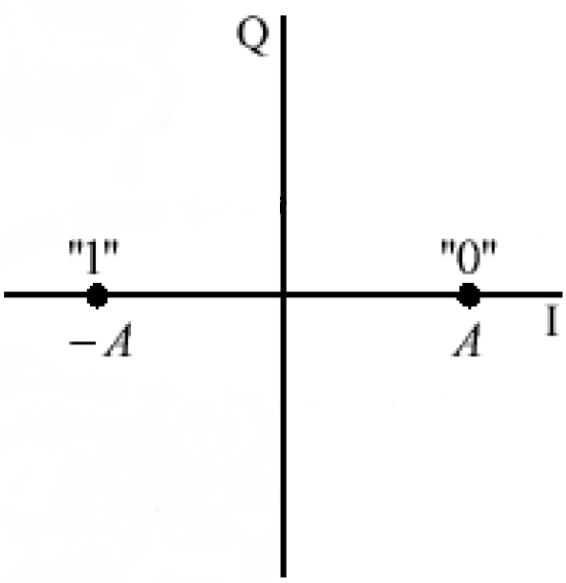


図 2.8 BPSK における信号空間ダイヤグラム[20]

BPSK では，伝送したいデジタル信号を 1 桁ずつ 2 種類の位相に対応させるが，PSK ではデジタル信号を複数桁ずつ位相に対応させることもできる．例えば，Quaternary PSK (QPSK)では, 伝送したいデジタル信号を 2 桁ずつ 4 種類の位相に対応させる. 具体的には, 伝送したいデジタル信号が“00”の場合に $\phi_m(t) = \frac{\pi}{4}$，“10”の場合に $\phi_m(t) = \frac{3\pi}{4}$，“11”の場合に $\phi_m(t) = \frac{5\pi}{4}$，“01”の場合に $\phi_m(t) = \frac{7\pi}{4}$ とする．このようにデジタル信号を位相 $\phi_m(t)$ に対応させることで，図 2.9 [20]のような信号空間ダイヤグラムが得られる．

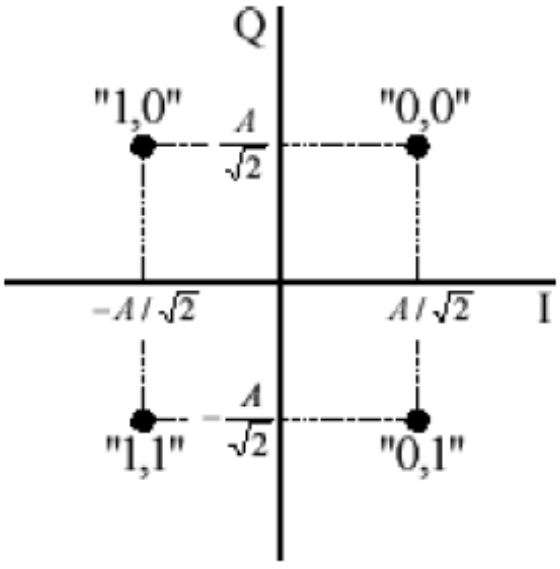


図 2.9 QPSK における信号空間ダイヤグラム[20]

2.3.4　QAM

QPSK のように，伝送したい信号の複数桁をまとめて 1 つの信号点に対応させることにより，1 桁を 1 つの信号点に対応させる場合に比べて伝送効率を向上させることができる．しかし，1 つの信号点に対応させる桁数が増えるにつれて信号空間ダイヤグラムにおける信号点の個数は増大し，信号点間距離が小さくなることによって伝送誤り率が上昇してしまう．そこで，例えば，伝送したい信号の 4 桁を 1 つの信号点に対応させる場合は，PSK (16-PSK)ではなく QAM（16-QAM）[20]を用いることで伝送誤り率を低減することができる．QAM は，伝送したい信号を搬送波の振幅 $a_m(t)$ と位相 $\phi_m(t)$ の両方に対応させる変調方式で，信号空間ダイヤグラムは図 2.10 [20]に示す通りである．

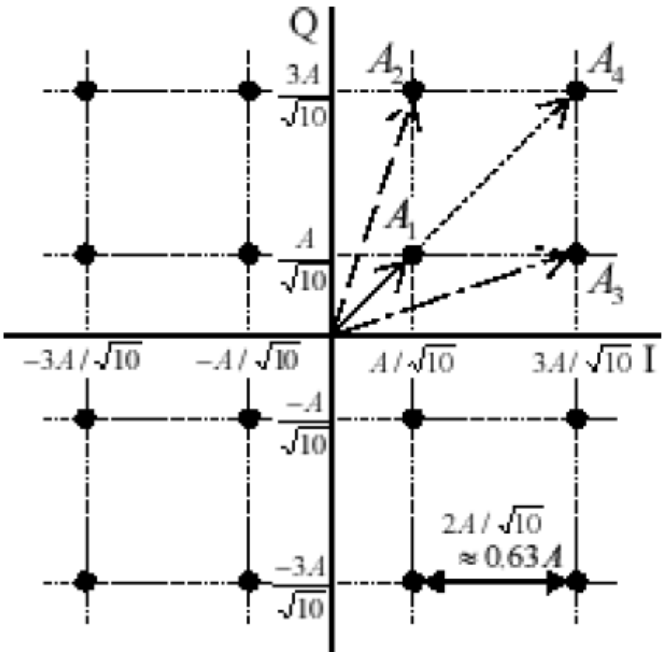


図 2.10 16-QAM における信号空間ダイヤグラム[20]

2.3.5　OFDM

PSK や QAM などは，1 つの搬送波を用いるデジタル変調方式である．これに対し，Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) [21]は，デジタル信号の伝送に複数の搬送波（これを「サブキャリア」と呼ぶ）を同時に用いる．隣り合うサブキャリアどうしは直交性を持つため，スペクトルが互いに重なっても復調時に分離することができる．それぞれの搬送波は QAM などの変調方式によって変調される．

OFDM は，サブキャリアに直交性を持たせることによりサブキャリアの周波数間隔を最小にし，周波数効率を向上させることができる他，マルチパスフェージングに強いという利点を持つ．

2.4 無線通信技術：IEEE802.11 (Wi-Fi)

IEEE802.11 [22]は，Wireless Local Area Network (WLAN)である Wi-Fi に関する規格を定義している. 具体的には, 物理層と Media Access Control (MAC)層における通信方式, 通信品質（Quality of Service; QoS），セキュリティなどに関する項目が定義されている．Wi-Fi は，家庭内やオフィスビル内などにおける通信手段として広く活用されている他，鉄道の駅，空港，百貨店，コンビニエンスストアなどの公共の場でも Wi-Fi スポットの設置が進んでいる．また，外国人観光客向けの公衆 Wi-Fi サービスが提供されるようになるなど，Wi-Fi の活用の幅はさらに広がっている．現在，Wi-Fi の通信方式に関する規格は IEEE802.11b/g/a/n/ac の 5 種類が実用化されているが，これらを用いて通信を行う場合，その種類によらず，MAC 層では Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA/CA) [23]と呼ばれるアクセス制御方式が採用されている. 本節では, まず CSMA/CA について述べた後，Wi-Fi の通信方式に関する規格 IEEE802.11b/g/a/n/ac のそれぞれについて説明する．

2.4.1 CSMA/CA

Wi-Fi では，複数の端末が 1 つのアクセスポイント（Access Point; AP）に接続している場合，それら複数の端末が同時に AP にフレームを送信するとフレームどうしが衝突し，フレームの中身のデータが破損してしまう恐れがある．この問題を解決するのが CSMA/CA [23]である．ここでは，CSMA/CA による MAC 層でのアクセス制御について述べる．

例えば，3 台の端末 A，B，C が 1 台の AP に接続している状態を考える（図 2.11 [23]に示す）．端末 A が送信したいフレームを持っている場合，端末 A は他の端末 B，C からのフレーム送信（すなわちキャリア信号）があるかを検証する．キャリア信号が検出されなければ, 端末 A は Distributed Coordination Function Inter Frame Space (DIFS)時間待機し, さらに端末ごとにランダムに設定されるバックオフ時間待機した後，AP にフレームを送信する．AP はフレームを受信し終わると，Short Inter Frame Space (SIFS)時間待機後に全端末に Acknowledgment (ACK)を送信する．CSMA/CA は，このように各端末が他の端末からのキャリア信号の有無を逐一検証しながら衝突が発生しないようにフレームを送信していくアクセス制御である．

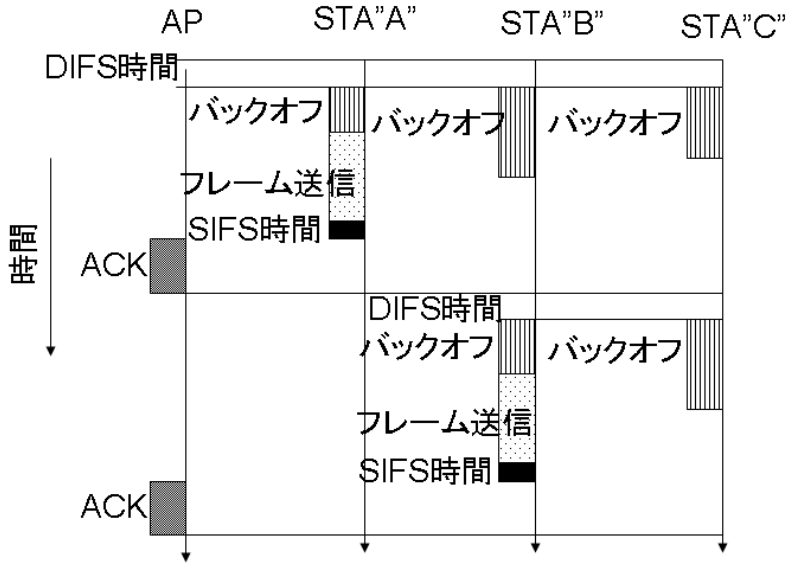


図 2.11 CSMA/CA によるアクセス制御の例[23]

しかし，CSMA/CA だけでは，ある端末がフレームを送信している最中であるにもかかわらず，その端末から離れたところにある別の端末がそのキャリア信号を検出できずにフレームを送信してしまうことがある（これを「隠れ端末問題」と呼ぶ）．この隠れ端末問題を解決するために，Request To Send (RTS) / Clear To Send (CTS)制御を導入する．上述の例と同様に，3 台の端末 A，B，C が 1 台の AP に接続している状態を考える（図 2.12 [23]に示す）．端末 A が送信したいフレームを持っている場合，端末 A は AP を含む全端末に RTS を送信する．AP は端末 A からの RTS を受信すると，SIFS 時間待機後に端末 A 以外のすべての端末（この場合は端末 B と C）に CTS を送信する．端末 A 以外の端末は，端末 A からの RTS または AP からの CTS を受信すると Network Allocation Vector (NAV)時間だけフレーム送信を待機せねばならない. この間に端末 A が AP にフレームを送信すれば，端末間でキャリア信号が検出できなくてもフレーム衝突を回避することができる．

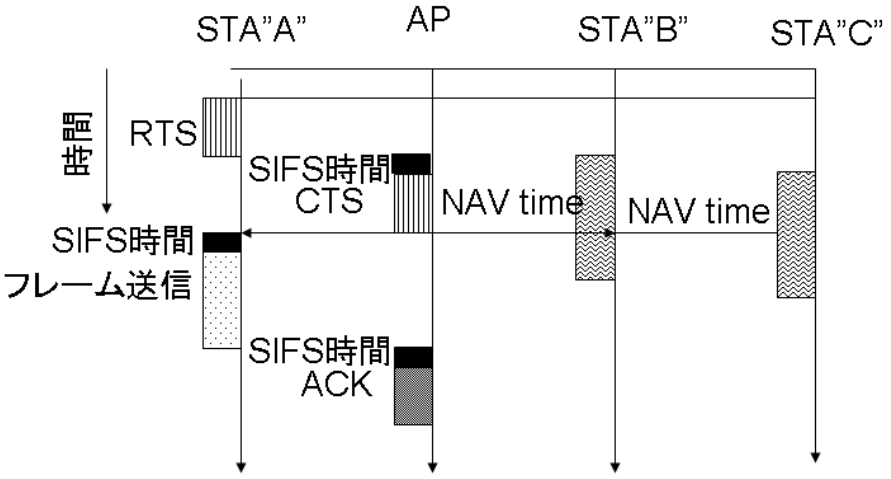


図 2.12 CSMA/CA with RTS/CTS による隠れ端末問題の解決例[23]

2.4.2 IEEE802.11b/g/a

IEEE802.11b/g/a [22]は，Wi-Fi の通信方式に関する規格である．IEEE802.11b/g は，2.4GHz 帯の周波数の電波を用いて通信を行う．2.4GHz 帯の周波数の電波は電子レンジなどでも用いられているため，同時に使用すると通信品質が劣化することがある．IEEE802.11g は，OFDM を採用することで，IEEE802.11b に比べて伝送速度を向上させている．一方，IEEE802.11a では 5GHz 帯の周波数の電波を用いて通信を行うため，電子レンジなどとの同時使用が可能である．ただし，5GHz 帯の周波数の電波は，Global Positioning System (GPS)や気象レーダなども使用するため，一部の無線チャネルを除いて屋外での使用が禁止されている．IEEE802.11a でも OFDM を採用することで，伝送速度は IEEE802.11g と等しい．

2.4.3 IEEE802.11n/ac

IEEE802.11n/ac [22, 24, 25, 26]も，IEEE802.11b/g/a と同様に Wi-Fi の通信方式に関する規格である．IEEE802.11n/ac には，IEEE802.11b/g/a からの伝送速度の向上のため，2 つの技術が新たに取り入れられている．

1 つ目は「チャネルボンディング」である．これは，複数の無線チャネルを束ねて広帯域な無線チャネルを生成し，伝送速度を向上させる技術である．IEEE802.11n/ac では基本となるチャネル幅が 20 [MHz]であるが，IEEE802.11n では最大で 2 チャネルを束ねて 40 [MHz], IEEE802.11ac では最大で 8 チャネルを束ねて 160 [MHz]の広帯域チャネルを生成できる. ここで, チャネルボンディングによる無線チャネル幅の拡張を図 2.13 [25]に示す.

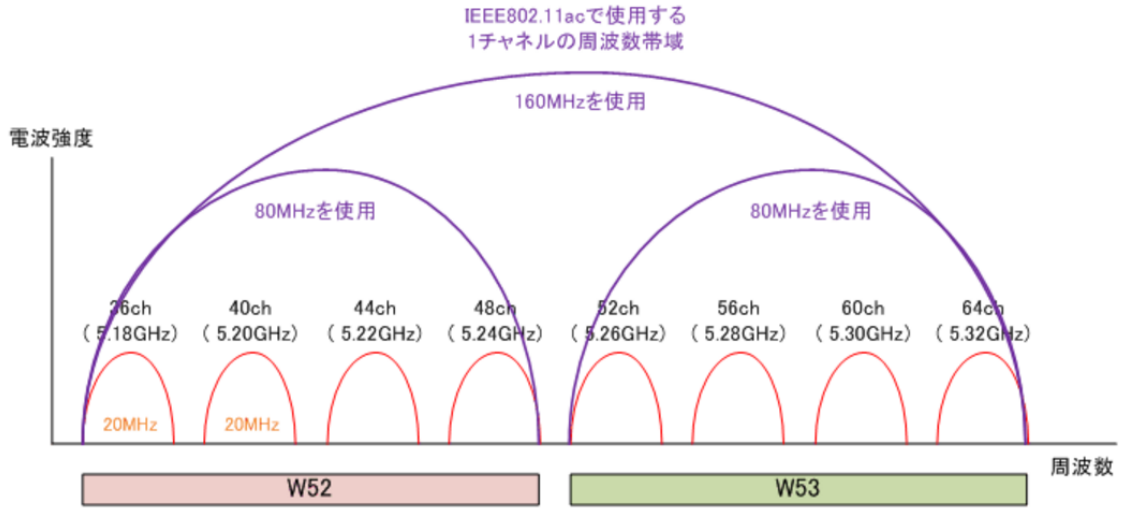


図 2.13 チャネルボンディングによる無線チャネル幅の拡張[25]

2 つ目は“Multiple-Input Multiple-Output (MIMO)”である．これは，複数組のアンテナを同時に用いることで同時伝送できる空間ストリーム数を増やし，伝送速度の向上を図る技術である． IEEE802.11n では最大 4 本，IEEE802.11ac では最大 8 本の空間ストリームを同時伝送できる．ここで，MIMO による複数の空間ストリームの同時伝送を図 2.14 [25] に示す.

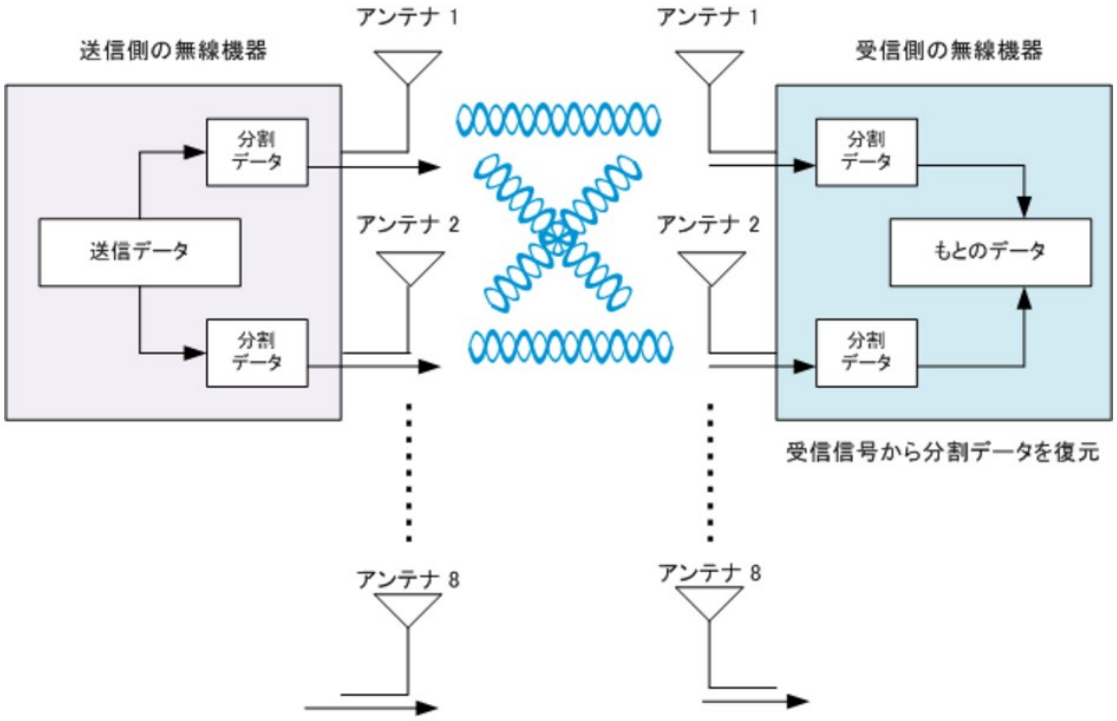


図 2.14 MIMO による複数の空間ストリームの同時伝送[25]

さらに，IEEE802.11ac では MIMO を拡張した Multi-User MIMO (MU-MIMO)もサポートしている．MU-MIMO は，複数のアンテナを用いることで複数の端末への同時伝送を可能とする．具体的には，最大で 8 つのアンテナを用いて 8 つの空間ストリームを合計 4 つの端末に同時伝送できる（1 端末あたり 2 つの空間ストリームを送受信）．この場合，全空間ストリームの伝送速度の合計は MU-MIMO を用いない場合の 4 倍となる．ここで，MU-MIMO による複数の空間ストリームの複数端末への同時伝送を図 2.15 [25]に示す.

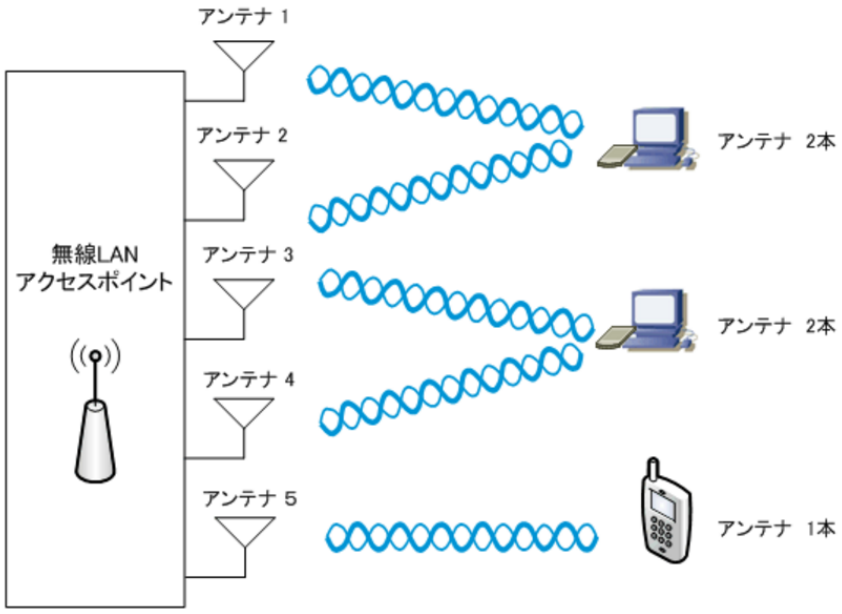


図 2.15 MU-MIMO による複数の空間ストリームの複数端末への同時伝送[25]

また，IEEE802.11n と IEEE802.11ac では，OFDM におけるサブキャリアの変調時の 1 信号点に割り当てるビット数が異なる．IEEE802.11n/ac ではいずれも OFDM におけるサブキャリアの変調方式は QAM であるが，IEEE802.11n では 1 信号点に 6 ビットを割り当てる（64-QAM）のに対し，IEEE802.11ac では 1 信号点に 8 ビットを割り当てる（256-QAM）ことで，1 信号点あたりのビット数が増加し，伝送速度が向上する．ここで，IEEE802.11n と IEEE802.11ac における信号空間ダイヤグラムの比較を図 2.16 [25]に示す．

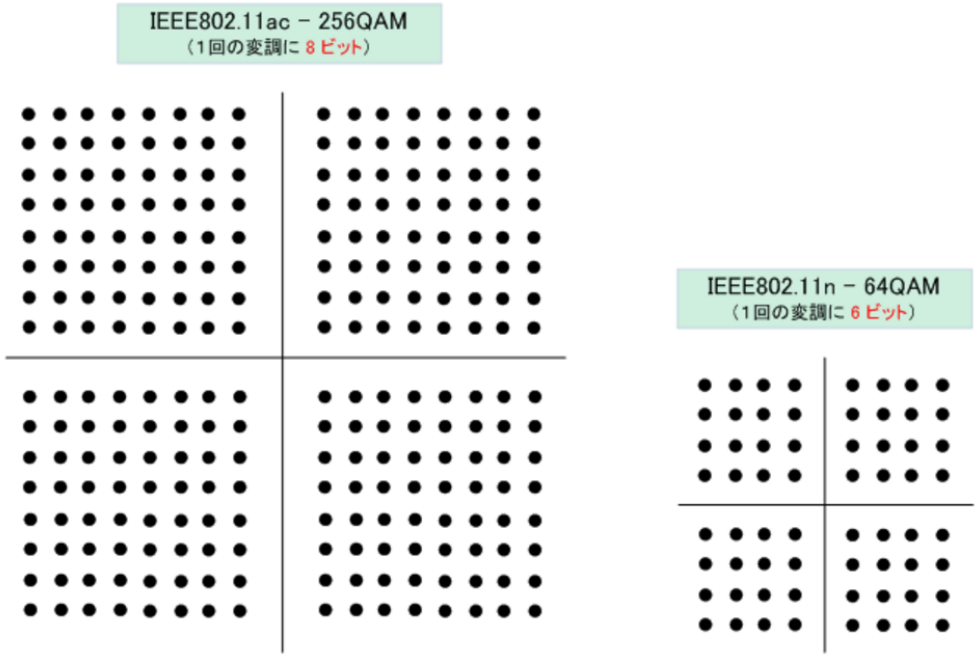


図 2.16 IEEE802.11n と IEEE802.11ac における信号空間ダイヤグラムの比較[25]

2.5 映像圧縮符号化技術：H.265/HEVC

2.4 節で述べた通り，Wi-Fi の伝送速度は OFDM，チャネルボンディング，MIMO などの技術によって高速化している．また，Long Term Evolution (LTE)などの Wi-Fi 以外の無線通信規格や Fiber To The Home (FTTH)などの有線通信規格の伝送速度も高速化を続けている[27]．しかし，同時にそういった通信ネットワーク上を流れる映像コンテンツは高精細化しており，特に 4K/8K 映像などを配信する場合には映像圧縮符号化技術が不可欠である．本節では，最新の映像圧縮符号化規格である H.265 / High Efficiency Video Coding (HEVC) [28]について述べる．

H.265/HEVC は，2013 年 1 月に国際標準化された最新の映像圧縮符号化規格である．現在，2K 映像の放送などに採用されている H.264 / Advanced Video Coding (AVC)の後継規格であり，4K/8K 映像の放送などに採用される予定である．H.265/HEVC は圧縮符号化効率の向上を重点的に目指した規格であり，その圧縮符号化効率は H.264/AVC の約 2 倍を誇る[29]．

本研究では，8K 映像の圧縮符号化および復号に HEVC Test Model (HM) [30]を用いている．HM は，H.265/HEVC の標準参照ソフトウェアであり，3 種類の圧縮符号化方式（Intra-only，Low-delay，Random Access）に対応している．Intra-only 方式では，すべてのフレームが独立に（画面内予測のみを用いて）符号化される．一方で，Low-delay 方式と Random Access 方式では画面間予測符号化を採用している．Low-delay 方式，Random Access 方式における符号化構造をそれぞれ図 2.17，図 2.18 [29]に示す．ここで，I (Intra)フレームとは画面内予測のみを用いて符号化されるフレーム，P (Predictive)フレームとは時系列的に自分より過去のフレームのみを参照して画面間予測符号化されるフレーム，B (Bi-directionally Predictive)フレームとは時系列的に自分より過去のフレームと未来のフレームを参照して画面間予測符号化されるフレームのことを指す．Low-delay 方式では，フレームを時系列順に符号化するため，符号化遅延を小さく抑えることができる．Random Access 方式では，フレームはそれより時系列的に過去のフレームと未来のフレームを参照して符号化するため，符号化効率を高めることはできるが符号化遅延は大きい．日本の 4K/8K 実用放送には Random Access 方式が採用される予定である．

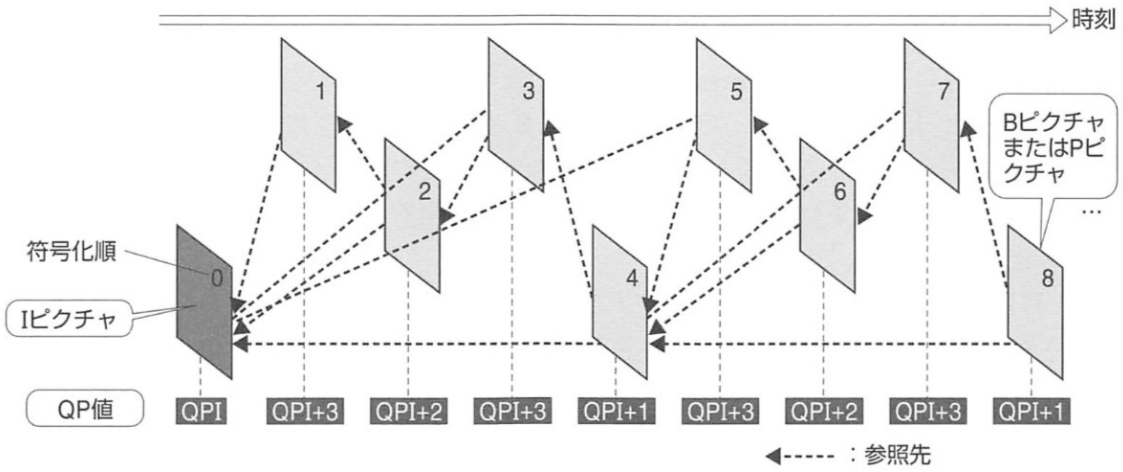


図 2.17 Low-delay 方式における符号化構造[29]

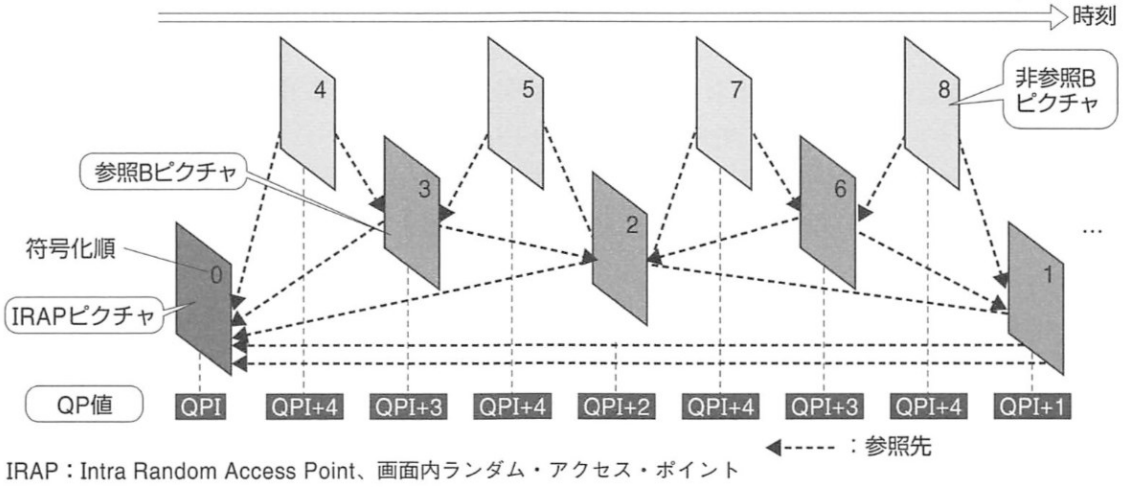


図 2.18 Random Access 方式における符号化構造[29]

2.6 映像走査技術

映像を伝送し，ディスプレイに表示するには，2.5 節で述べた映像圧縮符号化技術だけでなく，映像走査技術も必要である．走査とは，映像を伝送するために各フレームを画素に分解し，1 次元の信号に変換すること[21]である．走査方式には，インタレース（Interlace）方式とプログレッシブ（Progressive）方式の 2 種類がある．本節では，この 2 種類の走査方式について説明する．

2.6.1　インタレース方式

インタレース方式[29]では，1 枚のフレームを 2 枚のフィールドに分割して走査する（す

なわち，1 枚のフレームを 2 回に分けて走査する)．具体的には，まず奇数番目の走査線によって第 1 フィールドを作成し，次に偶数番目の走査線によって第 2 フィールドを作成する．インタレース方式におけるフレーム走査の方法を図 2.19 [29]に示す．

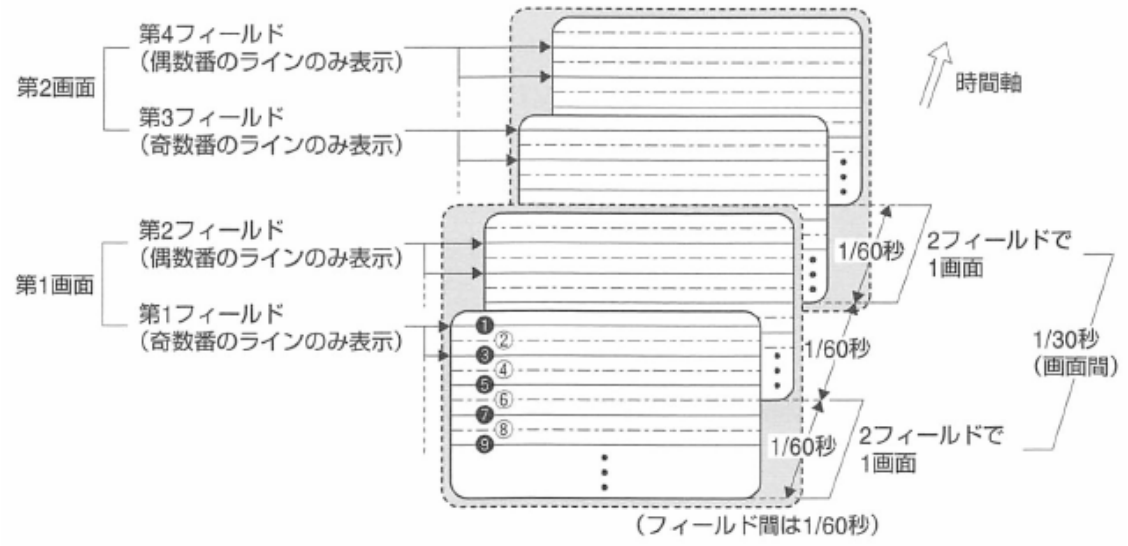


図 2.19 インタレース方式におけるフレーム走査の方法[29]

インタレース方式は，動きの激しい映像などに向いている一方で，細かい部分を表示しようとすると画面がちらついて見えてしまう．

2.6.2　プログレッシブ方式

2.6.1 項で述べたインタレース方式では，1 枚のフレームを 2 回に分けて走査するが，本項で述べるプログレッシブ方式[29]では，1 枚のフレームを上から下に向かって 1 回で走査する．プログレッシブ方式におけるフレーム走査の方法を図 2.20 [29]に示す．

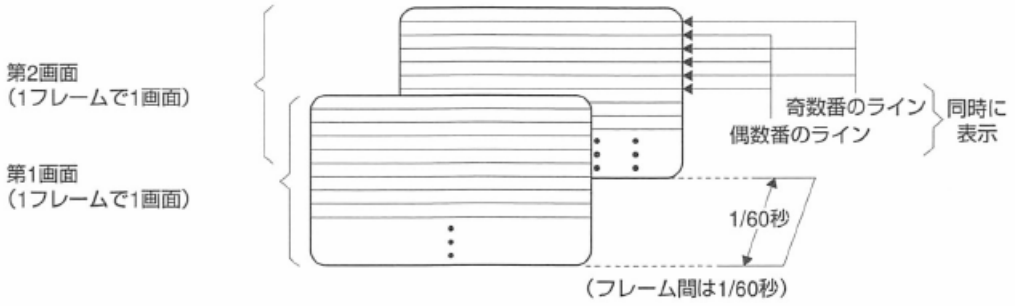


図 2.20 プログレッシブ方式におけるフレーム走査の方法[29]

インタレース方式と異なり，細かい部分の表示に適しているため，一般にパーソナルコンピュータ用のディスプレイなどに用いられている．

2.7 映像品質評価技術

映像配信サービスの品質を評価するには，クライアントが映像コンテンツを取得するときのスループットなどといった通信に関係する品質（配信品質）だけでなく，映像コンテンツの画質（映像品質）についても評価せねばならない．放送・通信連携プラットフォームについても，映像配信の部分については同様に配信品質と映像品質の両方を評価する必要がある．本節では，客観画質（映像が持つ雑音成分などの数値を用いた計算によって定量的に導かれる画質）と主観画質（人間がディスプレイを通して映像を視聴したときに自身の感覚に基づいて評価する画質）[31]について，それぞれを評価する技術を述べる．

2.7.1 客観画質評価技術

客観画質とは，映像が持つ雑音成分などの数値を用いた計算によって定量的に導かれる画質のことである[31]. その値は一意に決定されるため評価指標として扱いやすいという利点があるが，評価の主体が人間ではないため人間の感覚と差が生じる場合があるという欠点も併せ持つ. 本項では, 客観画質評価によく用いられる 2 種類の技術について説明する．

(a) Peak Signal to Noise Ratio (PSNR) [31]

原画像のi番目の画素位置における信号値を$x[i]$，評価対象画像のi番目の画素位置における信号値を$y[i]$，原画像および評価対象画像の画素数をNとする．このとき，原画像と評価対象画像の差分自乗平均は式(2.6) [31]のように表現され，Mean Square Error (MSE)と呼ばれる．

$$\mathrm{MSE} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(x[i]-y[i]\right)^2 \tag{2.6}$$

PSNR は，式(2.6)の MSE を用いて式(2.7) [31]のように定義される．

$$\mathrm{PSNR} = 10\log_{10}\frac{255^2}{\mathrm{MSE}}[\mathrm{dB}] \tag{2.7}$$

映像の場合は, 全フレームの PSNR を加算平均した値をその映像の PSNR として採用する．

PSNR は画質の良さを表すため, PSNR が高い画像ほど高画質な画像である. また, PSNR の高い領域では，主観画質に相関が高い特性を持つことが知られている．少ない計算量で導出できることから，最も広く用いられている客観画質評価技術である．

(b) Structural Similarity (SSIM) [31]

原画像のi番目の画素位置における信号値を$x[i]$，評価対象画像のi番目の画素位置における信号値を$y[i]$（いずれも画素数はN）とするとき，SSIM は式(2.8) [31]によって定義される．

$$\mathrm{SSIM} = \frac{(2\mu_x\mu_y + C_1)(2\sigma_{xy} + C_2)}{(\mu_x{}^2 + \mu_y{}^2 + C_1)(\sigma_x{}^2 + \sigma_y{}^2 + C_2)} \tag{2.8}$$

式(2.8)において，μ_x（およびμ_y），σ_x（およびσ_y），σ_{xy}は 11×11 画素に正規化された円対称ガウス関数$w[i]$を用いてそれぞれ式(2.9)，式(2.10)，式(2.11) [31]のように表現される．

$$\mu_x = \sum_{i=1}^{N} w[i]x[i], \mu_y = \sum_{i=1}^{N} w[i]y[i] \tag{2.9}$$

$$\sigma_x{}^2 = \sum_{i=1}^{N} w[i](x[i] - \mu_x), \sigma_y{}^2 = \sum_{i=1}^{N} w[i](y[i] - \mu_y) \tag{2.10}$$

$$\sigma_{xy} = \sum_{i=1}^{N} w[i](x[i] - \mu_x)(y[i] - \mu_y) \tag{2.11}$$

また，C_1，C_2は，信号の最大振幅Lを用いてそれぞれ式(2.12) [31]によって定義される．

$$C_1 = (0.01L)^2, C_2 = (0.03L)^2 \tag{2.12}$$

PSNR と同様に，SSIM が高い画像ほど高画質な画像である．また，PSNR よりも主観画質に近い特性を示す場合があるが，その根拠となる仮説（SSIM の提案者による仮説）はまだ立証されていない．

2.7.2 主観画質評価技術

主観画質とは，人間がディスプレイを通して映像を視聴したときに自身の感覚に基づいて評価する画質のことである[31]．実際の人間による評価を数値化するため，客観画質とは逆に人間の感覚を反映させることができる一方で，評価する人間によって感覚が異なる場合があり，扱うことが難しいという面もある．本項では，主観画質評価によく用いられる 5 種類の技術について説明する．

(a) Absolute Category Rating (ACR) [32]

図 2.21 [32]に示すように，ACR では評価者が評価対象映像を 10 [sec]視聴し，その直後 10 [sec]以内に評価点をつける．これをすべての評価対象映像に対して実施する．

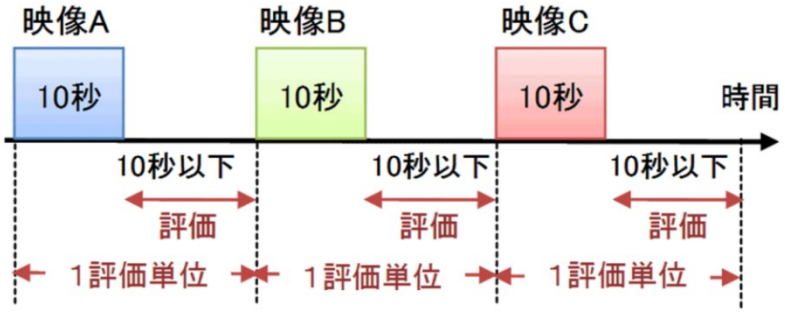


図 2.21 ACR における評価の方法[32]

評価者は，表 2.1 [32]に示す評価尺度に従って評価点をつけ，全評価者の評価点を加算平均した値（Mean Opinion Score; MOS）を ACR の最終的な評価値とする．

表 2.1 ACR における評価尺度[32]

評価点	評価
5	非常に良い (Excellent)
4	良い (Good)
3	普通 (Fair)
2	悪い (Poor)
1	非常に悪い (Bad)

ACR は，映像配信サービスの主観画質評価技術として最もよく用いられている．

(b) ACR with Hidden Reference (ACR-HR) [32]

ACR では，評価者は評価対象映像のみを視聴して評価点をつけるが，ACR-HR では評価対象映像の中に評価基準映像（評価対象映像を評価する際の基準となる映像）を導入し，ACR と同様図 2.21 に示す方法で各映像を評価する．評価基準映像としては，映像工学の専門家が 5 点あるいは 4 点をつけた映像が採用される．評価値は Differencial MOS (DMOS) と呼ばれ，式(2.13) [32]によって定義される．

$$\mathrm{DMOS} = \mathrm{MOS}_{\mathrm{eval}} - \mathrm{MOS}_{\mathrm{ref}} + 5 \tag{2.13}$$

式(2.13)において，$\mathrm{MOS}_{\mathrm{eval}}$ は評価対象映像の MOS，$\mathrm{MOS}_{\mathrm{ref}}$ は評価基準映像の MOS を表す．

ACR-HR では, 式(2.13)に示されるように評価基準映像と評価対象映像の差を評価値として用いるため，映像の内容（シーケンスの種類）が評価に与える影響を取り除くことができる．

(c) Degradation Category Rating (DCR) [32]

図 2.22 [32]に示すように，DCR では評価者は初めに評価基準映像を 10 [sec]視聴し，その 3 [sec]後に評価対象映像を 10 [sec]視聴する．さらにその後 5～11 [sec]以内に評価対象映像に対して評価値をつける．これをすべての評価対象映像に対して実施する．

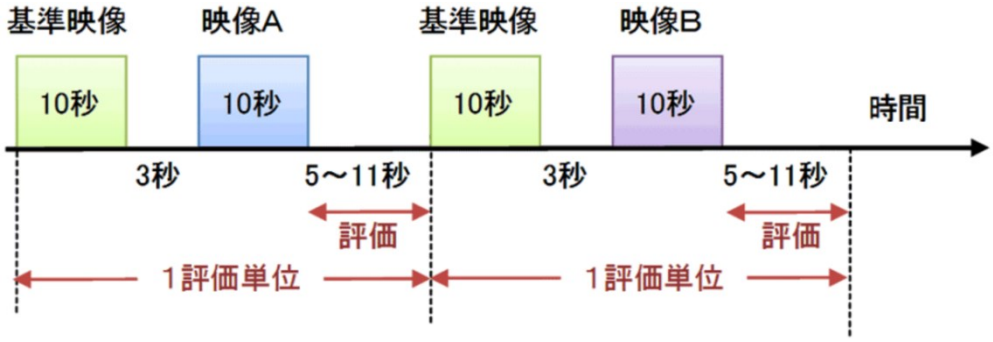


図 2.22 DCR における評価の方法[32]

DCR では，評価対象映像を視聴する前に必ず評価基準映像を視聴するため，評価基準映像に対する評価対象映像の劣化を評価することができる．したがって，評価尺度は表 2.2 [32]に示す通りとなる．表 2.2 に示す評価尺度に従って評価者がつけた評価点の MOS を DCR の最終的な評価値とする．なお，DCR におけるこの MOS は，Degradation MOS (DMOS)と呼ばれる．

表 2.2 DCR における評価尺度[32]

評価点	評価
5	劣化が認められない（Imperceptible）
4	劣化が認められるが気にならない（Perceptible, but not annoying）
3	劣化が認められ，わずかに気になる（Slightly annoying）
2	劣化が認められ，気になる（Annoying）
1	劣化が認められ，非常に気になる（Very annoying）

(d) Pair Comparison (PC) [32]

(a)，(b)，(c)で説明した主観画質評価技術では，1 評価単位で 1 種類の評価対象映像に評価点をつける．一方，PC を用いる場合，評価者は 2 種類の評価対象映像を 1 評価単位で評価する．図 2.23 [32]に示すように，2 種類の評価対象映像を 10 [sec]ずつ 2 [sec]間隔で視聴し，その直後 10 [sec]以内にこれら 2 種類の映像それぞれに評価点をつける．これをすべての評価対象映像に対して実施する．

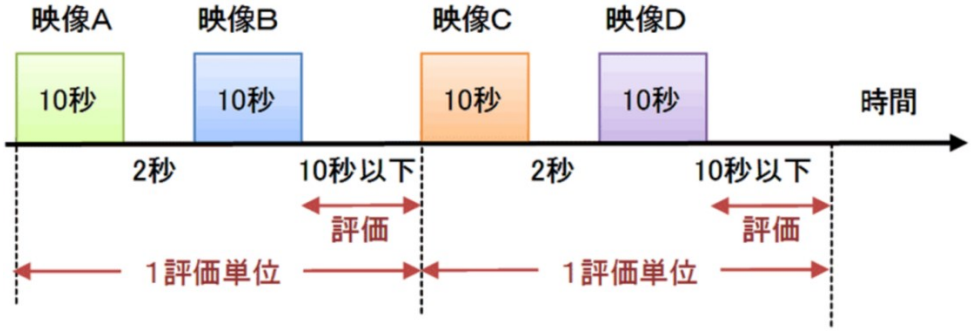


図 2.23 PC における評価の方法[32]

PC では，評価対象映像どうしを短い間隔（2[sec]間隔）で視聴するため，評価対象映像どうしの品質の差に着目した評価を行うことができる．したがって，PC に用いる評価尺度は表 2.3 [32]のように設定されている．表 2.3 に示す評価尺度に従って評価者がつけた評価点の MOS を PC の最終的な評価値とする．

表 2.3 PC における評価尺度[32]

評価点	評価
3	非常に良い（Much better）
2	良い（Better）
1	やや良い（Slightly better）
0	同じ（About the same）
-1	やや悪い（Slightly worse）
-2	悪い（Worse）
-3	非常に悪い（Much worse）

(e) Double Stimulus Continuous Quality Scale (DSCQS) [32]

DSCQS でも PC と同様に，1 評価単位で 2 種類の評価対象映像に評価値をつける．図 2.24 [32]に示すように，評価者は 2 種類の評価対象映像 A と B を 10 [sec]ずつ 3 [sec]間隔で 2 回視聴し，評価対象映像 A を 2 回目に視聴するときから評価対象映像 B を 2 回目に視聴後 5～11 [sec]以内にこれらに評価点をつける．これをすべての評価対象映像に対して実施する．

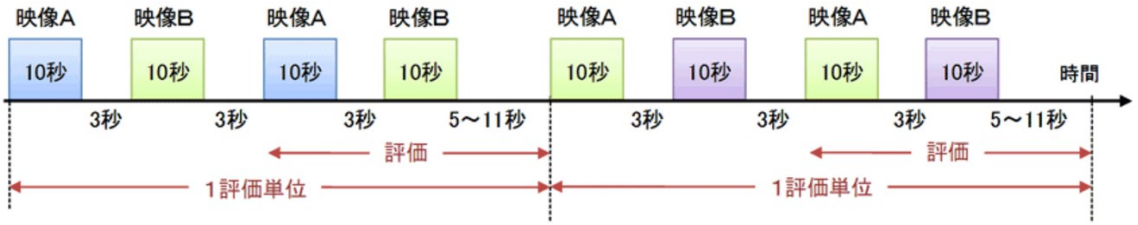


図 2.24 DSCQS における評価の方法[32]

DSCQS では，評価者は ACR と同様に表 2.1 に示す評価尺度に従って評価点をつける．

DSCQS は，放送に関連するシステムやサービスの主観画質評価技術としてよく用いられている．

第3章　8K 映像に対応した放送・通信連携プラットフォームの提案

第 1 章では，8K 映像の実用放送や放送番組の視聴環境の多様化に関する研究背景について述べた．次に，第 2 章では放送・通信連携プラットフォーム，映像配信技術，無線通信技術，映像圧縮符号化技術，映像走査技術，映像品質評価技術について，本研究に関連する技術を説明した．本章では，第 1 章で述べた研究背景を受け，第 2 章で説明した関連技術を用いて，8K 映像に対応した放送・通信連携プラットフォームの一例を提案する．

3.1 提案プラットフォームの概要

本研究では，8K 映像に対応した放送・通信連携プラットフォームの一例として，「MPEG-DASH を用いた 8K 放送番組再送信プラットフォーム」を提案する．この提案プラットフォームの概念図を図 3.1 に示す．

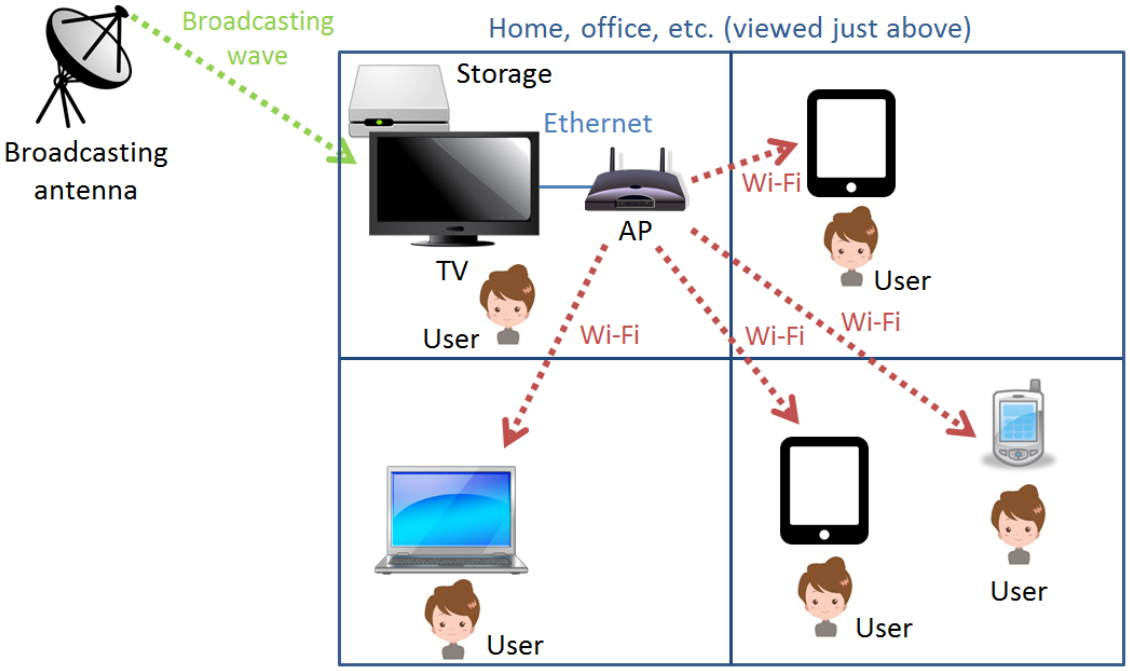


図 3.1 MPEG-DASH を用いた 8K 放送番組再送信プラットフォーム（概念図）

図 3.1 に示す提案プラットフォームは，テレビ受信機が放送波によって受信した 8K 放送番組を，テレビ受信機にイーサネット接続した Wi-Fi AP から同一屋内のモバイル端末へ MPEG-DASH を用いて再送信する．この提案プラットフォームを用いることで，次に示す利便性を実現することができる．

・テレビ受信機以外のモバイル端末でも 8K 放送番組を視聴できる（ただし，現時点ではモバイル端末へ再送信された 8K 映像のリアルタイムデコードはできない）.
・テレビ受信機によって受信された 8K 放送番組は，テレビ受信機にマウントされたストレージ機器に保存されているため，放送終了後はいつでもモバイル端末へ再送信することができる.
・モバイル端末へは HTTP を用いて配信（再送信）されるため，モバイル端末用のテレビチューナーや映像配信専用のプロトコルに対応したアプリケーションは不要である.

3.2 提案プラットフォームの詳細

本節では，3.1 節で提案した「MPEG-DASH を用いた 8K 放送番組再送信プラットフォーム」の詳細を述べる.

この提案プラットフォームを用いて 8K 放送番組がモバイル端末へ再送信される際の具体的な手順は次の①～③に示す通りである.

① テレビ受信機が放送アンテナから放送波によって 8K 放送番組を受信する.
② テレビ受信機によって受信された 8K 放送番組は，テレビ受信機で一旦復号され（ここまでは従来の放送サービスと同様），複数のビットレート（MPEG-DASH のレプリゼンテーション）にトランスコードされる．トランスコードされた各レプリゼンテーションの 8K 映像は MPEG-DASH セグメントに分割され，テレビ受信機にマウントされたストレージ機器に保存される.
③ テレビ受信機にイーサネット接続した Wi-Fi AP から, MPEG-DASH を用いて同一屋内のモバイル端末へ 8K 放送番組が再送信される.

ここで，それぞれの手順について詳しく説明する.

まず，手順①については，日本における 8K 映像の実用放送では映像圧縮符号化規格として H.265/HEVC が採用される予定であるため，提案プラットフォームにおいても H.265/HEVC で圧縮符号化された 8K 放送番組がテレビ受信機によって受信されることを想定するものとする.

次に，手順②については，MPEG-DASH の階層構造に基づき，テレビ受信機が受信した 8K 放送番組を複数のレプリゼンテーションにトランスコードするが，このトランスコードにも H.265/HEVC を用いる．各レプリゼンテーションの 8K 映像は再生期間が 2 [sec]のセグメントに分割され，各セグメントの URL を定義した MPD とともにテレビ受信機にマウントされたストレージ機器に保存される.

最後に, 手順③については, テレビ受信機にイーサネット接続した 1 台の Wi-Fi AP（Wi-Fi の通信方式は IEEE802.11ac）から，MPEG-DASH を用いてモバイル端末へ 8K 放送番組が配信（再送信）される．このとき，MPEG-DASH のメカニズムによって配信を行うため

に DASH-JS が用いられており，モバイル端末は Google Chrome ブラウザを使用して 8K 放送番組のセグメントを取得する．

これら①～③の手順を図 3.1 の概念図と対応させると，図 3.2 のようになる．

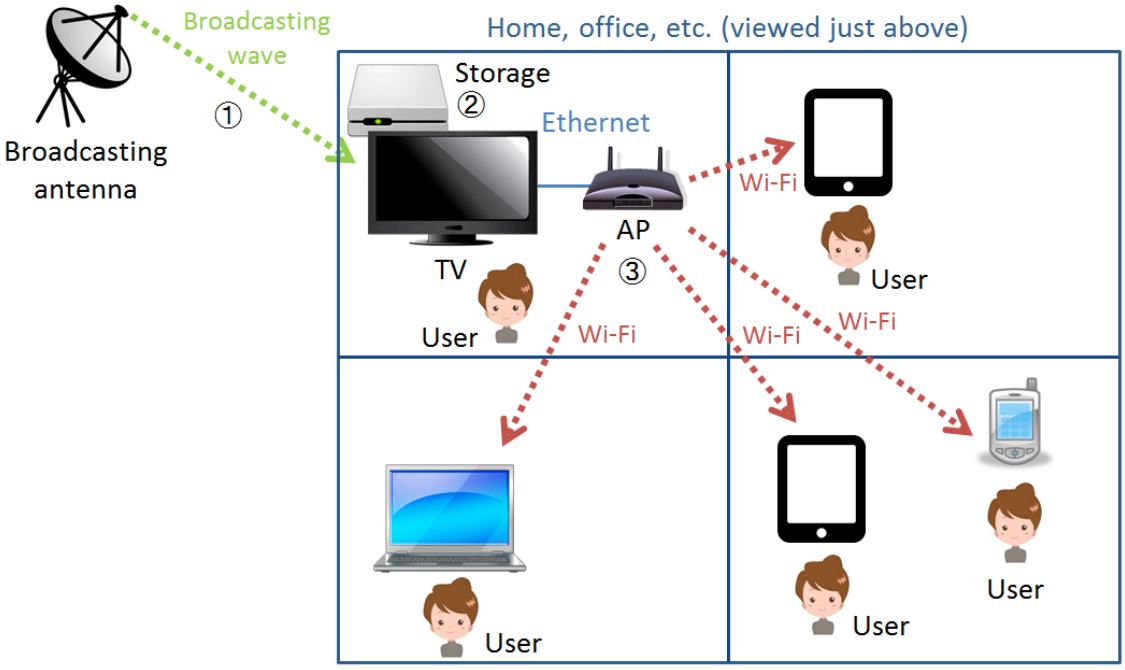


図 3.2 MPEG-DASH を用いた 8K 放送番組再送信プラットフォーム（再送信手順）

第4章　　配信品質に関する検討

第 3 章では，8K 映像に対応した放送・通信連携プラットフォームの一例である「MPEG-DASH を用いた 8K 放送番組再送信プラットフォーム」を提案した．本章では，まずこの提案プラットフォームにおいて，8K 放送番組がテレビ受信機にイーサネット接続した Wi-Fi AP から同一屋内のモバイル端末へ配信（再送信）される際の配信品質に関するモデルを構築する．次に，実機実験によってそのモデルの妥当性を検証するとともに，配信品質を評価する．

4.1 配信品質に関するモデルの構築

本節では，第 3 章で提案した放送・通信連携プラットフォームにおいて，8K 放送番組がテレビ受信機にイーサネット接続した Wi-Fi AP から同一屋内にあるモバイル端末へ配信（再送信）される際の配信品質に関するモデルを構築する．

4.1.1　再生バッファ制御に着目した複数端末への映像配信に関するモデル

第 3 章で提案した放送・通信連携プラットフォームでは，テレビ受信機にイーサネット接続した Wi-Fi AP から同一屋内にあるモバイル端末へ 8K 放送番組を再送信する際，MPEG-DASH を用いて配信する．また，MPEG-DASH のメカニズムによって配信を行うために DASH-JS を採用している．DASH-JS では，再生バッファ制御技術として Long ON-OFF Cycles を用いている．このため本項では，再生バッファ制御技術として Long ON-OFF Cycles を用いて，1 台の Wi-Fi AP からモバイル端末へ MPEG-DASH 配信を行う場合の配信品質に関するモデルを構築する．また，提案プラットフォームでは，複数のモバイル端末へ同時に 8K 放送番組を再送信するユースケースが想定されるため，本項で構築するモデルは複数のモバイル端末への同時配信にも対応させる．

まず，モデル中で用いる定数を表 4.1 に示す通り導入する．表 4.1 において，C [Mbps]は Wi-Fi AP がモバイル端末に対して提供できる可用帯域を表す．また，R [Mbps]は MPEG-DASH のレプリゼンテーションを表し，その最大値を $R_{\max}$ [Mbps]，最小値を $R_{\min}$ [Mbps]とする．$B_{\max}$ [sec]および $B_{\min}$ [sec]は，モバイル端末上の再生バッファサイズの最大値および最小値を表す．T_{on} [sec]および T_{off} [sec]は，Long ON-OFF Cycles における ON-period の期間および OFF-period の期間を表す．モバイル端末数は n で表され，競合回避を実現できる最大モバイル端末数を $n_{\max}$ とする．ここでの競合回避とは，「すべてのモバイル端末が互いに映像再生に影響を与えることなくセグメントを取得できる」ことである．

表 4.1 モデルにおける定数の定義

定数	定数が示すもの	単位
C	可用帯域	Mbps
R	レプリゼンテーション	Mbps
$R_{\max}$	レプリゼンテーションの最大値	Mbps
$R_{\min}$	レプリゼンテーションの最小値	Mbps
$B_{\max}$	再生バッファサイズの最大値	sec
$B_{\min}$	再生バッファサイズの最小値	sec
T_{on}	ON-period の期間	sec
T_{off}	OFF-period の期間	sec
n	モバイル端末数	台
$n_{\max}$	競合回避を実現できる最大モバイル端末数	台

次に，Long ON-OFF Cycles を用いて 1 台の Wi-Fi AP から 1 台のモバイル端末へ MPEG-DASH 配信を行う場合について考える．単純化のため，まずはレプリゼンテーションを固定する（すなわち $R = R_{\max} = R_{\min}$ [Mbps]であり，MPEG-DASH における適応レート制御を行わない場合を考える）．また，可用帯域 C [Mbps]はレプリゼンテーション R [Mbps]に比べて大きいものとする．Long ON-OFF Cycles では，モバイル端末は図 4.1 に示す通り再生バッファサイズが最小値 $B_{\min}$ [sec]のときに ON-period を開始し，ON-period の期間中にはセグメントを取得しながら再生し，再生バッファサイズが最大値 $B_{\max}$ [sec]に達すると一旦新たなセグメントの取得をやめる．

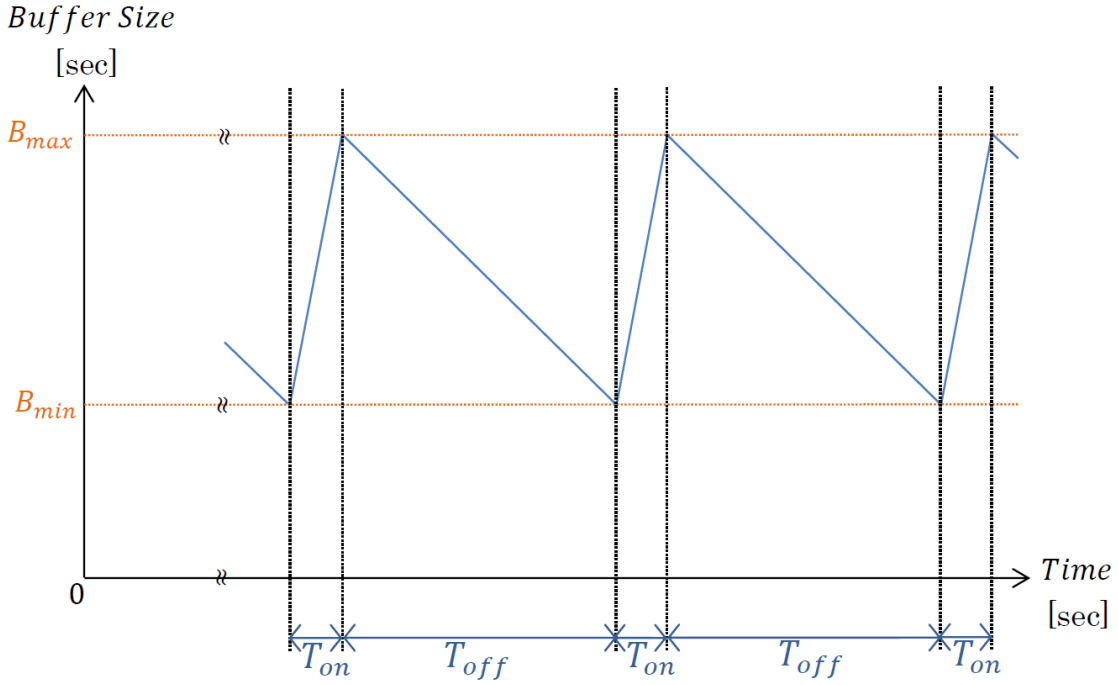


図 4.1 モバイル端末数が 1 台の場合の再生バッファサイズの挙動

すなわち，1 回の ON-period の期間である T_{on} [sec]の間に，モバイル端末は $B_{\max} - B_{\min}$ [sec]のセグメントおよびその期間中に再生される T_{on} [sec]のセグメントを取得する．以上のことを踏まえると，式(4.1)を導くことができる．

$$T_{on} = \frac{R(B_{\max} - B_{\min} + T_{on})}{C} \tag{4.1}$$

式(4.1)を T_{on} について整理することで，式(4.2)が導かれる．

$$T_{on} = \frac{R(B_{\max} - B_{\min})}{C - R} \tag{4.2}$$

モバイル端末上の再生バッファサイズが最大値 $B_{\max}$ [sec]に達すると，再生バッファサイズが最小値 $B_{\min}$ [sec]に減少するまでは OFF-period の期間であり，モバイル端末は新たなセグメントを取得せず映像再生のみを行う．すなわち，OFF-period の期間 T_{off} [sec]は，式(4.3)のように表現される．

$$T_{off} = B_{\max} - B_{\min} \tag{4.3}$$

さらに，モバイル端末数を一般化して n 台とする．モバイル端末間における競合回避を実現できる理想状態の一例として，各モバイル端末の ON-period が時間的に重複しない場合を考える．この場合，各モバイル端末上の再生バッファサイズは図 4.2 のようにな挙動を示す（図の簡潔化のため，図 4.2 におけるモバイル端末数は $n = 3$ とする）．

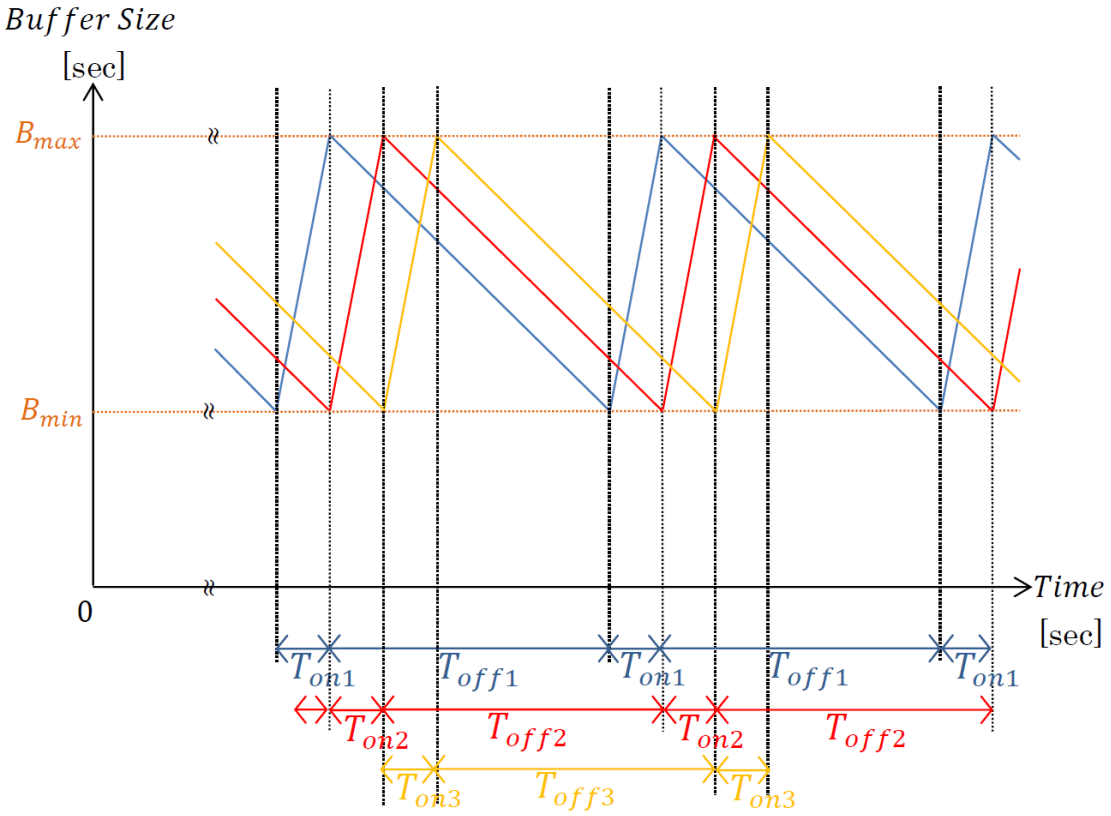


図 4.2 各モバイル端末の ON-period が時間的に重複しない場合の再生バッファサイズの挙動（$n = 3$）

図 4.2 に示すように, 各モバイル端末の ON-period が時間的に重複しないようにするには, あるモバイル端末の OFF-period の期間に他のすべてのモバイル端末の ON-period が重なることなく収まればよい．すなわち，モバイル端末間における競合回避を実現できる最大モバイル端末数 $n_{\max}$ は式(4.4)のように表現できる．

$$n_{\max} = \left\lfloor \frac{T_{off}}{T_{on}} + 1 \right\rfloor \tag{4.4}$$

式(4.4)において，⌊ ⌋は床関数を表し，一般に$\lfloor x \rfloor$は x を超えない最大の整数を意味する．式(4.2)，式(4.3)を式(4.4)に代入することで，モバイル端末間における競合回避を実現できる最大モバイル端末数 $n_{\max}$ は式(4.5)のように表すことができる．

$$n_{\max} = \left\lfloor \frac{C}{R} \right\rfloor \tag{4.5}$$

式(4.5)より，レプリゼンテーションを固定する場合（すなわち，MPEG-DASH における適応レート制御を行わない場合）は，モバイル端末間における競合回避を実現できる最大モバイル端末数 $n_{\max}$ は可用帯域 C とレプリゼンテーション R のみを用いて表すことができることが確認される．

ここまでは単純化のためレプリゼンテーションを固定していたが，ここからはレプリゼンテーションを最大値 $R_{\max}$ [Mbps] と最小値 $R_{\min}$ [Mbps] の範囲で変化させ，MPEG-DASH の適応レート制御を活用する場合の配信品質について考える．まず，式(4.5)におけるレプリゼンテーション R [Mbps]に，その最大値 $R_{\max}$ [Mbps] と最小値 $R_{\min}$ [Mbps]を代入したものをそれぞれ M ， N とする．すなわち， M と N はそれぞれ式(4.6)，式(4.7)のように表現される．

$$M = \left\lfloor \frac{C}{R_{\max}} \right\rfloor \tag{4.6}$$

$$N = \left\lfloor \frac{C}{R_{\min}} \right\rfloor \tag{4.7}$$

M と N は，それぞれすべてのモバイル端末が最大および最小のレプリゼンテーションのセグメントを取得するという仮定のもとでモバイル端末間の競合回避を実現できる最大モバイル端末数である．これら 2 つの値を，Wi-Fi AP から複数のモバイル端末へ映像コンテンツを配信する際の配信品質の解析指標として用いて，モバイル端末数 n との大小を比較することでその配信品質を次の 3 種類に分類することができる．

(i) $n \le M$ のとき，

モバイル端末間における競合回避を実現でき，最大レプリゼンテーション $R_{\max}$ [Mbps] のセグメントを取得できる．

(ii) $M < n \leq N$ のとき，

モバイル端末間でセグメントの取得に競合が発生するが，MPEG-DASH の適応レート制御により再生中断を回避できる．

(iii) $N < n$ のとき，

(ii)と同様にセグメントの取得に競合が発生し，MPEG-DASH の適応レート制御を用いてすべてのモバイル端末が最小レプリゼンテーション $R_{\min}$ [Mbps]を選択しても再生中断を回避できない．

4.1.2 可用帯域に関するモデル

4.1.1 項では，モバイル端末上の再生バッファ制御に着目し，1 台の Wi-Fi AP から同一屋内にある複数のモバイル端末へ MPEG-DASH を用いて映像コンテンツを配信する際の配信品質に関するモデルを構築した．このモデルは，可用帯域 C を一定値（すなわち，Wi-Fi AP とモバイル端末との位置関係によって可用帯域は変化しない）として扱っており，Wi-Fi AP とモバイル端末が同一室内かつ近距離にあることを前提としている．しかし，第 3 章で提案した放送・通信連携プラットフォームでは，サーバに接続した Wi-Fi AP とモバイル端末が同一室内にない場合もユースケースとして想定され得る．その場合は，Wi-Fi AP がモバイル端末に対して提供できる可用帯域がモバイル端末との距離によって変化することがある．また，Wi-Fi 規格として IEEE802.11ac を用いる場合は，使用する無線チャネル幅によっても可用帯域は大きく異なる．したがって，本項では Wi-Fi AP がモバイル端末に対して提供する可用帯域を，Wi-Fi AP とモバイル端末の間の距離の関数として定義するとともに，無線チャネル幅ごとに分けて定義することにする．

本項では，第 3 章で提案した放送・通信連携プラットフォームにおいて 8K 放送番組が Wi-Fi AP からモバイル端末へ配信（再送信）される際の配信品質をより正確に解析するモデルを構築するため，可用帯域の実測データから無線チャネル幅ごとに可用帯域の距離による関数を経験的に定義する．具体的には，第 3 章で提案する放送・通信連携プラットフォーム内で用いる Wi-Fi AP と 8K 放送番組を再送信する Android スマートフォンを IEEE8002.11ac を用いて接続し，その間の距離を変化させながら帯域計測ソフトウェア iPerf [33]を用いて可用帯域を計測する．計測の際，無線チャネル幅が複数選択できる場合は，選択可能なすべての無線チャネル幅に対して可用帯域を計測する．計測した可用帯域のデータ（実測データ）から，赤池情報量規準（Akaike's Information Criterion; AIC）[34]を用いることで，可用帯域を無線チャネル幅ごとに距離の多項式関数に近似する．近似により導いた可用帯域は，Wi-Fi AP とモバイル端末の間の距離を d [m]，無線チャネル幅を w [MHz]とし，$C_w(d)$ [Mbps]と表現する．

4.1.3　提案プラットフォームにおける配信品質に関するモデル

4.1.1 項では，モバイル端末上の再生バッファ制御に着目し，1 台の Wi-Fi AP から同一屋内にある複数のモバイル端末へ MPEG-DASH を用いて映像コンテンツを配信する際の配信品質に関するモデルを構築した．次に，4.1.2 項では，Wi-Fi AP がモバイル端末に提供する可用帯域を，無線チャネル幅ごとに Wi-Fi AP とモバイル端末の間の距離の関数 $C_w(d)$ として定義する方法を示した．本項では，これらを統合し，第 3 章で提案した放送・通信連携プラットフォームにおいて 8K 放送番組がテレビ受信機にイーサネット接続した Wi-Fi AP から同一屋内のモバイル端末へ配信（再送信）される際の配信品質に関するモデルを構築する．

4.1.1 項で提示した数式のうち，可用帯域 C が含まれるものについては，C を $C_w(d)$ に置き換える．これにより，Long ON-OFF Cycles における ON-period の期間 T_{on} [sec]，モバイル端末間における競合回避を実現できる最大モバイル端末数 $n_{\max}$，配信品質の解析指標である M および N の 4 つについては，それぞれ式(4.8)，式(4.9)，式(4.10)，式'(4.11)のようにチャネル幅ごとに Wi-Fi AP とモバイル端末の間の距離の関数として再定義される．

$$T_{on\ w}(d) = \frac{R(B_{\max} - B_{\min})}{C_w(d) - R} \tag{4.8}$$

$$n_{\max\ w}(d) = \left\lfloor \frac{C_w(d)}{R} \right\rfloor \tag{4.9}$$

$$M_w(d) = \left\lfloor \frac{C_w(d)}{R_{\max}} \right\rfloor \tag{4.10}$$

$$N_w(d) = \left\lfloor \frac{C_w(d)}{R_{\min}} \right\rfloor \tag{4.11}$$

以上より，第 3 章で提案した放送・通信連携プラットフォームにおいて，8K 放送番組がテレビ受信機にイーサネット接続した Wi-Fi AP から同一屋内にあるモバイル端末へ配信（再送信）される際の配信品質は，実際のモバイル端末数 n と解析指標 $M_w(d)$，$N_w(d)$ の大小を比較することで次の 3 種類に分類することができる．

(i) $n \le M_w(d)$ のとき，

モバイル端末間における競合回避を実現でき，最大レプリゼンテーション $R_{\max}$ [Mbps] のセグメントを取得できる．

(ii) $M_w(d) < n \le N_w(d)$ のとき，

モバイル端末間でセグメントの取得に競合が発生するが，MPEG-DASH の適応レート制御により再生中断を回避できる．

(iii) $N_w(d) < n$ のとき,

(ii)と同様にセグメントの取得に競合が発生し, MPEG-DASH の適応レート制御を用いてすべてのモバイル端末が最小レプリゼンテーション $R_{\min}$ [Mbps]を選択しても再生中断を回避できない.

4.2 実機実験

4.1 節では，第 3 章で提案した，8K 映像に対応した放送・通信連携プラットフォームの一例である「MPEG-DASH を用いた 8K 放送番組再送信プラットフォーム」において，8K 放送番組がテレビ受信機にイーサネット接続した Wi-Fi AP から同一屋内にあるモバイル端末へ配信（再送信）される際の配信品質に関するモデルを構築した．本節では，実機実験によってこのモデルの妥当性を検証するとともに，配信品質を評価する．

4.2.1 実験環境および評価指標

第 3 章で提案した放送・通信連携プラットフォームにおいて，8K 放送番組がテレビ受信機にイーサネット接続した Wi-Fi AP から同一屋内にあるモバイル端末へ配信（再送信）される環境を再現すべく，本項では次のような実験環境を構築する．

8K 映像の BS 実用放送を想定し，8K/60P (Progressive) 映像を H.265/HEVC で 80 [Mbps]に圧縮符号化する．符号化方式は Random Access，画面間予測における動き探索範囲は 64 画素である．ここで，ビットレート，符号化方式，動き探索範囲はすべて 8K 映像の BS 実用放送で想定されている設定に倣っている．この 8K 放送番組を想定した 8K 映像をモバイル端末へ再送信するため，MPEG-DASH で定義される階層構造に基づき，H.265/HEVC によって複数のレプリゼンテーション（40，60，80 [Mbps]）にトランスコードし，2 [sec]毎のセグメントを生成する．また，第 3 章で提案した放送・通信連携プラットフォームにおけるテレビ受信機を想定し，DASH-JS によって実装した MPEG-DASH サーバを研究室内に設置し, 8K 映像のセグメントと各セグメントの URL が定義された MPD をこのサーバ上に置く．さらに，図 4.3 に示すように，このサーバに IEEE802.11ac 対応の Wi-Fi AP をイーサネット接続する．8K 映像のセグメントは，この Wi-Fi AP を通してモバイル端末へ配信（再送信を想定）される．モバイル端末（IEEE802.11ac 対応 Android スマートフォン）はサーバおよび Wi-Fi AP と同一室内または隣の部屋にあるものとする．サーバにイーサネット接続した Wi-Fi AP とモバイル端末を結ぶ無線チャネル幅は，20，40，80 [MHz]のいずれかである．

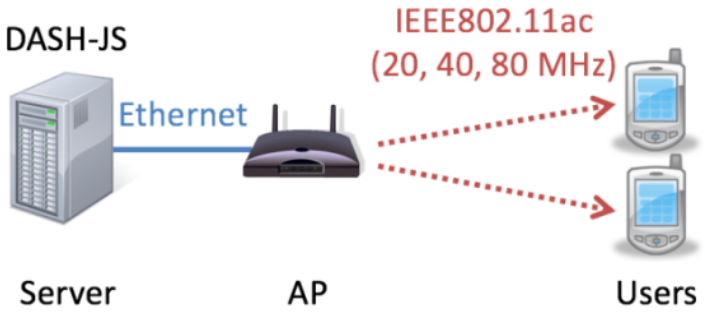


図 4.3 実機実験におけるトポロジー

評価指標は，200 秒間の配信における MPEG-DASH セグメント取得時のスループット，選択されたレプリゼンテーションの平均値を採用する．

また，4.1.2 項で説明した通り，この実験環境においてサーバにイーサネット接続した Wi-Fi AP とモバイル端末の間の距離による可用帯域の関数を定義する．そのため，サーバにイーサネット接続した Wi-Fi AP と Android スマートフォンを IEEE8002.11ac を用いて接続し，その間の距離を 1 [m]ずつ変化させながら iPerf を用いて可用帯域を計測する．この Wi-Fi AP は，IEEE802.11ac のチャネルボンディングにおいて 20，40，80 [MHz]の無線チャネル幅に対応しているため，これらすべての無線チャネル幅に対して可用帯域の計測を実施する．計測の際，Wi-Fi AP から約 6 [m]離れた位置にコンクリート製の壁がある．計測の結果を図 4.4 に示す．図 4.4 には，可用帯域の計測結果から AIC を用いて，可用帯域を Wi-Fi AP とモバイル端末の間の距離の 2 次関数に近似した曲線も併せて記載している（AIC により，図 4.4 の計測結果から多項式近似関数を作成する際の最高次数は，モデルの簡潔性を失わない 1～3 の次数のうち 2 が最適であることを確認している）．

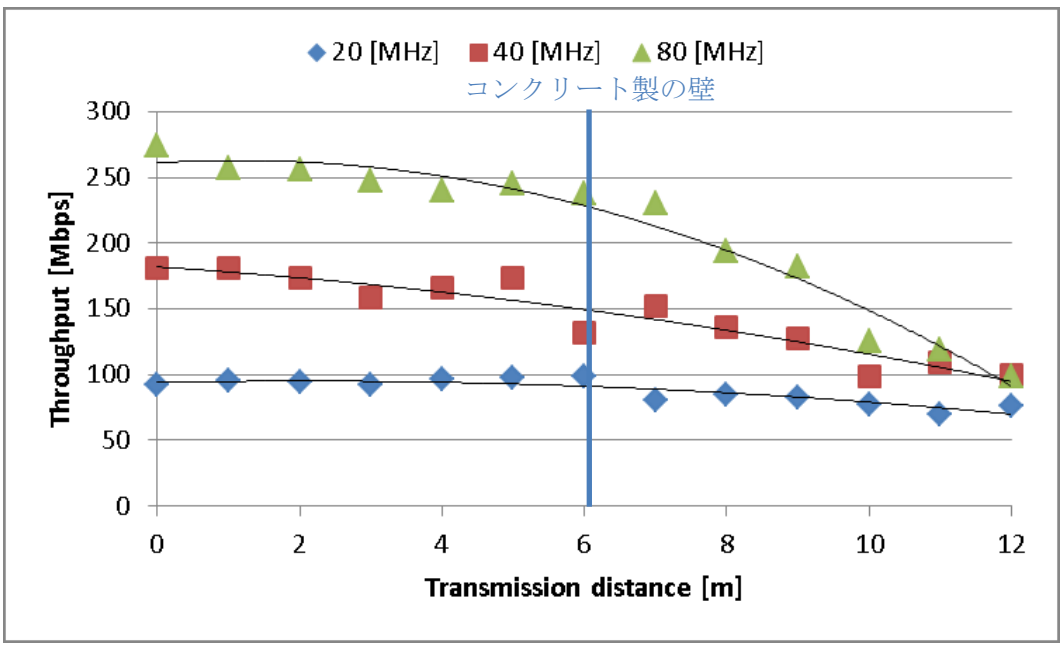


図 4.4 計測した可用帯域とその近似関数

図 4.4 に示す近似関数を式(4.12)に示す．式(4.12)において，(A)，(B)，(C)はそれぞれ無線チャネル幅が 20，40，80 [MHz]の場合の可用帯域を示している．

$$C_{20}(d) = -0.2557\,d^2 + 1.0656\,d + 93.914 \quad \text{(A)}$$

$$C_{40}(d) = -0.3077\,d^2 - 3.5670\,d + 181.86 \quad \text{(B)}$$

$$C_{80}(d) = -1.4502\,d^2 + 3.2810\,d + 260.93 \quad \text{(C)}$$

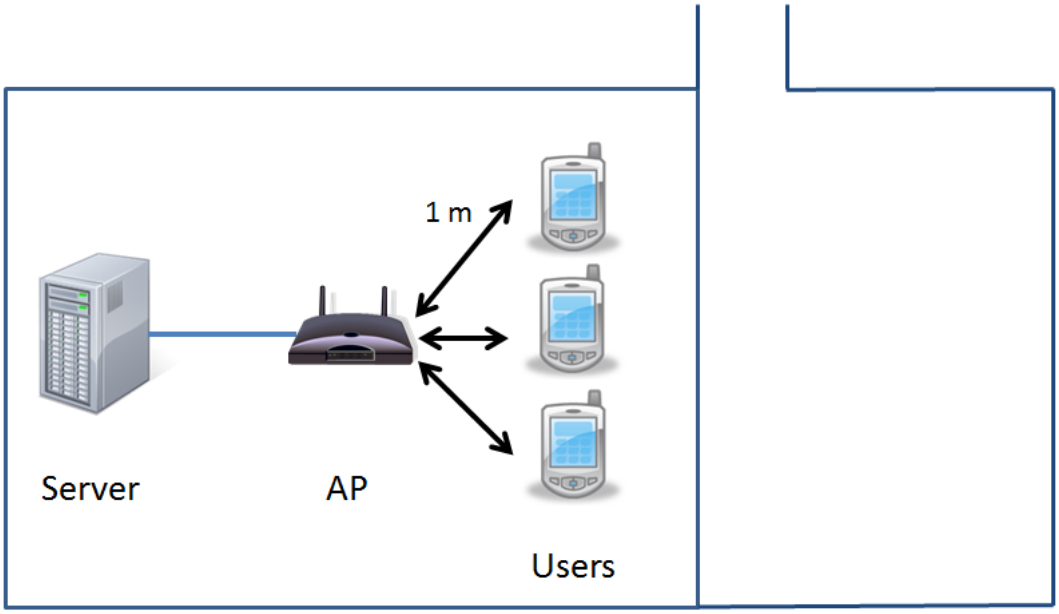
4.2.2　実験シナリオ

第 3 章で提案した放送・通信連携プラットフォームにおける配信品質を評価するため，および 4.1 節で構築したモデルの妥当性を検証するため，本項では表 4.2 に示す 6 種類の実験シナリオを用意する．

表 4.2 実験シナリオ

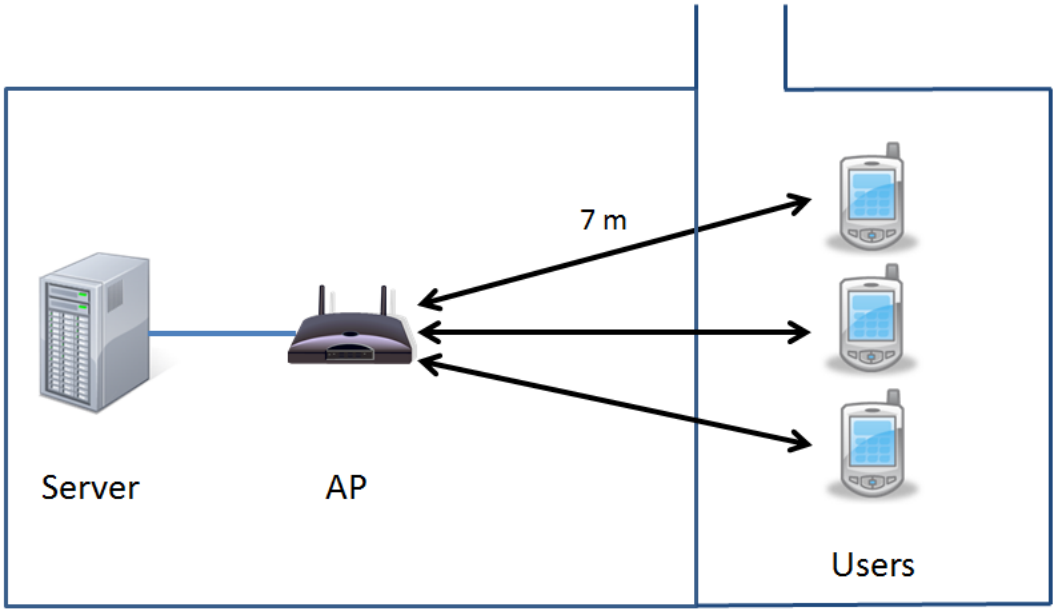
シナリオ名	モバイル端末数	モバイル端末の位置 （Wi-Fi AP とモバイル端末の距離）
(a)	1	Wi-Fi AP と同一室内 （1 [m]）
(b)	2	
(c)	3	
(d)	1	Wi-Fi AP の隣の部屋 （7 [m]）
(e)	2	
(f)	3	

シナリオ(a)，(b)，(c)では，モバイル端末は Wi-Fi AP と同一室内にあり，Wi-Fi AP とモバイル端末の距離は 1 [m]である．モバイル端末数はシナリオ(a)では 1 台，シナリオ(b)では 2 台，シナリオ(c)では 3 台である．一方，シナリオ(d)，(e)，(f)では，モバイル端末は Wi-Fi AP の隣の部屋にあり，Wi-Fi AP とモバイル端末の距離は 7 [m]である．また，部屋間はコンクリート製の壁で仕切られている．モバイル端末数は，シナリオ(d)では 1 台，シナリオ(e)では 2 台，シナリオ(f)では 3 台である．各シナリオにおける，サーバにイーサネット接続した Wi-Fi AP とモバイル端末の位置関係を図 4.5 に示す．



(i) シナリオ(a)，(b)，(c)

（モバイル端末数は，(a)では 1 台，(b)では 2 台，(c)では 3 台）



(ii) シナリオ(d)，(e)，(f)

（モバイル端末数は，(d)では 1 台，(e)では 2 台，(f)では 3 台）

図 4.5 サーバにイーサネット接続した Wi-Fi AP とモバイル端末の位置関係

4.2.3　モデルの検証および配信品質の評価

本項では，4.2.2 項で用意した 6 種類の実験シナリオに基づく実機実験の結果により，4.1 節で構築したモデルの妥当性を検証するとともに，第 3 章で提案した放送・通信連携プラットフォームにおける配信品質を評価する．

まずは，モバイル端末がサーバにイーサネット接続した Wi-Fi AP と同一室内にある場合について考える．

(a) 1 台のモバイル端末を Wi-Fi AP と同一室内に配置

まず，シナリオ(a)について，4.1 節で構築したモデルを用いて配信品質を解析する．シナリオ(a)では，サーバにイーサネット接続した Wi-Fi AP とモバイル端末の間の距離が 1 [m] であるから，$d = 1$ である．これを式(4.12)に代入し，各無線チャネル幅 (20, 40, 80 [MHz]) における可用帯域 $C_{20}(1)$，$C_{40}(1)$，$C_{80}(1)$ を導く．これらと $R_{\max} = 75.5$，$R_{\min} = 43.4$ をそれぞれ式(4.10), 式(4.11)に代入することで, 配信品質解析指標として $M_{20}(1)$，$M_{40}(1)$，$M_{80}(1)$，$N_{20}(1)$，$N_{40}(1)$，$N_{80}(1)$ を表 4.3 のように導く．

表 4.3 シナリオ(a)における配信品質解析指標

チャネル幅 w [MHz]	$M_w(d)$	$N_w(d)$
20	1	2
40	2	4
80	3	6

シナリオ(a)ではモバイル端末数は 1 台であるから，$n = 1$ である．したがって，無線チャネル幅によらず $n \le M_w(d)$ が成立する．すわなち，モデルによれば，モバイル端末は無線チャネル幅によらず常に最大レプリゼンテーションを選択できる．ここで，図 4.6 に示す実機実験結果を確認すると，無線チャネル幅によらずほとんど常に最大レプリゼンテーションを選択できていることがわかる．

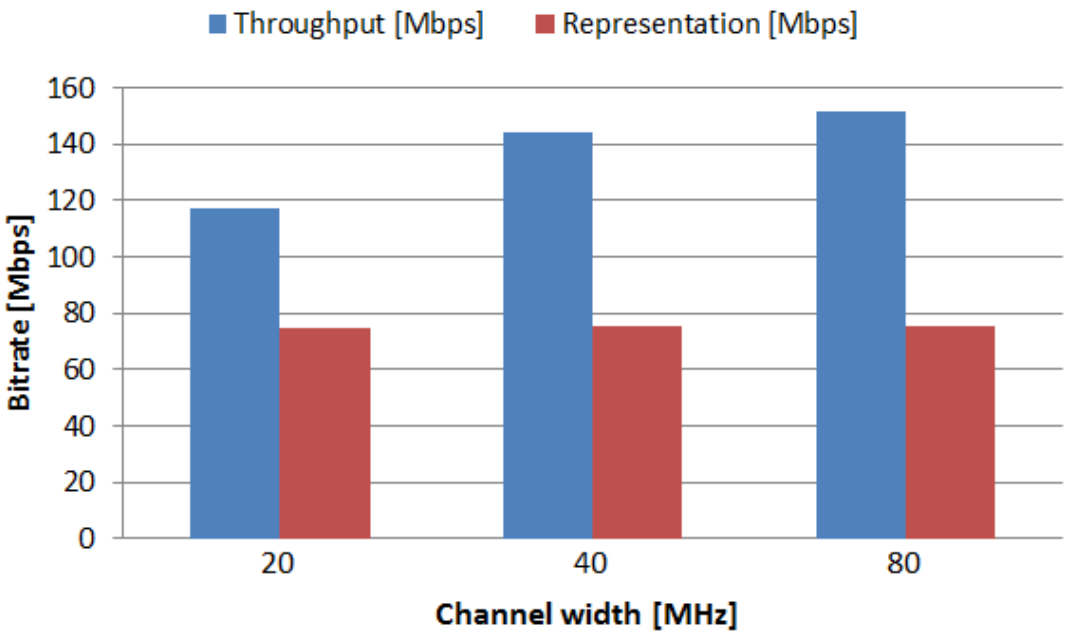


図 4.6 シナリオ(a)における配信品質

以上より，シナリオ(a)においてモデルと実機実験結果は一致していることがわかる．

(b) 2 台のモバイル端末を Wi-Fi AP と同一室内に配置

次に，シナリオ(b)について同様にモデルを用いて配信品質を解析する．シナリオ(a)からシナリオ(b)への変更点は，モバイル端末数を 1 台から 2 台に増やしたことであり，モデルにおける配信品質解析指標 $M_w(d)$ および $N_w(d)$ はモバイル端末数に依存しないため，これらの値はシナリオ(a)と同じく表 4.3 に示す通りである．シナリオ(b)ではモバイル端末数は 2 台であるから，$n = 2$ である．したがって，無線チャネル幅が 20 [MHz]の場合は $M_w(d) < n \le N_w(d)$，無線チャネル幅が 40，80 [MHz]の場合は $n \le M_w(d)$ が成立する．すなわち，モデルによれば，無線チャネル幅が 20 [MHz]の場合はモバイル端末間でセグメントの取得に競合が発生するが，適応レート制御により再生中断を回避でき，無線チャネル幅が 40, 80 [MHz]の場合はシナリオ(a)と同様にモバイル端末は 2 台とも常に最大レプリゼンテーションを選択できる．ここで，図 4.7 に示す実機実験結果を確認すると，無線チャネル幅が 20 [MHz]の場合はレプリゼンテーションの平均値は最大値と最小値の間にあり，適応レート制御により再生中断を回避できていることが確認できる（スループットがレプリゼンテーションを上回っていれば，再生中断は発生しない）．さらに，無線チャネル幅が 40, 80 [MHz]の場合はほとんど常に最大レプリゼンテーションを選択できている．

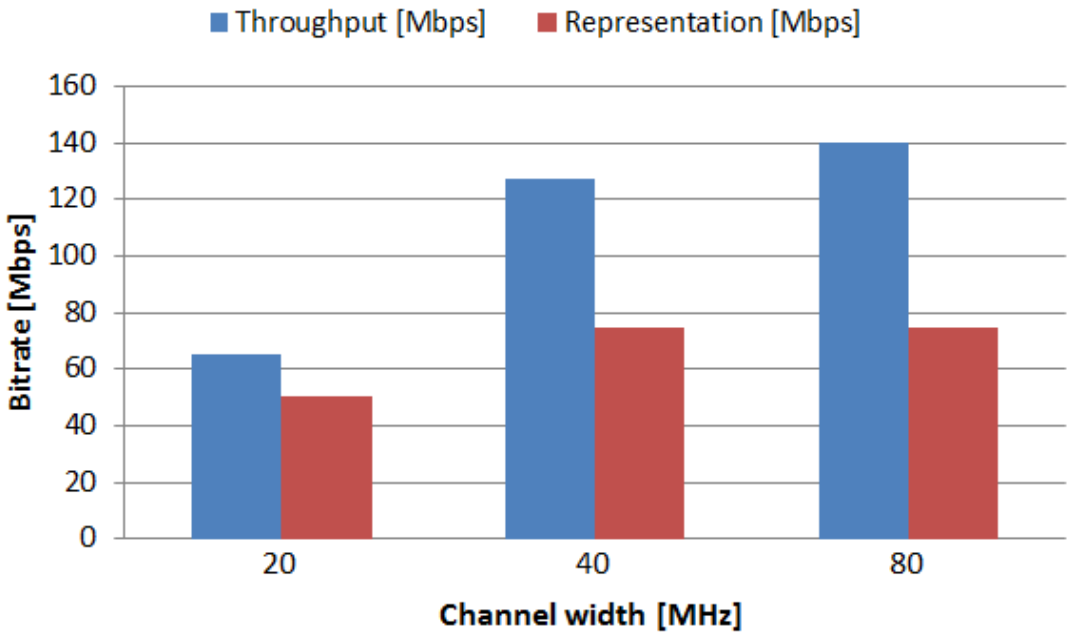


図 4.7 シナリオ(b)における配信品質

以上より，シナリオ(b)においてモデルと実機実験結果は一致していることがわかる．

(c) 3 台のモバイル端末を Wi-Fi AP と同一室内に配置

さらに，シナリオ(c)について同様にモデルを用いて配信品質を解析する．シナリオ(b)からシナリオ(c)への変更点は，モバイル端末数を 2 台から 3 台に増やしたことであり，シナリオ(a)と(b)の関係と同様に，モデルにおける配信品質解析指標 $M_w(d)$ および $N_w(d)$ はモバイル端末数に依存しないため，これらの値はシナリオ(a)，(b)と同じく表 4.3 に示す通りである．シナリオ(c)ではモバイル端末数は 3 台であるから，$n = 3$ である．したがって，無線チャネル幅が 20 [MHz]のときは $N_w(d) < n$，無線チャネル幅が 40 [MHz]のときは $M_w(d) < n \leq N_w(d)$，無線チャネル幅が 80 [MHz]のときは $n \leq M_w(d)$ が成立する．すなわち，モデルによれば，無線チャネル幅が 20 [MHz]の場合はモバイル端末間でセグメントの取得に競合が発生し，適応レート制御を用いてすべてのモバイル端末が最小レプリゼンテーションを選択しても再生中断を回避できない．一方，無線チャネル幅が 40 [MHz]の場合は，モバイル端末間でセグメントの取得に競合が発生するが，適応レート制御により再生中断を回避できる．さらに，無線チャネル幅が 80 [MHz]の場合は，モバイル端末は 3 台とも常に最大レプリゼンテーションを選択できる．ここで，図 4.8 に示す実機実験結果を確認すると，無線チャネル幅が 20 [MHz]の場合は，スループットがレプリゼンテーションの最低値を下回っており，再生中断が発生していることが確認できる．無線チャネル幅が 40 [MHz]の場合は，レプリゼンテーションが最大値と最小値の間にあり，適応レート制御により再生中断を回避できていることが確認できる．無線チャネル幅が 80 [MHz]の場合は，ほとんど常に最大レプリゼンテーションを選択できていることがわかる．

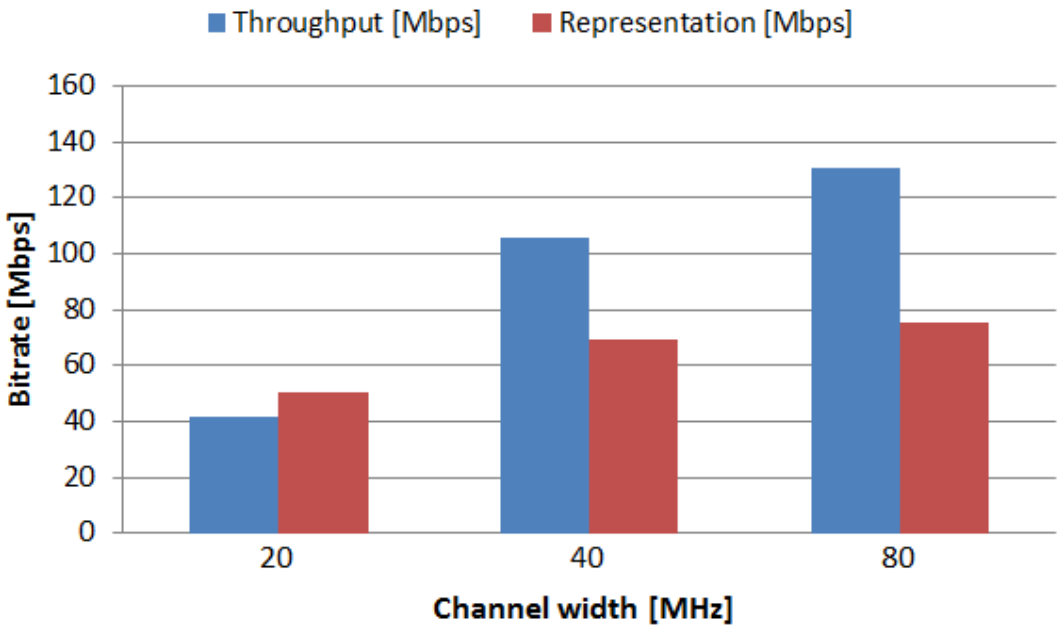


図 4.8 シナリオ(c)における配信品質

以上より，シナリオ(c)においてモデルと実機実験結果は一致していることがわかる．

シナリオ(a)，(b)，(c)では，モバイル端末がサーバにイーサネット接続した Wi-Fi AP と同一室内にある場合における配信品質について，4.1 節で構築したモデルの妥当性を検証するとともに，第 3 章で提案した放送・通信連携プラットフォームにおける配信品質を評価した．次に，シナリオ(d)，(e)，(f)では，モバイル端末がサーバにイーサネット接続した Wi-Fi AP の隣の部屋にある場合における配信品質について考える．

(d) 1 台のモバイル端末を Wi-Fi AP の隣の部屋に配置

シナリオ(d)について，4.1 節で構築したモデルを用いて配信品質を解析する．シナリオ(d)では，サーバにイーサネット接続した Wi-Fi AP とモバイル端末の間の距離が 7 [m]であるから，$d = 7$ である．これを式(4.12)に代入し，各無線チャネル幅（20，40，80 [MHz]）における可用帯域$C_{20}(7)$，$C_{40}(7)$，$C_{80}(7)$を導く．これらと$R_{\max} = 75.5$，$R_{\min} = 43.4$をそれぞれ式(4.10)，式(4.11)に代入することで，配信品質解析指標として$M_{20}(7)$，$M_{40}(7)$，$M_{80}(7)$，$N_{20}(7)$，$N_{40}(7)$，$N_{80}(7)$を表 4.4 のように導く．

表 4.4 シナリオ(d)における配信品質解析指標

チャネル幅 w [MHz]	$M_w(d)$	$N_w(d)$
20	1	2
40	1	3
80	2	5

シナリオ(d)ではモバイル端末数は 1 台であるから，$n = 1$ である．したがって，無線チャネル幅によらず $n \le M_w(d)$ が成立する．すわなち，モデルによれば，モバイル端末は無線チャネル幅によらず常に最大レプリゼンテーションを選択できる．ここで，図 4.9 に示す実機実験結果を確認すると，無線チャネル幅によらずほとんど常に最大レプリゼンテーションを選択できていることがわかる．

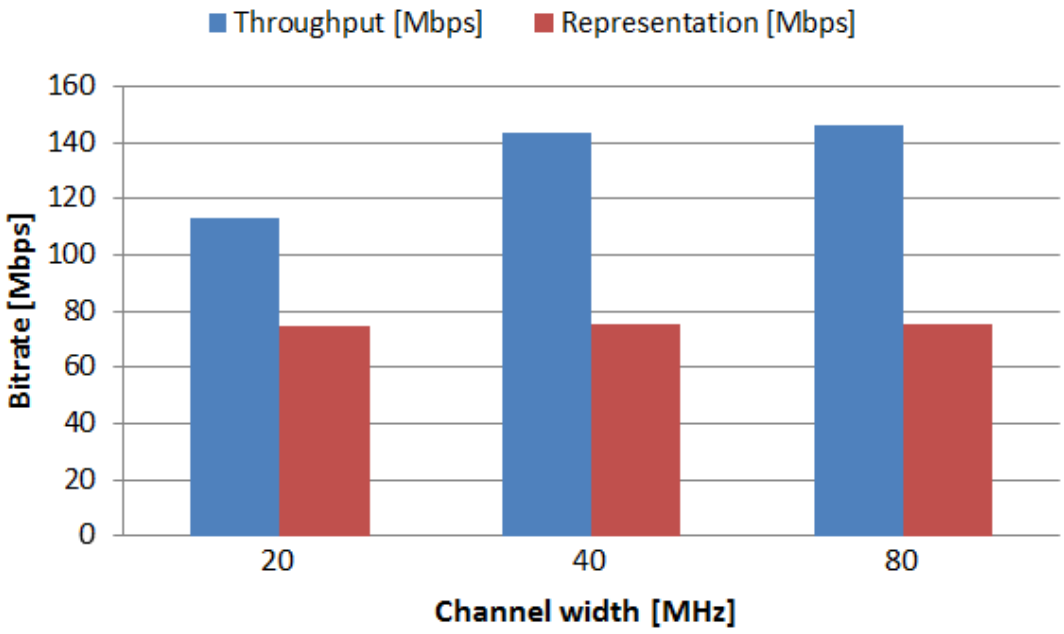


図 4.9 シナリオ(d)における配信品質

以上より，シナリオ(d)においてモデルと実機実験結果は一致していることがわかる．

(e) 2 台のモバイル端末を Wi-Fi AP の隣の部屋に配置

次に，シナリオ(e)について同様にモデルを用いて配信品質を解析する．シナリオ(d)からシナリオ(e)への変更点は，モバイル端末数を 1 台から 2 台に増やしたことであり，モデルにおける配信品質解析指標 $M_w(d)$ および $N_w(d)$ はモバイル端末数に依存しないため，これらの値はシナリオ(d)と同じく表 4.4 に示す通りである．シナリオ(e)ではモバイル端末数は 2 台であるから，$n = 2$ である．したがって，無線チャネル幅が 20，40 [MHz]の場合は $M_w(d) < n \le N_w(d)$，無線チャネル幅が 80 [MHz]の場合は $n \le M_w(d)$ が成立する．すなわち，モデルによれば，無線チャネル幅が 20，40 [MHz]の場合はモバイル端末間でセグメントの取得に競合が発生するが，適応レート制御により再生中断を回避でき，無線チャネル幅が 80 [MHz]の場合は，モバイル端末は 2 台とも常に最大レプリゼンテーションを選択できる．ここで，図 4.10 に示す実機実験結果を確認すると，無線チャネル幅が 20，40 [MHz]の場合はレプリゼンテーションの平均値は最大値と最小値の間にあり，適応レート制御により再生中断を回避できていることが確認できる．さらに，無線チャネル幅が 80 [MHz]の場合はほとんど常に最大レプリゼンテーションを選択できている．

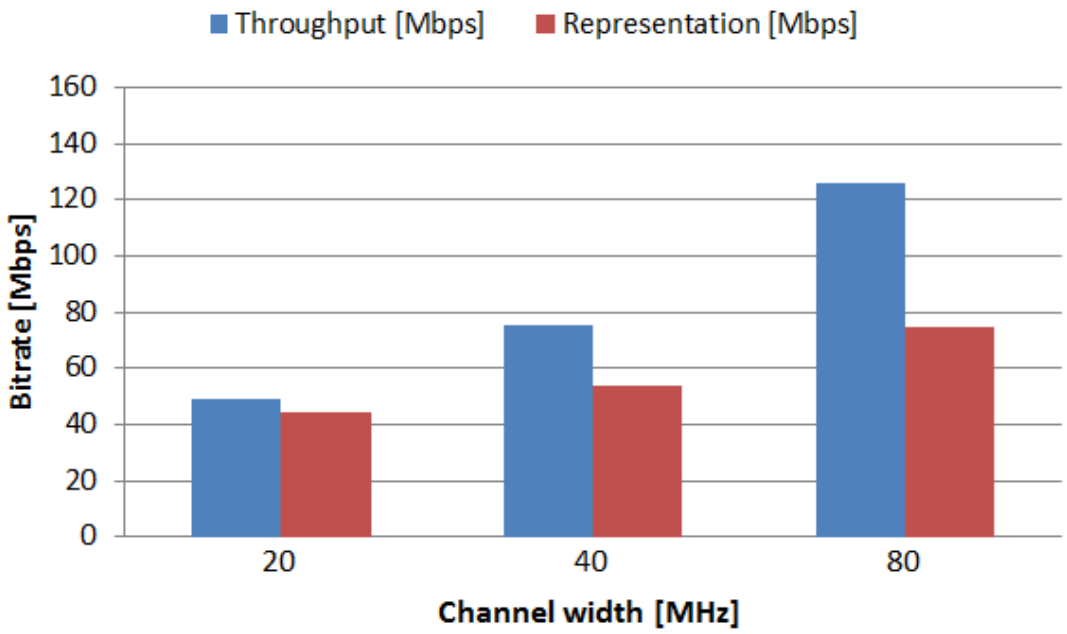


図 4.10 シナリオ(e)における配信品質

以上より，シナリオ(e)においてモデルと実機実験結果は一致していることがわかる．

(f) 3 台のモバイル端末を Wi-Fi AP の隣の部屋に配置

さらに，シナリオ(f)について同様にモデルを用いて配信品質を解析する．シナリオ(e)からシナリオ(f)への変更点は，モバイル端末数を 2 台から 3 台に増やしたことであり，モデルにおける配信品質解析指標 $M_w(d)$ および $N_w(d)$ はモバイル端末数に依存しないため，これらの値はシナリオ(d)，(e)と同じく表 4.4 に示す通りである．シナリオ(f)ではモバイル端末数は 3 台であるから，$n = 3$ である．したがって，無線チャネル幅が 20 [MHz]のときは $N_w(d) < n$，無線チャネル幅が 40，80 [MHz]のときは $M_w(d) < n \leq N_w(d)$ が成立する．すなわち，モデルによれば，無線チャネル幅が 20 [MHz]の場合はモバイル端末間でセグメントの取得に競合が発生し，適応レート制御を用いてすべてのモバイル端末が最小レプリゼンテーションを選択しても再生中断を回避できない．一方，無線チャネル幅が 40，80 [MHz]の場合は，モバイル端末間でセグメントの取得に競合が発生するが，適応レート制御により再生中断を回避できる．ここで，図 4.11 に示す実機実験結果を確認すると，無線チャネル幅が 20 [MHz]の場合は，スループットがレプリゼンテーションの最低値を下回っており，再生中断が発生していることが確認できる．また，無線チャネル幅が 40，80 [MHz]の場合は，レプリゼンテーションが最大値と最小値の間にあり，適応レート制御により再生中断を回避できていることが確認できる．

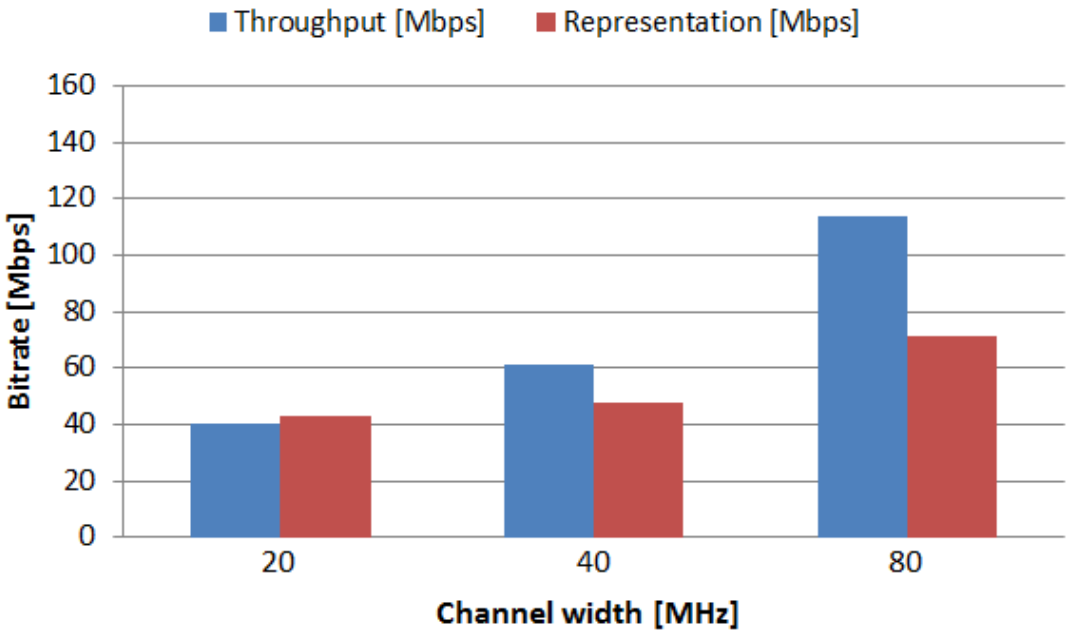


図 4.11 シナリオ(f)における配信品質

以上より，シナリオ(f)においてモデルと実機実験結果は一致していることがわかる．

シナリオ(a)，(b)，(c)では，モバイル端末がサーバにイーサネット接続した Wi-Fi AP と同一室内にある場合における配信品質について，シナリオ(d)，(e)，(f)では，モバイル端末がサーバにイーサネット接続した Wi-Fi AP の隣の部屋にある場合における配信品質について，4.1 節で構築したモデルの妥当性を検証するとともに，第 3 章で提案した放送・通信連携プラットフォームにおける配信品質を評価した．すべての実験シナリオにおいてモデルと実機実験の結果は一致し，モデルによる配信品質の解析が妥当であることが検証された．また，配信品質については，IEEE802.11ac のチャネルボンディングによって無線チャネル幅を拡張することで，実用放送で想定されている程度のビットレートの 8K 映像をサーバにイーサネット接続した Wi-Fi AP の隣の部屋にある複数台のモバイル端末に対しても再生中断なく配信できることが確認できた．

以上に加え，4.1 節で構築したモデルでは想定していないユースケースであるが，テレビ受信機にイーサネット接続した Wi-Fi AP と同一室内にある 1 台のモバイル端末と Wi-Fi AP の隣の部屋にある 1 台のモバイル端末へ 8K 放送番組を再送信する場合について，それを想定する実験シナリオに基づいて実機実験を行うことで配信品質を評価する．

(g) モバイル端末を Wi-Fi AP と同一室内に 1 台，隣の部屋に 1 台配置

シナリオ(g)では，2 台のモバイル端末を，サーバにイーサネット接続した Wi-Fi AP と同一室内に 1 台，Wi-Fi AP の隣の部屋に 1 台配置する．それぞれのモバイル端末と Wi-Fi AP の間の距離は，1 [m]と 7 [m]である．シナリオ(g)におけるサーバにイーサネット接続した

Wi-Fi AP とモバイル端末の位置関係を図 4.12 に示す.

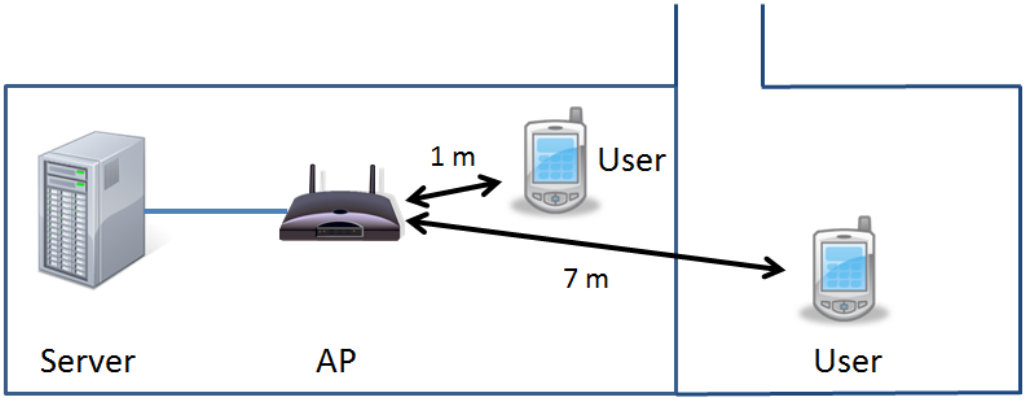


図 4.12 サーバにイーサネット接続した Wi-Fi AP とモバイル端末の位置関係
（シナリオ(g)）

シナリオ(g)は，2 台のモバイル端末がサーバにイーサネット接続した Wi-Fi AP から 1 [m]の位置にある（すなわち，モデルにおいては $d = 1$）シナリオ(b)から，モバイル端末が 1 台だけ 7 [m]まで離れたシナリオと言える．Wi-Fi AP から 7 [m]の位置にあるモバイル端末は，Wi-Fi AP から 1 [m]の位置にある場合に比べて，1 [mW]を基準とする受信電波強度である Received Signal Strength Indicator (RSSI)の低下（具体的には，-39 [dBm]から-62 [dBm]まで低下）により可用帯域が減少するため，シナリオ(g)における配信品質はシナリオ(b)における配信品質よりも劣化する．一方，シナリオ(g)は，2 台のモバイル端末がサーバにイーサネット接続した Wi-Fi AP から 7 [m]の位置にある（すなわち，モデルにおいては $d = 7$）シナリオ(e)から，モバイル端末が 1 台だけ 1 [m]まで近づいたシナリオとも言える．Wi-Fi AP に近づいたモバイル端末は，近づいた距離に応じて RSSI の向上により可用帯域が増加するため，シナリオ(g)における配信品質はシナリオ(e)における配信品質よりも向上する．この 2 点を踏まえ，シナリオ(g)における配信品質（スループット，レプリゼンテーション）は，シナリオ(b)における配信品質とシナリオ(e)における配信品質の間に含まれる．ここで，図 4.13 に示す実機実験結果を確認すると，スループットおよびレプリゼンテーションの値は，ともにシナリオ(b)における値とシナリオ(e)における値の間に含まれており，実際に配信品質がシナリオ(b)における配信品質より劣化するが，シナリオ(e)における配信品質よりは向上していることが確認できた．また，図 4.13 より，無線チャネル幅が 20 [MHz]の場合はレプリゼンテーションが最大値と最小値の間にあり，適応レート制御により再生中断を回避できていることが確認できる．また，無線チャネル幅が 40，80 [MHz]の場合は，ほとんど常に最大レプリゼンテーションを選択できていることが確認できる．

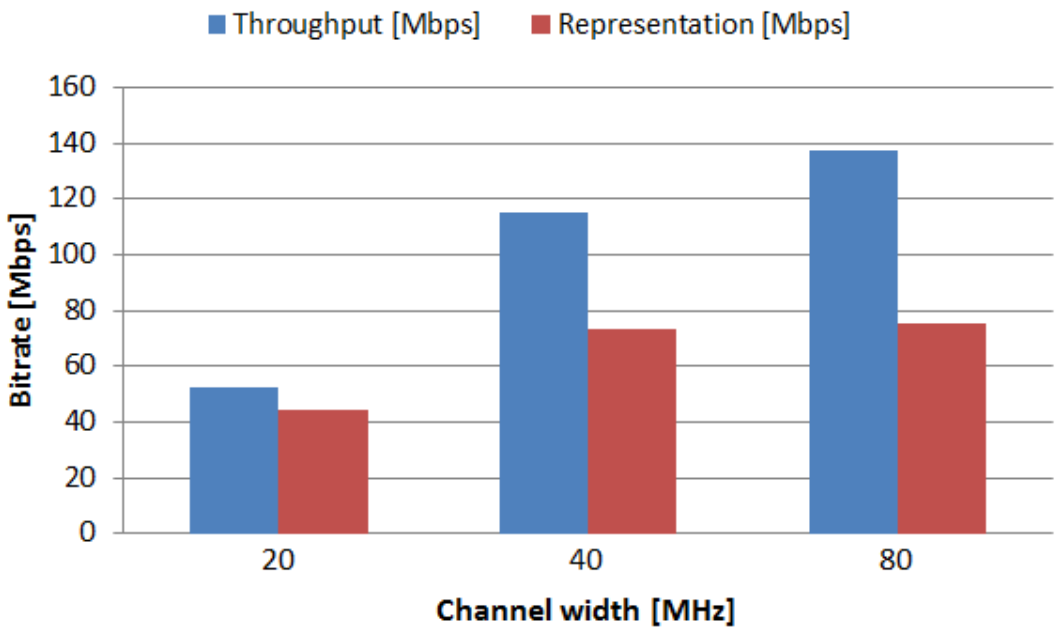


図 4.13 シナリオ(g)における配信品質

第5章　　映像品質に関する検討

第 4 章では，第 3 章で提案した，8K 映像に対応した放送・通信連携プラットフォームの一例である「MPEG-DASH を用いた 8K 放送番組再送信プラットフォーム」について，8K 放送番組がテレビ受信機にイーサネット接続した Wi-Fi AP から同一屋内のモバイル端末へ配信（再送信）される際の配信品質に関するモデルを構築し，実機実験によってそのモデルの妥当性を検証するとともに配信品質を評価した．本章では，8K/60P 映像を 2 つ（2 シーケンス）用いて，この提案プラットフォームにおける映像品質（客観画質および主観画質）を評価する．

5.1 評価対象映像

第 3 章で提案した放送・通信連携プラットフォームにおいて，放送波によってテレビ受信機に受信され，同一屋内のモバイル端末へ再送信される 8K 放送番組を想定し，8K 映像を 2 シーケンス（“highway”および“festival”）用意する．これらの第 1 フレームを図 5.1 に示す．



(i) “highway”の第 1 フレーム



(ii) “festival”の第 1 フレーム

図 5.1 評価対象映像の内容

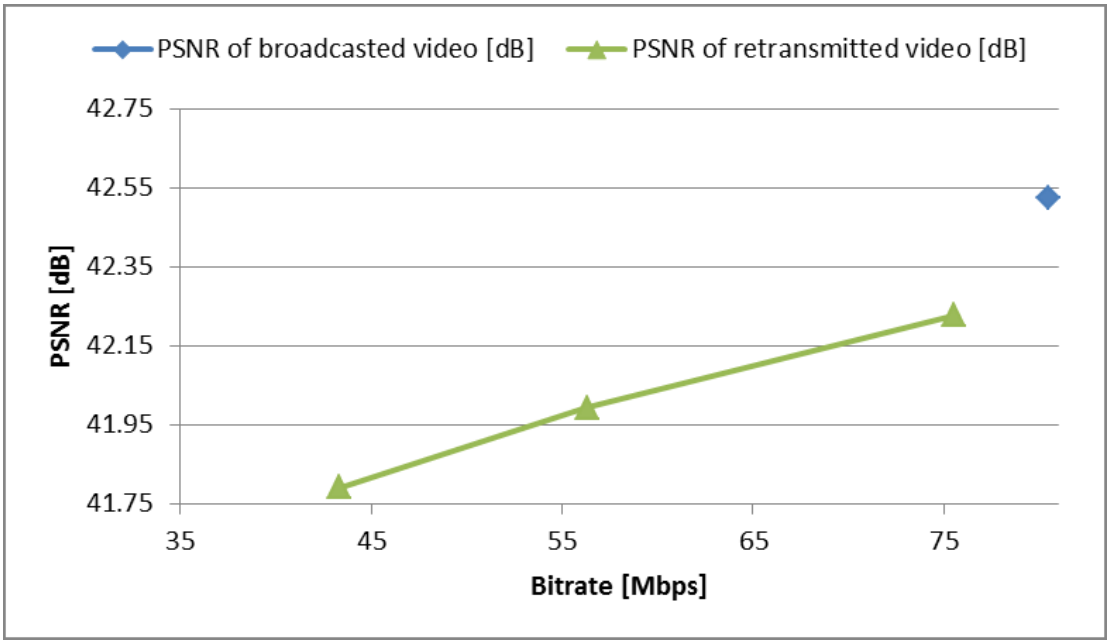
第 3 章で提案した放送・通信連携プラットフォームでは，まず H.265/HEVC で圧縮符号化された 8K 放送番組がテレビ受信機によって受信され，その後モバイル端末への再送信のため，MPEG-DASH で定義される階層構造に基づき，複数のレプリゼンテーションにトランスコードされる．第 4 章において，8K 放送番組がテレビ受信機からモバイル端末へ再送信される際の配信品質について検討するにあたり，8K 放送番組が BS 実用放送によってテレビ受信機に受信されることを想定したため，本章でも同様の想定とする．したがって，BS 実用放送で想定されている設定に倣い，8K/60P 映像を H.265/HEVC で 80 [Mbps]に圧縮符号化する．符号化方式は Random Access，画面間予測における動き探索範囲は 64 画素である．また，この 8K 放送番組を想定した 8K 映像を，H.265/HEVC を用いて 3 種類のレプリゼンテーション（40，60，80 [Mbps]）にトランスコードする．

本章では，第 3 章で提案した放送・通信連携プラットフォームの構造に従い，BS 実用放送によってテレビ受信機に受信される 8K 放送番組を想定した 8K 映像およびそれを 40，60，80 [Mbps]にトランスコードした映像を評価対象映像とする．

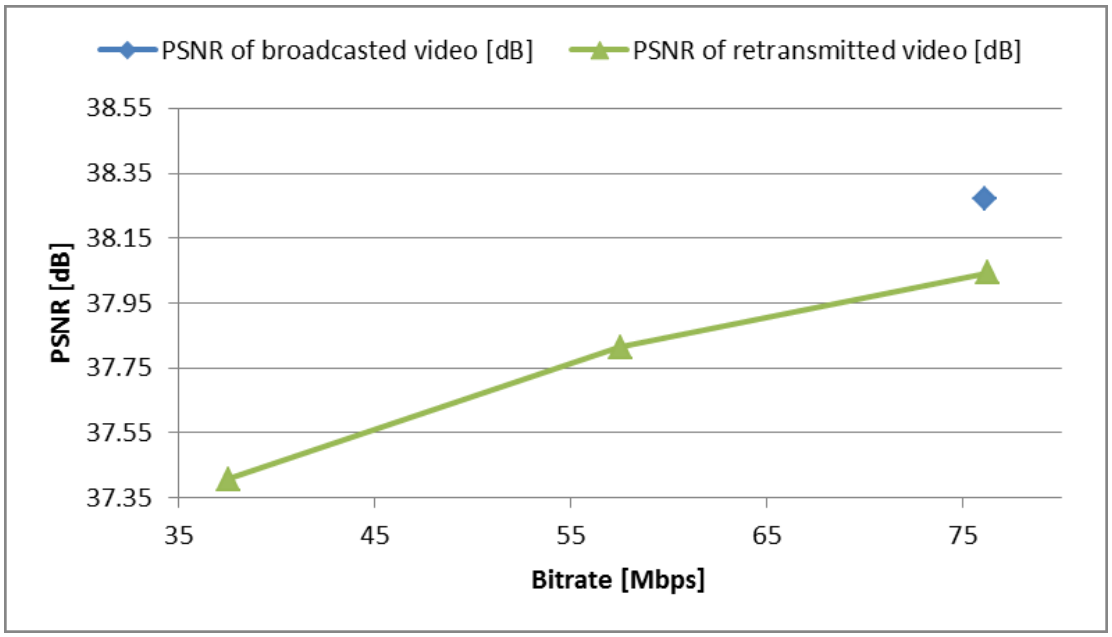
5.2 客観画質評価

5.1 節で述べた通り，本章では H.265/HEVC で 80 [Mbps]に圧縮符号化された 8K 映像およびそれを H.265/HEVC で 40，60，80 [Mbps]にトランスコードした合計 4 種類の映像を

評価する．本節では，それらの客観画質を評価する．客観画質の評価には，PSNR を採用する．図 5.2 に“highway”および“festival”の各映像における PSNR を示す．



(i) “highway”



(ii) “festival”

図 5.2 提案プラットフォームにおける客観画質（PSNR）

図 5.2 に示す 2 つのグラフは, 縦軸の範囲が異なるが, 目盛りの間隔は等しい. “broadcasted video”は，BS 実用放送によってテレビ受信機に受信される 8K 放送番組を想定した 8K 映像を意味する．一方，“retransmitted video”は，モバイル端末への再送信のために，

MPEG-DASH で定義される階層構造に基づき，“broadcasted video”を複数のレプリゼンテーションにトランスコードした映像を意味している．図 5.2 をみると，同一ビットレートにおける PSNR は“festival”より“highway”の方が高い．これは，“festival”がランダムで予測しにくい細かい動きを多く持つのに対し，“highway”は水平方向のパンニング動作がほとんどで予測しやすいことが理由である．また，いずれの 8K 映像においても，ビットレートが増えるにつれて PSNR が向上するが，そのうち最も低い 40 [Mbps]にトランスコードした映像の PSNR であっても実用放送で想定されている値を下回っておらず，実用放送と同程度の客観画質の 8K 映像をモバイル端末に再送信できることが確認できた．

5.3 主観画質評価

5.2 節では，第 3 章で提案した放送・通信連携プラットフォームの構造に従い，H.265/HEVC で 80 [Mbps]に圧縮符号化された 8K 映像およびそれを H.265/HEVC で 40, 60，80 [Mbps]にトランスコードした合計 4 種類の映像について，客観画質を評価した．本節では，同じ映像を用いて，第 3 章で提案した放送・通信連携プラットフォームにおける主観画質を評価する．

5.3.1 実験環境および評価指標

本項では，第 3 章で提案した放送・通信連携プラットフォームにおける主観画質評価における実験環境および評価指標について述べる．

まず，実験環境の概要を表 5.1 にまとめる．

表 5.1 実験環境

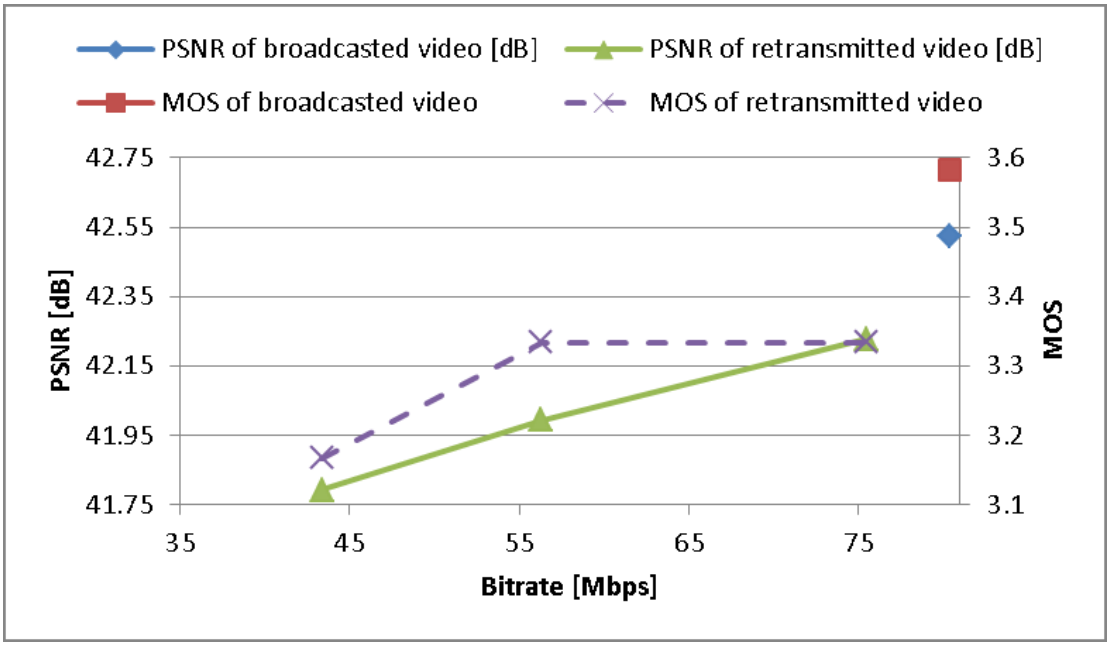
ディスプレイサイズ	85 [inch]
評価者数	6 名（×2 回）
評価者の視距離	ディスプレイの縦の長さの 0.75 倍
評価技術	DSCQS

実験は，窓のない部屋でディスプレイ以外の照明をすべて消した状態で行う．表 5.1 に示す通り，この部屋に 85 [inch]の 8K ディスプレイを用意し，6 名の評価者はこのディスプレイから，ディスプレイの縦の長さの 0.75 倍の距離だけ離れた位置[35]から映像を視聴し，2 回評価を行う．また，主観画質の評価には DSCQS を用いる．

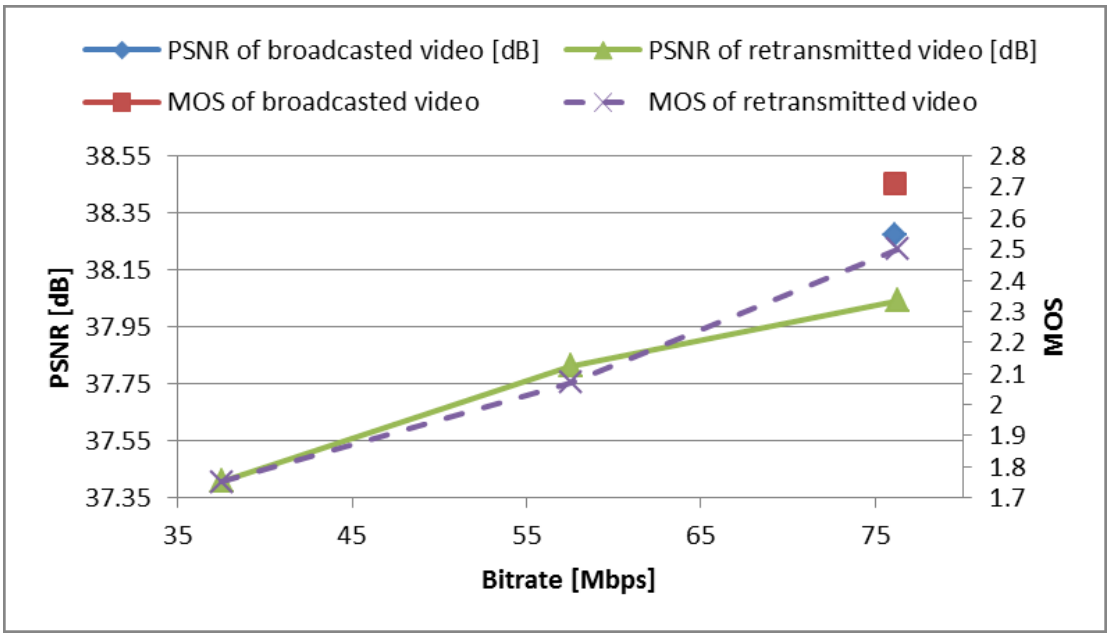
各評価者がつけた点数から MOS を導出し，それを最終的な評価指標とする．

5.3.2　実験結果および考察

5.3.1 項で述べた実験環境および評価指標に基づき，第 3 章で提案した放送・通信連携プラットフォームにおける主観画質を評価する．主観画質評価結果である MOS を，5.2 節で掲載した客観画質（PSNR）とともに図 5.3 に示す．



(i) “highway”



(ii) “festival”

図 5.3 提案プラットフォームにおける主観画質（MOS）および客観画質（PSNR）

図 5.2 と同様に，図 5.3 に示す 2 つのグラフは，縦軸の範囲が異なるが目盛りの間隔は等しい．“broadcasted video”は，BS 実用放送によってテレビ受信機に受信される 8K 放送番組を想定した 8K 映像を意味する．一方，“retransmitted video”は，モバイル端末への再送信のために，MPEG-DASH で定義される階層構造に基づき，“broadcasted video”を複数のレプリゼンテーションにトランスコードした映像を意味している．図 5.3 をみると，いずれの 8K 映像においても MOS は客観画質（PSNR）特性に矛盾しない特性を持っている．また，主観画質評価実験の際，映像工学の専門家（NHK 放送技術研究所の職員の皆様）であっても画質の差を認識するのは非常に困難であるというご感想を頂いており，トランスコードやビットレートの違いによる主観画質への影響は微々たるものであると言える．

第6章　　総括

6.1 まとめ

本研究では，8K 映像に対応した放送・通信連携プラットフォームの一例として，「MPEG-DASH を用いた 8K 放送番組再送信プラットフォーム」を提案した．また，この提案プラットフォームにおいて，テレビ受信機にイーサネット接続した Wi-Fi AP から同一屋内のモバイル端末へ 8K 放送番組を再送信する場合を想定した配信品質に関するモデルを構築し，実機実験によってその妥当性を検証するとともに配信品質を評価した．さらに，映像品質（客観画質および主観画質）についても評価を実施した．配信品質に関する実機実験の結果，モデルの妥当性が検証され，IEEE802.11ac のチャネルボンディングを用いて無線チャネル幅を拡張することにより，Wi-Fi AP の隣の部屋にある複数台のモバイル端末に対しても，実用放送で想定されている程度のビットレートの 8K 映像を配信（再送信）できることを確認できた．さらに，画質評価実験の結果，その 8K 映像は実用放送で想定されている程度の品質を維持できていることを確認した．

6.2 今後の展望

本研究では，テレビ受信機にイーサネット接続した Wi-Fi AP から同一屋内のモバイル端末へ 8K 放送番組を再送信する場合の MPEG-DASH 配信について，スループットとレプリゼンテーションの平均値を用いて配信品質を評価した．現在，MPEG-DASH を用いた配信品質については，レプリゼンテーションの平均値の他に，映像配信中におけるレプリゼンテーションの変動回数や再生中断回数などを考慮した Quality of Experience (QoE)モデルが提案されている[36]．本研究の今後の展望として，こういったモデルを用いてより詳細に配信品質を評価することが挙げられる．

謝辞

本研究に関して，日頃の進捗報告や学会発表についてご指導をいただいた甲藤二郎教授に心から感謝いたします．また，研究を進める上で貴重なアドバイスを下さった金井謙治助教，折橋翔太先輩をはじめとする甲藤研究室の先輩方，共同研究として大変お世話になった松尾康孝氏をはじめとする NHK 放送技術研究所の皆様，大西綾乃氏，藤井義巳氏をはじめとする構造計画研究所の皆様に深く御礼を申し上げます．

最後に，研究だけでなくたくさんの面でお世話になりました甲藤研究室の皆様に深く感謝致します．

2017 年 1 月 30 日

原田 臨太朗

参考文献

[1] 放送サービス高度化推進協会（A-PAB）, 4K・8K サービス予定 [online]: http://www.apab.or.jp/4k-8k/appeal/roadmap.html

[2] NHK, 8K スーパーハイビジョン [online]: http://www.nhk.or.jp/8k/

[3] NHK, スーパーハイビジョン, 試験放送について [online]: http://www.nhk.or.jp/shv/

[4] NHK, NHK Hybridcast [online]: http://www.nhk.or.jp/hybridcast/online/

[5] NHK, 技研公開 2016, 展示項目 [online]: https://www.nhk.or.jp/strl/open2016/tenji/index.html

[6] 大亦 寿之, 遠藤 大礎, 馬場 秋継, 松村 欣司, 藤沢 寛, 武智 秀, 真島 恵吾, 砂崎 俊二, 加井 謙二郎：放送通信連携プラットフォーム「ハイブリッドキャスト」の開発とサービスの多様化に向けた拡張方式の提案, 情報処理学会研究報告, Vol.2014-CDS-11 No.8, 2014 年 8 月.

[7] Hybrid broadcast broadband TV (HbbTV) [online]: https://www.hbbtv.org/

[8] YouView [online]: https://www.youview.com/

[9] Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2015-2020 White Paper [online]: http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/mobile-white-paper-c11-520862.html

[10] I. Sodagar: The MPEG-DASH Standard for Multimedia Streaming Over the Internet, IEEE Multimedia, vol.18, Issue 4, pp.62-67, Apr.2011.

[11] K. Satoda, H. Yoshida, H. Ito, and K. Ozawa: Adaptive Video Pacing Method Based on the Prediction of Stochastic TCP Throughput, IEEE Global Communication Conference (GLOBECOM) 2012, Dec.2012.

[12] B. Rainer, S. Lederer, C. Müller, and C. Timmerer: A seamless web integration of adaptive HTTP streaming, in Proc. Signal Processing Conference (EUSIPCO) 2012, pp.1519-1523, Aug.2012.

[13] HyperText Markup Language 5 (HTML5) [online]: https://www.w3.org/TR/html5/

[14] Media Source Extensions [online]: https://w3c.github.io/media-source/

[15] Apple, HTTP Live Streaming [online]: https://developer.apple.com/streaming/

[16] Microsoft, Smooth Streaming [online]: https://technet.microsoft.com/ja-jp/library/dd775200.aspx

[17] YouTube [online]: https://www.youtube.com/

[18] Netflix [online]: https://www.netflix.com/jp/
[19] 藤沢 寛：MPEG-DASH とハイブリッドキャスト, NHK 技研 R&D No.156, pp.14-21, 2016 年 3 月.
[20] 前原 文明：早稲田大学大学院基幹理工学研究科設置科目「無線信号処理」講義資料, 2014 年 7 月.
[21] 横山 重明, 吉川 忠久：1・2 陸技受験教室② 無線工学 A, 東京電機大学出版局, 2007 年 10 月.
[22] 竹下 隆史, 村山 公保, 荒井 透, 苅田 幸雄:マスタリング TCP/IP 入門編, pp.112-116, オーム社, 2012 年 9 月.
[23] 佐藤 拓朗：早稲田大学大学院基幹理工学研究科設置科目「ユビキタス情報通信ネットワーク」講義資料, 2015 年 7 月.
[24] ネットワークエンジニアとして, IEEE802.11n [online]: http://www.infraexpert.com/study/wireless15.html
[25] ネットワークエンジニアとして, IEEE802.11ac [online]: http://www.infraexpert.com/study/wireless49.html
[26] R.V. Nee: Breaking the Gigabit-per-Second Barrier with 802.11ac, IEEE Wireless Communications, Apr.2011.
[27] 藤本 幸洋 : 多様化するサービスに向けたアクセスシステム技術, NTT 技術ジャーナル, つくばフォーラム 2015 ワークショップ, pp.74-78, 2016 年 2 月.
[28] B. Bross, W.J. Han, J.R. Ohm, G.J. Sullivan, Y.K. Wang, and T. Wiegand: High Efficiency Video Coding (HEVC) text specification draft 10, JCTVC-L1003, Jan. 2013.
[29] 大久保 榮, 鈴木 輝彦, 高村 誠之, 中條 健：H.265/HEVC 教科書, インプレス社, 2013 年 9 月.
[30] HEVC Test Model (HM) [online]: https://hevc.hhi.fraunhofer.de/HM-doc/
[31] 電子情報通信学会知識ベース「知識の森」, 画像・音・言語, 画像符号化, 符号化画質 [online]: http://www.ieice-hbkb.org/files/02/02gun_05hen_09.pdf
[32] 日本電信電話(NTT), 情報ネットワーク総合研究所, ネットワーク基盤技術研究所, 通信トラヒック品質プロジェクト, 映像品質評価法 [online]: http://www.ntt.co.jp/qos/technology/visual/index.html
[33] iPerf [online]: https://iperf.fr/
[34] 樺島 祥介, 北川 源四郎, 甘利 俊一, 赤池 弘次, 下平 英寿, 土谷 隆, 室田 一雄：赤池情報量規準 AIC－モデリング・予測・知識発見, 共立出版, 2007 年 7 月.
[35] Rec. ITU-R BT.2020: Parameter values for ultra-high definition television systems for production and international programme exchange, Oct.2015.

[36] Y. Liu, S. Dey, F. Ulupinar, M. Luby, Y. Mao: Deriving and Validating User Experience Model for DASH Video Streaming, IEEE Transactions on Broadcasting, Vol.61, No.4, pp.651-655, Dec.2015.

発表文献

[1] 原田 臨太朗, 金井 謙治, 甲藤 二郎：無線環境下での MPEG-DASH を用いた 4K/2K 映像配信特性評価, 電子情報通信学会モバイルネットワークとアプリケーション (MoNA) 研究会, Vol.115, No.172, pp.7-12, 2015 年 8 月.

[2] Rintaro Harada, Kenji Kanai and Jiro Katto: Evaluations of 4K/2K Video Streaming Using MPEG-DASH with Buffering Behavior Analysis, IEEE Global Conference on Consumer Electronics (GCCE) 2015, pp.539-540, Oct.2015.

[3] Ayano Ohnishi, Yoshimi Fujii, Fumiko Ohori, Jiro Katto, Rintaro Harada and Sakiko Takenaka: Measurement Studies of Communication Quality between UAV and Ground Station using 802.11 Wireless Channels, IEICE International Workshop on Smart Wireless Communications (SmartCom) 2015, Vol.115, No.273, pp.43-48, Nov.2015.

[4] 折橋 翔太, 原田 臨太朗, 松尾 康孝, 甲藤 二郎：8K 動画における外部動き推定に基づいた H.265/HEVC の符号化制御手法, 画像符号化シンポジウム (PCSJ) / 映像メディア処理シンポジウム (IMPS), P-4-03, 2015 年 11 月.

[5] Shota Orihashi, Rintaro Harada, Yasutaka Matsuo and Jiro Katto: An Adaptive H.265/HEVC Encoding Control for 8K UHDTV Movies based on Motion Complexity Estimation, IEEE International Symposium on Multimedia (ISM) 2015, pp.343-346, Dec.2015.

[6] 原田 臨太朗, 折橋 翔太, 金井 謙治, 松尾 康孝, 甲藤 二郎：Wi-Fi を用いた 8K 映像の屋内再送信における品質評価, 情報処理学会オーディオビジュアル複合処理 (AVM) 研究会, Vol.115, No.349, pp.135-140, 2015 年 12 月.

[7] 折橋 翔太, 竹内 健, 原田 臨太朗, 松尾 康孝, 甲藤 二郎：外部動き推定を用いた 8K 映像向け H.265/HEVC 符号化制御手法, 映像情報メディア学会冬季大会, 12B-4, 2015 年 12 月.

[8] 原田 臨太朗, 折橋 翔太, 金井 謙治, 松尾 康孝, 甲藤 二郎：Wi-Fi を用いた 8K 映像の家庭内再送信に関する品質評価, 映像情報メディア学会冬季大会, 21B-1, 2015 年 12 月.

[9] Shota Orihashi, Rintaro Harada, Yasutaka Matsuo and Jiro Katto: Improvement of H.265/HEVC Encoding for 8K UHDTV by Detecting Motion Complexity, IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE) 2016, pp.273-274, Jan.2016.

[10] 原田 臨太朗, 折橋 翔太, 金井 謙治, 松尾 康孝, 甲藤 二郎：放送・通信連携サービスを想定した Wi-Fi ネットワーク上における 8K 映像配信の品質評価, 電子情報通信学会総合大会, B-6-11, 2016 年 3 月.

[11] 原田 臨太朗, 金井 謙治, 松尾 康孝, 甲藤 二郎：放送・通信連携サービスを想定した 8K 映像の再送信に関する品質評価, 電子情報通信学会画像工学（IE）研究会, Vol.116, No.37, pp.179-184, 2016 年 5 月.

[12] 竹内 健, 原田 臨太朗, 雑賀 新太郎, 松尾 康孝, 甲藤 二郎：色彩情報復元を考慮した色空間変換手法に関する一検討, 画像符号化シンポジウム（PCSJ）/ 映像メディア処理シンポジウム（IMPS), P-5-16, 2016 年 11 月.

[13] 原田 臨太朗, 雑賀 新太郎, 竹内 健, 金井 謙治, 松尾 康孝, 甲藤 二郎：MPEG-DASH を用いた 8K 放送番組再送信プラットフォームにおける映像配信品質特性評価, 電子情報通信学会通信方式（CS）研究会, Vol.116, No.347, pp.33-38, 2016 年 12 月.

[14] Rintaro Harada, Shintaro Saika, Masaru Takeuchi, Kenji Kanai, Jiro Katto and Yasutaka Matsuo: Quality Evaluations of 8K/60P UHDTV Retransmission for a Broadcasting and Communication Integrated Platform, IEEE International Symposium on Multimedia (ISM) 2016, pp.111-112, Dec.2016.

[15] 雑賀 新太郎, 原田 臨太朗, 竹内 健, 松尾 康孝, 甲藤 二郎：8K 映像における H.265/HEVC による動き予測に関する一検討, 情報処理学会オーディオビジュアル複合処理（AVM）研究会, 2017 年 2 月.（投稿済み）