無線LANにおける
OFDMAランダムアクセスに関する研究

上井　竜己

目次

図 目 次

表 目 次

第1章　序論

1.1　研究背景

近年，スマートフォン，タブレット端末やモバイル Wi-Fi ルータなどの普及により家庭内のみでなく外出先においても気軽にインターネット接続を行うことが可能となった．これに伴い，IEEE 802.11 (IEEE : The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.) 規格に準拠した無線 LAN (Local Area Network) を搭載した端末機器が著しく増加している [1,2]．さらに，2020 年に開催される東京オリンピックに向け，通信インフラの整備の一環として公衆無線 LAN サービス (ホットスポット) の急速な増設が予測される．このように時間・場所を問わず無線 LAN 端末を利用したインターネット接続の需要は今後ますます高まると予測できる．このような背景から駅や競技場など狭い範囲に多数の無線 LAN 端末が過密に存在する稠密環境が生じてしまう．稠密環境においては膨大な端末数や設置場所の多様性から，隠れ端末問題によるフレーム衝突や OBSS (Overlapping Basic Service Set) 問題だけでなく，無線 LAN 端末が送信しようとした場合に送信機会を得ることが難しく，端末あたりのスループットが大幅に低下するなど，通信性能へ深刻な影響を与える．

無線 LAN の標準化活動を行う IEEE 802.11 委員会のワーキンググループでは，2014 年 5 月からタスクグループ AX（TGax）を設立し IEEE 802.11ax (以下，11ax と呼称する) の標準化を進めている．TGax においても稠密環境が無線 LAN の通信性能へ与える影響を問題視しており [3,4]，11ax は稠密環境における通信性能を改善するための高効率無線 LAN システムを目指している．これまでの無線 LAN 規格では物理層の効率化を図り高スループット化を行い最大スループットを向上させることに主眼が置かれていたが [5–7]，11ax では最大スループットではなく，端末当たりの平均スループットの向上に焦点が当てられており，無線 LAN エリア全体のスループット向上に貢献することを目指している [8]．端末あたりの平均スループットを向上させる技術としてマルチユーザ伝送があり，11ax では新たにアップリンクマルチユーザ MIMO (Multiple Imput Multiple Output) と OFDMA (Orthogonal Frequency DivisionMultiple Access) 技術が導入される予定である [9]．マルチユーザ MIMO は複数端末への同時伝送技術であり，既に IEEE 802.11ac においてダウンリンク送信に導入されているが [10]，11ax ではアップリンク送信への利用が議論されている．また，OFDMA 技術は周波数リソースを端末ごとに分割し割当てることで，マルチユーザ伝送を可能にする技術であり，アップリンク・ダウンリン

ク送信での利用が議論されている．これらの技術によりアップリンクマルチユーザ送信を行うことで，稠密環境における無線LAN端末の送信機会の取得が比較的容易になり，端末あたりの平均スループットの改善が可能となる．

アップリンクマルチユーザ送信として，アップリンクマルチユーザMIMO送信とアップリンクOFDMAを用いた方式の2方式が議論されているが，実装の容易性からアップリンクOFDMAを用いた方式がより多くの無線LAN端末で採用されることが期待される．すでにOFDMA技術を採用しているLTEやWiMAXなどの無線通信規格では，複数ユーザに対して集中制御でRU (Resource Unit)と呼ばれる複数のサブキャリアをまとめた単位でユーザを割当てることで，稠密環境下における通信性能の向上を図っている[11,12]．これに対して，11axで検討されているアップリンクOFDMA伝送では，APが集中制御により送信端末をRUへ割当てるだけでなく，無線端末は専用のRUへランダムにアクセスするOFDMAランダムアクセスという分散制御を行う点でOFDMA技術を採用している他の無線通信規格と大きな違いがある．稠密環境では，無線LAN端末が送信しようとした場合に送信機会を得ることが難しく，無線LAN端末はAPへの承認手続きに時間がかかり，BSSへ所属することも難しい場合がある．そこで，BSSへ所属している無線LAN端末だけでなく，未承認の無線LAN端末やスリープから復帰した端末についてもOFDMAランダムアクセスへ参加させることを検討している[13–15]．このようにOFDMAランダムアクセスを用いることで，未承認の端末含め送信機会を得られない端末の体感品質の大幅な向上が期待できる．

OFDMAランダムアクセスの性能を最大限発揮し運用することが望ましいが，その性能には複数のMAC (Media Access Control)パラメータが互いに影響し合い，環境に応じた適切なパラメータ設計が困難である．IEEE 802.11のMACプロトコルであるDCF (Distributed Coordination Function)やEDCA (Enhanced Distributed Channel Access)についてもOFDMAランダムアクセスと同様に多くのMACパラメータが使用されており，適切なパラメータを設計するために，DCFやEDCAのプロトコル性能解析に関する検討が活発に行われてきた[16–22]．プロトコルの性能を解析することで各MACパラメータが性能へ与える影響が明確になり，適切なMACパラメータの設計が可能となる．現在までに独自のOFDMAランダムアクセスを提案し，その性能解析に関して検討されているが[23–25]，11axに対応したOFDMAランダムアクセスの性能解析は行われていない．そこで，11axにおけるOFDMAランダムアクセス性能を高い精度で解析可能な解析モデルの構築と，その性能解析が求められている．

1.2 研究目的

本研究の目的は，稠密環境における OFDMA ランダムアクセスの性能を最大限発揮するために，OFDMA ランダムアクセスの性能を解析し環境に応じた MAC パラメータ設計手法を提案することである．

本研究の第一の目的は，OFDMA ランダムアクセスの性能解析モデルを構築することである．OFDMA ランダムアクセスを用いたマルチユーザ伝送により無線 LAN 端末あたりの送信機会を増加させ，端末あたりの平均スループットを改善することが可能であるが，その性能を最大限引き出すためには OFDMA ランダムアクセスの運用に用いられる各パラメータを適切に設計する必要がある．各パラメータは互いに関係し合い，OFDMA ランダムアクセスの性能へ影響するため，性能解析モデルを構築し，各パラメータが性能へ与える影響を解析することで，環境に応じて適切なパラメータを設計することが可能となる．したがって，稠密環境下における OFDMA ランダムアクセスの性能限界を十分な精度で解析可能な性能解析モデルを構築する．

第二の目的は，構築した OFDMA ランダムアクセスの性能解析モデルを用いて，各パラメータが通信効率へ与える影響を解析することである．ここで通信効率とは RU あたりのフレーム送信成功確率と定義する．稠密環境における端末あたりの平均スループットを改善するためには，送信機会を増加させる必要がある，すなわち，送信失敗によるフレームの再送を抑え，送信成功確率の高い効率的な通信を行う必要がある．したがって，OFDMA ランダムアクセスにおいて RU あたりの送信成功確率と定義する通信効率へ各パラメータが与える影響について解析する．

第三の目的は，環境に応じて OFDMA ランダムアクセスの通信効率を最大化する MAC パラメータの設計手法を提案することである．無線 LAN を利用するユーザ数は，時間や場所によって様々であり，AP は環境に応じて適切な MAC パラメータを設計し，各ユーザへ通知する手法が必要になる．したがって，MAC パラメータを設計・通知する手法について提案する．

1.3 本論文の構成

本論文は，全 6 章により構成される．図 1.1 に各章の相互関係を示す．

· 本章では，研究背景および目的，本研究の位置づけについて述べる．

· 第 2 章では，11ax の概要について述べ，11ax へ新たに採用されるアップリンク OFDMA 技術について詳述する．OFDMA ランダムアクセスはアップリンクマルチユーザ送信において運用されるため，まず，アップリンクマルチユーザ送信方式の手順について説明し，その後，OFDMA ランダムアクセスの仕組みについて説明する．

· 第 3 章では，OFDMA ランダムアクセスの性能解析モデルを提案し，提案モデルが DCF の性能解析モデルの基本的なモデルである Bianchi モデルの拡張モデルとみなせることを示す. さらに，提案モデルから通信効率の理論式を導出し，計算機シミュレーションと解析結果の比較により性能解析モデルの精度について考察する．

· 第 4 章では，前章で導出した理論式を用いて，OFDMA ランダムアクセスの通信効率を解析し，各 MAC パラメータが通信効率へ与える影響について考察する．

· 第 5 章では，OFDMA ランダムアクセスの最大通信効率を達成する各 MAC パラメータの最適化条件を導出する．導出した最適化条件を用いた MAC パラメータの最適化とユーザ数推定手法を含めた MAC パラメータの設計手法を提案し，計算機シミュレーションにより提案手法の有用性を示す．

· 第 6 章では，本論文の結論を述べる．

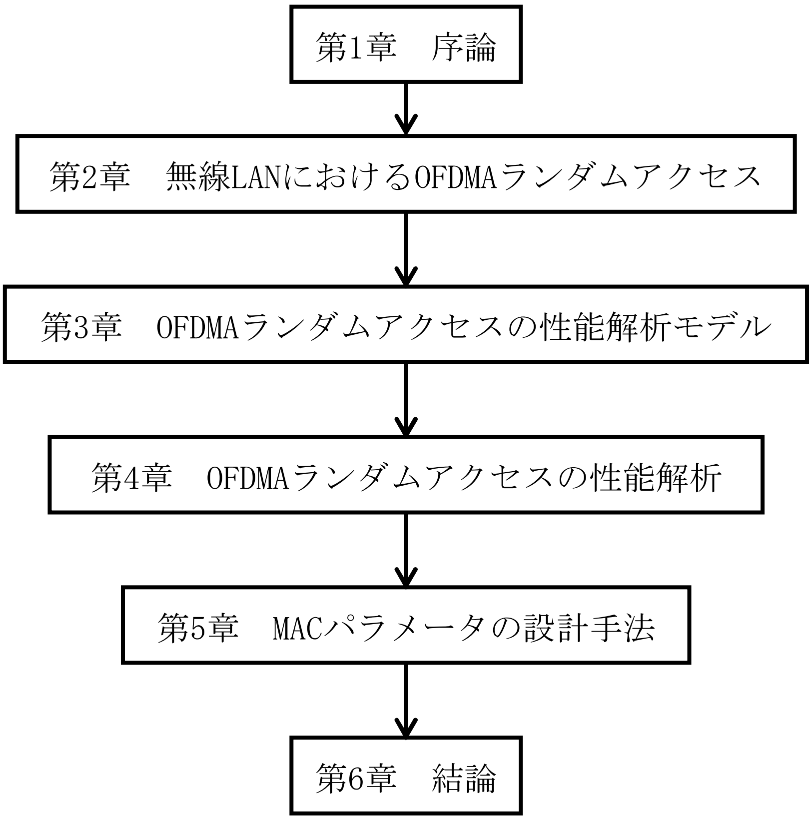
第1章　序論
第2章　無線LANにおけるOFDMAランダムアクセス
第3章　OFDMAランダムアクセスの性能解析モデル
第4章　OFDMAランダムアクセスの性能解析
第5章　MACパラメータの設計手法
第6章　結論

図 1.1: 各章の相互関係

1.4 記号・変数の定義

$E[L]$: 送信フレームの平均 MAC ペイロードサイズ [bit]

N_{RU} : RU 数

N_{RA} : OFDMA ランダムアクセス用 RU(RA − RU) 数

N_{user} : OFDMA ランダムアクセスへ参加しているユーザ数

$N_{user_{est}}$: 推定した OFDMA ランダムアクセスへ参加している ユーザ数

m : 最大バックオフステージ数

m_{def} : 最大バックオフステージ数

m_{opt} : 通信効率を最大化する最大バックオフステージ数

m_{sim} : 計算機シミュレーションで使用する最大バックオフ ステージ数

m_{SP} : 有限 SP 長を考慮した最大バックオフステージ数

OCW_{max} : OCW の最大値

OCW_{min} : OCW の最小値

p : UL − MU フレーム送信時の衝突確率

p_{est} : 測定したフレーム衝突確率

p_{RU} : 特定の RA − RU へ UL − MU フレームを送信する時の フレーム衝突確率

$p_{RU_{opt}}$: 通信効率が最大化する RA − RU あたりのフレーム衝突確率

P_s : 特定の RA − RU において, 1 台のユーザが UL − MU フレーム送信し，送信成功する確率

P_{tr} : 特定の RA − RU において，少なくとも 1 台のユーザが UL − MU フレームを送信している確率

P_sP_{tr} : 通信効率

P_{wait} : 特定の RA − RU における UL − MU フレーム送信の有無に係らず，他の RA − RU における UL − MU フレーム送信により通信待機となる確率

S : システムスループット

S_{RU} : 1RA − RU あたりのスループット

Normalized S_{RU} : 1RA − RU あたりの正規化スループット

T_c : フレーム衝突時に送信待機しているチャネル使用時間

T_{data} : 平均データフレーム時間

T_{idle} : 全てのユーザが送信しない場合の UL – MU フレーム送信待ち時間

$T_{MU\ BACK}$: MU – BACK(MU – Block ACK) フレーム時間

T_s : UL – MU フレーム送信成功時のチャネル使用時間

T_{SIFS} : SIFS(Short Interframe Space) 時間

T_{TI} : TF – R(Trigger Frame for Random Access) の送信間隔

T_{TF-R} : TF – R フレーム時間

T_{wait} : 少なくとも 1 ユーザが UL – MU フレーム送信する場合の UL – MU フレーム送信待ち時間

τ_{RU} : あるユーザが T_{TI}内に特定の RA – RU を用いてフレームを送信する確率

τ_{TI} : あるユーザが T_{TI}内に UL – MU(Uplink Multi – User) フレームを送信する確率

$\tau_{TI_{est}}$: 推定したトリガ間隔 TI 当たりの送信確率

W : OFDMA Contention Window の初期値

W_{def} : フレーム送信時に設定した OCW の初期値

W_{opt} : 通信効率を最大化する OCW の初期値

W_{sim} : 計算機シミュレーションで使用する OCW の初期値

W_{SP} : 有限 SP 長を考慮した OCW の初期値

第2章　無線LANにおけるOFDMAランダムアクセス

2.1　はじめに

近年の無線 LAN 端末の急激な増加により駅や競技場などに生じる稠密環境は，膨大な端末数や設置場所の多様性から，隠れ端末問題によるフレーム衝突や OBSS 問題だけでなく，無線 LAN 端末が送信しようとした場合に送信機会を得ることが難しく，端末あたりのスループットが大幅に低下するなど，通信性能へ深刻な影響を与える．無線 LAN の標準化活動を行う IEEE 802.11 委員会においても，稠密環境が無線 LAN の通信性能へ与える影響を問題視しており [3,4]，2013 年 5 月から高効率な無線 LAN システムの実現に向けて High Efficiency Wireless LAN Study Group (HEW-SG) の活動が開始された．2014 年 5 月からは Task Group (TG) として，11ax の標準化が進められており，無線 LAN エリア全体のスループット向上に貢献することを目指している [8]．端末あたりの平均スループットを向上させる技術としてマルチユーザ伝送技術があり，OFDMA 技術を用いたアップリンクマルチユーザ (以下，UL-MU : Uplink Multi-user) 送信が採用される予定である [9]．OFDMA 技術をランダムアクセス技術と組み合わせた OFDMA ランダムアクセス技術を用いた UL-MU 送信により，端末あたりの平均スループットの大幅な改善が期待される．

本章では，まず 11ax の概要について述べる．次に，11ax で規定されている UL-MU 送信方式の手順と OFDMA ランダムアクセスの仕組みについて説明するとともに，OFDMA ランダムアクセスの運用に使用する制御情報，すなわち MAC パラメータとして任意の値を選択可能であることを示す．

2.2　IEEE 802.11ax 規格

IEEE 802.11 が標準化された 1998 年以降，マルチメディアの普及に伴い，大容量のデータを無線で通信する需要が高まった．容量の大きなデータを通信する場合，通信処理を高速に行うために，より高いデータの伝送効率 (スループット : 1 秒間の送信ビット数) が求められる．需要を満たすために，無線通信規格である IEEE 802.11 では，高スループットを実現することを目的の一つとし規格化を進めてき

た．IEEE 802.11 が策定した無線 LAN 規格の内，代表的な 802.11 標準の一覧を表 2.1 に示す．無線通信規格 IEEE 802.11a (1999 年) [5] では 2Mbps ほどのスループットしか実現できていなかったが，IEEE 802.11n (2009 年) [6] により 600Mbps にまで向上し，2013 年 12 月に標準化が完了した IEEE 802.11ac [7] では，最大 6.9Gbps にまで通信速度を高速化できる．

表 2.1: 種々の 802.11 標準規格

IEEE 802.11a	最大 54Mbps の 5GHz 帯無線 LAN
IEEE 802.11b	最大 11Mbps の 2.4GHz 帯無線 LAN
IEEE 802.11g	最大 54Mbps の 2.4GHz 帯無線 LAN
IEEE 802.11n	最大 600Mbps の 2.4/5GHz 帯無線 LAN
IEEE 802.11ac	最大 6.93Gbps の 5GHz 帯無線 LAN
IEEE 802.11ax	High Efficiency Wireless LAN (現在策定中)

1998 年に IEEE802.11 が標準化されてから 20 年近く経過し，無線 LAN サービスの利用は私たちの生活に広く浸透した．こうした背景から，無線 LAN 端末は急激に増加しており，駅や空港など狭い範囲に多数の無線 LAN 端末が過密に存在する稠密環境が生じる．無線 LAN では，同一の無線チャネルを複数のユーザで共有する必要があり，各ユーザはどのようなタイミングで相手にデータフレームを送信するべきかを判断するためにアクセス制御を行うが，IEEE 802.11 では CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) を採用した DCF によりアクセス制御を行っている．DCF により各ユーザは他ユーザとの共存を自律分散型制御により実現しているが，稠密環境下においては，隠れ端末問題によるフレーム衝突やシステムスループットの大幅な低下など通信性能へ深刻な影響を与える恐れがある．稠密環境における通信性能の劣化が顕在化してきたことを踏まえ，2014 年 5 月から高効率な無線 LAN システムの実現に向けて 11ax の標準化が行われている．これまでの IEEE 802.11 標準規格では，高スループット化に焦点が当てられてきたが，11ax では最大スループットではなく，端末当たりの平均スループットを改善し無線 LAN エリア全体のスループット向上に貢献することに主眼が置かれている [8].

稠密環境下における通信性能を改善する技術の一つとして，OFDMA ランダムアクセス技術を用いた UL-MU 送信技術が採用される予定である [9]．次節以降でこの UL-MU 送信プロトコルと OFDMA ランダムアクセスについて詳述する．

2.3 UL-MU 送信プロトコル

マルチユーザ伝送技術は既に IEEE 802.11ac においてダウンリンクマルチユーザ MIMO 技術が導入されているが [10]，11ax では稠密環境における無線 LAN 端末の送信機会を増加させ，端末あたりの平均スループットを改善させるためにアップリンク送信においてマルチユーザ伝送技術が採用される予定である．本節では，11ax における UL-MU 送信プロトコルについて説明する．

UL-MU 送信プロトコルは図 2.1 に示すように，大きく 3 つのフェーズで構成されている．(1) 送信要求フェーズでは，AP が TF-R (Trigger Frame for Random access) と呼ばれるコントロールフレームを送信することで，各ユーザへ UL-MU 送信に必要な制御情報を伝える．(2) UL-MU フレーム送信フェーズでは，各ユーザが送信要求フェーズで得た制御情報に従い OFDMA ランダムアクセスを行い，送信権を取得したユーザは UL-MU フレームを AP へ送信する．(3) DL-MU フレーム応答フェーズでは，AP が受信した UL-MU フレームの受信状態に応じた MU-BA (Multi-User BlockAck) の応答を行う．この一連の手順は TF-R の送信間隔であるトリガ間隔 T_{TI} で繰り返される．なお図中 SIFS は Short Interframe Space の略である．このように，UL-MU 送信プロトコルは，AP が TF-R 送信によってプロトコルの開始を集中制御し，各ユーザは送信権を OFDMA ランダムアクセスによる分散制御で取得するハイブリット方式である．

11ax では UL-MU 送信プロトコルの運用期間が限られており，図 2.2 に示す SP (Service Period) と呼ばれる期間での運用が検討されている [26]．SP は Beacon フレームにより通知される TWT (Target Wake Time) によって制御される．図 2.2 は，2 つの TWT が通知された例を示している．AP は Beacon フレーム送信後，TWT1 後に TF-R 送信により SP を開始する．SP 期間内で UL-MU 送信プロトコルは運用され，各ユーザは UL-MU 送信を行う．SP 終了後，TWT2 による次の SP が開始されるまで，UL-MU 送信プロトコルは運用されない．なお，SP 期間外は既存プロトコルである DCF や EDCA 等が運用される．

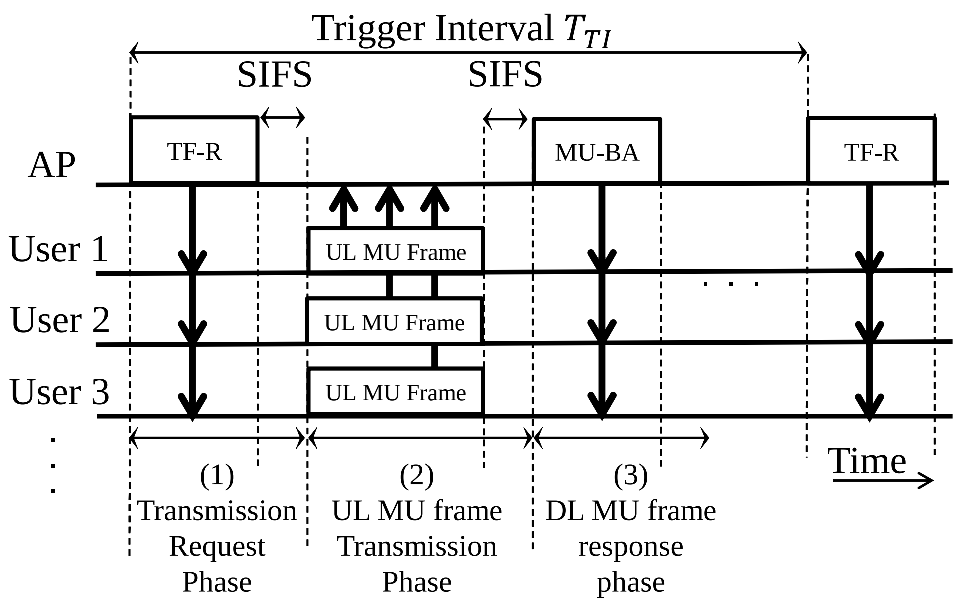

図 2.1: UL-MU 送信プロトコル手順

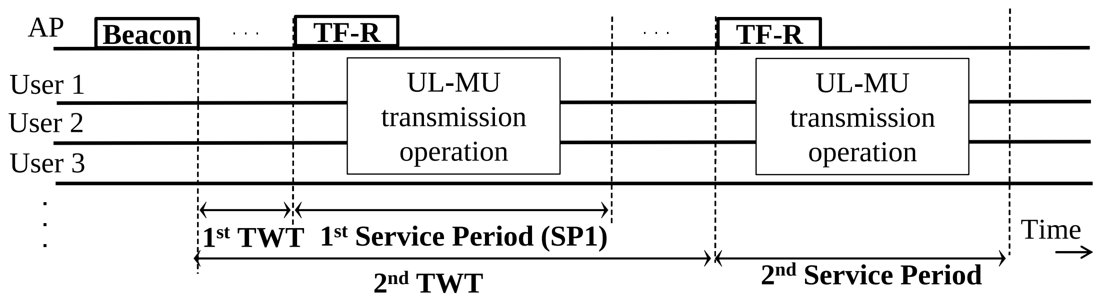

図 2.2: IEEE 802.11ax における TWT 手順

2.4 OFDMA ランダムアクセス

OFDMA ランダムアクセスでは，複数ユーザに対して RU と呼ばれる複数のサブキャリアをまとめた単位でユーザを割当てる．11ax における送信帯域幅と RU 数の関係を表 2.2 に示す．表中の 26-tone RU は 26 本のサブキャリアで構成される RU を，CBW20 は送信帯域幅 20 MHz であることを示す．11ax では 80 MHz 帯域幅利用時に 5 つのサブキャリア数の異なる RU を組み合わせて送信することができ，最

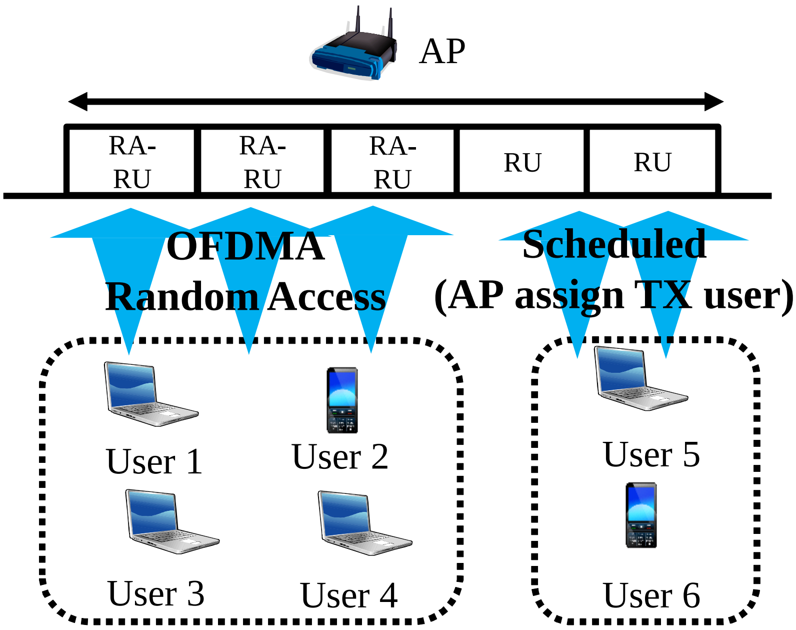

図 2.3: UL-MU 送信における RU の利用例

大 37 個の RU へ分割可能である．このように，RU 数は与えられた範囲内で自由に選択できる．

RU には OFDMA ランダムアクセスで使用する RA-RU (Random Access RU) の他に，AP が送信者を割当てる RU がある．AP はユーザから得られるユーザのバッファ情報を参照し，ユーザを RU へ割当てる．割当て情報は TF-R を介してユーザに通知され，該当ユーザは OFDMA ランダムアクセスへ参加することなく，指示された RU を用いて UL-MU 送信を行う．一方，バッファ情報を AP へ通知していないユーザ，特にスリープ状態から復帰したユーザや BSS へ所属していないユーザは，少なくとも初回の UL-MU 送信についてはバッファ情報を AP へ通知する

表 2.2: 送信帯域幅と総 RU 数の関係

RU Type	CBW20	CBW40	CBW80	CBW80+80 and CBW160
26-tone RU	9	18	37	74
52-tone RU	4	8	16	32
106-tone RU	2	4	8	16
242-tone RU	I-SU/MU-MIMO	2	4	8
484-tone RU	N/A	I-SU/MU-MIMO	2	4
996-tone RU	N/A	N/A	I-SU/MU-MIMO	2
2×996 tone RU	N/A	N/A	N/A	I-SU/MU-MIMO

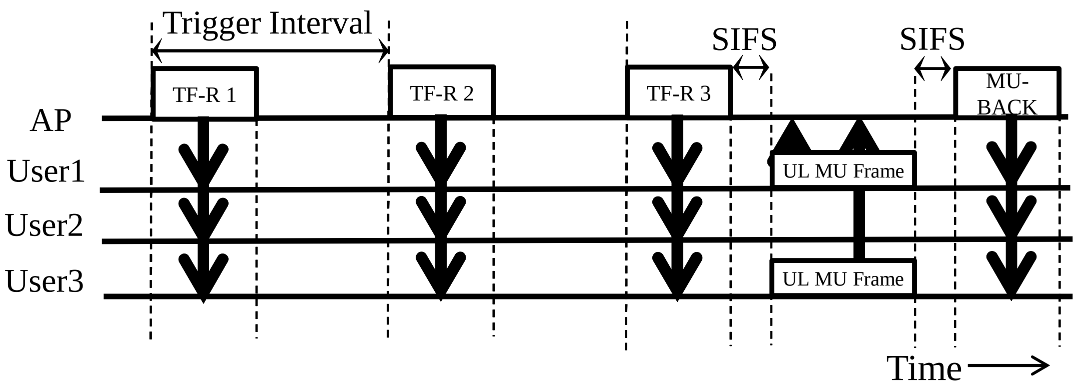

図 2.4: OFDMA ランダムアクセスにおけるバックオフ手順の一例

ために RA-RU を用いて OFDMA ランダムアクセスを行う必要がある．図 2.3 に，UL-MU 送信における RU の利用例を示す．図 2.3 では，OFDMA ランダムアクセスにより送信権を取得した 4 台のユーザと AP により RU へ割当てられた 2 台のユーザが同時に UL-MU 送信を行っている．このように，AP の集中制御により送信ユーザを割当てる RU と，OFDMA ランダムアクセスによる分散制御により送信権を取得したユーザが送信する RU を同時に利用するハイブリッドな通信となる．

次に，OFDMA ランダムアクセスのバックオフ手順について説明する．各ユーザはあらかじめ決められた OCW (OFDMA Contention Window) 幅の範囲内で OBO (OFDMA Backoff Counter) 値を選択する．各ユーザはあらかじめ標準の OCW 幅を保持しているが，Beacon フレームを介して AP が新たな OCW 幅を各ユーザへ通知することで，任意の値へ更新可能である. AP は RA-RU 数を決定し，TF-R を介してユーザへ通知する．各ユーザは TF-R の受信毎に OBO 値を RA-RU 数分減少させる．このとき，OBO 値が RA-RU 数を下回っている場合，OBO 値は 0 となる．OBO 値が 0 になったユーザは送信権を獲得し，RA-RU 内でランダムに選択した RU へ UL-MU 送信を行う．複数ユーザが 1 つの RU を選択した場合，フレーム衝突が発生する．このように，従来の IEEE 802.11 ではスロットタイムごとにチャネルの状態を確認し BO (Backoff Counter) 値を減少するのに対し，OFDMA ランダムアクセスでは OBO 値の減少タイミングを AP が集中制御する．さらに，減算値についても従来の IEEE 802.11 では 1 ずつ BO 値を減少していたが，RA-RU 数分減少させている．

OFDMA ランダムアクセスにおいてユーザが送信権を獲得する流れの一例を図 2.4，表 2.3 に示す．3 台のユーザがそれぞれ OBO 値として 9，15，7 を選択し，TF-R により通知される RA-RU 数が常に 3 である場合を想定している．表 2.3 に示すように，ユーザは TF-R 受信ごとに OBO 値を 3 づつ減少させ，3 回目の TF-R 受信時に OBO 値が 0 となり，ユーザ 1，3 は送信権を獲得し RA-RU の中でランダムに選択した RU へ UL-MU 送信を行う．

表 2.3: バックオフ手順の一例 (RA-RU 数が常に 3 である場合)

	Initial OBO	TF-R 1	TF-R 2	TF-R 3
User1	OBO=9	OBO=6	OBO=3	UL-MU Transmission
User2	OBO=15	OBO=12	OBO=9	OBO=6
User3	OBO=7	OBO=4	OBO=1	UL-MU Transmission

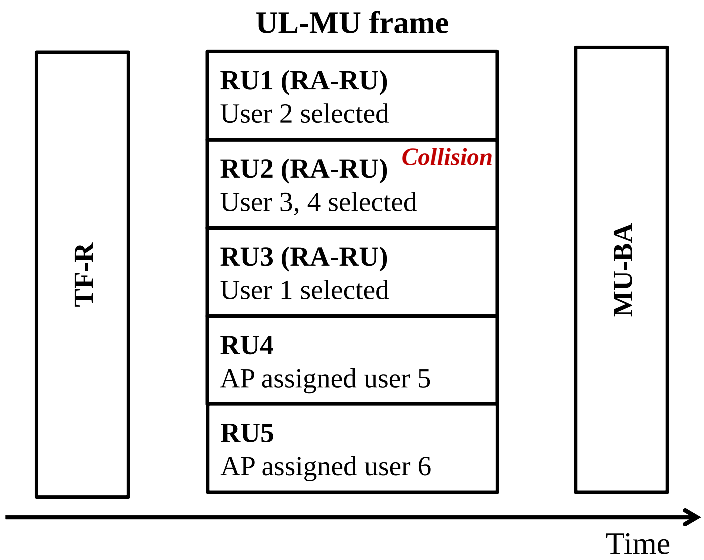

図 2.5: OFDMA ランダムアクセスの動作例

図 2.5 に OFDMA ランダムアクセスにおける RA-RU の選択例を示す．RU 数 5 つの内 3 つを RA-RU，2 つを AP が送信者を割当てる RU とし，OFDMA ランダムアクセスにより 4 ユーザが同時に送信権を獲得したものとする．AP によりユーザ 5，6 はそれぞれ RU4，5 へ割当てられ，ユーザ 1 からユーザ 4 は送信する RU を 3 つの RA-RU からランダムに選択する．ユーザ 1，ユーザ 2 はそれぞれ単独で RU を選択したが，ユーザ 3，ユーザ 4 は互いに RU2 を選択しフレーム衝突が起こる．このように，RA-RU 数以上のユーザが同時に送信権を獲得した場合，必ずフレーム衝突が発生してしまう．

2.5　まとめ

本章では，11ax の概要と OFDMA ランダムアクセス技術について詳述した．高スループット化に主眼が置かれていた従来の IEEE 802.11 の規格とは異なり，稠密

環境における通信性能の低下を改善するために，端末当たりの平均スループットを改善し無線LANエリア全体のスループットを向上する高効率な無線LANシステムの実現を目指し11axの規格化が進められていることを説明した．また，11axではアップリンク送信においてマルチユーザ伝送技術が採用されることから，UL-MU送信プロトコルについて説明した．OFDMAランダムアクセスはUL-MU送信プロトコル上で運用され，APによるUL-MU送信タイミングの集中制御とOFDMAランダムアクセスによる分散制御を行うハイブリッドな手法であることを示した．

本章で説明したUL-MU送信プロトコル，OFDMAランダムアクセスの手順は，11axによって規定されており変更することはできない．したがって，OFDMAランダムアクセス運用に使用する制御情報，すなわち，MACパラメータの最適化と最適化したMACパラメータを反映する仕組みを用いて，OFDMAランダムアクセスの性能を最大化する必要がある．

第3章　OFDMA ランダムアクセスの性能解析モデル

3.1　はじめに

OFDMA ランダムアクセスの運用には，RA-RU 数，OCW 幅やバックオフステージと呼ばれる再送回数など多くの MAC パラメータが関係する．OFDMA ランダムアクセスの効率的な運用には，これらのパラメータを環境に応じて適切に設計する必要があり，そのためには OFDMA ランダムアクセスの性能を正確に推定することが必要となる．

IEEE 802.11 規格の MAC プロトコルである DCF や EDCA も OFDMA ランダムアクセスと同様に，多種多様なサービスを満たすため，CW 幅や IFS (Interframe Space)，バックオフステージ数など多くの MAC パラメータを適切に設計する必要があり，MAC プロトコルの性能解析に関して多くの既存検討が行われた．図 3.1 に IEEE 802.11 規格 MAC プロトコル性能解析に関する既存研究についてまとめている. Bianchi はバックオフステージと BO からなる 2 次元マルコフ連鎖を用いて，飽和状態における DCF の性能解析モデルを提案した [16]．飽和状態とは，各ユーザが常に送信フレームを保有している状態であり，[16] のモデル (以下，Bianchi モデルと呼称する) を用いることで極限的な環境における DCF の性能限界を明らかにすることができる．この Bianchi モデルを基本モデルとして，DCF の性能解析モデル [17, 18] だけでなく，EDCA の性能解析モデルも提案されてきた [19, 20]．また，DCF や EDCA は非飽和状態で運用されることが一般的であり，非飽和状態への拡張も試みられている [21, 22].

一方，OFDMA ランダムアクセスの性能解析については，図 3.2 に示すようにこれまでに独自のプロトコルが提案され性能解析が行われてきた [23–25]．[23] の OFDMA ランダムアクセスは，ユーザは RU 毎にバックオフタイマーを持ち，OBO 値が 0 となった RU へフレームを送信する手法である．しかし，11ax で採用が予定される OFDMA ランダムアクセスでは全ての RU に対してバックオフタイマは 1 つであり，送信権を獲得後，フレーム送信を行う RU をランダムに選択する．[24] では，11ax と同様に，1 つのバックオフタイマを使用しランダムに RU を選択するが，OFDMA ランダムアクセスが運用されるプロトコルと OBO 値の減算値が異なる．[24] では，DCF や EDCA における BO 値の減算値と同様に，OBO 値は 1 ず

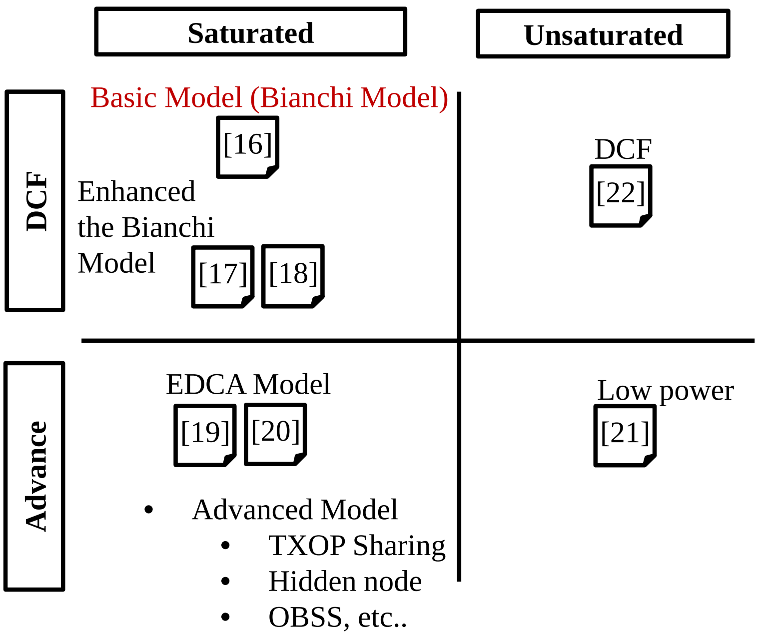

図 3.1: IEEE 802.11 規格 MAC プロトコル性能解析に関する既存研究

つ減少させる．一方，11ax では MU 送信による同時送信ユーザ数の向上を考慮し，OBO 値は RU 数ずつ減少させる．[25] では，OBO 値の減少値は RU 数となっているが，OBO 値の減少タイミングと運用プロトコルが異なっており，11ax における OFDMA ランダムアクセスの性能解析モデルとしては使用できない．

そこで本章では，11ax に対応した OFDMA ランダムアクセスの性能解析モデルを提案し，さらに，今後の拡張性を考慮し IEEE 802.11 規格 MAC プロトコル性能解析に関する既存研究の成果を流用できるよう，提案モデルが DCF の性能解析モデルの基本的なモデルである Bianchi モデルの拡張モデルとみなせることを示す．次に，提案モデルから RA-RU あたりのフレーム送信成功確率と定義する通信効率の理論式を導出し，計算機シミュレーションと理論式を用いた解析結果との比較により提案モデルの解析精度について検討する．

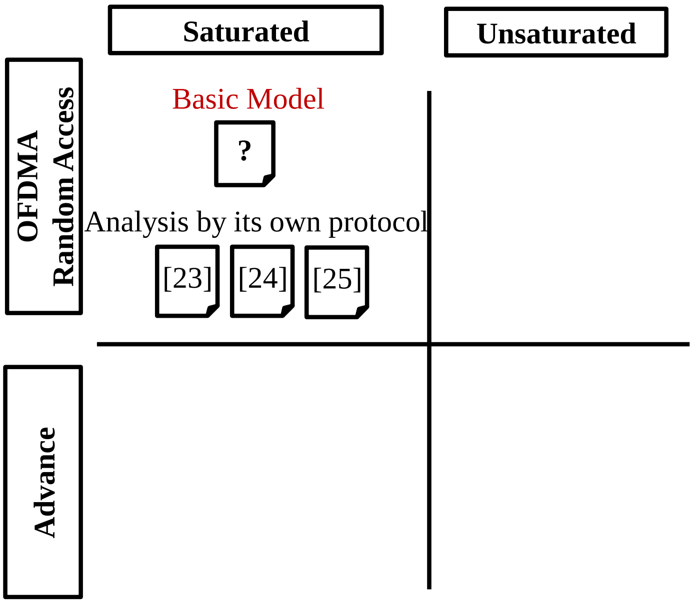

図 3.2: OFDMA ランダムアクセスの性能解析に関する既存研究

3.2 マルコフ連鎖によるモデル化

OFDMA ランダムアクセスのモデル化にあたり，まず OFDMA ランダムアクセスにおけるユーザの挙動について述べる．各ユーザは AP への UL-MU フレームを送信する場合，区間 $[0, OCW_{min}]$ の範囲内で OBO 値 k をランダムに選択する．このとき，OCW_{min} は OCW 幅の最小値である．OBO 値は TF-R 受信時に RA-RU 数 N_{RA} 分減少し，OBO 値が 0 になったときにランダムに選択した RA-RU へ UL-MU フレームを送信する．UL-MU フレーム送信が失敗した場合にはバックオフステージ数 i に応じて，OCW 幅を $OCW_i = \min\{2^i(OCW_{min}+1)-1, OCW_{max}\}$ に更新し，再度，OBO 値を区間 $[0, OCW_i]$ から選択し UL-MU フレームを再送する．このとき OCW_{max} は OCW 幅の最大値である．このように，OFDMA ランダムアクセスは DCF や EDCA のように各ユーザが通信路の状況を検出し BO 値を制御する必要は無く，AP の TF-R 送信により OBO 値の減少タイミングが制御される．さらに，DCF や EDCA における BO 値の減少値は 1 であるが，OFDMA ランダムアクセスでは TF-R により通知される N_{RA} 分減少する．

OFDMA ランダムアクセスのモデル化にあたり，1 台の AP と N_{user} 台のユーザから成る無線 LAN ネットワークを想定する．AP からのデータフレーム送信はないものとし，TF-R は一定のトリガ間隔 T_{TI} でユーザに送信されるものとする．なお，フレーム衝突以外の送信エラーは通信中に発生しないものとする．ネットワーク環境が短時間で大きく変化することは稀であることから，通信中の RA-RU 数は

一定とする．さらに，解析を容易にするために，OCW_i は常に RA-RU 数の倍数であると近似する．加えて，本論文では，OFDMA ランダムアクセスの性能解析を目的とするため，SP による運用期間の限定はせず，OFDMA ランダムアクセスが常時運用されるものとする．また，AP が送信者を割当てる RU は無いものとして，全てのユーザは OFDMA ランダムアクセスへ参加しているものとする．このとき，ユーザは常に送信フレームを保有している飽和状態であると仮定する．その他の仮定については，文献 [16] と同様である．

図 3.3 に，$N_{RA} = 3$ 時の OFDMA ランダムアクセスの性能解析モデルとして，2 次元マルコフ連鎖モデルを示す．性能解析モデルは，バックオフステージ $i \in [0, m]$ と OBO 値 $k \in [0, W_i' - 1]$ による状態 (i, k) とその状態遷移により構成される．図 3.3 中の $W_0' - 1$ は OCW_{min} に対応しており，バックオフステージ i によって $W_i' - 1 = OCW_i = 2^i(OCW_{min} + 1) - 1$ と変化する．m はバックオフステージの最大値であり，m 以降は再送を繰り返しても OCW 幅の最大値 $OCW_{max} = W_m' - 1 = 2^m(OCW_{min} + 1) - 1$ で OCW 幅は固定される．ランダムに選択された OBO 値は $N_{RA} = 3$ ずつ減少し，1 以上の OBO 値が選択された状態から状態 $(i, 0)$ へ向かう状態遷移が N_{RA} 数分できる．よって，1 つのバックオフステージで部分的に 3 つの独立した状態遷移ができる．バックオフステージ i によっては，図 3.4 に示すように OCW_i が N_{RA} の倍数とならない場合があり，各状態遷移における状態数が異なる．図 3.3 の性能解析モデルでは解析を容易にするために，OCW_i が常に N_{RA} の倍数となるように近似する．バックオフステージにおける各状態への状態遷移確率の総和に対して図 3.4 で示す状態 $(i, W_i' - 1)$ への状態遷移確率の割合は，N_{RA} に対して OCW_i が大きくなるに従い小さくなるため，この近似が解析精度へ与える影響は小さくなる．OBO 値が 0 になると，すなわち状態 $(i, 0)$ へ遷移したとき，AP への UL-MU フレームの送信を行う．送信に成功するとバックオフステージは 0 に再設定され，フレーム衝突確率 p で発生するフレーム衝突が起こると次のバックオフステージへ遷移する．

図 3.3 に示す性能解析モデルでは，バックオフステージ毎に N_{RA} 数の独立した状態遷移ができる．ここで，OCW_i が N_{RA} の倍数であると近似しているため，図 3.5 に示すように，バックオフステージ i における N_{RA} 数の独立した状態遷移を 1 つにまとめることができる．これに伴い，N_{RA} 数の状態を 1 つにまとめた状態，すなわちバックオフステージ i において状態 $(i, 0)$ 以外の状態への再送もしくは送信成功時の状態遷移確率は $1/\frac{W_i'}{N_{RA}}$ となる．このとき，状態 $(i, 0)$ への状態遷移確率は，状態 $(i, 0)$ 以外の状態への状態遷移確率と等しくない．解析を容易にするために，$W_i = W_i' + N_{RA} - 1$ と再定義し，図 3.6 へ示すように状態 $(i, 0)$ への状態遷移確率を状態 $(i, 0)$ 以外の状態への状態遷移確率 $1/\frac{W_i}{N_{RA}}$ と同一であると近似する．なお，バックオフステージにおける各状態への状態遷移確率の総和に対して図 3.5 で示す状態 $(i, 0)$ への状態遷移確率の割合は，N_{RA} に対して OCW_i が大きくなるに従い小さくなるため，この近似が解析精度へ与える影響は小さくなる．また，図 3.6 中の $W_0 - 1$，$W_m - 1$ はそれぞれ OCW_{min}，OCW_{max} に対応しており，バックオフステー

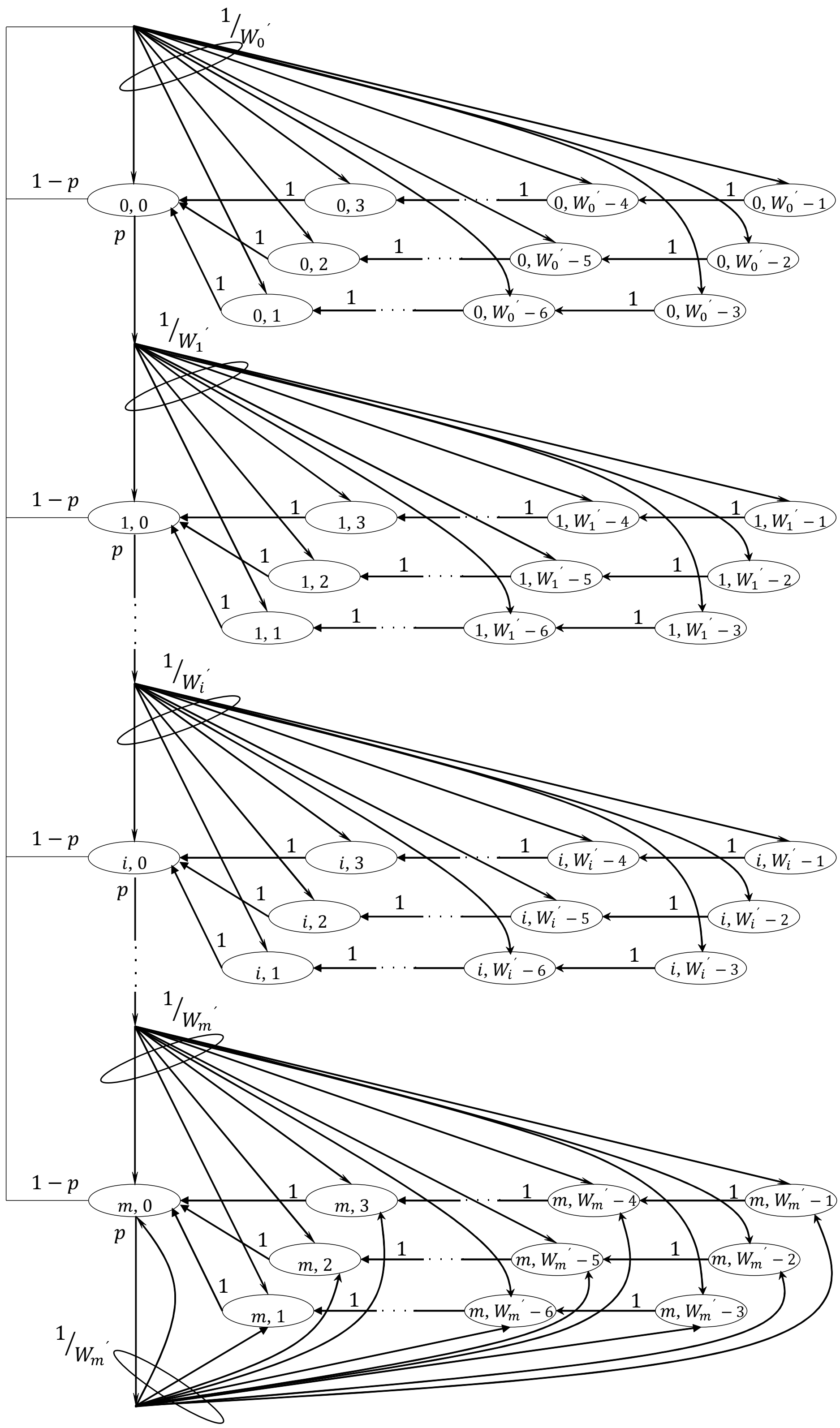

図 3.3: 飽和状態における OFDMA ランダムアクセスのマルコフ連鎖モデル (N_{RA} = 3)

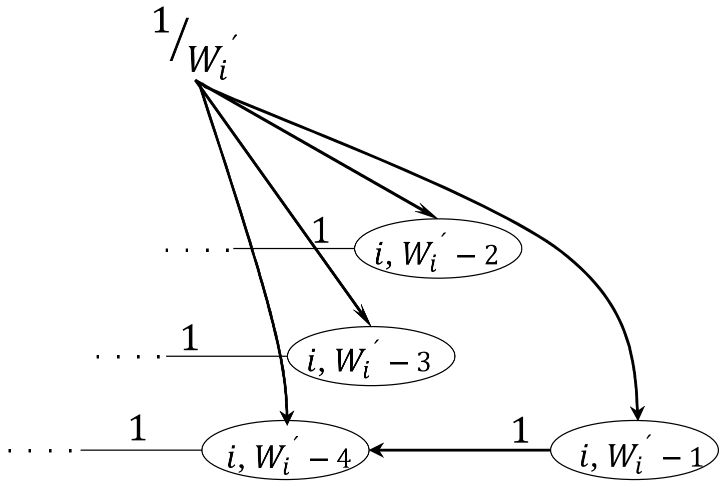

図 3.4: 状態 (i, k) とその状態遷移 (OCW_i が N_{RA} の倍数でない場合の例)

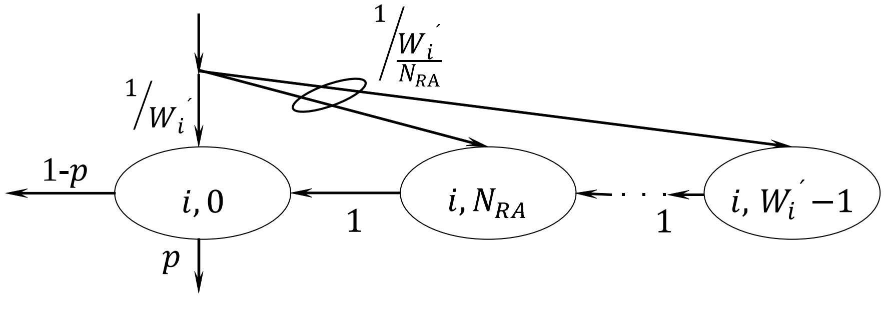

図 3.5: 各状態への状態遷移 (近似前)

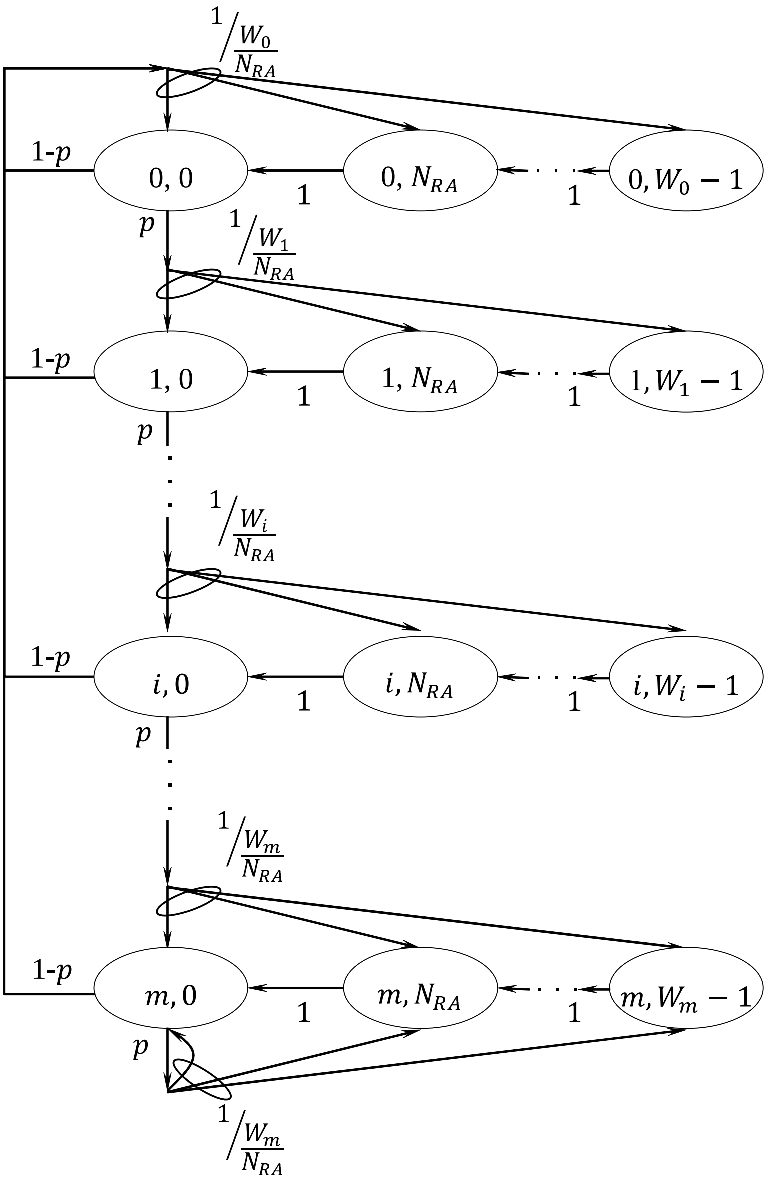

図 3.6: Bianchi モデルの拡張モデルとしての飽和状態における OFDMA ランダムアクセスのマルコフ連鎖モデル

ジ i によって $W_i - 1 = OCW_i = 2^i(OCW_{min} + 1) - 1$ と変化する．このように，N_{RA} 数に関係なくバックオフステージ内の状態遷移が 1 つとなり，よりシンプルなモデルとして，OFDMA ランダムアクセスの性能解析モデルを再構築できる．

図 3.6 の性能解析モデル (以下，提案モデルと呼称する) は，DCF 性能解析モデルの基本的なモデルである Bianchi モデルの拡張とみなすことが可能である．BO 値の変化に着目した場合に DCF と OFDMA ランダムアクセスの違いは大きく分けて 2 つあり，BO･OBO 値の減少タイミングと減少値とが異なる．DCF において，BO 値はアイドルスロット毎に 1 ずつ減少し，通信路がビジーと検出されるとビジー区間終了時まで停止される．OFDMA ランダムアクセスでは，OBO 値は TF-R 受信毎に N_{RA} ずつ減少する．この違いを考慮し Bianchi モデルを拡張すると，提案モデルと同一になる．DCF の BO 値減少タイミングであるアイドルスロットは固定長であり，本論文における TF-R も一定のトリガ間隔での送信を仮定している．さらに，Bianchi モデルにおいて N_{RA} ずつ BO 値を減少するようモデルを拡張すると，バックオフステージあたりの状態数が $1/N_{RA}$ 倍となり，提案モデルの状態遷移と一致する．

このように，提案モデルを Bianchi モデルの拡張モデルと考えることで，DCF や EDCA の性能解析に関する多くの既存検討の成果を，OFDMA ランダムアクセスの性能解析へ反映することができる．例えば，リトライリミットを考慮した DCF の性能解析に関する既存研究 [27,28] の成果を流用し，OFDMA ランダムアクセスにおいてリトライリミットを考慮した性能解析が可能となる [29].

3.3 性能評価指標

稠密環境では同時に送信権を取得するユーザが多く，フレーム衝突が増加してしまう．OFDMA ランダムアクセスの性能を最大限発揮するためには，フレーム衝突確率を抑えフレーム送信の成功確率を高くする必要がある．本論文では，T_{TI} における 1 RA-RU あたりの UL-MU フレーム送信成功確率を通信効率と定義する．この通信効率は，各ユーザが効率よく UL-MU 送信をできていることを評価する指標であり，提案モデルから解析的に求めていく．加えて，システムスループットの理論式を構築し，MAC スループットにより正規化されたシステムスループットが通信効率と等しくなることを示す．

通信効率の理論式を提案モデルより求めるにあたり，まず，あるユーザが T_{TI} 内に UL-MU フレームを送信する確率 τ_{TI} を求める．提案モデルが Bianchi モデルの拡張モデルとみなせ，両モデルの違いの一つはバックオフステージあたりの状態数が $1/N_{RA}$ 倍となる点であることから，文献 [16] における式 (7) 中の W を W/N_{RA} とすることで，τ_{TI} を求めることができる．

状態 (i,k) の定常状態確率を $b_{i,k}$ と記述すると $b_{i,0}$ の和で表現され，$W = W_0$ とおくと τ_{TI} は式 (3.1) と導かれる．

$$
\begin{aligned}
\tau_{TI} &= \sum_{i=0}^{m} b_{i,0} \\
&= \frac{2}{1+\frac{W}{N_{RA}}+p\frac{W}{N_{RA}}\sum_{i=0}^{m-1}(2p)^i}
\end{aligned}
\tag{3.1}
$$

式 (3.1) より，τ_{TI} は N_{RA}，W，m の 3 つの MAC パラメータが関係している．UL-MU フレーム送信時の衝突確率 p は OFDMA ランダムアクセスへ参加している全てのユーザ数を N_{user} として，式 (3.2) と導かれる．

$$
p = 1-(1-\tau_{TI})^{N_{user}-1} \tag{3.2}
$$

τ_{TI} と p の値は式 (3.1) と式 (3.2) の非線形連立方程式を解くことにより得られる．τ_{TI} を用いて，あるユーザが T_{TI} 内に特定の RA-RU を用いて UL-MU フレームを送信する確率 τ_{RU} は式 (3.3) で与えられる．

$$
\tau_{RU} = \frac{\tau_{TI}}{N_{RA}} \tag{3.3}
$$

ここで，特定の RA-RU へ UL-MU フレームを送信する時のフレーム衝突確率 p_{RU} は，τ_{RU} を用いて式 (3.4) となる．

$$
p_{RU} = 1-(1-\tau_{RU})^{N_{user}-1} \tag{3.4}
$$

同様に，特定の RA-RU において，少なくとも 1 台のユーザが UL-MU フレームを送信している確率 P_{tr} は式 (3.5)，UL-MU フレーム送信が成功する確率 P_s は式 (3.6) で与えられる．

$$
P_{tr} = 1-(1-\tau_{RU})^{N_{user}} \tag{3.5}
$$

$$
P_s = \frac{N_{user}\tau_{RU}(1-\tau_{RU})^{N_{user}-1}}{P_{tr}} \tag{3.6}
$$

これより，通信効率は式 (3.7) により $P_s P_{tr}$ で与えられる．

$$
P_s P_{tr} = N_{user}\tau_{RU}(1-\tau_{RU})^{N_{user}-1} \tag{3.7}
$$

次に，システムスループットの理論式を求める．OFDMA ランダムアクセスでは，図 3.7 に示すようにユーザが UL-MU 送信をしていない場合の待ち時間が 2 通りある．1 つは全てのユーザの OBO 値が 0 とならなかったために，全てのユーザが UL-MU 送信しない場合に待つ T_{idle}，もう 1 つは少なくとも 1 ユーザが UL-MU

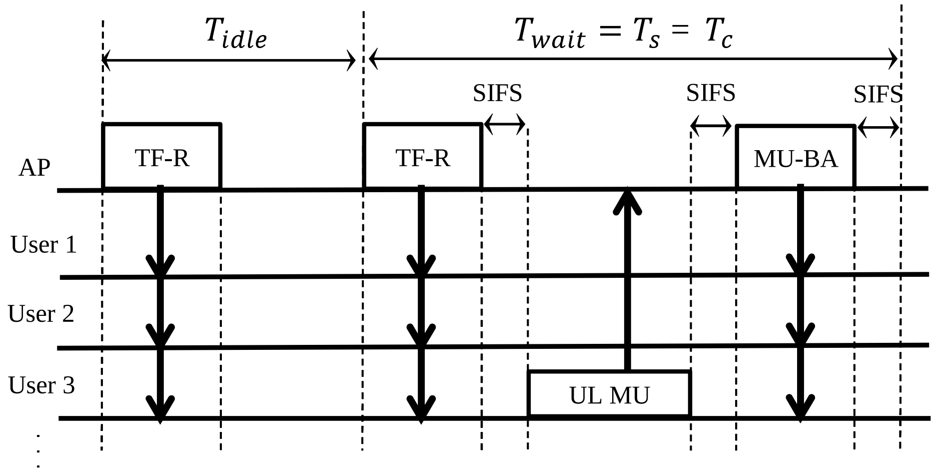

図 3.7: UL-MU フレーム送信待ち時間：全てのユーザが送信しない場合 (T_{idle})，他のユーザが送信している場合 (T_{wait})

送信する場合に待つ T_{wait} である．このように，複数ある RA-RU の内，少なくとも一つ以上の RA-RU が使用される場合は，残りの RA-RU の状態に関係なく T_{wait} 待つ必要がある．ここで，特定の RA-RU における UL-MU フレーム送信の有無に係らず，他の RA-RU における UL-MU フレーム送信により，通信待機となる確率 P_{wait} は式 (3.8) で与えられる．

$$P_{wait} = 1 - (1 - P_{tr})^{N_{RA}-1} \tag{3.8}$$

これより，システムスループット S は式 (3.9)，1 RA-RU あたりのスループット S_{RU} は式 (3.10) で導かれる．なお，$E[L]$ は送信フレームの平均 MAC ペイロードサイズ [bit] であり，$(1 - P_{tr})(1 - P_{wait})$ は全ての RA-RU で UL-MU フレーム送信が行われていない確率，$(1 - P_{tr})P_{wait}$ は特定の RA-RU は使用されていないが，他の RA-RU における UL-MU フレーム送信のため通信待機となる確率，$P_{tr}(1 - Ps)$ はフレーム衝突確率を示している．

$$S = N_{RA} S_{RU} \tag{3.9}$$

$$S_{RU} = \frac{P_s P_{tr} E[L]}{I + P_s P_{tr} T_s + P_{tr}(1 - Ps) T_c} \tag{3.10}$$

$$I = (1 - P_{tr})(1 - P_{wait}) T_{idle} + (1 - P_{tr}) P_{wait} T_{wait} \tag{3.11}$$

このとき，図 3.7 に示すように，OFDMA ランダムアクセスにおける UL-MU フレーム送信成功時のチャネル使用時間 T_s，フレーム衝突時に送信待機しているチャ

ネル使用時間 T_c は T_{wait} と等しいため，式 (3.10) は式 (3.12) となる．

$$S_{RU} = \frac{P_s P_{tr} E[L]}{I + P_{tr} T_c} \tag{3.12}$$

ここで，式 (3.12) の 1 RA-RU あたりのスループット S_{RU} を MAC スループットの平均値 $E[L]/T_{TI}$ によって式 (3.13) に示すように $Normalized\ S_{RU}$ に正規化する．

$$Normalized\ S_{RU} = S_{RU} \Big/ \frac{E[L]}{T_{TI}} \tag{3.13}$$

さらに，本論文では一定のトリガ間隔で TF-R が送信されるものと仮定しているため，T_{idle}，T_{wait}，T_s，T_c は式 (3.14) に示すように T_{TI} と等しくなる．

$$T_{idle} = T_{wait} = T_s = T_c = T_{TI} \tag{3.14}$$

T_{TF-R} を TF-R フレーム時間，T_{data} を平均データフレーム時間，$T_{MU\ BACK}$ を MU-BACK フレーム時間，T_{SIFS} を SIFS 時間としたときの T_{TI} の最小時間は式 (3.15) で与えられる．

$$T_{TI} = T_{TF-R} + T_{data} + T_{MU\ BACK} + 3T_{SIFS} \tag{3.15}$$

このとき，式 (3.13) へ式 (3.12) と式 (3.14) を代入すると，式 (3.16) となり，$NormalizedS_{RU}$ は通信効率と等しくなる．これにより，$Normalized\ S_{RU}$ は MAC ペイロードサイズにかかわらず，確率 P_s と確率 P_{tr} により与えられる．

$$Normalized\ S_{RU} = P_s P_{tr} \tag{3.16}$$

従って，以降は式 (3.7) によって与えられる通信効率を評価指標とする．

3.4 性能解析モデルの評価

提案した OFDMA ランダムアクセスの性能解析モデルの有用性を確認するために，解析結果と計算機シミュレーションによる結果と比較を行う．数値計算には表 3.1 に示すパラメータを用いた．帯域幅 80 MHz の最大 RU 数 37 を RU 数 N_{RU} とし，N_{RU} の全てを RA-RU として用いる．また，全ての送信フレームの MAC ペイロードサイズは 8000 [bits] の固定サイズとする．データフレームの PHY レートは 11ac 規格の MCS9 (変調方式 256QAM，符号化率 5/6，1 ストリーム) の Short GI を用いた．コントロールフレームの PHY レートは MU-BACK と TF-R 送信時に使用する．なお，フレーム長として MU-BACK は Compressed Bitmap を持つ Block Ack フレーム，TF-R は Null Data Packet Announcement (NDPA) フレームを用いるものとした [30]．IEEE 802.11 委員会が規定している System Simulation Calibration の

Box3 (Test1) [31, 32] によるキャリブレーション済みの MAC シミュレータを基本とし，OFDMA ランダムアクセス用に拡張したシミュレータをモンテカルロ法に基づき Matlab で実装し，計算機シミュレーションに使用する．計算機シミュレーションでは，解析とあわせてフレーム衝突時のみ送信エラーとしている．また，提案モデルではユーザが選択する OBO 値は常に N_{RA} の倍数と仮定したが，実際には区間 $[0, OCW_i]$ からランダムに選択される．よって，計算機シミュレーションではより実際の環境と揃えるため，ユーザは全ての OBO 値をランダムに選択できるようにしている．

表 3.1: 数値計算に用いたパラメータ諸元

General parameters	
Bandwidth	80 MHz
Data frame PHY rate	433.3 Mbit/s
Control frame PHY rate	6.5 Mbit/s
DATA frame payload	8000 bits
MAC header	240 bits
PHY header	40 µs
SIFS (T_{SIFS})	16 µs
UL-MU parameters	
Total number of RUs (N_{RU})	37
Number of RA-RUs (N_{RA})	37
OCWmax (OCW_{max})	1023
Trigger frame duration (T_{TF-R})	156 µs
MU Block ACK frame ($T_{MU\ BACK}$)	84 µs

また，解析値の算出には N_{RA}，W，m，N_{user} を用いるが，RA-RU 数は $N_{RA} = N_{RU} = 37$ とし，W として 8，32，64 を使用すると，$W = OCW_{min} + 1$ と OCW_{max} の関係から m は式 (3.17) で与えられ，$m = 7, 5, 4$ となる．

$$m = \log_2\left(\frac{OCW_{max} + 1}{OCW_{min} + 1}\right) \tag{3.17}$$

したがって，式 (3.7) において N_{user} を変化させ解析値を算出した．

通信効率の解析値と計算機シミュレーションの結果を図 3.8 に示す．図 3.8 中の線は解析値を，各種マーカーは計算機シミュレーション結果を示しており，$OCW_{min} = 7$ のユーザ数が少ない場合を除き，解析値とシミュレーション結果はよく一致して

いることが分かる．表 3.2 に示す解析値と計算機シミュレーション結果の相対誤差からも，高い解析精度が得られていることが確認できる．

また，図 3.8 では帯域幅 80 MHz を想定したが，稠密環境では複数の BSS が密集しており 80 MHz の帯域幅を確保することが難しい．そこで，帯域幅 20 MHz の最大 RU 数 9 を RU 数 N_{RU} とし，N_{RU} の全てを RA-RU として用いた場合の通信効率の解析値と計算機シミュレーションの結果を図 3.9 に示す．図 3.9 中の線は解析値を，各種マーカーは計算機シミュレーション結果を示しており，解析値とシミュレーション結果はよく一致していることが確認できる．表 3.2 に示す解析値と計算機シミュレーション結果の相対誤差からも，$OCW_{min} = 7$ のユーザ数が少ない場合に，それ以外と比べ比較的に誤差は大きいが十分に高い解析精度が得られている．

OCW_{min} が小さくユーザ数が少ない場合に解析精度が低い原因として，Bianchi モデルが含む問題と提案モデルが含む近似による影響が考えられる．Bianchi モデルでは，表 3.2，表 3.3 の解析結果と同様に，CW_{min} が小さくユーザ数が少ない場合の解析精度が低くなることが知られており，これまでに解析精度の改善手法 [18, 33] がいくつか提案されている．また，提案モデルは 3.2 節で説明した 2 つの近似を含んでいる．1 つ目は OCW_i は常に N_{RA} の倍数になるように近似しており，2 つ目は再送時もしくは送信成功時における状態 $(i, 0)$ への状態遷移確率を $1/W_i$ から $1/\frac{W_i}{N_{RA}}$ へ近似している．これらの近似が解析精度に与える影響は N_{RA} に対して OCW_i が大きくなるに従い小さくなるため，表 3.2 において $N_{user} = 20$ に着目すると，OCW_{min} が大きくなるほど解析精度が高くなっている．加えて，ユーザ数の増加に従って再送回数が多くなり OCW_i が大きくなるため，各 OCW_{min} において N_{user} の増加に伴い相対誤差が小さく抑えられている．また，表 3.2 と表 3.3 から明らかなように，$N_{RA} = 9$ の相対誤差は，$N_{RA} = 37$ の相対誤差と比較し小さく抑えられているが，これも提案モデルに含む近似による影響が小さくなるためである．

提案モデルは OCW_{min} が小さくユーザ数が少ない場合の解析精度に検討の余地があるが，表 3.2 と表 3.3 に示す結果から稠密環境における OFDMA ランダムアクセスの性能解析モデルとしての解析精度は十分であると判断できる．

なお，全ての送信フレームの MAC ペイロードサイズは 8000 [bits] の固定サイズとし解析を行ったが，式 (3.7) から明らかなように，通信効率の算出に MAC ペイロードサイズは影響しない．確認のために，MAC ペイロードサイズを 4000 [bits] に変更し算出した通信効率の解析値と計算機シミュレーションの結果を，図 3.11 ($N_{RA} = 37$) と図 3.10 ($N_{RA} = 9$) に示す．図 3.11，図 3.10 より，MAC ペイロードサイズを 4000 [bits] とした場合においても，MAC ペイロードサイズ 8000 [bits] と同一の結果を得ることが確認できる．

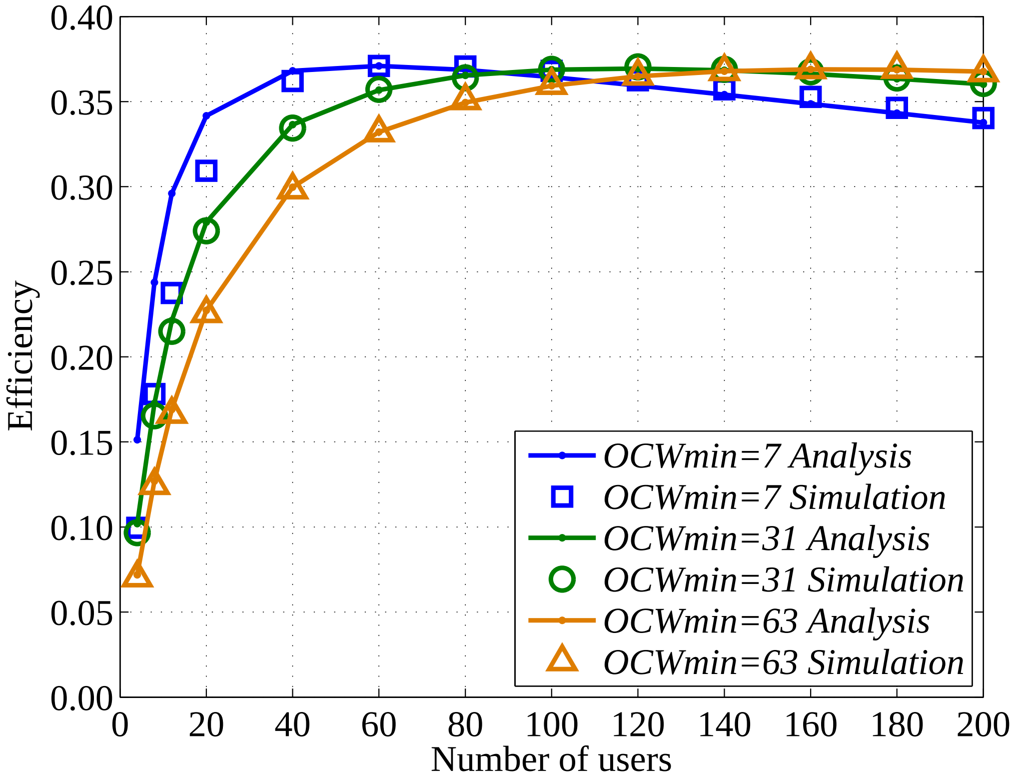

図 3.8: ユーザ数に対する通信効率 (N_{RA} = 37, $E[L]$ = 8000 [bits]) : 解析値 (線)，シミュレーション結果 (マーカー)

表 3.2: 解析値と計算機シミュレーション結果との相対誤差（図 3.8）

N_{user}	OCW_{min} = 7	OCW_{min} = 31	OCW_{min} = 63
20	-10.17%	-1.87%	-1.09%
40	-1.85%	-0.44%	-0.31%
80	0.56%	0.12%	0.14%
120	0.86%	0.43%	-0.07%
160	0.89%	0.23%	0.06%
200	0.75%	0.00%	-0.07%

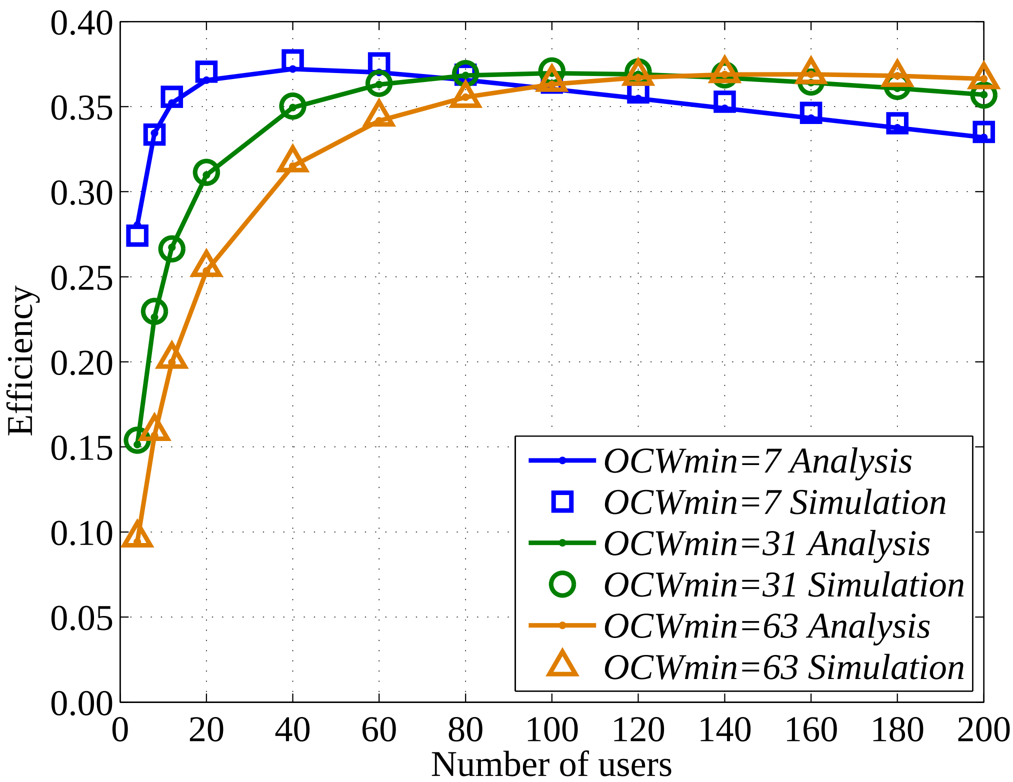

図 3.9: ユーザ数に対する通信効率 (N_{RA} = 9, $E[L]$ = 8000 [bits])：解析値 (線)，シミュレーション結果 (マーカー)

表 3.3: 解析値と計算機シミュレーション結果との相対誤差（図 3.9）

N_{user}	OCW_{min} = 7	OCW_{min} = 31	OCW_{min} = 63
20	1.67%	0.58%	0.18%
40	1.98%	-0.14%	-0.02%
80	1.34%	0.12%	-0.40%
120	1.05%	0.44%	0.53%
160	0.86%	-0.12%	-0.21%
200	0.75%	-0.13%	-0.47%

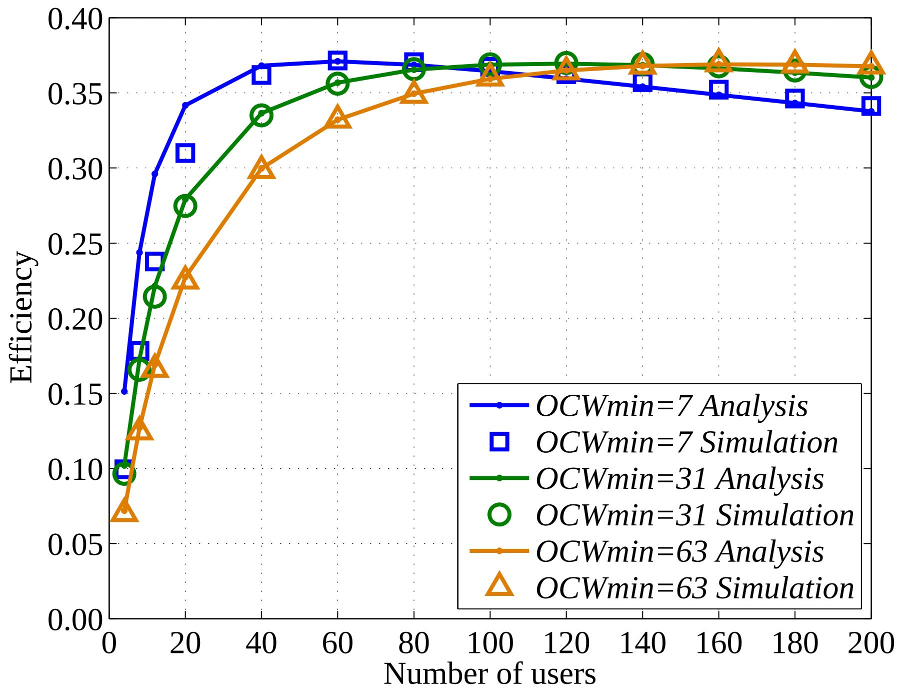

図 3.10: ユーザ数に対する通信効率 (N_{RA} = 37, $E[L]$ = 4000 [bits]) : 解析値 (線)，シミュレーション結果 (マーカー)

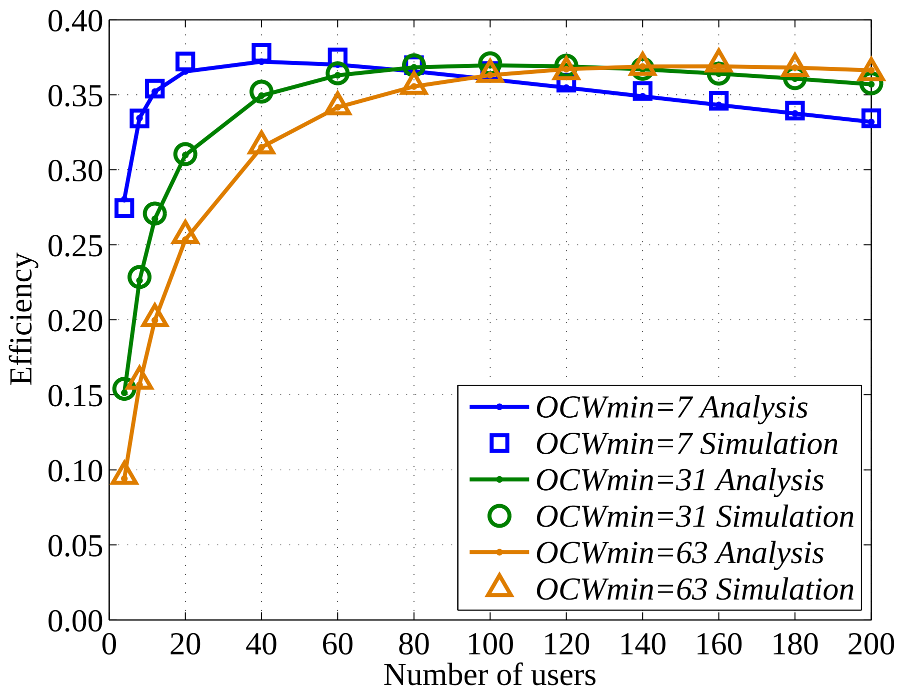

図 3.11: ユーザ数に対する通信効率 (N_{RA} = 9, $E[L]$ = 4000 [bits]) : 解析値 (線)，シミュレーション結果 (マーカー)

3.5 まとめ

本章では，MAC プロトコルの性能解析に関する既存研究について説明し，OFDMA ランダムアクセスの飽和状態における性能解析モデルを提案した．提案した性能解析モデルは Bianchi モデルの拡張とみなすことが可能であり，既存研究の成果を容易に流用可能となった．次に，稠密環境ではフレーム衝突が増加することから，本論文では T_{TI} における 1 RA-RU あたりの UL-MU フレーム送信成功確率を通信効率と定義し，理論式を導出した．定式化することで OFDMA ランダムアクセスの性能を容易に解析可能となった．さらに，計算機シミュレーションと解析結果の比較により，OCW_{min} が小さくユーザ数が少ない場合には提案モデルが含む近似が解析精度に影響を与えるが，ユーザ数の多い稠密環境における性能解析モデルとしては，提案モデルは十分な精度で解析可能であることを示した．

第4章　OFDMA ランダムアクセスの性能解析

4.1　はじめに

稠密環境における OFDMA ランダムアクセスの性能を最大限発揮するためには，複数の MAC パラメータを適切に設計する必要がある．しかし，各 MAC パラメータは互いに関係し合い OFDMA ランダムアクセスの性能へ影響を与えるため，環境に応じて適切に MAC パラメータを設計することは難しく，各 MAC パラメータの設計指針が必要である．

本章では，第 3 章で導出した理論式を用いて，OFDMA ランダムアクセスが効率的に運用されていることを示す評価指標である通信効率について解析し，MAC パラメータの設計指針を示す. まず，3 つのパラメータ τ_{TI}，N_{user}，N_{RA} が通信効率へ与える影響について解析するとともに，通信効率の最大値を明らかにする. 次に，MAC パラメータ W，m が通信効率へ与える影響について解析し，MAC パラメータの設計指針を検討する.

4.2　通信効率

OFDMA ランダムアクセスの通信効率について解析することで，その最大値を明らかにし，関係するパラメータが通信効率へ与える影響を明らかにする．通信効率は式 (3.7) で示されるように，式 (3.5) で示される P_{tr} と，式 (3.6) で示される P_s によって与えられる．ここで，式 (3.5)，式 (3.6) における変数として，τ_{RU} と N_{user} の 2 つの変数があり，さらに τ_{RU} は式 (3.3) で示されるように τ_{TI} と N_{RA} によって与えられる．本節では，τ_{TI}，N_{user}，N_{RA} が通信効率へ与える影響について考察を行う．このとき，数値解析に用いるパラメータは表 3.1 と同一とする．なお，性能解析にあたり，従来の MAC プロトコルである DCF と OFDMA ランダムアクセスの比較を通して，OFDMA ランダムアクセスが稠密環境下において通信効率を改善可能であることを示す.

4.2.1 τ_{TI} と通信効率

τ_{TI} が通信効率へ与える影響について考察を行う．τ_{TI} は式 (3.1) で示されるように，N_{RA}，W，m の 3 つの MAC パラメータが関係しており，τ_{TI} が通信効率へ与える影響を解析することは，MAC パラメータを設計する上で重要になる．まず，P_{tr} と P_s へ τ_{TI} が与える影響について解析を行い，P_{tr} と P_s によって与えられる通信効率について考察を行う．このとき，数値解析に用いるパラメータは表 3.1 と同一とし，N_{RU}，N_{RA} はともに送信帯域幅 80 MHz の最大 RU 数 37 とする．

(A) P_{tr} の解析

式 (3.5) において τ_{TI} を変化させ P_{tr} の解析値を算出し，図 4.1 に P_{tr} と τ_{TI} の関係を示す．図 4.1 より，τ_{TI} の増加にともない P_{tr} も増加している．P_{tr} の増加率はユーザ数が多くなるほど高く，τ_{TI} が 1 の時にユーザ数 10 の P_{tr} は約 0.24 であるのに対し，ユーザ数 100 では約 0.94 となっている．つまり，ユーザが T_{TI} 内に UL-MU フレームを常に送信している場合，ユーザ数 100 では特定の RA-RU において 94% の確率で 1 台以上のユーザが UL-MU フレームを送信している．一方で，ユーザ数 10 では $N_{RA} > N_{user}$ となるため，常に使用されない N_{RA} が存在し，約 76% の N_{RA}，すなわち約 28 個の N_{RA} は未使用となっている．

ここで，DCF の性能解析結果を図 4.2 に示す．DCF の性能解析結果の算出に当たり，[16] の式 (10) において，ユーザがランダムに選択されたスロットタイムにおいてフレームを送信する確率 τ を変化させスロットタイムにおいて少なくとも 1 台のユーザがフレームを送信している確率 $P_{tr_{DCF}}$ の解析値を算出した．なお，[16] において $P_{tr_{DCF}}$ は P_{tr} と表記されているが，本論文における P_{tr} の定義と異なるため，便宜上 $P_{tr_{DCF}}$ に変更している．図 4.2 より，DCF では OFDMA ランダムアクセスと比較し，τ の増加に対して $P_{tr_{DCF}}$ が急峻に増加し，ユーザ数 10 では τ が約 0.5 以上，ユーザ数 100 では約 0.1 以上で $P_{tr_{DCF}}$ はほぼ 1 となる．これは，DCF が OFDMA ランダムアクセスのように各ユーザの送信先を複数の RU へ分散させることができず，全サブキャリアを 1 台のユーザで占有するためである．したがって，稠密環境下では，任意のスロットタイムにおいて常に 1 台以上のユーザがフレームを送信するような状態が生じやすい．

P_{tr} や $P_{tr_{DCF}}$ の値が大きい，すなわち 1 台以上のユーザが特定の RA-RU において UL-MU フレームを送信している確率，あるいはスロットタイムにおいて 1 台以上のユーザがフレームを送信している確率が高いネットワーク状態では，フレーム送信時にフレーム衝突が発生する確率が高い．図 4.3 に，式 (3.4) において τ_{TI} を変化させ算出した特定の RA-RU へ UL-MU フレームを送信する時のフレーム衝突確率 p_{RU} の解析値を，図 4.4 に [16] の式 (9) において τ を変化させ算出したフレーム衝突確率 p_{DCF} の解析値を示す．なお，[16] において p_{DCF} は p と表記されている

が，本論文における p の定義と異なるため，便宜上 p_{DCF} に変更している．図 4.3, 4.4 より，フレーム衝突確率 p_{RU}，p_{DCF} と図 4.1，図 4.2 に示した P_{tr} や $P_{tr_{DCF}}$ がほぼ一致していることが確認できる．

以上の結果から，表 3.1 で示す解析条件においては，DCF ではユーザ数 10 の時に τ が約 0.5 以上になるとフレーム送信のほとんどがフレーム衝突となり，再送を繰り返してもフレーム送信が成功する確率は極めて低いと考えられる．一方で，複数 RU を用いたマルチユーザ伝送が可能な OFDMA ランダムアクセスでは，τ_{TI} が 1，すなわちユーザが常にフレームを送信するネットワーク環境においても，ユーザ数 100 の時に，フレーム衝突確率は 1 に達しておらず，再送を繰り返すことでフレーム送信を成功させることができる．

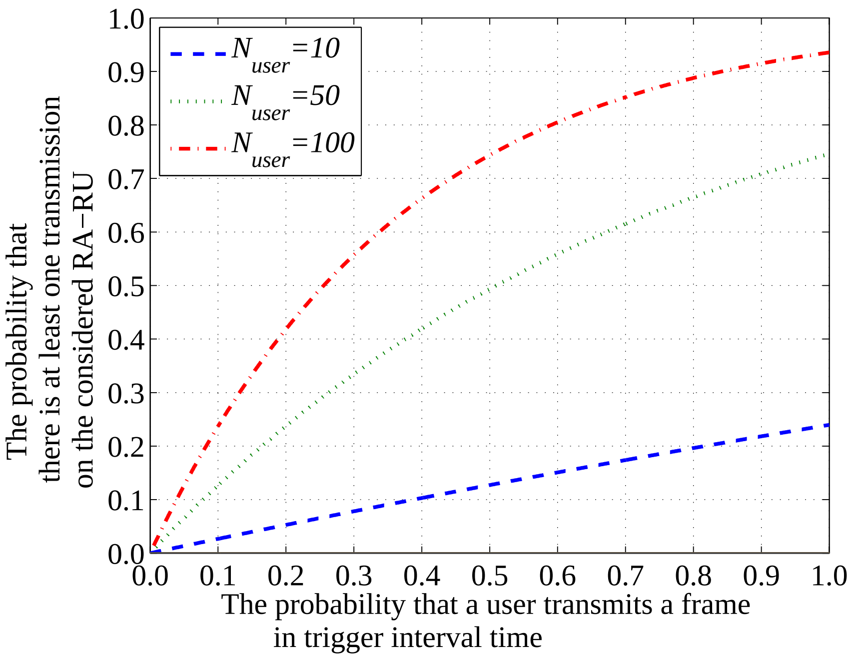

図 4.1: OFDMA ランダムアクセスの P_{tr} (N_{RA} = 37) : 解析値

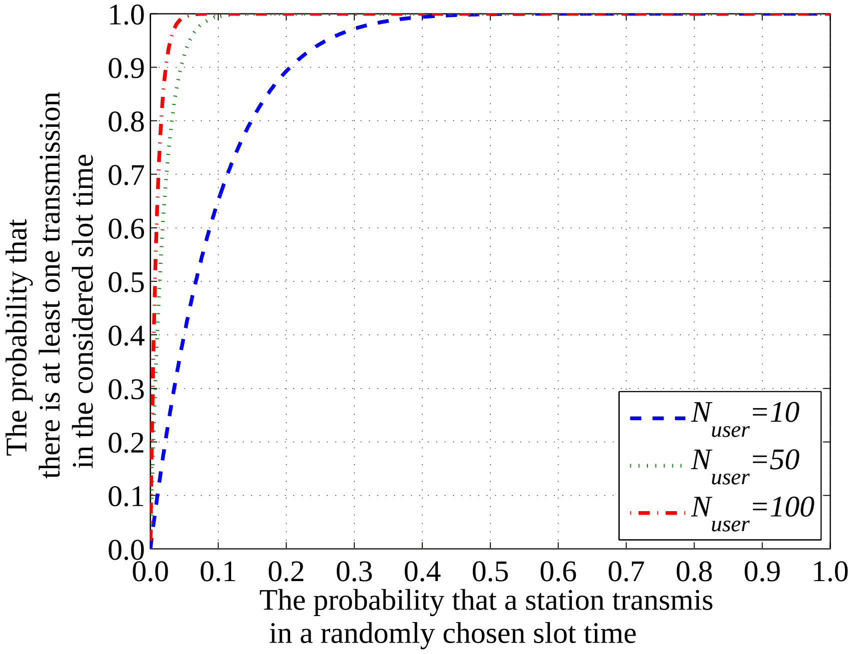

図 4.2: DCF の $P_{tr_{DCF}}$: 解析値

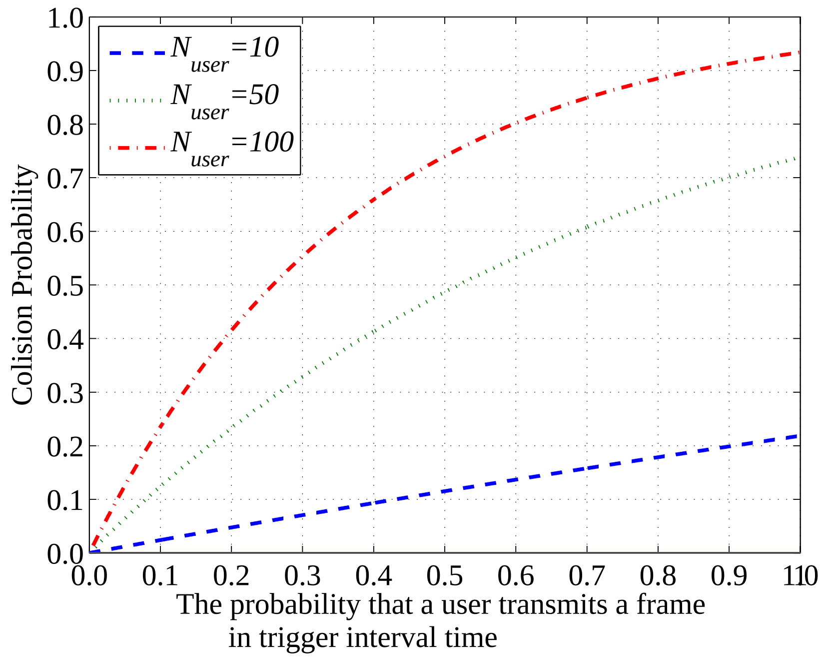

図 4.3: OFDMA ランダムアクセスの p $(N_{RA} = 37)$: 解析値

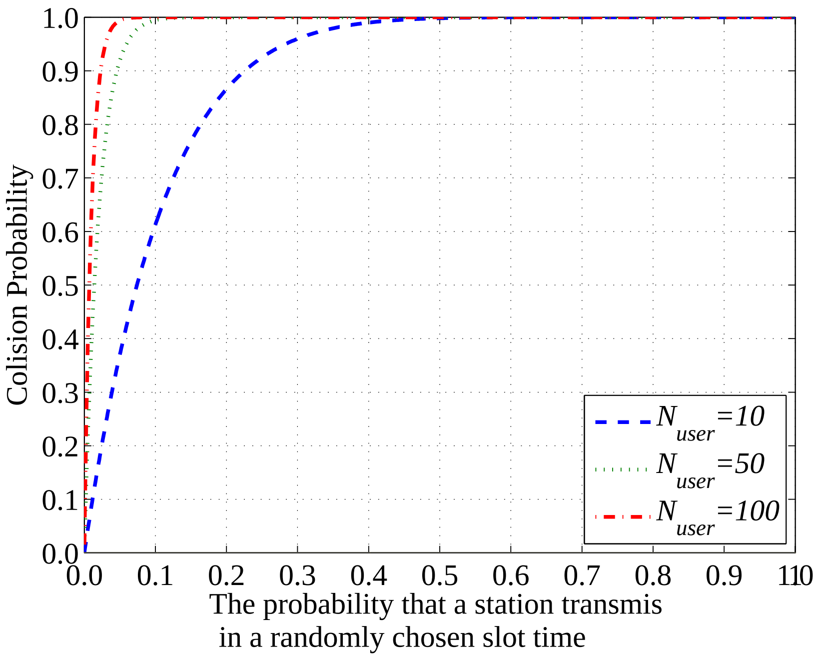

図 4.4: DCF の p_{DCF} : 解析値

(B) P_s の解析

P_{tr} は特定の RA-RU において少なくとも 1 台のユーザが UL-MU フレームを送信している確率であったが，1 台以上のユーザが同じ RA-RU へ UL-MU フレームを送信した場合，パケット衝突となる．したがって，OFDMA ランダムアクセスにおける UL-MU フレームの送信成功確率 P_s は P_{tr} において一つの RA-RU に 1 台のユーザが UL-MU フレームを送信する確率と等しい．式 (3.6) において τ_{TI} を変化させ P_s の解析値を算出し，図 4.5 に P_s と τ_{TI} の関係を示す．図 4.5 より，τ_{TI} の増加に従い P_s が低下している．P_s の低下率はユーザ数が多くなるほど高く，τ_{TI} が 1 の時にユーザ数 10 の P_s は約 0.88 であるのに対し，ユーザ数 100 では約 0.19 となっている．このように，τ_{TI} が等しい場合，ユーザ数が多くなるほど送信成功確率は低下する．また，一定以上の送信成功確率を確保したい場合には，ユーザ数によって τ_{TI} を調整する必要があり，ユーザ数が多くなるほど τ_{TI} は低くする必要がある．

ここで，DCF の性能解析結果を図 4.6 に示す．DCF の性能解析結果の算出に当たり，[16] の式 (11) において，τ を変化させ DCF におけるフレームの送信成功確率 $P_{s_{DCF}}$ の解析値を算出した．なお，[16] において $P_{s_{DCF}}$ は P_s と表記されているが，本論文における P_s の定義と異なるため，便宜上 $P_{s_{DCF}}$ に変更している．図 4.6 より，DCF では OFDMA ランダムアクセスと比較し，τ の増加に対してフレームの

送信成功確率が急峻に低下し，ユーザ数 10 で τ が約 0.65，ユーザ数 100 で τ が約 0.1 の時にフレーム送信成功確率はほぼ 0 となる．$P_{s_{DCF}}$ が 0 に近づく，すなわち，フレーム送信は成功しない状態に近づくことであり，このような状態ではフレームの再送を繰り返しても送信が成功する確率はきわめて低い．

図 4.5 と図 4.6 より，表 3.1 で示す解析条件において，OFDMA ランダムアクセスでは，τ_{TI} が 1，すなわちユーザが常にフレームを送信するネットワーク環境で，かつユーザ数 100 台の場合でもフレーム送信成功確率は約 0.19 であるのに対し，DCF では τ が約 0.65 以上になるとユーザ数 10 台であってもフレームの送信成功確率はほぼ 0 となってしまう．

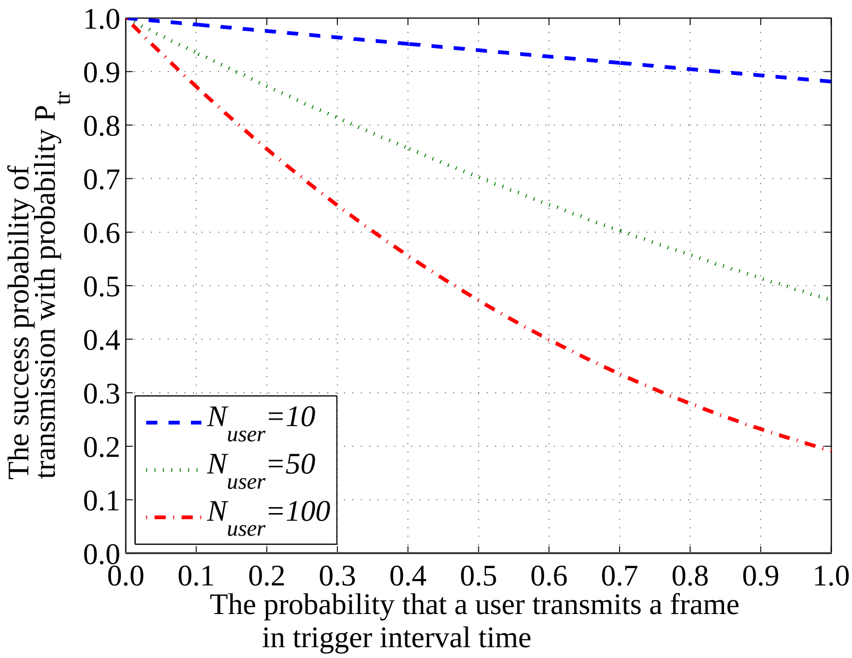

図 4.5: OFDMA ランダムアクセスの P_s (N_{RA} = 37) : 解析値

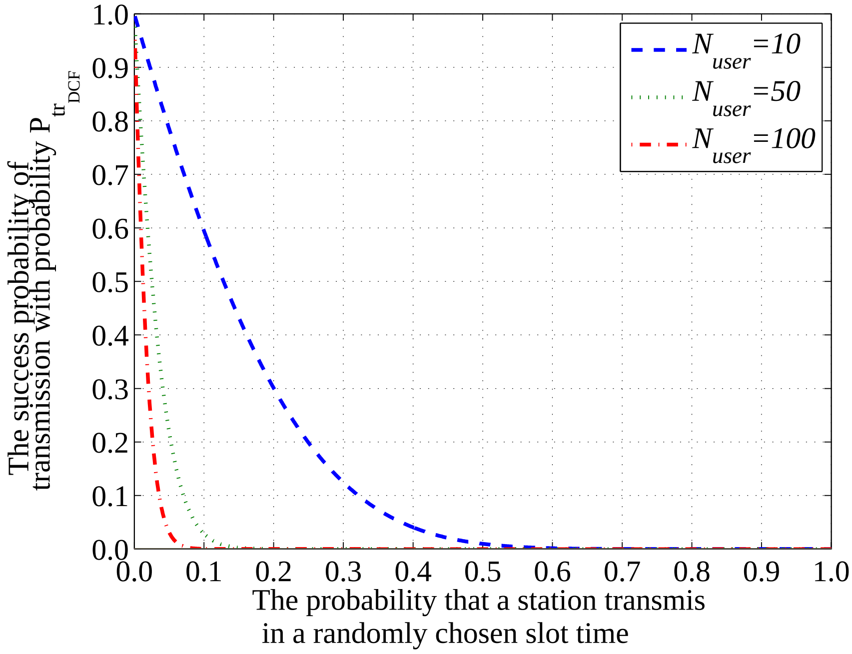

図 4.6: DCF の $P_{s_{DCF}}$: 解析値

(C) 通信効率の解析

通信効率 P_sP_{tr} について考察する．通信効率は式 (3.7) で表され，式 (3.7) において τ_{TI} を変化させ通信効率の解析値を算出し，図 4.7 に通信効率と τ_{TI} の関係を示す．OFDMA ランダムアクセスはスロット付き ALOHA 方式と類似しており [34]，図 4.7 に示すように，最大通信効率はスロット付き ALOHA と同様の約 0.37 となる．また，$N_{user} = 10$ のように $N_{RA} > N_{user}$ となる場合に通信効率は最大値に達していない．原因は未使用の RA-RU が存在し周波数利用効率が低下するためであり，AP は N_{RA} を N_{user} 以下に設定する必要がある．一方，$N_{RA} \leq N_{user}$ の場合，N_{user} 毎に異なる τ_{TI} で通信効率が最大となる．

ここで，DCF 性能解析結果を図 4.8 に示す．DCF の性能解析結果の算出に当たり，[16] の式 (10) と式 (11) において，τ を変化させ DCF の通信効率の解析値を算出した．図 4.8 より，DCF の最大通信効率はユーザ数によって異なり，ユーザ数 100 では約 0.37，ユーザ数 10 では OFDMA ランダムアクセスの最大通信効率より高い約 0.39 となっている．しかしながら，τ の増加に伴い，通信効率は急峻に低下し，ユーザ数 10 の時に，τ が 0.6 以上では通信効率はほぼ 0 となる．

図 4.7 と図 4.8 より，OFDMA ランダムアクセスでは最大通信効率を達成する τ_{TI} の値が，DCF の τ の値と比較し大きい．つまり，ユーザのフレーム送信確率を高く保つことができ，結果として送信待機時間が減りユーザの体感品質の改善が可能となる．

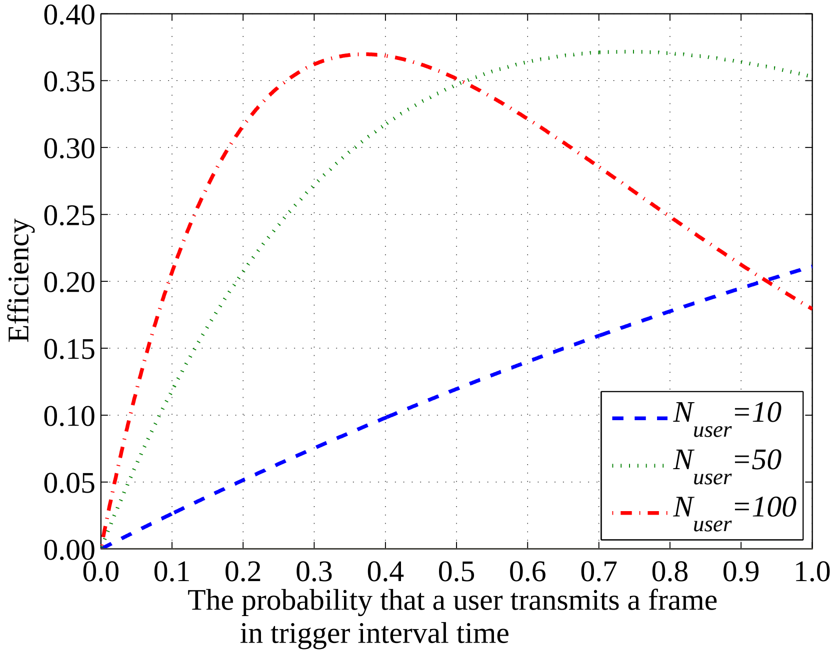

図 4.7: OFDMA ランダムアクセスの通信効率 (N_{RA} = 37) : 解析値

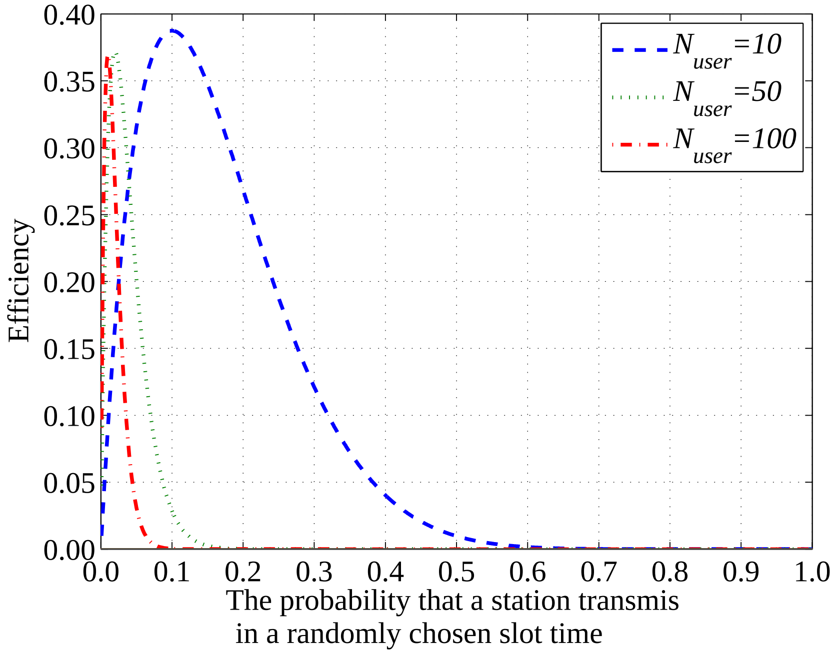

図 4.8: DCF の通信効率 : 解析値

4.2.2 N_{user} と通信効率

N_{user} が通信効率へ与える影響について考察を行う．無線 LAN を利用するユーザ数は，時間や場所によって様々であり，ユーザ数が通信効率へ与える影響を解析することは，環境に応じた適切な MAC パラメータを設計する上で重要である．解析にあたり，数値解析に用いるパラメータは表 3.1 と同一とし，τ_{TI} は 0.1，0.3，0.5 とした．

式 (3.7) において N_{user} を変化させ通信効率の解析値を算出し，図 4.9 に通信効率と N_{user} の関係を示す．図 4.9 より，ユーザ数が増加するに従い通信効率は増加し，最大通信効率である約 0.37 に達し低下する．τ_{TI} によって最大通信効率を達成するユーザ数は異なっており，τ_{TI} が 0.1 の時にユーザ数約 370，τ_{RU} が 0.5 の時にユーザ数 70 で最大通信効率を達成している．このように，ユーザ数によって τ_{TI} を適切に調整することで通信効率を最大化できる．

ここで，DCF 性能解析結果を図 4.10 に示す．DCF の性能解析結果の算出に当たり，[16] の式 (10) と式 (11) において，N_{user} を変化させ DCF の通信効率の解析値を算出した．このとき，τ は 0.1，0.3，0.5 とした．図 4.10 より，最大通信効率を達成するユーザ数は τ が 0.1 の時に約 10 台であり，10 台以降はユーザ数の増加に伴い通信効率は減少していく．

図 4.9 と図 4.10 より，DCF では τ が 0.1 の時の最大通信効率を達成するユーザ数は約 10 であるのに対し，OFDMA ランダムアクセスでは τ_{TI} が 0.1 の時の最大通信効率を達成するユーザは約 370 であり，表 3.1 で示す解析条件 ($N_{RA} = 37$) においては，OFDMA ランダムアクセスは DCF に対し最大通信効率において約 37 倍のユーザを許容できることを示している．

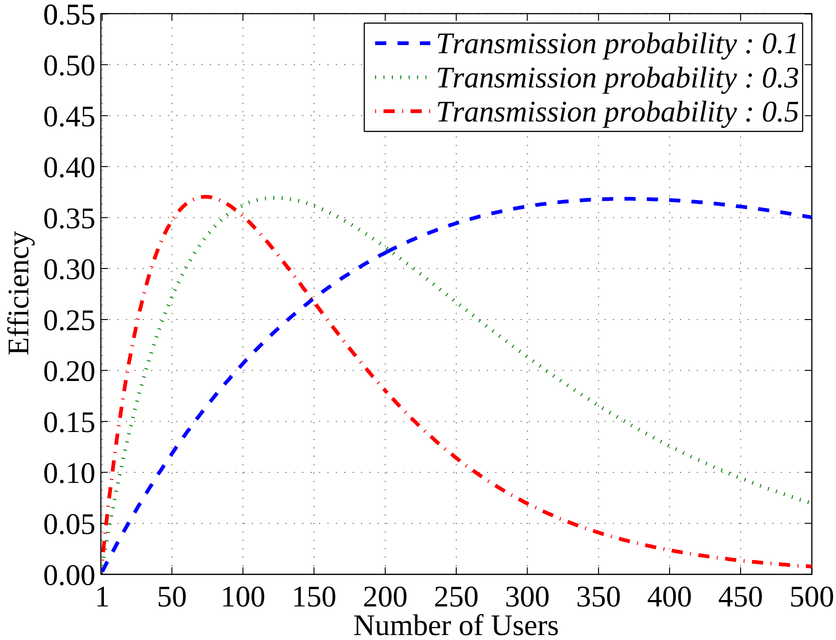

図 4.9: OFDMA ランダムアクセスの通信効率 (N_{RA} = 37) : 解析値

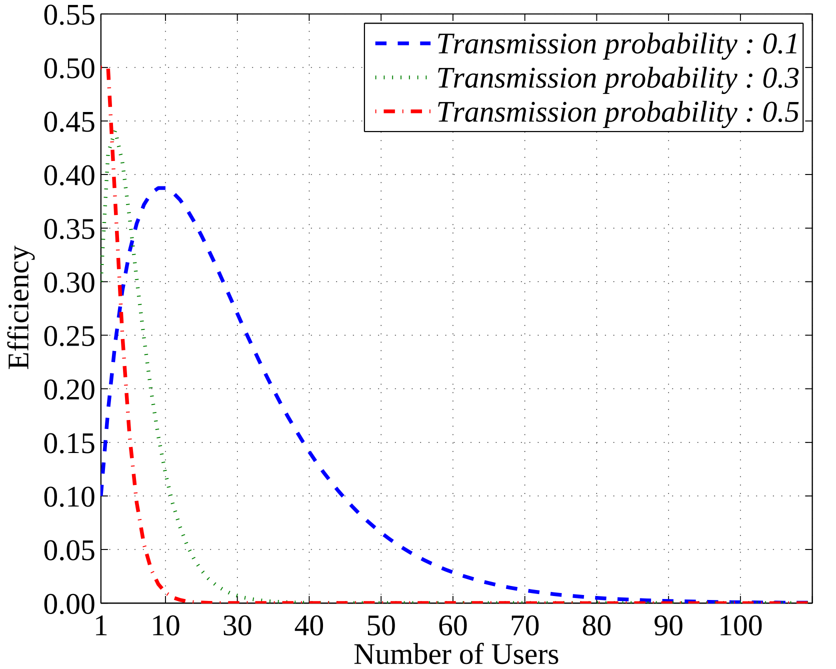

図 4.10: DCF の通信効率 : 解析値

4.2.3　N_{RA} と通信効率

N_{RA} が通信効率へ与える影響について考察を行う．11ax では N_{RA} の他に，AP が送信者を割当てる RU があり，状況に応じて AP が N_{RA} を設計する．したがって，N_{RA} が通信効率へ与える影響を解析することは，AP が N_{RA} を設計する上で重要である．解析にあたり，数値解析に用いるパラメータは表 3.1 において N_{RA} を可変とし，その他パラメータは同一とした．

式 (3.3) において τ_{TI} を 0.5 とし，N_{RA} を変化させ算出した τ_{RU} を式 (3.7) に代入して通信効率の解析値を算出し，図 4.11 に通信効率と N_{RA} の関係を示す．図 4.11 より，ユーザ数によって最大通信効率を達成する N_{RA} が異なることが確認できる．N_{user} が 50 台において最大通信効率を達成する N_{RA} は 25 であり，その後，N_{RA} の増加にしたがって通信効率は低下していく．ここで，N_{RA} が 25 未満の場合，解析に使用した τ_{TI} は 0.5 であるため，ユーザ数 50 であっても常に未使用の N_{RA} が存在してしまう．通信効率を高く保つためには未使用の N_{RA} を減らす必要があり，AP は T_{TI} 内にフレーム送信を行うユーザ数を把握することが望ましい．

次に，式 (3.3) において N_{user} を 50 とし，τ_{TI} を変化させ算出した τ_{RU} を式 (3.7) に代入して通信効率の解析値を算出し，図 4.12 に通信効率と τ_{TI} の関係を示す．また，式 (3.3) において τ_{TI} を 0.5 とし，N_{user} を変化させ算出した τ_{RU} を式 (3.7) に代入して通信効率の解析値を算出し，図 4.13 に通信効率と N_{user} の関係を示す．図 4.12 と図 4.13 より，図 4.11 と同様に N_{RA} によってそれぞれ最大通信効率を達成する τ_{TI} と N_{user} が異なることが確認できる．このように，OFDMA ランダムアクセスに使用する N_{RA} によって，通信効率を最大化するための τ_{TI}，N_{user} が異なるため，AP はネットワーク環境にしたがって適切な N_{RA} を設計する必要がある．この時，AP が N_{user} を制御することは難しく，また表 2.2 に示すように N_{RA} にも限りがあるため，MAC パラメータを適切に設計することで，τ_{TI} を調整する必要がある．

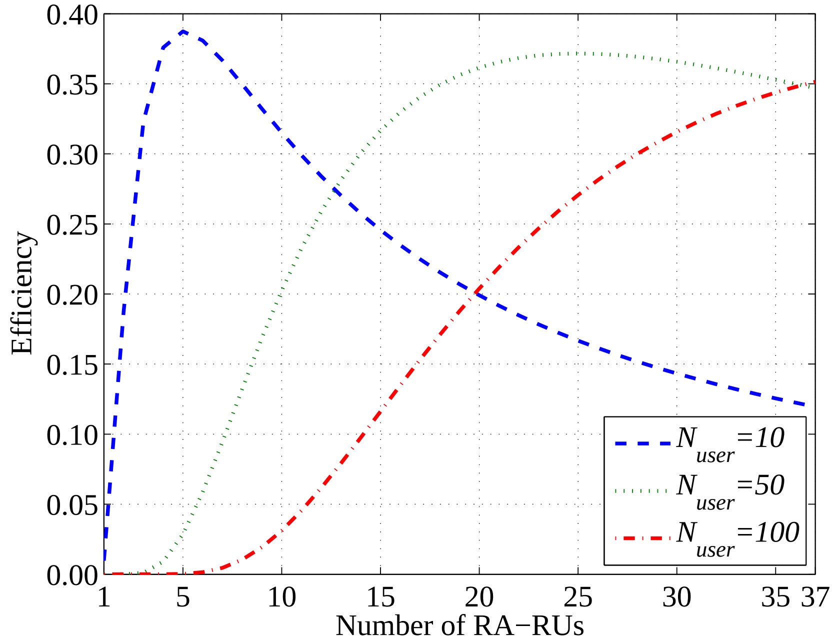

図 4.11: N_{RA} に対する通信効率 ($\tau_{TI} = 0.5$) : 解析値

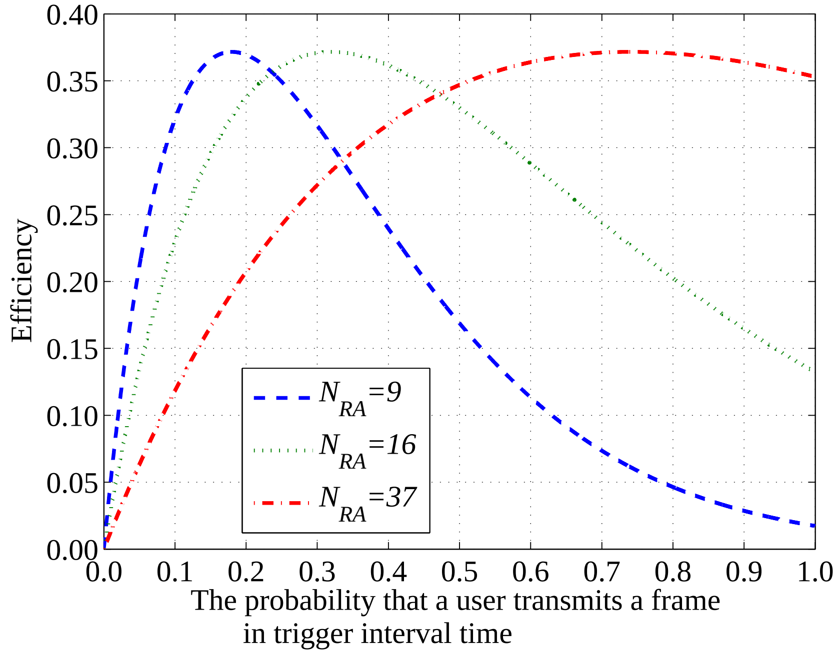

図 4.12: τ_{TI} に対する通信効率 ($N_{user} = 50$) : 解析値

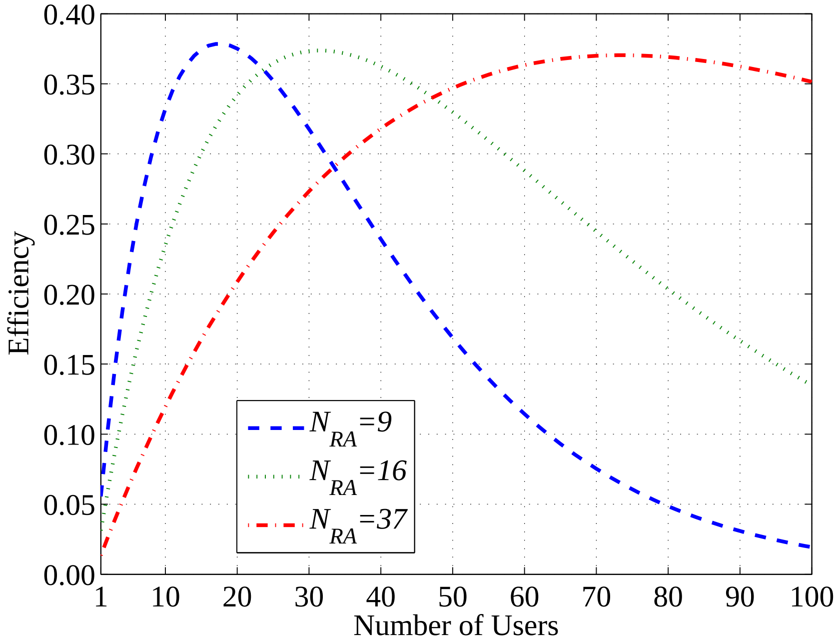

図 4.13: N_{user} に対する通信効率 (τ_{TI} = 0.5) : 解析値

4.3 MAC パラメータの設計指針

4.2 節で効率的な OFDMA ランダムアクセスの運用を実現するためには，τ_{TI} を適切に設計する必要があることを述べた．τ_{TI} は MAC パラメータの m，W，N_{RA} によって調整が可能であり，本節では各 MAC パラメータが通信効率に与える影響について解析と計算機シミュレーションにより考察を行う．このとき，各種パラメータは表 3.1 を使用し，帯域幅 80 MHz の最大 RU 数 37 に加え，帯域幅 20 MHz の最大 RU 数 9 についても $N_{RU} = N_{RA}$ とし考察を行う．なお，MAC パラメータである N_{RA} は m，W，と比較し，表 2.2 に示すように限りがあり自由に設計できないことから，N_{RA} が通信効率へ与える影響については A.1 へ記載する．

式 (3.7) において $m = 5$ と固定し W を変化させ通信効率の解析値を算出し，計算機シミュレーション結果と共に図 4.14，図 4.15 に示す．このとき，OCW 幅は m に従い $W_m - 1 = 2^m(OCW_{min} + 1) - 1$ まで増加するものとする．図 4.14，図 4.15 より，N_{user} 毎に適切な OCW_{min}，すなわち通信効率が最大となる値が確認できる．つまり，通信効率の高い OFDMA ランダムアクセスの運用を行うためには，N_{user} に従った，適切な OCW_{min} を設計する必要がある．

また，式 (3.7) において $W = 16$ とし，m を変化させ算出した通信効率の解析値を計算機シミュレーション結果と共に図 4.16，図 4.17 に示す．OCW 幅は図 4.14，図 4.15 の場合と同様に m に従い，OCW_{max} による上限なしに増加するものとする．図 4.16，図 4.17 において，N_{user} に関係なく，$m = 6$ 以降は通信効率が飽和している．これは，N_{user} に従って m を 6 以下に設計する必要性を示している．上述の OFDMA ランダムアクセスにおける W と m の傾向は，DCF における傾向と同様であり [16]，W と m の設計手法について DCF や EDCA の性能解析に関する既存検討の成果を反映できる可能性が高い．

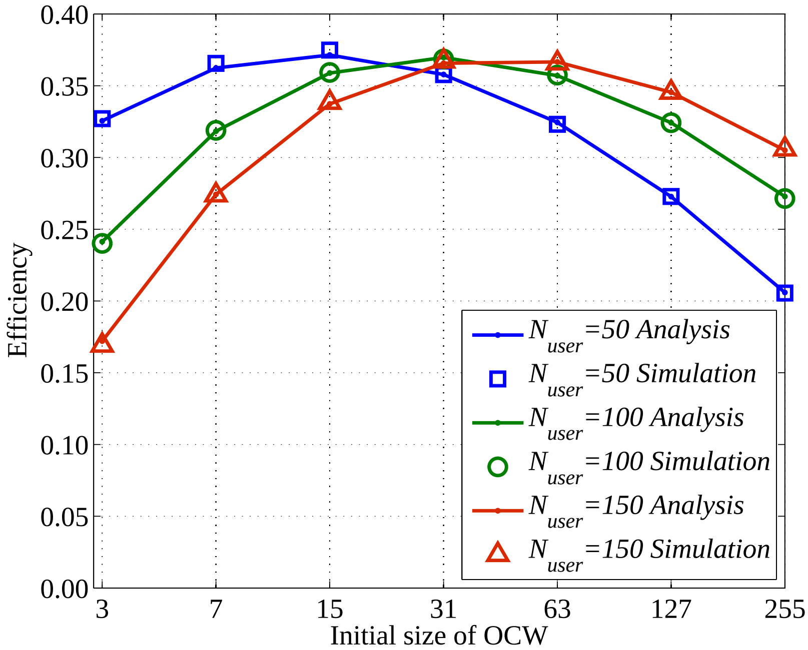

図 4.14: 最小 OCW 幅に対する通信効率 (N_{RA} = 9, m = 5) : 解析値 (線)，シミュレーション結果 (マーカー)

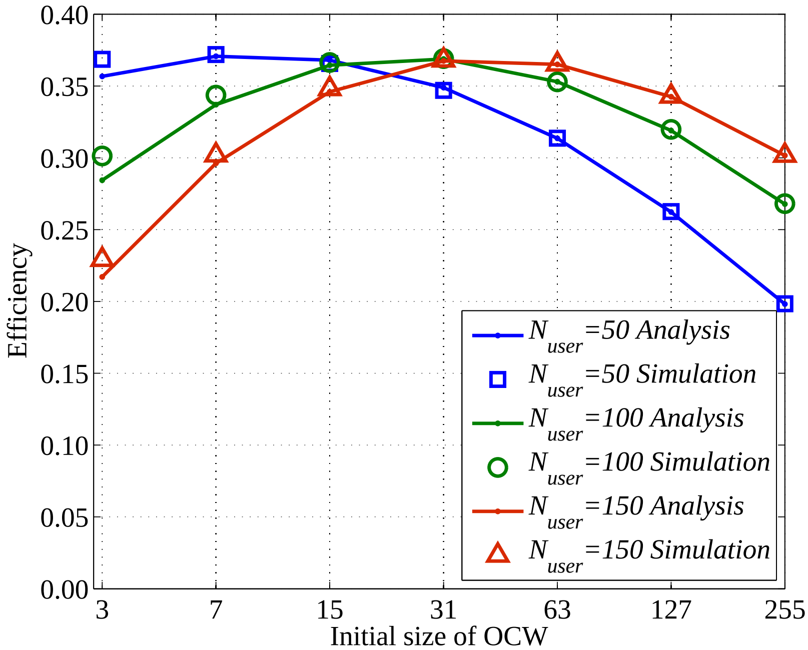

図 4.15: 最小 OCW 幅に対する通信効率 (N_{RA} = 37, m = 5) : 解析値 (線)，シミュレーション結果 (マーカー)

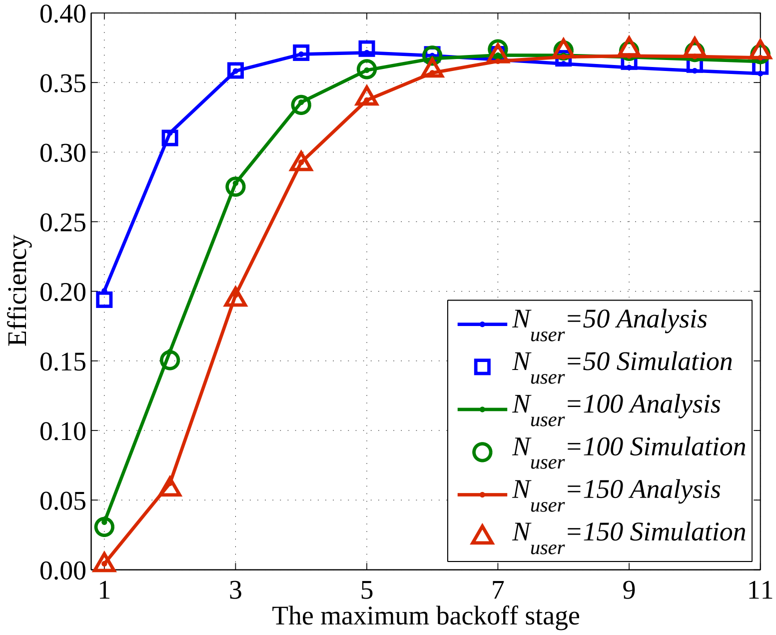

図 4.16: 最大バックオフステージ数 m と通信効率 ($N_{RA} = 9$, $W = 16$) : 解析値 (線), シミュレーション結果 (マーカー)

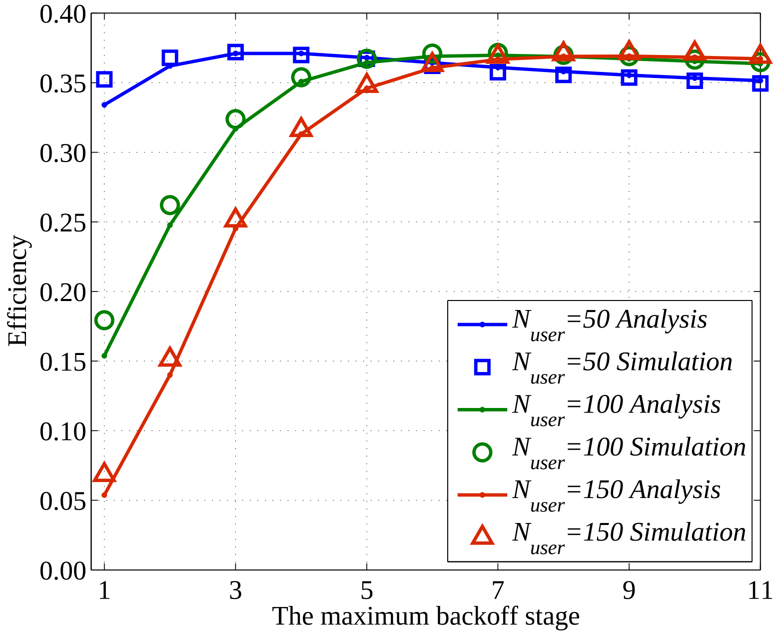

図 4.17: 最大バックオフステージ数 m と通信効率 ($N_{RA} = 37$, $W = 16$) : 解析値 (線), シミュレーション結果 (マーカー)

4.4 まとめ

本章では，OFDMA ランダムアクセスの性能を最大化するための，環境に応じた MAC パラメータ設計手法の検討にあたり，第 3 章で導出した理論式を用いて OFDMA ランダムアクセスの通信効率について性能解析を行い，MAC パラメータの設計指針を示した．まず，τ_{TI}，N_{user}，N_{RA} は互いに関係し合い通信効率へ影響を与えるが，N_{user} を制御することは難しく，N_{RA} は数に限りがあるため，τ_{TI} を調整することで通信効率を最大化することが望ましいことを示した．さらに，τ_{TI} は MAC パラメータにより調整が可能であり，MAC パラメータ W，m の設計指針として，N_{user} に従い OCW_{min} を適切に設計する必要があること，N_{user} に従って m を 6 以下に設計する必要があることを示した．

第5章　MACパラメータの設計手法

5.1　はじめに

OFDMA ランダムアクセスの通信効率を最大化するためには，MAC パラメータの最適化と最適化した MAC パラメータを反映する仕組みが必要である. 各ユーザは AP より通知される MAC パラメータを設定する．通知方法として，AP は N_{RA} を TF-R，W と m を Beacon フレームへ含めてユーザへ送信し，各ユーザは受信したフレームから MAC パラメータを取得する．したがって，AP が環境に応じた，すなわちユーザ数に応じた適切な MAC パラメータを設計し各ユーザへ通知することができれば，OFDMA ランダムアクセスの運用において高い通信効率を実現できる．

稠密環境下では，新規に BSS への参加を望むユーザが AP との承認手続に時間が掛かる可能性があり，11ax では承認手続きを円滑に進めるため，Basic Service Set へ属しているユーザだけでなく未承認ユーザの OFDMA ランダムアクセスへの参加が検討されている [14, 15]．AP は自身の BSS へ既に所属しているユーザ数は把握しているが，未承認ユーザが OFDMA ランダムアクセスへ参加する場合，AP は OFDMA ランダムアクセスへ参加する正確なユーザ数を把握することができない．したがって，MAC パラメータの最適化にあたり，OFDMA ランダムアクセスへ参加するユーザ数を推定する必要がある．

本章では，OFDMA ランダムアクセスの性能を最大化するための，環境に応じた MAC パラメータ設計手法を提案する. まず，OFDMA ランダムアクセスの最大通信効率を達成するための各 MAC パラメータの最適化条件を導出する. 次に，ユーザ数の推定手法と MAC パラメータの最適化条件を用いた MAC パラメータの設計手法を提案する. さらに，11ax における有限 SP 期間内での OFDMA ランダムアクセス運用を考慮した提案手法の拡張を行い，計算機シミュレーションにより有効性を示す.

5.2　MACパラメータの最適化条件

AP が各 MAC パラメータ N_{RA}，W，m を設計するために，通信効率を最大化する各 MAC パラメータの条件を求める．まず，最大通信効率を達成する τ_{TI}，すな

わち，最大通信効率達成時のあるユーザが T_{TI} 内に UL-MU フレームを送信する確率 $\tau_{TI_{opt}}$ を導出し，$\tau_{TI_{opt}}$ を用いて MAC パラメータ N_{RA}，W，m の最適化条件を求める．

5.2.1 通信効率の最適化条件

通信効率が最大となる τ_{TIopt} を求める．$P_s P_{tr}$ は $0 \leq \tau_{RU} \leq 1$ において上に凸な関数であり，1 つの最大値を持つことから，式 (5.1) によって，通信効率を最大化する 1 RA-RU あたりの送信確率 τ_{RUopt} を求めることができる．

$$\frac{dP_s P_{tr}}{d\tau_{RU}} = 0 \tag{5.1}$$

したがって，通信効率が最大となる τ_{RUopt} は式 (5.2) となる．

$$\tau_{RU_{opt}} = \frac{1}{N_{user}} \tag{5.2}$$

これより，通信効率が最大となるときの，あるユーザが T_{TI} 内に UL-MU フレームを送信する確率 $\tau_{TI_{opt}}$ は式 (3.3) へ式 (5.2) を代入して，

$$\tau_{T_{TIopt}} = \frac{N_{RA}}{N_{user}} \tag{5.3}$$

と導かれる．よって，第 4 章において通信効率と τ_{TI} の関係を示した図 4.7 の解析に使用したパラメータである $N_{RA} = 37$，$N_{user} = 10, 50, 150$ を式 (5.3) に代入すると図 4.7 における各 N_{user} の $\tau_{TI_{opt}}$ が算出できる．環境に応じて MAC パラメータを適切に設計し τ_{TI} を $\tau_{T_{TIopt}}$ に近づけることで OFDMA ランダムアクセスの通信効率を最大化可能である．

5.2.2 RA-RU 数の最適化条件

OFDMA ランダムアクセスでは AP が送信する TF-R を受信する毎に，OBO を N_{RA} 分減少させるため，N_{RA} によってユーザ当たりの送信権獲得頻度が変化する．さらに，ユーザ数が少ない場合に使用する N_{RA} が多すぎると周波数利用効率が低下するなど，通信効率を最大化するために最適な $N_{RA_{opt}}$ を求める必要がある．

τ_{TI} と τ_{RU} の関係から，式 (3.3) へ式 (5.2) を代入して，

$$N_{RA_{opt}} = \tau_{TI} N_{user} \tag{5.4}$$

と導かれる．式 (5.4) より，$N_{RA_{opt}}$ は τ_{TI} と N_{user} から容易に求めることができる．

第 4 章において通信効率と N_{RA} の関係を示した図 4.11 を用いて考察する．図 4.11 の解析に使用した τ_{TI} は 0.5 であり，$N_{RA_{opt}} = N_{user}/2$ となる．図 4.11 において，例えば N_{user} が 50 の場合の $N_{RA_{opt}}$ は 25 となり，最大通信効率を達成する．一方で，$N_{RA_{opt}} > N_{RA}$ の場合，パケット衝突が発生する確率が高くなり通信効率は低下し，$N_{RA_{opt}} < N_{RA}$ の場合，未使用の RA-RU が常に存在し，通信効率は低下していく．したがって，AP は $N_{RA_{opt}}$ に近い N_{RA} を設計すべきであるが，表 2.2 に示すように N_{RA} には上限があり，設計可能な N_{RA} に対して，τ_{TI} を調整する必要がある．

5.2.3 OCW の初期値と最大バックオフステージ数の最適化条件

AP が設計可能な N_{RA} が $N_{RA_{opt}}$ と異なる場合，τ_{TI} を調整することで通信効率を最大化する必要がある．τ_{TI} を調整する MAC パラメータとして W と m の最適化条件を求める．まず，通信効率が最大となる RA-RU あたりのフレーム衝突確率 $p_{RU_{opt}}$ は，$\tau_{RU_{opt}}$ を用いて次式で与えられる．

$$p_{RU_{opt}} = 1 - (1 - \tau_{RU_{opt}})^{N_{user}-1} \tag{5.5}$$

式 (3.3) へ式 (5.2)，(5.5) を代入し，W は式 (5.6) で与えられる．

$$W = \frac{\frac{2}{\tau_{RU_{opt}}} - N_{RA}}{1 + p_{RUopt} \sum_{i=0}^{m-1} (2p_{RUopt})^i} \tag{5.6}$$

m は W と OCW_{max} の関係から，式 (5.7) で与えられる．

$$m = \log_2 \left(\frac{CW_{max}}{W} \right) \tag{5.7}$$

式 (5.6) と式 (5.7) の非線形連立方程式を解くことにより通信効率を最大化する OCW の初期値 W_{opt} と最大バックオフステージ m_{opt} を求めることができる．

5.3 MAC パラメータ設計手法の提案

5.3.1 MAC パラメータ設計手法

各ユーザが設定する MAC パラメータは，N_{RA} は TF-R，W や m は Beacon フレームを介して AP が通知する．前節で示した最適化条件を用いて環境に応じた適切な

MAC パラメータを AP が設計し，各ユーザへ通知することができれば，OFDMA ランダムアクセスを効率的に運用可能となる．各 MAC パラメータを最適化するためには，まず，$\tau_{T_{TIopt}}$ を求める必要がある．$\tau_{T_{TIopt}}$ は式 (5.3) で示すように，N_{RA} と N_{user} によって与えられる．N_{RA} は AP によって設計可能であるが，N_{user} については AP が把握することは難しい．理由として，未承認ユーザも OFDMA ランダムアクセスへ参加する可能性があるためである．稠密環境下では，新規に BSS への参加を望むユーザが AP との承認手続に時間が掛かる可能性があり，11ax では承認手続きを円滑に進めるため，BSS へ属しているユーザだけでなく，未承認ユーザの OFDMA ランダムアクセスへの参加が検討されている [14, 15]．しかし，AP は自身の BSS に既に所属しているユーザ数は把握できるものの，未承認ユーザが OFDMA ランダムアクセスへ参加する場合，AP は OFDMA ランダムアクセスへ参加する正確なユーザ数を把握することができない．

そこで，OFDMA ランダムアクセスへ参加しているユーザ数は，BSS へ所属している各ユーザがユーザ自身のフレーム衝突確率 p_{est} を測定することでユーザ数を推定できる．フレーム送信時に設定した OCW の初期値 W_{def}，最大バックオフステージ数 m_{def} と測定したフレーム衝突確率 p_{est} を式 (3.1) へ代入し，推定したトリガ間隔 TI 当たりの送信確率 $\tau_{TI_{est}}$ は，

$$\tau_{TI_{est}} = \frac{2}{1+\frac{W_{def}}{N_{RA}}+p_{est}\frac{W_{def}}{N_{RA}}\sum_{i=0}^{m_{def}-1}(2p_{est})^i} \tag{5.8}$$

と導かれる．式 (5.5) へ式 (5.8) を代入した式 (5.9) より，OFDMA ランダムアクセスへ参加しているユーザ数 $N_{user_{est}}$ を推定することができる．

$$N_{user_{est}} = 1 + \log_{(1-\frac{\tau_{TI_{est}}}{N_{RU}})}(1 - p_{est}) \tag{5.9}$$

ユーザが推定した $N_{user_{est}}$ を AP へ通知することにより，AP は各ユーザから通知された $N_{user_{est}}$ をもとに，最適な MAC パラメータを算出できる．

図 5.1 に MAC パラメータの設計手順を示す．各ユーザは式 (5.9) を用いて $N_{user_{est}}$ を推定し，AP への送信フレームを介して，例えば BSR の一部として通知する．AP は各ユーザから取得した $N_{user_{est}}$ を用いて最適な MAC パラメータを算出し，TF-R や Beacon フレームを介してユーザへ MAC パラメータを通知する．また，AP による MAC パラメータの更新に時間を有する場合には，ユーザ自身で W や m を適応的に調整可能である．

本節で説明した W と m の最適化により通信効率を最大化する手法を提案手法 1 とし，その有用性を計算機シミュレーションにより確認する．計算機シミュレーション環境は表 3.1 と同一とし，稠密環境において送信帯域幅として広帯域の確

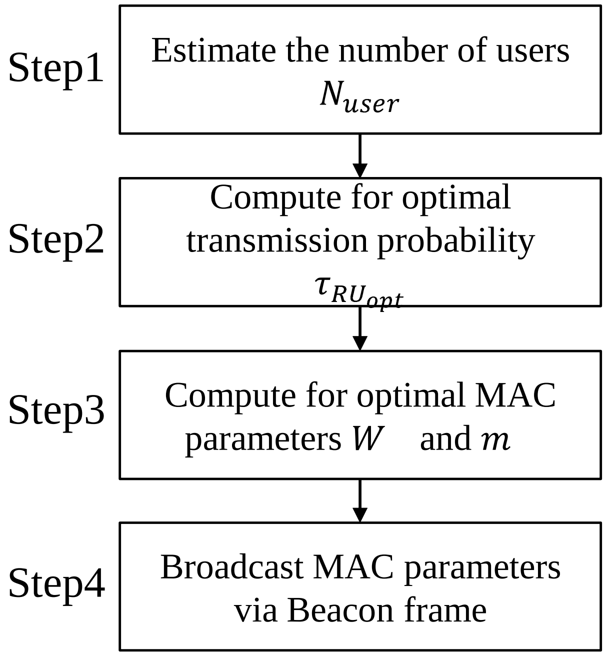

図 5.1: MAC パラメータの設計手順

保が難しいことを考慮し，帯域幅 20 MHz の最大 RU 数 9 を N_{RU} とし，$N_{RU} = N_{RA}$ として計算機シミュレーションを行う．なお，評価は N_{user} が N_{RA} 以上を対象としている．計算機シミュレーションを行うにあたり，m_{opt} と W_{opt} はいずれも整数値ではないため計算機シミュレーションで使用する最大バックオフステージ数 m_{sim} は m_{opt} に最も近い整数を使用し，OCW の初期値 W_{sim} は以下の式 (5.10) において，$N_{step} = N_{RA}$ として求めた N_{RA} の倍数値を使用する．

$$W_{sim} = N_{step} \left\lfloor \frac{W_{opt}}{N_{step}} + 0.5 \right\rfloor \tag{5.10}$$

シミュレーション結果を図 5.2 に示す．図 5.2 中の線は提案手法を適用した場合の通信効率，各種破線は W を固定した場合の通信効率を示している．図 5.2 より，提案手法を適用し N_{user} に応じた適切な W と m を設計することで，N_{user} に関わらず，常に最大値に近い通信効率を維持している．

5.3.2 有限 SP 長を考慮した MAC パラメータ設計手法

5.3.1 節では，第 3 章で提案した OFDMA ランダムアクセスの性能解析モデルから導出した理論式を用いて N_{user} に応じて適切な MAC パラメータを設計し，τ_{TI} を調節する手法を提案手法 1 とし，通信効率の最大化が可能であることを示した．し

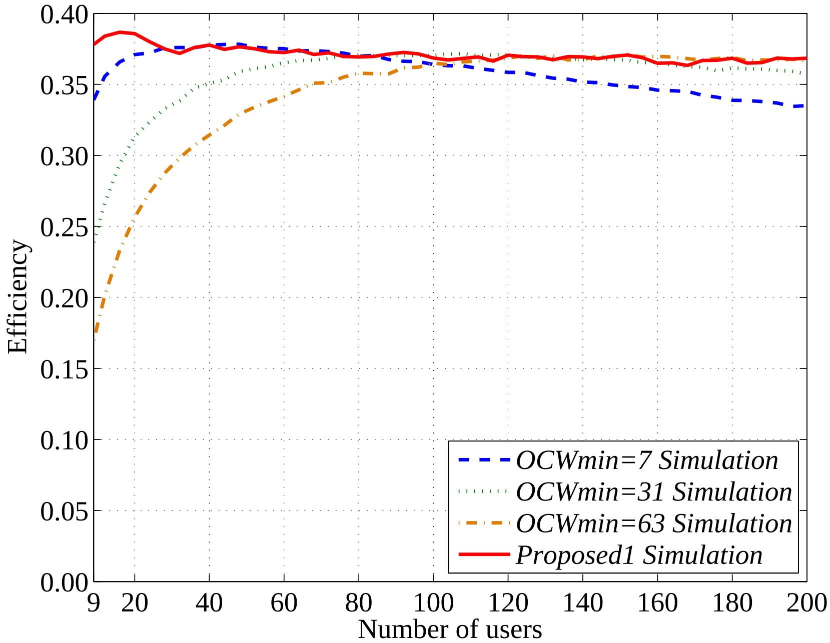

図 5.2: ユーザ数に対する通信効率 ($N_{step} = N_{RA}, N_{RA} = 9$)：シミュレーション結果

かしながら，提案モデルは OFDMA ランダムアクセスによる通信が常に行われることを想定しており，11ax の SP 期間による OFDMA ランダムアクセス運用期間の制限が考慮されていない．したがって，5.3.1 節の MAC パラメータ最適化について 11ax で実装可能な手法へ拡張する必要がある．

第 2 章 2.3 節で説明したように，11ax において UL-MU 送信は図 2.2 に示す SP 期間内での運用が検討されている．そのため，UL-MU 送信で使用される OFDMA ランダムアクセスも SP 期間内で運用されることになる．2017 年 4 月時点では SP 期間の長さは決定していないが，Beacon フレーム送信間隔内に SP が複数存在することから，本論文では SP 期間として，一般的な Beacon フレーム送信間隔 100 ミリ秒以内を想定する．

SP 期間の長さによっては，式 (5.7) で与えられる最大バックオフステージ数回の再送を行えないため，式 (5.7) を再定義する必要がある．SP 期間が短い場合を考慮し，有限 SP 長を考慮した最大バックオフステージ数 m_{SP} として，ここでは固定値 1 を利用する．

$$m_{SP} = 1 \tag{5.11}$$

式 (5.11) より，m_{SP} は固定値となるため，OCW_{max} に関係なく有限 SP 長を考慮した OCW の初期値 W_{SP} を求めることができる．式 (5.11) を式 (5.6) へ代入することで，W_{SP} は式 (5.12) で与えられる．

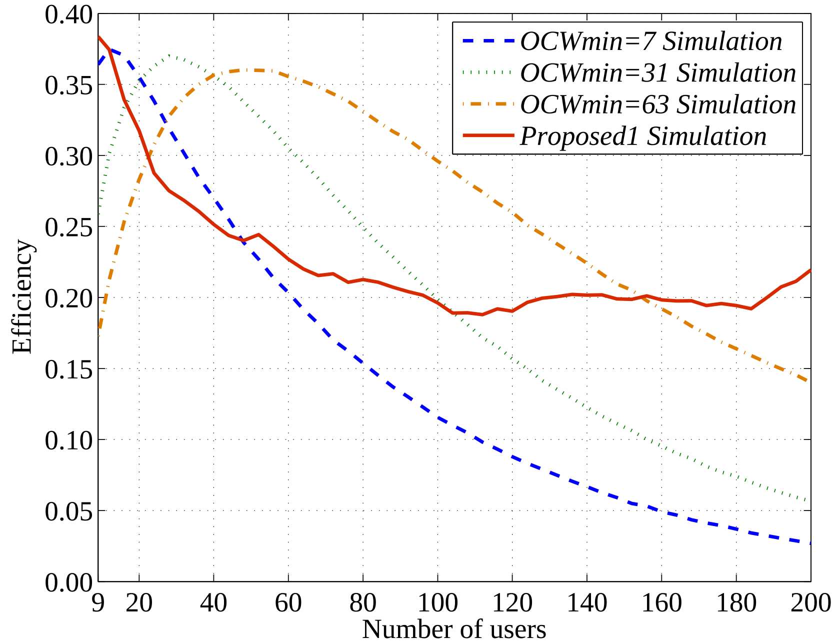

図 5.3: ユーザ数に対する通信効率 (SP 期間 10 ミリ秒)：シミュレーション結果

$$W_{SP} = \frac{\frac{2}{\tau_{RUopt}} - N_{RU}}{1 + p_{RUopt}} \tag{5.12}$$

m_{SP} を固定値とし，N_{user} に応じて W_{SP} を変更する手法を提案手法 2 として，5.3.1 節と同じ環境下で計算機シミュレーションによる評価を行う．なお，SP 期間は 10，50，100 ミリ秒とし，有限 SP 長を考慮した計算機シミュレーションを行う．

まず，SP 期間 10 ミリ秒を想定した環境において，5.3.1 節で提案した有限 SP 長を考慮していない提案手法 1 を適用した場合について考察する．図 5.3 に提案手法 1 の計算機シミュレーション結果を示す．図 5.3 中の線は提案手法 1 を適用した通信効率，各種破線は W を固定した場合の通信効率を示している．図 5.3 より，11ax のように OFDMA ランダムアクセスの運用期間が限られている場合，提案手法 1 では通信効率の大きな改善は期待できず，提案手法 1 の拡張の必要性を示している．

次に，11ax での運用を考慮し拡張した提案手法 2 を適用した場合について考察する．図 5.4，図 5.5，図 5.6 に，SP 期間 10，50，100 ミリ秒とした場合における提案手法 2 の計算機シミュレーション結果を示す．各図中の線は提案手法 2 を適用した通信効率，各種破線は W を固定した場合の通信効率を示している．図 5.4 より，SP 期間 10 ミリ秒において提案手法 2 を適用した場合に通信効率は常に最大値に近い値を維持している．しかし，SP 期間が長くなるに従って，特にユーザ数

が少ない場合に最大通信効率まで通信効率は改善されていない．これは提案手法2が m_{SP} として最小値である1を利用しているためである．

SP期間100ミリ秒において，$m_{SP}=3$ として提案手法2を適用した結果を図5.7に示す．図5.7より，$m_{SP}=1$ とした図5.6と比較して通信効率は最大値に近い値を示していることが確認できる．このように，SP期間長に従って m_{SP} を設計することで，環境に応じた適切なMACパラメータを設計可能である．

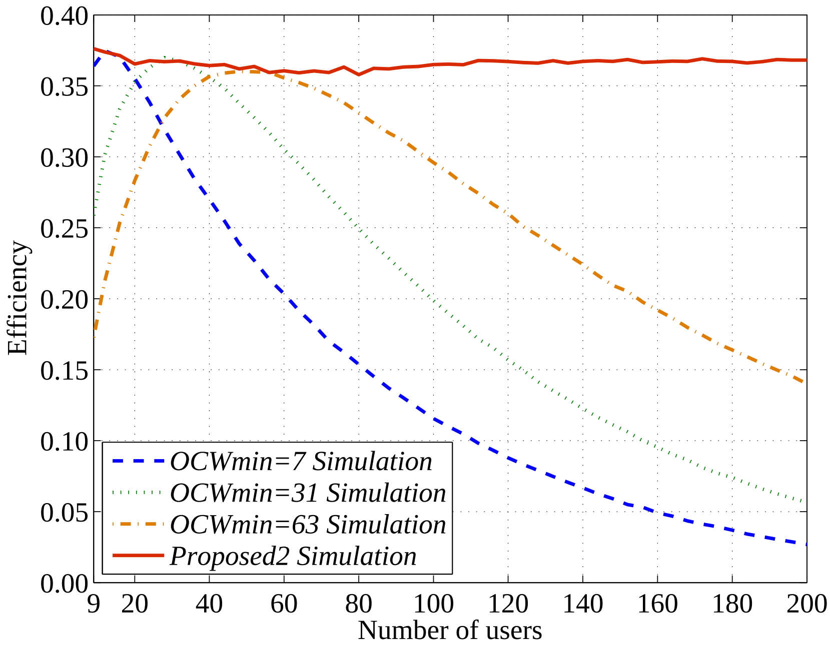

図5.4: ユーザ数に対する通信効率 (SP期間10ミリ秒, $m_{SP}=1$)：シミュレーション結果

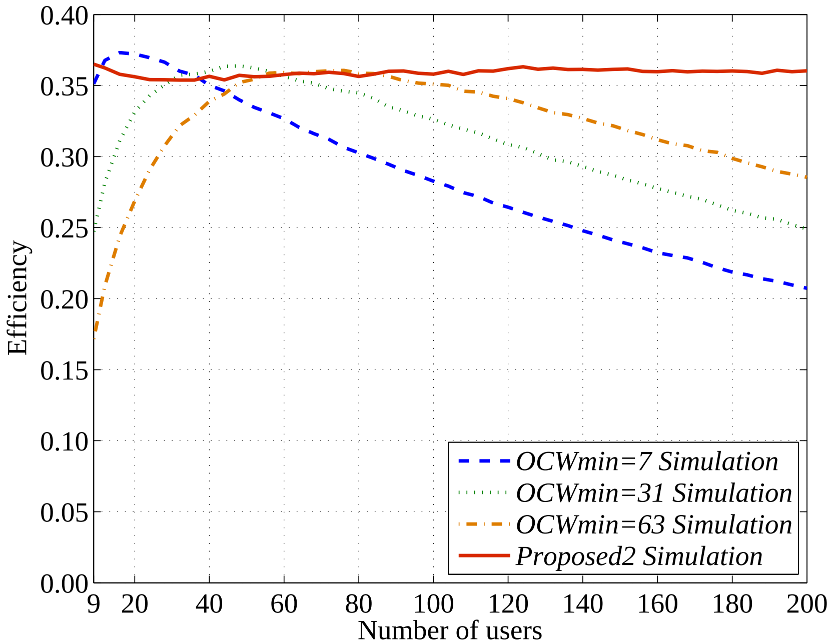

図 5.5: ユーザ数に対する通信効率 (SP 期間 50 ミリ秒, $m_{SP} = 1$) : シミュレーション結果

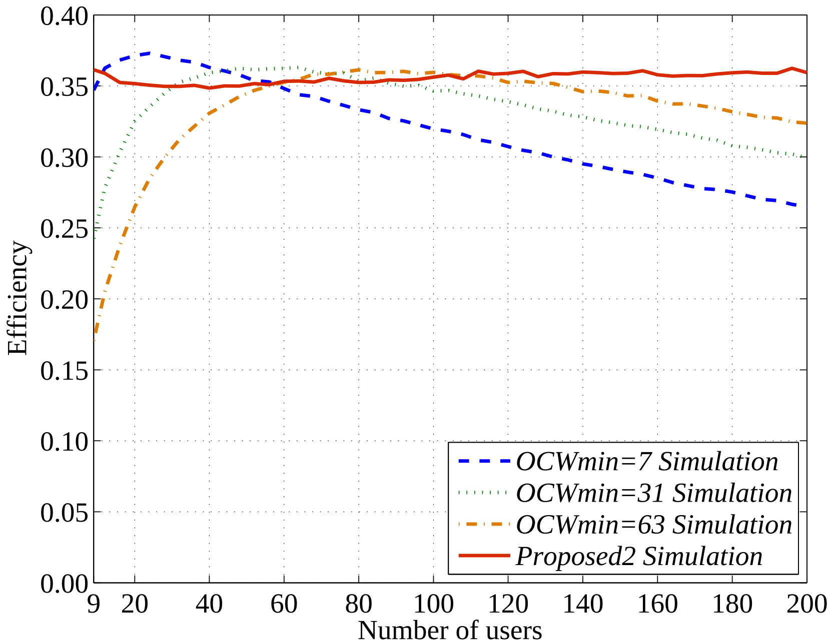

図 5.6: ユーザ数に対する通信効率 (SP 期間 100 ミリ秒, $m_{SP} = 1$) : シミュレーション結果

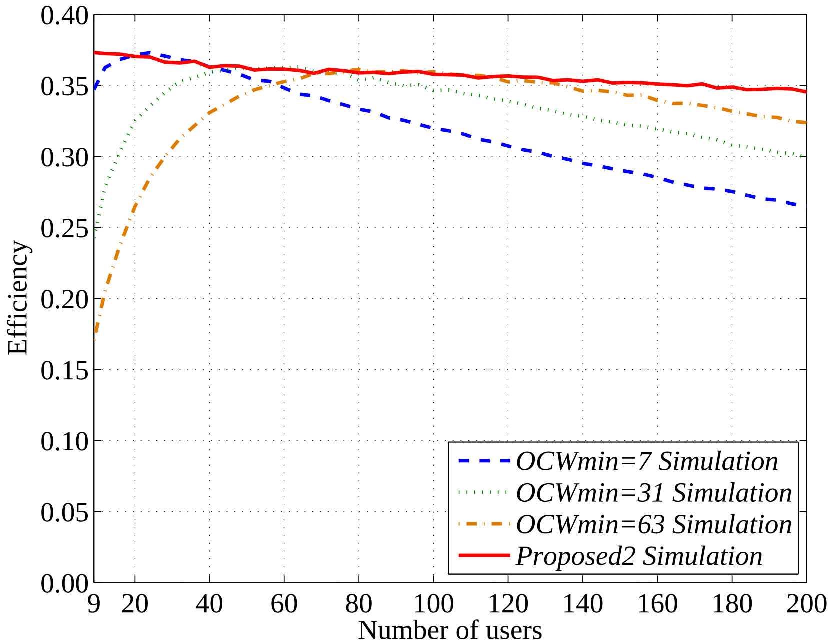

図 5.7: ユーザ数に対する通信効率 (SP 期間 100 ミリ秒, $m_{SP} = 3$)：シミュレーション結果

5.4 まとめ

本章では，OFDMA ランダムアクセスの性能を最大化するための，環境に応じた MAC パラメータ設計手法を提案した．まず，OFDMA ランダムアクセスの最大通信効率を達成するための各 MAC パラメータの最適化条件を導出し，ユーザ数により各 MAC パラメータが最適化可能であることを示した．次に，未承認ユーザを含め OFDMA ランダムアクセスへ参加しているユーザ数の推定手法と MAC パラメータの最適化条件を用いた MAC パラメータの設計手法を提案した．さらに，11ax における有限 SP 期間内での OFDMA ランダムアクセス運用を考慮した MAC パラメータの設計手法についても提案し，計算機シミュレーションによりその有用性を示した．提案手法を用いて 2 つの MAC パラメータ W，m を適切に設計することで，11ax における OFDMA ランダムアクセスを，ユーザ数に関わらず最大通信効率に近い性能を維持し運用可能であることを示した．

第6章　結論

本論文は，無線LANの国際標準であるIEEE 802.11において策定中である11axにおけるOFDMAランダムアクセスの性能を最大化するMACパラメータ設計手法についてまとめたものである．本論文で得られた成果を以下にまとめる．

第2章では，11axの概要とOFDMAランダムアクセス技術について説明し，OFDMAランダムアクセスの性能を最大化するためには，OFDMAランダムアクセスの運用に使用する制御情報，すなわち，MACパラメータの最適化と最適化したMACパラメータを反映する仕組みが必要となることを示した．

第3章では，2次元マルコフ連鎖を用いてOFDMAランダムアクセスの性能解析モデルを提案した．提案モデルは，DCF性能解析の基本的なモデルであるBianchiモデルの拡張とみなせ，既存研究の成果を容易に流用することが可能となった．さらに，提案モデルから性能評価指標である通信効率の理論式を導出し，定式化することでOFDMAランダムアクセスの性能を容易に解析可能となった．また，計算機シミュレーションと解析結果の比較により，OCW_{min}が小さくユーザ数が少ない場合には提案モデルが含む近似が解析精度に影響を与えるが，ユーザ数の多い稠密環境における性能解析モデルとしては，提案モデルは十分な精度で解析可能であることを示した．

第4章では，MACパラメータ設計手法の検討にあたり，第3章で導出した理論式を用いてOFDMAランダムアクセスの通信効率について性能解析を行い，MACパラメータの設計指針を示した．まず，通信効率を最大化するためにはτ_{TI}を調整する必要があることを示した．さらに，τ_{TI}はMACパラメータにより調整が可能であり，MACパラメータW，mの設計指針として，N_{user}に従いOCW_{min}を適切に設計する必要があること，N_{user}に従ってmを6以下で設計する必要があることを示した．

第5章では，11axにおける有限SP期間内でのOFDMAランダムアクセス運用を考慮したMACパラメータの設計手法を提案した．OFDMAランダムアクセスの最大通信効率を達成するための各MACパラメータの最適化条件を導出し，各MACパラメータはユーザ数によって最適化可能であることを示した．さらにユーザ数の推定手法とともに，MACパラメータの設計手法を提案した．また，11axにおけるOFDMAランダムアクセスの有限SP期間内での運用を考慮し，MACパラメータの設計手法を拡張した．計算機シミュレーションを通して，提案手法を用いて2つのMACパラメータW，mを適切に設計することで，11axにおけるOFDMAラ

ンダムアクセスを，ユーザ数に関わらず最大通信効率に近い性能を維持し運用可能であることを示した．

以上のように本論文では，OFDMA ランダムアクセスの性能を最大化する MAC パラメータ設計手法を提案し，その有効性を示した．

今後の課題としては，提案モデルの解析精度の向上と非飽和状態への拡張が挙げられる．本論文では飽和状態を仮定して性能解析を行ったが，実環境における非飽和状態では，送信フレームを保有するユーザ数は時間軸でばらつきが生じるが，平均すると常に一定数のユーザは送信フレームを保有していることから，部分的に飽和状態として考えることができ，本論文で得られた MAC パラメータを適用可能である (A.2 参照)．しかしながら，トラヒック量の変化や送信フレームを保有するユーザ数のばらつきが性能へ与える影響などを解析するためには，提案モデルに含まれる近似をなくし，さらに提案モデルを非飽和状態へ拡張する必要がある．これらの拡張とその性能解析については今後の課題とする．

付録A　Appendix

A.1　MAC パラメータ N_{RA} が通信効率へ与える影響

N_{RA} が通信効率に与える影響について解析を行う．式 (3.7) において $W = 16$ とし，N_{RA} を変化させ通信効率の解析値を算出し，計算機シミュレーション結果と共に図 A.1 に示す．図 A.1 より，N_{user} と N_{RA} に関係なく通信効率はほぼ一定である．また，比較の為に，OBO 値を 1 ずつ減少させた場合の計算機シミュレーション結果を図 A.2 に示す．図 A.2 では，N_{RA} における通信効率は N_{user} により異なり，さらに N_{RA} の増加と共に通信効率が低下している．原因は，OBO 値を 1 ずつ減少させた場合に $\tau_{T_{TI}}$ が N_{RA} に関係なく一定になるためである．式 (5.3) より，N_{RA} の増加に従い通信効率が最大となる $\tau_{T_{TIopt}}$ も大きくなる．しかしながら，式 (3.1) で与えられる τ_{TI} は，OBO 値を 1 ずつ減少させた場合に N_{RA} に関係なく τ_{TI} が算出される．これにより，図 A.2 に示すように N_{RA} が大きくなると通信効率が低下する．これに対して，N_{RA} ずつ OBO 値を減少させた場合に，τ_{TI} は N_{RA} に従って大きくなるため，通信効率は N_{RA} に関係なくおおよそ一定に保たれている．

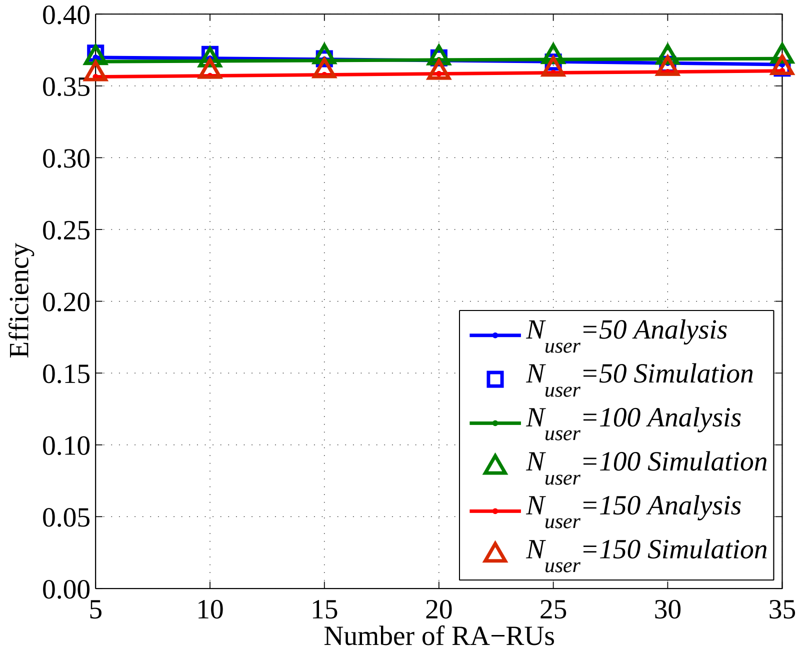

図 A.1: RA-RU 数と通信効率 (OBO 減少値 N_{RA}) : 解析値 (線)，シミュレーション結果 (マーカー)

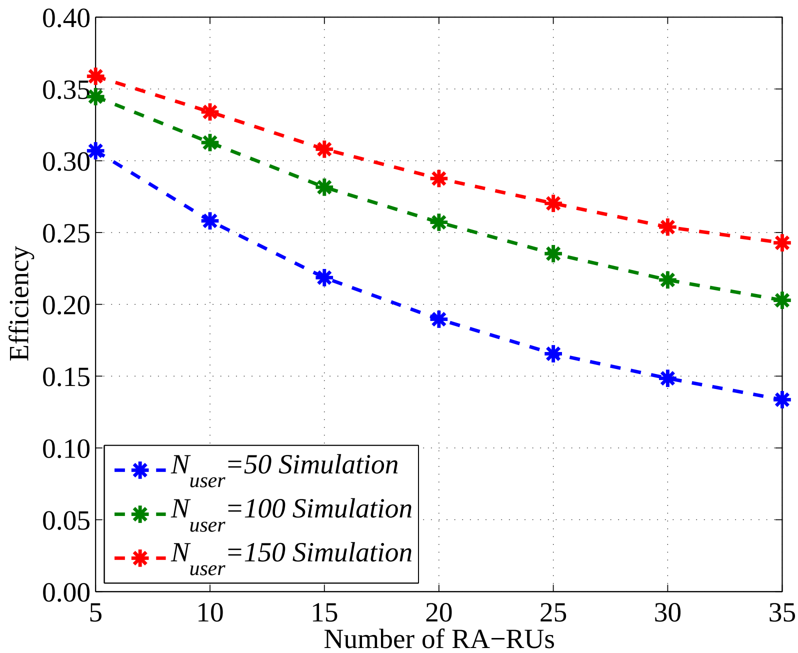

図 A.2: RA-RU 数と通信効率 (OBO 減少値 1) : シミュレーション結果

A.2　非飽和状態における提案モデルの応用

非飽和状態においても，飽和状態における OFDMA ランダムアクセスの性能解析モデルである提案モデルを利用可能である．非飽和状態において，TF-R 受信タイミングで送信フレームを保有するユーザ数は時間軸でばらつきが生じるが，平均すると常に一定数のユーザは送信フレームを保有しており，部分的に飽和状態にあるとみなせる．特に稠密環境下ではこのような状況が起こりやすく，非飽和状態においても部分的に飽和状態にあるユーザ数，すなわち TF-R 受信タイミングで送信フレームを保有するユーザ数の平均値における MAC パラメータの最適値を適用することが可能となる．

非飽和状態における部分的な飽和状態について考察を行う．TF-R 送信回数を 2000 回とし，トラヒックモデルが [31] で定義されている Buffered Video Steaming Traffic Model でかつ，各ユーザのトラヒック量は同じであると仮定すると，非飽和状態にあるユーザ数が 100 台存在する環境における，部分的に飽和状態にあるユーザ数の平均値は図 A.3 となる．

図 A.3 に示すように，ユーザあたりのトラヒック量が 2 Mbit/s の場合に，部分的に飽和状態にあるユーザは平均約 13 台存在し，飽和状態の平均約 13 台のユーザからなる無線 LAN ネットワークとみなせる．実際には，部分的に飽和状態にあるユーザ数は図 A.4 に示す頻度で時間的に変化する．図 A.4 における標準偏差は約 3.35 であるため，部分的に飽和状態にあるユーザ数の内 95 %以上は 6 台から 20 台となる．そこで，第 4 章の図 4.14 と同一の環境でユーザ数を 6, 13, 20 とし解析と計算機シミュレーションを行った結果を図 A.5 に示す．

このように，非飽和状態においても，部分的な飽和状態を考慮することで，図 A.5 に示すように提案モデルを用いた非飽和状態における性能解析が可能であり，本論文における成果を利用できる．

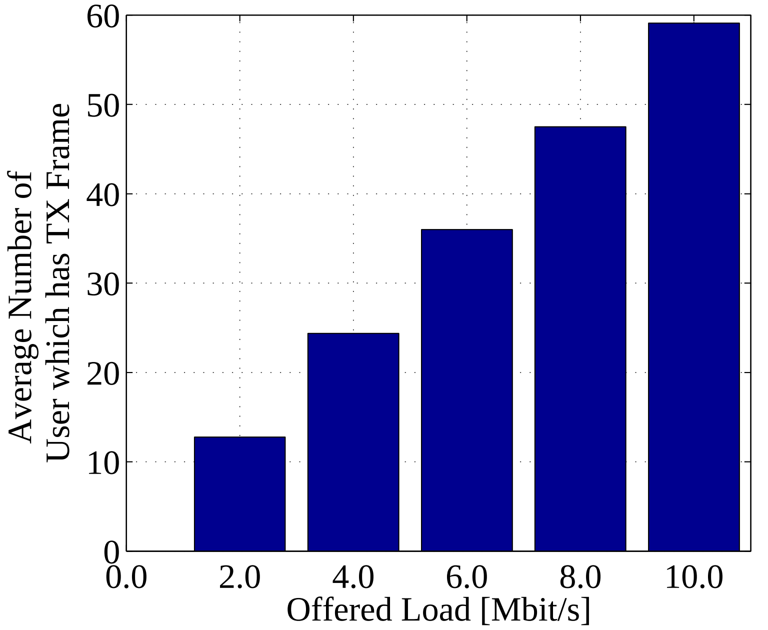

図 A.3: トラヒック量と部分的に飽和状態にあるユーザ数
（非飽和状態にあるユーザ数 100 台，ユーザあたりのトラヒック量 2,4,6,8,10 Mbit/s）

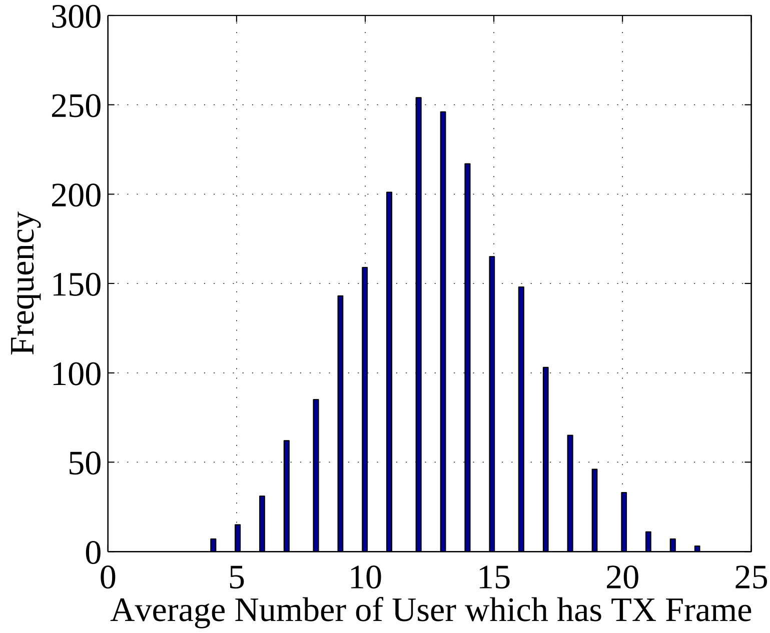

図 A.4: 部分的に飽和状態にあるユーザ数と頻度
（非飽和状態にあるユーザ数 100 台，ユーザあたりのトラヒック量 2 Mbit/s）

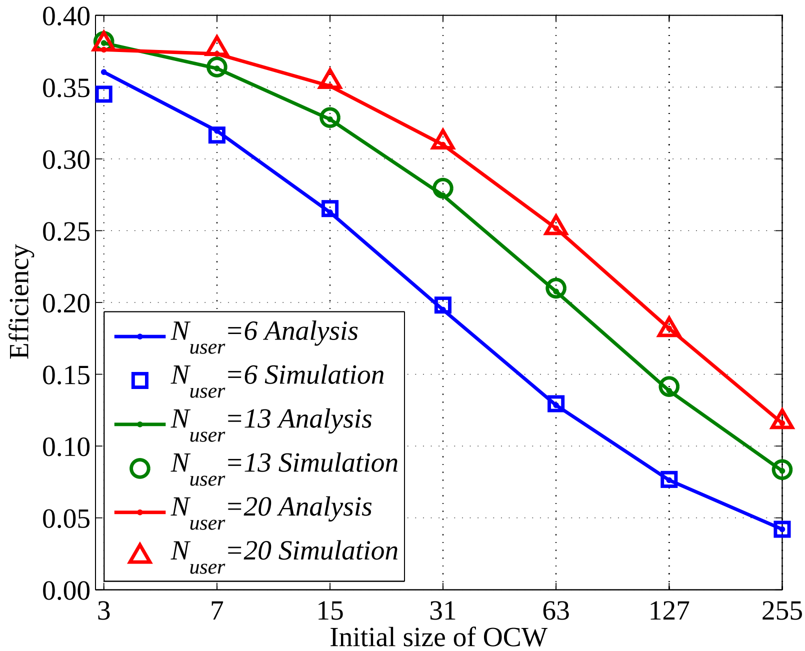

図 A.5: 最小 OCW 幅に対する通信効率 (m=5):解析値 (線)，シミュレーション結果 (マーカー)
（部分的に飽和状態にあるユーザ数 6, 13, 20 台）

謝辞

本研究を行うにあたり，著者の指導教員である九州工業大学大学院情報工学研究院電子情報工学研究系尾知博教授には，本研究を行う機会，環境を与えて頂くとともに，研究の方向性，進め方を示唆して頂きました．また，公私にわたる御指導，御助言を賜り改めて深く謝意ならびに敬意を表します．九州大学大学院システム情報科学研究院古川浩教授，九州工業大学大学院情報工学研究院情報創成工学研究系硴崎賢一教授，九州工業大学大学院情報工学研究院電子情報工学研究系川原憲治准教授，黒崎正行准教授には，本論文の審査を通して貴重な御意見，御指導を賜わり，ここに厚く御礼申し上げます．九州工業大学大学院情報工学研究院電子情報工学研究系レオナルドラナンテジュニア助教には，本研究を進めるにあたって様々な相談や協力をして頂き，また，九州工業大学大学院情報工学研究院電子情報工学研究系長尾勇平客員准教授には，本研究の方向性について示唆に富んだ貴重なご意見を頂きました．ここに深く感謝いたします．本研究の一部は若手研究 (B)15K18067 の助成を受けたものである．関係者各位に心より感謝申し上げます．

参考文献

[1] ICT 総研，“2016 年公衆無線 LAN サービス利用者動向調査，” [Online] Available WWW: http://ictr.co.jp/report/20160913.html

[2] 総務省，“我が国のインターネットにおけるトラヒックの集計･試算，” [Online] Available WWW: http://www.soumu.go.jp/main content/000430359.pdf

[3] Y. Inoue, et al., “Beyond 802.11ac - A very high capacity WLAN,” IEEE802.11-13/0287r1, March 2013.

[4] L. Cariou, et al., “High-efficiency Wi-Fi,” IEEE802.11-13/0331r0, March 2013.

[5] “IEEE802:11aTM/IEEE 802.11a STANDARD for Information Technology - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: High-speed Physical Layer in the 5 GHz Band,” the 802.11 Working Group of the 802 Committee, June. 2003.

[6] “IEEE802:11nTM/IEEE 802.11n STANDARD for Information Technology - Part 11: Wireless lAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications: Enhancements for Higher Throughput,” the 802.11 Working Group of the 802 Committee, Oct. 2009.

[7] “IEEE802:11acTM/IEEE 802.11ac STANDARD for Information Technology - Telecommunications and information exchange between systems - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications - Amendment 4: Enhancements for Very High Throughput for Operation in Bands below 6 GHz,” the 802.11 Working Group of the 802 Committee, Dec., 2013.

[8] O. A. Magd, “802.11 HEW SG Proposed PAR,” IEEE 802.11-14/0165r1, March 2014.

[9] R. Stacey, “IEEE P802.11 Wireless LANs: Specification Framework for TGax,” IEEE 802.11-15/0132r16, March 2016.

[10] 浅井 裕介, 石原 浩一, 村上 友規, 工藤 理一, 市川 武男, 鷹取 泰司, 溝口 匡人, “超高速無線LAN 規格 IEEE802.11ac の概要とマルチユーザ MIMO の実験的検証,” 信学論（B）, vol.J97-B, no.1, pp.1-18, Jan. 2014.

[11] “3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description; Stage 2 (Release 8),” 3GPP TS 36.300 V8.3.0 (2007-12), pp.1–137, Sep. 2008.

[12] “IEEE standard for local and metropolitan area networks part 16: Air interface for broadband wireless access systems,” IEEE Std 802.16-2009 (Revision of IEEE Std 802.16-2004), pp.1–2080, May 2009.

[13] C. Ghosh, R. Stacey, E. Perahia, et al., “Random Access with Trigger Frames using OFDMA, ” IEEE802.11-15/0875r1, July 2015.

[14] C. Ghosh, R. Stacey, E. Perahia, et al., “Random Access with Trigger Frames using OFDMA,” IEEE802.11-15/0875r1, July 2015.

[15] L. Lanante, M. Kurosaki, Y. Nagao, T. Uwai, and H. Ochi, “Random Access UL MU Resource Allocation and Indication,” IEEE802.11-16/0340r1, March 2016.

[16] G. Bianchi, “Performance analysis of the IEEE802.11 distributed coordination function,” IEEE J. Sel. Areas Commun., vol.18, no.3, pp.535–547, March 2000.

[17] E. Ziouva and T. Antonakopoulos, “CSMA/CA performance under high traffic conditions: Throughput and delay analysis,” Comput. Commun., vol.25, no.3, pp.313–321, Feb. 2002.

[18] I. Tinnirello, G. Bianchi, and Y. Xiao, “Refinements on IEEE 802.11 distributed coordination function modeling approaches,” IEEE Trans. Veh. Technol., vol.59, no.3, pp.1055–1067, March 2010.

[19] Y. Xiao, “Performance Analysis of Priority Schemes for IEEE 802.11 and IEEE 802.11e Wireless LANs,” IEEE Trans. Wireless Commun., vol.4, no.4, pp.1506–1515, July 2005.

[20] D. Xu, T. Sakurai, and H.Ł. Vu, “An Access Delay Model for IEEE 802.11e EDCA,” IEEE Trans. Mobile Computing, vol.8, no.2, pp.261–275, Feb. 2009.

[21] 中川 春彦, 榊原 勝己, 山北 次郎, “非飽和状態における IEEE 802.11 DCF の消費電力に関する解析,” 信学論（B）, vol.J90-B, no.2, pp.127-137, Jan. 2007.

[22] K. Duffy, D. Malone, D. J. Leith, "Modeling the 802.11 distributed coordination function in non-saturated conditions," IEEE Comm. Lett., vol.9, no.2, pp.715–717, August 2005.

[23] X. Wang, and H. Wang "A Novel Random Access Mechanism for OFDMA Wireless Networks," Proc. IEEE GLOBECOM 2010, pp.1–5, Florida, Dec. 2010.

[24] H. Kwon, H. Seo, S. Kim, and B. G. Lee "Generalized CSMA/CA for OFDMA systems: protocol design, throughput analysis, and implementation issues ," IEEE Trans. Wireless Commun., vol.8, no.8, pp.4176–4187, August 2009.

[25] Q. Qu, B. Li, M. Yang, and Z. Yan "An OFDMA based concurrent multiuser MAC for upcoming IEEE 802.11ax," Proc. IEEE WCNC 2015, pp.136–141, New Orleans, March. 2015.

[26] H. Hong, J. Ahnm, W. Ahn, and R. Y. Kim, "MU-RTS/CTS for TWT Protection, " IEEE802.11-16/0353r2, March 2016.

[27] P. Chatzimisios, A. C. Boucouvalas and V. Vitsas, "IEEE802.11 packet delay - a finite retry limit analysis," Proc. IEEE GLOBECOM 2003, pp.950–954, San Francisco, Dec. 2003.

[28] H. Wu, Y. Peng, K. Long, S. Cheng and J. Ma, "Performance of reliable transport protocol over IEEE 802.11 wireless LAN: analysis and enhancement," Proc. IEEE INFOCOM 2002, pp.599–607, New York, June 2002.

[29] 入木田知恭, 上井竜己, ラナンテ レオナルド Jr., 黒崎正行, 尾知博, "IEEE 802.11ax における有限リトライリミットを考慮した OFDMA ランダムアクセスの性能解析," 信学技報, RCS2017-80, pp.179–184, 2017 年 6 月.

[30] 小畑 晴香, 鍋谷 寿久, 青木 亜秀, "IEEE 802.11ax 無線 LAN における特性評価 (3) ~ ランダムアクセストリガフレームを用いたバッファ情報収集 ~," 2016 信学総大, B-5-141, pp.534, 2016 年 3 月.

[31] R. Porat, M. Fischer, S. Merlin, et al., "11ax Evaluation Methodology," IEEE802.11-14/0571r12, January 2016.

[32] S. Merlin, G. Barriac, H. Sampath, et al., "TGax Simulation Scenarios," IEEE802.11-14/0980r16, July 2015.

[33] 梅原 大祐, 田野 哲, 守倉 正博, 大槻 暢朗, 杉山 隆利, "IEEE802.11DCF の性能解析モデルに関する簡易補償方式," 信学技報, CS2010-42, pp.29–34, 2010 年 11 月.

[34] W. Ahn, J. Ahn, and R. Y. Kim, “Congestion control for UL MU random access,” IEEE802.11-16/0085r1, January 2016.