

超進化802.11 高速無線LAN教科書

MIMO から Massive MIMO を用いた 伝送技術とクロスレイヤ評価手法

博士(工学) 西森健太郎 共著
博士(情報学) 平栗 健史

コロナ社

まえがき

現在、スマートフォンや Wi-Fi は私たちの生活には欠かせないツールとなっている。また、これらで要求される伝送速度は、20 年前からは想像できない速度が実現しており、これは次世代無線通信方式によりさらに進化するだろう。一方、無線通信システムが使用できる周波数帯は非常に限られているため、「限られた周波数帯域において、いかに伝送速度を向上させるか」は、無線通信システムにおける永遠の課題であり、これまでもさまざまな技術によってこの課題が克服されてきた。この中で、本書では、伝送速度を向上させる大きなきっかけとなり、今では無線通信のスタンダードとなっている OFDM (orthogonal frequency division multiplexing) をいち早く導入した IEEE 802.11 の無線 LAN 標準と、MIMO (multiple input multiple output) 技術を解説するとともに、無線 LAN を用いた MIMO 伝送の特性や評価方法を解説することを目的としている。

近年、MIMO 技術に関しては、LTE (long term evolution) や IEEE 802.11n の標準規格に採用されたことをきっかけとして、MIMO の原理や基礎特性を記載した教科書は多く出版されている。一方、無線 LAN の規格を網羅した教科書もいくつか出版されている。しかし、無線 LAN の標準規格書は、あくまでも規格で策定されている機能が記載されているだけであり、その技術が採用されている意味や目的が述べられていないので、どのように MIMO 伝送に結びつけるか、ということを知者が検討することは非常に難しい。また、無線 LAN を含め、実際のシステムでどのように MIMO 伝送を評価したらよいかといった観点で詳細な記載が行われている教科書はこれまで見当たらなかった。

本書の著者である西森と平栗は、IEEE 802.11a から始まり、最近の無線 LAN の標準化に携わった経験と、MIMO 等のアレーアンテナを用いた空間信号処理技術に関する最先端の研究開発に、それぞれ 20 年近くにわたり携わってきた。そこで、実際の無線 LAN 規格を用いた MIMO 伝送を評価するため、比較的簡単な手法でツールを開発しようというモチベーションから本書を作成するきっかけとなった。著者の 1 人である西森は、物理層 (PHY 層) におけるアダプティブアレーから MIMO 伝送に至るまでのアンテナを含む信号処理の先駆者であり、もう 1 人の著者である平栗は、MAC 層以上の無線通信アクセス制御技術に関しては、国内でも数少ない専門家である。これまでの研究開発の経験 (= 人生) のすべてを注力し、本書の著者以外では実現できなかった、PHY 層と MAC 層技術の融合、すなわち、クロスレイヤ技術の解説を体系的にまとめることができたことは非常に大きな意義があると確

信している。

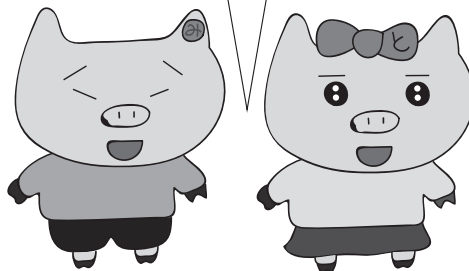
本書をまとめるにあたり、無線通信を実現するためには個々の技術が重要なものというまでもなく、総合的に無線通信システムを考えることが必要であり、「無線通信の総合力」が必須であることを痛感した。以上の背景に基づき、本書では、まず2~4章で無線LANの基礎を体系的に学習することができる。5章ではMIMOの基礎から次世代無線通信のキー技術であるMassive MIMOまでをまとめている。なお、5章について本書を超える部分は、2014年に著者が出版した「マルチユーザMIMOの基礎」を参照いただければ幸いである。6章では、これまでの章の内容をもとにIEEE 802.11acを例にとり、マルチユーザMIMO伝送の評価方法とその特性を示している。また、付録では本書で使用するおもな記号リストをまとめているので、理解の助けとしていただきたい。

本書を通じて、無線通信を実現するためには総合力が必要であることを実感していただきたい。また、本書のサブタイトルとして、今後も発展が想定されるMIMO伝送を用いた無線LANの教科書のスタンダードとなるべく、「超進化802.11高速無線LAN教科書」というタイトルを与えさせていただいた。本書が無線通信のさらなる発展に寄与すれば幸いである。

2017年8月

西森 健太郎, 平栗 健史

最後に、本書は、電子情報通信学会・通信ソサイエティ・コミュニケーションクオリティ研究会の第二種研究会第1回基礎講座ワークショップで用いたチュートリアル講演での資料をもとに執筆されている。本書の執筆にあたり、多大なるご協力をいただいた、また貴重な機会を与えていただいた、当該研究会ワークショップで実行委員長の高橋 玲 様、実行委員会幹事の梅原大祐先生、松田崇弘先生、実行委員会メンバーならびに事務局の浅見未香 様に感謝するとともに、いつも励ましと癒しを与えていただいている著者らの愛すべき家族に感謝します。



目 次

1. はじめに

1.1 技術背景	1
1.2 本書の内容	4

2. 無線 LAN の基礎知識

2.1 無線 LAN の標準化と機能	6
2.2 無線 LAN ネットワーク構成	7
2.2.1 無線 LAN ネットワークのコンポーネント種別と定義	7
2.2.2 接続手順のための概要と運用規定	8
2.2.3 ネットワーク構成の基本モード	10
2.3 無線 LAN の標準化技術と動向	12
2.3.1 IEEE 802 標準化委員会と無線 LAN 標準規格	13
2.3.2 IEEE 802.11n の標準規格	14
2.3.3 IEEE 802.11aa の標準規格	24
2.3.4 IEEE 802.11ac の標準規格	25
2.3.5 次世代無線 LAN 規格 IEEE 802.11ax	29

3. 無線 LAN の PHY 層の概要

3.1 無線 LAN における変調方式	32
3.2 OFDM 方式	32
3.2.1 マルチパス伝搬	32
3.2.2 OFDM 方式の原理と MIMO-OFDM	34
3.3 IEEE 802.11a 標準規格における OFDM 方式	36
3.3.1 畳み込み符号化とインターリーブ	38

3.3.2 OFDM シンボルの生成	39
3.3.3 サブキャリア数と伝送速度の関係	40
3.3.4 PHY 層の信号フォーマット	41

4. 無線 LAN の MAC 層の概要

4.1 アクセス制御と拡張機能	43
4.2 CSMA/CA アクセス方式とキャリアセンスのアルゴリズム	45
4.2.1 IFS による優先制御	45
4.2.2 EIFS によるフレーム送信の同期機能	46
4.2.3 バックオフ制御	47
4.2.4 キャリアセンスによる受信レベル	48
4.2.5 キャリアセンスと送受信のアルゴリズム	49
4.3 IEEE 802.11e の優先制御による QoS 機能	53
4.4 MIMO 伝送と SU/MU-MIMO 伝送によるアクセス制御	55
4.4.1 MIMO を用いたアクセス制御 (IEEE 802.11n)	56
4.4.2 固有モード伝送, MU-MIMO を用いたアクセス制御 (IEEE 802.11ac)	57
4.5 IEEE 802.11ac の QoS 機能サポート	61
4.6 理論計算によるスループットの計算方法	62
4.7 IEEE 802.11 および 802.11n フレームフォーマット	69

5. シングルユーザ, マルチユーザおよび Massive MIMO の基礎

5.1 MIMO 伝送のコンセプトと実現手法	77
5.2 MIMO 伝送のチャンネル容量	81
5.3 MIMO における受信信号分離技術と送信指向性制御技術	92
5.3.1 受信信号分離技術	92
5.3.2 送信指向性制御技術	94
5.4 マルチユーザ MIMO (MU-MIMO) の原理	98
5.5 MU-MIMO における下り回線指向性制御技術	101
5.5.1 線形演算による指向性制御技術	101
5.5.2 非線形制御技術とユーザ選択法	105

5.6	PHY 層での SU/MU-MIMO 伝送の特性	106
5.7	Massive MIMO のコンセプトとチャンネル容量	108
5.7.1	基本コンセプト	108
5.7.2	チャンネル容量	108
5.8	MAC 制御を考えた場合の課題とその改善手法	111
5.8.1	CSI フィードバックの問題点	111
5.8.2	伝送効率改善手法	112

6. 無線 LAN における MIMO の性能評価

6.1	無線 LAN における MIMO 伝送方法 (SU/MU-MIMO)	114
6.1.1	伝送速度における MAC プロトコルの研究	114
6.1.2	フレームアグリゲーションに関する研究	115
6.1.3	CSI フィードバックを含む伝送効率の研究	115
6.1.4	伝送距離に関する研究	116
6.2	PHY/MAC 総合評価ツールの概要	117
6.2.1	平均受信電力の決定	117
6.2.2	平均 SNR の決定	120
6.2.3	SU/MU-MIMO 伝送による PHY 層の伝送速度の決定	122
6.2.4	CSI フィードバックによるオーバーヘッドの計算	123
6.2.5	シミュレーション条件	124
6.3	SU/MU-MIMO の性能評価	126
6.3.1	MCS インデックスごとの性能評価	126
6.3.2	アグリゲーションを含む性能評価	128
6.3.3	CSI フィードバックを考慮した性能評価	128
6.3.4	基地局と端末間の距離特性を考慮した性能評価	129
6.3.5	各方式の適用領域	130
6.4	CSI フィードバックを排除する MU-MIMO 伝送の性能評価	131
付	録	134
引用	・参考文献	136
索	引	145

1 | はじめに

1.1 技術背景

携帯電話の最新規格である LTE (long term evolution)^{1)†} や IEEE 802.11 規格を用いた無線 LAN^{2),3)} に代表されるブロードバンド無線システムは、PC、スマートフォン、タブレット、ゲーム機などに実装もしくは接続することが可能となっている。さらに、これらのシステムは、つぎの世代に向けてさらなる高度化・高速化をとげている。この流れは第5世代移動通信システム (5G) に向けた開発につながるものとなる。

「限られた周波数帯域において、いかに伝送速度を向上させるか」という課題は、無線通信システムにおける永遠の課題であり^{4),5)}、これまでもさまざまな技術によってこの課題が克服されてきた。図 1.1 にこの 10 年間における携帯電話の加入者数の推移を示す⁹⁾。図から明らかのように、すでに 2007 年には、携帯電話は 1 億台を突破した。さらに、スマートフォンや無線 LAN の普及に伴って高速なデータを多くのユーザが使用する時代となっており、1 人が 1 台のみならず、2 台以上の携帯端末を所有する時代となっている。

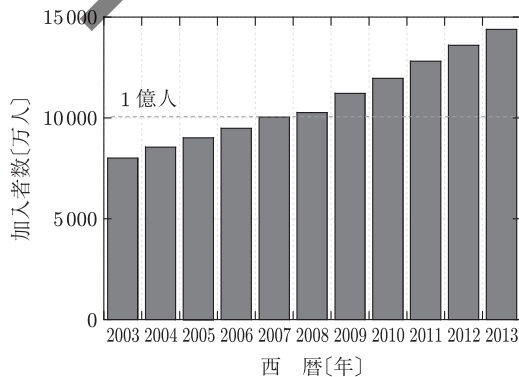


図 1.1 携帯電話加入者数の推移
〔通信白書〕2014⁹⁾より

† 肩つき番号は巻末の引用・参考文献を表す。

伝送速度の向上という観点から、技術的な発展と照らしあわせて考えると、21世紀に入り、CDMA (code division multiple access)^{6), 7)} を基本とする第3世代移動通信システムが導入され、LTE を実現する商用サービスも2010年より開始された¹⁾。また、無線LAN^{2), 3)} もさまざまな場所で使用でき、WiMAX⁸⁾ では移動環境でも数十Mbpsの伝送が可能となっている。図1.2に、携帯電話と無線LANシステムにおける年代に対する商用サービスの伝送速度の推移を示した。LTEやIEEE 802.11n 準拠の無線LANでは伝送速度が100Mbpsを超え、ユーザにとって非常に利便性の高いサービスが実現されている。現在ではさらに高速化され、200~300Mbpsのサービスが提供されている。「限られた周波数帯域における無線通信サービスの実現」という前提に立つと、これらのシステムではいずれも5bps/Hz (100Mbps/20MHz)を超えた周波数利用効率を達成している。さらに、LTE AdvancedやIEEE 802.11acではさらにこの10倍以上の伝送速度を達成することが規格として盛り込まれている。

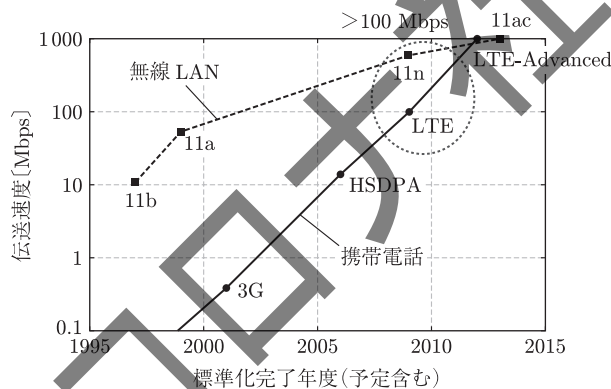


図 1.2 携帯電話と無線LANの伝送速度の推移

こういった性能向上の背景には、当然ながら目覚ましい技術の進展が背景にある。半導体デバイスの進歩によりデジタル信号処理がより現実的な手段となった。OFDM (orthogonal frequency division multiplexing) 技術^{10)~12)} が導入されたことにより、各周波数チャネル (サブキャリア) でフラットフェージングチャネルを生成することができ、マルチパスフェージング下でも広帯域無線通信を活用できるようになったことも非常に大きな成果である。

さらに、OFDMにおけるインターリーブ技術、Turbo符号やLDPC (low-density parity-check code) などの誤り訂正技術、再送制御技術などの発展により、十数年前の移動通信では難しいと考えられていた16 QAM, 64 QAMなどの多値変調の適用が可能となった^{10), 12)}。ただし、これらの技術を用いたとしても、やはり限界がある。先に述べた非常に高い周波数利用効率を達成するためのブレークスルーは、MIMO (multiple input multiple output) 技術の導入であるといえる^{13), 14)}。じつは、図1.2の100Mbpsを超える伝送速度の実現は

MIMO 技術を適用することで達成されている。したがって、2000 年に入ってから無線通信システムの発展を最も支えた技術は、MIMO 技術であるといえる。

MIMO とは、送信局と受信局の両方に複数のアンテナ（アレーアンテナ）を用いることにより、i) 伝送速度の向上、ii) 信頼性の向上の、いずれかもしくは両方を実現可能とする技術である^{16), 17)}。MIMO 技術は無線 LAN システムに導入されたことをきっかけに、WiMAX や LTE にも導入され、いまや無線通信システムにとって欠かせない技術となっている。

MIMO 技術は、空間領域におけるアレーアンテナを用いた信号処理技術であると解釈できる。空間領域におけるアレーアンテナを用いた信号処理技術として MIMO とは異なる手法で、システム全体の周波数利用効率を向上させる技術がこれまで検討されてきた。これは、SDMA (space division multiple access) と呼ばれる技術であり^{19)~21)}、ちょうど MIMO 技術の提案から少し前にそのコンセプトが提案されている。

図 1.3 に SDMA の概念図を示す。SDMA は図に示すように、アダプティブアレーアンテナ^{41), 42)}を基地局 (AP: access point) 側に用いて複数の異なる指向性を形成することで、同一時間 (t_1)、同一周波数 (f_1) で複数のユーザと通信することを可能とする。無線通信システムにおいて、複数のユーザと通信するためのアクセス方法 (多元接続) として、TDMA (time division multiple access) や FDMA (frequency division multiple access) が商用システムでもおもに用いられている⁵⁾。TDMA, FDMA はそれぞれ、時間、周波数の違いで複数のユーザと通信することを可能とする。ただし、どちらの方法を用いても、周波数利用効率はユーザ数分だけ低下することになる。SDMA では、AP のアンテナ本数分のユーザを同時に接続でき、形成される複数の指向性は直交する。ここで、直交とは、ユーザ 1 の方向に形成した指向性は、他のユーザ (2, 3) の方向には形成されない。すなわち、他ユーザの方向には指向性のヌルが形成される。このように、SDMA は TDMA, FDMA と比べて、複数ユーザが存在する環境下で高い周波数利用効率を得ることができる。

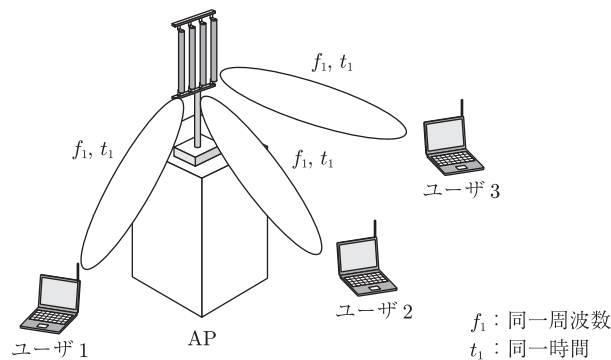


図 1.3 SDMA の概念図

通常、SDMA では、図 1.3 に示すようにユーザ側のアンテナ数は 1 であるが、SDMA に MIMO の考え方を導入することも可能である。これは、ユーザ側のアンテナを複数にすることである。ただし、ユーザ側にはハードウェア規模の制約から、多くのアンテナを有することが困難である。そこで、AP には多くのアンテナを有し、複数のユーザと AP の間における MIMO による通信を実現することを考える。これは、一般にマルチユーザ MIMO (MU-MIMO)^{22)~25)} と呼ばれている。MU-MIMO は、無線 LAN の最新規格として検討が進められている IEEE 802.11ac³⁾ や、最新の移動通信の規格として検討が進められている LTE-Advanced²⁹⁾ などにおいて導入が予定されている。MU-MIMO と対比するために、1 人のユーザが AP と MIMO による通信を行う場合をシングルユーザ MIMO (single user MIMO: SU-MIMO) と呼ぶ。さらに、MU-MIMO との対比がない場合は、断りなく SU-MIMO を単に MIMO と呼ぶことにする。

近年では、MU-MIMO を実現するために Massive MIMO といったコンセプトが提案されている。Massive MIMO では、AP のアレーアンテナ数がユーザの合計のアンテナ数よりも十分に多いことを想定しているため、ユーザ数が増加しても伝送速度はさほど低下しない利点を有する²⁶⁾。本書でも Massive MIMO のコンセプトと基本特性を取り上げる。

1.2 本書の内容

SU-MIMO および MU-MIMO の検討では、これまでおもに送信側の指向性制御および受信側の復号技術がフォーカスされてきた²²⁾。すなわち、物理層 (physical layer: PHY 層) における検討が多く行われてきた。しかしながら、SU/MU-MIMO では、送受信の間の伝搬特性を表す伝搬チャネル情報 (channel state information: CSI) を利用することが大前提となるため、この情報取得のための効率を考慮することが実際には必要となる。すなわち、PHY レベルだけではなく、MAC (medium access control) 層まで考慮した評価が必要不可欠である。本書では、無線 LAN の最新規格である IEEE 802.11ac を例にとり、SU/MU-MIMO の下り回線における通信効率をできるだけ厳密に評価することで、MIMO 通信の総合性能を定量評価することを目的としている。

まず、2 章では、無線 LAN の標準化として知られている IEEE 802 標準規格について、市販化されている技術や市場で注目されている機能を抽出して解説している。ここで説明しきれなかった点も多数あるため、具体的な評価を行うためには標準規格書のドキュメントを参照されたい。

3 章では、PHY 層の技術について紹介し、無線 LAN で用いられている OFDM の基礎から応用まで解説している。

4章では、MAC層の技術について紹介し、これまでの書籍ではあまり解説されてこなかった、無線LANで用いられているMIMOやMU-MIMO伝送を用いたときのアクセス制御を紹介するとともに、そこで用いられるフレームフォーマットの紹介やスループット特性の簡易的な理論計算方法について解説している。

5章では、シングルユーザおよびマルチユーザMIMOの基礎について、丁寧に解説している。本書では、シングルユーザとマルチユーザMIMO (SU/MU-MIMO) についての基本項目を特に、初心者でもわかるように解説をしたつもりであるが、まだ難しいと感じられた人も多いかもしい。さらに本領域の検討をさらに掘り下げる場合は、著者の「マルチユーザMIMOの基礎」²⁵⁾を参考にして検討を進めていただきたい。

6章では、無線LANのMIMO, SU-MIMO, MU-MIMO伝送のネットワーク構成を例として、PHYとMACが連携した評価方法を示すとともに、SU-MIMOとMU-MIMOにおけるスループットと伝送効率をPHYとMACの両方を考慮して評価している。MAC効率まで考慮した場合、MU-MIMOがSU-MIMOよりもスループットや伝送効率が向上するわけではないことが明らかとなった。また、両者で有効となる適用領域は使用するパラメータに大きく依存することも考察している。また、MU-MIMOではCSIフィードバックに伝送効率の低下が大きく、CSIフィードバックを排除するインプリシットビームフォーミングが有効であることを解説している。

本書では、限定されたアンテナ数で評価を行ったが、近年はAPに100素子以上のアンテナを用いるMassive MIMOといった技術^{65)~67)}が次世代移動通信(5G)システムにおけるキー技術として注目されている。Massive MIMOでは、非常にアンテナ数が多いため、CSIの取得という観点では、たとえインプリシットビームフォーミングを適用したとしてもオーバーヘッドが大きくなることが考えられる。今後、CSIの取得という観点からMassive MIMOにおける研究開発を行うことは非常に重要であるといえる。

一方、非常に多くのユーザや「もの」を対象としたセンサネットワークが注目を集めている。こういったシステムでは伝送速度はそれほど必要としないものの、非常に多くのユーザを扱う必要がある。また、MIMO伝送を用いた無線LANとの共存も重要である。このような場合、低速伝送のシステムが高速伝送のシステムの伝送効率を低下させる可能性がある。効率的なアクセス制御を考慮しつつ、既存システムへの効率も考慮した検討が必要となるであろう。

これらの各章を通して読んでいただくことにより、MIMO伝送とそれに係る無線LANで採用されているお主な技術を理解することができる。また最後の6章では、PHY層とMAC層がともに連携する技術や評価方法を学ぶことができるため本書の大きな特徴となっており、実際に研究などで検討を進める際にもお役立ていただくことができるかと思う。

索引

【あ】		シャドーイング	118	【の】	
アクセスカテゴリ	53	自由空間伝搬損失	118	上り回線	99
アダプティブアレー	77	周波数リソース	78	【は】	
アドホックモード	11	周波数利用効率	2	ハイスループット・モード	16
アレーアンテナ	77	受信レベル	48	パケット衝突	126
		ショートプリアンブル	41	バックオフ制御	47
【い】		【そ】		【ひ】	
インターリーブ	37	相関行列	89	非線形制御	105
インフラモード	10	相加・相乗平均の定理	90	【ふ】	
【う】		【た】		フーリエ変換	34
ウエイト	96	ダイバーシチ	86	複素平面	82
【お】		畳み込み符号化	38	符号化率	37
奥村・秦式	118	多値変調	93	符号間干渉	33
【か】		【ち】		物理層	4
ガードインターバル	34	遅延プロファイル	33	フリスの伝達公式	117
【き】		チャンネル行列	88	ブリッジモード	12
逆行列	93	チャンネル容量	85	フレームアグリゲーション	14, 23
キャリアセンス	6	直交	95	ブロック対角化	102
キャリアセンスレベル	48	直交偏波	91	【ま】	
【く】		【て】		マルチパス伝搬	33
空間相関	90	低雑音電力増幅器	120	【み】	
下り回線	99	デシベル	117	ミックス・モード	19
グリーンフィールド・モード	18, 19	デュアル CTS プロテクション	17	【ゆ】	
【こ】		伝送効率	126	ユーザスケジューリング	106
交差偏波識別度	91	伝搬損失	119	ユニタリ行列	91
固有値	90	伝搬損失係数	119	【ら】	
固有ベクトル	97	伝搬チャンネル	78	ランダムアクセス制御	43
固有モード伝送	94	電力増幅器	87	【れ】	
コンパチビリティ	18	【と】		レイリーフェージング	83
【さ】		特異値分解	95	レガシー規格	7
再送制御の動作	43	【ぬ】		レガシー・モード	16, 19
サブキャリア	36	ヌル	100	【ろ】	
【し】		【ね】		ロングプリアンブル	41
時間リソース	78	熱雑音	81		

【A】		【D】		IFFFT	35
AC	53	dB	117	IFS	45
aCCATime	49	DCF	43, 54	Integrated LAN	7
AC_BE	53	DCF IFS	45	Integration	9
AC_BK	53	DFS	10	ISM バンド	7, 49
AC_VI	53, 61	Disassociation	9	i.i.d.	106
AC_VO	53, 61	Distribution	9	【L】	
AIFS	53	distribution service	7	LLC レイヤ	8
aMACProcessingDelay	51	distribution service medium	7	logical link control レイヤ	8
AP	94	DPC	105	Lower モード	16
APSD	24	DS	7	LTE	1
aRcPLCPDelay	49	DSM	7	L-LTF	64
aRxTxSwitchTime	51	dynamic frequency selection	10	L-SIG	64
aRxTxTurnaroundTime	51	【E】		L-STF	64
aSIFSTime	51	EDCA	53	【M】	
Association	8	EDCAF	61	MAC	4
aTxPLCPDelay	51	EIFS	46	MAC 層	6
aTxRampOnTime	51	【F】		MAC-SAP	64
aTxRFDelay	51	FDMA	3	Massive MIMO	5, 108
A-MPDU	23, 59	FFT	35	MCS インデックス	60
A-MSDU	23	【G】		MIMO	84
【B】		GI	34	MIMO-OFDM	35
BA	62	Group ID	61	MISO	84
BAR	62	【H】		MLD	93
basic service area	7	HEW	29	MMSE	92
basic service set	7	HT	64	More Data	69
BD	101	HTC	64	More Fragments	69
BER	107	HT Control Middle	73	More PSMP	22
BPSK	36	HT-LTFs	64, 66	MRG	24
BR	59, 123	HT-STF	64	MRG-Block-ACK	24
BR フレームフォーマット	75	【I】		MRG-Directed	24
BRP	59	idle	45	MRG-Unsolicited-Retry	24
BRP フレームフォーマット	75	IEEE 802 標準化委員会	13	MU-MIMO	26
BSA	7	IEEE 802.1D	53	【N】	
BSS	7	IEEE 802.11	1	NAV	71
busy	45	IEEE 802.11 作業部会	6	NDP	59
【C】		IEEE 802.11ac	61	NDP フレームフォーマット	75
CAMA/CA	6	——の拡張帯域	26	NDPA フレームフォーマット	75
contention window	45	——の標準規格	25	【O】	
CSI	59, 122	IEEE 802.11ax	29	OFDM	2, 32
CSI フィードバック	55, 111	IEEE 802.11n の標準規格	14	OFDM サブキャリア数	62
CSMA	6	IEEE 802.11WG	13	OFDMA	30
CSMA/CA	39, 43, 44, 54	【J】		open systems interconnection	
CSMA/CD	6, 44	【K】		モデル	13
CW	45	【L】			

Order	69			TPC	9
OSI モデル	13			transmit power control	9
		【P】	【Q】	TXOP	55
PHY 層	6		QoS 機能	53	
PHY_CCA.indication	51		QoS 機能サポート	61	
PHY_RXEND.indication	51		QPSK	36	
PHY_RXSTART.indication	51				
PHY_TXSTART.request	51		【R】		【U】
PIFS	45		Reassociation	9	Upper モード
PLCP	49		Retry	69	
PLCP プリアンブル	64				【V】
PLCP ヘッダ信号	64		【S】		VHT
PMD	49		SDMA	3	VHT (very high throughput)-SIG-A
PMD_DATA.request	51		SIC	93	66
PMD_DATA.indication	49		SIFS	45	VHT-LTFs
PMD_RSSI.indication	51		SIMO	84	VHT-SIG-B
Power Management	69		SISO	78, 84	VHT-STF
power save multi-poll	19		SNR	81	
Protected Frame	69		STA	94	【W】
Protocol Version	69		STA Info	22	WDS
PSMP	19		STBC	17, 115	WiMAX
PSMP グループアドレス ID	22		STBC 非対応	17	wireless distribution system
PSMP STA Info 固定	22		Subtype	69	Wi-Fi 認証
フィールド	22		SU-MIMO	25	
PSMP-DTT	19		SU/MU-MIMO	55	【Z】
PSMP-DTT シーケンス					ZF
デュレーション	22		【T】		81
PSMP-DTT スタート			TDD	96	【数字】
オフセット	22		TDMA	3, 26	2 進指数バックオフ
PSMP-DTT デュレーション	22		TGaa (802.11aa)	24	16 QAM
PSMP-UTT	19, 21		TGac (802.11ac)	14	64 QAM
			TGac/ad (802.11ac/ad)	14	802.11e
			TGe (802.11e)	14	802.11WG
			TGn (802.11n)	14	13

— 著者略歴 —

西森健太郎 (にしもり けんたろう)

1994年 名古屋工業大学工学部電気情報工学科卒業
1996年 名古屋工業大学大学院工学研究科博士前期課程
修了 (電気情報工学専攻)
日本電信電話株式会社入社
2003年 博士 (工学) (名古屋工業大学)
2006年 デンマーク オールボー大学客員研究員
2009年 新潟大学准教授
現在に至る

平栗 健史 (ひらぐり たけふみ)

1999年 筑波大学大学院理工学研究科博士前期課程修了
(理工学専攻)
日本電信電話株式会社入社
2008年 博士 (情報学) (筑波大学)
2010年 日本工業大学准教授
2016年 日本工業大学教授
現在に至る

超進化 802.11 高速無線 LAN 教科書
MIMO から Massive MIMO を用いた
伝送技術とクロスレイヤ評価手法

Transmission Technologies towards MIMO to Massive MIMO
and Cross-layer Evaluation Methods

—Ultra-evolutionary 802.11 High-speed Wireless LAN Textbook—

© Kentaro Nishimori, Takefumi Hiraguri 2017

2017年11月2日 初版第1刷発行

★

検印省略

著者 西 森 健 太 郎
平 栗 健 史
発行者 株式会社 コロナ社
代表者 牛来真也
印刷所 三美印刷株式会社
製本所 有限会社 愛千製本所

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10
発行所 株式会社 コロナ社
CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

振替 00140-8-14844・電話 (03)3941-3131 (代)

ホームページ <http://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-00903-3 C3055 Printed in Japan

(齋藤)



JCOPY <出版者著作権管理機構 委託出版物>

本書の無断複製は著作権法上での例外を除き禁じられています。複製される場合は、そのつど事前に、出版者著作権管理機構 (電話 03-3513-6969, FAX 03-3513-6979, e-mail: info@jcopy.or.jp) の許諾を得てください。

本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられています。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めていません。落丁・乱丁はお取替えいたします。