



## IEEE 802.11無線LAN標準化動向



株式会社東芝 総合研究所 インフラシステムR&D センター  
ワイヤレスシステム技術開発部 **あだち ともこ**  
**足立 朋子**

### 1. はじめに

一般に無線LANはWi-Fiという呼称がなじみ深いですが、標準化活動はIEEE 802.11 Working Groupにて行われている。イーサネットの無線化を目的に始まった活動だが、拡張規格を表すアルファベットがaから始まり、今ではbrまで進んでいることが示すように、進化を続けており、無線LAN技術はより広い分野、新しい利用形態へ展開しようとしている。

本稿では、IEEE 802.11標準化活動の仕組みについて詳しく説明する。さらに、過去からの標準化活動の変遷を振り返り、現在活動中の各グループの概観を紹介する。その上で、特に最新のメインストリームの標準化活動である802.11bn標準化で検討されている注目技術を解説する。

### 2. 無線LANとは

#### 2.1 無線LANの位置付けとIEEE 802.11

無線LAN (Local Area Network) は、通信距離数100m程度で極めて高速な伝送レート (802.11be規格にて、例えば、2.4GHz帯40MHzチャンネル1つ、5GHz帯160MHzチャンネル1つ、6GHz帯320MHzチャンネル2つで各チャンネル8ストリーム利用できるとすると約60Gb/s) を提供する無線通信システムである。一方で、免許不要の周波数帯を利用することも大きな特徴である。これにより、誰でもシステムを展開できる利点がある反面、他システムと周波数共用するため、通信品質が保証できないベストエフォート型の通信方式を基本とする。

無線LANの標準化は、IEEE (The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.: 米国電気電子学会) 下の802.11<sup>[1]</sup> 以外にも、欧州ETSI (European Telecommunications Standards Institute) や日本MMAC (Multimedia Mobile Access Communication Systems) で行われていたが、現在では802.11無線LAN規格が世界標準である。成功理由としては、ISM (Industrial Scientific and Medical) 帯、特に5GHz帯ではなく、より低い2.4GHz帯の利用から

始めたこと、自律分散的に周波数を共用できるCSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) を採用したこと、が大きい。これらは他団体が策定していた仕様と比べ、製品開発を容易にした。加えて、1997年に最初の規格発行後、2年で後継の高速拡張規格802.11a、bをリリースしたこと、その際、後方互換の保証をしたこと、また、製品間での相互接続を保証するためWi-Fi Alliance<sup>®\*1 [2]</sup> (設立当初はWECA (Wireless Ethernet Compatibility Alliance) として発足、2000年に改称) での認証が2000年から開始したことも、IEEE 802.11無線LANの市場確立を後押しした。

#### 2.2 802.11とWi-Fi

厳密には802.11規格は、OSI (Open Systems Interconnection) 参照モデルの第2層 (データリンク層) の下位副層であるMAC (Medium Access Control: 媒体アクセス制御) 層と第1層のPHY (Physical: 物理) 層に関してIEEE 802委員会下の802.11 WG (Working Group) が定めた無線LANの基準であり、一方、Wi-FiはWi-Fi Alliance<sup>®</sup>によるブランド名である。Wi-Fi Alliance<sup>®</sup>は802.11規格に準じた製品の相互接続性試験基準及び製品としてサポートすべき機能基準を規定し、基準を満たした製品に対しWi-Fiの認証ロゴを付与する。802.11規格は開発向け規定であるのに対し、Wi-Fi Alliance<sup>®</sup>の規定は製品向け規定と位置付けることができる。ただ現在では広くWi-Fiという言葉が認知されており、ベースとしているのは802.11規格であるため、802.11無線LANとWi-Fiを同義と扱っても差し支えない状況にある。

Wi-Fi Alliance<sup>®</sup>は2018年に、802.11axに対応するネーミングとしてWi-Fi6を用いることを発表、それに伴い、遡って先の規格である802.11acに対しWi-Fi5、802.11nに対しWi-Fi4を用いることとした<sup>[3]</sup>。2019年に開始したWi-Fi6認証では、従来の2.4GHz帯と5GHz帯を対象としたことから、それと区別できるように、その後開始された6GHz帯もサ

\*1 「Wi-Fi」及びWi-Fi Alliance<sup>®</sup>はWi-Fi Allianceの登録商標である。  
その他本文書に掲載の商品、機能等の名称は、それぞれ各社が商標として使用している場合がある。





ようになる。2000年代初頭は米国企業が主流だったが、現在は中国をはじめとするアジア企業も多数上位を占めている。

### 3.3 活動母体となる組織

米国陸軍少佐であった人物が様々な考えの人々が集う場において円滑に意見集約を行うために考案した、Robert's Rule of Orderという議事規則が、投票を含む会議運営に採用されている。例えば、動議の提出者 (mover) に加え、1名の賛同者 (seconder) が必要である。

次に標準化活動でのグループについて説明する。

- TG (Task Group): 実際に規格ドラフトを策定するグループである。規格ドラフトに対して提出されたコメント処理も担当する。TG名として付されたアルファベットが802.11での拡張規格を識別するアルファベットになる。
- SG (Study Group): TGの立上げを行うグループである。TG立上げに当たっては具体的に、PAR (Project Authorization Request) とCSD (Criteria for Standards Development) という2つの文書を策定する。PARはTGの活動範囲や意義など規格化活動を規定する一方、CSDは規格化活動の位置付けなどを説明する。
- TIG (Topic Interest Group): フィージビリティスタディを行うグループであり、SGの立上げ承認前の活動として開始することも多い。

なお、SGやTIGの立上げ議論は、WNG SC (Wireless Next Generation Standing Committee) というグループにて行われる。なお、TGでの動議は投票権を保持している者しか提出者と賛同者の役を担えないが、SG、TIG、またWNG SCについてはその限りではない。

PARとCSDが、802.11 WG、802 EC (Executive Committee)、IEEE-SA (Standards Association) Standards Board下のNesCom (New Standards Committee) で順に承認されると、TGが成立する。

### 3.4 規格策定の手順

規格策定の典型的な進め方は、まず基本的な合意内容をリストアップしたSFD (Specification Framework Document) の策定を進め、そこから拡張規格の体裁に落とし込んだ

規格ドラフト0.1版を策定し、コメント募集 (CC: Comment Collection) \*2をかけ、提出されたコメントに基づき規格ドラフトを更新する。そして規格ドラフト1.0版から802.11 WGレベルでの承認投票であるLB (Letter Ballot) にかける。LBを繰り返し、コメントによるドラフトの更新がなくなると、次にIEEE-SAレベルでの承認投票 (SA Ballot。SB (Sponsor Ballot) とも呼ばれる) も同様にコメントによるドラフトの更新がなくなるまで繰り返す。なお、LBで承認率75%以上となった規格ドラフトは承認された体になり、投票活動と規格ドラフトの更新は継続されるものの、メインストリーム系の拡張規格についてはこれを機に規格ドラフト準拠の製品のリリースが始まる。SBが終了すると、IEEE-SA Standards Board下のRevCom (Reviewing Committee) での承認を経て、規格として発行される。

発行された規格は有料で販売<sup>[5]</sup>開始されるが、メンバーは発行時に期限付きで取得可能となるほか、発行から6か月後には無償で取得可能になる<sup>[6]</sup>。なお、標準化活動で扱われる寄与文書はすべて公開である<sup>[7]</sup>。規格ドラフトに関しては、投票権保持者のみが基本取得可能だが、会合の現地参加者はローカルサーバーから取得可能という特典がある。また、承認された規格ドラフトもWGで販売を承認されれば購入できる<sup>[5]</sup>。

拡張規格は、ベースライン規格への追加・修正の形態で記述される。一方で、これらの拡張規格を数年おきに1つの規格に統合 (roll-up) して、それを新たなベースライン規格とする作業がある。この作業を担当するグループは、代々TGmx (xがアルファベット順にカウントアップする) として活動し、IEEE Std 802.11-20XXのような統合規格を策定する。現在最新の統合規格はIEEE Std 802.11™-2024である。なお、TGmx (現在はTGmfが活動中) の活動は統合作業に制限されず、例えば、拡張規格や実際の製品化で発覚した誤りやミスマッチの修正、さらに、新規の (TGを立ち上げるほどではないような) 小さな提案も対象となる。IEEE Std 802.11™-2016では、測距機能に使われるFTM (Fine Time Measurement) が追加された。

市場の安定化のため、各拡張規格は同一周波数帯での後方互換の維持を保証しており、それらの拡張規格を統合し続けることによってベースライン規格のボリュームは増

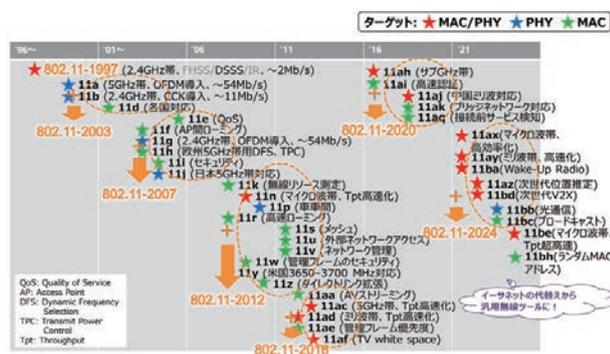
\*2 CCとは、TG内のメンバー中心にドラフトをレビューしてコメントを提出するもの。投票対象となる規格ドラフトの策定を加速させる方法として利用される。投票権維持には無関係であり、参加は任意である。ドラフトにアクセスできる人は誰でもコメントを提出することが可能である。



加の一途をたどっているが、使われなくなった機能はシビアに削除されてもいる。例えば、1997年設立時にあったIR (Infrared。赤外線) やFH (Frequency Hopping。周波数ホッピング) 方式は既に規格から削除されている。

### 3.5 成立済み規格と現在の活動の概観

図3に802.11標準化の変遷を、図4に現在執筆時点での活動中のTG動向の概観を示す。



■ 図3. 802.11標準化活動の変遷



■ 図4. 現在活動中のTG動向概観 (執筆時)

なお、SGとしては、現在PQC (Post-Quantum Cryptography) SGが活動している。これは、セキュリティ拡張によるポスト量子暗号 (PQC) をサポートする標準化活動の立上げを行うものであり、2025年5月会合から活動を開始し、802.11 WGレベルでのPARとCSDの承認を得た。7月会合にて802 ECからのコメントを受け付け、対応後、TGbtになる予定である。

またTIGとしては、現在AUTO (Automotive) TIGが活動している。これは2024年9月から活動を開始しており、無線LANによるコネクテッドカーでのオフロードのフェージビリティスタディを行っている。現在、ユースケース、要求、

KPIの提案の募集中であり、2026年1月まで活動する予定である。

## 4. 802.11bn標準化

本節では、現在最も注目を浴びている802.11bn標準化活動について紹介する。活動母体はTGbnである。

### 4.1 活動目標とターゲットユースケース

TGbnの活動目標は、以下である。

- 単独のBSS\*<sup>3</sup>あるいはオーバーラップするBSSシナリオにおいて、下記を実現することにより、信頼性向上
    - 802.11beに対し、SINR (Signal to Interference and Noise Ratio) レベル (Rate vs Range) でスループットを25%拡大するモードを少なくとも1つ持つ
    - 802.11beに対し、遅延分布の95%タイル値を25%削減するモードを少なくとも1つ持つ
    - 802.11beに対し、ある与えられたシナリオ、特にBSS間の移行時に、MACフレームのロスを25%削減するモードを少なくとも1つ持つ
  - 802.11beに対し、AP (モバイルAPを含む) のパワーセーブを強化、また、P2P (Peer-to-Peer) 動作を改善
  - 対象周波数帯は1~7.250GHz
    - 2.4GHz、5GHz、6GHz帯で後方互換保証
- 高信頼に主な軸足を持つが、欧州エコデザイン指令を意識して802.11無線LANとして初めてAPでの低消費電力化に取り組む点も大きな特徴である。

これらの目標達成により、高速かつ遅延要求の厳しいユースケース、例えば、メタバース、AR/VR、ロボティクス、産業IoT向け自動化、物流、スマート農業などへの適用が期待されている。

### 4.2 現在の状況

TGbnでは現在 (執筆時)、規格ドラフト1.0版 (D1.0) の策定とLB開始を目指して、SFDへ技術的な合意事項の入力及び規格ドラフト用のテキスト案の採択を進めている。

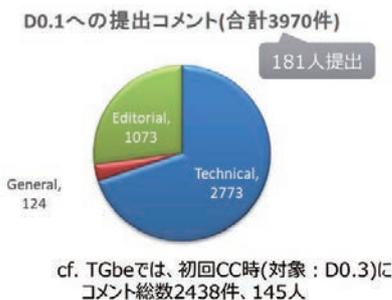
図5は、これまでSFDに入力された累積の動議件数をTGbeの場合と比較したものである。入力数の立ち上がりはTGbeに比べて遅かったが、2024年11月会合からは急伸しており、コロナ禍による活動制約を受けたTGbeを大きく上回る合意事項を積むことができ、CCを早く開始することが

\*3 Basic Service Set。例えば、1台のAP (Access Point) とそれに接続するSTA (Station) から構成される単位



できた。

2025年1月会合後に規格ドラフト0.1版 (D0.1) を策定し、実施した初回CCでのコメント提出状況を図6に示す。コメントは181人から約4,000件提出され、145人から約2,400件のコメントが提出されたTGbeよりも更に関心を集めていると言えよう。



■図6. 初回CC (規格ドラフト0.1版対象) へのコメント提出状況

現在は、このコメントへの対応処理を進め、規格ドラフトを更新中である。現状のタイムラインは図7のようにになっている。

2025年5月会合ではコメント処理が約3割の状況で、LB開始のための承認動議が試みられたが、否決された。具体的には、まず同一周波数帯上の他システムとの共存保証を説明するCAD (Coexistence Assurance Document) の承認動議が承認率73.8%で否決され、続くD1.0版策定とLB開始の承認動議が承認率43.2%で否決された (いずれもテクニカルな動議のため、可決には75%以上の承認率が必要)。CADとは、PARにて物理層を改変するとした場合に、CSDにより他システムとの共存を保証することが求められるため、LB実施時に規格ドラフトとともに提出が必須な文書である。TGbnも、物理層の拡張を行う。一連の否決により、当初は5月にD1.0策定の予定であったところ、翌7月会合に先送りになった。一方で、その後の予定は変更して

おらず、2028年5月に成立予定である。なお、3.4節で述べたように過去のメインストリーム系の活動ではLBで規格ドラフトが承認率75%を達成するとその準拠製品のリリースが始まっており、規格ドラフト2.0版 (D2.0) で承認率75%以上を達成することが多い。TGbnの場合も2026年に製品リリースが始まるかもしれない。

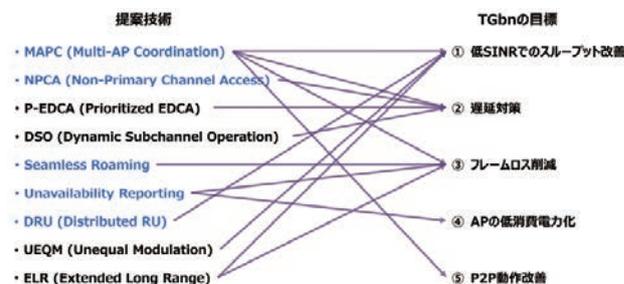


SG: Study Group (規格化活動を開始するための枠組みを定義すること(PAR/CSD)で承認されたグループ)  
 PAR: Project Authorization Request (コアプロパティと優先順位を明確化する活動を開始)  
 CSD: Criteria for Standards Development (規格化活動の進捗状況を確認)  
 TG: Task Group (規格ドラフトも決定するグループ)  
 SFD: Specification Framework Document (技術仕様概要、規格ドラフトのベースとなる文書)  
 Letter Ballot (LB): 802.11シリーズでの承認投票  
 Recirculation (75%以上の承認率確保、ドラフト内容の変更のため、投票者とコメントのやり取りが可能な投票)  
 Sponsor Ballot (SB): IEEE Standards Association (ISA)への承認投票  
 RevCom: Standards Review Committee (IEEE SA Standards Boardの下にある組織で、最終版の最終承認を行う)

■図7. TGbnの標準化タイムライン

### 4.3 TGbnの提案技術

現在最新の規格ドラフト0.3版 (D0.3) に記載されている代表的な提案技術と、TGbnの活動目標との関係は図8のようになる。このうち青字で示した技術に関して、以降で概要を紹介する。なお、対応する活動目標は図8内の番号①～⑤で示す。



#### ● MAPC (Multi-AP Coordination) … ①②③⑤

MAPCはTGbeで提案されたが議論が進まずTGbnに持ち越された技術である。同じプライマリチャネル\*4でBSSを運用する複数のAPが干渉レベルの低減やネットワーク性能の向上のために協調する仕組みであり、採択された具体的な下記の5種類の協調方法によってTGbnの活動目標のほぼすべてに応えようとしている。

#### • Co-BF (Coordinated Beamforming) … ①②③

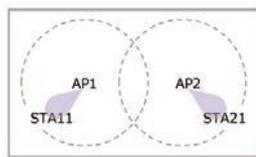
APが他のBSS下のSTAからのCSI (Channel State Information) 取得を他のAPと協調し、その上でビームフォーミングを実施して互いに干渉を抑えて同時送信

\*4 BSSの運用に係る情報などを通知するBeaconフレームを送信するチャネル

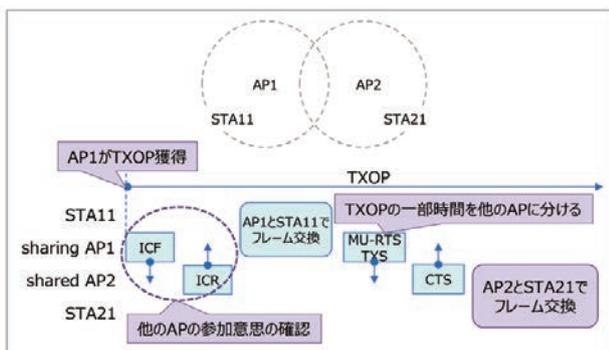


する (図9 (a))。

- Co-SR (Coordinated Spatial Reuse) … ②  
送信制御により、一方のAPでの送信獲得期間 (TXOP: Transmission Opportunity) 中に他のAPでの同時送信を許可する。
- Co-TDMA (Coordinated Time Division Multiple Access) … ②③  
TXOPを獲得したAPがその一部期間を他のAPに割り当てる (図9 (b))。
- Co-RTWT (Coordinated Restricted Target Wake Time) … ②③  
APが遅延クリティカルなトラヒック送信用スケジュール期間 (R-TWT (Restricted Target Wake Time)) を他のAPと共有・保護する。
- Co-CR (Coordinated Channel Recommendation) … ⑤  
P2P用の推奨チャンネル情報をAP間で交換する。



(a) Co-BFのイメージ



ICF: Initial Control Frame  
ICR: Initial Control Response frame  
MU-RTS TXS: Multi-User Request-To-Send Triggered TXOP Sharing  
CTS: Clear-To-Send

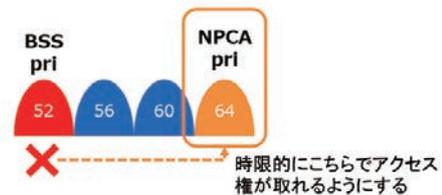
(b) Co-TDMAの実実施手順例

■ 図9. Co-BFのイメージと、Co-TDMAの実実施手順例

● NPCA (Non-Primary Channel Access) … ②

従来は、プライマリチャンネルでアクセス権を確保できないと送信できない。それに対し、NPCAはプライマリチャンネルが他のBSSの通信により使えない場合に、図10のように、あらかじめ設定したNPCAプライマリチャンネルに

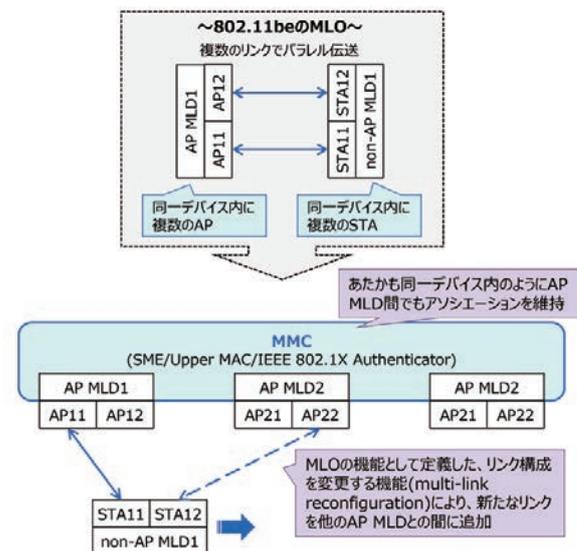
て時限的にアクセスできるようにする。NPCAプライマリチャンネルは1つのみに制限されるが、これは同じBSS内の通信相手の送信の待ち受け動作の実装負荷を軽減するためである。



■ 図10. 5.3GHz帯にてチャンネル52をプライマリチャンネルに、チャンネル64をNPCAプライマリチャンネルにした例

● Seamless Roaming … ③

これは、802.11beで導入された、デバイス間で複数のリンクによる平行伝送を実現するMLO (Multi-Link Operation) をベースに、端末の移動に合わせて移動先のAP (厳密にはAP MLD (Multi-Link Device)) に接続を切り替えていく方式である。図11のように、802.1X Authenticator、SME (Station Management Entity)、上位MAC機能をまとめた、MMC (Multilink Mobility Controller) という概念を新たに設け、それによって複数の異なるデバイスであるAP MLDをあたかも1つのデバイスのように扱い、MMCで結ばれたAP MLD間ではアソシエーションを維持する。これによって、複数のAP MLDでSTA側に対しPTKSA (Pairwise Transient Key Security Association) を共通にでき、接続先で暗号化方式も引き継げるようになる。なお、異なるデバイス間



■ 図11. Seamless Roamingの概観



でSTA側に対するデータ伝送の同期を取ることは実装上困難なため、異なるAP MLD間でのやり取りはコンテキスト転送にとどめる。

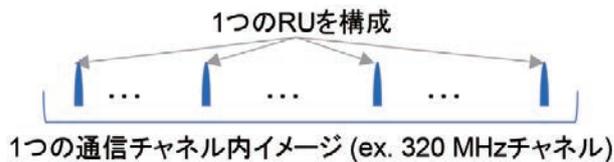
## ● Unavailability Reporting … ③④

TGbnでは、従来のOMI (Operating Mode Indication) を拡張し、より様々な通信の“都合”を通知できるようにしている。従来OMIはSTAがパワーセーブなどのために、通信パラメータを一時的に制限することをAPに通知、通知を受けたAPではSTAにデータを送信する際にロバストなフレームで送信を開始し、STAはその後のフレーム交換中は通常の通信パラメータに戻すものである。通信パラメータとは、例えば、MCS (Modulation and Coding Scheme)、空間ストリーム数、使用チャンネル幅などである。これを、TGbnではデバイス内での他の無線システムの通信を考慮した通信制限状況の通知にも拡張する。なお、他システムの把握と通信の制限方法はベンダ独自の対応となる。他の無線システムとは、Bluetooth<sup>®</sup>\*5、802.15.4、UWB、セルラーなどが想定されている。この他システムとの関係での通信制限（これは動的に実施することになるため、DUO (Dynamic Unavailability Operation) と呼ぶ)に加えて、周期的に通信できない期間の通知もできるようにする（これをPUO (Periodic Unavailability Operation) と呼ぶ)。PUOは従来のスケジューリング機能であるTWT (Target Wake Time) を拡張利用するが、APの低消費電力化手法として注目されている。

## ● DRU (Distributed Resource Unit) … ①

RU (Resource Unit) とは、OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access. 異なる周波数を用いてユーザ多重する方式) で各ユーザに割り当てられる周波数リソースのことである。従来のRU (これをTGbnではRRU (Regular RU) と呼ぶ) は連続したサブキャリアで構成されるところ、DRUでは図12のように非連続のサブキャリアで構成される。DRUが主に注目されている理由は、米国の6GHz帯で、例えば、LPI (Low Power Indoor) のクライアントに関し、最大EIRP (Equivalent

Isotropic Radiation Power. 等価等方放射電力) は24dBmのところ、最大EIRP PSD (Power Spectral Density. パワースペクトル密度) は-1dBm/MHzに制限されており、サブキャリアをより広い帯域に分散した方が出力電力を上げられるためである。



■ 図12. DRUのイメージ

## 5. おわりに

無線LANの標準化活動は、ITU-Rとは違い、米国の学会であるIEEEの下で行われるフォーラム標準である。そのような背景もあり、1人1票の個人ベースで、個人々が技術的専門性を持ち、判断することが求められる。明確に承認率によって可決・否決の決着を出す意思決定プロセスを取るため、デッドロックの様相を来す場合も往々にしてあるが、そのような危機を切り抜け今日に至っている。そしてメインストリームの標準化活動では、目標を高速化のみならず無線LANの適用範囲を広げる高信頼化、また、時代の潮流を受けたAPの低消費電力化へ拡大している。本稿が無線LAN標準化への関心の扉を開く一助になれば幸いである。

(2025年 5月22日 ITU-R研究会より)

### 参考文献／関連リンク

- [1] <https://www.ieee802.org/11/>
- [2] <https://www.wi-fi.org/>
- [3] <https://www.wi-fi.org/news-events/newsroom/wi-fi-alliance-introduces-wi-fi-6>
- [4] S. McCann, doc. : IEEE 802.11-25/0215r4, “802.11 WG March 2025 Session Report,” Mar. 2025.
- [5] <http://www.techstreet.com/ieeegate.html>
- [6] IEEE GET Program™ <http://ieeexplore.ieee.org/browse/standards/get-program/page/series?id=68>
- [7] <https://mentor.ieee.org/802.11/documents>

\*5 Bluetooth<sup>®</sup>はBluetooth SIG, Inc.の登録商標である。

その他本文書に掲載の商品、機能等の名称は、それぞれ各社が商標として使用している場合がある。