

TR-1064

IoT エリアネットワーク向け伝送技術の 概説

Overview of Signal Transmission Technologies
for IoT Area Network

第 4.0 版

2022 年 4 月 5 日制定

一般社団法人
情報通信技術委員会

THE TELECOMMUNICATION TECHNOLOGY COMMITTEE

本書は、一般社団法人情報通信技術委員会が著作権を保有しています。

内容の一部又は全部を一般社団法人情報通信技術委員会の許諾を得ることなく複製、転載、改変、転用及びネットワーク上での送信、配布を行うことを禁止します。

目 次

.....	1
目 次.....	3
<参考>.....	5
第 I 部 I o T エリアネットワーク向け有線伝送方式について.....	6
1. はじめに.....	6
2. 要求条件.....	6
2.1 HEMS.....	6
2.2 AMI (UAN).....	7
2.3 BEMS.....	7
2.4 CEMS.....	7
3. 各種伝送媒体の特徴.....	7
3.1 電力線.....	7
3.1.1 宅内電力配電系.....	8
3.1.2 屋外電力配電系.....	8
3.1.3 「HD-PLC」方式.....	9
3.1.4 ITU-T における検討.....	10
3.2 宅内同軸ケーブル.....	11
3.3 宅内電話線.....	12
3.4 宅内 LAN ケーブル (CAT ケーブル).....	12
3.5 シングル・ペア・イーサネット方式.....	12
4. 上位層との接続.....	14
5. 伝送方式.....	15
6. 各種有線伝送規格の比較.....	16
7. 課題.....	16
第 II 部 I o T エリアネットワーク向け無線伝送方式について.....	17
1. はじめに.....	17
2. 各無線方式の概説.....	17
2.1 Wi-Fi 方式.....	17
2.1.1 規格の概要.....	17
2.1.2 Wi-Fi と 無線 LAN の定義.....	18
2.1.3 IEEE802.11b.....	18
2.1.4 IEEE802.11a.....	18
2.1.5 IEEE802.11ac.....	18
2.1.6 IEEE802.11ah.....	19
2.1.7 IEEE802.11ax.....	19
2.1.8 IEEE802.11ad/ay (WiGig).....	20
2.1.9 IEEE802.11be (Wi-Fi 7).....	20
2.2 Bluetooth 方式.....	21
2.3 Zigbee 方式.....	24

2.4	Wi-SUN 方式	25
2.5	U-bus Air	27
2.6	Z-Wave 方式	28
2.7	G.wnb : 狭帯域の宅内無線ネットワーク	29
2.8	特定小電力無線	30
2.9	UWB 方式	30
2.10	PHS 方式	32
2.11	WiMAX	32
2.12	DECT 方式	34
2.13	IP500	35
2.14	LPWAN	36
2.15	NB-IoT	40
2.16	sXGP	41
3	各種無線伝送規格の比較	42
4	まとめ	43

<参考>

1. 国際勧告等との関連

本技術レポートに関する国際勧告はない。

2. 改版の履歴

版数	制定日	改版内容
第1版	2017年3月7日	制定
第2版	2018年3月15日	<ul style="list-style-type: none">・第I部「2.4 CEMS」の説明を修正・第II部「2.14 LPWAN」、及び「2.15 NB-IoT」に説明を追加・第II部に「2.16 sXGP」の節を追加・全体として書式、表記法を統一
第3版	2020年11月10日	<ul style="list-style-type: none">・第I部「シングル・ペア・イーサネット方式他」の説明を修正・第II部「Wi-Fi」他を最新状況に説明を追加・追加分について、別紙1/2の表に追記
第4版	2022年4月5日	<ul style="list-style-type: none">・2.1.1「規格の概要」にWi-Fi 6(E)とWi-Fi 7を追加・2.1.9 IEEE802.11be (Wi-Fi 7) を追加・2.14 LPWANに最新状況を追加

3. 参照文章

主に、本文内に記載されたドキュメントを参照した。

4. 技術レポート作成部門

第1版 : IoTエリアネットワーク専門委員会 (SWG3604)

第2版 : IoTエリアネットワーク専門委員会 (SWG3604)

第 I 部 I o T エリアネットワーク向け有線伝送方式について

1. はじめに

本報告では、TR-1044「HEMS等に向けた伝送技術の概説」に続いて、HEMSやAMI(UAN)、BEMS、CEMSのみならず、IoTにまで拡大した各種の伝送方式に関して概説する。具体的には国内でのマルチベンダ環境の実現、海外への輸出も念頭に、国際標準化されているものやフォーラム等で検討されている新しい方式等を抽出した。スマートグリッドやホームネットワーク関係のみならずエリアネットワークまで拡張し紹介する。

ITU-Tが作成したスマートグリッド関連の有線伝送方式勧告としては、電力線、同軸ケーブル、電話線を使用する宅内広帯域伝送方式のITU-T勧告G.9960/G.9961「統合高速有線ホームネットワーク送受信器」と、同勧告の関連勧告であるG.9963、G.9964、G.9972及び屋外宅内狭帯域電力線伝送方式勧告であるG.9955、G.9956「狭帯域OFDM電力線通信送受信器」がある。

IEEEが作成したスマートグリッド関連の有線伝送方式規格としては第三世代「HD-PLC」方式が2010年にIEEE 1901として承認され、また新たに第四世代「HD-PLC」方式がIEEE 1901aとして2019年に承認された。また、マルチホップ技術(ITU-T G.9905)と合わせて使用することで、最大10ホップで一台のコントローラ当たり最大1024台のノードを管理することができる。これにより、住空間だけでなく、商業ビル、工場、トンネル、地下施設や街路灯など幅広い環境で適応可能となっている。

2. 要求条件

各アプリケーションの要求条件を以下に整理した。

2.1 HEMS

HEMS (Home Energy Management System) で有線伝送方式を使用する場合の要求条件としては以下のような特徴がある。

- ホーム内の様々な家電品(テレビ、クーラー、冷蔵庫、洗濯機、照明器具など)の消費電力の監視、表示、制御に使用される。
- ソーラパネル、蓄電器、EVなどが接続され、これらの監視、制御、表示のための情報転送に使用される。
- 数十台程度の家電品、エネルギー関連設備(ソーラパネルなど)が接続されることを想定する必要がある。
- 日本の家屋の平均延べ床面積である129 m²(一戸建て)、48m²(共同住宅)規模のエリアに対して十分に対応可能である必要がある。
- 宅内の各種伝送媒体(電力線、同軸ケーブル、電話線)を有効活用できることが望ましい。

特に以下の点について、配慮する必要がある。

(1) スマートメーターとの連携

- スマートメーターの情報を需要家が把握するための“見える化”などのため、スマートメーターで得られる情報を宅内で伝送しHGW、PC、表示装置などに転送すること(Bルート対応)が想定される。
- デマンドレスポンスなどのためにAMIから宅内の機器の消費電力情報の取得と制御を行う場合を想定する必要がある。

(2) 宅内センサーネットワークとの連携

- ホーム内の有線センサーネットワークの通信手段として使用される場合を想定する必要がある。
- 無線センサーネットワークと連携し集約するシンクノード間の通信手段として使用されることを想定する必要がある。

これらの各使用形態では、速度より強靱性（Robustness）がより重視される。伝送距離は最大30m程度を想定する必要がある。

2.2 AMI (UAN)

AMI (UAN) の特徴を以下に示す。AMI は MDMS (Meter Data Management System) とスマートメーター間を通信手段により接続し、情報転送や遠隔開閉器制御などを行う。配電線を使用した通信方式 (PLC) はその一部であるコンセントレータと各メータ間を接続する目的で使用される。

- 高密度住宅地、高層マンション内、集合住宅内、ビル内、地下街、郊外、山間地など様々な環境での使用を想定する必要がある。
- 電力線伝送方式の適用エリアと接続されるメータ数は技術的実現性の側面と経済性の側面から最適な方法が選択される筈であるが、現時点で適用領域が絞り込んでいる状況ではないので、ここでは、エリアとして 50m×50m、500m×500m、5km×5km の 3 ケース、メータ数として 10、50、500 を想定して検討した。
- AMI は 1 メータ (端末) あたりの情報量は少ないが接続される端末数は多い。(ここでは、情報量として、数十 kbps から数百 kbps を想定した)
- セキュリティの確保、効率的かつ迅速な通信ネットワークの維持、管理。10年以上の使用に耐えるシステムであることなどが要求される。

2.3 BEMS

ビルディング内のエネルギー制御 (冷暖房、換気、照明など)、検針などに使用する。左記以外に、防災などのシステムを統合することもある。端末数は数十から数百を想定する必要がある。ビル内の伝送距離として最大300m程度を想定する必要がある。この場合も、一般に速度より強靱性 (Robustness) が必要とされる。

2.4 CEMS

メガソーラなどを含む、半径数km程度の閉じた範囲で、発電、送電、配電も含めたエネルギーマネジメントシステムである。将来、直流送電技術が使用される可能性もある。送電、配電に使用されるケーブルが通信にも使用できることが望ましいが、今後の課題である。

3. 各種伝送媒体の特徴

3.1 電力線

電力線は宅内、屋外の有線伝送に使用可能であり、HEMS、AMI (UAN)、BEMS、CEMSなど電力関連の通信に広く使用されることが期待される。宅内配電線、屋外の高圧配電線、屋外の低圧配電線があり伝送路としての特性はそれぞれかなり異なる。

ここでは、HEMSでの使用が想定される“宅内配電線”とAMI (UAN) としての使用が想定される“屋外低圧配電線”について、より詳細にその特徴を比較検討した。

表 3-1 電力配電線ネットワークの構成要素

大分類	小分類	主な構成要素
宅内電力配電系	戸建	宅内電力配線、分電盤
	集合住宅	宅内電力配線、棟内電力配線、分電盤、変圧器
屋外電力配電系		屋外高圧配電線 (6.6kV、3相3線式など)
		屋外低圧配電線 (単相2線式、単相3線式など)
		引込線 (単相2線式、単相3線式など)
		変圧器
ビル内配電系		ビル棟内幹線配電線 (縦配線される場合と横方向敷設がある)
		変圧器
		分電盤

表 3-2 電力配電線ネットワークの通信路としての基本パラメータ

	トポロジ	分岐数	ネットワークのサイズ (注1)	代表的なケーブル	最大伝送路長	備考
宅内電力配電系	樹枝状方式	十から数十	~20m×20m	VVF (銅、断面積：14mm ² 、絶縁体：ビニル)	30m程度	
屋外電力配電系	樹枝状方式、ループ方式	数十から数百	50m×50m 500m×500m 5km×5km	OW (銅、断面積：38mm ² 、絶縁体：2mmビニル)	50m 500m 5km	ループは常時開路方式が多い
ビル内配電系	樹枝状方式	数十から数百、幹線と引込線から構成される	30m×30m 同一系統 (1変圧器下の配線) 当たり	OE (銅、断面積：60mm ² 、外径：5mm、絶縁体：2mmポリエチレン)	300m程度	異なる変圧器グループ間をCCU、ICUで接続し1コンセントレータ当たりのメータ数を増加させる案もある。

注1 数値は本検討での想定値

3.1.1 宅内電力配電系

宅内電力配電系については、単相3線式配線が多く使用されている、距離は最大30m程度である。分岐数は十から数十程度ある。家電機器からの雑音発生、異相間通信などへの対応が必要であるという特徴がある。宅内電力配電系では狭帯域PLC・広帯域PLCともに利用可能であるが、広帯域PLCについては、引込口における分電盤から負荷側において屋外、屋内ともに利用可能となっている。ただし、屋外は、屋内に比べて規制値が10dB低い。

ケーブルからの放射による妨害電波発生を避けるため、電波法により、使用できる周波数帯域が、狭帯域PLCでは10kHz~450kHz、広帯域PLCでは2MHz~30MHzに制限されている。伝送路としての性能は100Mbps~300Mbps程度であるが、異相間接続の有無、雑音状態、家電品のインピーダンスなどにより大きく変動する。伝送路の減衰量は使用周波数帯域内で大きく変動するが、性能を発揮させるためには、70dBから80dB程度の減衰量に対応できる受信器性能が必要。特性の悪い伝送路では直接接続ができない可能性もあるため、ITU-T勧告G.9905によるマルチホップルーティングをサポートしている。

3.1.2 屋外電力配電系

屋外配線の、コンセントレータとメータ間、メータとメータ間の伝送路の周波数特性はネットワークのサイズ、分岐数、使用ケーブルの構造、使用周波数帯域などにより異なる。

中サイズ以上のネットワークでは、一つのメータあるいはコンセントレータから全てのメータに直接接続することはできないため、マルチホップ機能が必須である。

表 3-3 必要ホップ数

		メータ数 50			メータ数 500		
メータの 配置	横	6			21		
	縦	7			22		
エリアサ イズ		大	中	小	大	中	小
	横 [m]	5000	500	50	5000	500	50
	縦 [m]	5000	500	50	5000	500	50
	3σホップス	4.0	3.3	3.3	13.9	11.3	6.5

ネットワークのエリアサイズ、メータ数にもよるが、物理速度（オーバーヘッド込み）1Mbps以上を確保。送受信器としては、メータ数50の場合で最大ホップ数4程度、メータ数500の場合で最大ホップ数14まで対応する必要がある。メータ数10以下であればほとんどのケースで、メータ間の直接通信が可能であるが、1ホップ程度が必要となる場合もある。

3.1.2.1 伝送路の特性

コンセントレータとメータ間、メータとメータ間の周波数特性はエリアサイズによりかなり異なる。エリアが波長程度以上になると分布定数ネットワークとしての振る舞いが顕著になり、周波数により損失が大きく変化する。

PLC送受信器はこうした周波数特性を持つ伝送路に対して対応できる特性を持つ必要がある。特に、特定の使用可能な周波数帯を選択して使用できるOFDM方式、あるいは同等の特性を持つ方式が望ましい。また、十分な性能を得るためには、サブキャリア帯域は10kHz以下であることや、各サブキャリアの最大伝送路損失は70dBから80dB以上でも信号受信が可能であることが必要。

3.1.3 「HD-PLC」方式

● 規格の概略

「HD-PLC」方式は、HD-PLC Allianceを中心に、IEEEで規格化され、第三世代「HD-PLC」方式が2010年にIEEE 1901として承認され、また新たに第四世代「HD-PLC」方式がIEEE 1901aとして2019年に承認された。IEEE 1901aは様々なIoTに適した標準仕様となるように検討された結果、IEEE 1901を拡張して、さらなる高速化（同軸利用で最大1Gbps）と長距離化（通信距離 最大2倍*ケーブルに依存）を実現した仕様となっている。

HD-PLC Allianceは2007年9月に設立され、様々な分野の企業で構成されるコンソーシアムである。現在、18社と1団体（LONMARK JAPAN）でメンバー構成されている。

● 主要規格

- ・通信速度: 最大1Gbps
- ・変調方式: Wavelet OFDM (2PAM~32PAM)
- ・誤り訂正: リードソロモン符号、接続符号、LDPC-CC符号の併用
- ・周波数: 2~28MHz (標準モード)、2~56MHz (2倍モード)、2~112MHz (IEEE: up to 100MHz) (4倍モード)
- ・ネットワーク構成: コントローラ 1台あたり、最大128台のノードと接続可能
- ・モードとチャンネルID: 9モード(XB1-1,2,4Ch, XB2-1,2,4Ch, XB4-1,2,4Ch), 15チャンネルID(X-1, ..., 15)

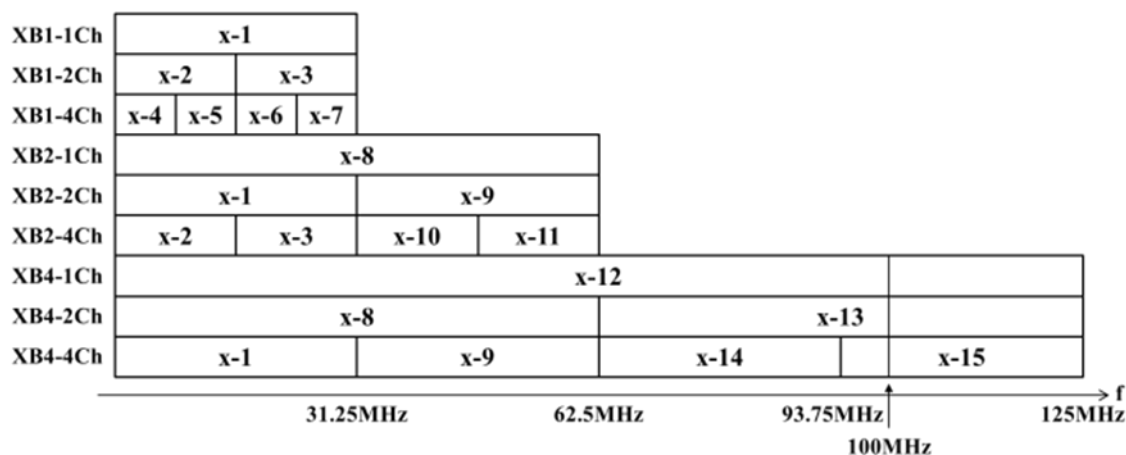


図 3-1 各モードに設定されているチャンネルIDと周波数の関係
 HC-PLC ALLIANCE資料、「HD-PLC」Quatro Core の概要より抜粋

● 特徴

IEEE 1901aのモードには、使用する周波数帯域と帯域内に存在するチャンネル数の組合せに応じて9種のモードがある。使用する周波数帯域には、IEEE 1901仕様と同じSCW (Single Channel Wavelet) band (XB1) と、その2倍の帯域であるExtended band 2 (XB2)、および4倍の帯域であるExtended band 4 (XB4) の3種があり、それぞれの帯域内に1、2、4つのチャンネルが存在する。各モードに設定されているチャンネルIDと周波数の関係を図1に示す。XB1-1Chモード (Channel ID : x-1) はIEEE 1901仕様と同じであり、IEEE 1901準拠の端末との間で通信の互換性が保たれている。また、XB1-2Chモードでは、シンボル長がXB1-1Chモードの2倍、すなわちサブキャリア間隔がXB1-1Chモードの1/2倍となり、周波数オフセットを行うことにより2つのチャンネル (Channel ID : x-2、x-3) を利用可能である。同様に、同じWaveletエンジンを用いて、シンボル長の変更と周波数オフセットの組合せにより15のチャンネルを形成可能であり、ユーザは伝送路の状態に応じて最適な使用チャンネルを選択できる。

また、マルチホップ技術 (ITU-T G.9905) と合わせて使用することで、最大10ホップで一台のコントローラ当たり最大1024台のノードを管理することができる。これにより、住空間だけでなく、商業ビル、工場、トンネル、地下施設や街路灯など幅広い環境で適応可能となっている。

最後に、本技術は電力線だけでなく専用線 (同軸線やツイストペアの制御線など) 利用が可能な技術となっている。

3.1.4 ITU-Tにおける検討

ITU-Tにおいては、電力線を使用した標準として、狭帯域PLCと呼ばれる技術と広帯域PLCと呼ばれる技術の二つが標準化されている。

(1) 狭帯域PLC技術

ITU-T G.990xシリーズとして勧告化されているものであり、9~535kHzの周波数帯を使った電力線通信技術に従ったものである。特に、G.9903として標準化されたG3-PLC技術についてはフランスの大手電力事業者がスマートメーターの収容に使われているほか、ARIB規定に準拠する日本仕様はAnnex Fに反映されている。また、日本提案のルーティング方式G.9905が採用されている。

(2) 広帯域PLC技術

ITU-T G.996xシリーズとして勧告化されているものであり、電力線のほか電話線、同軸線、プラスチックケーブル (POF) 等の伝送媒体を対象としている。電力線に対しては、25MHz、50MHz、100MHz帯の周波数帯域を使う伝送技術標準として、周波数およびPSD関連規定がG.9964、システム/物理層規定がG.9960、データリンク層規定

がG.9961が中心となる勧告として規定されている。当初は、ホームネットワークでの適用が主なターゲットとされていたものの、アクセス網、電力網における最適な伝送技術として考えられている。

特に最近では、電力線網（スマートグリッド）におけるスマートゲートウェイ（通信網におけるHEMS相当機器）の収容に向けた検討などが進められており、OFDM変調方式のサブキャリア数の見直しも含めた新たな規定についての議論が行われている。

(3) 新規勧告案G.iot

上述した広帯域PLC技術によるG.996xシリーズ標準では、25MHz（“Low Complexity Profile”）を始めとした三つの周波数帯域を持つプロファイルが規定されている。このG.996xシリーズ標準をベースとしつつ、ユースケースとしてIoTスマートホームへの適用を想定した標準化検討の開始が2019年7月に合意された。現時点、具体的な規定内容に関する合意はなされていない状況であり、インプリする上での簡易化も含めたIoT各種要件を考慮した検討が進められているところである。

3.2 宅内同軸ケーブル

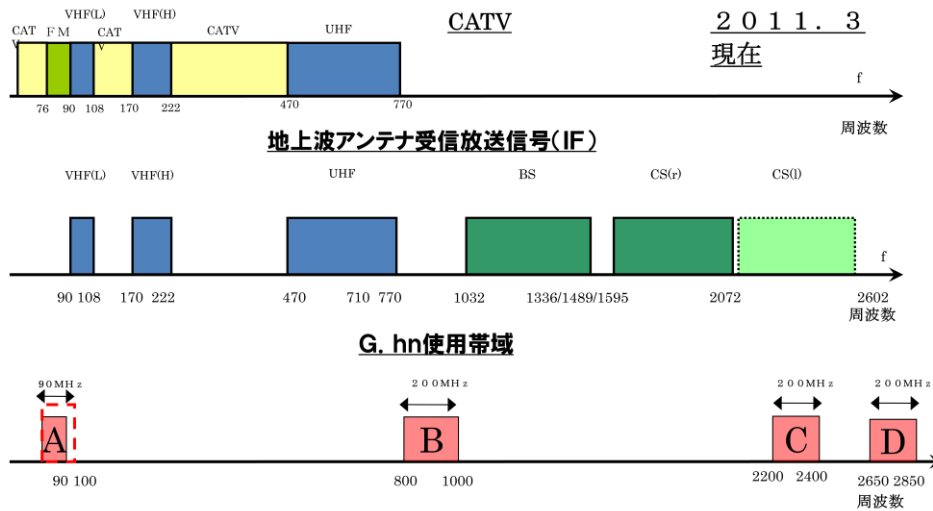


図 3-2 同軸ケーブルの利用状況と HEMS、BEMS の使用可能周波数領域

注：G.9964 Amd.1 より抜粋、2016年2月制定で200MHzベースバンド向けプロファイルが追加（帯域幅190MHz）

HEMSとして宅内で使用できる伝送媒体として、前章の宅内電力配線が主に使用されると予測されるが、本章の宅内同軸ケーブル配線は電力線では接続が困難な場合の補助手段として使用できる。

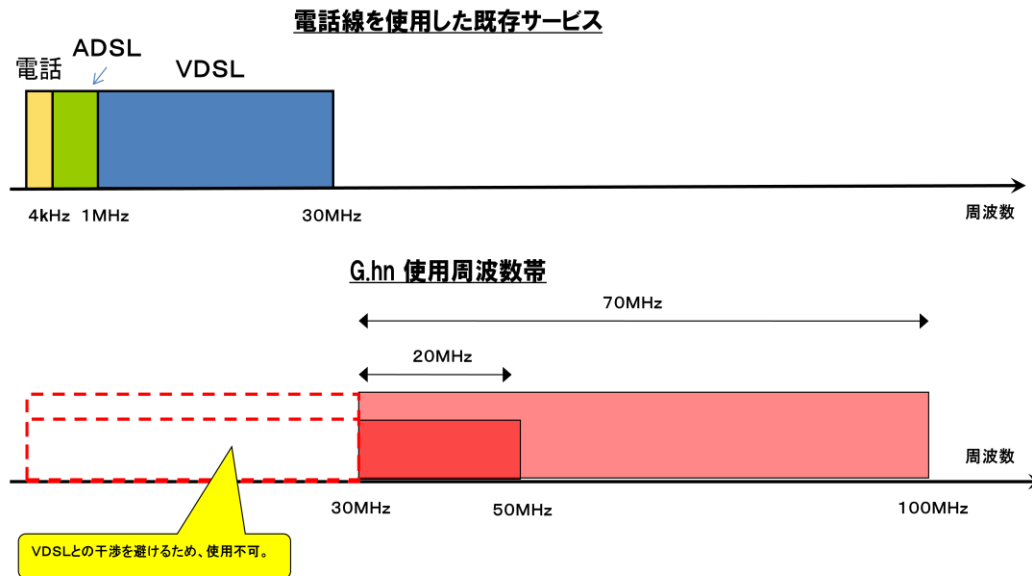
アンテナ受信TV、CATVに使用されている同軸ケーブルを使用する場合には、同軸ケーブルを共用するテレビ信号等、他のサービスと使用周波数帯域が重ならないようにする必要がある。伝送路損失は最大60dB程度に対応する必要がある。サブキャリア間隔600kHz以下であることが伝送路の性能を発揮させるために必要。

600Mbpsから2Gbps程度の物理速度が期待できる。（HEMS用としては数十kbps～数百kbpsで十分であるが）

表 3-4 宅内同軸ネットワークの構成要素

	トポロジー	分岐数	ネットワークのサイズ	代表的なケーブル	最大伝送路長	備考
1	樹枝状方式	0～3	最大30m×30m	S-4C-FBなど	30m程度	分岐はスプリッタを使用して行われる

3.3 宅内電話線



28

図 3-3 電話線の利用状況と HEMS, BEMS の使用可能周波数領域

注：G.9964 Amd.2 より抜粋、2016年9月制定により、200MHz ベースバンド向けプロファイルが追加。

電話線はアナログ電話、ADSL、VDSL で使用されている場合には、それらの周波数帯域を避ける必要がある。特に、電話線が VDSL で使用されている場合には 30MHz 以下の周波数は使用できない。

上記の VDSL 信号を避けるために 30MHz 以上を使用するという条件でも、宅内伝送路として電話線を使用した場合、800Mbps 以上の物理速度が期待できる。

3.4 宅内LANケーブル (CATケーブル)

最近、Ethernet用LANケーブルが配線されている住宅もあるので、LANケーブルを使用したHEMSも選択肢として存在する。100Mbps、1Gbpsの物理速度を提供する。通信可能な距離は約100mである。

3.5 シングル・ペア・イーサネット方式

(1) 規格の概要

Single Pair Ethernet (以下、SPE) は、IEEE802.3委員会にて規格化された1対のバランスされたツイスト・ペア・ケーブルを用いた通信及び給電規格によって構成された規格である。

これまでのイーサネット同様に、1000/100/10Mbpsの通信及びDC給電について規定されており、他のIEEE802.3規格と同じくイーサネットファミリーを構成する。

その為、既存のイーサネットで実現しているサービスは、そのままSPE上で実現することが出来る点が大きなメリットである。

本方式は自動車業界を中心とするOPEN Allianceにて車載向けの用途について検討されて同団体からIEEE802.3へ各種仕様要件が提出されている点が特徴的である。

また特にIEEE802.3cg(S/L)はビル・工場・プラント等での監視、制御等の用途としても有望視されている。

DC給電機能については最大50Wの省電力でありながら、SPE上に重畳出来るため個別の電源ラインを必要としない為エコシステムとしても期待されている。

同シングル・ペア・イーサネット各規格について以下に示す。

(2) IEEE802.3bw (100BASE-T1)

SPEケーブルを用いて100Mbps全二重通信方式を実現する規格 (2015年制定)

(3) IEEE802.3bp (1000BASE-T1)

SPEケーブルを用いて1000Mbps全二重通信方式を実現する規格 (2016年制定)

(4) IEEE802.3bu (Power over Data Line)

SPEケーブルを用いてDC48/24/12Vの給電を行う規格 (2018年制定)

(5) IEEE802.3cg (10BASE-T1)

・ IEEE802.3cg(s)

SPEケーブル上で10MbpsのP-P/P-MP通信を実現する規格。 (2019年11月制定)

・ IEEE802.3cg(L)

SPEケーブル上で10MbpsのP-P通信を実現する規格。

また同規格にてDC48V24Vの給電を行う規格を合わせて規定。

4. 上位層との接続

物理層伝送方式を国内 HEMS, AMI (UAN) で使用可能とするためには、ECHONET Lite をサポートする必要がある。物理層として、イーサネット MAC、IPv4/IPv6 のいずれかのプロトコル対応機能を持つことにより可能となる。

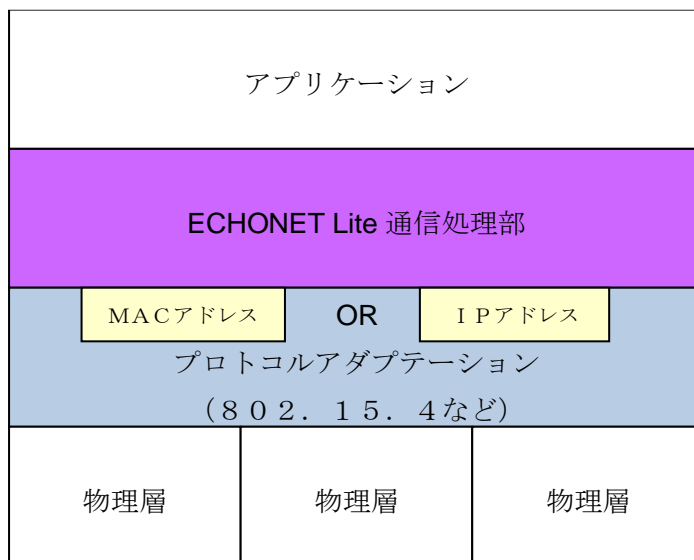


図 4-1 ECHONET Lite との接続 (ECHONET Consortium WEB より)

● 標準化動向：

有線通信物理層の国際標準化は主に IEC, ITU-T, IEEE で行われている。ITU-T, IEEE のスマートグリッド関連の物理層、MAC 層の標準化はほぼ完了しており安定した状況にある。

5. 伝送方式

3章の各伝送媒体上での通信のために使用される各種通信技術を以下に示す。通信媒体の特徴に応じて、これらの機能の組み合わせとパラメータの最適化が行われる。

日本国内での適用を考えた場合に、各規格の中で適切なパラメータ選択を行う事が出来る仕様であることが重要である。

表 5-1 電力線、同軸ケーブル、電話線伝送の主要方式パラメータ

	PHY 層/MAC 層 方式パラメータ	説明
使用周波数帯域	開始周波数 終了周波数	必要機能性能の実現、伝送媒体、場所(国地域、屋内屋外など)を考慮し、適切な値を選択する必要がある
送信電力	PSD マスクで定義	同上
変調方式	マルチキャリア変調方式 (OFDM/Wavelet)	いずれの伝送媒体でもチャンネル損失が帯域内で大きく変化するため、平坦でない伝送路への適応力が高いマルチキャリア変調方式が適している。
サブキャリア変調方式	差動変調 同期変調	同期変調の方が約 2.5dB SNR が良くなるが信号処理がやや複雑になる。
誤り訂正方式	LDPC/Turbo 符号 リードソロモン符号 (RS) + 畳み込み符号 (CC)	LDPC/Turbo 符号は誤り訂正能力が高いが信号処理量が多い。RS+CC は訂正能力が LDPC/Turbo 符号に劣るが、信号処理量は少ない。一般に広帯域 PLC、同軸伝送、電話線伝送では前者。狭帯域 PLC には後者が適している。 ITU-T 勧告 G.9955, IEEE 標準 P1901.2 も両者を使い分けている。
再送機能		インパルス雑音などによるバースト誤りが発生し易いチャンネルや伝送特性が瞬時に変化するチャンネルに対して有効。
インタリーブ機能		インパルス雑音対策に使用する。
マルチホップ(リレー)機能	ホップ数、ルーティング方式	屋外の配電線を使用した低速 PLC 方式による AMI アクセスシステムでメータ数が多い場合(16 台以上程度)は必須である。目安として 9 ノード以下の場合には、マルチホップ機能は必須ではない。宅内の広帯域 PLC 方式では、必須ではないが、この機能があることが望ましい。
暗号化	AES-128	AES-128 が一般に使用される。

6. 各種有線伝送規格の比較

(別紙1)

7. 課題

有線技術を用いた HEMS, AMI に関連した今後解決すべき技術的課題としては以下がある。

(1) 宅内／屋外の PLC 方式間の相互干渉に関する課題（電力線伝送）

宅内／屋外の電力線伝送システムは運用主体が異なる可能性がある。その場合両者が同一周波数帯域(10kHz～450kHz)を使用すると、相互干渉の問題が発生するため、なんらかの対応が必要。

(2) 同一帯域を使用する異なる方式の共存（電力線伝送）

高速 PLC については ITU-T においては G.9972 の中で、また、IEEE では IEEE1901 の中で時分割による方式である ISP (Inter System Protocol) が仕様化されている。

低速 PLC の共存の方式としては、G3-PLC (G.9903) において以下の二つの方式が規定されている。なお、識別用プリアンプル (cEIFS) により方式を識別する方式は、IEEE1901.2 に記述されたものである。

- 周波数分割
- 共存用のプリアンプルで方式を識別

(3) 宅内同軸ケーブルからの電磁波放射問題（同軸ケーブル）

宅内同軸ケーブルを使用したホームネットワークに共通の課題として、妨害電磁波放射がある。特にUHFアンテナからの逆放射の影響評価が課題となっている。ITU-T勧告G.9960ではB, C, Dの各周波数が日本国内で使用可能な周波数帯域として、Annex C（日本仕様）の中で定義されている。

第Ⅱ部 I o Tエリアネットワーク向け無線伝送方式について

1. はじめに

第Ⅰ部に続いて、HEMSやAMI (UAN) 、BEMS、CEMSのみならず、IoTにまで拡大したエリアネットワークに係る各種の無線伝送方式に関して概説する。第Ⅰ部と同様に技術の一覧をまとめて、別紙2に示す。要求条件等については、第Ⅰ部で触れたので、ここでは、個別の各種無線伝送技術に関して概説する。

2. 各無線方式の概説

2.1 Wi-Fi方式

2.1.1 規格の概要

Wi-Fi (wireless fidelity) は、Wi-Fi Alliance によって IEEE802.11 シリーズ (802.11a/802.11b/802.11g/802.11n 等) を利用した無線 LAN 機器間の相互接続性を認証されたこと (Wi-Fi Certified) を示すブランド名である。

通信規格であるIEEE 802.11シリーズを利用した無線機器間の相互接続性等について、Wi-Fi Alliance (米国に本拠を置く業界団体) によって認定された機器には、Wi-Fiロゴの使用が許可される。

その後2013年に標準化した「IEEE 802.11ac」の進化版として、標準化団体 IEEE (米電気電子技術者協会) のタスクグループ (TG) において審議が進んでいるのが「IEEE 802.11ax」等、新しい規格が審議されている。

また、無線 LAN の普及促進を図る業界団体、Wi-Fi Alliance が無線 LAN を世代別に見分けるために 2018年10月に新しい呼び方を命名し、IEEE 802.11ax相当を「Wi-Fi 6」、つまり無線 LANの第6世代に当たる規格とし、最近では、「Wi-Fi 6E」として6GHz帯域を追加されたモデルもあるが、日本国内では使用できないので、「Wi-Fi 6(E)」とした。その他 802.11beの検討も始まり、次世代ということでWi-Fi 7が予定されている。同時に「802.11ac」製品は「Wi-Fi 5」、「802.11n」製品は「Wi-Fi 4」と呼ばれる。それより前の世代の IEEE 規格についても正式ではないが、俗称として「802.11g」は「Wi-Fi 3」、「802.11a」は「Wi-Fi 2」、「802.11b」は「Wi-Fi 1」と呼ばれている。

近年の動向として、IEEE 802.11axの他、下記の方式が新しく台頭してきている。以下、新しい各規格について追記した。これらの変遷について表2-1に示す。

◆IEEE 802.11ax (Wi-Fi Alliance の認証プログラムでは「Wi-Fi 6」)

◆IEEE 802.11ah (Wi-Fi Alliance の認証プログラムでは「Wi-Fi HaLow」:法整備ができたので、国内では商用化を検討中。

◆IEEE 802.11ay (Wi-Fi Alliance の認証プログラムでは「WiGig」)

◆IEEE 802.11be (Wi-Fi Alliance の認証プログラムでは「Wi-Fi 7」を予定

表 2-1 IEEE802.11 の変遷

規格名	利用周波数帯 (Hz)	最高伝送レート	規格化	Wi-Fi Alliance 呼称
802.11	2.4G	2Mbps	1997年6月	
802.11b	2.4G	11Mbps	1999年9月	(Wi-Fi 1)
802.11a	5G	54Mbps	1999年9月	(Wi-Fi 2)
802.11g	2.4G	54Mbps	2003年6月	(Wi-Fi 3)
802.11n	2.4G、5G	600Mbps	2009年9月	Wi-Fi 4
802.11ad	60G	6.757Gbps	2013年1月	WiGig
802.11ac	5G	6.933Gbps	2013年12月	Wi-Fi 5
802.11ax	2.4G、5G、(6G)	10Gbps	2021年2月	Wi-Fi 6(E)
802.11ah	920M	数 Mbps	2016年	Wi-Fi HaLow
802.11be	2.4G、5G	46Gbps	2024年5月予定	Wi-Fi 7

注：Wi-Fi Alliance呼称中の () 分は俗称

2.1.2 Wi-Fi と 無線LAN の定義

「無線 LAN」(IEEE802.11 規格の無線 LAN) と「Wi-Fi」は、本来定義が異なるものである。Wi-Fi CERTIFIED ロゴを製品に表示するためには認証試験を受け合格する必要がある、それがなされていないものは「Wi-Fi」ではない。Wi-Fi Alliance が定めた WPA version 1 仕様は IEEE 802.11 のドラフトをもとにした仕様であり、正式の IEEE 802.11 とは厳密には異なっている (WPA version 2 は IEEE 802.11 を満たしている)。

2.1.3 IEEE802.11b

免許不要で扱える 2.4GHz ISM帯の周波数帯域を利用する。日本国内で利用できるチャンネル数は、中心周波数 2.412GHz の 1ch から 同 2.472GHz の 13ch まで 5MHz 刻みの 1-13ch と、同2.484GHz の14ch の計14ch である。

ただし、一つのチャンネル幅の規格が 22MHz であるため、干渉なしで通信できる最大チャンネル数は 4個となる。

2.1.4 IEEE802.11a

5GHz帯の周波数帯域を利用する。日本国内で利用できるチャンネルは以下の通り。

表 2-2 IEEE802.11a 利用無線チャンネル表

タイプ	チャンネル	屋外利用	備考 (中心周波数 GHz)
W52	36、40、44、48	×	5.18、5.20、5.22、5.24
W53	52、56、60、64	×	5.26、5.28、5.30、5.32
W56	100、104、108、・・・、140	○	5.50、5.52、5.54、・・・、5.70

2.1.5 IEEE802.11ac

5GHz帯の周波数帯を利用し、日本国内で利用できるチャンネルはIEEE802.11aに同じである。IEEEでの標準化は2014年1月に完了しており、変調方式の多値化、チャンネル幅の拡大、MIMO (Multiple Input Multiple Output)のストリーム数増大、MU-MIMO (Multi User MIMO)対応により、伝送速度の高速化を実現している。

Wi-Fiアライアンスによる認証は2フェーズに分けて進められており、2013年6月に認証が開始されたWave1と、2016年に認証開始予定のWave2が存在する。Wave1は、ストリーム数は最大3、MU-MIMO未対応でSU-MIMO (Single User-MIMO)のみ、チャンネル幅は最大80MHzで、最大物理伝送速度は1.3Gbpsである。Wave2は、ストリーム数は最大4、MU-MIMO対応、チャンネル幅は最大160MHzで、最大物理伝送速度は3.5Gbpsとすることが検討されている。

2.1.6 IEEE802.11ah

IoT向けの無線LAN規格として2016年9月に、既存インフラのサブGHz帯の免許不要周波数帯を利用する標準化として完了した。従来の2.4GHz帯、5GHz帯無線LANに比較して、通信距離の拡大、省電力化、同時接続数の拡大を図ることが可能となる。帯域幅は1MHz、2MHz、4MHz、8MHz、16MHzの規定で、1MHz、2MHzへの対応が必須、変調方式はOFDMで、伝送速度は1MHz幅で150kbpsとなる見込みである。

802.11ahは、Wi-Fi HaLowという名前だけでなく、仕様は無線LANの仲間で、電波の免許を取得する必要がない「アンライセンス」の規格の既存の無線LAN同等の規格である802.11acをカスタマイズしたものである。仕様のにも802.11acの物理層の動作クロック周波数を1/10（ダウンスクロック）にしたもので、通信距離も無線LANのように見通しの良い所では数百メートル程度通信可能で、無線LANのチップは設計からやり直す必要がなく安価に作れるとされており、拡大が期待されている。

しかし、現状利用する電波の周波数帯である920MHz帯を利用するための法規制が整っていないことから、今後実用化に向けた関係機関などへの働き掛けを強めるため、2019年5月からは国内での実証実験を始めている。

2.1.7 IEEE802.11ax

802.11axは802.11acから物理層について大きな仕様変更が行われている。ただし同802.11a/b/g/n/acといった旧規格に準拠する機器との下位互換性は確保されている。2020.10現在、年内にも標準化が完了する（承認される）見通しとなっている。下記に主な技術的変更点を記載する。

◆デュアルバンド

5GHzの無線周波数帯でしか運用できなかった802.11acとは異なり、2.4GHz帯と5GHz帯の両方（マルチバンド）で運用が可能である。マルチバンドにより利用できるチャンネルが増えて接続しやすくなる。また2.4GHz帯は5GHz帯と比べて速度は遅いものの、カバー範囲は広い。

IoTデバイスでは、大量のデータを高速転送するよりも、少量のデータを離れた場所から転送する用途が主流であるため、802.11axでは、IoTデバイスには2.4GHz帯を割り当て、高速のデータ伝送速度を必要とするデバイスには5GHz帯を割り当てる、と言うやり方が可能になる。

◆直交周波数分割多元接続（OFDMA）

本技術の中でも極めて期待値が高いOFDMAは、単一のAPのチャンネルを要素別に小型のリソースユニット（RU）に分割する。RUを複数のユーザに配分することで、上り（ユーザ端末からAPへのデータ送信）と下り（APからユーザ端末へのデータ送信）の両方で複数のデバイスとAPを同時に通信できるようにできる。

◆Target Wake Time（TWT）

TWTはAPとユーザ端末間で通信するタイミングを事前に決定する仕組みである。APはユーザ端末と接続するタイミング以外、スリープ状態にできる。IoTデバイスは一般的に、データ転送の頻度が比較的少ない。例えばスマートサーモスタットは、気象データを1日に1回クラウドに送信するだけで済む場合がほとんどである。TWTの機能を使うと、企業等は営業時間外の夜間などトラフィックの少ない時間帯にデータを転送するよう、スケジュールを組めて、ネットワークの混雑解消とユーザデバイスのバッテリー消費量削減の両方を期待できる。

2.1.8 IEEE802.11ad/ay (WiGig)

手軽に、同程度の伝送速度を実現できないかというのが WiGigを開発する当初の動機で、その背景としては解像度 1920×1080 ピクセル (フルHD) の映像を無線で飛ばしたい、と言う目的であった。しかし2007年当時の想定では、「IEEE 802.11n」で何とか転送して表示できる程度であった。

伝送速度を高めつつ遅延を減らす、つまり余分なエンコードや複雑な技法を使わずに帯域を確保する一番の早道は、利用する周波数帯を引き上げることであるということから60GHz帯を利用するアイデアが登場した。その理由は幾つかあるが、1つに60GHz帯は主要国で比較的共通する周波数 (57GHz～64GHz) を取れるので、単一の規格でカバーしやすいという事情がある。また、利用できる周波数帯が広いので、複雑なエンコーディングをしなくても性能を出しやすい。占有帯域で比較してみると IEEE802.11acはチャンネル当たり20MHzの帯域なのに対し、IEEE802.11adでは最終的にチャンネル当たり2.16GHzの帯域を確保できる。帯域が100倍になれば、計算上はそのまま伝送速度も100倍になる。

デメリットとしては電波の到達距離が短いことである。障害物のない見通し状態では最大数十メートルでも到達可能だが、屋内等においては壁面や家具が吸収して通信不能になってしまい、現実問題としての到達距離は10メートル以下で、家庭内LANとして使うためには問題がある。ただし、ワイヤレスディスプレイ用と考えた場合、実際の利用には問題ないという判断が一般的であった。

この到達距離の割り切りもあって、WiGigの開発は順調に進み、2012年に「IEEE 802.11ad-2012」として公開したが、仕様が出たものの、準拠した製品は少ない。Wireless Gigabit Allianceは2013年1月にWi-Fi Allianceに吸収合併されており、現在はWi-Fi AllianceがWiGigのプロモーションも行っている。

IEEE 802.11adの次の規格として、2015年から標準化作業が始まったのが「IEEE 802.11ay」である。2020.10現在 Draft 5.0段階まで進み、2020年中に最終仕様が決まる予定である。基本的な技術はIEEE 802.11adに近いが、拡張版というよりもIEEE 802.11adの電波到達距離を伸ばして無線LAN向けに作り直したというのが実情に近い。目標は28Gbps程度の伝送速度と、最低でも100メートルの到達距離 (屋外における見通し状態) の実現である。28Gbpsというのは、非圧縮の8K映像 (7,680×4,320ピクセル、60fps、24bitカラー) のリアルタイム転送を想定しており、遅延時間は10ms以内に抑えるとしている。下記に主な改良点を記載する。

- ◆ MIMOの実装とビームフォーミングの利用
- ◆ 256QAMの利用
- ◆ チャンネルボンディングの利用

2.1.9 IEEE802.11be (Wi-Fi 7)

2019年5月に発足したタスク・グループBE (TGbe) では、IEEE 802.11axの次のメインストリーム規格として、MAC SAP (Service Access Point) *1における30 Gbit/s以上の最高スループットの実現、低遅延・低ジッタ通信の実現をターゲットとするIEEE 802.11beの標準規格化を2024年5月の完了をめざして活動している。ベースとなる技術は802.11axであり、2.4 GHz帯、5 GHz帯に加え、6 GHzでの利用を想定し、静止状態および歩行者の速度での利用環境下をターゲットとしている。ドラフト版が2021年3月、2024年初頭を目処に確定版の仕様をリリースする計画となっている。主な技術を以下に示す。

■ 周波数利用効率向上・広帯域化技術

TGbeでは最大1024QAM (Quadrature Amplitude Modulation) であった信号変調多値数を4096QAMに拡張、Multiple Input Multiple Output (MIMO) の最大ストリーム多重数を8から16へ拡張する検討がされている。これにより、これまでのIEEE 802.11axよりさらなる高速化を見込むことが可能である。同時にLong Term Evolution (LTE) 等で利用

されている、再送時に破損したデータのみを送信する Hybrid Automatic Repeat Request (HARQ) 機能を採用し、データ再送の効率化も図っており、最大利用帯域幅を従来の160 MHzから320 MHzに拡張することも検討されている。

■マルチリンク伝送技術

TGbeではこれまではなかった新しい機構としてマルチリンク伝送を規定予定である。従来のIEEE 802.11無線LAN規格では、単一のアクセスポイント (AP*2) または端末 (STA*3) はそれぞれが独立して動作を行っていたが、マルチリンク伝送ではマルチリンクデバイス (MLD) と呼ばれる1つの筐体の実装された複数の無線機能を連携・協調させ、MLD間 (複数のAPを搭載するAP MLDと複数のSTAを搭載するSTA MLD間) で伝送路 (リンク) を複数確立し利用することで、高速・高信頼な伝送を可能にする。マルチリンク伝送では異なるデータを並列伝送し伝送速度を向上させる、同一のデータを並列伝送しデータ受信の信頼性を向上させる、制御情報や高優先データを送信する際、もっとも品質の良いリンクを選択する等の伝送形態が考えられる。

■マルチAP協調・連携技術

TGbeでは複数のAPが協調し、複数の端末と同時送受信を行うマルチAP協調・連携技術を規定予定である。マルチAP協調・連携技術として、複数のAPが協調し、各APの送信電力等のパラメータを最適化する Coordinated Spatial Reuse (Co-SR)、各APが同一の時間、周波数で送信対象となるそれぞれのSTAに干渉が生じないように同時送信を行うCoordinated Beamforming (Co-BF)、送信対象のSTAが複数のAPから送信されるデータを合成受信可能となるような協調伝送を行うJoint Transmission (JT)、複数のAP間でOFDMAのリソース割当を柔軟に行う Coordinated Orthogonal Frequency Division Multiple Access (Co-OFDMA) 等が議論されている。

■低遅延・低ジッタ化技術

TGbeでは競合する端末数が多い場合やシステム内外の干渉が多い場合においても低遅延・低ジッタ通信が可能となるような技術を規定予定で、具体的には、各リンクの遅延特性を通知可能な機能や、低遅延を要するトラフィックの送信機会を定期的に確保する技術、IEEE 802.1イーサネット規格の低遅延化機能であるTime Sensitive Network (TSN) のIEEE 802.11との連結技術が議論されている。

■その他の機能

ほかにも、緊急通報を実現する機構 [National Security and Emergency Preparedness (NS/EP)] や、APがSTA間の直接通信をサポートする機能等が議論されている。

2.2 Bluetooth方式

● 規格の概要

数mから数十m程度の距離の情報機器間で、電波を使い簡易な情報のやりとりを行うのに使用される。当初エリクソン、インテル、IBM (現 レノボ)、ノキア、東芝の5社によって策定され、現在は9社がプロモーター企業となっている。IEEEでの規格名は、IEEE 802.15.1である。

2.4GHz帯を使用してPC (主にノートパソコン) 等のマウス、キーボードをはじめ、携帯電話、PHS、スマートフォン、PDAでの文字情報や音声情報といった比較的低速のデジタル情報の無線通信を行う用途に採用されている。OSIレイヤでは、レイヤ1~2に該当する。

● 標準規格団体

1998年に設立された団体でBluetooth SIG (Special Interest Group) で、世界の一流企業から構成されるメンバー企業間でBluetooth技術を取りまとめる非営利事業者団体で、ワシントン州カークランドに本拠地を置き、2018年末で34,465社 (南北アメリカ34%、アジア太平洋36%、ヨーロッパ・中東・アフリカ29%) が参加し15のWG、70のPJ、委員会・WG参加会社は2,012団体となっており、仕様策定、認証、普及に取り組んでいる。

● 変復調方式

周波数ホッピングスペクトラム拡散方式

※周波数ホッピングについて；広帯域（2402～2480MHz）の中に1MHz毎に79個のチャンネルを設定し、周波数ホッピング方式（FHSS：Frequency Hopping Spread Spectrum）により、毎秒1600回のチャンネル切り替えを行いながら通信を行う。また、キャリアセンスは使用しない。

● 伝送速度

表 2-3 各種バージョンにおける伝送速度関係

策定日	バージョン (+OPTION)	非対称通信速度 (上り/下り)	(対称) 通信速度	補足
1999.7	1.x	723.2kbps/57.6kbps	432.6kbps	1.1:普及版 1.2:無線LANとの干渉対策が盛り込まれた
2004.11	2.x	723.2kbps/57.6kbps	432.6kbps	
2004.11	2.x+EDR	2178.1kbps/177.1kbps	1306.9kbps	Enhanced Data Rate (EDR) を追加
2009.4	3.x	723.2kbps/57.6kbps	432.6kbps	
2009.4	3.x+EDR	2178.1kbps/177.1kbps	1306.9kbps	
2009.4	3.0+HS		24Mbps	802.11 PAL、High Speed (HS) を追加
2009.12	4.0		1Mbps	Bluetooth Low Energyを追加
2014.12	4.2		1Mbps	4.0に比べアプリケーションデータの転送速度が向上（260kbps⇒650kbps）
2016.12	5.0		Bluetooth Low Energy のデータレートが 2M/1M/500k/125kbps	2及び1Mbpsは従来通り到達距離が 100m、125kbpsは到達距離が400mとなった。メッシュネットワークにも対応
2019.1	5.1			方向探知機能を追加

注：4.1からIPv6対応が盛り込まれている

Bluetooth規格は異なるバージョンによっても基本的には後方互換性を持つが、オプション（EDR、HS）などについては個別に対応が必要となる。また、バージョンだけでなく、機器は同じプロファイルに対応している必要がある。

● 伝送距離

<BR/EDR>			<LE>
[クラス]	[出力]	[距離]	[出力]
・ class1	100mW	100m	100mW
・ class1.5	-	-	10mW
・ class2	2.5mW	10m	2.5mW
・ class3	1mW	1m	1mW

電波強度(出力)のクラスによる。

● セキュリティ認証など

■暗号化：Bluetoothプロファイル（GAP：Generic Access Profile）にて機器の接続/認証/暗号化を行っている。

誤り訂正は、前方エラー訂正（FEC：Forward Error Correction）にて実施しており、1/3レートFEC、2/3レートFEC、自動再送（ARQ：Automatic Repeat reQuest）などがある。

Bluetoothのセキュリティは下記の様に2段階構成になっている。

- ・一段目：ペアリングを実行してリンクキーを生成する。
- ・二段目：プロファイル接続時にリンクキーを使い、無線の暗号化を行う。

また、Bluetoothには、BR/EDR(Classic)とLE(Low Energy)の二種類の無線規格が存在し、ClassicとLEではセキュリティについてもそれぞれに異なる仕様が規定されている。

<Bluetooth Classic の場合>

- ・ペアリング=暗号化の実装は製品として必須。仕様上は非暗号化通信も可能だが、それを用いた実装では製品ロゴ認可を通らない。
- ・ペアリング方式には PIN (2.0 以前)と SSP (2.1 以降)があるが、PIN は既に廃止され互換性のためだけに残っている。
- ・SSP モードでは JustWorks(認証なし)、または Passkey Entry, Numeric Comparison, OOB のペアリング認証を伴う。
- ・暗号アルゴリズムは E0 を使用、4.2 以降ではオプションとして AES-CCM が追加。

<Bluetooth LE の場合>

- ・ペアリング=暗号化の必要性は、デバイスのロール(Broadcaster/Observer/Peripheral/Central)とアトリビュートの属性(Privacy Feature)に従う。
- ・ペアリング方式には LE Legacy (4.1 以前)と LE Secure Connections (4.2 以降)がある。
- ・ペアリング認証は Bluetooth Classic とほぼ共通。ただし LE Legacy Pairing では Numeric Comparison をサポートしない。
- ・暗号アルゴリズムは AES-CCM を使用。
- ・「Privacy Feature」対応実装の場合、乱数アドレスを用いることで物理アドレスの暴露を最少化できる。



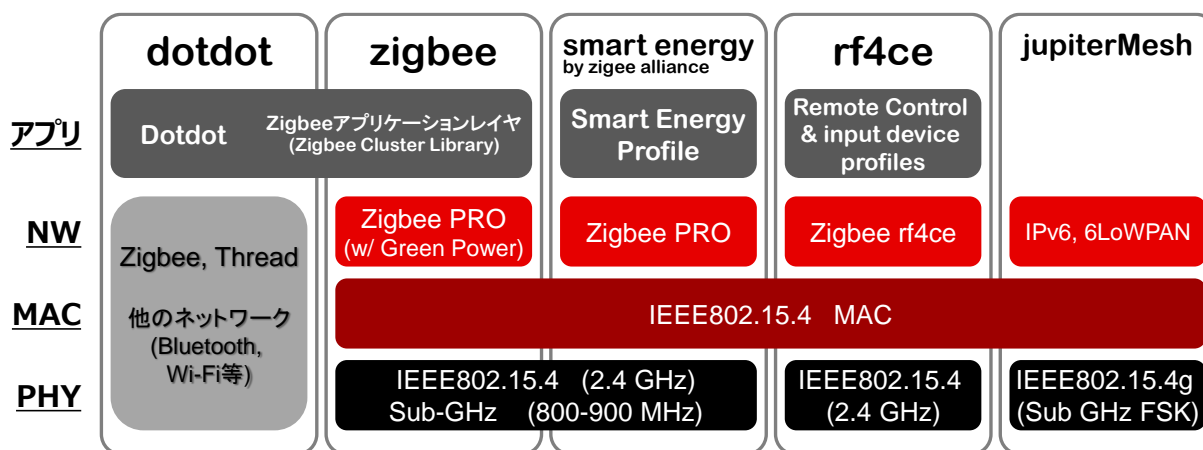
■認証：現状、Bluetoothは通信方式も使用目的もまったく違う2つの規格が共存しているということになる。Bluetooth 4.0から、LEのみを搭載したものとクラシックとLEの両方を搭載したものがあり、ロゴで見分けられるようになっている。Bluetoothを搭載する製品を開発するメーカーは、この2つの規格のどちらを使用するかを、製品の用途によって決めているのである。

- (左) 「Bluetooth」：クラシックのみ対応 (Bluetooth 3.0まで)
- (中) 「Bluetooth SMART」：LEのみ対応
- (右) 「Bluetooth SMART READY」：クラシック、LE両方対応

2.3 Zigbee方式

● 規格の概要

一般にZigbeeと呼ばれている無線通信規格はIEEE802.15.4の物理層／MAC層をベースとした2.4GHz帯の近距離無線ネットワークの標準規格で、規格策定団体のZigbee AllianceがZigbee PROとして規定したものである。Zigbee PROは信頼性のある低消費電力・低コストの無線メッシュ方式で、ネットワークトポロジーとして、スター、ツリー（木構造）、メッシュをサポートすることで市場の様々な要求に応えることができる。また、通信速度は最大250kbpsとBluetoothやUWB（Ultra Wide Band）等と比べて低いものの、低消費電力での動作が特長で、低コストでの導入が期待できる。またZigbee Allianceはアプリケーションを含む全OSIレイヤを対象とする製品認証を提供している点も特徴の一つである。図2.1は、Zigbee Allianceが提供する技術規格を図示したものである。



(Zigbee Alliance ホームページ「Zigbee Technical Presentation」を参考に作成)

図 2.1. Zigbee Alliance が提供する技術規格

Zigbee Allianceのネットワークレイヤの技術規格には、2.4GHz帯でメッシュネットワークに対応したZigbee PRO、家電用リモコンや入力デバイス向け1対1通信のrf4ce、サブギガ周波数帯でIPv6と6LoWPANに対応したJupitar Meshがある。Zigbee PROにはバッテリー不要でエナジーハーベスティングで動作するGreen Power by the Zigbee Allianceデバイスが含まれ、Zigbee Pro対応機器のON/OFFスイッチや開閉センサーなどに利用される。

Zigbeeのアプリケーションレイヤは、当初はLight Link (照明機器)、Home Automation (家電)、Retail Services (スーパーなど量販店の設備)、Building Automation (ビル管理制御)などの複数の個別プロファイルを規定し、プロファイル毎に認証を発行していたが、プロファイル間の相互接続ニーズが高まったことに対応して、Zigbee Cluster Library (ZCL)として相互接続可能なプロファイルに一本化した。また、GCLを元に、Zigbee PROだけでなくThread, Wi-Fi, Bluetoothなどの各種IPネットワークにも対応するDotdotと呼ぶアプリケーション層のフレームワークを2018年に発表し、認証プログラムを提供している。また電力会社の遠隔監視制御などに対応しZigbee PROで動作するSmart Energy by the Zigbee Allianceが欧米のスマートメーター等で採用されている。

● 標準規格団体

2002年に設立されたZigbee Allianceが、技術規格の策定、製品認証、および普及推進活動を行っている。Allianceの会員数は、理事を輩出してAllianceの運用に関与できるPromoter会員が20社、技術規格の提案・作成ができるParticipantsが97社、完成した仕様書を参照できるAdopterが176社、計293社（2020年2月現在）で、世界30ヶ国以上か

ら参加している。2019年末にAmazon, Apple, Google, IKEAなどの大手がPromoter会員として参加したことで会員は増加傾向にある。

● 標準化状況とスマートグリッドへの適用レベル

Zigbeeは、HEMS市場を中心としながら、ヘルスケア、RFリモコン、ホームオートメーションなどに幅広く利用されてきた。スマートグリッドに関しては、Zigbee Allianceが中心となって仕様策定を進めたSmart Energy Profile 2.0 (SEP2.0) は北米のスマートグリッド規格に対応したホームネットワーク向けのアプリケーションプロトコルで、IEEE P2030.5 - Standard for Smart Energy Profile Application ProtocolとしてZigbee Allianceから分離して標準化された。JupiterMeshはSEP2.0、スマートメーター等に向けたIPv6対応の広域マルチホップ無線方式である。

一方、Zigbee AllianceではZigbee PROで動作する” Smart Energy by the Zigbee Alliance” プロファイルの開発を続け、欧米の電力会社のスマートメーター等で採用されている。

● IoTへの適用

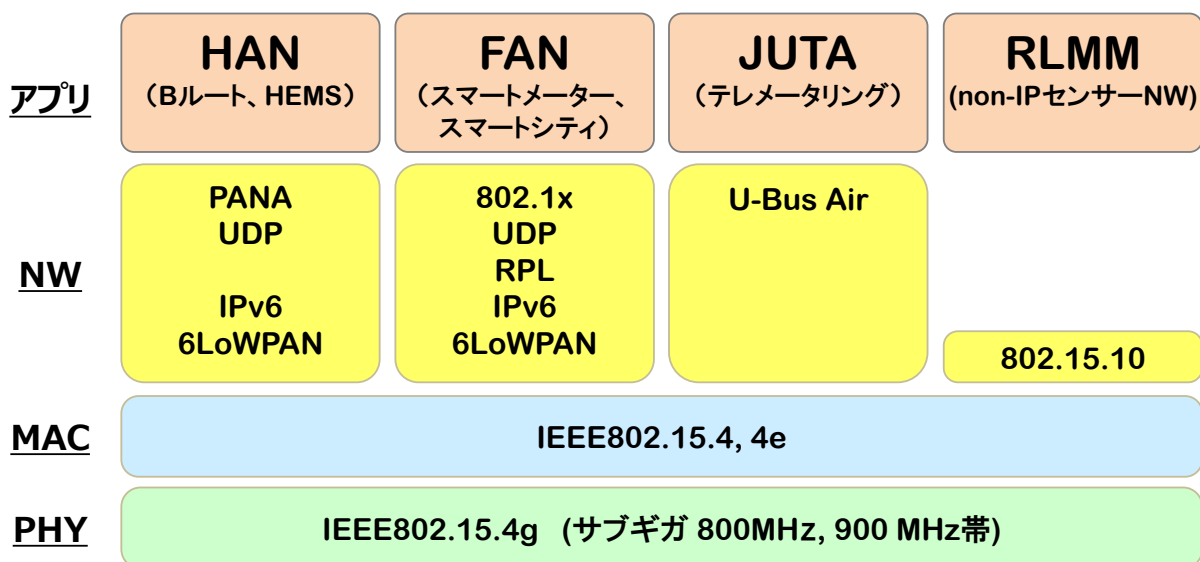
Zigbeeはホーム、ビル、量販店などで利用されてきたほか、近年はZigbee Light Linkに対応した照明器具が米国でヒットし、Amazon Echo Plusに搭載されるなど、欧米のスマートホーム普及の一翼を担ってきた。またIoTの普及に伴い、Thread, Bluetooth, Wi-FiなどIPベースの無線利用ニーズが増えてきたことから、これまで個別に認証してきたZigbeeアプリケーションをDotdotと呼ぶ共通フレームワークに一本化し、従来のZigbee PRO 対応のアプリケーションがIPネットワークでも動作する技術規格の提供を始めた。さらに2020年1月に、Amazon, Apple, Google, Zigbee AllianceがZigbee Alliance内にConnected Home over IP WGを設置し、Amazon Alexa, Apple Siri, Google Assistant などと互換性のあるデバイス開発の共通プラットフォーム開発に資するオープンスタンダードの開発・発展に協力すると発表した。

2.4 Wi-SUN方式

● 規格の概要

Wi-SUNは近距離無線通信規格IEEE802.15.4で規定されているサブギガ周波数帯を用いたSmart Utility Network (SUN)向けの無線通信方式である。国際的な民間団体のWi-SUN AllianceがIEEE802.15.4gをベースにIETFなどの国際標準規格を用途別に組み合わせてプロファイルと呼ぶ相互接続仕様を策定し、これに対応した相互接続試験に合格した機器に製品認証を与えている。これにより、メーカーが異なってもマルチベンダーで相互接続できる無線ネットワークを構築できる。

Wi-SUN Allianceが認証の対象とするのは、PHY (物理) 層、MAC層、およびネットワーク層で、アプリケーション向けに複数の標準技術を組み合わせた技術プロファイル仕様と認証プログラムを提供している。図2.2は、Wi-SUNアライアンスの技術プロファイルを図示したものである。Wi-SUN PHY層ではIEEE802.15.4gで規定されているサブギガ向け技術規格から、アプリケーションの要求や国毎の技術条件に対応した幾つかの変調方式、伝送速度、チャンネル帯域幅などを組み合わせたPHYプロファイルを規定している。MAC層はIEEE802.15.4eをベースとして、アプリケーションに必要なパラメータ設定や省電力方式などの機能の選択と、IE (Information Element)によるWi-SUN用の拡張機能を規定している。IEはIEEE802.15.4で規定された相互接続可能な機能拡張の手段で、国際標準に準拠しながら追加手順を定義できるものである。ネットワーク層はIEEE802やIETFで国際標準化された技術仕様や国内標準仕様から、ルーティング、トランスポート、セキュリティなどの必要な規格を組み合わせる相互接続可能な技術プロファイル仕様を規定している。



(Wi-SUN Alliance 公開情報を元に作成)

● **図 2.2 Wi-SUN アライアンスの技術プロファイル**

Wi-SUN Allianceの主な技術プロファイルには以下が有る。

- **HAN (Home Area Network) :**
ホームネットワーク向けのプロファイルで、アプリケーションとしてECHONET Liteをサポートする。国内電力会社のスマートメーターのBルートに採用されているほか、HEMS、各種IoTなどに利用されている。IPv6でルーティングするツリー型ネットワークを構築できるほか、リレー（中継器）や電池駆動可能なスリープ機器にも対応している。
- **FAN (Field Area Network) :**
スマートシティ向けのプロファイルで、IPv6でルーティング可能なマルチホップ/メッシュネットワークを構築できる。スマートグリッドのAMI（Advanced Metering Infrastructure、日本のAルート相当）や街灯などの市中設備管理などに利用される。町村程度の中域エリアをカバーするほか、IP対応のアプリケーションが利用できる。2019年2月から米国の技術規格に対応した認証プログラムを提供している。
- **JUTA (Japan Utility Telemetry Association)**
NPO法人テレメタリング推進協議会(JUTA)が制定したテレメタリング用通信規格 U バスエアのPHY層およびMAC層に対応する、IEEE802.15.4 規格を使用した技術仕様。Wi-SUNアライアンスとJUTAが協力して試験仕様を開発し、2019年5月に共同で認証プログラムを発表した。認証の対象は都市ガス・プロパンガス・水道等のスマートメーターリングに関連する各種機器、およびそれらを構成するデバイス、モジュール等である。
- **RLMM (Resource Limited Monitoring and Management)**
non IP型のマルチホップ通信方式で、IEEE802.15.10 (Layer 2 routing)をベースとし、省電力で低機能のセンサーデバイスでマルチホップ/メッシュネットワークを構築するIoTシステムなどでの利用を想定している。2020年2月現在仕様策定中で認証プログラムは発表されていない。

● **標準規格団体**

2012年に設立された国際的な民間団体のWi-SUN Allianceが相互接続仕様と製品認証を提供している。2020年2月現在で、理事会メンバーのCisco, Itron, Landis+Gyr, NICT, オムロン、ルネサスエレクトロニクス、東芝、Trilliantをはじめ、26ヶ国以上から268団体が参加している。

● 標準化状況とスマートグリッドへの適用レベル

Wi-SUNは2020年2月現在、HAN, FAN, JUTAの認証プログラムを提供している。また認証プログラムの対象国の拡大や、RLMM等の新たなプロファイルの仕様検討などを行っている。

スマートグリッドに関しては、Wi-SUN HANはTTC標準JJ-300.10「ECHONET Lite向けホームネットワーク通信インタフェース（IEEE802.15.4/4e/4g 920MHz帯無線）」として国内標準化され、国内電力会社10社のスマートメーターでBルート通信方式の主方式として採用された。Wi-SUN Allianceによると200以上の製品がWi-SUN HAN認証を取得し、スマートメーターに実装されている。

Wi-SUN FANはスマートグリッドのAMI (Advanced Metering Infrastructure、日本のスマートメーターAルートに相当) 向けの技術プロファイルで、2019年から米国向け認証プログラムを開始し、50製品程度が認証を取得している。IPv6対応のマルチホップネットワークで、複数のアプリケーションでの共用が可能のため、スマートメーターに加え街灯管理などのスマートシティの事例が欧米で増えている。

HANとFANの合計で、世界で9500万台のデバイスが利用されている。(Wi-SUN Allianceホームページ、2020年3月現在)

● IoTへの適用

スマートホーム、スマートシティ、スマートメーターリングほかスマートグリッドアプリケーションでの利用が想定され事例が増えて来ている。

2.5 U-bus Air

● 規格の概要

U-Bus Airは、主に電源をとることが困難なガス・水道メータの無線通信規格として2009年からNPO法人テレメータリング推進協議会（以下、JUTA。英語表記 Japan Utility Telemetry Associationの略）において仕様検討・標準化が進められてきた。

ネットワーク上の全ての装置が電池駆動のルーターとして動作するよう低消費電力動作に特化した仕様となっており、1日1回程度のトラフィックであれば全装置がリチウム電池（CR17450相当）2本で10年間の稼働が可能である。

U-Bus Airがカバーする範囲は、OSI参照モデルのMAC層以上の部分で、物理層についてはIEEE802.15.4gを採用している。

U-Bus Airのネットワークの最大接続数は50台であり、ネットワークトポロジーはメッシュを採用している。U-Bus Airの各無線装置は起動後に自動的にメッシュネットワークを構築し、屋外環境でのマルチホップ通信においても高い通信信頼性を確保している。

● 標準規格団体

JUTAは、国内のユーティリティ事業者、メーターメーカー、通信装置メーカー、通信事業者等、80社以上が参加している。また、U-Bus Airの相互接続性を確保するため、Wi-SUN AllianceにおいてJUTA Profileとして標準化がすすめられている。

● 標準化状況とスマートグリッドへの適用レベル

JUTAは、U-Bus Airをガス・水道メータに加えて様々なガス機器や警報器などが接続できる規格に拡張し、安心・安全見守り系の遠隔監視サービスや省エネサービスニーズに対応する次世代メータインフラ

(AMI : Advanced Metering Infrastructure) として標準化を推進しており、Aルート、Bルートへの活用の両面での運用が検討中である。

都市ガス事業者国内最大大手である東京ガスは、2018年度からU-Bus Airを活用したガスのスマートメーターの導入を実施する方針で技術開発を進めていることを、発表している。

2.6 Z-Wave方式

● 規格の概略

- ・Z-Waveはサブギガ帯を使用した無線通信方式である。日本は2012年7月から920MHz帯の使用が可能になった。2.4GHz帯と比較して到達距離が長く、回折性が高いので障害物を回りこんで通信できるという特性がある。現在、スマートホーム用途のゲートウェイ・センサーデバイスに多くの採用実績がある。
- ・Z-Wave Allianceは2005年1月に設立され、ホームテクノロジー分野の大手企業で構成されるコンソーシアムである。現状375社のZ-Wave Allianceメンバーで構成され、3,000以上のZ-Wave認証済み製品がある2020年8月時点)。
- ・全ての機器はZ-Wave Allianceが用意したZ-Wave認証プログラムでの認証が必要で、認証された機器にはZ-Waveロゴの使用が許可され、ブランド・ベンダーを問わず機器間の高い相互運用性が保たれる。

● 主要規格

- ・通信速度: 100 Kbps
- ・変調方式: GFSK
- ・距離: 見通し30m
- ・周波数:
 - ・ 865.22MHz (インド)
 - ・ 868.42MHz (ヨーロッパ/中国/UAE/シンガポール/南アフリカ)
 - ・ 869.0MHz (ロシア)
 - ・ 908.42MHz (アメリカ/カナダ/メキシコ)
 - ・ 915-917MHz (イスラエル)
 - ・ 919.7MHz (韓国)
 - ・ 919.82MHz (香港)
 - ・ 921.42MHz (オーストラリア/ニュージーランド/ブラジル)
 - ・ 922-926MHz (日本/台湾)
- ・ネットワーク構成 : コントローラ 1台あたり、最大232台のノードと接続可能。
- ・最大 4ノード中継可能。

● 特徴

- ・1GHz以下の周波数帯 (Sub-GHz帯) を使用するため、無線LAN や電子レンジ当の影響を受けない。
- ・メッシュネットワーク対応
 - ・室内での伝達距離は約 30m だが、メッシュネットワークを構築することで距離や障害物の影響で直接コントローラの電波が届かないノードに対しても通信可能。
 - ・コントローラ 1台あたり、最大232台のノードと接続可能。
 - ・最大 4ノード中継可能。
- ・応用製品
 - ・現在米国、欧州などで 1500種類程度の認定機器がある。

- ・スマートメーター、ホームセキュリティー・スマートホームへ各種センサー類・サーモスタット・スマートロック等が採用されている。

2.7 G.wnb : 狭帯域の宅内無線ネットワーク

G.wnbは、ITU-T SG15 Q4会合で議論されている。G.wnbは1GHz以下ではZ-Waveを利用する方式として考えられている。（周波数規定関連についてITU-Rとリエゾンにより議論を進めている。）

G.wnbのITU-T勧告（G.9959）では、送信機の物理層（physical layer）とMAC層（medium access control layer）が提案されている。各国から以下のような周波数割り当てが、提案されている。

表 2 - 4 各国の使用周波数

Country / Market	Center frequency (MHz)		Channel Width (kHz)
EU	f _{EU1}	869.85	300
	f _{EU2}	868.40	400
US	f _{US1}	916.00	300
	f _{US2}	908.40	400
HK	f _{HK1}	919.80	400
ANZ	f _{ANZ1}	919.80	300
	f _{ANZ2}	921.40	400
MY	f _{MY1}	868.10	400
IN	f _{IN1}	865.20	400
JP	f _{JP1}	951.10 (NOTE 1)	300
	f _{JP2}	954.70 (NOTE1)	300
	f _{JP3}	955.50 (NOTE1)	300
	f _{JP1}	Not used	n/a
	f _{JP2}	Not used	n/a
	f _{JP3}	926.30 (NOTE 2)	300
	f _{JP1}	922.50 (NOTE 3)	300
	f _{JP2}	923.90 (NOTE 3)	300
	f _{JP3}	926.30 (NOTE 3)	300
NOTE 1: Valid until 31 March 2018.			
NOTE 2: This limited one-channel-frequency is to be used until the NOTE 3 designations are valid.			
NOTE 3: The use of these frequencies shall be valid from 25 July 2012. For more details see the national regulations.			

送信パワーは、-5dBm以上で、上限は各国の規制値まで。

2.8 特定小電力無線

● 規格の概要

ライフスタイルやビジネスシーンが多様化し、近距離間での簡易連絡用のコミュニケーション手段を求める声が強くなった現代、比較的狭いサービスエリアにおける無線通信の需要は増加している。こうした背景から、「特定小電力無線局」に対する制度が作られ、総務省で定める一定の条件を満たした無線設備であれば無線従事者資格も無線局免許も必要とせず、広く一般の人々が利用できる。規格は、1989年（平成元年）に制度化され、発射される電波の強さ（空中線電力）は1W（当初は10mW）以下と総務省告示に定められている。OSIレイヤでは、レイヤ1～2に該当する。

● 標準規格と周波数帯

電波産業会(ARIB)にて標準規格化しており、特定用途の周波数毎に制定している。

- ・ ラジオマイク 74/322/806MHz帯
- ・ 補聴援助用ラジオマイク 75MHz帯
- ・ 音声アシスト用無線電話 75.8MHz帯
- ・ テレメータ、テレコントロール及びデータ伝送 400/1200MHz帯
- ・ 医療用テレメータ 400MHz帯
- ・ 無線呼出 400MHz帯
- ・ 体内埋込型医療用データ伝送及び帯体内埋込型医療用遠隔計測 400MHz帯
- ・ 無線電話(ラジオマイクを除く)400MHz帯
- ・ 国際輸送用データ伝送設備及び国際輸送用データ制御設備 430MHz帯
- ・ 移動体識別 950MHz/2.4GHz帯
- ・ 移動体検知センサー 10.525/25.15GHz帯
- ・ ミリ波画像伝送及びミリ波データ伝送 59～66GHz帯
- ・ ミリ波データ 60.5/76.5GHz帯

● 変復調方式、伝送速度、伝送距離、MAC方式

変復調方式は電波の型式により周波数変調、位相変調など。伝送速度は周波数により1.2～9.6kbps、100kbpsなど。伝送距離も周波数により数十m～数kmなど様々。また、MAC方式はキャリアセンスにより実施。

● 標準化状況とスマートグリッドへの適用レベル

各用途の周波数帯毎に制定され、最近では、950MHz帯が割り当てられているスマートメーター向けでは、920MHz帯に移行することが決定しており、各社にてスマートメーター用インタフェースに採用され、実用化されつつある。また、消費電力について、ボタン電池レベルで稼働する機器は既に多数ある。

● セキュリティ認証・暗号化方式・誤り訂正

無線設備、および上位レイヤにて考慮が必要。

2.9 UWB方式

● 概要

UWB (Ultra Wide Band : 超広帯域無線) と呼ばれ、IEEE 802.15.3aのことを示す場合が多い。Wireless USBの基本技術でもある。近距離での高速通信と位置検出が可能なのが特徴となる無線通信技術である。もとはアメリカの軍事技術として開発されたが、連邦通信委員会（FCC）から2002年2月に民間利用が許可されている。アメリカでは特別な免許無しでの使用が可能。一般的には搬送波・広帯域変調を用いた、近距離高速通信が可能

な無線技術のこと。位置測定やレーダーの機能も持ち合わせている。使用する帯域はマイクロ波帯と準ミリ波帯の2種類がある。

- マイクロ波帯

米国では3.1GHz～10.6GHzが利用可能、日本では3.4～4.8GHz、7.25～10.25GHzが利用可能。

なお3.4～4.8GHzの利用については、第4世代携帯電話やWiMAX等との帯域競合が予想されるため、他の通信方式との干渉回避技術(DAA: Detect and Avoid)の搭載が義務付けられている。(2008年末までは、4.2～4.8GHzの帯域に限りDAAなしでも利用可能だった)

単位周波数当たりの出力レベル(放射電磁雑音規制値) : -41.3 dBm/MHz

- 準ミリ波帯

22GHz～29GHz

ただし23.6～24GHzについては電波天文・地球探査衛星などで使用される帯域のため、この帯域に対する妨害を与えないことが条件となる。

- 通信速度

- ・ 実際(実験段階・2004年) : 320Mbps
- ・ 目標 : 480Mbps 以上 (USB 2.0の通信速度と同じ)

- 変調方式

- ・ MB-OFDM (MultiBand Orthogonal Frequency Division Multiplexing) : MultiBand-OFDM Alliance (MBOA) が推進
OFDMを応用。3.1GHz～10.6GHzの帯域を14バンドに分割し割り当て、それを5つの論理チャンネルにグループ化。
- ・ DS-UWB (Direct Sequence UWB) : モトローラ陣営が推進
インパルスレディオ方式とDSスペクトル拡散方式のハイブリッド。
- ・ CSM (Common Signaling Mode: コモン・シグナリング・モード) 方式
MB-OFDM方式とDS-UWB方式の折衷方式。双方の物理層を認め、共存に必要な作業をMAC層のプロトコルで行う。3.96GHzを中心周波数とする500MHz幅の共通バンド (Common Signaling Mode Band) を定め、最大10Mbps程度の通信を実現する。

- 特徴

- ・ 消費電力が少ない
- ・ 妨害電波に強い
- ・ 高速通信が可能。ただし、距離が長くなると極端に速度が低下する。
- ・ 位置検出の精度が高く、誤差は数cm内
- ・ 従来以上に広い周波数帯に拡散して通信を行う
- ・ 半径10m程度の近距離での使用がターゲット

- 用途例

- ・高精度三次元位置検知システム

アクティブタグとしてセンサーとタグ間の伝搬時間を計測して距離を求める。センサーを複数台設置することで3次元での位置を検知することが可能で、検知精度は数cmまで設定が可能。

- ・高解像度ワイヤレス監視カメラ・防犯カメラ

2.10 PHS方式

●概要

簡易型携帯電話として、携帯電話とは法令上、明確に区別されている。コードレス電話を屋外でも使用するという発想で、日本で規格化した電話システムで1995年からサービスされている。現在では、携帯電話に押されて加入者数は減少したが、中国、タイ、ベトナム等で普及が進み、世界で8000万件以上の契約がある。1.9GHz帯を利用する。基地局の送信出力が最小20mW～最大500mWと小さく、マイクロセル方式により1基地局あたりのカバーエリアを小さくして同一周波数の再利用が容易になる。また、基地局が小型で低コスト化できるため、地下街や地下鉄構内、建物内等に設置可能である。

●標準化団体

日本国内の規格

●変調方式

TDMA/TDDであり、1スロット32kbpsとなっている。これが1通話スロットとなっており、音声の符号化としてはADPCMを使用している。データ通信においては、直接PHSの通信チャネルに対して伝送する方式としてPIAFS (Personal Handyphone System Internet Access Forum Standard) が策定され、1997年からサービスされている。

●スマートグリッドへの適用

PHSは、ラスト・ワン・マイルを接続する手頃な無線技術として注目されており、ひとつの応用としてテレメータリングに利用される。

ガスメータへの適用は既に始まっているほか、建物内やコミュニティに設置される各種のセンサー情報を遠隔伝送する仕組みとして使用されている。

2.11 WiMAX

●規格の概略

WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) とは無線通信技術規格である。WiMAXは異なる機器間での相互接続性確保のため、IEEE 802.16作業部会と業界団体のWiMAX Forumにより規格標準化が進められている。

●固定WiMAX (Fixed WiMAX)

IEEE802.16-2004 規格の WirelessMAN-OFDM (サブキャリア数: 256固定) / WirelessHUMAN-OFDM無線インタフェースに準拠し、固定 (FWA) 用途の WiMAXサービスを実現。

●WiMAX Release 1.0 (Mobile WiMAX)

IEEE802.16e 規格によって補足・修正された 802.16-2004 規格の WirelessMAN-OFDMA (サブキャリア数：512 または 1024 チャンネル幅に応じて可変) 無線インタフェースに準拠し、固定、ノマディック、ポータブル、モバイルの用途のWiMAXサービスを実現。120km/hでの高速移動を想定した規格。

●WiMAX Release 2.0 (WiMAX2)

モバイル WiMAX の後継規格となるIEEE802.16m-2011 は、802.16e 規格によって補足・修正された 802.16-2004 規格を、第四世代移動通信システム (4G) の一つの要求条件を満たすように補足・修正され、更なる高速化した仕様となる。350km/hでの高速移動を想定した規格。

●WiMAX Release 2.1 (WiMAX2+)

WiMAX Release 2.0に対して、Additional Elementsとして3GPPが標準化したTD-LTEの互換性を持つ技術を導入したもの。ただし、TD-LTE互換となるため、端末ごとにSIMによる認証が必要となる。

国内でのサービスでは、2.5GHz帯にて新規に20MHzの割り当てを受け、既存30MHzと合わせて50MHzの帯域で運用。2015年3月には下り最大220Mbpsでの通信を実現した。

表 2-5 固定 WiMAX と モバイル WiMAX の比較

	固定WiMAX	モバイルWiMAX
規格名	IEEE 802.16-2004	IEEE 802.16e-2005
利用周波数帯	11GHz帯以下	6GHz帯以下
伝送速度	最大約75Mbps (20MHz帯域使用時)	最大約75Mbps (20MHz帯域使用時)
変調方式	OFDM	OFDM, OFDMA, SOFDMA
	BPSK/QPSK, 16QAM & 64QAM	QPSK, 16QAM & 64QAM
マルチアンテナ技術	MIMO (オプション)	MIMO, AAS, STC (すべてオプション)
移動性	固定・可搬	固定・可搬・移動体 (120km/h)
チャンネル帯域	1.75MHz~10MHz可変	1.25MHz~20MHz可変
セル半径	2~10km	1~3km
標準化完了時期	2004年6月1日	2005年12月1日

表 2-6 IEEE 802.16e と IEEE 802.16m まとめ

	IEEE 802.16e (WiMAX Release 1.0)	IEEE 802.16m (WiMAX Release 2.0)	
		必須	目標
周波数	2.3GHz, 2.5GHz, 3.3~3.8GHz	(1GHz,) 2.3GHz, 2.5GHz, 3.3~3.8GHz	
復信方式	TDD	TDD, FDD/HFDD	
チャンネル帯域	3.5, 5, 7, 8.75, 10MHz	5, 10, 20, 40MHz	
最大伝送速度 (ダウンロード)	64Mbps (2×2、チャンネル帯域が 10MHzの時)	160Mbps以上 (2×2、チャ ネル帯域が20MHzの時)	300Mbps以上 (4×4、チャ ネル帯域が20MHzの時)
最大伝送速度 (アップロード)	28Mbps (2×2、MIMO使用時、 チャンネル帯域が10MHzの時)	56Mbps (1×2、チャンネル 帯域が20MHzの時)	112Mbps (2×4、チャンネル 帯域が20MHzの時)
最大移動速度	60~120km/h	350km/h	500km/h
遅延	LLA(Link Layer Access):20ms Handoff:35~50ms	LLA(Link Layer Access):10ms Handoff:30ms	
MIMO設定	ダウンロード：2×2 MIMO アップロード：1×2 MIMO	ダウンロード：2×2 MIMO アップロード：1×2 MIMO	ダウンロード：2×4, 4×2, 4×4 MIMO アップロード：1×4, 2×2, 2×4 MIMO
平均VoIP利用ユーザ数	50ユーザ/セクター/FDD MHz	50ユーザ以上/セクター /FDD MHz	100ユーザ以上/セクター /FDD MHz
	25ユーザ/セクター/TDD MHz	30ユーザ以上/セクター /TDD MHz	50ユーザ以上/セクター /TDD MHz

2.12 DECT方式

●概要

DECT (Digital Enhanced Cordless Telecommunications) はETSI (欧州電気通信標準化機構) において、デジタルコードレス電話規格として1992年に制定された。ITU-R勧告 M.1457にてIMT-2000のFDMA/TDMAシステムとしても規定されているため、国際的には携帯電話の一種として捉えることもできる。

2010年に総務省令「デジタルコードレス電話の無線局の技術基準」が改正され、国内での利用が可能となった。その後、高度化に対応するため2017年9月にキャリア周波数の数や周波数共用条件の変更など、技術的条件の改定が行われた。

●標準化団体と規格

DECTはETSIの商標で、テスト仕様を含め約250の規格群がETSIから発行されている。米国ではFCC Part15 Subpart D – Unlicensed Personal Communications Service Devicesに規定されている。

日本国内の適用にあつては、ARIB (一般社団法人電波産業会) ARIB STD-T101「時分割多元接続方式広帯域デジタルコードレス電話の無線局の無線設備規格」が2011年3月に発行されている。

また、アプリケーションの標準化と相互接続を目的として、CAT-iq (Cordless Advanced Technology – internet quality) 認証プログラムをDECT Forum、HAN FUN (Home Area Network FUNCTIONal protocol) 認証プログラムをULE Allianceで行っている。

●使用する周波数、通信方式

1.9GHz帯（日本国内では、1,895.616MHzから1.728MHz間隔で5波）の周波数を利用する。

通信方式はTDMA/TDD（時分割多元接続/時分割複信方式）で、多重数は12となる。伝送速度は、標準変調方式のGFSKの場合1.152Mbpsであり、最大64QAMで6.912Mbpsとなる。

●DECTの特長

1.9GHz帯を使うため、無線LANとの干渉がなく、通信障害が低減されている。また、周波数チャネルの使用状況を常時モニタリングし、自動的に最適なチャネルを選択することで、効率良く周波数帯域を利用することができている。通信距離は、見通しで300m以上、屋内で50m程度であり、中継器による多段再生中継も可能である。

●DECT ULE

DECT ULE（Ultra Low Energy）は、DECTをベースに策定された超低消費電力版の規格で、IoT/M2Mアプリケーションを意図した規格として、ETSIから2013年4月にTS 102 939-1が、2015年3月にTS 102 939-2が発行された。デバイスおよび物理レイヤにはDECTそのものを使用し、セキュアなパケット通信を行うトランスポートレイヤをETSIで規定し、スマートホームを実現するアプリケーションレイヤを業界団体のULE Allianceで規定している。

スリープ時の消費電流は数 μ A程度で、非同期モード（イベントトリガ起動）、または、同期モード（間欠起動）で端末を駆動させることより、充電不要な一次電池で、数年間にわたり端末を駆動させること可能にしている。

2.13 IP500

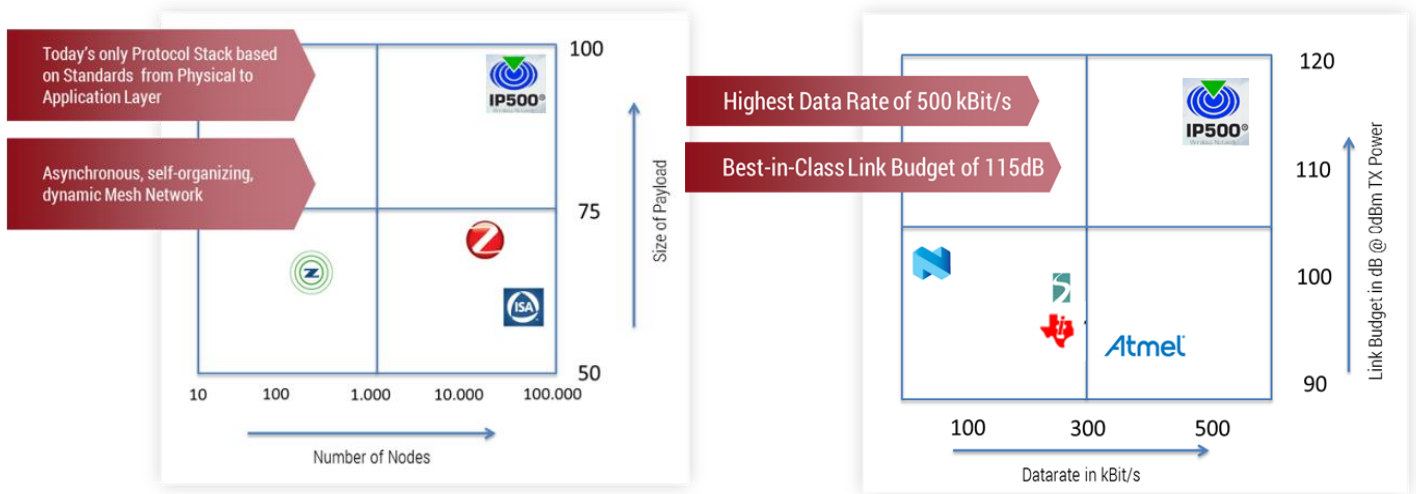
IP500 Allianceが運営を開始したのは2008年、その後2010年5月にベルリン（ドイツ）で非営利組織として設立された。IoTランドスケープの目標は、高いセキュリティ、省エネルギー、ネットワーク内におけるワイヤレスの快適性やモビリティのほか、高いプロセスの安定性、大型商業ビルや工場施設での品質を確保するところにある。IP500 Allianceは、高いパフォーマンスと信頼性に対するニーズに関して、安全性とセキュリティの規制の問題に対処する。こうした要求は、（CoreNetix- www.coreNetix.comなどの）サプライヤーを選ぶよう提起されていた。こうしたサプライヤーが信頼性の高いIP500ソリューション/モジュールを開発した。これにはデュアルバンドの機能（Sub 1 GHzおよび2.4 GHz、IEEEスタンダード802.15.4 2006準拠をベースとする）やIPv6/6LowPAN、NW Stackベース、スケーラブルなメッシュ機能とBACnet over IP付きが含まれる。

● IP500 NWLスタックの主な機能

- シンクロニックなメッシング、自己回復機能、TCPおよびUDPスタンダードのコミュニケーション付き
- すべてのネットワークトポロジーをサポート（メッシュ、ツリー、スター、ポイント・ツー・ポイント）
- ナローバンドで500kbps、Sub 1と2.4 GHz同時のデューティサイクルメーカーニズム
- 6LowPANスタンダード準拠、IPアドレス（802.15.4 RF ICs）向け
- ローカルレベル、アプリケーションレベルでのメッシュ管理
- 「ローカルパワーマネジメント」、最長バッテリー寿命で効率的な電源使用（10年以上）向け
- HWプラットフォームとSWスタックの間での時間サービスの透明性
- SWアップデートオプション、FlashとOTAP向け、ネットワークアクセス向け「高セキュリティマネジメント」
- セキュリティ/暗号化、PHYとネットワークレベル（例、AES-128）

- IP500 NWLトポロジー

IP500ネットワークスタックは、画期的でアドホックなネットワークに自動化されたネットワークフォーメーション、設定およびメッシュのルートヒーリングを提供する。これは、AODV (AdHocディスタンスベクトル) プロトコルなどのオープンスタンダードなメッシュプロトコルやIETFによる新たなスタンダードプロトコル経由で提供される場合がある。このプロトコルにより、IP500のセンサーネットワークは1000を超えるノードを持つ大規模ネットワークのトポロジーを、最高のペイロード効率性でサポートすることができる。最も単純なケースでは、スタックは直接的なポイント・ツー・ポイントのコミュニケーションを提供し、これはスタートボロジに拡張される。スターを活用して、パケットはスターのあるノード間で送信可能となり、RF ネットワークは施設、ビル、住宅の既存ネットワークに貼り付けが可能となる。



左) NWL (ノード数とペイロードの関係)

右) データレーとリンクバジェットの関係

図 2-3 IP500 のパフォーマンス

2.14 LPWAN

LPWAN (Low Power Wide Area Network) とは、IoTデバイスを電池無交換で数年間駆動可能で、かつ、1台のゲートウェイ (もしくは、基地局) で半径数km以上の広域無線通信が可能なることを特徴とした技術である。

IoTデバイス、ゲートウェイ、データを蓄積するプラットフォーム、データを活用するアプリケーションサーバから構成されるハイレベルアーキテクチャにおいて、LPWANはIoTデバイスとゲートウェイ間の通信方式として適用され、サブGHz帯の無線通信方式を活用して、IoTデバイスの低電力化と広域通信を実現する。

前記無線通信方式は、低消費電力と広域無線通信の実現を図るため、LoRaやSigfox等の各アライアンスで物理・MACレイヤを中心に独自に規定されている。通信速度は最大で数十kbps、データ長は最大で250バイト程度である。

免許不要帯域のLPWAは、最近までLPWANと言われるケースがほとんどであるが、LPWAと言われている場合もある。本文書では以降、携帯回線を用いるLPWAと区別する意味で、免許不要の低消費電力広域無線通信システムはLPWANと呼ぶ。なお免許不要帯域はISM (Industry Science Medical) バンドとも言われ、サブG帯、2.4G帯、5G帯などがその帯域で、Bluetooth・Zigbeeなどは2.4G帯、Wi-Fiはさらに5GHz帯も使用している。サブGHz帯は日本915MHz、米国920MHz、欧州865MHzとエリア毎の帯域仕様割り当てに従って帯域が異なっている。LPWANで日本の915MHz帯域をサポートしているものは少ない。

LPWANは2010年ごろに登場したが、注目されるようになったのは2015年あたりからである。下記のような方式が乱立しており、それぞれが特徴を強調している。フォーラムの会員によるサポートで運営する方式と、企業が運営する方式があるが、通信システムだけを提供する場合から、ターンキー（システム全体の開発・設置・運用）システムで提供する場合まで、様々なビジネスモデルがあり、激しい市場争いを繰り広げている。

相互接続の点からは、運営母体が非営利団体か企業の運営かでビジネスモデルが異なる。下記に状況を記載する。

(1) 2019年当時のLPWA

◆非営利団体が運営（フォーラム等）

- ・ Dash7 : Dash7 Alliance
- ・ LoRa : LoRa Alliance
- ・ Weightless : Weightless IG (Interest Group)
- ・ Halow : Wi-Fi Alliance、Wi-Fi Halow、IEEE規格名IEEE802.11ah

◆企業が運営

Accellus、Aclala、Dart、Injune、nWave、SENSUS、Sigfox、Silver Link、Telensa、WAVIoT

Dash7等が2.4GHz帯域なのを除けば、サブGHz帯域を使用しているのが多い。言うまでもなく搬送周波数の低い方が伝送距離を伸ばすことができるからである。また通信方式もそれぞれ特徴があるが、スペクトラム拡散技術を活用して、耐ノイズ性やセキュリティの向上を図っている。

下表に、これらLPWAN方式の比較を示す。

表 2-7 LPWAN 方式の比較

規格名 比較項目	LoRa	Sigfox	WAVIoT	Nwave Weightless-P	Ingenu RPMA	Flexnet
周波数帯	サブGHz帯	サブGHz帯	サブGHz帯	サブGHz帯	2.4GHz	280MHz帯
変調方式	CSS	BPSK	DBPSK	DBPSK	RPMA	FSK
MAC	独自 (LoRaWAN)	独自	独自	独自	独自	独自
暗号化対応	○ (AES-128)	○ (独自)	○ (XTEA-256)	○ (AES-128)	○ (AES-128)	不明
リンクバジ ェット[*1]	154dBm	151dBm	166dBm	147dBm	163dBm	不明
通信速度 (bps)	300~50k[*2]	100 [*3]	10~100k[*1]	200~100k [*4]	下り 600 k 上り 100 k	10 k
通信距離	都市部数km 見通し15km	都市部5km 郊外15km	都市部10km 郊外50km	都市部2km 郊外5km [*5]	郊外5km [*1]	最大20km

注：引用元は以下の通り。

[*1] : WAVIOT NB-FI LPWAN TECHNOLOGY

[*2] : LoRaWAN 101

[*3] : <http://www.radio-electronics.com/info/wireless/sigfox/basics-tutorial.php>

[*4] : http://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1327380

[*5] : 欧州規格の場合、国内ではこれより狭くなる

以下、主なものとしてLoRa、SigFox、WAVIoT、Nwave (Weightless-P)、Ingenu (旧 OnRamp)、Flexnetについて概要を記載する。

なお、NB-IoT (LTE) は携帯回線という既存の枠組みの中にあり、別項で詳細を記載する。

(2) 現状のLPWA (2022.1現在)

現状、(1)に示した当時の状況からの変遷(赤字)を下記に示し、記載を更新する。

表2-8 LPWAN方式の比較

規格名	Sigfox	LoRaWAN	Wi-SUN	ZETA	ELTRES
周波数帯	Sub-GHz帯 (920MHz)	Sub-GHz帯 (920MHz-928MHz)	Sub-GHz帯 (920MHz)	Sub-GHz帯 (920MHz)	Sub-GHz帯 (920MHz)
通信速度	100bps	250kbps	50~300kbps	300/600/2.4kps	80bps(上り)
最大伝送距離	約50km	約15km	約3km	約2~10km	約100km
種別	公衆網	公衆網、自営網	自営網	自営網	公衆網
バッテリー寿命	10年以上	10年以上	-	-	-
推進団体	仏 Sigfox	米 LoRa Alliance	Wi-SUN Alliance	ZETA Alliance	-

現状、定義されているLPWAの位置づけを下記に示す。

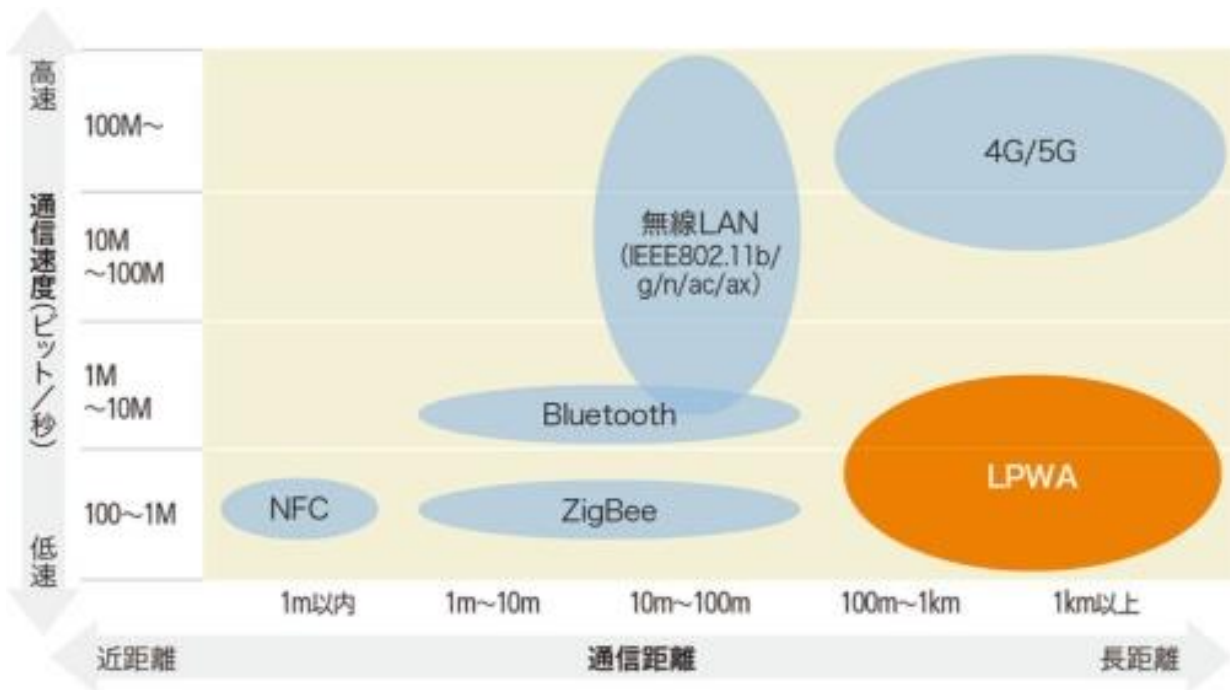


図2-4 無線技術におけるLPWAの位置付け

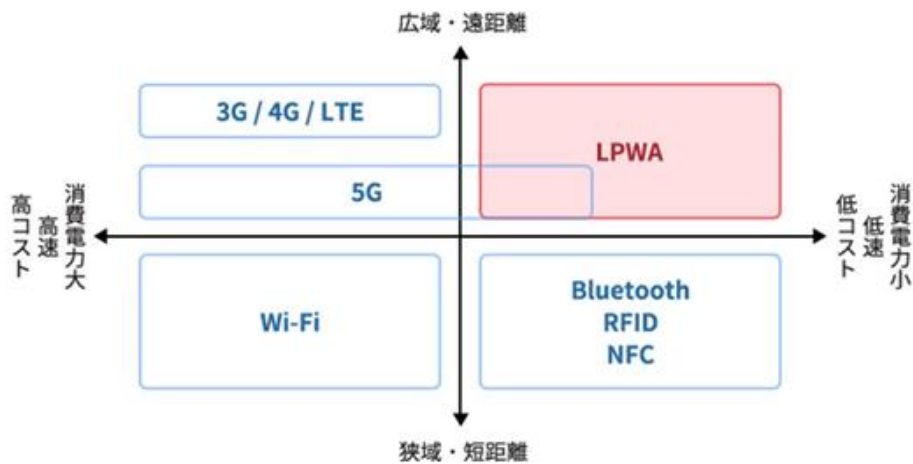


図 2 - 5 各通信方式の位置付け

(a) **LoRa**

LoRaはオープンスタンダードとして提案されており、LoRaチップと通信モジュールを開発製造しているICメーカーSemtechとIBMが設立したLoRa Allianceが推進しており、IBMやZTE、仏Orangeなどがスポンサー企業として名を連ねている。またLoRaWANは多くの国々で通信キャリアが中心となり全国展開中であり、LoRa Allianceの認証を受けて活動している。

LoRaという規格名は、「長距離」を意味する英語“Long Range”から来ている。

LoRaWANは免許不要の920MHzのサブG帯域を使い、ネットワーク構成や通信範囲は携帯回線とはほぼ同じ（都市部数km、見通し15km）で、最大通信速度250kbpsの双方向通信である。

LoRaでは物理レイヤとMACレイヤをLoRaアライアンスで独自に規定している。

LoRaの物理レイヤでは、変調方式にチャープスペクトラム拡散を使う。チャープスペクトラム拡散は軍事・宇宙通信分野で古くから使われている変調方式で、FSK方式に比較して長距離性能やロバスト性能に優れている変調方式の1つである。

MACレイヤでは、LoRaWANと呼ばれる独自方式を使う。LoRaWANでは、アクセス制御方式、MACフレーム、MAC制御コマンド、セキュリティ方式（AES-128）を規定している。

(b) **Sigfox**

Sigfox社が運営しており、同社は2009年創業の仏国ベンチャー企業で、2017年現在、25か国、約800万端末を設置済みとしている。

Sigfox通信サービスは1国1社に限定、Sigfoxネットワークオペレータ（SNO）として独占的に1国を任せている。

通信速度は100bpsと遅いが、通信範囲は都市部で約5km（最大約15km）、郊外では15kmくらい（最大50km）とLPWANの中で広い方である。月額通信料金は\$ 1.0からと言われており、以下の特徴がある。

- Sigfoxでは物理レイヤとMACレイヤをSigfoxで独自に規定している。
- Sigfoxの物理レイヤでは、変調方式にBPSKを使う。
- MACレイヤでは、独自方式を使う。IoTデバイスにデータ送信制約（データ長12バイト、140回/日）を行うことで省電力化を実現している。セキュリティ方式も規定しているが詳細情報は公開されていない。

(c) **Wi-SUN (TTC 情報通信関係のフォーラム活動に関する調査報告書より抜粋)**

Wi-SUN Allianceが推進している通信規格。Wi-SUN Alliance は、ECONET Lite 規格に対応した電力量計等と宅内エネルギー管理システムとの無線通信規格の策定、IEEE802.15.4g 規格をベースにした無線仕様の相互接続性試験の実施、普及促進を目的として 2012 年に設立された団体である。情報通信機構 (NICT)、富士電機、村田製作所、オムロンをはじめとする日本企業が中心となって設立し、標準化と普及促進に積極的に活動し、2021 年 7 月現在のメンバは 248 社に達し、そのうち海外メンバが 2/3 の 169 社に増加している。

Wi-SUN Alliance では、低消費電力で動作する無線通信規格 IEEE802.15.4g を使った次世代電力量計 (スマートメータ) による自動検針および管理のため、相互運用性検証を実施している。

2013 年には、東京電力がスマートメータと宅内のホームゲートウェイを接続する無線通信方式に Wi-SUN を採用することがアナウンスされている。

主な特徴として通信速度が最大300kbpsと他の方式と比較して速いこと、送受信できるデータサイズに制限がないこと、マルチホップ通信が可能であることがある。

(d) **ZETA (TTC 情報通信関係のフォーラム活動に関する調査報告書より抜粋)**

ZiFiSense社が提唱し、ZETA Allianceが推進している通信規格。次世代 LPWA 通信規格 ZETA の普及促進のために、IT アクセス、QTnet、テクサー、凸版印刷の 4 社が開発元の中国 ZiFiSense 社と合意して 2018 年 6 月に設立した。ZETA は IoT に適した

LPWAN 通信規格で、超狭帯域による多チャンネル通信、マルチホップ・メッシュネットワークによる分散アクセス、双方向での低消費電力通信などの特長がある。数 km から 10km 程度の通信距離があり、マルチホップを利用して広大なエリアをカバーできるため注目を集めている。参加メンバは日本と中国の企業のみであり、2021 年 7 月現在、日本 102 団体、中国 91 団体が参加している。

Meshネットワーク、マルチホップ通信などが特徴。中継器によるマルチホップ (メッシュアクセス) で従来無線が届きにくい場所へも通信できる。これを活かして、山間部にある錦鯉の養殖池の遠隔管理などにも用いられている。

(e) **ELTRES**

ソニーが独自に開発したLPWAの通信規格。ETSIにおいて国際標準規格として公開され、後発ながら国産技術として注目されている。

スペイン語の定冠詞「EL」と、3を意味する「TRES」を組み合わせた造語で、「長距離安定通信」「高速移動通信」「低消費電力」の3つの特徴を持っている。ISM帯域である周波数923.6M~928MHzを用いるアンライセンス系のLPWAネットワーク技術である。空中線電力が20mWの特定小電力 (サブGHz) 無線で、通信距離が見通し条件で100km以上と非常に長く、時速100km以上の高速移動中でも通信が可能で、送信機と受信機間でGPSの時刻情報を同期することによる高精度な通信も実現できる。ノイズの多い都市部でも高感度で通信でき、様々なセンサーで取得した情報を広範囲に効率よく収集することができるなど、新たなユースケースへの活用が考えられる。

2.15 NB-IoT

前記LPWANに相当するものとして、既存の携帯電話ネットワークを使ったIoT通信デバイス向け通信規格である3GPPの「LTE版LPWA」の標準化作業が進められている。2016年6月に発表されたRelease13でカテゴリM1とカテゴリNB1 (NB-IoT) がそれに相当する。カテゴリM1は、1.4MHzの帯域幅で上り下りとも1Mbpsの通信速度を得られる。モデムの複雑性 (カテゴリ4を100%とした場合) はカテゴリ1が80%であるのに対し、20%まで引き下げることができる。

さらに方向性を明確にしたのがカテゴリNB1として定義されたNB-IoTで、帯域幅を200kHz以下まで絞り込み、通信速度も下り25kbps、上り60kbps程度と低速に抑えることにより、低コスト化、長距離対応化、低消費電力化を図っている。

LTE方式をベースにして拡張することで、ソフトウェアのアップデートで、LTEの高速無線大容量通信方式と、併存する機能としてLPWA通信機能も提供される。下記にLTE方式における各カテゴリの比較を示す。

表 2-9 LTE方式における各カテゴリの比較

	LTE Cat.1	LTE Cat.0	LTE Cat.M1 (eMTC)	LTE Cat.NB1 (NB-IoT)
機能特徴	<ul style="list-style-type: none"> MIMOなし、Single Rx、全二重 10Mbps/5Mbpsに機能限定(省電力/コスト/カバレッジでIoT要件には未対応) In-band 	<ul style="list-style-type: none"> MIMOなし、半二重 1Mbpsのデータ通信、省電力モード対応(voice/VoLTEには未対応でIoTに必要な機能のみに限定) In-band 	<ul style="list-style-type: none"> MIMOなし、全二重、半二重 バンド幅を削減 間欠受信間隔を延ばして省電力強化の機能拡張 In-band 	<ul style="list-style-type: none"> MIMOなし、半二重(TDDなし) バンド幅を削減 間欠受信間隔を延ばして省電力強化の機能拡張 In-band、Guard-band、Standaloneの3つの運用方式
3GPP Release	Rel-8	Rel-12	Rel-13	Rel-13
リリース年/商用年	2009	2014	2016	2016/2017
Downlink peak rate	10Mbps	1Mbps	1Mbps	~25kbps
リンクバジェット (dBm)	140	140	155	164
Uplink peak rate	5Mbps	1Mbps	1Mbps	~60kbps
バンド幅	20MHz	20MHz	1.08MHz	180kHz
アンテナ数	2	1	1	1
Duplex mode	Full duplex (FD)	Half duplex (HD)	FD & HD (type B), 周波数分割多重&時分割多重	HD (type B), 周波数分割多重
省電力	—	Power save mode (PSM)	PSM, eDRX (extended I-DRX, C-DRX) (DRX: Discontinuous Reception、間欠受信)	PSM, eDRX (extended I-DRX, C-DRX) (DRX: Discontinuous Reception、間欠受信)

2.16 sXGP

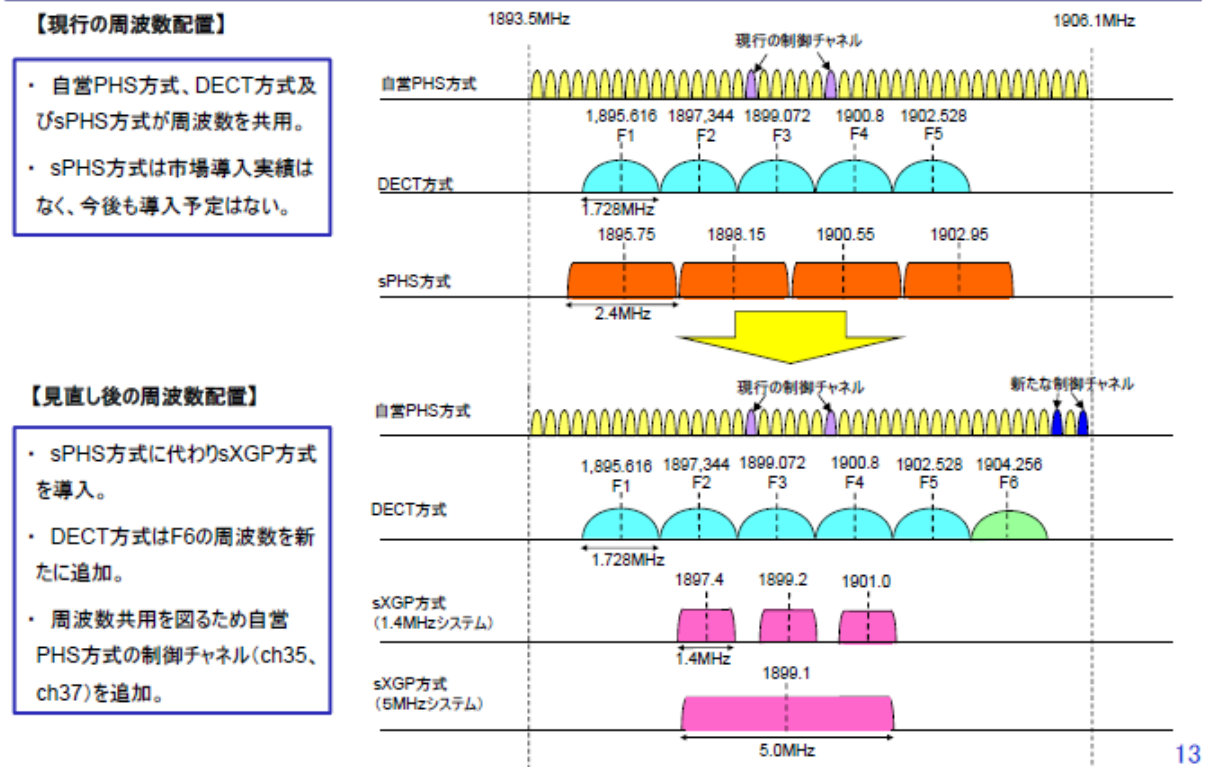
XGPフォーラムは、TDD方式の狭帯域マイクロセルシステムであるPHSの発展、普及を目的とした組織であるPHSMoUグループを発展的に改組した団体で、PHS関連の通信事業者、メーカーが参加している。

sXGP (shared eXtended Global Platform) 方式は1.9GHz帯の次世代の無線通信システムとして検討されている方式で、現在、PHS、DECTの各方式が規定されているが、XGPフォーラムでTD-LTE方式をベースとした新しいデジタルコードレス電話システムを検討しており、2017年10月にsXGP規格Version1が承認された。

sXGP方式デジタルコードレス電話は、2017年11月時点では総務省で特性試験方法が定められていないため、2017年11月からTELECで特性試験方法(略称:sXGP方式デジタルコードレス電話の特性試験方法)を制定して総務大臣に届け出て、新規の特性試験方法として運用を開始している。

下記にDECT方式とsXGP方式の周波数配置を示す。

DECT方式及びsXGP方式の主な技術的条件案①



13

図 2 - 6 DECT 方式と sXGP 方式の周波数配置

(出典：総務省資料、http://www.soumu.go.jp/main_content/000464848.pdf より)

3. 各種無線伝送規格の比較

(別紙 2 参照)

4. まとめ

エリアネットワークはHEMSなどの家庭内ネットワーク（家庭内のセンサーネットワーク）のみならず、IoTまで拡大した町レベル程度までの通信が考えられ、以下に示すような条件が求められる。

エリアネットワークの必要条件

(1) 価格

安価なセンサー装置やセンサー内蔵機器を配置し家庭内のセンサーネットワークを構成する場合、通信制御装置は安価であることが望ましい。

例えば、市中に普及している通信方式を採用することで、センサー装置やセンサー内蔵機器を比較的安価に実現することができると考えられる。

(2) 設置工事

既築住宅や近隣への適用を考えると、装置の設置工事／配線工事が簡単に行えることが重要となる。新規配線工事が不要であることが理想である。

(3) 低消費電力

各種のセンサー装置やセンサー内蔵機器においては、装置の設置制約等の問題から電池駆動が必要なケースが想定され、低消費電力を実現することが必要条件となる。

(4) 広域性

各種のセンサー装置やセンサー内蔵機器においては、家庭内から近隣エリアに拡大する場合はエリア内での通信が必要なため、半径数 km 程度の広域無線通信ができることが必要条件となる。

(5) 装置の設定

センサーネットワークを構成する機器の設定や制御については、設置時に簡単に初期設定でき、運用形態の変更を簡単に行うことができることが重要である。

現状では家庭内センサーネットワークの設置を行う場合は、家屋内の既設有線配線を利用する、または家屋内の無線到達性を考慮した低消費電力の無線通信を利用することが望ましく、エリアネットワークまで展開する場合は、通信速度とセキュリティ、及び広域性が重要と考える。