

IIJR

Internet
Infrastructure
Review

Dec.2024

Vol. 65

定期観測レポート

IIJインフラから見た インターネットの傾向～2024年

フォーカス・リサーチ

LPWAについてのIIJの取り組み ～ LoRaWAN[®]の現在地と Wi-Fi HaLow[™]の展望～

IIJ

Internet Initiative Japan

Internet Infrastructure Review

December 2024 Vol.65

エグゼクティブサマリ	3
1. 定期観測レポート	4
Theme 01 BGP・経路数	4
Theme 02 DNSクエリ解析	6
Theme 03 IPv6&モバイル	8
Theme 04 インターネットバックボーンのトレンド	12
2. フォーカス・リサーチ	16
2.1 はじめに	16
2.2 LoRaWAN [®] に関するIIJの取り組み	17
2.3 Wi-Fi HaLow [™] (IEEE 802.11ah)の特徴と今後の展望	20
2.4 むすび	25
Information	26

エグゼクティブサマリ

ここ数年、IT関連のニュースはAIに関するもので溢れていますが、なかでも2024年のノーベル物理学賞と化学賞がAIの研究者に授与されたことは、ひととき大きなニュースとなりました。

IT関連のノーベル賞としては、過去に半導体などのデバイスの分野に関するものがありましたが、物理学賞は今のAIを支える基礎となっている人工ニューラルネットワークの研究に対するものです。一方、化学賞はAIを使ったタンパク質の構造予測の研究に対するものでした。従来なら困難であった複雑なタンパク質の立体構造を、AIを用いて予測しています。AIが社会実装されたことによるイノベーションの1つです。

どちらもAI関連ではあるもの、一方はAI自体の開発に関する成果、もう一方はAIの活用によるIT以外の分野での成果ということで、AIという技術の社会への影響の大きさを再認識させられたニュースでした。

「IIR」は、IIJで研究・開発している幅広い技術を紹介しており、日々のサービス運用から得られる各種データをまとめた「定期観測レポート」と、特定テーマを掘り下げた「フォーカス・リサーチ」から構成されます。

1章の「定期観測レポート」では「IIJインフラから見たインターネットの傾向」について解説します。ここでは、BGP・経路数、DNSクエリ解析、IPv6トラフィックに関して、IIJの設備で観測できる統計を毎年取得し、分析しています。定期的に分析することにより、利用の傾向や実装の変化などを見出すことができます。普段は気づくことのない、インターネットのなかで起きている変化を解き明かす興味深いデータであると言えます。

2章の「フォーカス・リサーチ」は「LPWAについてのIIJの取り組み ～LoRaWAN[®]の現在地とWi-Fi HaLow[™]の展望～」です。以前からIIJは、IoT向けの通信手段としてLPWAに注目し、手軽に利用できるアンライセンズバンド型のLoRaWAN[®]を利用した数々のソリューションを提供してきました。そして2022年の電波法の改正により、日本国内でもWi-Fi HaLow[™]の利用が可能になりました。この章では、これまでのLoRaWAN[®]の取り組みを紹介すると共に、新しいWi-Fi HaLow[™]の特徴やIIJで実際に行った性能評価の結果に加え、今後の展望についてお伝えします。

IIJでは、このような活動を通じて、インターネットの安定性を維持しながら、日々改善し発展させていく努力を続けております。今後も、企業活動のインフラとして最大限に活用していただけるよう、様々なサービス及びソリューションを提供し続けてまいります。



島上 純一（しまがみ じゅんいち）

IIJ 取締役 専務執行役員 CTO。インターネットに魅かれて、1996年9月にIIJ入社。IIJが主導したアジア域内ネットワーク A-BoneやIIJのバックボーンネットワークの設計、構築に従事した後、IIJのネットワークサービスを統括。2015年よりCTOとしてネットワーク、クラウド、セキュリティなど技術全般を統括。2017年4月にテレコムサービス協会MVNO委員会の委員長に就任し、2023年5月に退任。2021年6月より同協会の副会長に就任。

IIJインフラから見たインターネットの傾向 ～2024年

インターネットサービスを提供するIIJは、国内でも有数規模のネットワーク・サーバインフラを運用しています。その運用によって得られた情報から1年間のインターネットの動向を分析し、本誌IIRで毎年報告しています。今回もBGP経路、DNSクエリ分析、IPv6、モバイルの各視点からここ1年の変化の傾向を分析しました。

総経路数は95万弱となりました。増加数は昨年の2倍超ですがそれでも過去10年で2番目の少なさであり(図-1参照)、その減少傾向は継続しているものと推測されます。なお今回は/10～/20の経路数がすべて減少となりました。移転目的のアドレスブロック分割が現在も活発であることの影響と思われます。またunique IPv4アドレス数は昨年よりも更に多い2200万強(0.6%)の減少となりました。昨年と合わせておよそ/8ブロック2つ分が失われた計算になります。

Theme 01

BGP・経路数

最初にIIJ網から他組織に広報している「IPv4フルルート」の情報(表-1)及び「IPv4フルルート」に含まれるunique IPv4アドレス数の情報(表-3)を確認します。

次に「IPv6フルルート」の情報(表-2)及び「IPv6フルルート」に含まれるunique IPv6/64ブロック数の情報(表-3)を確認します。

表-1 「IPv4フルルート」に含まれるプレフィクス長ごとの経路数の推移

年月	/8	/9	/10	/11	/12	/13	/14	/15	/16	/17	/18	/19	/20	/21	/22	/23	/24	total
2015年9月	18	13	36	96	261	500	999	1731	12863	7190	12317	25485	35904	38572	60900	52904	301381	551170
2016年9月	16	13	36	101	267	515	1050	1767	13106	7782	12917	25229	38459	40066	67270	58965	335884	603443
2017年9月	15	13	36	104	284	552	1047	1861	13391	7619	13385	24672	38704	41630	78779	64549	367474	654115
2018年9月	14	11	36	99	292	567	1094	1891	13325	7906	13771	25307	39408	45578	88476	72030	400488	710293
2019年9月	10	11	37	98	288	573	1142	1914	13243	7999	13730	25531	40128	47248	95983	77581	438926	764442
2020年9月	9	11	39	100	286	576	1172	1932	13438	8251	14003	25800	40821	49108	101799	84773	473899	816017
2021年9月	16	13	41	101	303	589	1191	2007	13408	8231	13934	25276	41915	50664	106763	91436	497703	853591
2022年9月	16	13	39	101	298	592	1208	2064	13502	8292	13909	25051	43972	52203	109071	96909	536520	903760
2023年9月	16	14	39	102	298	577	1196	2064	13490	8245	13809	25059	43863	51012	109514	98178	550621	918097
2024年9月	16	16	37	93	295	573	1165	2059	13224	8220	13718	24624	43786	51827	111483	99239	579274	949649

表-2 「IPv6フルルート」に含まれるプレフィクス長ごとの経路数の推移

年月	/16-/28	/29	/30-/31	/32	/33-/39	/40	/41-/43	/44	/45-/47	/48	total
2015年9月	142	771	168	6846	1808	1150	386	990	648	10570	23479
2016年9月	153	1294	216	8110	3092	1445	371	1492	1006	14291	31470
2017年9月	158	1757	256	9089	3588	2117	580	1999	1983	18347	39874
2018年9月	168	2279	328	10897	4828	2940	906	4015	2270	24616	53247
2019年9月	192	2671	606	12664	6914	3870	1566	4590	4165	34224	71462
2020年9月	205	3164	641	14520	9063	4815	2663	5501	4562	45160	90294
2021年9月	223	3628	705	20650	13050	10233	4170	11545	5204	61024	130432
2022年9月	298	4247	895	21926	15147	12509	4108	13840	6994	73244	153208
2023年9月	316	4357	923	23228	17427	14828	5518	16453	9579	86881	179510
2024年9月	322	5360	934	24739	20198	17657	4672	19418	12470	95628	201398

総経路数は20万超に到達しました。増加数は昨年よりは減少しましたが一昨年と同程度を維持しています。"/41-/43"列の数を除くと本定期観測を開始して以来増加する一方の各経路数ですが、今回は/29の増加数が初めて4桁になったことが目を引きまます。unique/64ブロック数も30%弱の増加となっており、IPv6の導入、IPv6ネットワークの拡大が引き続き進んでいることが窺えます。なおBGPとは無関係の余談ですが、昨今想定される大規模ネットワークの例示に従来のもの(/32)では不足との理由から、より大きなドキュメント用IPv6アドレスブロック(/20)の追加が行われています(RFC9637)。

最後に「IPv4/IPv6 フルルート」広報元AS(Origin AS)数を確認します(表-4)。なおこの1年の間にARIN及びLACNICに

対し各々1024の32-bit only AS番号が追加割り振りされています。

2016年にIANAの16-bit AS番号在庫が枯渇してから8年が経過しました。16-bit AS番号Origin AS数の9年連続減少も仕方なしと思えますが少々寂しくも感じます。32-bit only AS番号 Origin AS数は「IPv4+IPv6」「IPv4のみ」「IPv6のみ」のいずれも増加しましたが増加数は各々一昨年よりも少ない程度となっています。特に「IPv4のみ」の増加数は3桁に留まり同16-bit AS数の減少数を下回ったため全体の「IPv4のみ」Origin AS数も2年連続の減少となりました。2021年から続く「IPv4+IPv6」32-bit only AS増加数が同「IPv4のみ」増加数を上回る傾向と併せて、来年の結果が気になるところです。

表-3 「IPv4フルルート」に含まれるunique IPv4アドレス総数及び「IPv6フルルート」に含まれるunique IPv6/64ブロック総数の推移

年月	IPv4 アドレス数	IPv6 /64ブロック数
2015年9月	2,791,345,920	31,850,122,325
2016年9月	2,824,538,880	26,432,856,889
2017年9月	2,852,547,328	64,637,990,711
2018年9月	2,855,087,616	258,467,083,995
2019年9月	2,834,175,488	343,997,218,383
2020年9月	2,850,284,544	439,850,692,844
2021年9月	3,036,707,072	461,117,856,035
2022年9月	3,068,374,784	532,578,391,219
2023年9月	3,055,604,992	700,359,397,494
2024年9月	3,033,333,504	896,502,953,452

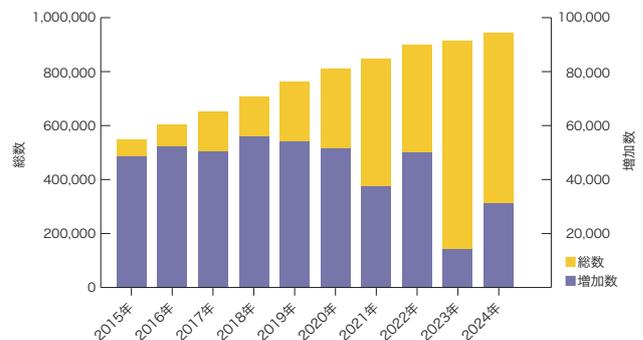


表-4 「IPv4/IPv6フルルート」の広報元AS数の推移

AS番号	16-bit (1~64495)					32-bit only (131072~419999999)				
	IPv4+IPv6	IPv4のみ	IPv6のみ	total	(IPv6-enabled)	IPv4+IPv6	IPv4のみ	IPv6のみ	total	(IPv6-enabled)
2015年9月	8228	34544	137	42909	(19.5%)	1424	6801	78	8303	(18.1%)
2016年9月	9116	33555	158	42829	(21.7%)	2406	9391	146	11943	(21.4%)
2017年9月	9603	32731	181	42515	(23.0%)	3214	12379	207	15800	(21.7%)
2018年9月	10199	31960	176	42335	(24.5%)	4379	14874	308	19561	(24.0%)
2019年9月	10642	31164	206	42012	(25.8%)	5790	17409	432	23631	(26.3%)
2020年9月	11107	30374	229	41710	(27.2%)	7653	19668	574	27895	(29.5%)
2021年9月	11465	29219	302	40986	(28.7%)	9514	21108	5242	35864	(41.1%)
2022年9月	11613	28398	369	40380	(29.7%)	10816	22211	5764	38791	(42.7%)
2023年9月	11770	27617	460	39847	(30.7%)	12640	22128	2067	36835	(39.9%)
2024年9月	12068	26720	476	39264	(31.9%)	13905	22737	2386	39028	(41.7%)

DNSクエリ解析

IJでは利用者がDNSの名前解決を利用できるようフルサービスリゾルバを提供しています。この項目では名前解決の状況を解説し、IJで2024年10月9日に行ったフルサービスリゾルバの1日分の観測データのうち、主にコンシューマサービス向けに提供しているサーバのデータに基づいて分析と考察を行います。

フルサービスリゾルバは利用者端末からのDNS問い合わせに応じて必要な名前解決機能を提供します。具体的には、名前を解決するためrootと呼ばれる最上位のゾーン情報を提供する権威サーバのIPアドレスを手がかりとして、問い合わせを行い、適宜権威サーバをたどって必要なレコードを探します。フルサービスリゾルバが毎回このように他のサーバに問い合わせをしていると負荷や遅延の影響が問題となるため、得られた情報はしばらくキャッシュしておいて再び同じ問い合わせを受けた場合にはそのキャッシュから応答しています。最近はこの他にも家庭用ルータやファイアウォールなど、通信経路上の機器にもDNS関連の機能が実装されており、DNS問い合わせの中継や制御ポリシーの適用に関わっている場合があります。また、Webブラウザなど一部のアプリケーションでは独自の名前解決機能を実装している場合があり、OSの設定とは異なるポリシーで名前解決を行っている場合もあります。

ISPは接続種別に応じたPPPやDHCP、RA、PCOなどの通知手段を利用してフルサービスリゾルバのIPアドレスを利用者に伝え、利用者端末が名前解決用のネームサーバを自動設定できるようにしています。ISPは複数のフルサービスリゾルバを利用者に伝えられるほか、利用者は自身でOSやWebブラウザな

どの設定を変更して利用するネームサーバを指定することもできます。端末に複数の名前解決用ネームサーバが設定されている場合、どれを利用するかは端末の実装やアプリケーションに依存するため、フルサービスリゾルバ側では利用者が総量としてどの程度の問い合わせを行っているか分かりません。このため、利用者側の挙動や状態が変わると、突然あるフルサービスリゾルバ向けの問い合わせが増えることも考えられるため、フルサービスリゾルバでは問い合わせ動向を注視しながら、常に処理能力に余裕を持たせた運用を心がける必要があります。

IJが提供するフルサービスリゾルバの観測データを見てみると、利用者の利用傾向を示すように時間帯によって問い合わせ量の変動し、朝4時25分頃に問い合わせ元のIPアドレス当たり最小の0.15query/sec、夜21時50分頃にピークを迎えて0.32query/sec程度になっています。昨年に比べると、全般に0.02ポイント程度減少しています。問い合わせ傾向を通信に使われたIPv4とIPv6のIPプロトコル別に見てみると、昨年からはIPv6が+1ポイント程度増えており、IPv4を通信に使った問い合わせが全体の約59%、IPv6が約41%となっています。

近年の特徴的な傾向として、朝方の正時などキリの良い時刻に一時的に問い合わせが増加することが挙げられます。今年もこれまでと同様、朝6時や朝7時にそうした増加が見られました。午前6時と午前7時の14秒前と9秒前の問い合わせも前年同様増加している事が観測できました。これは近年見られている傾向で、正時に増加する問い合わせ量では急な増加後、緩やかに問い合わせ量が減っていくのに比べて、正時前の増加では急な増加の直後にそれまでの問い合わせ量程度に戻っています。つまり多くの端末が綺麗に同期して問い合わせを行っていることから、何かすぐに完了する軽量のタスクが実行されているのではないかと推測しています。一方で、今年是这样したキリの

良い時刻の増加量が今までと比べて減少しているほか、朝8時から夜22時までの正時には逆に問い合わせが減少して、そこから徐々に増加する傾向が観測できました。名前解決を利用している端末の実装に何らかの変更があったと推測しています。

問い合わせプロトコルに注目すると、UDPが98.438%でほとんどがUDPでの問い合わせになっています。ただ、TCPでの問い合わせは2021年が0.189%、2022年が0.812%、2023年が1.419%、2024年が1.561%であり、ここ数年TCPでの問い合わせ割合が増加してきています。主な増加要因として、DNS over TLS (DoT)での問い合わせが増えてきていることが挙げられます。DoTでは基本的にTCPの853番ポートを使って問い合わせをするため、DoTの利用が増えるとTCPの問い合わせが増えることになります。

問い合わせレコードタイプに注目すると、ホスト名に対応するIPv4アドレスを問い合わせるAレコードとIPv6アドレスを問い合わせるAAAAレコード、そしてWebサービスの解決に用いられるHTTPSレコードが全体の98%を占めています。AとAAAAの問い合わせ傾向は通信に利用されるIPプロトコルで

違いが見られ、IPv6での問い合わせではより多くのAAAAレコード問い合わせが見られます。IPv4での問い合わせでは、全体の62%程度がAレコード問い合わせ、17%程度がAAAAレコード問い合わせです(図-2)。一方IPv6での問い合わせでは、全体の40%程度がAレコード問い合わせ、35%程度がAAAAレコード問い合わせです(図-3)。昨年と比べるとIPv4では+5ポイント、IPv6でも+2ポイント程度Aレコードの問い合わせ割合が増加しています。これに代わって、2020年から観測され始めたHTTPSレコードのDNS問い合わせが今回初めて減少傾向を示しました。IPv4で17%、IPv6で24%程度となっており、昨年と比べるとIPv4で-3ポイント、IPv6では-2ポイントと減少していました。クライアントの実装に何らかの変更があったことが考えられます。2022年から観測され始めたSVCBレコードは、IPv4で0.30%、IPv6では0.57%と、まだ全体に対する比率は少ないながらも順調に推移しています。これは、Discovery of Designated Resolvers (DDR)という、クライアントが暗号化に対応したフルサービスリゾルバを検出するための新しいプロトコル提案の実装が利用されているためと推測しています。

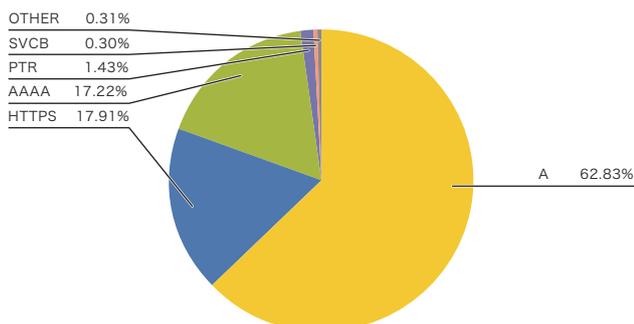


図-2 クライアントからのIPv4による問い合わせ

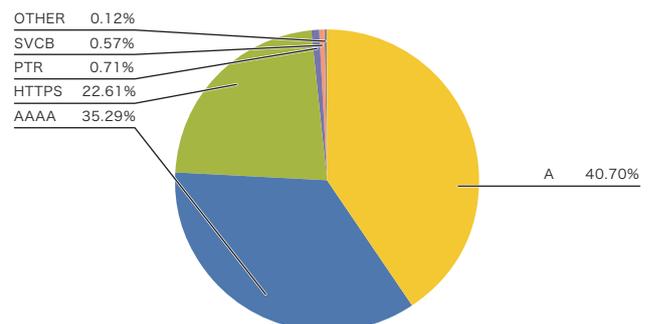


図-3 クライアントからのIPv6による問い合わせ

IPv6&モバイル

今回もIJJバックボーンのIPv6トラフィック量、送信元AS、主なプロトコルについて見ていきます。また、モバイルサービスの端末OS別のIPv6接続状況などについても調査したいと思います。

■ トラフィック

IJJのコアPOP(東京3カ所、大阪2カ所、名古屋2カ所)のバックボーンルータで計測したトラフィックを図-4に示します。集計期間は2024年2月1日から9月30日までの8カ月間です。2024年のインターネットトラフィック量の期中の推移とし

ては、IPv6、IPv4共に緩やかに減少傾向となっていました。昨年同日(グラフの薄い色の線)と重ねて比較すると、IPv6、IPv4いずれも昨年よりは増加しており、それぞれの前年比はIPv6が14.309%増、IPv4が14.505%増であり、ほぼ同じ増加率となっていました。

図-5に、2024年2月1日を100として指数化したグラフを示します。先ほどご紹介したとおり、年初からのトラフィック量の推移としては微減かつ、IPv6もIPv4もほぼ同様の動きとなっています。

次に、トラフィック全体に占めるIPv6の比率を図-6に示します。最小18.6%から最大22.5%ほどで推移し、期中の平均は

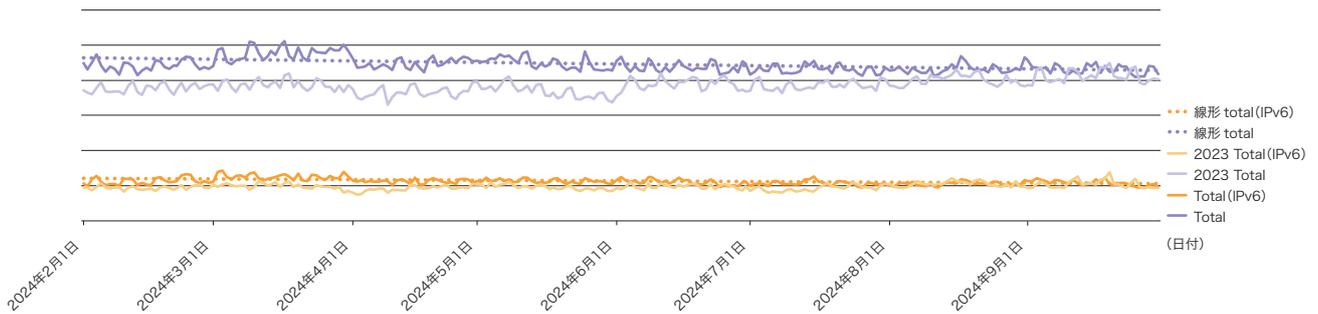


図-4 IJJコアPOPのバックボーンルータで計測したトラフィック

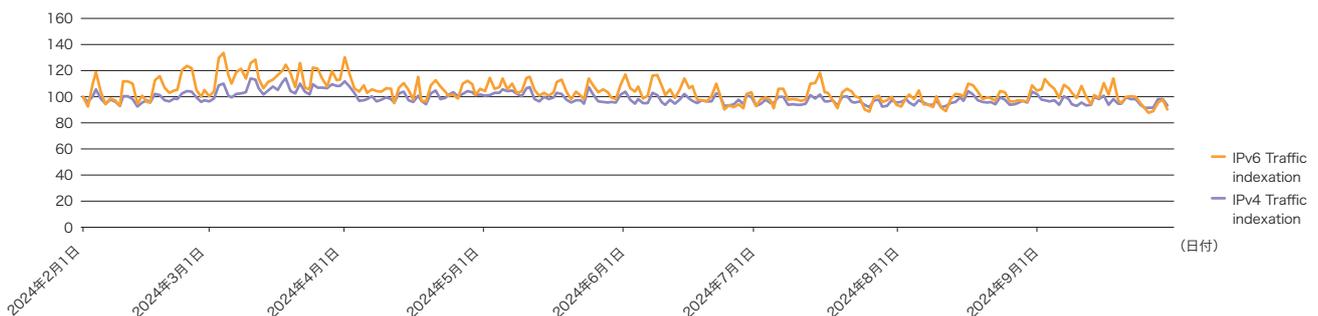


図-5 2024年2月1日を100としたときの変動状況

20.16%となっています。大きなトレンドは見取れず、昨年同時期とほぼ同等の比率となっていて、IPv6の伸びは小休止といったところでしょうか。

以下に2017年からのIPv6比率の推移を表-5に示します。これまでコロナ禍を除いて順調に伸びてきましたが、今年は昨年と同等の比率となりました。

■ 送信元組織(BGP AS)

2024年2月1日から2024年9月30日までの、IPv6とIPv4のトラフィック送信元組織(BGP Source AS番号)の上位を図-7と図-8に示します。

IPv6では、IIJ内の配信などが6割以上を占めますが、IIJ以外のASについて見ていきます。まず昨年2位だった米検索大手のA社がトラフィック比率6%で1位となりました。2位は昨年1位だった日本の大手コンテンツ事業者のB社で比率は5%でした。今回1位と2位が入れ替わりとなりましたが、トラフィック量は拮抗しているので今後も再逆転があるかもしれません。3位は米クラウド事業者のC社で昨年の8位から上ってきました。一昨年は16位だったので、ここ数年大きくIPv6トラフィックを伸ばしているといえます。ただし、トラフィック比率は約2%と上位2社からは少し開きがありますし、4位以下もかなり拮抗しているので、今後も毎年のように順位は変わっていくものと思われれます。

表-5 IPv6比率の推移(2017年～)

	2017年 IIR Vol.37	2018年 IIR Vol.41	2019年 IIR Vol.45	2020年 IIR Vol.49	2021年 IIR Vol.53	2022年 IIR Vol.57	2023年 IIR Vol.61	2024年 IIR Vol.65
IPv6比率	4%	6%	10%	10%	11.2%	15.1%	20.1%	20.16%

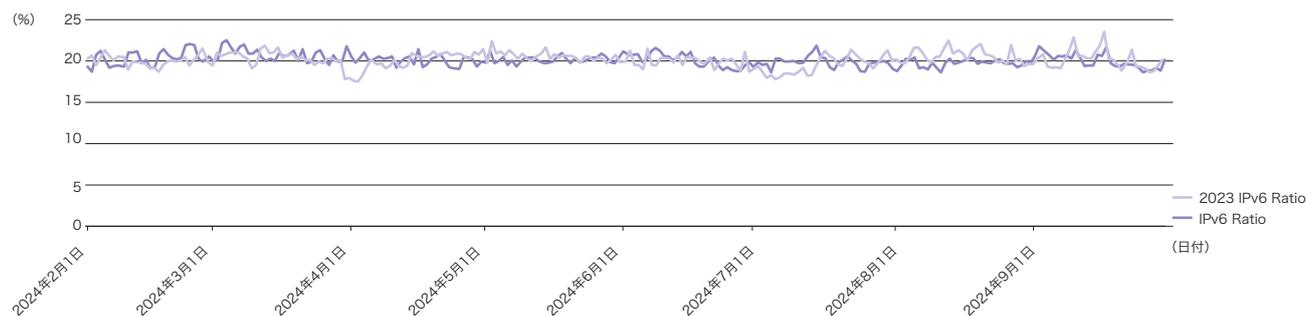


図-6 トラフィック全体に占めるIPv6の比率

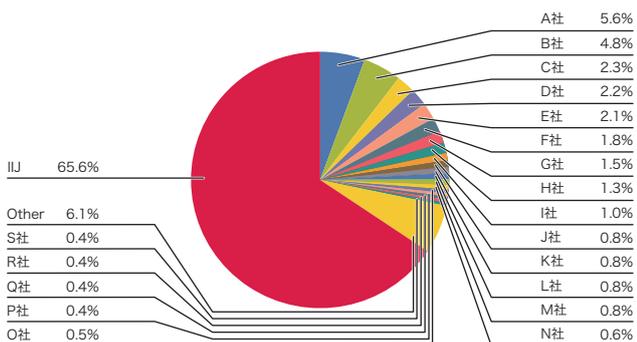


図-7 IPv6のトラフィック送信元組織(BGP Source AS番号)

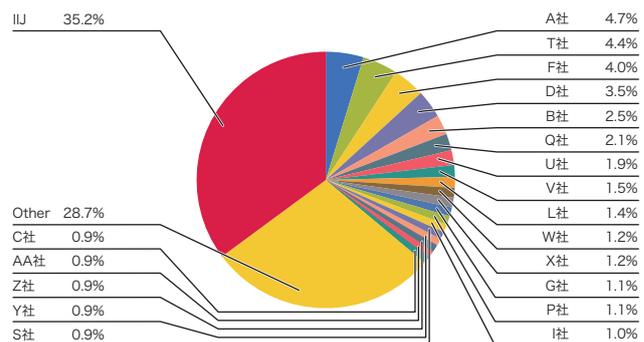


図-8 IPv4のトラフィック送信元組織(BGP Source AS番号)

■ 利用プロトコル

IPv6トラフィックのProtocol番号(Next-Header)と送信元ポート番号で解析したグラフを図-9に、IPv4トラフィックのProtocol番号と送信元ポート番号のグラフを図-10に示します。期間は2024年9月30日(月)から10月6日(日)の1週間です。

IPv6は、昨年同様HTTPS、QUIC、NAT Traversal、ESPと続き、これら上位4つのプロトコルで利用率91%を占めます。なお、HTTPSは74%、QUICは9%で、HTTP系プロトコルで8割以上となり、NAT-TとESPのVPN系プロトコルは8.4%でした。

トラフィック傾向は昨年と大きく変わりませんが、全体的に昼間のトラフィックが増えているように見えます。特にIPv6は土曜日曜の昼のトラフィックが増加しており、個人ユーザのトラフィックが大きな比率を占めるのではないかと推察しています。また、IPv4においてはUDP443がTCP80を上回り、非暗号化HTTPが減少しています。しかしほぼグラフでは見え

ないくらいの量しかないIPv6のHTTPと比べ、IPv4ではやっとQUICに追い越されたところで、まだまだ古いサーバが多いのではないかと考えられます。

■ モバイルのIPv6接続状況

一昨年の本レポートのVol.57(<https://www.ij.ad.jp/dev/report/iir/057.html>)及び昨年の本レポートのVol.61(<https://www.ij.ad.jp/dev/report/iir/061.html>)に続いて、今回も個人向け「IJmioモバイルサービス」の接続における、IPv6有効化率を調査します。また、端末OS種別による違いと端末メーカーによる違いの有無も見てみることにします。

IJmioモバイルサービスに接続している端末のIPv6有効化率は60.6%でした。昨年は58.73%、一昨年は56.3%で、毎年2ポイント程度の増加となっています。端末OS別に見ると、Apple iOSのIPv6有効化率は87.010%、AndroidのIPv6有効化率は30.235%でした。AndroidのIPv6有効化率は昨年

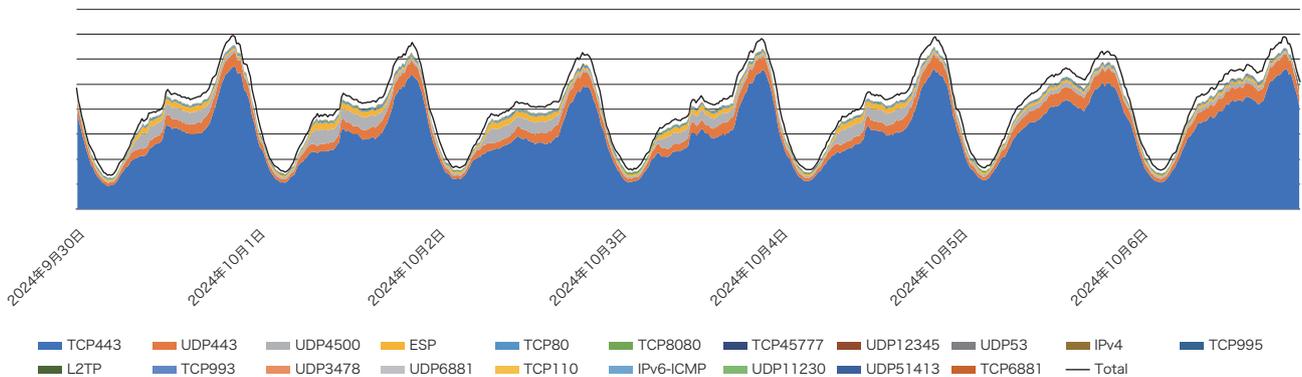


図-9 IPv6トラフィックの送信元ポート解析

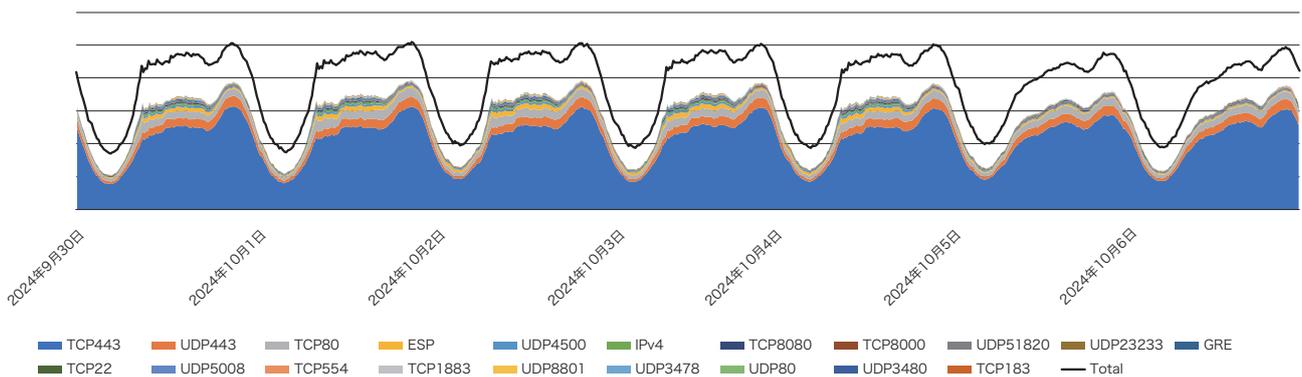


図-10 IPv4トラフィックの送信元ポート解析

比較で5ポイントと大きく上昇していて、全体のIPv6有効化率増に寄与しています。

次に、IIJmioモバイルサービスに接続している端末の上位20位までのメーカー別IPv6有効化率を見てみます。図-11に上位20社のグラフを示します。日本ではApple製品を利用してユーザが多く、53%以上のシェアとなっています。そしてAppleのIPv6有効化率は約87%と高く、昨年より若干有効化率が上がっています。なお、IPv6有効化率が最も高かった端末メーカーはモトローラモビリティで、有効化率91.7%となっています。続いてAppleの87%、3番目はGoogleの86%となります。

今回注目したのは、IIJmio接続端末数では14位のFCNTです。今年新製品としてarrows we2などが発売となりましたが、arrows we2単体で見ると、IPv6有効化率は97.6%となっており、デフォルト設定でAPNプロファイルがPDP-Type IPv4v6になっていて、IPv6接続が有効になっているものと考えられます。ただし、同じFCNT製でも、MNO向け端末であるF-51Bは7.4%のIPv6有効化率で、FCNT製端末全体では31.2%に留まってしまいます。

■ まとめ

今回もIIJインターネットバックボーンコアのトラフィック、送信元AS、プロトコルについて紹介しました。トラフィック量は期中微減、昨年比約14%強の増加でした。IPv6の利用率はほぼ横ばいの20.16%で、今年は足踏み状態となりました。送信元ASで見るIPv6トラフィック量は1位と2位が逆転しましたが拮抗、3位以下もそれぞれ1～2%で拮抗状態です。

利用プロトコルについては、これまで同様、IPv6の方が比較的新しく構築されたサーバが多いとみられ、暗号化HTTP系プロトコルが8割以上を占め、非暗号化HTTPは微量となっていますが、IPv4だと非暗号化HTTPはまだそれなりにある状態です。

モバイルについては、Android系OSの端末でIPv6有効化率が5ポイント上昇、全体として2ポイント弱の上昇となりました。また、新たに発売となった端末でAPN設定のPDP-Type設定でIPv6が有効化されているように見受けられます。今後もデフォルトでIPv6有効化された端末が増えていくことが望まれます。

引き続き様々な角度からIPv6の状況を観察しつつ、何か新しい発見がありましたら紹介したいと思います。

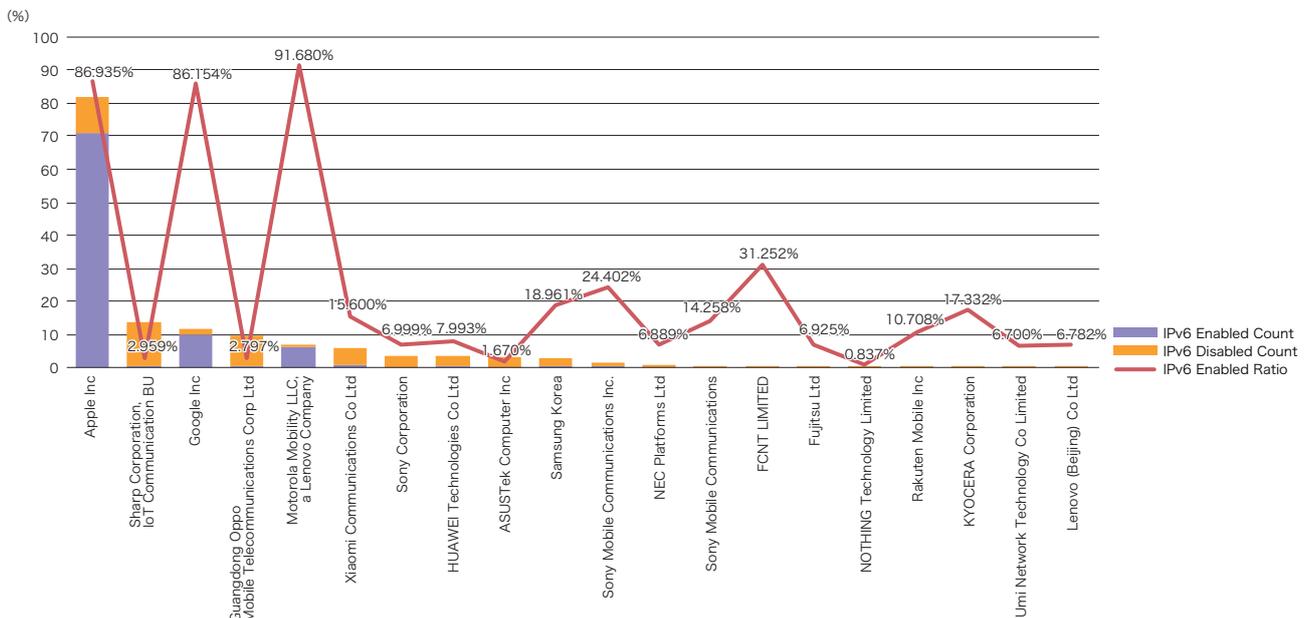


図-11 UEメーカーIPv6有効化状況(上位20社)

インターネットバックボーンのトレンド

IIJのインターネットバックボーンインフラの相互接続と経路の観点から昨今のインターネットバックボーンに関するトレンドを紹介します。

■ 相互接続インタフェースのトレンドと要件

インターネット上で相互接続を行うには、インタフェースを事業者間で統一させる必要があります。現在、IIJでは相互接続のインタフェースとして主に400G-FR4、100G-LR4及び10G-LRを利用しています。ここ数年のトレンドとして、10Gのインタフェースを使った事業者間の相互接続を見直す動きがあります。事業者が相互接続を行う目的として、「トラフィック交換にかかる費用の削減」及び「効率化による通信品質の向上」が挙げられます。費用削減の観点では、相互接続に10Gのインタフェースを利用することがコスト的に見合わない状況になりつつあると想像されます。その主要要因として、事業者間のAS境界で利用される相互接続ルータの100Gポートあたりのコスト改善と10Gインタフェースの扱いづらさが挙げられます。相互接続ルータはIIJにおいても広帯域かつ高密度のものを要望・選定します。そういったルータで10Gのインタフェースを

利用するとポートの利用効率下がってしまいます。理由としては、100Gと10Gがポート構成上、排他的に利用される場合が多いためです。限りある物理インタフェースポートを10Gで利用すると100Gに比べて帯域が小さくなりますし、その分運べるトラフィック量が少なくなり、結果としてポートあたりの利用効率下がります。また、相互接続ルータとして10Gから400Gインタフェースまで対応できるものを選定しようとすると100G/400Gのみ対応可能なルータに比べて機能や価格で満足できる選択肢が狭まることです。

そのため、IIJでは10Gインタフェースの利用が必須ではない接続やLink Aggregationにより10Gの回線を複数束ねている接続、今後帯域を10G以上へ増速する可能性がある接続では、相互接続する相手に対して10Gから100Gのインタフェースへの増強をお願いしています。同様にIIJの相互接続先事業者からも今後は10Gの個別接続から、IXP経由の接続に変更する、もしくは100Gインタフェースへポート増強のリクエストを受けるようになっていきます。

図-12と図-13を比較して、IIJのインターネットバックボーンの直近1年間における相互接続インタフェースの割合の変化を見てみます。ここ1年で全体割合に対して10Gの利用が減少

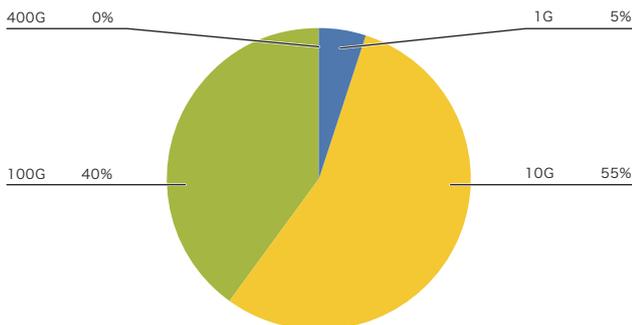


図-12 IIJインターネットバックボーンにおける相互接続インタフェースの割合(2023年10月)

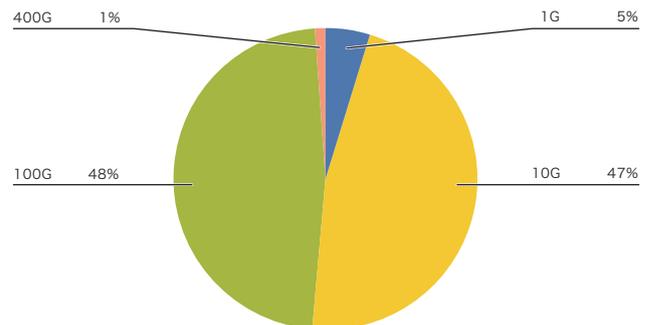


図-13 IIJインターネットバックボーンにおける相互接続インタフェースの割合(2024年10月)

し、100Gのインタフェースの利用率が上昇していることが分かります。

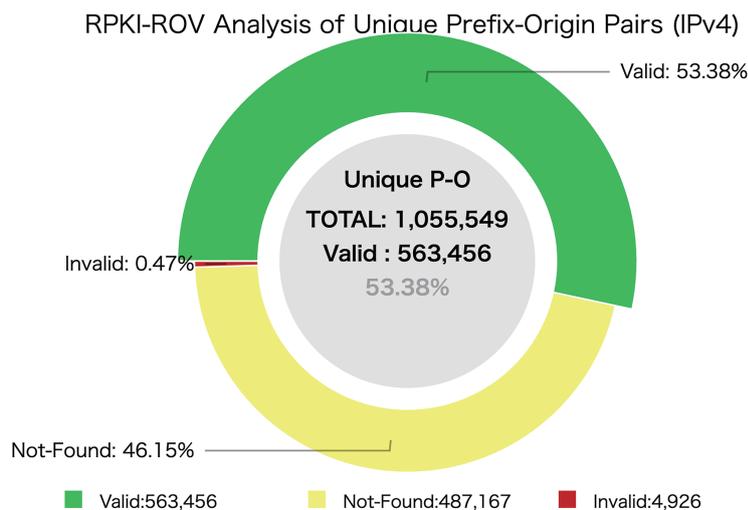
100G以上の相互接続のインタフェース要件として、400Gインタフェースの利用が検討されていますが、利用に関してはまだ限定的な印象です。IXP事業者での対応は比較的進んでいる認識ですが、事業者間での相互接続においては大規模なトラフィックを持つ事業者以外はまだまだこれからの対応と思われます。

その他、新たなトレンドとして、100Gのインタフェースにおいて100G-LRの利用を推進する動きが見受けられます。100G-LRは現在広く使われている100G-LR4と比較して、1波長あたりの伝送容量が25Gから100Gへ増えた仕様です。レーザーの数が1個体あたり4から1へ減ったため個体あた

りのコスト低下及び部品点数が減ったことによる故障率の低下がメリットとして挙げられます。現在欧米のIXPを中心として相互接続インタフェースに100G-LRの利用が始まっていて、今後は事業者間の相互接続にも利用されていくと予想されています。

■ RPKI関連の状況

RPKI関連の状況について確認してみましょう。自組織が保有するIPアドレスの正当性を署名として登録されるROAの状況をみてみます。インターネット上に公開されている NIST RPKI MonitorによるROAの当登録状況(図-14、図-15)^{*1}としては、インターネット上の全IPv4経路におけるValid (ROAが登録され、経路検証済)の割合が53.38%、Not-Found (ROAの登録がまだ実施されていないもの)の割合が46.15%、Invalid (ROAの登録状況に差異があり、不正経路と扱われる



NIST RPKI Monitor:RPKI-ROV Analysis Protocol:IPv4 RIR: All Date: 2024-10-15 18:00
 URL: <https://rpki-monitor.antd.nist.gov/ROV#div1>

図-14 RPKI MonitorによるROAの当登録状況(IPv4)2024年10月15日18:00

*1 参照:NIST RPKI Monitor(<https://rpki-monitor.antd.nist.gov/>)。

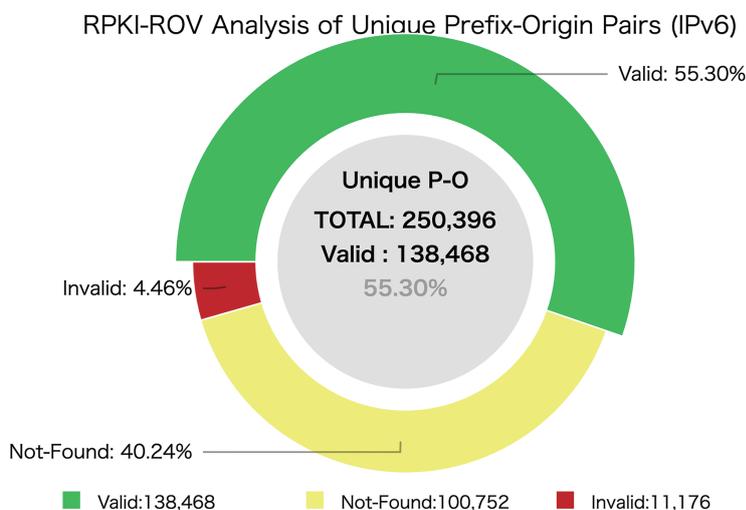
もの)の割合が0.47%であるようです。IPv6においてはValidが55.30%、Not-Foundが40.24%、Invalidが4.46%でした。IPv4におけるROAの登録の割合が50%を超えてきており、半数以上の経路で正当性が担保されている点についてはだいぶ進捗したように見て取れます。一方でIPv6はInvalid経路が4%以上ある状況です。ROAの登録はシンプルで、経路を生成・広告するOriginAS、PrefixとSubnet情報、広告する最大経路長(Subnetのサイズ)を登録します。いずれかのパラメータがROAと矛盾となるとInvalidとなってしまいますため、検証目的ではない場合は是正が必要と思われます。現在、RPKI-ROVをAS

境界のBGPピアで有効にしており、IJへピアから広告される経路についてはROAに基づいたOrigin Validationを実行しています。Invalid経路については経路ハイジャックであるかどうかの見分けがつかないため、基本的には受け取らないようなポリシーで運用しています。

一方で、IJが生成・広告しているインターネット経路のROA登録状況をみてみましょう(表-6)。IJはAS2497というGlobal ASを保有してインターネットへ参加しており、IJから経路広告される場合のOriginASはAS2497となります。2024年10

表-6 IJが生成・広告しているインターネット経路のROA登録状況

	Origin AS2497である経路数	IJがTransitし、インターネットへ広告している経路数
Valid	80	4200
Unknown	102	3757
Invalid	0	3
Valid rate	44.0%	52.8%



NIST RPKI Monitor:RPKI-ROV Analysis Protocol: IPv6 RIR: All Date: 2024-10-15 18:00
URL: <https://rpki-monitor.antd.nist.gov/ROV#div1>

図-15 RPKI MonitorによるROAの当登録状況(IPv6)2024年10月15日18:00

月16日現在において、AS2497がOriginとなる経路のROA登録状況としては、Validの割合が44.0%となります。約半分弱においてROA登録されており、経路の正当性が担保されている状況です。一方で、ROAが登録されていないNot-FoundとしてROV判定されている経路は50%以上存在します。ROA登録の敷居が高いところとして、IPアドレスを保有する組織が自らROA登録、発行する必要があります。IIJが保有するIPアドレスは特殊な場合を除いてROA登録はほぼ完了している状況ですが、IIJへIPアドレスを持ち込まれているユーザにおいてはまだROA登録が進んでいないことが確認でき

ます。IIJでの代行登録ができない現状ではユーザ自身に登録してもらう必要があります。IIJからのサポートを行いますので、ぜひAS2497のROA登録率を上げていけるようにご協力をお願いいたします。

また、IIJがお客様の経路をトランジットしている割合を含めると、全経路の52.8%はROVでValidとして判定されています。日本国内においてもROAの発行が進んでいる状況が見て取れます。

執筆者:

1.BGP・経路数

倉橋 智彦 (くらはし ともひこ)

IIJ 基盤エンジニアリング本部 運用技術部 技術開発課

2.DNSクエリ解析

松崎 吉伸 (まつざき よしのぶ)

IIJ 基盤エンジニアリング本部 運用技術部 技術開発課

3.IPv6&モバイル

佐々木 泰介 (ささき たいすけ)

IIJ MVNO事業部 基盤開発部

4.インターネットバックボーンのトレンド

蓬田 裕一 (よもぎた ゆういち)

IIJ 基盤エンジニアリング本部 ネットワーク技術部 ネットワーク技術1課

LPWAについてのIIJの取り組み ～LoRaWAN[®]の現在地とWi-Fi HaLow[™]の展望～

2.1 はじめに

IoT(Internet of Things)という言葉が世の中に浸透して久しいですが、SDGsに始まる昨今の社会課題を解決しようとする動きに対し、IoTが主要な手段のうちの1つであることは間違いないと言えるでしょう。例えば、スマート農業のような労働人口減少下における生産性向上の取り組みや、スマートシティにおけるエネルギー利用の効率化などのためにIoTを用いることが挙げられます。IoTそのものは抽象的な概念であるために様々なアプローチが存在しますが、LPWA(Low Power Wide Area)無線を搭載したセンサーなどの機器によるデータ収集及びそのデータの利活用はよく知られた事例です。

LPWAとは、その名称のとおり低消費電力で広範囲に届く無線技術の総称です。通信速度や通信頻度を落とすことで消費電力

を抑えており、通信方式や運用方法による差異もありますが、小型のバッテリーであってもセンサーなどの機器を年単位で稼働させることが可能です。また、無線の周波数帯域を狭めたり、周波数拡散を行ったりすることで長距離の伝送であっても信号の劣化をできるだけ抑えるような工夫がなされています。LPWAは大きく分けてライセンスバンド型(通信キャリアが提供するもの)とアンライセンスバンド型(Wi-Fi[®]用の機器などのように、総務省の許可を得た無線機器^{*1}であれば誰でも自由に使用できるもの)の2種類が存在しますが、その中でも更にくつつかの通信方式があり、表-1に示すようにそれぞれ特徴を有しています。

IIJでは、アンライセンスバンド型では世界的にもデファクトスタンダードになりつつあるLoRaWAN[®]に着目し、LoRaWAN[®]を

表-1 LPWAの種類と主な特徴

	通信方式	利用者側での 基地局の設置	通信可能範囲の目安	通信速度の目安	主な特徴
ライセンスバンド型 (携帯電話の周波数帯を使用)	LTE-M	不要	基地局エリア内	～数百kbps ^{*3*4}	既存のLTEの設備が使えるため、ライセンスバンド型ではメジャーな方式。他の方式と比べると消費電力は高めだが、ハンドオーバー可能なで移動体にも適している
	NB-IoT	不要	基地局エリア内	～100kbps ^{*3}	LTE-Mよりも帯域幅・伝送速度を抑えることで消費電力を下げている。ハンドオーバー不可。LTEと互換性がなくなったこともあり、日本国内では基地局の整備が進まず、現在はソフトバンクのみが展開 ^{*5}
アンライセンスバンド型 (主に920MHz帯の特定小電力無線) ^{*2}	ELTRES [™]	不要	～100km ^{*6}	数十bps ^{*7}	ソニーが開発した独自通信規格で、超長距離伝送や移動体にも対応。時刻同期にGNSSを使うため、屋外での使用を想定している。ソニーネットワークコミュニケーションズが基地局を含めサービスとして展開
	LoRaWAN [®]	必要	～10km	～約5kbps	Semtech社(米)が開発したLoRa [®] 通信を用いている。チャープ方式によるスペクトル拡散を採用しておりノイズに強い。LoRaWAN [®] は物理層より上位(アプリケーション層除く)のプロトコルを規定したもので、その仕様がオープンになっていることから、アンライセンスバンド型では世界的にも利用台数が多い ^{*8}
	Sigfox	不要	人口カバー率95% ^{*9}	100bps ^{*10}	UnaBiz SAS社(仏)が提供。無線の干渉を極限まで抑えるため超狭帯域(100Hz)で通信する。速度も抑えられるが、安価に利用できる。日本国内の事業者は京セラコミュニケーションシステムで、基地局を含めサービスとして展開
	Wi-Fi HaLow [™]	必要	～2km ^{*11}	～数Mbps ^{*11}	IEEE 802.11ahで標準化されている規格で、既存のWi-Fi [®] (IEEE 802.11シリーズ)の技術がベースとなっている。HaLowとは、Wi-Fi Alliance [®] から認証を受けた機器に適用されるブランド名。アンライセンス系LPWAの中では高速で、ストリーミング通信にも適している
	ZETA	必要	～10km ^{*12}	～50kbps ^{*12}	ZifiSense社(中国)が開発した通信方式。超狭帯域(2kHz)通信を採用している。多チャネル通信や、メッシュネットワークにも対応

*1 日本国内では、一般的に技適マークを取得している機器のことを指します。

*2 LPWAで用いられるアンライセンスバンド型の規格は、920MHz帯の特定小電力無線を使用しているものがほとんどです。920MHz帯は他の特定小電力無線と比較して、障害物に強く(回折しやすい)、かつ、通信速度や到達距離も確保しやすいためIoTの用途に適していると言われていました。「計装豆知識「920MHz帯無線通信について」、エムジートレンド(https://www.mgco.jp/magazine/plan/mame/b_network/1510/)。「Sub-GHz無線とは」、TechWeb(<https://techweb.rohm.co.jp/product/wireless/sub-ghz/43/>)。

用いた様々なサービスを展開しています。また、既存のWi-Fi®の技術がベースとなっており、ユーザサイドにも馴染みやすいWi-Fi HaLow™にも着目し、技術調査などの活動を進めています。本稿では、IIJにおけるLoRaWAN®に関する現在までの取り組みや、Wi-Fi HaLow™の技術的な特徴について自社での実験結果も踏まえつつ紹介し、今後の展望についても述べていきます。

2.2 LoRaWAN®に関するIIJの取り組み

アンライセンス系のLPWAでは世界的に見てもLoRaWAN®のシェアが最も多く、接続回線数が2024年で約5億、2026年では約7.5億になるとも予想されています*8。海外では各種メータ(水道など)の監視や、スマートビルディングの分野での活用が先行しているようですが、国内ではIIJが主導している以下の分野でも広がりを見せています。

■ 農業IoT

IIJでは、2017年に農林水産省の公募事業である革新的技術開発・緊急展開事業(うち経営体強化プロジェクト)を受託し、IoT技術で水田の水管理を効率化するための研究開発(実証実験含む)を3年間に渡り行ってきました*13*14。

その中で、次の理由から農業IoTのLPWA無線規格として優位性のあるLoRaWAN®を採用しました*15。

- ・ 小型のバッテリーでも、測定頻度が少なければ年単位でエンドデバイス(センサーなど)を稼働可能
- ・ 利用形態に応じた基地局の配置が可能なので、サービス

提供事業者側の制約を受けにくい(他の規格のサービスエリア外であっても利用可能)

- ・ エンドデバイスと基地局間の通信にはコストがかからないため、たくさんのデバイスを少ない基地局でカバーすることでコストメリットが出てくる
- ・ 下り通信にも対応しているため簡易的な機器制御も可能
- ・ オープンな規格であるため、複数ベンダーの機器を組み合わせることで、ユースケースを創出しやすい

研究開発の成果としては、独自開発した水田センサーや自動給水弁を活用することで、水田の水管理にかかる時間(給水栓開閉、移動時間などの合計)を約7割削減できることを実証しています*14。

現在は、これらの取り組みで得た知見を活かし、「IIJ水管理プラットフォームfor水田」や、「水田センサーMITSUHA」といったサービスを展開しています。更に、水田の水管理にとどまらず、次のような農業を起点とした地域社会の課題解決のための各種取り組みを進めています*16。現時点で全国の基礎自治体約70団体への支援実績を有しており、更なる広がりが期待されています。

- ・ 果実などの収穫量向上のための土壌水分量のモニタリング
- ・ 携帯エリア不感地域におけるトラクターの自動操舵
- ・ 災害対策のための河川などのモニタリング
- ・ 鳥獣害対策のための罠センサーの作動検知

*3 「第4次産業革命における産業構造分析とIoT・AI等の進展に係る現状及び課題に関する調査研究報告書」、国立国会図書館サーチ(<https://ndlsearch.ndl.go.jp/books/R100000039-I11370285>)。

*4 「報道発表資料」(お知らせ)IoTサービス向け通信方式「LTE-M」を提供開始」、NTTドコモ(https://www.docomo.ne.jp/info/news_release/2018/09/26_00.html)。

*5 「国内唯一、ソフトバンクのNB-IoT戦略」、BUSINESS NETWORK(<https://businessnetwork.jp/article/7505/>)。

*6 「概要」、SONY ELTRES™(<https://eltres-iot.jp/overview/>)。

*7 「ELTRES™ IoTネットワークサービス」、NURO Biz(<https://biz.nuro.jp/service/eltres/detail/>)。「【QA集】特長、通信速度、エリア、仕様、価格など」、SONY(<https://iot.sonymnetwork.co.jp/column/column010/>)。最大128bitのペイロードを5秒間に4回繰り返して送信。

*8 「令和6年版 情報通信白書 データ集」、総務省(<https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r06/html/dashu.html#f00239>)。

*9 「サービスエリア」、IoTネットワーク Sigfox、KCCS(<https://www.kccs.co.jp/sigfox/area/>)。

*10 「LPWAとは」、IoTネットワーク Sigfox、KCCS(<https://www.kccs.co.jp/sigfox/service/lpwa/>)。

*11 「802.11ahについて」、802.11ah推進協議会(<https://www.11ahpc.org/11ah/index.html>)。

*12 「ZETA LPWAネットワーク」、Zeta Alliance(<https://japan.zeta-alliance.org/zeta.php>)。

*13 「水田水管理ICT活用コンソーシアム」を設立し、農林水産省の公募事業「革新的技術開発・緊急展開事業」を受託し、IIJ(<https://www.iij.ad.jp/news/pressrelease/2017/0619.html>)。

*14 「水田作」、農研機構、生物系特定産業技術研究支援センター(<https://www.naro.go.jp/laboratory/brain/h27kakushin/keiei/result/suidensaku.html>)。

*15 「2. フォーカス・リサーチ(1)農業IoTでのLoRaWAN®普及に向けたIIJの取り組み」、Internet Infrastructure Review (IIR) Vol.47, IIJ(<https://www.iij.ad.jp/dev/report/iir/047/02.html>)。

*16 「スマート農業説明会」、IIJ(https://www.iij.ad.jp/news/pressrelease/2024/pdf/handout_20240917.pdf)。

■ 低温保管品などの温度管理

温度管理は、2018年に食品衛生法が改正されHACCPに沿った食品の衛生管理が制度化されたことを皮切りに、様々な業種に波及しています。IJJでは、農業IoTで培ったノウハウを横展開させ、2020年よりLoRaWAN[®]を活用した食品温度管理向けのソリューションを展開しています*17。このソリューションでは、生鮮食品市場・水産加工場などの冷蔵庫・冷凍庫や、飲食店のセントラルキッチンのような食品の調理・加工を行う作業場などにおける温度管理の作業負担の軽減に貢献しています。

昨今では衛生管理だけでなく、食品ロスの低減を目的として、その保管温度をモニタリングすることで廃棄サイクルを適切に管理する取り組みも広がりつつあります。

また、食品以外では

- ・ 医療業界での薬品の品質管理
- ・ 物流倉庫の低温保管品の品質管理

といった目的でも温度管理のニーズが広がっています。

これらのユースケースに共通しているのが、冷蔵庫内、薬品庫内、物流倉庫内においては、センサーの設置したい場所に必ずしも電源の引き込みができない、ということです。また、庫内の扉を閉めた状態であっても庫外との通信が確保できることが重要となります。

LoRaWAN[®]は温度管理用のセンサーを小型のバッテリーでも年単位で駆動でき、電源が取れない場所への設置が容易です。また、自営型のLPWAですので建屋内や庫内であってもユースケースに応じた無線環境を構築しやすく、更に、長距離通信を想定している規格ですので、遮蔽物である扉が閉まっている状態でも近距離であれば通信が可能です。これらの特徴を活かすことで、IoT・LPWA市場において、LoRaWAN[®]の温度管理の事例が増えていくことが期待されています。

■ 建築・土木現場におけるモニタリング

建設業界では慢性的な人材不足、労働災害の発生、効率化の停滞といった課題に直面しています。こういった課題の解決には、センサーを活用した現状把握及びそれに対するアクションが有用になりますが、建築の現場では施工の進捗によって日々環境が変わるため、無線によるセンサー情報の収集は簡単ではありません。そのような環境下においてもLoRaWAN[®]は適しており、実際に建設会社の協力のもと実施したPoCでは、約30,000㎡の物流施設の建築現場においても工期中の各センサーの情報を安定して取得できることが確認できました*18。

PoCでは、次の項目を遠隔監視することで工期中の各業務の効率化につながることも実証しています。

- ・ 暑さ指数(WBGT)
- ・ 守衛の皮膚温度、心拍の把握による作業員の安全管理
- ・ 工事進捗の画像
- ・ 建機の稼働
- ・ 建機の所在(工区)
- ・ 建機のカギの所在

最近では照明の消し忘れ、現場の窓の閉め忘れ、雨量などを見たいとの要望もいただいております。今後も建築現場におけるモニタリングにLoRaWAN[®]が幅広く活用されていくと期待されます。

また、建築だけでなく、トンネルなどのLTEがつかない土木の現場においても作業員の安全管理をしたいといったニーズがあり、こうした現場も長距離通信及びバッテリー駆動が可能なLoRaWAN[®]が活躍できるフィールドです。

■ LoRaWAN[®]の通信環境構築について

前述のとおり、LoRaWAN[®]は自営型のLPWAですので、各エンドデバイスからのデータが受け取れるように基地局を設置する必要があります。LoRaWAN[®]の無線はスペクトル拡散を用いているため、受信した無線信号の強度がノイズレベルより低

*17 「IJJ LoRaWAN[®]ソリューション for HACCP温度管理」、IJJ(<https://www.ijj.ad.jp/biz/haccp/>)。

*18 「銭高組と建設現場におけるLoRaWAN[®]を活用した現場環境データの収集・分析システムの実証実験を実施」、IJJ(<https://www.ijj.ad.jp/news/pressrelease/2024/1106.html>)。

くても(後述するSNRがマイナスでも)通信が可能です*19。この特徴はLoRaWAN®の大きな強みで、利用者側が設置したい位置に機器を置くだけで通信が成立する場合も多く、それほど手間をかけずに通信環境を構築することができます。一方、屋外で数kmの距離を伝搬させたい場合や、建物内部の入り組んだ箇所にエンドデバイスを配置しなければならない場合などには、事前にある程度環境を評価した上で基地局の配置を検討することもあります。ここでは、そのような場合にどのような点に着目して通信環境を評価するのかについて、これまでLoRaWAN®を取り扱ってきた知見に基づき、技術的な観点から述べていきます。

通信環境を評価するにあたって、主な確認事項は次のとおりです。

- ・ 電波の受信強度 (RSSI)
- ・ 信号対雑音比 (SNR)
- ・ 他の920MHz帯の無線システムからの影響

RSSIに関しては、機器のアンテナや信号処理回路などの性能が影響し、製品によって異なるため一概に指標を定めることは難しいですが、自社での運用実績を踏まえると-100dBm以上を

確保できれば、もしパケットロスが発生してもエンドデバイス側の自動再送機能で概ねリカバー可能です。更に万全を期すなら余裕を見て-80dBm程度まで確保できると理想的です。ちなみに、LoRaWAN®に限らず、屋外で開けた環境(建物などの障害物がない)であれば、2波モデルを使ってRSSIをある程度見積もることができます。2波モデルは図-1に示すように、自由空間の減衰に加えて直接波と平面大地による反射波の干渉を考慮したものです*20。モデル自体はとても単純であるために実環境のシミュレーションには到底及びませんが、電波の周波数、送信電力、アンテナ高さ及び利得、距離だけがパラメータなので計算しやすく、おおよその感覚を掴むには適しています。図-2に2波モデルの計算結果を示します。アンテナが低いほど、平面大地の影響を受けやすくなるため、例えばLoRaWAN®で1km電波を飛ばしたい場合は2m以上のアンテナ高さを確保できると良好に電波を飛ばせそうと言えます。また、アンテナが8m程度の高さになると(第1)フレネルゾーン半径を超えるため平面大地の影響が少なくなり、ほぼ自由空間の減衰のみで表すことができます。ちなみに、フレネルゾーンとはいわゆるアンテナ間の見通しを示す領域で、この領域内部に障害物があると反射や回折などが起こり伝搬特性に大きく影響します。

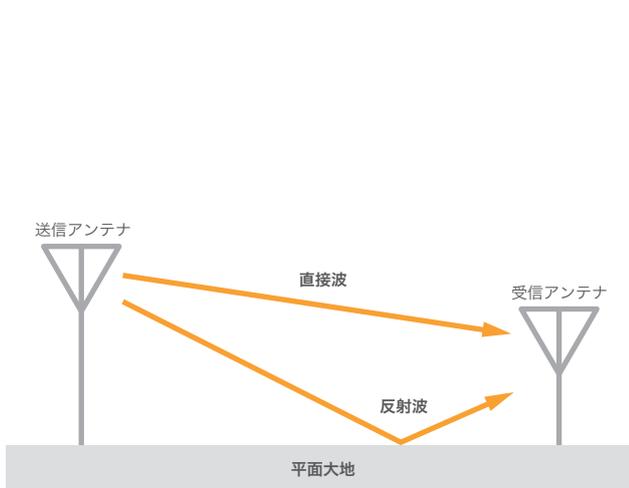


図-1 2波モデルの概念図

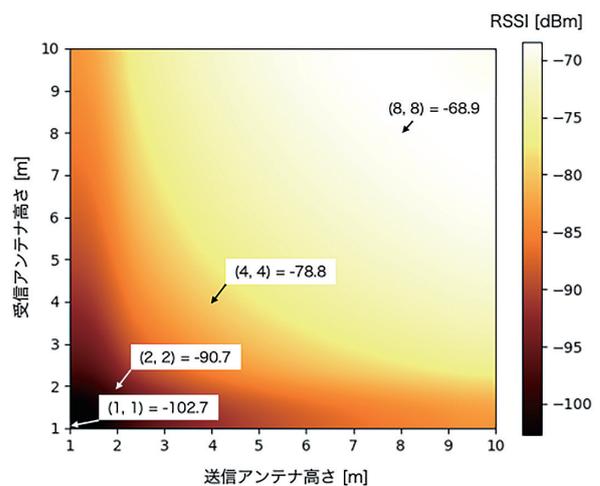


図-2 2波モデルの計算例(周波数 920MHz、送信電力 13dBm、アンテナ利得 2.14dBi、アンテナ距離 1km)

*19 「RSSI and SNR」、The Things Network (<https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/rssi-and-snr/>)。

*20 高田潤一, "電波伝搬の基礎理論," 映像情報メディア学会誌, vol. 70, no. 1, pp. 142-148 (2016). (https://www.jstage.jst.go.jp/article/itej/70/1/70_142/_article/-char/ja)。

SNRに関しては、表-2に示すように、LoRaWAN®のデータレート (DR) ごとにその限界値が定められています*19*21。センサーデータなどのごく少量のデータであればDR2で運用することが多い*22ので、理論上はSNRが-15dBでも問題ない*23ということではありますが、RSSIと同様に、ある程度(5~10dB)の余裕が確保できると理想です。経験上はRSSIが良好であればSNRも問題ない場合が多いのですが、環境によって変化する値でもありますので、RSSIとセットでSNRも見ておくことで定量的な評価がしやすくなります。

また、920MHz帯の特定小電力無線は表-1に示す各種LPWA規格だけではなく、RFIDなどの他のシステムでも用いられているため、LoRaWAN®の通信仕様としては日本の電波法に基づくARIB STD-T108の規定にのっとり、自分が電波を発する前にその周波数チャンネルが他のシステムによって使われていないことを確認*21*24しなければならぬと明記されています。したがって、障害物などがない環境であるにもかかわらず通信が思ったように成立しない場合には、無線が混雑している可能性があるため、近くで920MHz帯の他の無線システムが使われていないかどうかを見る場合もあります。

ちなみに、IIJではLoRaWAN®の電波環境を把握するための測定用デバイス*25の提供も行っています。測定用デバイスは、図-3に示すような動作を行い、ゲートウェイから返ってきたダウンリンクの情報に基づき、測定結果(平均RSSI/SNR及び通

信成功率)を集計して表示します。本体を起動し、ディスプレイを見て測定結果を確認するだけで良いので、実際の現場でもよく活用されています。

2.3 Wi-Fi HaLow™ (IEEE 802.11ah) の特徴と今後の展望

2022年9月に電波法が改正され、国内においてIEEE 802.11ah/Wi-Fi HaLow™(ヘイロー)の本格的な利用が可能になりました。HaLowとは、IEEE 802.11ah(以下、11ah)対応機器のうち、Wi-Fi Alliance®が認定したものに対して付与されるブランド名です。名称のとおり、Wi-Fi®の規格の一種ですが、IoT専用の位置付けでLPWAにもカテゴリ化されます。

■ LPWAとしての11ah

LPWAとして11ahを見てみると次の特徴が挙げられます。

- ・他のアンライセンス帯のLPWAと同様、920MHz帯の特定小電力無線を使用
- ・11ahはIP通信が可能
- ・11ahは変調方式にOFDMを用いており、LPWAとしては高速通信が可能で、通信環境にもよるが数百kbps~Mbpsオーダーも可能
- ・11ahはLPWAとしては帯域幅を使う(LoRaWAN®は125kHzだが、11ahは1MHz以上)ため、超長距離の通信は難しい。また、比較的干渉には気を使う必要がある

表-2 LoRaWAN®のデータレート (DR) ごとの通信速度と許容SNR値(無線の帯域幅はすべて125kHz)

DR	通信速度 [bps]	許容SNR [dB]
DR0	250	-20
DR1	440	-17.5
DR2	980	-15
DR3	1760	-12.5
DR4	3125	-10
DR5	5470	-7.5



図-3 LoRaWAN®測定用デバイスの動作

*21 「RP002-1.0.4 Regional Parameters」、LoRa Alliance(<https://resources.lora-alliance.org/home/rp002-1-0-4-regional-parameters>)。

*22 DR0、1は無線の送信時間が400msを超えるため、日本の電波法に則した運用の複雑さからあまり使われることはありません。

*23 LoRaWAN®はスペクトル拡散方式を用いているため、SNRがマイナスでも通信が成立します。

*24 キャリアセンスや、LBT(Listen Before Talk)と呼ばれます。

*25 「LZ-01V2 - IIJ LoRaWAN®ソリューション」、IIJ(https://www.ij.ad.jp/biz/lorawan/device2/sencor_15.html)。

LoRaWAN[®]はその通信の特性上、比較的容量の大きいデータをリアルタイムかつ、双方向でやり取りするには向いていません。11ahはIP通信ができ、動画も伝送可能な通信速度が出せるため、監視カメラや遠隔でのファームウェア更新などのユースケースに期待されていることが大きな特徴です。逆に言うと、帯域幅やMAC層以上のオーバーヘッドなどを考慮すると、端末の電力収支的にはLoRaWAN[®]と比べて見劣りしてくる可能性が高いので、11ahがLoRaWAN[®]をそのまま置き換えていくことはあまりなさそうです。したがって、11ah対応のセンサー端末が今後出てくるとすれば、測定値を常時送信するような(電池駆動ではない)タイプのものが主流になるのかもしれませんが。いずれにしろ、LoRaWAN[®]と11ahのそれぞれの特徴を知った上で適切に使い分けていくことが重要です。

■ 11ahの技術的な特徴

前述のとおり、11ahはWi-Fi[®]シリーズに含まれており、ユーザー側から見たときの使用感は従来のWi-Fi[®]とほぼ同じであると言えます。具体例としては、以下が挙げられます。

- ・ SSID/BSSIDを使用
- ・ 子機(STA)がアクセスポイント(AP)に接続する
- ・ WPA2/3によるセキュリティの担保

11ahを技術目線で見るとWi-Fi[®] 5(IEEE 802.11ac)の仕様がベースになっているものの、920MHz帯のLPWAとしても使えるようにするために変更が加えられている部分もありますので、以下で代表的なものを紹介します*26。

■ 狭帯域化

11acの帯域幅は20/40/80/160MHzで規定されています。しかし、各国のサブギガ帯で使える帯域幅は限られており、日本の920MHz帯では7.6MHzしか使えません。そこで、11ahの帯域幅は11acの1/10(2/4/8/16MHz)とし、更に1MHzの帯域幅をサポートしています。ただし、国内では前述の理由から現在は1/2/4MHzの帯域幅のみ使用可能となっています。

ちなみに、11ahでは図-4に示すように帯域幅を狭くした方が伝送距離を稼ぎやすくなります。主な理由としては、帯域幅が狭い方が干渉を防げることや、周波数あたりの電力密度が高くなることが挙げられます。ただし、帯域幅が狭いとOFDMのサブキャリア数が減るため、後述する変調符号化方式(MCS)が同じ場合は伝送速度が落ちることになります。

■ マルチパス耐性の向上

11ahでは、帯域幅を狭くするためにOFDMのサブキャリア間隔を11acの1/10である31.25kHzに規定しています。これは、

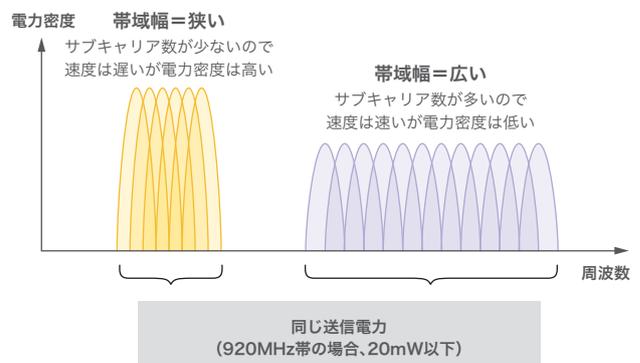


図-4 帯域幅と電力密度についての概念図

*26 小林忠男, "プライベートワイヤレスネットワーク入門 Wi-Fi[®] 6, 802.11ah, ローカル5G 徹底解説," リックテレコム, 2021

11ac用の無線チップの動作クロックを1/10に下げること
 で実現することを想定したものです。したがって、図-5に示すよ
 うにOFDMのシンボル時間は11acの10倍の32usになります。
 また、ガードインターバル(GI)長も11acより10倍以上長く設
 定でき、屋外かつ長距離であっても安定した伝送が可能とな
 ります。これは、図-6に示すように、マルチパスによる遅延波の遅
 延時間がGI長に収まる場合は、OFDM信号を復調する際にシン
 ボル間干渉の影響をなくすることができるためです*27。

■ 変調符号化方式(MCS)

表-3に11ahの変調符号化方式(Modulation and Coding
 Scheme)と物理層のデータレートを示します。11ahのMCS
 は11acをベースとしており、MCS Index 0~9における変調方
 式と符号化率は11acとまったく同じです。したがって、MCS
 Index 0~9の間はIndexが大きいほど一度に変調できるビッ
 ト数が多くなるためデータレートは速くなります。ただし、前

述のとおり帯域幅が11acの1/10になっているため、11acと
 比較するとデータレートも1/10となります。MCS10は11ah
 専用に制定されたもので、帯域幅1MHzのみでサポートして
 います。MCS0を2回繰り返して送信することで、速度は落ち
 ますが通信の安定性を確保しています。

ちなみに、MCSを自動で切り替える機能を備えている機器も
 多いですが、無線のRSSIやSNRの値をチェックして制御する
 場合が多いようです。

表-3のデータレートですが、表記している数字は物理層にお
 ける規格上の最大値であるため、実際の速度はこれよりも落
 ちるという点には注意しなければなりません。特に、11ahで
 はカメラの映像をストリーミングするといった(LPWAとし
 ては)比較的容量の大きい通信を常時行うようなユースケー
 スが多いため、他のLPWAの規格以上に、電波法で規定され

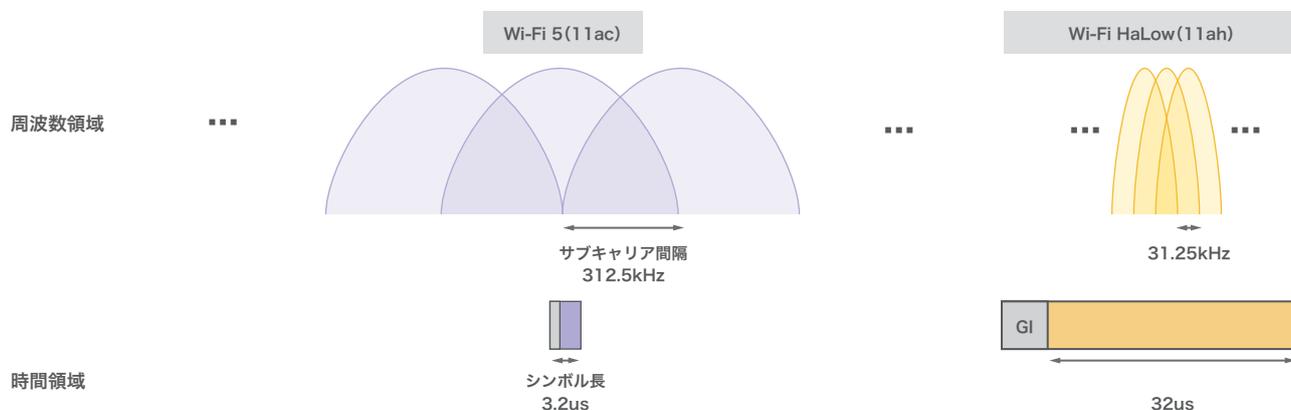


図-5 OFDMサブキャリア間隔とシンボル長の概念図

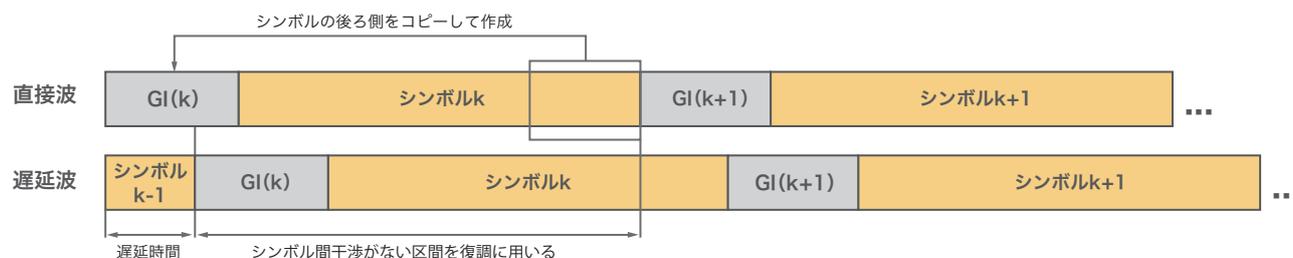


図-6 ガードインターバルの効果

*27 伊丹誠, "OFDMの基礎と応用技術," 電子情報通信学会 基礎・境界ソサイエティ Fundamentals Review, vol. 1, no. 2, pp. 35-43, 2007. (https://www.jstage.jst.go.jp/article/essfr/1/2/1_2_2_35/_article/-char/ja/).

る920MHz帯の10%Dutyのルールに気をつける必要があります。10%Dutyルールとは、簡単に言うと、限られた周波数帯域を皆が効率良く使えるようにするために、それぞれが電波を飛ばす時間を1時間に360秒(10%)以下になるようにする、というものです。そのため、通信の連続性を担保するために通信を細切れにして(速度を1/10に抑えて)あげる必要があります*28。結果としては、11ahで常時通信をする場合の通信速度は表-3に記載したデータレートの更に1/10以下(11acと比較すると1/100)になってしまいます。

■ その他の特徴

その他の11ahの特徴としては、誌面の都合ですべては記載しませんが次のような機能も有しています。ちなみに、省電力化機能とBSS Coloringは後発のWi-Fi® 6 (IEEE 802.11ax) でも採用されています。

- ・ 省電力化(Target Wake Time: TWTによるスリープ機能)
- ・ BSS Coloringによるチャンネル間干渉の低減
- ・ APにおけるリレー機能(オプション)

■ 11ahの通信環境構築について

11ahの通信環境構築に関しては、LoRaWAN®の場合と共通する事項の他に、帯域幅やMCSなど別途考慮しなければならない事項もあります。

RSSI/SNRはLoRaWAN®同様重要で、通信の目安としては機器にもよりますがそれぞれ-85dBm/15~20dB以上はあった方が良いでしょう。RSSIに関しては図-2と照らし合わせて見た場合、障害物のない屋外で1km程度の通信を行いたい場合には3~4m以上のアンテナ高さが必要になってきます。

SNRに関しては、帯域幅を変えたり、MCSを変えたりして許容可能な値のある程度操作することは可能ですが、前述の10%Dutyルールを踏まえた通信速度を考慮した上で、実際の通信状況も見ながら調整を行う必要があります。

他の920MHz帯システムとの干渉については、802.11シリーズとしてCSMA/CAを行うことになっているため、11ahが他のシステムを妨害することはまずありません。しかし、11ahは比較的帯域幅を使う規格であるために、チャンネルが混雑している場合には11ah側が待機する時間が多くなる可能性はありますので、事前にチャンネルの混雑状況を確認しておくのも有効です。更に、1つのAPに常時通信するカメラを複数接続するような場合も、台数が多すぎると通信が成立しなくなる可能性があるため注意しておく必要があります。

通信エリアの確保に関しては、AP機器によってはリレー機能に対応しているものもあるため、1ホップでの伝送距離確保が厳しい場合やアンテナの見通しが確保しにくい場合などには

表-3 11ahにおけるMCSと物理層のデータレート(空間ストリーム数=1, GI長=8us)

MCS Index	変調方式	符号化率	データレート(帯域幅 1MHz)[Mbps]	データレート(2MHz)[Mbps]	データレート(4MHz)[Mbps]
0	BPSK	1/2	0.3	0.65	1.35
1	QPSK	1/2	0.6	1.3	2.7
2	QPSK	3/4	0.9	1.95	4.05
3	16-QAM	1/2	1.2	2.6	5.4
4	16-QAM	3/4	1.8	3.9	8.1
5	64-QAM	2/3	2.4	5.2	10.8
6	64-QAM	3/4	2.7	5.85	12.15
7	64-QAM	5/6	3.0	6.5	13.5
8	256-QAM	3/4	3.6	7.8	16.2
9	256-QAM	5/6	4.0	N/A	18.0
10	BPSK x 2	1/2 x 2	0.15	N/A	N/A

*28 基本的には、速度を落とした常時通信を行えるよう、機器側に設定項目を設けてある場合が多いです。なお、常時通信が必要でなければ、1時間のうち360秒以内というルールを守った上で速度制限なしで通信することは可能です。

そういったものを活用するのも1つの手段でしょう。また、通信状況の確認に関しては、これも機器の仕様にはよりますが、そのような機能を標準で備えているものもあります。

■ 11ahの性能評価実験

IJでは、昨年から今年にかけて屋外(荒川の河川敷)で11ahの性能評価実験を行いました^{*29*30}。

1回目の実験は常時通信ではない状態(10%Dutyによる速度制限が掛からない状態)でiPerfによる速度調査を行い、2回目の実験はiPerfに加えて実際に動画を常時伝送した状態(10%Dutyによる速度制限を掛けた状態)で行いました。実験結果のサマ리를表-4に示します。

1回目の結果では、道路による反射などの影響もあり、必ずしも距離に反比例して速度が下がるわけではないことがわかりました。帯域幅4MHzの場合は、100m地点では2Mbps以上を出しているものの、800m地点では100kbpsを下回るなど、長距離を飛ばしにくい傾向も見えます。また、MCSを自動で選択する設定にしていたので、RSSI/SNRが変動すると通信が安定しにくいということもあるようです。距離1000m以下では、受信アンテナ高さが1.8mの状態で行っていましたので、この場合は800mあたりを境に2波モデルにおけるRSSIの推定値が-85dBmを下回っていくことになります。した

がって、そのあたりの距離を境に通信状態が悪くなったというのはそこまで違和感のない結果と言えます。なお、受信アンテナ高さを人手で約4mに変更した場合は1km以上での疎通も確認できています。

2回目の結果では、200m地点では10%Dutyの制限がかかっているにもかかわらず、MCS7で動いていたためそれなりの速度が出ていることがわかります。しかし、MCSを1回目と同様に自動の設定にしていたため、距離が延びるとMCSも不安定になる傾向も見られ、800mを超えると通信が難しくなりました。この地点でのRSSI測定値は平均して約-82dBmであったことや、2波モデルによる推定を加味すると、ここが限界地点であったというのは妥当と言えます。

動画の伝送状態に関しては、フレネルゾーン内部の車両の通過などにより動画のコマ落ちが発生する場合もありましたが、高画質にこだわらない監視の用途(河川の水位など)であれば800mの距離でも十分使用できるでしょう。使用するアンテナ、帯域幅やMCSの工夫次第ではより長距離でも速度を稼げる可能性があります。

■ 課題と今後の展望

11ahで映像伝送以外のユースケースの可能性のあるものとしては、次のようなものが挙げられます。基本的には、従来の

表-4 性能評価実験の結果サマリ

#	10%Dutyによる速度制限	アンテナ(ダイポール相当)高さ	帯域幅4MHz	帯域幅2MHz	帯域幅1MHz
1回目(距離1000m以下)	速度制限なし(Dutyサイクルサイクル外では通信停止)	送信アンテナ3m 受信アンテナ1.8m	・100mで約2.2Mbps ・500mで約590kbps ・800mで約80kbps ・1000mでほぼ通信不可	・100mで約1.7Mbps ・500mで約420kbps ・800mで約380kbps ・1000mで約200kbps	・100mで約1.3Mbps ・500mで約840kbps ・800mで約150kbps ・1000mでほぼ通信不可
1回目(距離1100m以上)	速度制限なし(Dutyサイクルサイクル外では通信停止)	送信アンテナ3m 受信アンテナ約4m	・1200mで約120kbps	・1300mで約220kbps	・1300mで約230kbps
2回目	速度制限あり	送信アンテナ4m 受信アンテナ4m	・200mで913Kbps ・400mで416Kbps ・800mで計測不可	・200mで436kbps ・400mで313kbps ・800mで不安定、100kbps前後	未実施

*29 「Wi-Fi HaLow™の性能評価実験を行いました」、IJ Engineers Blog (<https://eng-blog.ij.ad.jp/archives/21601>)。

*30 「Wi-Fi HaLow™の性能評価実験 第2弾 〜どこまでいける!?動画チェックしてみた!〜」、IJ Engineers Blog (<https://eng-blog.ij.ad.jp/archives/25458>)。

方法だと通信のスペック的に厳しい場合や、回線の設置・ランニングコストが見合わない場合に11ahが当てはまることが多いようです。

- ・ 工場などにおける建屋内の通信(有線/既存Wi-Fi®)の拡張
- ・ LTEからの置き換えによる回線ランニングコストの低減
- ・ 自治体における防災などを想定したマルチキャスト通信
- ・ トンネル・地下などでの音声長距離通信

これらのように社会インフラとして利用されていくためには価格も重要な要素になってきますが、11ah対応の製品(機器、通信モジュール、半導体など)はまだそれほど市場に出てきていないというのも現状です。そのため、まだまだ価格的に既存のWi-Fi®と比較しても割高な印象です。国内ではIJも正会員として参加している「802.11ah推進協議会」が中心となって市場を盛り上げていけるよう活動を進めており、海外のベンダーの協力も得ることで、製品のラインナップも徐々に増えてきています。一方で、異なるベンダーの機器間での相互接続性にはまだ課題があるようです。ここに関しても802.11ah推進協議会の枠組みの中で取り組んでいるところですので、今後はより使いやすくなっていくことが期待されます。

また、今後の注目したい動きとしては、850MHz帯の利用です*31。現在850MHz帯はデジタルMCAに割り当てられて

いますが、2029年のサービスの終了に伴い空くこととなります。この帯域が11ahに割り当てられると、より広帯域での通信が可能になったり、前述の10%Dutyのルールがない状態で使えるようになる可能性が高く、更なるユースケースの拡大が見込まれます。850MHz帯を使うことで他のシステムとのバッティングも回避できるため、LoRaWAN®などの他のLPWAとの併用がより行いやすくなったり、それらのバックボーンネットワークとして機能できる可能性もあります。5年後の話なのでまだ先ではありますが、段階的に一部の帯域のみをできるようにする計画もあるようです。総務省が提示している予定では今年の秋頃を目処に技術的要件を取りまとめることになっているので、この記事が公開される頃にはより具体的な情報が出てきているかもしれません。

2.4 むすび

IJにおけるLPWAの取り組みとして、LoRaWAN®及びWi-Fi HaLow™(IEEE 802.11ah)について紹介しました。LoRaWAN®は既にワールドワイドで活用されており、オープンでつながりやすいという強みも活かしながら、国内においても更なる広がりが期待されます。HaLowはまだこれからという部分もありますが、IP通信をサポートしており、既存のLANやWi-Fiシステムからの切り替えが簡単であるといったメリットもあるため、引き続き動向をウォッチしつつ、新たなサービスへつなげることができるよう取り組んでまいります。

執筆者:



三宅 伸明 (みやけ のぶあき)
IJ IoTビジネス事業部 営業部



斉藤 翔太 (さいとう しょうた)
IJ IoTビジネス事業部 技術部 センシングサービス課

*31 「802.11ahの利用周波数の拡大に向けた、総務省「900MHz帯自管用無線システム高度化作業班」が開始」、802.11ah推進協議会 (<https://www.11ahpc.org/news/20240412/index.html>)。

IIJ 技術情報発信コンテンツの紹介



【IIJ 2024 TECHアドベントカレンダー】

開発・運用の現場エンジニアが執筆するIIJ公式ブログ「IIJ Engineers Blog」では、今年で8回目となる「IIJ 2024 TECHアドベントカレンダー」を開催中です。

■ 2024年のラインナップ

今年もクラウドやネットワーク、セキュリティ、IoT、AIのほか、IIJエンジニアによる運用にまつわる話、新人エンジニアのおうち紹介、シェルスクリプトで雪の結晶を描く、などなど、最新のコアな技術情報からゆるく柔らかい社内ネタまで、様々な技術記事を12月1日から24日のクリスマスイブまで毎日公開していますので、ぜひご覧ください。

日	月	火	水	木	金	土
12 / 1	2	3	4	5	6	7
IIJ 2024 TECHアドベントカレンダー開催！（本記事です）	Starlinkとhome 5Gを色々と比較してみました	Beautiful Code	IPsec通信が暗号エンジンによって高速化するのを体験してみた	シェルスクリプトで雪の結晶を描く	SSHでも二要素認証を使いたい	IoT米について
8	9	10	11	12	13	14
IIJ Bootcamp 2024開催報告 - 6年目の開催報告	セキュリティ運用的な何か	Safousで家庭内IoTへの非VPN式セキュアリモートアクセス	チームの運用を考える（仮）	コンソールのログインプロンプトにIPアドレスを表示する方法	LinuxでYubiKey 5を使う（hopgateのTOTP対応）	Splunkでメールの配送図を作る

日	月	火	水	木	金	土
12/15 — 事故防止のためのterminal設定 (wezterm 紹介)	16 — クラウドサービスを支える大規模メンテナの舞台裏	17 — SEIL/x86 Ayame(ペアメタル)で10 Gbps対応ルーターを構築	18 — 新卒の自宅 / 業務環境紹介 その1	19 — 新卒の自宅 / 業務環境紹介 その2	20 — 生成AIを使った何かのネタ	21 — インフラ運用業務における認知バイアスについて(仮)
22 — バイナリ解析 関連	23 — GPUクラスタでフォールトトレラント LLM推論	24 — selfhostedなネタ、もしくは、仕事とシェル芸みたいなテーマ	—	—	—	—

※予定している記事は変更になる可能性があります。

IIJ Engineers Blog: IIJ 2024 TECHアドベントカレンダー
(<https://eng-blog.ij.ad.jp/adventcalendar2024>)



■ IIJ 公式Xアカウント@IIJ_ITS

なお、各媒体の記事公開やイベント開催情報は、IIJ公式Xアカウント@IIJ_ITSでお知らせしています。ご興味のある方はぜひフォローしてください。

@IIJ_ITS https://x.com/IIJ_ITS





Internet Initiative Japan

株式会社インターネットイニシアティブ(IIJ)について

IIJは、1992年、インターネットの研究開発活動に関わっていた技術者が中心となり、日本でインターネットを本格的に普及させようという構想を持って設立されました。

現在は、国内最大級のインターネットバックボーンを運用し、インターネットの基盤を担うと共に、官公庁や金融機関をはじめとしたハイエンドのビジネスユーザに、インターネット接続やシステムインテグレーション、アウトソーシングサービスなど、高品質なシステム環境をトータルに提供しています。

また、サービス開発やインターネットバックボーンの運用を通して蓄積した知見を積極的に発信し、社会基盤としてのインターネットの発展に尽力しています。

本書の著作権は、当社に帰属し、日本の著作権法及び国際条約により保護されています。本書の一部あるいは全部について、著作権者からの許諾を得ずに、いかなる方法においても無断で複製、翻案、公衆送信等することは禁じられています。当社は、本書の内容につき細心の注意を払っていますが、本書に記載されている情報の正確性、有用性につき保証するものではありません。

本冊子の情報は2024年12月時点のものです。

©Internet Initiative Japan Inc. All rights reserved.
IIJ-MKTG019-0065

株式会社インターネットイニシアティブ

〒102-0071 東京都千代田区富士見2-10-2 飯田橋グラン・ブルーム
E-mail: info@ij.ad.jp URL: <https://www.ij.ad.jp>