

- ✓ 生成AI
- ✓ 無線ネットワーク
- ✓ IoTセキュリティ

生成モデルが投げかけるAI開発への期待と課題

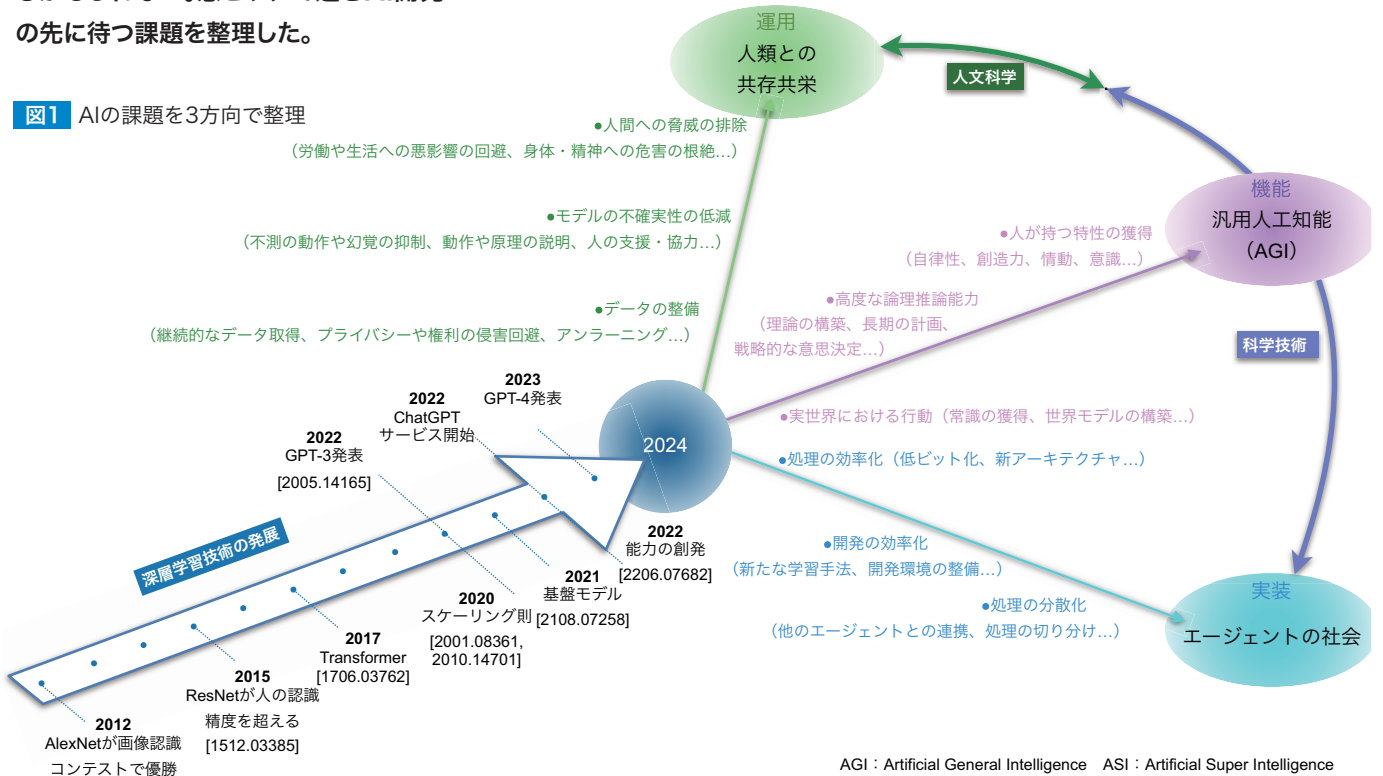
今井 拓司 技術ジャーナリスト

人工知能(AI)の開発が転換期を迎えた。大規模言語モデル(LLM)をはじめとする巨大な生成AIの登場が、人に近いAIを実現する可能性を一気に高めている。しかも、より多くのデータを使い、より巨大なAIを学習させるだけで、そこに近づけるかもしれない。急ピッチで進むAI開発の先に待つ課題を整理した。

「私は50年もの間、AIを人間の脳に近づけようとして開発を重ねてきた。脳の方が機能的に優れていると信じていたからだ。だが23年に考えを改めた。(中略)現在の対話型AIは人間の脳の100分の1の規模でも数千倍の知識がある」(加トロント

大学のジェフリー・ヒントン名誉教授)¹⁾。深層学習に関する数々の研究成果で知られ、「AIのゴッドファーザー」ともいわれる同名誉教授の発言は、人工知能(AI)の研究開発がこれまでと全く異なる段階に突入したことを象徴する。AIの開発が始

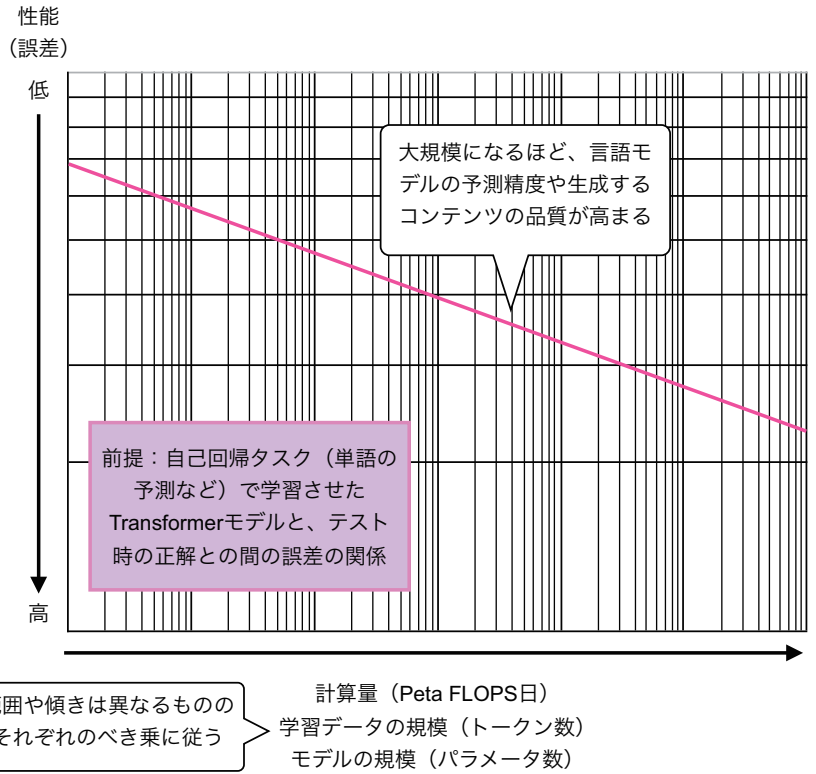
図1 AIの課題を3方向で整理



今後のAIの課題を示した。生成AIの成長は今後も続き、機能の面では、いずれは人に迫る能力を備えた汎用人工知能(AGI)や、人を上回る人工超知能(ASI)が実現する可能性が取り沙汰されている。運用面では、開発の急激な進捗により、人間の手に負えないAIが登場する可能性を憂慮して各種の規制を求める声が高まってきた。実装面では、膨大な計算資源を必要とする現在のアーキテクチャの軽量化や処理の分散化が進みそうだ。 [] 内の数字はarXivの番号を示す注2)。

図2 成長の原動力は大規模化

2020年にOpenAI社は、言語モデルの性能は学習に利用する計算量、学習データの規模、モデルの規模のべき乗に従うという法則を発表した[2001.08361]。計算量、学習データの規模、モデルの規模の間に適切な規模の関係が成り立つこと、モデル(ニューラルネット)の幅や深さといった詳細はあまり影響がないこと、モデルのアーキテクチャとしては、過去に多用されたLSTMよりもTransformerの方が効果が高いことなども明らかにした。同社は、画像やビデオの生成、画像とテキストの相互変換、数学の問題解決を対象にするモデルでも同様な関係が成り立つことを示している[2010.14701]。



まって以来の目標だった人間の脳よりも、現在のAIの方が優れていると暗に認めたからである^{注1)}。

ヒントン名誉教授に心変わりを促したのは、米OpenAI社の対話サービス「ChatGPT」や、その基盤となった大規模言語モデル(LLM: Large Language Models)「GPT-4」といった生成AIの猛烈な成長スピードだろう。文章や画像を生成するAIの能力は高まる一方で、同社が2024年2月に公開した「Sora」のように、言葉で指定した通りの高品質な動画まで生成可能になりつつある。後述するように、その影響は一見畑違いのロボットの研究開発にも波及している。

この勢いはまだまだ続きそうだ。同教授が名を連ねる論文[arXivの番号: 2310.17688]^{注2)}にこうある。「我々は、汎用AIシステムが今後10年から20年以内に、多くの重要な分野で人間の能力を上回る可能性を真剣に受け止めなければならない」(米アンソロピック社のLLM「Claude 3」による日本語訳)。OpenAI社のサム・アルトマン氏や米テスラ社のイーロ

ン・マスク氏といった起業家ではなく最先端の研究者が、人に匹敵する能力を備えたAI、いわゆるAGI(Artificial General Intelligence:人工汎用知能)の誕生が近いと感じているのだ^{注3)}。

機能、運用、実装で整理

AIを取り巻く現在の状況は、将来を大きく明と暗に塗り分けている。明の領域に入るのは、技術開発の先行きである。今後のAIの課題を機能、運用、実装という三つの側面で見えた場合、機能と実装が相当する(図1)。

とりわけAIの機能面では、今後の見通しは明るい。生成AIの成長の勢いに乗って、これまで足りないと言われてきた、実世界における行動や論理推論の能力も順次実現すると期待が高い。

実装面では、膨大な計算量やメモリ容量を要する生成AIを、いかに能力の限られた機器で実現するかが大きな問題になりそうだ。ただし技術開発は非常に活発で、有望な方向性も見えつつある。

一方で、今後の見通しに暗さが広がる

のが、AIを社会や生活で運用していく面である。AIの能力が強力になりすぎて、人類に負の影響を及ぼすのではないかと懸念が膨れ上がっている^{注4)}。

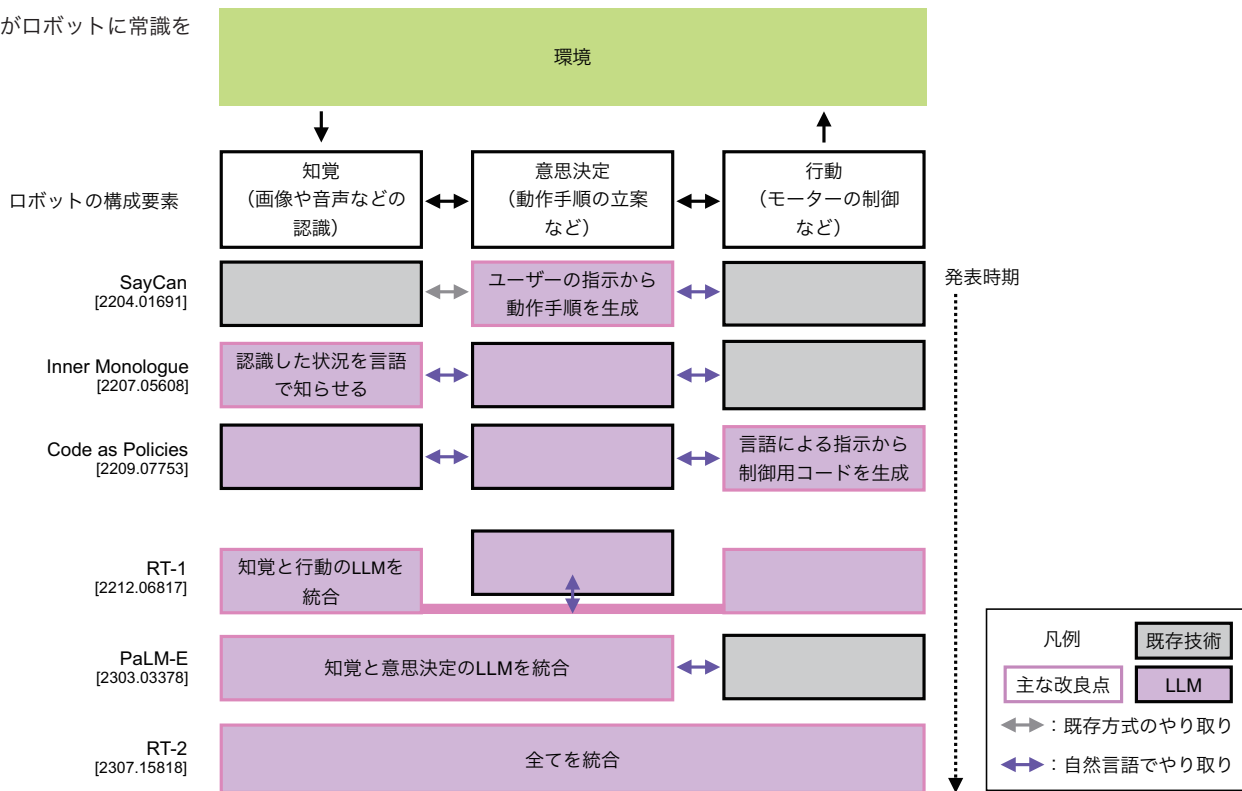
不安の高まりを受けて、日本を含む各国政府や国連などが、AI開発の規制に乗り出した^{注5)}。仮に法的に規制されなかったとしても、AIの不規則な動作への対応、センシティブなデータや各種権利の取り扱いなど、幾つもの課題をクリアしていく必要がある。こうした問題は一朝一夕には解消できず、試行錯誤が何年も続きそうだ。

以下では、技術開発の対象である機能面と実装面の現状を解説する。人文科学の知見が重要になる運用面については取り上げない^{注6)}。ただし、この面での進展が技術開発の針路に大きく影響することは忘れないでおくべきだろう。

規模の拡大を追い求める

技術面でのAIの先行きを見通すために欠かせないのが、現在の急成長の理由を知ることだ。ここ数年で開発が加速した最大の要因は、2020年にOpenAI社が発表

図3 LLMがロボットに常識を



Google DeepMindは、ロボットの知覚、意思決定、行動の実行に使うモジュールのそれぞれで、大規模言語モデル (LLM) を用いる技術を開発してきた。LLMの持つ常識的な知識を利用して、ロボットを実環境で活動しやすくさせるためである。例えばLLMを知覚モジュールに使うと、カメラの映像から物体と行動の対象を認識し、実行した行動の成否を言葉で意思決定モジュールに伝えることが可能になる (「Inner Monologue」)。それを受けた意思決定モジュールは、後続の行動を立案できる。このほか図にはないが「AutoRT」[2401.12963]と呼ぶ技術では、様々なロボットが置かれた環境をLLMが認識し、そこで実行可能な新たなタスクをLLMが自発的に生成する機能も実現している。同社はモジュール間の情報伝達の効率を引き上げ、学習の効果を高めるために、これらのモジュールを一体化する技術も発表している (「RT-1」～「RT-2」)。

した経験則にある。AIの性能は、学習に利用する計算量、データの規模、モデル (AIの実体であるニューラルネットワーク) の規模のべき乗に従うというものだ (図2)。これらの規模をひたすら拡大することで、性能が高まり続けるというのだ。

これは恐るべきことである。それでもこの法則が成り立つことは、実績が示している。現にGPT-4の開発はこの考えに則って実施され、学習後の性能は事前の予測とよく一致したという [2303.08774]。しかも、今のところ性能向上の限界は見えていない。

2022年には、さらに新しい法則が見つかった。言語モデルの規模を拡大していくと、あるところで突然新しい能力が創発するとの発見である。米Google社などの論文によれば、入力 (プロンプト) を工夫すれば様々なタスクに対応できるLLMの能力

などは、大規模化によって発現したという [2206.07682]。この現象の理由は解明されておらず、今後創発する能力の予測もできない。

これらの経験則は、AIの能力を高め続ける最有力の方法は、途方もない計算能力を、ある意味闇雲に投入し続けることだと示唆する^{注7)}。サム・アルトマン氏が数兆ドルもの資金を調達してAIチップの製造能力を確保しようとする理由はここにある²⁾。これらの経験則が将来にわたって成り立つ保証はないが、理論による説明を待っているだけでは競争に負けてしまう。

LLMがロボット開発に福音

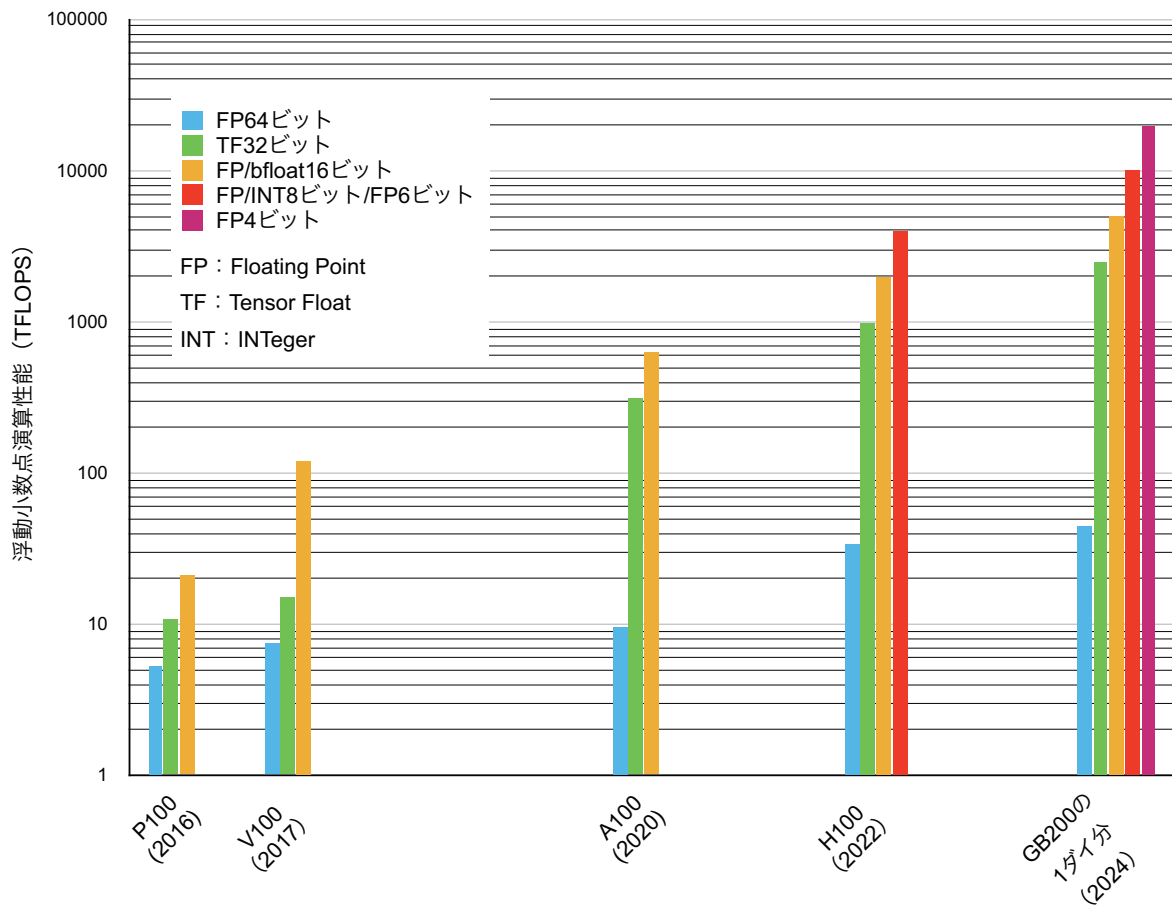
大規模化の効果が長期にわたって継続するとしたら、AIの開発者にとっては朗報だ。極論すれば、これまで解けなかった難問が、待っているだけで霧散し得るため

だ。実際にその兆しはある。例えば実世界で活動するロボットの開発は、LLMの登場によって大きな転換点を迎えている。

実世界で動作する機械をAIで適切に制御することは、今なおお立ちどころハードルの筆頭といえる。端的な例が自動運転車だ。人手を介さずに運転が可能で、いわゆるレベル4の自動運転車は当初の予定より大幅に遅れ、いまだに実現する気配がない。2024年2月に米Apple社が開発から撤退した理由の一つは、同レベルの技術を確立できなかったことという³⁾。

現実世界に対応するのが難しい一因は、学習時には想定していなかった例外的な状況がいくらでも生じることである。例えば車を運転中に前方の軽トラがパイロン (三角コーン) を積んでいたら、人間であれば貨物だと分かるが、AIは道路工事のサインと考えてしまいかねない [2307.07162]。こう

図4 低ビット化で桁違いの性能に



NVIDIA社がAIの学習・推論向けに開発した最上位のGPUの性能を示した。いずれも行列演算の高速化回路「TensorCore」を使う、重みがスパース（疎）といった最も性能が高い条件での値である。世代が進むにつれて、より低ビットの数値表現に対応することで、桁違いに性能を引き上げてきたことがわかる。2024年3月に発表した最新の「GB200」は1CPUと2GPUを1パッケージ内に収めた製品で、公開された仕様の1/2をGPU1ダイフ分とみなしてプロットした。この製品では、前世代の「H100」で加わったFP/INT8ビットに、さらにFP6ビット、FP4ビットを追加した。

したシーンを解釈するには、「軽トラは物の運搬に使う」「運搬中の物は、本来の役目を果たしていない」といった常識が必要だが、AIにはそれがない。

常識を持つロボットの誕生

そこで注目を集めるのがLLMの活用である。膨大な知識を有するLLMは常識的な知識を膨大に備えており、自動運転車やロボットの開発に生かすことができる。

LLMがロボットの動作を大きく変えることを示した例が、Google社のAI研究開発部門、Google DeepMindが手がける一連の研究である。同社は、ロボットの知覚、意思決定、行動を司るモジュールにLLMを組み込んで、その効果を確かめてきた(図3)。

例えば意思決定のモジュールに応用すれば、人から「牛乳をこぼしちゃったから助けて」という命令を受けたロボットは、「スポンジを探し、ピックアップして、戻って、拭く」といった一連の動作を立案できる(図中の「SayCan」)。常識を備える言語モデルが、曖昧な指示を具体的な手順に分解できるわけだ。

今ではGoogle社以外にもロボットにLLMを使う研究例が増えつつある[2402.05741]。米Alphabet社傘下の米Waymo社など、自動運転車の企業も活用を始めている[2311.01043]。

LLMなどの大規模なAIが恩恵をもたらすのは、複雑な現実に対処する能力に限らない。既存のAIに欠けるとされてきた論理

推論[2212.10403]、創造性[2401.01623]、さらには意識[2308.08708]まで、現在のLLMを基礎として実現する可能性が議論されている。今後の開発は、大規模化の効果を見極めつつ、モデルの学習方法やアーキテクチャの工夫を重ねていくことになりそうだ。

基盤モデルを軽くする

巨大なAIの能力が伸び続ける時代に、身近な用途や製品に特化したAIはどのように実装すればいいのか。その指針を与えるのが基盤モデルという考え方だ。

基盤モデルは米スタンフォード大学が提唱した言葉で、LLMのような事前学習させた大規模なAIのことを指す

[2108.07258]。様々なタスクで活用可能な知識を提供することでAI開発を大幅に容易にできる存在といえる。一からAIを開発しては到底太刀打ちできず、どのような用途であっても基盤モデルを無視することは難しい^{注8)}。

基盤モデルを個々の事例に流用する基本的手段は、モデルの拡張や追加のデータによる再学習などである。ただし、性能をなるべく落とさずに、計算資源が乏しい製品やサービスに組み込む方法はある。蒸留や量子化、プルーニングといった、モデルを軽量化して必要な計算能力やメモリ容量を減らす手法である^{注9)}。

中でも徐々に利用が広がっているのが量子化だ。AI向けのGPUで大きなシェアを持つ米NVIDIA社の動向が、この動きを反映している(図4)。2020年の製品では最低でも16ビット浮動小数点を用いていたのに対し、2024年3月に発表した最新製品ではとうとう4ビット浮動小数点という極端な表現を採用するに至った。

それでも実用に堪えることが、複数の研究から明らかになっている。LLMの推論性能

を3~16ビットで比較したところ4ビット浮動小数点最適だったとする研究や[2212.09720]、重みを{-1,0,1}の3値で表現すれば(1.58ビットに相当)、同等規模の16ビットLLMに匹敵する性能を発揮できると主張する論文がある[2402.17764]。

量子化に加えて、現在のLLMが利用するTransformerよりも計算量などの点で効率的なアーキテクチャの検討も進んでいる^{注10)}。ただし本当にどの方式が生き残るかは、べき乗則が成り立つかどうかや実サービスの成否などによるため、時間をかけて判断するしかないだろう^{注11)}。

究極の姿はエージェント

AIの機能が次第に人と変わらなくなるにつれて、物理的なロボットであれ、ネット上で活動するソフトウェアであれ、AIの立ち居振る舞いは人に近づく見込みである。会話などを通じてユーザーと交流できるのはもちろん、多岐にわたるユーザーの要求を達成するために、独自の判断に基づき、自律的に行動するようになる。いわゆるエージェントと呼ばれる形態だ。AI研究者

の多くは、多数のAIエージェントが、暗に陽に人を補佐する将来像を思い描いている^{注12)}。

今後は、どのようにエージェントを構築していくかも、実装面の大きな課題になりそうだ。その雛形は、現状のLLMを外部のツールと連携させたアプリケーションソフトである^{注13)}。LLMはエージェントに欠かせない要素と見られており、LLMを中心にしたエージェントの構築技術の研究開発が進んでいる[2308.11432]。

興味深いのは、エージェントと人との間だけでなく、エージェントとエージェントが連携する際のインタフェースにも自然言語を使う可能性があることだ。自然言語であれば標準的なインタフェースを新たに策定する必要がなく、LLMであれば必要に応じて自然言語を異なるコードに変換できるからである。実際に図3の研究例では、モジュール間を自然言語のやり取りで繋いでいる。AIの技術が成熟した未来には、人とエージェントが分け隔てなく語り合い、助け合う社会が現れるのかもしれない。

今井拓司 (いまいたくじ) 1990年、東京工業大学大学院を修了し、日経BP社に入社。以後、約28年にわたりエレクトロニクス技術の専門誌『日経エレクトロニクス』や技術系ニュースサイト『Tech-On! (現『日経クロステック』)』、『日経産業新聞』や『日経電子版』で記者、デスク、副編集長、編集長、編集委員を経験。2018年2月からフリーランス。得意分野は人工知能やユーザーインタフェース、コンピュータハードウェアなど先端技術全般。

参考文献：1)「〈直言×テクノ新世〉「人知超すAIは人を操る」ジェフリー・ヒントン氏」、日本経済新聞電子版、2024年3月10日付。2) K. Hagey and A. Fitch, "Sam Altman Seeks Trillions of Dollars to Reshape Business of Chips and AI," The Wall Street Journal, Feb. 8, 2024. 3) Mark Gurman, Drake Bennett, 「年1500億円投じた「アップルカー」、なぜ実現できなかったのか」、Bloomberg, 2024年3月7日。

注1) 誤差逆伝播法(バックプロパゲーション)や蒸留といった超定番の学習技術を生み出した同名名誉教授が次のように語るのには衝撃的でさえる。「おそらく大規模言語モデルは脳よりも効率的に学習できる¹⁾」。**注2)** arXiv(https://arxiv.org/)は査読前の論文を投稿するサーバーで、番号で検索すれば論文を読める。番号の最初の4桁は投稿した年月に対応する。**注3)** AGIに決まった定義はなく、既に最先端のLLMが該当するとの意見もある。Google DeepMindは、AIの能力を深さ(性能)と広さ(汎用性)で見積もり、レベル0からレベル5に分ける案を提唱している[2311.02462]。**注4)** ヒントン名誉教授は2023年4月に、約10年間にわたる米Google社の職を辞した。AIが人類に危害をもたらし得る存在であることを、職務に縛られず自由に発信するためだ。前出の論文も、将来のAIが人類の脅威にならないよう企業や政府に早期の対策を求める内容で、やはり「AIのゴッドファーザー」とされる加モントリオール大学のヨシュア・ベンジオ(Yoshua Bengio)教授、歴史学者のユヴァル・ハラリ(Yuval Noah Harari)氏やノーベル経済学賞受賞者の米プリンストン大学の故ダニエル・カーネマン(Daniel Kahneman)名誉教授を含む24名の連名で提出した。**注5)** 2024年3月、欧州議会はAIの開発や利用に関する世界初の包括的な規制法案を可決した。一部の用途の禁止まで踏み込んだ厳しい内容で、2026年ごろから運用される見込みである。同月に国連総会は、AIの安全性や信頼性の促進を目指した決議案を採択。日本では政府が「AI事業者ガイドライン」を策定中で、最終案に対する意見公募の結果を同月に公開している。**注6)** 運用面の課題解決に向けた技術はある。例えば人類に対するAIの脅威を減らす研究の分野は、人間の意図や価値観とAIのそれを合わせるという意味で、「AIアライメント」と呼ばれる。AIを特定の要求に沿うように学習させる技術や、開発したAIが実際に狙い通りにしているか検証する手法の開発が進んでいる[2310.19852]。学習用データの取り扱いでは、公開されたAPI経由でLLMの内部に秘匿された情報を引き出すハッキング技術[2403.06634]が現れたり、AIに特定のデータを忘れさせる「マシン・アンラーニング」の研究が進んでいる[2306.03558]。**注7)** この方法のボトルネックになりかねない問題として、AIの学習に使うデータの枯渇がある。現在のLLMが利用する、インターネット上の高品質な文章データは2026年までに枯渇するという予測が公表されている[2211.04325]。より多くのデータを集めるために、今後は企業や個人などが所持するプライベートなデータをいかに活用できるかが重要になりそうだ。**注8)** 一方で、多数のAIシステムの開発で基盤モデルの活用が広がると、基盤モデルに欠陥やバイアスが潜んでいた場合に一気に被害が拡大する危険性を同大学は指摘している。**注9)** いずれも以前からある手法で、(1)蒸留[1503.02531]は大規模なモデルの入出力を模倣するように小規模なモデルを学習させる。(2)プルーニングは、大規模なニューラルネットから重要度の低いパラメータを削って軽量化を図る。(3)量子化は、計算に用いる数値の表現をより少ないビット数に変える方法である。(2)と(3)を比較した研究では、ほとんどの場合で量子化の方が良い結果になるとの指摘がある[2307.02973]。**注10)** 例えば構造化状態空間モデル(SSM: structured State Space Model)の一種である「Mamba」[2312.00752]などが関心を集めている。画像生成の分野では、現在主流の拡散モデルよりも高速なConsistency Models[2303.01469]といった提案がある。**注11)** 新しいアーキテクチャの開発を自動化する試みもある。Transformerの開発者らが設立したスタートアップ企業サカナAI(東京港区)は、オープンソースのLLMに進化アルリズムを適用して高性能なLLMを自動設計する技術を発表している[2403.13187]。**注12)** 例えば、注3)で紹介したGoogle DeepMindのAGIの定義では、AGIの実現によって可能になる自律性の最高の段階を「エージェントとしてのAI」と規定している。**注13)** 実際、LLMを外部の検索エンジンやデータベースなどと連携させるオープンソースのライブラリ「LangChain」では、タスクに応じてツールを選び、実行し、結果を評価するモジュールをAgentと呼んでいる。

無線ネットワークの現状と今後

阪田 史郎 千葉大学 名誉教授

無線ネットワークの現状を俯瞰する。俯瞰後、そこから導かれる今後の技術開発、進展が特に期待される3つのトピックについて述べる。3つとは、6G携帯電話網、IoT (Internet of Things) の中核となる無線センサネットワーク、競合するローカル5Gと無線LANである。これらは部分的に互いに影響を及ぼし合っており、相乗的な進展も期待できる。最後に今後の展望を提示する。

無線ネットワークは、性能値を代表する通信距離と通信速度によって、図1のように大きく分類できる。

- (1) 短・中距離 (数百m以下) で高速 (数Mbps以上)
- (2) 短・中距離で低速 (数Mbps以下)
- (3) 長距離 (数百m以上) で高速
- (4) 長距離で低速

2024年現在、(1)には無線LAN、(2)にはBluetooth、(3)には携帯電話網が、既に定着している。LPWA (Low Power Wide Area) は、(4)の第4の無線ネットワークの位置づけで登場したが、2021年以降は盛り上が

りを欠き、定着しきれていない。本稿で取り上げる無線ネットワークの変遷は図2の通りである。

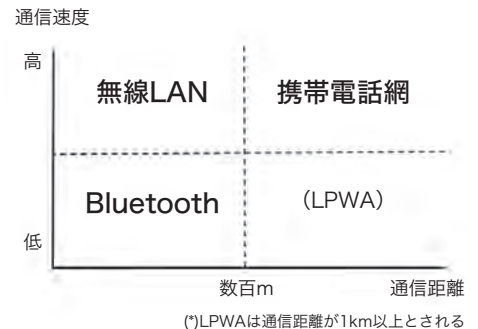
携帯電話網は6G / Beyond 5Gに

1979年にサービスが開始された1G携帯電話網から、ほぼ10年ごとに世代が変わり、2020年には5Gのサービスが始まっている。1Gから5Gへの変遷の概要を表1に示す¹⁾。携帯電話網は、網の形状からセルラー網やモバイル通信網などとも呼ばれたが、3G以降は、移動通信システム (MCS: Mobile Communication System) が正式名である。

1Gの自動車電話に始まり、2G以降は携帯電話、スマートフォン、ウェアラブル機器など各種端末向けに普及している。3G以降は、3GPP (Third Generation Partnership Project) を中心に標準化が進められている。3GPPからの提案を受けて、1国が1票を持つデジュール国際標準としてITU-Rが勧告する。

1Gから4Gまでは高速化のみが主要目標であったが、5Gでは車やロボット、ドロー

図1 無線ネットワークの分類



ン、IoT / センサなどの新しい需要の拡がりに対応するため、携帯電話網史上初めて高速化以外の目標が設定された。すなわち、

- ・高速大容量通信: eMBB (enhanced Mobile Broadband)
- ・超高信頼・低遅延通信: URLLC (Ultra Reliable Low Latency Communication)
- ・多数同時接続: mMTC (massive Machine Type Communication, IoTに対応。Machineはセンサ)

の3サービスの提供が5Gの目標となっている。eMBBは4GのMBBをさらに高速化したサービスである。URLLCとmMTCが新しい需要に対応するためのサービスという位置づけとなる(図3)。3サービスの本格的な利用は2026年以降に始まると予測される。

6Gはテラヘルツ波で高速化

2030年開始予定の6Gについては、①～⑫に示すような技術目標が設定された。6Gへの移行を円滑にするため、その途中段階の仕様である5G-Advancedの検討も進められている²⁾。

①5Gの10倍から100倍の超高速大容量 (100Gbps以上の通信速度。ピークで1Tbps):

表1 携帯電話網の変遷

	第1世代	第2世代	第3世代	第3.5世代	第3.9世代	第4世代	第5世代
特徴等	自動車電話 → ショルダーホン	GSM (欧州) PDC (日本)	IMT-2000 (W-CDMA, cdma2000)	第3世代の 高速版 (HSPA)	LTE (ALL-IP化)	IMT-Advanced (LTE-Advanced のみ実用化)	IMT-2020
アナログ/ デジタル	アナログ	デジタル	デジタル	デジタル	デジタル	デジタル	デジタル
サービス 開始年	1979年	1993年	2001年	2006年	2010年	2014年	2020年 (一部2019年)
変調方式等 主要技術	FDMA	TDMA	CDMA	CDMA, HSPA	OFDM, MIMO	OFDM, MU-MIMO	OFDM, OFDMA Massive MIMO等
最大データ 通信速度	音声通話 中心	128kbps 音声、 低速データ	384kbps 音声、 低速データ	下り7.2Mbps 上り5.8Mbps	下り300Mbps 上り75Mbps	50Mbps-数100Mbps 音声、データに加え、 無線LANとも連携、 中品質ストリーミング	数100Mbps-10Gbps 超高速大容量、 高信頼・低遅延、 IoT向けセンサの多数同時 接続の3種類のサービス

↑
2013年に第4世代に

第4世代

・テラヘルツ帯(100GHz以上／300GHz～3THz)の中の275～320GHz、45GHz幅の帯域を使用

・アクセス通信速度を5Gの10倍、コア通信速度は5Gの100倍

・ネットワーク容量を5Gの1000倍
・アップリンクの向上(アップリンク:ダウンリンク=1:4の固定比率である5Gに対してアップリンクの比率を高める)

②5Gの1/10の超低遅延(0.1ms、エンド・エンド間で1ms)、低ジッタ(±0.1ns)

③5Gの10倍の超多数同時接続(1000万/km²)

④2020年現在の1/100の超低消費電力(センサの電池寿命20年)

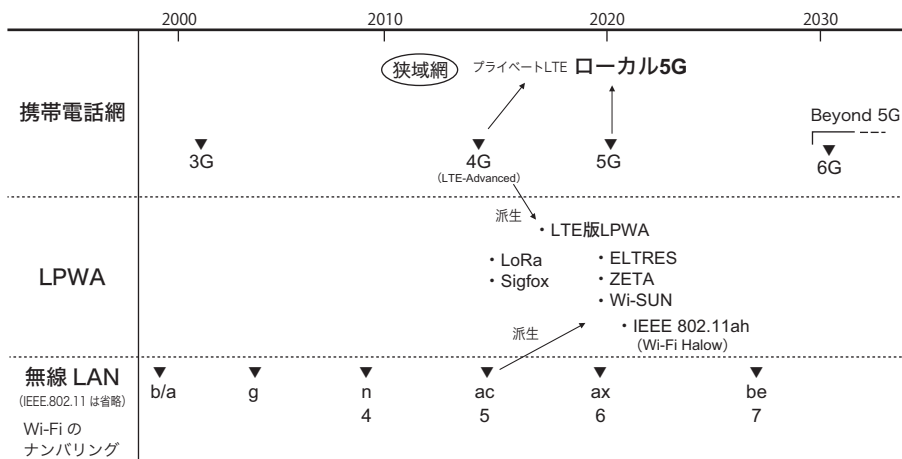
⑤超安全(セキュリティ、プライバシー保護)

⑥超高信頼(耐障害性。5Gの100倍の99.99999%以上の成功率(5Gの1/100の10⁻⁷以下の誤り率))

⑦超カバレッジ拡張(陸・海・空・宇宙での利用) → 離島、海洋、山間部などのカバーエリアの拡大や災害時の通信手段など(図4)

・宇宙ではGEO(Geostationary Earth Orbit: 静止衛星)、LEO(Low Earth Orbit: 低軌道衛星)/VLEO(Very Low Earth Orbit: 超低軌道衛星)、HAPS(High Altitude Platform Station: 高

図2 無線ネットワークの変遷の概要



度疑似衛星)に基地局設置

⑧固定-移動通信融合(5WWC(5G Wireless and Wireline Convergence)を拡張)

⑨AI利用による自律的運用(ゼロタッチオペレーション、自己最適化)

⑩CPS(Cyber Physical System, デジタルツインとほぼ同義。リアル/現実とバーチャル/仮想の融合システム)の完全時刻同期の実現

⑪超高精度測位(屋外誤差50cm以下、屋内誤差1cm以下)

⑫補完ネットワークとの高度同期

6Gだけではなく、2040年にサービス開始予定の7Gをも想定したBeyond 5Gのイメージは図5ようになる。真中の楕円部分は5Gである。上の青い部分は、5Gの3サー

ビス(eMBB, URLLC, mMTC)のそれぞれをさらに高性能化した機能群を意味する。両横と下の薄赤の部分である超低消費電力、超安全・信頼性、自律性、拡張性は、持続可能で新たな価値の創造に資するBeyond 5Gならではの機能群である。6Gとその先を想定したイメージを示している。

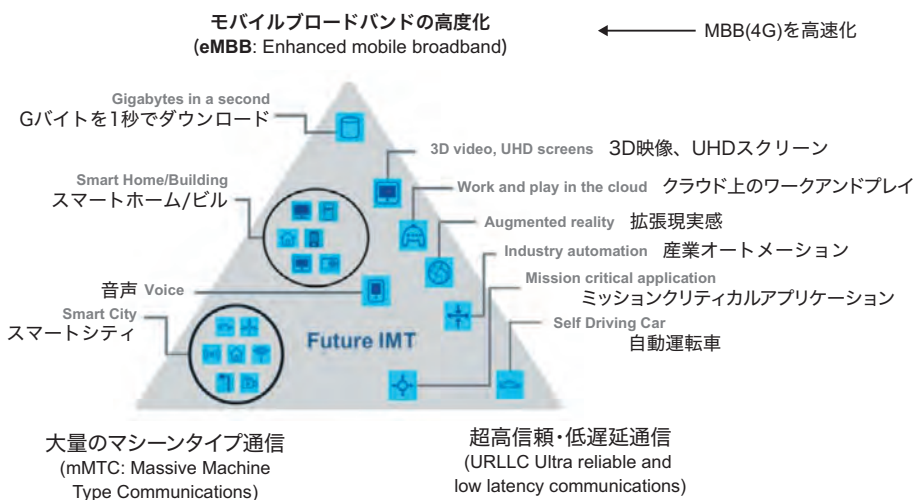
IoT向けセンサネットワーク

センサネットワークは組込みシステム技術との関係が深い。IoTの中核であるとともに、クラウドコンピューティングを補完するエッジコンピューティングや、4GにおけるLTE版LPWA、5GにおけるmMTCにも対応し、MEC(Multi-access Edge Computing)を実現するネットワークでもある。

LPWA、低消費電力で広域に対応

2000年代に、IoTの前身であったユビキタスネットワークの主役として、センサネットワークの研究が盛んに行われた。2003年に標準化されたIEEE 802.15.4 TG(Task Group)を基にZigBeeなどが開発されたが、普及に至らなかった。ZigBeeなどが普及しなかった最大の理由は、長距離が必須の第4の無線ネットワークにならなかったからである。すなわち、低消費電力化はある程度達成されたものの、多くのニーズに対して必要な通信距離が十分でなかったとされる。

図3 5Gの利用シナリオ (ITU-Rビジョン勧告 M.2083, 2015. 9)



IoT向けセンサネットワークについては、低価格で低消費電力でかつ1km以上の通信距離が必要と言われた2013年頃に、フランスにおいてLoRaWAN、Sigfoxなどの独自仕様のLPWAが相次いで開発された。第4の無線ネットワークとしての初めての製品である^{3),4)}。

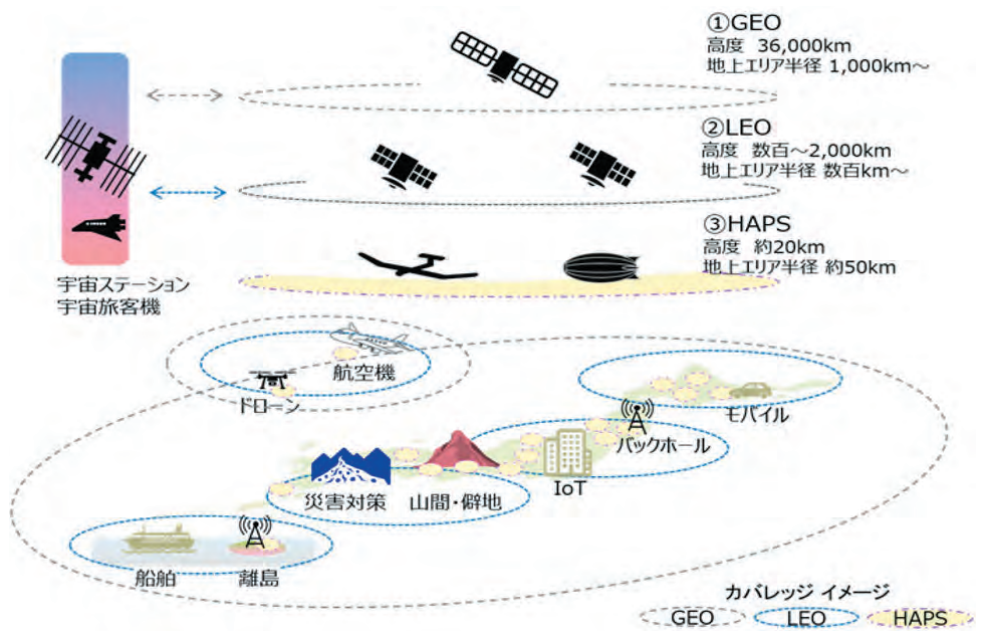
独自仕様LPWAは、欧州における3G/4Gの携帯電話網のデータ通信サービスのシェアを奪い始めた。3GPPでは、データ通信のシェア低下を食い止めるために、わずかに数か月間の検討で、2016年に4Gの規格としてLTE版LPWAを追加した。独自仕様LPWAに対抗するためである。

LTE版LPWAには、2種類のサービスがある。一つは、独自仕様LPWAと性能的に近い仕様で対抗する「NB-IoT (NB: Narrowband)」。

もう一つは、独自仕様LPWAを性能的に上回ることで差別化を図る「LTE-M (eMTCとも呼ばれる)」である。LTE版LPWAの後継については、5GのmMTCのサービスとして継続的に検討されている。

この慌ただしい動きは世界に波及し、国内では2017年から2018年にかけては毎週のようにLPWAの新しい技術やサービスに関するニュースが発表された。この間、

図4 衛星・HAPSによる通信サービスの提供イメージ



IEEEにおいても標準化の検討が行われ、IEEE 802.15.4gを基にした「Wi-SUN (Smart Utility Networks)」や、無線LANの技術を基に長距離通信を可能にした後述する「IEEE 802.11ah (Wi-Fi Halow)」が登場した。

失速気味のLPWAだが希望も

以上のように、LPWAは大きく3種類に分けられる。独自仕様LPWA (LoRaWAN、

Sigfoxの先行組や後発のELTRES、ZETA等)、携帯電話系のLTE版LPWA (3GPP/ITU-Tによるデジュール国際標準)、IEEE系LPWA (IEEEによるデファクト標準) である。さらにそれぞれにいくつかのLPWAが存在し、各LPWAの通信方式と仕様はすべて異なる。要求性能が多様で、各通信方式に一長一短があることから、統一的な標準方式の規格化は不可能と考えられている。

多くのLPWAの出現で百花繚乱ともいえる状況となり、一時はLPWAが第4の無線ネットワークとして定着するかと思われた。しかし当初の勢いは持続せず、2021年以降は全体として年率約20%の成長に留まっている。初期値が小さいため、普及とは言い難い状況である。今後も急激な利用拡大は予想しづらい。国内におけるLPWAの種類は2020年には20近くに上ったが、2024年には1/3程度に減少している。突出して利用が多いLPWAはなく、淘汰されていくLPWAが今後も増える可能性がある。

表2と表3に各種LPWAを比較した。ちなみに国内では、4Gの周波数帯 (UHF帯) を使用するLTE版LPWAを除き、免許不要の920MHz帯を使用する。

図5 Beyond 5Gのイメージ

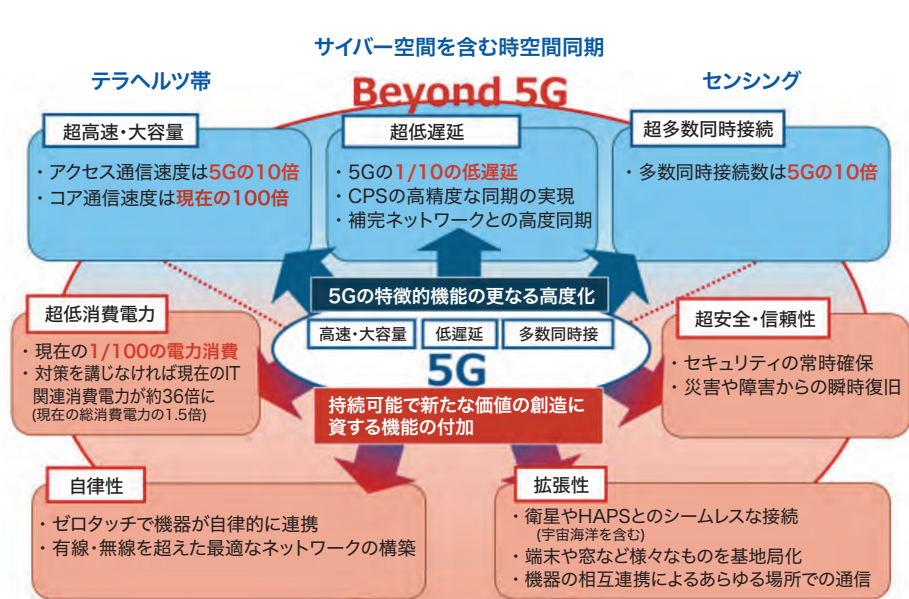


表2 独自仕様LPWA vs. セルラーLPWA

独自仕様LPWA	セルラーLPWA
LoRaWAN, Sigfox, EnOcean Long Range, ELTRES, ZETA,...	4GのLTE-M(eMTC), NB-IoT
<ul style="list-style-type: none"> 免許不要帯域 (920MHz(国内) 利用が大部分。サービス品質の保証は困難) 規制なし プロプライエタリベンダによるクローズドソースのものが多い 製品認証・テストを行うものが増えつつある IP利用不可 カバーする領域が限定 容易に低価格で導入可能 短パケット、低消費電力 低モビリティ 	<ul style="list-style-type: none"> 免許帯域 (700MHz-2.1GHzを利用。サービス品質保証) 規制あり グローバル標準のオープン仕様 製品認定要 IP利用可能 カバーが広い キャリアグレードサービス <ul style="list-style-type: none"> - 安定性 - 信頼性/頑強性 - セキュリティ - モビリティ (ハンドオーバー, (*)FOTA)

↓
低性能で低機能だが低価格

↓
高性能で高機能だが高価格

(*FOTA: Firmware Over/On The Air (端末のファームウェアを無線通信によって配布・更新))

表4 LPWAの主要3機能に対応する主な応用

メータリング (検針)	<ul style="list-style-type: none"> ●電気、ガス、水道のスマートメータリング (遠隔自動検針) ●農業 (水田、グリーンハウスの) 温度、湿度、肥料状態計測 ●マンホールの水位、自動販売機、AED等のバッテリー残量計測
モニタリング (監視)	<ul style="list-style-type: none"> ●大気中や森林、土壌、海洋、河川、湖沼等の環境汚染モニタリング ●川、崖、ダム、橋、トンネルなどの公共インフラの崩壊予知・監視 ●プラント、石油パイプラインなどの設備監視 ●エレベータ、エスカレータの遠隔監視 ●自動車・自転車の駐車管理、シェアバイク/シェアサイクル ●各種資産の盗難監視・検知
トラッキング (追跡)	<ul style="list-style-type: none"> ●物流における物資の配送、貨物の追跡 ●トラック・タクシー・バスの配車、運行、追跡 ●児童や高齢者の見守り、徘徊検知・追跡 ●災害や遭難時の安否確認、避難誘導 ●各種資産の盗難時の追跡

表3 独自仕様主なLPWAの比較

LPWA名	独自仕様LPWA				LTE版LPWA		IEEE系PWA	
	LoRaWAN	Sigfox	ELTRS	ZETA	LTE-M(eMTC)	NB-IoT	Wi-SUN	IEEE 802.11ah(Wi-Fi Halow)
ネットワーク種別	自営網が主	公衆網	公衆網	自営網	公衆網	公衆網	自営網	自営網
通信速度	最大 37.5kbps	送信 100bps 受信 600bps	80bps	100~50kbps	上り最大 1Mbps 下り最大 0.8/1Mbps	上り最大62.5kbps 下り最大26.1kbps	最大2.4Mbps	最大4Mbps
通信方向	双方向	ほぼ上り単方向	上り単方向	双方向	双方向	双方向	双方向	双方向
データサイズ / 通信頻度	11.2byte/回 無制限	12byte/回 上り140回 下り4回/日	16byte/回 送信タイミング固定	プロトコルによる 無制限	上り下り1000bit	上り1000bit 下り640bit	無制限/無制限	無制限/無制限
通信距離	最大約8km	最大約30km	最大約100km	2~10km	最大10km	最大40km	最大20km	最大1km
備考	先発。独自仕様で最も利用が多い	先発。簡易で低価格	100km/hの高速移動体との通信も可能	最大4のマルチホップ通信	独自仕様LPWAに比べて高性能	独自仕様LPWAに近い性能で対抗。主に中国で利用	最大24のマルチホップ通信。電力スマートメータリングで実績	LPWAの中では最高性能。IPの利用が可 無線LANで実績

LPWAでは、IoTのアプリケーションとして、公共や産業、個人レベルまで、人々の生活の隅から隅に至る広い利用形態が想定されている。メータリング(検針)、モニタリング(監視)、トラッキング(追跡)が主要3機能とされる(表4)。

各応用場面に対応した数多くの実証実験が行われている。しかし、キアラアプリとされるスマートメータリング(電気、水道、ガス)、健康・見守り、環境モニタリング、インフラ崩壊予兆監視などについても、収益性の高いビジネスモデルの構築には至っていない。

失速気味のLPWAだが希望もある。総務省は2025年の利用開始をめどに、業務用のデジタルMCA (Multi-channel Access radio system) の跡地としてLPWA用の新たな周波数帯域を検討している。従来の920.6-928MHzに加えて、新たに845-860MHz、928-940MHzが利用可能になる予定である。周波数帯域の拡張により、LPWA間の干渉を抑制し、さらなる高性能化が可能になる。この政府の政

策による後押しなどを活用したLPWAの利用拡大、第4の無線ネットワークとしての定着が期待される。

このほか、カメラを視覚センサとするハイエンドな高速センサネットワークも存在する。

5GのmMTCでは当初、LTE版LPWAとそれほど大きな差のない1~10Mbpsの通信速度を想定していた。しかしLTE版LPWAの利用が進まず、今後の需要拡大が読めないこともあり、数百Mbpsとより高速な仕様を検討中である。この速度では、LP(低消費電力)もWA(広域)も実現できない。第4のネットワークではなく短・中距離で高速なネットワークになるが、LPWAと互いに補完しながらIoTを牽引することが期待される。LPWAと高速センサネットワーク双方のIoT向けセンサネットワークを表5に示す。

ローカル5G vs. 無線LAN

1990年代における無線LANの開発競争では、米国のIEEE 802.11 WG (Working Group)の通信方式が世界標

準になり、欧州は敗北した。欧州は、国際標準化における有利 (ITUはデジュール標準化機関のため欧州が有利) な立場を利用して、狭域網においても米国主導の無線LANに対抗、すなわち自営網でも携帯電話網を普及させることが悲願だった。

ローカル5G、工場と建設現場に期待

このような状況において、ドイツは2011年に「インダストリー4.0」を提唱した。ドイツやその周辺国は、2010年代半ば以降に狭域網を活用した製造業の振興を検討し始めた。この影響もあって、日本国内では2010年代半ば以降、主に製造業での利用を想定したプライベートLTEやローカル5Gの検討が始まった。

もう一つの伏線が、携帯電話網と無線LANの関係である。携帯電話網と無線LANは、3G以前は図6のように明確なすみ分けがあった。データ通信の性能面では、無線LANが携帯電話網を圧倒的に上回り、無線LAN向けに開発された多くのデータ通信技術が携帯電話網における

表5 IoT向けセンサネットワーク

	センサ	センサネットワーク	通信距離	消費電力
ハイエンド (高性能・高機能) IoT	カメラ	・5GのmMTC ・将来は6G、 IEEE 802.11bf等	最大数100m	LPWAに比べて 高消費電力
ローエンド (低性能・低機能) IoT	一般センサ (1個100円~ 1000円)	・独自仕様LPWA ・4GのLTE版LPWA ・IEEE系LPWA	1km以上	低消費電力

：2023年現在実用中
日経BP社によれば、2025年のIoTの市場規模は29兆円

図6 携帯電話網 vs. 無線LAN

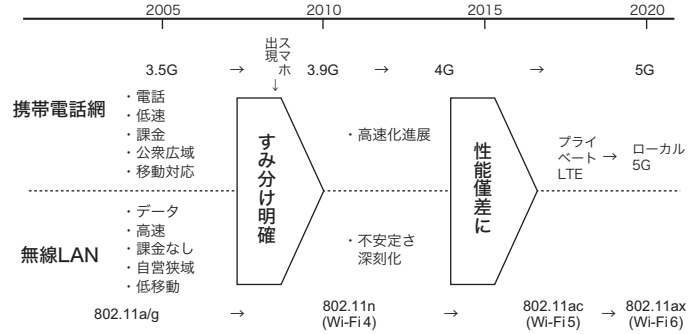
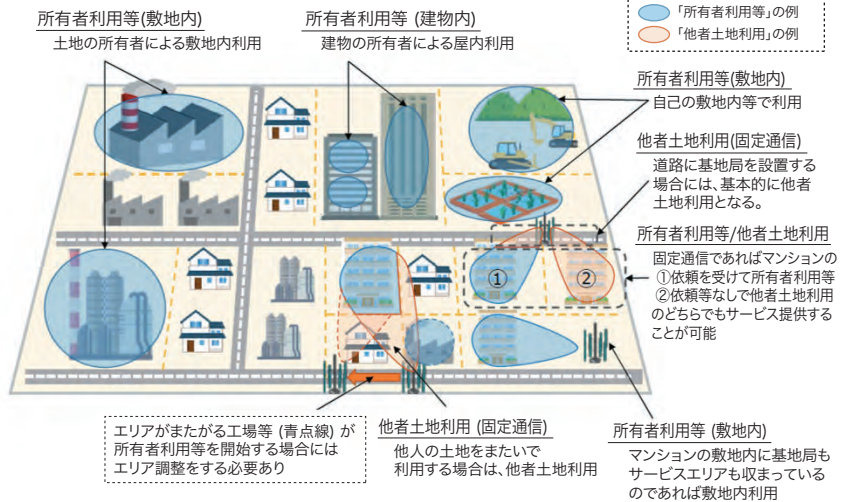


表6 5G/ローカル5Gで提供される3種類のサービスの端末と性能

	主な端末	性能 ()内は最高性能目標
eMBB	汎用的な機能、性能を備えた携帯電話機、スマートフォン等	・移動性能 (500km/h) ・周波数効率 (4Gの3倍) ・ユーザ体感伝送速度 (100Mbps) ・最高伝送速度 (20Gbps) ・システム通信容量 (10Mbps/m ²) ・エネルギー効率 (4Gの100倍)
URLLC	車、ロボット、ドローン、携帯電話機、スマートフォン、産業用センサ等	・遅延 (1ms) ・32バイトの packets 99.999%以上の通信成功率 (10 ⁻⁵ 以下の誤り率)
mMTC	センサ(カメラが主体)が代表的。ウェアラブル機器、家電、ロボット等	・接続端末密度 (10 ⁶ /km ²)

図7 ローカル5Gの利用イメージ



データ通信に適用された。しかし2010年代半ばに利用され始めた4GのLTE-Advanced(現在のLTE)のデータ通信の性能は、当時の無線LANに迫るものとなり、ローカル5Gの4G版となるプライベートLTEの検討を促した。

ローカル5Gは、短・中距離用の無線ネットワークのデファクト標準として定着していた無線LANの牙城に一石を投じた。無線LANとの競合状態を生じさせることになったのである。無線LANでは、IEEE 802.11ac以降に4Gや5Gの通信技術を多く適用するようになり、ローカル5Gと無線LANの技術上の立場は、3G以前と逆転している。

総務省は、5Gのサービス開始が目前に迫った2019年12月に、ローカル5Gの免許申請を開始した。広域網の5G携帯電話網と5Gの通信方式をほぼそのまま踏襲した狭域網のローカル5Gを並行して利用できるようにすることで相乗効果を生み出し、製造業の復活をも狙った政策であった^{3), 4)}。

ローカル5Gと5Gの技術的な相違点は、アップリンク性能を向上させる準同期TDD

(時分割複信:Time Division Duplex)のみと言ってよい。5Gの技術をほぼそのまま使うため、3つのサービスの性能値は表6に示す通りである。閉域利用の特徴を生かした、公衆網の5Gでは実現できないアプリケーションへの期待は高い(図7)。

ローカル5Gの免許は利用する「場所」に対して交付され、免許を取得するのは対象の建物や土地の所有者でも所有者から委託された事業者でも構わない。ローカル5Gの無線局を扱う事業者は、第三級陸上特殊無線技士の資格が必要であり、免許は無線局事項書と工事設計書を地域の総務省総合通信局(国内11カ所)に提出することで申請できる。

2024年現在、国内では、ローカル5Gに対して5Gの周波数に隣接するミリ波帯としている28.2~28.3GHz帯と、サブ6と呼ばれる4.6~4.9GHz帯の周波数が割当てられている。既に200以上の企業や自治体が

免許を取得している。総務省は調査の結果として、ローカル5Gの有望なアプリケーションを図8のように示している。各アプリケーションの主な利用機能を表7に示す。これらのアプリケーションの中でも、ドイツと同じく製造業向けのスマートファクトリ(工場)、スマートコンストラクション(建設現場)への期待が大きく、この2つが7割程度の利用比率を占めるとされている。

ローカル5Gの有望なアプリケーションに適用される5G/ローカル5Gの機能と利用場所を表8に示す。アプリケーションの多くが、高速大容量のeMBBまたは高信頼低遅延のURLLCの利用を想定している。

ローカル5G、コスト高が難

免許申請が可能になった2019年12月から4年半が経過し、国や自治体の助成もあって既に200以上の実証実験が実施さ

図8 ローカル5Gで
実用化が期待される
アプリケーション

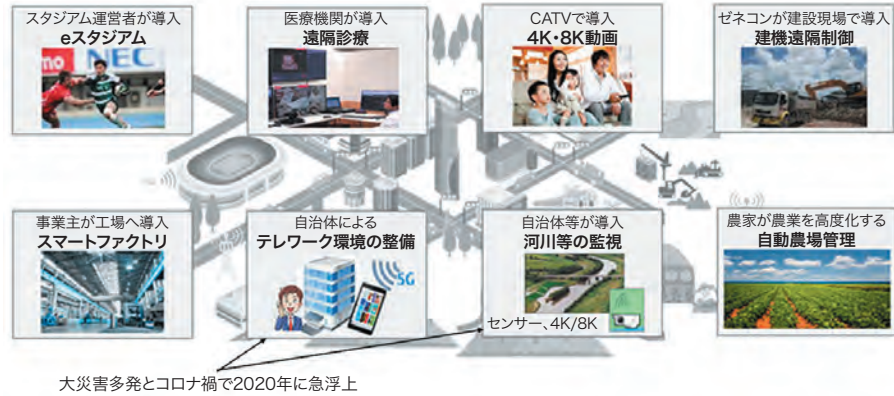


表7 ローカル5Gの有望アプリケーションの主な利用機能

アプリケーション	主な利用機能
スマートファクトリ	生産設備のリアルタイム制御、産業用ロボットの自動運転
スマートコンストラクション(建設現場)	重機の遠隔操縦
発電所・プラント・港湾・空港	遠隔作業支援
インフラ監視	河川の氾濫、崖の崩落、ダムが決壊、トンネル・橋梁の崩壊の監視
イベント会場/eスタジアム	観客向けのコンテンツ配信、警備・セキュリティ
観光支援	観光施設での高精細VRによる体感観光、SL列車への映像配信
4K・8K映像配信(含.地域BWA CATV連携)	地域BWAによるマンションへのCATV映像配信
医療機関・病院	個人情報保護の目的からプライベートネットワークを構築
農業支援	ドローンによって撮影された画像データの解析、農業散布

表8 ローカル5Gの有望なアプリケーションに適用される
5Gのサービス、利用場所

	超高速大容量 (eMBB)	超信頼低遅延 (URLLC)	多数同時接続 (mMTC)	利用場所
スマートファクトリ	◎	◎	△	屋内
スマートコンストラクション(建設現場)	◎	◎	△	敷地内屋外・屋外
発電所・プラント・港湾・空港	◎	◎	△	屋外
インフラ監視	◎	◎	△	屋外
イベント会場/eスタジアム	◎	◎	—	敷地内屋外・屋外
観光支援	◎	△	—	屋外
4K・8K映像配信(含.地域BWA, CATV連携)	◎	△	—	敷地内屋外
医療機関・病院	◎	△	△	屋内
農業支援	◎	△	◎	敷地内屋外・屋外

れているものの、実利用は少ないのが現状だ。導入・運用コストが高い、免許の取得やネットワーク設計など構築・運用に専門的な知識が必要、などが課題とされる。

2021年以降、ローカル5Gの製品に加えて、構築支援ツールや性能評価ツール、性能測定器などが多く開発・発売され、実利用の環境が徐々に整備されつつある。また総務省はローカル5Gの利用を促進するため、2023年以降、基地局の共同利用や海上利用、より密な基地局の設置、アップリンクのさらなる性能向上などの利用条件の緩和策の検討を行っている。

性能向上が続く無線LAN

無線LANの研究と標準化は、米国と欧州を中心に1990年頃に始まった。無線LANの最初の普及版は、1999年に米国のIEEE 802.11 WGで標準化されたIEEE 802.11bである。以後、メインストリームの標準は、IEEE 802.11a、b、g、n、ac、axと続き、2024年現在、IEEE 802.11beの標準化が進められている(図9)。メインストリーム無線LANの主な仕様を表9に示す。

これらのIEEEの標準名とは別に、無線

LANの普及促進を推進する業界団体のWi-Fi Allianceは、4G以降の携帯電話網のローカル版との競合を念頭に置き、IEEE 802.11nをWi-Fi 4、IEEE 802.11acをWi-Fi 5、IEEE 802.11axをWi-Fi 6、IEEE 802.11beをWi-Fi 7と別途ネーミングしている。

2010年代半ばに検討され始めたプライベートLTEの性能は、IEEE 802.11n(Wi-Fi 4)からIEEE 802.11ac(Wi-Fi 5)へのバージョンアップを進めていた無線LANに肉薄するようになった。プライベートLTEが利用されないままローカル5Gの検討が始まったことで、IEEE 802.11 WGはローカル5Gに対抗するためにIEEE 802.11ac(Wi-Fi 5)を2014年に、さらに高性能化したIEEE 802.11ax(Wi-Fi 6)を2020年に標準化した。IEEE 802.11ax(Wi-Fi 6)は、

2021年に利用が始まっている。

また、IEEE 802.11ax(Wi-Fi 6)については、2.4GHz帯と5GHz帯に加えて、6GHz帯を新たに加えたIEEE 802.11ax(Wi-Fi 6E、EはExtended)が発表された。IEEE 802.11ax(Wi-Fi 6E)の基本性能はIEEE 802.11ax(Wi-Fi 6)と同じだが、チャンネルの追加やチャンネルボンディングが可能となり、IEEE 802.11ax(Wi-Fi 6)に比べて、高速化、低遅延化、輻輳軽減が可能になっている。

さらに、2024年現在標準化を進めているIEEE 802.11be(Wi-Fi 7)は、性能的に6G対抗を想定する。IEEE 802.11be(Wi-Fi 7)は、通信速度だけでなく多くの性能特性を向上させる仕様となっている。これらの多くは、4Gや5Gで開発、利用されてきた技術とその拡張版である。

表9 メインストリーム無線LANの主な仕様

	Wi-Fi 5	Wi-Fi 6	Wi-Fi 7
規格名	IEEE 802.11ac	IEEE 802.11ax	IEEE 802.11be
理論上の最大通信速度	6.9Gbps	9.6Gbps	46Gbps
周波数帯	2.4GHz, 5GHz	2.5GHz, 5GHz	2.4GHz, 5GHz, 6GHz
変調方式	256-QAM OFDM	1024-QAM OFDMA	4096-QAM OFDMA
チャンネル幅	20/40/80/80+80/160MHz	20/40/80/80+80/160MHz	最大 320MHz
MIMO	MU-MIMO (Multiuser MIMO)	MU-MIMO (Multiuser MIMO)	Multi-MU (Multi-Multiuser MIMO)

図9 メインストリーム無線LANの標準化と主要技術

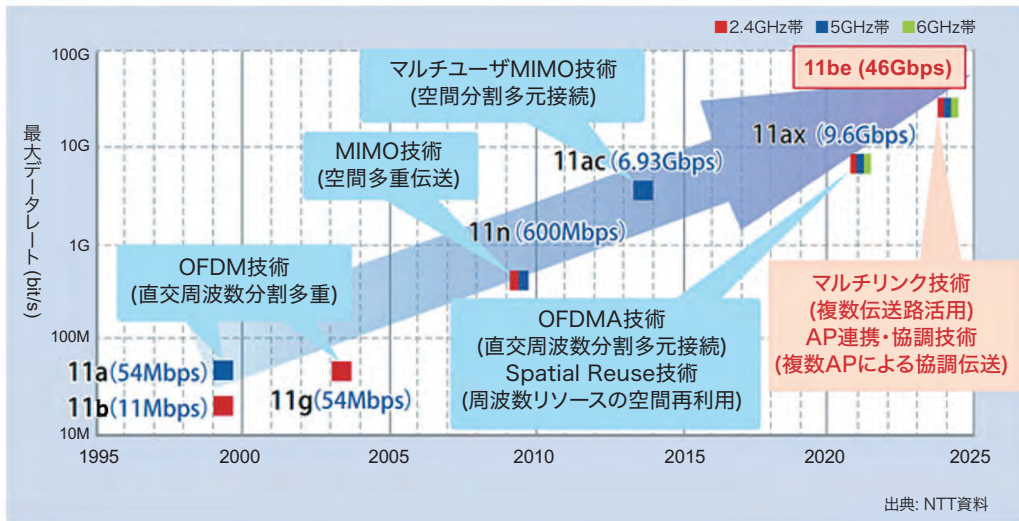


表10 無線LANの今後の展開

IEEE 802.11ay	60GHz帯無線LAN (2025年に製品化)	IEEE 802.11adの後継。1チャンネル当りの帯域幅は2.16GHzで100Gbps以上を実現。ビームフォーミングを活用し、TDD、チャンネルボンディング、MIMOを導入。高速無線LAN、近接・近距離通信(AR/VR等)、光ファイバに代わる無線バックホールの使い方。メタ(旧Facebook)は街中に張り巡らし、パナソニックはV2X(路者間、車車間で大容量データを瞬時にダウン/アップロード)を計画。類似仕様にIEEE 802.15.3eがある。
IEEE 802.11az	誤差1m以内で位置測 (2024年に標準化)	MIMOを使う場合のストリームレベルでの分解能を持たせた伝搬路推定プロトコルやビームフォーミングなどの指向性を利用した角度推定、NLOS判定などの技術を組合せて、誤差を1m以下にする。
IEEE 802.11ba	LPWA/mMTCに対抗するための超低消費 (時期未定)	Wake-Up Radio(ウェイクアップ無線): 受信専用モジュール(WUR: Wake-Up Radio)がAPから送られてきたウェイクアップパケット(WUP: Wake-Up Packet)を受信すると、本体にWake-Upを指示。これを受けて本体が起動し、通信を開始する。WUP受信時に1mW以下を目標。WURからの指示がない限り本体は眠り続けられる。LPWA対抗としては、IEEE 802.11ah(Wi-Fi Halow。低消費電力への考慮はやや少ない)がある。
IEEE 802.11bc	放送型無線LAN (2024年に標準化)	2.4/5/6GHzで利用。端末はコネクション確立前であっても受信でき、逆に端末からも送信できる。災害時などの情報をアナウンスするためにWi-Fiネットワークに接続していない端末へ伝送、美術館で展示物に近づいた端末にガイダンス情報を配信、センサ情報の収集の産業用途等。
IEEE 802.11bf	LPWA/mMTCに対抗するためのセンシングの機能つき無線LAN (2025年に標準化)	1~7.125GHz、45GHzより上のミリ波帯を利用。送受信アンテナ間でやり取りされる(CSI(Channel State Information)。チャンネル状態情報)を使い、室内の人数や侵入者、転倒の検知ほか、PCの無線LAN機能で電波から人の動きを検出し、ユーザが近づいたことを察知したり、画面を後ろからのぞき込まれている状態を検知したりすることなど。

802.11ahが狙うハイエンドLPWA

IEEE 802.11ahはWi-SUN同様に、2010年頃に話題となったスマートグリッド(次世代電力網)用スマートメータ向けに検討され、2012年に基本仕様、2017年に最終仕様が標準化された。メインストリーム無線LANと同じOFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing:直交周波数分割多重方式)方式を用いるため低消費電力化や長距離化が困難で、当初は通信距離が不足していた。しかし、その後の技術開発で1km以上の通信が可能となり、後発組としてLPWAに参入した。

最大通信速度が4MbpsでLPWAの中

で最も高速、IP(Internet Protocol)が利用可能等の特徴があり、ハイエンドLPWAとしての展開を狙っている。2023年末から利用可能となり、NTTなどの後押しもあって2024年以降の利用増加が見込まれる。

このほかIEEE 802.11WGは、ローカル5Gへの対抗を強化するため、表10に示すようなメインストリーム無線LANを補完する周辺機能群を検討している。このような無線LANのオプションについては、これまで40以上もの機能が標準化されているが、実装面やコスト面の理由から利用例はほとんどない。表11に示した機能群が、メインストリーム無線LANと効果的に統合さ

れ、実用化されることが期待される。

今後の展開を占う

無線LANに対するローカル5Gの優位点としては、一般に通信距離が相対的に長い、周波数の免許を取得するため輻輳の問題が少ない(無線LANは免許不要で相対的に輻輳が発生しやすい)、SIM機構によりセキュリティ面で相対的に優位などとされる。ローカル5GとIEEE 802.11ax(Wi-Fi 6/6E)の比較を表11、セキュリティに関する比較を表12に示す。セキュリティに関する差異はほとんどないとの見方が多い。

2024年現在、2020年頃に比べれば大幅

表11 ローカル5GとIEEE 802.11ax(Wi-Fi 6/6E)の比較

	ローカル5G	IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6/6E)
周波数帯	免許要。4.5GHz帯、28GHz帯	免許不要。2.4GHz帯、5GHz帯、6GHz帯
最大通信速度	10-20Gbps(2022年末時点では1-2bps)	規格上は9.6Gbps (2022年末時点では約5Gbps)
セキュリティ、認証方式	APN (Access Point Name) / パスワード、SIM ・SIM認証を行うため強度が高い ・ミリ波使用の場合、敷地・建物外に電波が漏れにくい	WPA3、SSID/パスワード ・WPA3はセキュリティ強度が高い ・敷地・建物外に電波が漏れやすい
通信の安定性	高(他の移動通信事業者との干渉対策は必要)	低(免許不要帯域のため干渉・混信対策は困難)
通信遅延	eMBB: 4ms、URLLC:1ms	20-30ms
通信距離	屋内アンテナの場合 < 50m 屋外アンテナの場合: 数百m	< 50m
電波到達範囲	1台の基地局で広範囲をカバー。移動に対応	長距離通信は不可。移動には対応しない
コスト	・端末もルーターも数十万円 ・基地局は数十万~数百万円 ・コア設備も含めると数千円~1億円	・AP1台の価格は数万~十数万円 ・クラウドWi-Fiを使用すれば初期コストも抑えられる

表12 ローカル5Gと無線LANのセキュリティに関する比較

	ローカル5G	無線LAN
認証	・セルラーと同様ユーザ認証のために接続先 ゲートウェイを識別するAPNやパスワードに加 認 えてSIMカードが必要になり、セキュリティ面で 証はより強固。 ・端末認証では、SIMを使ったEAP-AKA、電子証明書によるEAP-TLSなどを用いる。	・デバイスは接続先APを識別するSSIDとパスワードを知っていれば通信可能となる。通信開始までの手続きが簡易。 ・認証時の鍵交換プロトコルSAEを採用。 ・Enhanced Open(SSIDの選択のみで接続)。
他	・ローカル5Gでは、そもそも地域限定の周波数を用いるため、データが外に漏れない。28GHz以上ではさらに情報は漏れにくい。	・2000年代半ばから利用されてきたWPA2を大幅に強化したWPA3を規格化。

APN (Access Point Name) SIM (Subscriber Identity Module) SSID (Service Set Identifier) SAE (Simultaneous Authentication of Equals)
WPA (Wi-Fi Protected Access) EAP: Extensible Authentication Protocol AKA: Authentication and Key Agreement TLS: Transport Layer Security

に縮まったものの、ローカル5Gと無線LANの価格差は大きい。端末が100台規模のシステムに対して、ローカル5Gの価格は無線LANの数倍から10倍程度とされている。

無線LANは、早期にはIEEE 802.11ax (Wi-Fi 6)を高性能化したIEEE 802.11ax(Wi-Fi 6E)の投入によって、ローカル5G対する競争力を強化する。中期的には、IEEE 802.11be(Wi-Fi 7)の2027年頃の開発を目指して、6Gのローカル版に対抗すると思われる。

一方のローカル5Gは、急速に開発・利用環境が整備されてきているものの、低価格化が遅れると、IEEE 802.11ax(Wi-Fi 6/Wi-Fi 6E)とIEEE 802.11be(Wi-Fi 7)には

さまれて、低成長のまま普及しない可能性がある。IEEE 802.11be(Wi-Fi 7)が予想以上に早期に開発されると、ローカル5Gも6Gのローカル版もさらに厳しい状況となる。

ローカル5Gは、無線LANの数倍という通信距離の利点を生かし、早期の低価格化を進めながら、キラーアプリとされるスマートファクトリ(工場)、スマートコンストラクション(建設現場)などへの浸透を強力に推進することが重要である。

本稿ではまず、無線ネットワークの現状を俯瞰した。2020年頃まではLPWAや5G/ローカル5Gの新技術の出現で話題が豊富であったが、その後特に注目すべき技

術は生まれていない。

携帯電話網では、Beyond 5Gの議論が進められてはいるものの6Gの技術目標を明確にした程度である。LPWAは、期待に反して高成長を維持できず、長距離で低速の第4の無線ネットワークになれていない。

このような状況の中で、これまで短・中距離で高速な無線ネットワークとして定着してきた無線LANを脅かすような形でローカル5Gが登場し、無線LANと競合する状況になった。現在は、無線LANの動きが激しいが、両者は互いに補完する関係で共存できる可能性もある。両者の動静は、今後の無線ネットワーク全体の方向にも影響を与えるものであり、注視する必要がある。

阪田史郎(さかたしろう) 1974年早稲田大学大学院修士課程電子通信工学修了。同年日本電気(NEC)入社。1996年同社研究所所長。2004年千葉大学大学院教授、2019年同大学名誉教授。2019年東京大学大学院工学系研究科上席研究員。専門は情報通信ネットワーク。工学博士。単著書3、共著書46。IEEE Fellow、日本工学会フェロー、電子情報通信学会フェロー、情報処理学会フェロー。総務省情報通信審議会専門委員。電子情報通信学会顕彰功績賞、情報処理学会功績賞、総務省関東総合通信局長賞、同省東海総合通信局長賞他受賞。

参考文献 1) 阪田史郎: 5G/ローカル5Gの最新動向と新ビジネス、研究開発リーダー(技術情報協会)、2023.8. 2) 阪田史郎:「5G/ローカル5Gの動向とBeyond 5G/6Gに向けた新技術の展望」、技術情報協会、2022. 3) 阪田史郎: IoTを牽引する広域センサネットワークLPWAの最新動向と将来展望、オプトロニクス、2019.5. 4) 阪田史郎: ウェアラブル機器のためのIoT通信技術 - LPWAを中心として、電気計算、2019.10.

IoT機器のセキュリティ規制 現状と対策

牧野 進二 組込みシステムセキュリティ委員会 副委員長

いまや多くのIoT (Internet of Things) 機器が日本はもちろん世界各地で導入されている。しかし、IoT機器の管理・運用が正しく行われていない場合が多く、攻撃者の踏み台として利用されることが少なくない。こうした背景から、IoT機器の利用やデータ活用に関して各国・地域で法律による規制が始まっている。本稿では各国・地域における法規制の現状と対応策を述べるとともに、JASAとセキュアIoTプラットフォーム協議会が2024年度から始める中小企業向け「セキュアIoTプログラム」を紹介する。

従来はクローズドな環境で利用されていた機器にネットワーク機能が追加され、IoT (Internet of Thing) 機器としてインターネットに繋がる。こうした風景が、世界各国・地域でいまや普通になってきた。社会問題の解決にIoT機器のデータを有効活用するなど、今後の発展への期待は大きい。例えば日本政府が提唱するSociety5.0は、IoT機器なしでは実現でき

ないだろう。

一方で問題も抱えている。現状のまま放置すると、踏み台にされDDoS (Distributed Denial of Service) 攻撃に悪用されかねないなど、サイバーセキュリティ面での懸念が拭いきれない。例えばコンシューマ向けIoT機器では、デフォルト・パスワードのまま使われ、管理・運用が正しく行われていないケースが少なくない。そのため攻撃者の格好の餌食となり、踏み台として利用されているケースが多くなっている(図1)。

各国・各地域における法規制

こうした認識は、日本だけではなく各国・各地域共通である。IoT機器を使ったデータ活用を進める上で、セキュリティの脅威への対策が喫緊の課題になっており、各国・各地域でIoT機器の利用やデータ活用に関する法規制が数多く登場している。

各国・各地域の法規制には大きく2つの狙いがある(図2)。

一つは、サイバー空間からの脅威に対し

て自国・自地域の情報を保護するとともに、自国・自地域の産業の競争優位性を確保することである。

2つ目は他国・他地域の法規制との連携である。IoT機器がインターネットを介して世界と否応なくつながる時代である。また利用できるIoT機器を自国・自地域製だけに限定することも難しい。企業や個人の利便性や満足度を高めるために、他国・他地域の法規を遵守している機器であれば安心して使えるようにしたい。逆に法規制をクリアしていないIoT機器は排除できることが望ましい。そのために他国・他地域のサイバー政策との協調が不可欠となっており、そのための法整備が急務である。

EUの法規制に要注意

サイバーセキュリティに対する法規制としては、例えば認定制度やラベリング制度が挙げられる。実際、すでに多くの認定制度やラベリング制度の運用が各国・各地域で始まっている(図3)。対象は広く、これまで法規制の対象でなかったコンシュー

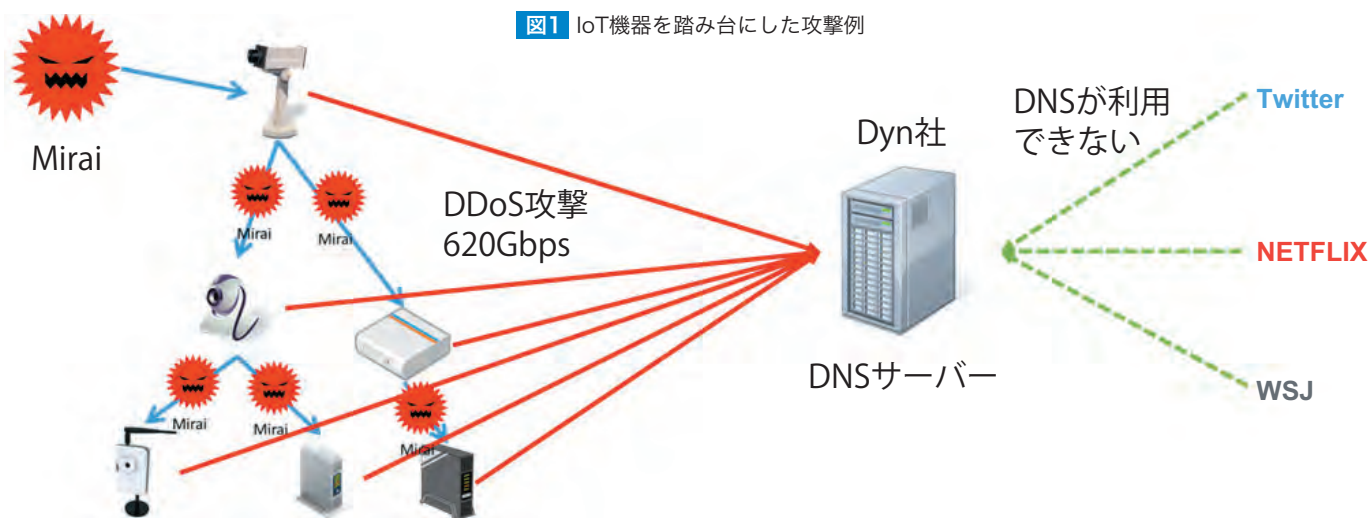
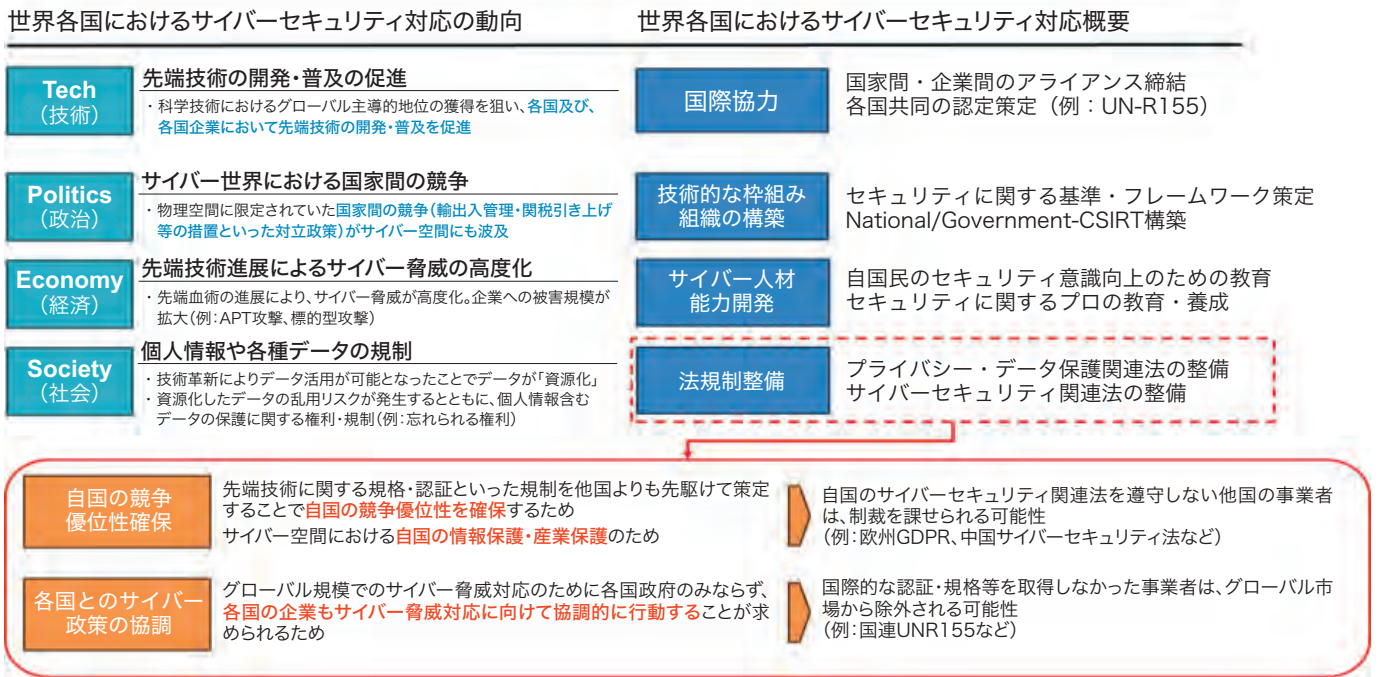


図2 各国・各地域でのサイバーセキュリティ対応動向



マ製品などの分野にまで拡大している。

コンシューマ用途のIoT機器の認定制度やラベリング制度の制定で、活発な動きを見せているのが欧州である。また米国でも、ラベリング制度が始まっている。以下では欧州と米国、日本の状況を紹介する。




欧州で注目すべきはRED指令

(Radio Equipment Directive)である(図4)。ネットワーク機能を備えるコンシューマ用途のネットワーク機器を対象とする。RED指令は、安全なネットワークの利用、個人情報の保護、サイバー空間からの脅威への対策を求めている。2025年8月から義務化される。欧州で販売・運用するネッ

トワーク機能を備えるIoT機器は、それまでに適合要件を満たさなければならない。

RED指令以上に要注意なのは、2026年に発効が予定されている「サイバーレジリエンス法(CRA: Cyber Resilience Act)」である。RED指令は、ある程度製品分野が限られているため影響は大きくない

図3 サイバーセキュリティ認定・ラベリング制度

国、地域	法規制	主な対象製品	規制開始	(整合) 規格
英国 	PSTI (Product Security and Telecommunication Infrastructure)	消費者向け且つインターネット接続可能な(有線/無線)製品	2024年4月29日	EN303 645 利用可能
欧州 	無線機器指令 (RED)CS 3(3) (d), (e), (f)	無線機器且つ、インターネット接続できる機器	2024年8月→ 2025年8月に延伸 見込み	2024年6月 (リリース予定)
	サイバーレジリエンス法 (CRA)	デジタル要素を含むソフトウェア、ハードウェア製品	2025年? 2026年?	—
	NIS2指令 (NIS2 Directive)	重要インフラ(セクタ)事業者及び、重要インフラに導入されるIoT機器	2024年 各国内法へ移行	—
米国 	2020年 IoTサイバーセキュリティ改善法	トランスディーサx1 ネットワーク x 1以上	(政府調達品) 2022年12月	NISTIR8259/ NISTIR8425

必要な整合規格が発効前。適合評価が難しい

2022年1月発表

■サイバーセキュリティの要件

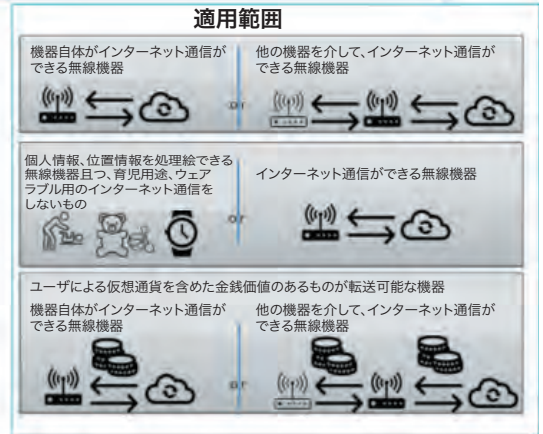
- ・ 3(3)(d)「無線機器はネットワークまたはその機能に損害をあたえず、ネットワーク資源を悪用せず、それによって許容できないサービスの低下を起こさない」
- ・ 3(3)(e)「無線機器は利用者と加入者の個人データおよびプライバシーが確実に保護される保障措置が組み込まれている」
- ・ 3(3)(f)「無線機器は不正行為からの保護を保証する特定の機能をサポートしている」

■2025年8月1日から義務化予定

■該当製品

インターネットに接続される全ての無線機器

■整合規格:リリース前



と思われる。しかし2026年に発効予定のサイバーレジリエンス法は、様々な分野の機器に影響が出ると予想される(図5)。

RED指令は、技術要件としてサイバーセキュリティ対策ができていないことを認定する。これに対してサイバーレジリエンス法では、技術要件だけではなくプロセス要件も認定範囲に含まれる。つまり製品開発のプロセスにも注意をはらい、サイバーレジリエンス法への対応が必要になる。

具体的には、要件、ユーザへの指示、技術文書、適合性試験、EU適合宣言での対応が求められる。さらに、ENISA(欧州ネットワーク・情報セキュリティ機関: The European Union Agency for Cybersecurity)への報告義務が課せられ、脆弱性が悪用されたサイバーセキュリティ事故が発生した場合の罰則規定があるとも言われる。

サイバーレジリエンス法は、OSSの利用

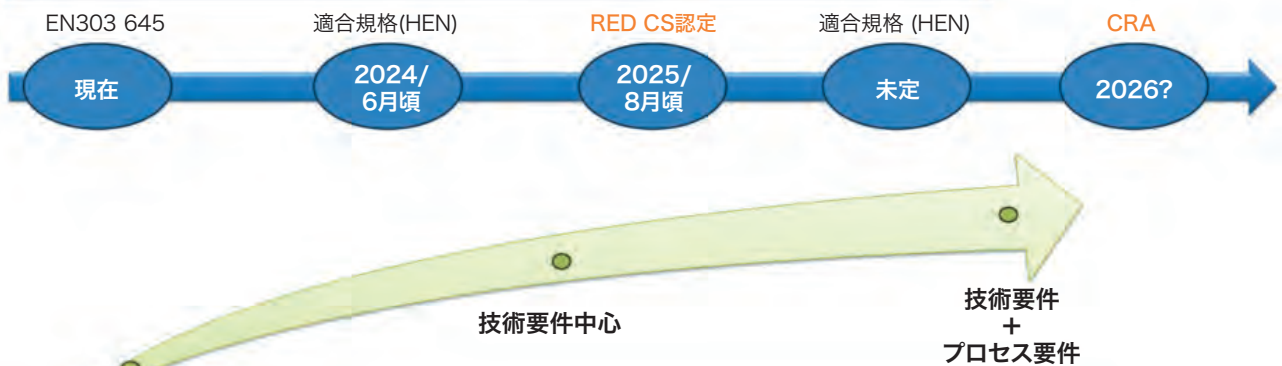
も規制の対象とする。OSSを利用する場合には、「イノベーションや研究を妨げないようにするため、商業活動の過程以外で開発または提供される無料のオープンソースソフトウェアは、本規則の対象とすべきではない」とされる。OSS利用にあたっては注意が必要になる。

米国ではNISTIR 8425が重要

米国の認証制度とラベリング制度では

図5 サイバーレジリエンス法概要

RED CS認定よりも大きなインパクトがあるCRA。準備が必要になる。



基礎的な技術要件

- CRA適合に向けて
1. EN303 645利用し、RED CS認定の適合に近づける。
 2. RED CS適合規格が発効された後、自己適合宣言または、NB型式認証を取得
 3. CRAでは対象製品のプロセス要件が大幅に追加見込み

■ラベリングについての留意事項

- ①ラベルは消費者のIoT製品の購入意識を支援するものであること。
(IoT製品の信頼/信用を高める目的)
- ②ラベルデザインは理解されやすいマークであること。
- ③サイバーセキュリティの専門的な知識を必要とせず、広く消費者が利用できること。
- ④IoT製品のセキュリティ・ステークホルダー間で責任を共有すること。
(小売業者、メーカー、業界、非営利団体、学术界、政府など)
- ⑤消費者への教育キャンペーンを伴うこと。
(ラベルの認知度向上及び、プログラムの重要な側面について消費者に透明性を提供)
-製品の基準、専門用語の解説、適合性評価に関する一般的な情報、適合宣言、
範囲(製品の種類やラベル付き製品の識別)、消費者への期待、ラベリングプログラムの連絡先の情報

■適合性評価について

- ①適合性評価スキームオーナーは、公的機関又は、民間企業の場合もある。
- ②単一の適合性評価ではなく、IoT製品の利用範囲、ユースケース別にアプローチが可能
- ③適合性適合性評価スキームオーナーを定義し、スキームオーナーは以下を対応
 - 推奨の基準を調整
 - 適合性評価要件を定義
 - ラベルと関連情報を開発
 - 消費者へのサポート・教育を実施
- ④単独または、組合せて技術要件への適合を検討
 - 自己適合宣言
 - 第三者による試験又は、検査
 - 第三者認証

Executive Order 14028とNISTIR 8425が重要である。前者は2021年にサイバーセキュリティ大統領令として発令された。後者は、コンシューマ用途のラベリング推奨(認証)基準として制定された規制である。

NISTIR 8425は、消費者向けIoT機器で満たすべき最低限のセキュリティ要件を定義する(図6)。またRecommend Criteria(推奨基準)で、IoTラベリング基準に基づく認証スキームについて検討す

べき事項が記載されており、注目すべき文書である。

ISO対応も不可欠に

このほかISO規格にも注意が必要である。認定・ラベリングに関する国際規格としてISO/IEC 2740xシリーズが存在する(表1)。ISO/IEC 27400は標準化済みで、ISO/IEC 27402は現時点でDraft版、ISO/IEC 27404は策定中となっている。こ

れらが認定・ラベリング制度が国際標準化された場合には、対応が不可欠となる。

経産省が適合性評価制度を検討

国内では経済産業省が、IoT製品に対するセキュリティ適合性評価制度構築に向けた検討を行っている。2024年3月15日の時点で最終とりまとめの段階である²⁾。2024年4月から制度の説明や準備が実施され、2024年度中に制度自体の評価

表1 ISO/IEC 2740 x 概要

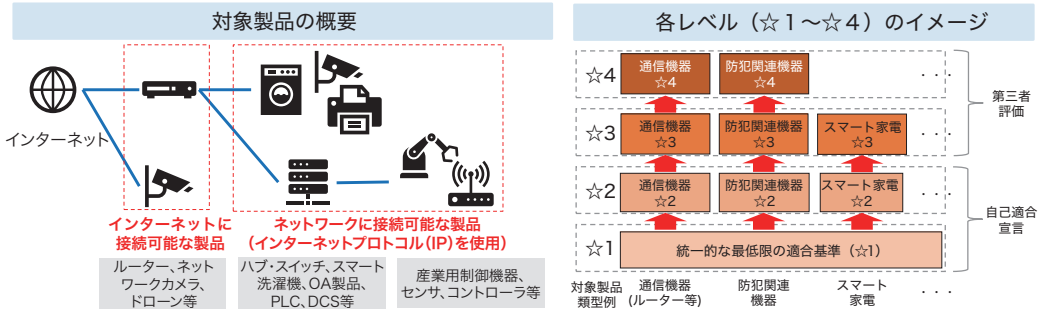
No	規格名	概要	対象者	備考
1	ISO/IEC 27400	IoTソリューションのセキュリティとプライバシーに関するリスク、原則、コントロール(対策)に関するガイドライン	IoT サービスプロバイダ、IoT サービス開発者、IoT ユーザ	2017年:総務省・経産省のIoTセキュリティガイドライン v1.0を提案しプライバシー要件が追加され標準化
2	ISO/IEC 27402	IoT機器のセキュリティとプライバシーに関するIoT機器の要求ベースライン要件	IoT機器、製造者	2019年米国発案 NISTIR 8259がベース。IoTセキュリティ要件を定義後にNISTIR 8425になっている
3	ISO/IEC 27404	消費者向けIoT機器のサイバーセキュリティラベリングフレームワーク	消費者、開発者、サイバーセキュリティラベルの発行団体、試験機関	シンガポール発案。欧米ともラベリングに向けた検討を実施

図7 経済産業省セキュリティ適合性評価制度 レベル概要

各レベル（☆1～☆4）の位置付け

- 前回の検討会でのご意見を踏まえ、これまでの検討会での議論をもとに、各レベルの位置付けについて整理した。

レベル	位置付け	適合基準	評価方式
☆3以上	政府機関等や重要インフラ事業者、大企業の重要なシステムでの利用を想定したIoT製品類型ごとの汎用的なセキュリティ要件を定め、それを満たすことを独立した第三者が評価して示すもの	製品類型別	第三者認証
☆2	IoT製品類型ごとの特徴を考慮し、☆1に追加すべき基本的なセキュリティ要件を定め、それを満たすことを製品ベンダーが自ら宣言するもの		
☆1	IoT製品として共通して求められる最低限のセキュリティ要件を定め、それを満たすことをIoT製品ベンダーが自ら宣言するもの	製品類型共通	自己適合宣言



を行い、2025年度から正式に始まる段階となりつつある³⁾。

セキュリティ適合性評価制度では、大きく4レベルで製品の適合性評価が行われ

る(図7)。レベル1とレベル2は「自己適合宣言」、レベル3とレベル4は「第三者認証」が必要な適合性評価制度である。評価の内容や基準などが適切かどうかを確認す

るために、レベル1の適合性評価制度を2024年4月から試験的に始める。

適合性評価制度における自己適合宣言のレベル1、2では、IoT製品ベンダーなど

図8 経済産業省セキュリティ適合性評価制度 認定スキーム

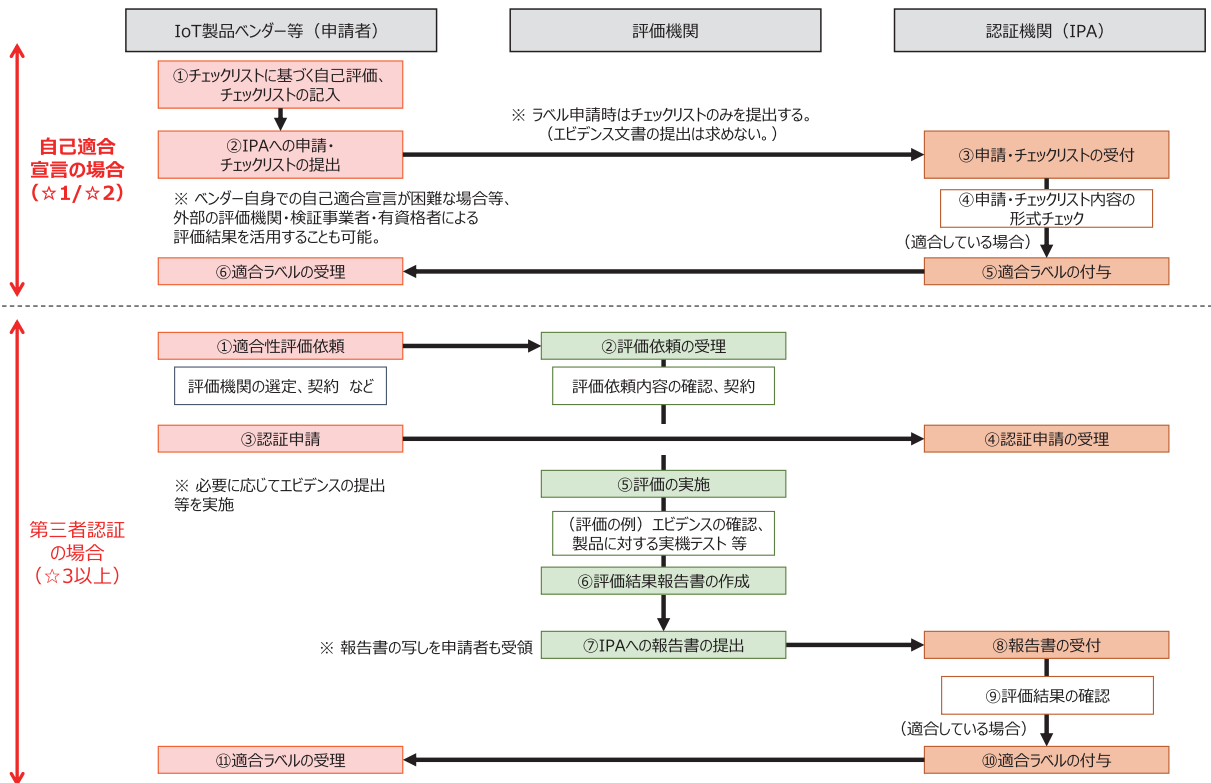


図9 セキュアIoTプログラム概要



IoT機器適合性評価事業
「セキュアIoTプログラム」
における共同運営



IEC62443をはじめとする国際標準やSP800シリーズなどのセキュリティ規格が定められ、調達基準としても採用され始めているが、取得のためには莫大の費用と長期の検証期間がかかるため適合できるのが一部の大手企業に限定されるのが現状である。

「IoTセキュリティ手引書」をベースに「脆弱性検査およびIoTセキュリティ検査」とIoTシステムに求められるセキュリティ要件を以下の点に絞り込み、国際標準(IEC62443)への適合性を確認する「セキュアIoT認定」を組合わせたプログラムを発表。

【検証ポイント】

●ライフサイクル管理

- ・真正性の担保 (鍵管理、ROT: Root Of Trust)
- ・認証と識別 (設計・製造、利用、廃棄、リサイクル)
- ・セキュアアップデート (OTA:Over The Air)



申請者が定められた手順書に従い適合性チェックリストを利用し評価を実施する(図8)。認定のスキームオーナーは情報処理推進機構(IPA)が担う。エビデンスとなる文書を提出する必要はない。

JASAがサポートを開始

以上に述べた国際的な認定制度やラベリング制度、経済産業省が推進している適合性評価制度などを踏まえ、JASAはセキュアIoTプラットフォーム協議会と連携し、認定やラベリングの取得を目指す中小企業に向けた支援制度「セキュアIoTプログラム⁴⁾」を2024年度に始める(図9)。

セキュアIoTプログラムは、セキュアIoTプラットフォーム協議会が立ち上げた、産業用のIoT機器に向けた認定プログラムであ

る。幅広く網羅的な規格のIEC 62443をベースに、IoTセキュリティ手引書に基づいた認定プログラムで、脆弱性検査とIoTセキュリティ検査を中心に認定を行う。

脆弱性検査は、主にソースコードのセキュアコードレベルの検査、ネットワークスキャンでの脆弱性診断、ソースコードベースでの既知の脆弱性診断などで構成する。IoTセキュリティ検査は、IoT機器やシステムに求められるセキュリティ要件をライフサイクル管理に絞り込んでいる。具体的には、真正性の担保、認証と識別、セキュアアップデートなどの妥当性評価を行う。

セキュアIoTプログラムは、認定やラベリングの取得を目指す企業に向けたサポートプログラムとしても利用可能だと考えている。認定・ラベリング制度への対応に

困った場合に活用を検討いただきたい。

IoT機器の利用やデータ活用に関しての法規制は、今後もさまざまな国・地域に拡大することは間違いない。認定やラベリング取得へのニーズがますます高まることが予想される。セキュアIoTプログラムのカバー範囲を広げることも必要になってくるだろう。

組込みシステムセキュリティ委員会は、サイバーセキュリティに関する法規や認定・ラベリング制度の調査を継続的に行いながら、セキュアIoTプログラムの対応範囲を拡大する予定である。同時に急務となっているセキュリティ人材の育成にも努める。具体的にはセキュリティ人材の育成教育プログラムを2024年度から始める予定である。ぜひ活用を検討いただきたい。

牧野進二(まきのしんじ) 2017年より、JASAでセキュリティに関わるWG活動を行っている。2019年に組込みシステムセキュリティ委員会を立ち上げ、国際動向調査や組込み機器のセキュリティ対策などを会員企業で利用できるように活動中である。著書に「組込みエンジニアの教科書」(シーアンドアール研究所)、「ETSS標準ガイドブック」(日経BP)、「エンベデッドシステム開発のための組込みソフト技術」(電波新聞)がある。

1) サイバーレジリエンス法のOSS解釈 https://www.theregister.com/2023/12/04/infosec_in_brief/

2) IoT製品に対するセキュリティ適合性評価制度構築に向けた検討会 https://www.meti.go.jp/shingikai/mono_info_service/sangyo_cyber/wg_cybersecurity/iot_security/index.html

3) IoT製品に対するセキュリティ適合性評価制度の構築について(p.20) https://www.meti.go.jp/shingikai/mono_info_service/sangyo_cyber/wg_cybersecurity/iot_security/pdf/007_04_00.pdf

4) セキュアIoTプログラム <https://www.secureiotplatform.org/s-iot-cert>