

STATE OF THE  
**EDGE**  
2024

エッジの現状 2024

# 目次

編集者より .....	3
第1章：2024年のエッジ コンピューティングとマクロトレンド.....	4
第2章：エッジのサイバーセキュリティ.....	15
第3章：無線通信とエッジ コンピューティング.....	33
第4章 エッジAI .....	54
第5章：EDGEからのポストカード .....	72
付録A：LF Edge サブプロジェクト ディレクトリ.....	80
付録B：オープンなエッジ コンピューティング用語集、バージョン2.0.....	85
クレジット .....	96

## 編集者より

読者の皆さん、

今回で第7版となる「2024年エッジの現状」レポートによろそ。私は過去2年間、このプロジェクトの委員長を務めさせていただきました。この経験で最もやりがいを感じたのは、業界全体の素晴らしいオピニオンリーダーと関わり、彼らから学ぶ機会を得たことです。エッジ コンピューティングに対する見方が大きく変わりました。

State of the Edgeレポートは、急速に進化するエッジ コンピューティング分野の包括的な見解を提供するために、業界の先駆者であるMatt TrifiroとJacob Smithが共同で設立し、2018年に始まりました。この第7版のリリースにあたり、このレポートでは、この分野のダイナミックな性質と飛躍するテクノロジーとの交わりを反映し、その価値を高め続けていると確信しています。クラウド コンピューティング、エッジ コンピューティング、AI、半導体の進歩、ロボット工学、ワイヤレス通信など、現在、最も革新的な技術の多くが、かつてない方法で融合しつつあるユニークな瞬間に我々は立ち会っています。

### エッジ コンピューティングに変革の年

AIは、エッジのユースケースで最も重要な推進力として登場し、可能性の限界を押し広げています。運転手のいない自動車やロボタクシーなどの自律走行車の商業化は、現代のエッジ コンピューティングの最も顕著な例です。エッジ コンピューティングは、私たちの日常生活に欠かせないものとなりつつあり、多くの場合、私たちはそれに気づかぬうちに、エッジ コンピューティングを利用しています。将来は、先進的なVR/ARデバイスやヒューマノイドロボットなど、さらに革新的なアプリケーションが登場し、そのすべてがエッジ コンピューティングに大きく依存することになるでしょう。

本レポートの目的は、業界のベテランから新規参入者まで、幅広い読者にこうした複雑な動きを理解してもらうことです。各章では、エッジの展望の重要な側面を探り、洞察と専門家による分析を提供しています。

### 今年のレポートの内容

- **第1章**：まず、Linux Foundation Edge が提唱するエッジ コンピューティングの分類方法を紹介します。普遍的に利用されるフレームワークはまだ見つかっていませんが、表現を統一することで、コラボレーションとイノベーションが促進されると考えています。また、本章では、エッジ AI の台頭、クラウドネイティブとエッジネイティブの融合、IT/OT の融合、5G 技術の採用など、この分野を形成するマクロトレンドについても取り上げます。
- **第2章**：本章では、エッジ環境におけるサイバーセキュリティを取り上げ、ゼロトラスト戦略や多層防御（Defense in Depth）戦略など、エッジ環境特有の課題と新たなソリューションを検証します。また、新たな規制の取り組みがエッジのセキュリティに与える影響についても検討します。

- **第3章**：ここでは、無線通信とエッジコンピューティングの関係性について説明します。5Gのような現在のテクノロジーや、6Gや衛星通信のような将来の技術の一端を紹介します。また、通信プロバイダーやクラウドサービスプロバイダーにおいて、ワイヤレス、エッジ、クラウドコンピューターを、どのように組み合わせるソリューションを構築しているかについても説明します。
- **第4章**：本章の焦点はエッジAIです。エッジAIにおける連合学習の役割と、エッジAIによるユースケースを探ります。最近の大規模言語モデルや生成AIに関する関心の高まりに伴い、エッジコンピューティングはこれらのイノベーションを実現する重要な手段として勢いを増しています。2024年には、サンフランシスコやロサンゼルスなどの都市で商用ロボタクシーサービスがすでに開始されており、日常生活におけるエッジAIの影響が拡大していることを示しています。
- **第5章**：最後を締めくくるのは、当レポートシリーズ恒例の「エッジからのポストカード」です。このミニエッセイは、業界の実務家やオピニオンリーダーによって執筆され、業界の方向性、今後の課題、開発中のソリューションのスナップショットを掲載しています。手軽にエッジコンピューティングの現状を知ることができます。

このレポートを読みながら、貴重な見識と実践的な教訓を見出していただければ幸いです。過去2年間、Linux Foundationの指導の下、このプロジェクトを主導できたことを光栄に思います。この分野でイノベーションを推進するオープンソースコミュニティを、あなたやあなたの組織がどのように活用し、貢献できるか、ぜひ考えてみてください。

「早く行きたければ、一人で進め。遠くまで行きたければ、みんなで進め。」ということわざがあります。この言葉は、オープンソースの共同作業の理念を完璧に捉えていると思います。このことを念頭に置いて、私は皆さんと一緒にこの旅に出られることにワクワクしています。コミュニティに参加していただき、ありがとうございます！



**Hakan Sonmez**  
 Chair, State of the Edge Report 2024  
 Governing Board Member, LF Edge

## 第1章

# 2024年の エッジコンピューティングと マクロトレンド



## 第1章：2024年のエッジ コンピューティングとマクロトレンド

### はじめに

本レポートの第1章では、Linux FoundationのLF Edgeプロジェクトが提唱するエッジ コンピューティングの包括的な分類方法について解説します。サービス プロバイダー エッジとユーザー エッジの基本的な定義を示し、エッジ連携の際のそれぞれの役割に焦点を当てます。この章は、エッジ コンピューティングに精通したプロフェッショナルであっても、これからエッジ コンピューティングの世界に足を踏み入れる方であっても、復習や新たな学習経験として、貴重な情報となることを目的としています。また、一般的なエッジの展開パターンと、エッジ コンピューティングの全体像におけるさまざまなノードとコンポーネントの主要な特性についても説明します。

また、ベーシックな分類方法に従って、現在エッジ コンピューティング市場を形成しているいくつかのマクロトレンドを分析しています。これらのトレンドには、クラウドネイティブとエッジネイティブの融合、情報技術（IT）と運用技術（OT）の融合、エッジAIとデータトラスト フレームワークの台頭、エッジ コンピューティングを促進する5G導入の役割などが含まれます。本章の終わりには、エッジ コンピューティングが何を意味するのか、クラウド コンピューティングや従来のオンプレミスITとどのように関係するのか、なぜエッジ展開のために共有言語とフレームワークの確立が重要なのか、といった既存の課題の一端を明らかにしたいと考えています。

LF Edgeでは、エッジ コンピューティングに関する共通の分類方法と言語を定めることが、コラボレーションとイノベーションを促進する上で極めて重要だと考えています。パブリッククラウド プロバイダー、スタートアップ企業、ソフトウェアベンダー、通信会社などによるエッジ コンピューティングへの注目が高まる中、認知度は確実に高まっていますが、まだ混乱も見られます。我々の目標は、エッジ コンピューティング領域を解明し、体系的に理解することで、その上に強固な基盤を構築し、それを提供することです。

### エッジ コンピューティングの分類方法-共通言語の構築

エッジ コンピューティングとは、主に計算機能を必要とされる場所、つまりネットワークの一番外側に近づけることです。このアプローチにより、さまざまなアプリケーションやサービスのパフォーマンス、セキュリティ、運用コスト、信頼性が向上します。処理のために生データをクラウドに送り返す必要性を減らすことで、エッジ コンピューティングは待ち時間と帯域幅という一般的な課題を解決することができます。本質的には、デバイスとそれをサポートする計算リソース間の距離を縮めることであり、まったく新しいタイプのアプリケーションへの道を切り開いています。

実際には、現在の集中型データセンターと、サービス プロバイダーやユーザーのフィールドに展開される無数のノードとの間の経路に沿って、新しいリソースとソフトウェアスタックを広げることを意味します。一言で言えば、エッジ コンピューティングは分散型クラウド システムのようなもので、複数のアプリケーション コンポーネントがネットワークによって相互接続されながら連携して動作します。

LF Edgeの分類方法（図1-1）は、用語を明確にすることで、固有の技術的およびロジスティックなトレードオフに従って一連の環境を区分し、市場の混乱をなくすことを目的としています。また、この分類方法は、クラウド、電気通信、IT、OT、IoT、モバイル、コンシューマの各市場における関心時に対してのバランスにも配慮しています。

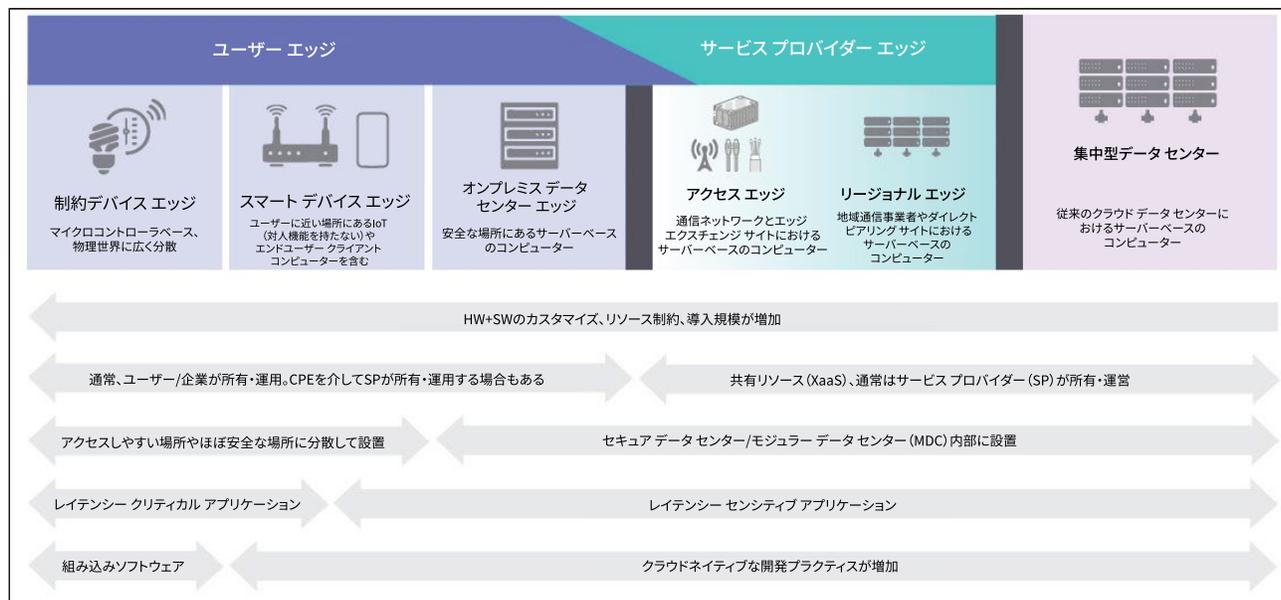


図1-1：LF Edgeの考える一連のエッジ コンピューティング

ここで、図1-1に示した一連のエッジ コンピューティングの主な構成要素を見てみましょう。

### 集中型データセンター

図の右端には、クラウドベース コンピューターを代表する集中型データセンターがあります。この施設は、デバイス レベルでは単純に達成できない、大幅なスケール メリットと柔軟性を提供します。集中型クラウドのリソースは仮想的には無制限ですが、本来はデバイスのリソースには制約があります。集中型クラウドは、多数のデバイスの集成的として動作（デバイスの設定、追跡、監督など）を管理することができますが、データセンターの場所が移動できないこととリソースを共有する性質によって制限されます。

### サービスプロバイダー エッジ

集中型データセンターからデバイスに向かうつながりに沿って進んだときに、最初に登場するエッジ区分がサービスプロバイダー (SP) エッジです。ここでは、グローバルの、固定もしくはモバイル ネットワーキング インフラ上でサービスを提供します。パブリック クラウドと同様、サービスプロバイダー エッジのインフラ（計算機、ストレージ、ネットワーク）は、多くの場合サービスに利用されます。しかし、サービスプロバイダー エッジのソリューションは、パブリック インターネットや携帯電話ネットワークなどのサービスプロバイダーが運営するプライベート ネットワークを利用するパブリッククラウドとは異なり、セキュリティとプライバシーを向上させることができます。サービスプロバイダー エッジは、通信サービスプロバイダー (CSP) による既存の数十億ドル規模の投資

を活用しています。CSPは通常、ネットワーク エッジにコモディティ サーバーを設置し、近隣の施設にあるクラウド プロバイダーやベアメタル事業者と接続し続けています。サービス プロバイダー エッジのインフラは、ユーザー エッジよりも標準化されているものの、導入される場所によって、規制への準拠や堅牢化など特定の要件が存在する場合があります。

サービス プロバイダー エッジは本質的には分散型であり、計算リソースをエンドユーザーに大幅に近づけることができます。CSPは、固定またはモバイル ネットワークをエッジで活用することで、数多くのエッジアプリケーションのプラットフォームを構築することができ、無線プロバイダーが5Gに移行する際など、ネットワークの進化に合わせて新たなビジネス モデルやユースケースを実現できます。固定ネットワークにおいて、CSPは多くの場合、CPE（Customer Premise Equipment：顧客構内設備）を使って企業ビルや家庭内でネットワークを終端し、これをさらに活用して追加のエッジ サービスを提供することができます。

### ユーザー エッジ

2つ目のエッジ分類はユーザー エッジです。サービス プロバイダー エッジに対してラスト マイル ネットワークを隔てた位置にあり、サービス プロバイダーエッジと分離されています。多くの場合、待ち時間をさらに短縮するためには、エンドユーザーや物理プロセスに近いオンプレミスと同様の分散された計算リソースを使用することが不可欠です。一般的に、ユーザー エッジに計算リソースを配置するもう一つの理由はネットワーク帯域幅の節約で、サービス プロバイダー エッジや集中型データセンターなど、ラスト マイル ネットワーク全体でのデータのバックホール通信を最小限に抑えることができます。ユーザー エッジにエッジを導入する動機は、アプリケーションのニーズに合わせたリソースの確保以外に、自律性の向上、セキュリティとプライバシーの強化、全体的なコスト削減などがあります。サービス プロバイダー エッジと比較して、ユーザー エッジはより多様なリソースを備えています。一般的に、エッジの計算リソースが物理的な世界に近いほど、より専門化され、制約される傾向があります。

図1-1に示すように、エッジ層の基本的な違いはコンピューティング資産の所有権です。サービス プロバイダー エッジやパブリック クラウド内のリソースは通常、エンドユーザーが所有するのではなく、多くのユーザーで共有されます。一方、ユーザー エッジのリソースは通常、ユーザ専用で、顧客自身が所有・運用します。ユーザー エッジのリソースのみに依存するアプリケーションは、多くの場合、運用コスト（OpEx）ではなく資本支出（CapEx）が必要なビジネス モデルになります。つまり、インフラの取得や運用の複雑さ、スケーラビリティへの対応は、プロバイダーによるサービスとして提供されず、ユーザーが責任を負うことになります。

しかし、サービス プロバイダー（およびクラウド プロバイダー）は、オンプレミスのコンピューティング インフラやネットワーク インフラを含むマネージド サービス ソリューションを提供するようになってきており、ユーザー エッジとサービス プロバイダー エッジの両方のリソースを統合したアプリケーションの配信ができつつあります。例えば、サービス プロバイダーがプライベートな携帯電話基地局を管理して遠隔地の採掘現場での接続性を確保したり、分析会社がサービス プロバイダー エッジからユーザー エッジで動作するデバイスにAIベースの意思決定サポートを提供したりすることが挙げられます。

## エッジ コンピューティングの展開パターン

ユーザー エッジ内のサブカテゴリーは、階層化された一連のコンピューティングの一部として、サービス プロバイダー エッジやクラウドと連携しますが、必ずしも直線的ではありません。スマート温度調節器、スマートフォン、コネクテッド ビークルなど、物理的な世界に配置された制約のあるスマート デバイスは、多くの場合、ルータを介してサービス プロバイダー エッジやクラウドに直接接続し、オンプレミスのデータ センター インフラをすべて迂回します。他には、デバイスがオンプレミスに配置され、より高性能なローカル エッジ コンピューティング リソースと相互作用し、それがサービス プロバイダー エッジおよびクラウドと通信するシナリオなどがあります。この一連のつながりには、地域性、能力、形状・仕様、所有権などの複雑な検討要素があります。図1-2に、さまざまなエッジ展開パターンの例を示しています。

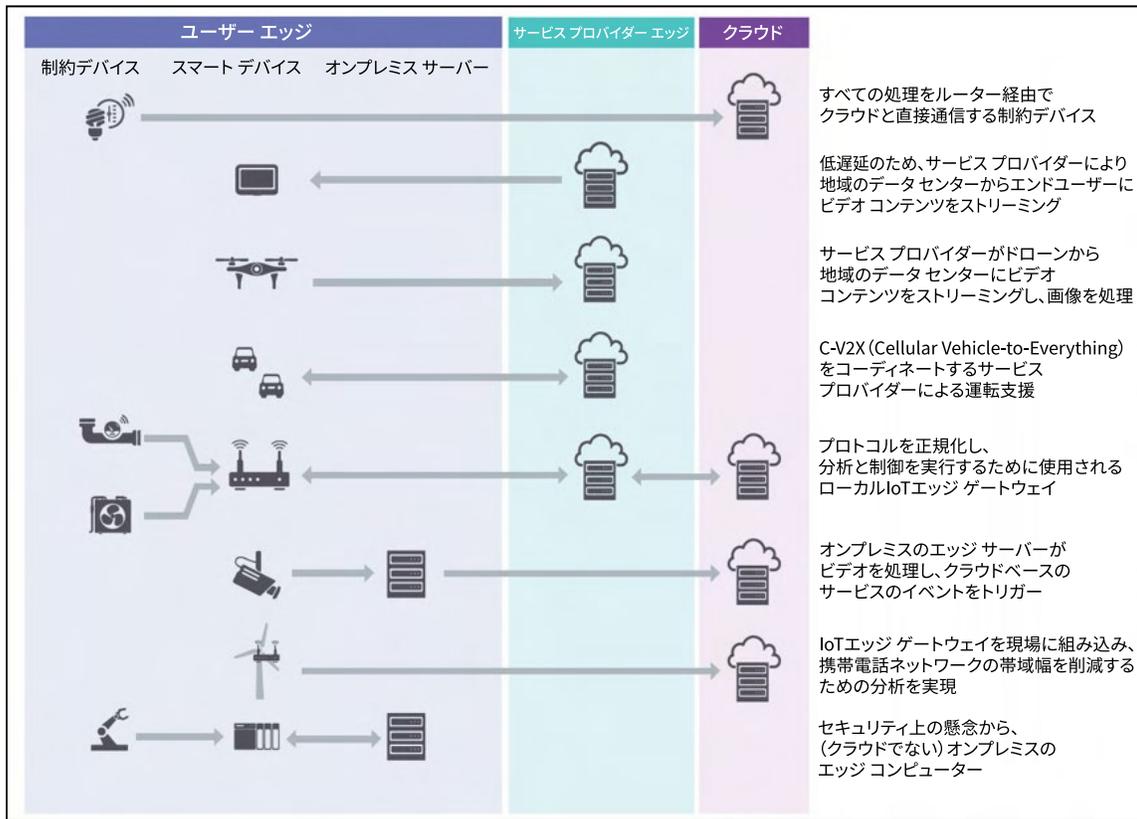


図1-2：エッジの一連のつながりの中での展開パターン例

## エッジの特徴

図1-1に示す各エッジ層には、スケーラビリティ、信頼性、レイテンシー、コスト、セキュリティ、および自律性に関してトレードオフがあります。一般に、ユーザー エッジのコンピューターは、有線または無線のローカル エリア ネットワーク (LAN) 上で管理される専用リソースで構成され、サポートするユーザーやプロセスに関連します。対照的に、サービス プロバイダー エッジとパブリック クラウドは、一般的にワイド エリア ネットワーク上で動作する共有リソース (XaaS) です。

多くの場合、ユーザー エッジとサービス プロバイダー エッジの処理は連動して機能します。ユーザー エッジの処理は通常、レイテンシーへの配慮、帯域幅の効率、自律性、安全性、セキュリティ、プライバシーに最適化され、サービス プロバイダー エッジの処理はスケーラビリティを重視します。例えば、AI/MLモデルは集中型クラウド データセンターまたはサービス プロバイダー エッジで学習され、実行のためにユーザー エッジに展開されます。以下の図1-3は、各エッジ層の主な特徴を示しています。

属性	ユーザー エッジ			サービスプロバイダー エッジ		集中型クラウド データセンター
	制約デバイス エッジ	スマートデバイス エッジ	オンプレミス データセンター エッジ	アクセスエッジ	リージョナルエッジ	
ハードウェア クラス	制約のあるマイクロコントローラベースの組み込みデバイス (音声制御スピーカ、温度調節器、照明スイッチ、センサー、アクチュエーター、コントローラーなど)。KB~MBのメモリが利用可能。	Armおよびx86ベースのゲートウェイ、組み込みPC、ハブ、ルーター、サーバー、小規模クラスター。利用可能なメモリは256MB以上だが、制約がある。必要に応じてアクセラレーター (GPU、FPGA、TPUなど)。	標準サーバーと アクセラレーター付きネットワーク	アクセラレータを備えた標準的なサーバーやネットワーク、通信無線インフラ	標準サーバーと アクセラレーター付きネットワーク	標準サーバーと アクセラレーター付きネットワーク
配備場所	物理世界に広く分散し、個別の製品やシステムに組み込まれている	セキュアなデータセンター以外のフィールドに分散配置 (工場フロア、備品庫、スマートホームなど)、または分散システム内に組み込み (コネクテッドビークル、風力タービン、街灯など)。	セキュアなオンプレミスのデータセンターや、マイクロデータセンター (MDC)。通常、企業が所有・運営。	サービスプロバイダー (ISPやCSPなど) が所有・運営するCO、RO、サテライトDC。サービスプロバイダーが所有・管理するCPEの場合、リソースはユーザー エッジに配置することもある。	サービスプロバイダー (ISPやCSPなど) が所有・運営するCO、RO、サテライトDC。	CSPが所有・運営する集中型DC、ゾーン、リージョン。主要ネットワークに近いDCで処理を実行
グローバルノード拠点数	数兆	数十億	数百万	数十万	数万	数百
役割/機能	限られた機能のアプリケーションに限定され、高度な処理はより高いクラスのコンピューターに依存。TinyMLによるシンプルなML機能が出現。	アプリやサービスのための使用範囲の限定された汎用コンピューター。IoTコンピューティングエッジ (対人機能を持たないシステム) やユーザーエッジデバイスなどのスケーラビリティに制限のある動的でCSW定義のコンフィギュレーション。	中程度のスケーラビリティを持つアプリケーションやサービス向けのローカル汎用コンピューター。特定の企業専用。	ユーザー企業にインターネットへのラストマイルアクセスを提供。可用性は高く、パブリックやプライベート、汎用や専用のものがある。幅広いスケーラビリティがある。IaaS, PaaS, SaaS, SDN (XaaS) のための共有リソース。	可用性は高く、パブリックやプライベート、汎用や専用のものがある。幅広いスケーラビリティがある。IaaS, PaaS, SaaS, SDN (XaaS) のための共有リソース。	ハイバースケールやウェブスケール、パブリック、汎用である。パブリッククラウドにはIaaS, PaaS, SaaS, SDN (XaaS) の共有リソースが含まれる。
ソフトウェアアーキテクチャ	組み込みソフトウェア /ファームウェア、時間制約のあるアプリケーションのためのリアルタイムオペレーティングシステム (RTOS)。	能力とユースケースに応じて、ベアメタルからコンテナ化 /仮想化まで。Linux, Windows, モバイルOS (Android, iOSなど)。	仮想化、コンテナ化、クラスタ化されたコンピューター。LinuxやWindows。	仮想化、コンテナ化、クラスタ化されたコンピューター。VNF, CNF, マネージドサービス、ネットワークング。LinuxやWindows。	仮想化、コンテナ化、クラスタ化されたコンピューター。VNF, CNF, マネージドサービス、ネットワークング。LinuxやWindows。	ベアメタル、VM、クラスター、コンテナ、様々なアーキテクチャ、様々なサービス。LinuxやWindows。
セキュリティ、運用管理	専用の無線通信運用管理ツールで、多くの場合、デバイス/メーカーによるカスタム品。セキュリティのためにより広域なコンピューティング環境に依存することがある。	リソースの制約、独自の機能、アクセシビリティ、現場の技術的専門知識が限られているため、特定のセキュリティツールや運用管理ツールが必要。ネットワークファイアウォールが活用できないことが多い。	分散クラスターをサポートできるようにクラウドデータセンターのセキュリティツールや運用管理ツールを適応させたもの、専用に構築されたデータセンターの物理的なセキュリティやネットワークセキュリティによるマルチットを活用。	クラウドデータセンターのセキュリティと運用管理ツールを進化させ、各地に分散したKubernetesクラスターをサポートする	クラウドデータセンターのセキュリティと運用管理ツールを進化させ、各地に分散したKubernetesクラスターをサポートする	従来のクラウドデータセンターのセキュリティと運用管理ツール
物理的特徴	あらゆるデバイスに対応する様々な形状・仕様	ユースケースに基づき、独自のI/O、産業用途の耐久性、規制認証などを備えた特殊な形状・仕様を多様にミックス	堅牢性と規制を考慮した汎用サーバークラスのインフラ (MDC用など)	専用の無線インフラ。ローカライズされたリソースのために、電力、熱、堅牢性、規制を考慮した汎用サーバーおよびネットワークインフラ。	電力、熱、堅牢性、地域資源に対する規制を考慮した汎用サーバーおよびネットワークインフラ。	汎用サーバー インフラ

図1-3：一連のエッジの流れにおけるエッジ属性のまとめ

重要なのは、エッジ層の境界は固定されていないということです。例えば、CPE (Customer Premise Equipment) がオンプレミスに設置され、マネージド サービスとして接続性と計算機能を提供する場合、サービス プロバイダー エッジとユーザー エッジの両方に該当する可能性があります。逆に、企業所有のプライベートクラウド データセンターに見られるように、ユーザー エッジがラスト マイル ネットワークを超えて広がることもあります。これらのエッジの境界は流動的かもしれませんが、常に技術的・物的な条件は、特定の処理がどの環境で最も効率的に実行されるかによって決まります。

エッジ層がどのように定義されるかにかかわらず、本来の目的は、開発者に最大限の柔軟性を提供し、現実的な制限を念頭に置きながら、クラウドからエッジまでの一連の流れに対し、できるだけ下流までクラウドネイティブの環境を展開することにあります。

## エッジ コンピューティングを形成するマクロトレンド

エッジ コンピューティングは、ネットワーク上のデバイスやデータの急速な増加に後押しされ、ホットな話題となっています。市場調査会社IDCは、現在のエッジ コンピューティングのグローバル市場は2024年に2,280億ドルに達し、2028年には3,780億ドルに達すると予測しており、2024年から2028年にかけての年間成長率は2桁の高成長になると予測しています<sup>1</sup>。

膨大なデータ量により、より分散型のコンピューティング モデルへのシフトが促されています。このトレンドは予想外なものではなく、コンピューターの歴史を振り返ると、10～15年ごとに中央集権型と分散型が繰り返されてきました。私たちはメインフレームからPCに移行し、インターネットの登場によってモバイル コンピューターとユビキタス接続が台頭し、クラウド インフラへの投資が進みました。

エッジトレンドの大きな原動力の1つは、IoTユースケースの台頭であり、ダウンロード中心のシナリオに主眼を置く従来のネットワーク設計とは異なります。対照的に、IoTソリューションは本質的にはアップロード中心です。5Gネットワークの出現は、エッジ コンピューティングの必要性をさらに加速させています。5Gは、近接するアンテナ基地局間の極めて狭い範囲の接続を利用して、極めて広帯域かつ低遅延の接続をデータの消費者に提供します。このような接続は、従来の有線でのアップロードよりもはるかに高速ですが、データが宛先に到達するまでには低速のパスを通過しなければならない場合があるため、上流に新たなボトルネックが生じる場合があります。このため、エッジ コンピューターがローカルでデータを前処理し、下流で利用可能な広帯域幅を活用しながら、上流のボトルネックを緩和する必要があります。

要するに、エッジ コンピューティングは、待ち時間の短縮、帯域幅の節約、自律性の強化、セキュリティとプライバシーの向上といったニーズが推進の原動力です。ユースケースは、IoT、エッジAI、5G（特にプライベート5G）、セキュリティなど様々な領域に広がり、あらゆる市場の垂直統合に適用できます。しかし、クラウドがエッジ コンピューターに取って代わられるわけではありません。むしろ、クラウドとエッジが連携して進化する需要に対応することで、計算リソースがより広範に分散されるようになっています。

本章の残りの部分では、現在エッジ コンピューティングを形成している4つのマクロトレンドについて考察します。具体的には、クラウドネイティブとエッジネイティブの融合、情報技術（IT）と運用技術（OT）の融合、エッジAIとデータトラストの台頭、そしてエッジ コンピューティングを加速させる5G導入の役割です。

### トレンド#1：クラウドネイティブとエッジネイティブの融合

コンテナ化とKubernetesの登場により、クラウドネイティブなソフトウェア開発は急速に拡大し、プラットフォームに依存しないマイクロサービスベースのアーキテクチャと、継続的なソフトウェア拡張のための継続的インテグレーション/継続的デリバリー（CI/CD）プラクティスが採用されています。データセンターで活用されているクラウドネイティブ開発のメリットはエッジにも適用でき、業界最高水準のコンポーネントを使って動的にアプリケー

<sup>1</sup> IDC: Worldwide Spending on Edge Computing Forecast to Reach \$378 Billion in 2028  
<https://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prUS52587424>

ションを構成し、分散方式を用いてスケール アップ/スケール アウトし、開発者のイノベーションに合わせて継続的に改善することが可能になります。

理論的には、開発者はコンテナ化された処理を、デバイスから集中型クラウド データ センターまでの一連の環境のあらゆる場所に展開できるユニバーサル プラットフォームにアクセスできるようになり、ユースケースやコンテキストに応じて分散型コンピューティングと集中型コンピューティングの利点をバランスよく活用できます。しかし、重要なプロセスを保護し、安全性とコンプライアンスを確保しながらレガシー システムをサポートする必要があるなど、固有の技術的または物流的なトレード オフがある場合には、実現できない場合もあります。

「エッジネイティブ アプリケーション」とは、集中型データ センターで全てを運用することが現実的ではない、あるいは望ましくないアプリケーションのことです。エッジネイティブ アプリケーションはクラウドネイティブの原則を活用していますが、リソース制約、セキュリティ、レイテンシー、自律性など、エッジ特有の課題に対応できるよう設計されています。「エッジネイティブ」では、アプリケーションがクラウドから切り離されているわけではないことに注意が必要です。むしろ、エッジネイティブ アプリケーションは、上流のクラウド リソースとシームレスに連携することを意味しています。中央集中型のクラウド コンピューティング リソース、リモート管理、オーケストレーション機能との連携ができない、あるいはCI/CDのプラクティスを活用しないエッジ最適化アプリケーションは、真の「エッジネイティブ」ではなく、むしろ従来のオンプレミス ソリューションに近いと言えるでしょう。典型的な例は、原子力発電所内の従来のSCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) アプリケーションで、セキュリティ上の理由からクラウドから独立して運用されています。

結局のところ、開発者は、レイテンシーや安全に関するクリティカル要件のような固有のトレードオフに対応しつつ、クラウドネイティブの思想をエッジの一連のつながりの可能な限り末端まで浸透させた基盤を構築する必要があります。

エッジ コンピューティング ソリューションは、本質的には何らかの形でクラウドを組み込んでいます。クラウドとエッジの連携には、次のようなさまざまな方法があります：

- クラウド中心型：クラウドは一元化されたデータ リポジトリとして機能し、事実上無制限の計算能力を提供します。複数のソースからデータを収集、正規化、前処理するエッジ アプリケーションと連携して動作します。
- クラウド サポート型：クラウドが AI/ML モデルのトレーニングに使用され、エッジに展開されます。
- エッジ中心型：顧客データはすべてオンプレミスに置き、クラウドはハードウェアやアプリケーションのリモート オーケストレーションなど特定のタスクのみを処理します。このアプローチは、セキュリティ、IP 保護、データ プライバシー、データ主権に基づく要件に対応しながらも、エッジ リソースを集中管理できるメリットがあります。

「エッジネイティブ」という言葉は、クラウドネイティブの原則を採用しながらも、エッジ中心型の運用を念頭に置いて設計されたアーキテクチャを表す言葉として登場しました。このアーキテクチャでは、ロケーション、レイ

テンシー、多様なコンポーネントの統合といったオンプレミスのニーズを優先します。重要なのは、エッジネイティブのソリューションはクラウドを排除しているのではなく、オンプレミスの要件を重視しながらクラウドをアーキテクチャの補完的なパーツとするように設計されていることです。

## トレンド#2：ITとOTの融合

情報技術（IT）と運用技術（OT）の融合は、近年重要なトピックとなっています。組織のアプローチには2つの方向のアプローチがあり、物理世界で展開される従来のOTシステムからより上流へ拡大するケースと、従来のITデータセンターやクラウドから下流へ拡大するケースがあります。それぞれ、「OTアップ」、「ITダウン」のアプローチと捉えることができ、それぞれのアプローチごとに異なる検討事項があります。

OTは、工場、製油所、ビルなどの産業プロセスに根ざしています。モノのインターネット（IoT）ソリューションの台頭により、以前は孤立していた業務が接続されるようになり、可視性が向上し、処方的アナリティクスを実行できるようになりました。これらの機能により、効率、品質、安全性の改善が進められています。投資対効果は明確である一方で、OT環境にIoTソリューションを導入することは、限られた電力、信頼性の低い接続環境、過酷な環境条件（熱、湿度、汚れなど）、数十年の寿命を持つ機器、安全・セキュリティ規制、100年以上前のサプライヤーの独自システムへの依存など、独自の課題を持っている場合があります。さらに、OTの専門家は、機械工学、電気工学、化学工学、生物工学、科学技術分野など、さまざまなバックグラウンドを持っていることが多く、データセンターやクラウドネイティブアプリケーション開発で使用されるツールや方法論に精通していない可能性があります。

一方、IT管理者は通常、垂直的な産業運営に関する専門知識が不足しており、産業における環境の科学のおよびビジネス的側面をあまり知りません。IT管理者は、データやデバイスのセキュリティを維持する責任を負うかもしれませんが、管理の複雑さを最小限に抑え、サーバーの物理的なセキュリティに対する信頼性を高めるために、集中型のインフラやアプリケーション（データセンターやパブリッククラウドなど）を好みます。

エッジ展開への「OTアップ」アプローチは、多くの場合、従来の産業用制御システムそのままに軽量の「ゲートウェイ」ハードウェアとセンサーを展開します。これは、様々なIP技術または非IP通信プロトコルを標準化されたIPベースのフォーマット（MQTT、OPC-UAなど）に変換するIoT技術を使用してエッジインフラを近代化し、ネットワーク経由でデータを伝送できるようにします。これらのエッジデバイスは、ネットワークが途絶えた場合でもデータを持続できるようにローカルに保存し、ルールエンジンやAI推論モデルを介して基本的な分析を実行することもできます。これらのエッジノード上のソフトウェアは、クラウドネイティブの原則を念頭に置いて構築されている場合もあれば、そうでない場合もあります。

逆に、エッジコンピューティングへの「ITダウン」アプローチは、集中管理を維持しながら、クラウドやデータセンターのプラクティスを物理的な世界に拡張するアプローチです。これには、ソフトウェア定義インフラ、クラウドネイティブアプリケーション、CI/CDパイプラインなどクラウドファーストのプラクティスが活用されます。ITダ

ウンアプローチの主な目標は、OT環境特有の要件を損なうことなく、その思想を可能な限りエッジ環境へ拡張することです。これによりIT部門は、俊敏性と応答性を最大化し、集中管理とリモート運用を維持することができます。

### トレンド#3：エッジAIの台頭とデータの信頼性

エッジにおける人工知能と機械学習（AI/ML）の一般的なアプローチは、中央集中型のクラウド データ センターのような豊富なリソースを持つ環境でディープ ラーニングとモデルのトレーニングを行う方法です。学習が完了すると、これらのモデルはサービス プロバイダーやユーザー エッジなどのように、リソースに制約のある環境に配備され、そこでローカルに推論を実行できるようになります。一連のエッジ環境においてこれらのモデルを実行する場所の選択は、待ち時間の最小化、自律性の維持、ネットワーク帯域幅の使用量の削減、ユーザー プライバシーの強化、データ主権要件への対応など、いくつかの要因に依存します。

プライバシーやデータ主権に関する課題に対応するため、連合学習や、エッジで直接モデル学習を行う傾向が強まっているものの、これには潜在的な地域バイアスなどへの考慮が必要です。制約デバイス エッジにおけるもう1つの新たなトレンドは、マイクロコントローラベースのデバイスにML推論モデルを導入することです。例えば、スマートスピーカーは、MLモデルを使用して、「Hey, Google」や「Hey, Alexa」のようなウェイクワード（訳注:「OK Google」、「Alexa」）をローカルで認識し、その後の音声対話は、より上位のエッジ環境にあるサーバーで処理することができます。「TinyML」として知られるエッジAIフレームワークでは、デバイスの限られた処理能力で動作させるため、特別なツールセットが必要です。エッジAIのトピックについては、本レポートの次の章で詳しく説明します。

エッジAIやその他の現在の技術トレンドにより、ネットワークのあらゆる場所で、より多くのソフトウェア定義インテリジェンスが必要になるというネットワーク環境の変化を生み出しています。同時に、AIソリューションの急速な成長により、自動でのデータ生成が増加しています。これらにより多くの機会が生まれますが、偽データ（ディープフェイクなど）の拡散などのリスクも増加するため、セキュリティとデータの信頼性強化対策が必要です。

これからの5年～10年で、私たちはアンビエント コンピューティングの未来に向かってゆくでしょう。そこでは、コンピューティング機能が物理的な世界の至るところにシームレスに埋め込まれ、事実上、据え置き型コンピューターがモバイルと同じくらいダイナミックになります。このような分散コンピューティング リソースを十分に活用し、相互接続されたエコシステムを通じて新たなビジネス モデルやユーザー体験を実現するためには、多様なネットワークを介した安全で確実なデータの流れをサポートするシステムを設計することが極めて重要です。オープンソース コラボレーションが元来から持つ透明性は、基盤システムの信頼性構築に活用することができ、それらの信頼性を確立する上で重要な役割を果たします。データ トラスト ビジョンの達成には、社内外の利害関係者間の信頼と透明性を醸成するオープンで協調的なアプローチを今、始めることが重要です。

## トレンド #4：5Gの採用

5Gの採用と5Gネットワークの展開は、エッジ コンピューティングの成長の大きなきっかけとなっています。5Gは高帯域幅と低遅延接続を提供しており、これまで低速ネットワークによって制限されていた新たなユースケースの実現を可能にしています。5Gにより、エッジ コンピューティングは、自律走行、拡張現実、スマート シティ、スマート ファクトリー、スマート ヘルスケアなど、より複雑でリアルタイム性を必要とするアプリケーションをサポートできるようになります。

また、衛星通信と非地上ネットワーク（NTN：non-terrestrial networks）も、特に地上ネットワークによりカバーされない地域で、5Gとエッジ コンピューティングを補完する重要な技術として台頭してきています。SpaceX社のStarlinkやOneWebのような企業は、5Gと連携してより広いカバレッジと低遅延を提供する低軌道（LEO：low-earth orbit）衛星ネットワークを開発しています。これらの衛星と5Gの連結により、より弾力的で柔軟な通信フレームワークが構築され、遠隔地や電波の届きにくい場所でのエッジ コンピューティングの展開が可能になります。衛星そのものをエッジ デバイスとして使用し、ローカルで計算を実行し、地上局とのデータ往復を減らすことで、進化する5Gエコシステムにおける衛星の重要性が今後もさらに強化されるでしょう。

プライベート5Gネットワークは、さまざまな企業アプリケーション専用に安全かつ高性能な接続を提供することで、エッジ コンピューティングの導入を加速する上で重要な役割を果たしています。プライベート5Gネットワークは、パブリック5Gネットワークと比較して、データ セキュリティ、ネットワーク管理、アプリケーション パフォーマンスをよりコントロールしやすく、個々の組織の特定のニーズを満たすように設計されています。従来の通信会社と大手クラウド サービス プロバイダーの両方が、企業顧客にプライベート5Gネットワークを提供することに取り組んでいます。

通信事業者は5Gとエッジ コンピューティングを活用し、従来の接続性を超えた革新的なサービスを提供することで、新たな収益機会を創出しています。例えば、通信事業者は、エッジでの新サービスの提供、ネットワーク スライシング技術の活用、クラウド プロバイダーとの連携、プライベート5Gネットワークの展開などにより、5Gを収益化しています。こうした戦略は、従来の接続サービスを超えた価値を生み出すのに役立っています。

5Gとエッジ コンピューティングの高度な共生関係については、本レポートの次の章で詳しく説明します。

第2章

# エッジの サイバーセキュリティ

JIM DAVIS



## 第2章：エッジのサイバーセキュリティ

### はじめに

エッジコンピューティングは、プライバシーの強化のため、データのローカル化を求められることもあり、さまざまな業界で支持を集め続けています。同時に、中央集中型でないエッジコンピューティングは、サイバー攻撃の対象が地理的に分散した何百、何千ものエッジノードに拡大するという問題も浮き彫りにしています。

規模の問題は別として、エッジデバイス、特にノートパソコンやモバイルデバイスでは、生成AIアプリケーションのパワーアップのため、GPUやAIコプロセッサのようなより大きな計算能力を手に入れつつあります。ディープフェイクビデオから新たな悪意のあるコードまで、あらゆるものを簡単に作成できるようになったことで、より多くの人の手に渡り、悪意のある活動を防止するための新たな課題が生まれています。このような新しいアプリケーションが広く利用される中で、エッジコンピューティングがセキュリティの強化のためにできることはあるのでしょうか？

エッジコンピューティングの攻撃対象

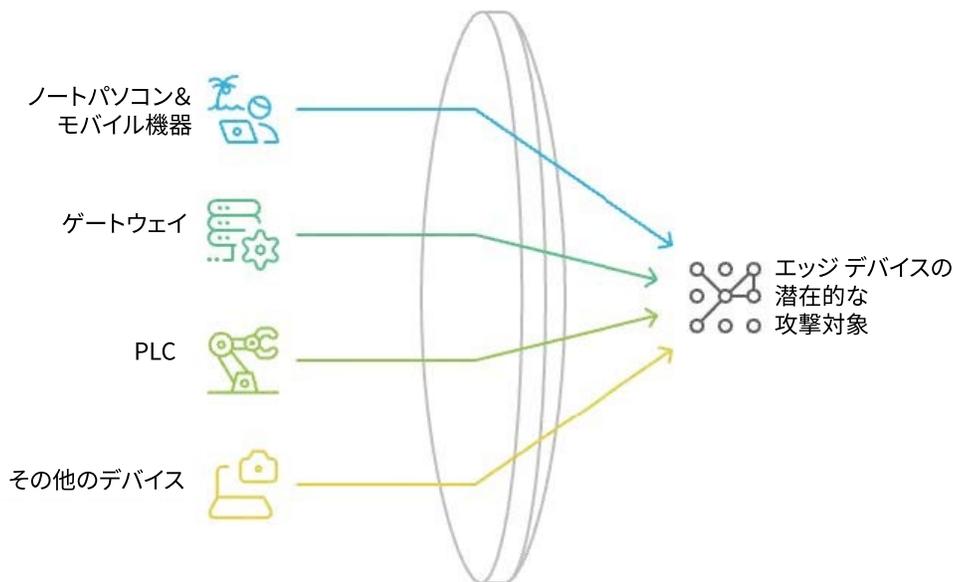


図2-1：エッジコンピューティングの攻撃対象

本章では、進化する脅威の状況などエッジセキュリティの概要を説明します。市場動向については、モバイルデバイスへの生成AI機能の導入やゼロトラストの採用拡大などを取り上げます。最後に、エッジコンピューティング環境のセキュリティに対する企業の取り組み方に影響を与える、欧州連合（EU）と米国における規制上の問題を取り上げます。

## エッジ コンピューティングの脅威の全体像

エッジ環境には、いくつかの固有のセキュリティ上の課題もありますが、従来のIT環境からずっと存在する課題もあります。これらの課題には、ネットワークセキュリティ、デバイスの監視、脆弱性のパッチ適用なども含まれます。その結果、エッジ コンピューティング環境は、特に製造業や公益事業などの重要なインフラにおいて、サイバー攻撃者にとって絶好の標的となっています。

パッチをめぐる課題の説明として、米国のサイバーと重要インフラのセキュリティおよび回復力の強化を任務とする連邦政府機関のひとつである、サイバーセキュリティ インフラセキュリティ庁（CISA）の情報を紹介します。CISAは2024年4月現在、産業制御システム（ICS）に関連する101件のセキュリティ勧告を公表しています。2023年下半期には、製造業において重要な621件の共通脆弱性識別子（CVEs）が報告されました<sup>2</sup>。すべての脆弱性がエッジ デバイスやネットワークだけに影響する問題ではなく、CVEsの内容にはエッジ デバイスやネットワークの動作に影響を与える集中制御システムにも影響する内容が含まれています。

実は、多くの攻撃の最初の侵入経路は人です。2023 Verizon Data Breach Incident Report (DBIR)によると、情報漏えいの74%は人が関与しています。開発者やシステム管理者の設定ミスや誤送信（間違った相手に何かを送る）などが人為的ミスのほとんどを占めています。

人の関与の先にある、エッジコンピューティングの一般的な攻撃方法や攻撃タイプはどんなものがあるのでしょうか？

### ネットワークおよびアプリケーション層への攻撃

IT/OTセキュリティ ベンダーのNozomiのデータ<sup>3</sup>によると、2023年下半期に発生した脅威の38%はネットワークの異常（ネットワーク スキャンを含む）と攻撃でした。他の情報源からのデータでもこの情報が裏付けられています。エッジ コンピューティング インフラの脅威として認識されているトップは、分散型サービス拒否（DDoS）攻撃で、電子メールの漏洩とデータ流出がこれに続いています<sup>4</sup>。

分散型サービス拒否（DDoS）攻撃は、複数のシステムを使用して、ターゲットにリクエストを殺到させ、帯域幅やリソースを占有することで圧倒し、本来の利用したいユーザーが利用できないようにするものです。リクエストは、ボットネットと呼ばれる侵害されたコンピュータ ネットワークを使用して行われます。ボットネットは、侵害されたウェブサーバーで構成され、家庭やビジネス環境のルーター、監視カメラやDVR、ウェアラブル（スマートウォッチなど）のような消費者向け製品などのIoTデバイスを使用することもあります。サービス拒否（DoS）攻撃も、単一のデバイスで攻撃する同様の手法です。

<sup>2</sup>“Critical Manufacturing Sector | Cybersecurity and Infrastructure Security Agency CISA.”  
[www.cisa.gov/topics/critical-infrastructure-security-and-resilience/critical-infrastructure-sectors/critical-manufacturing-sector](https://www.cisa.gov/topics/critical-infrastructure-security-and-resilience/critical-infrastructure-sectors/critical-manufacturing-sector).

<sup>3</sup>“Nozomi Networks Assesses the Threat Landscape.” Nozomi Networks,  
<https://www.nozominetworks.com/resources/ot-iot-security-report-executive-summary-february-2024>.

<sup>4</sup>“2023 AT&T Cybersecurity Insights Report: Edge Ecosystem.” AT&T,  
[cybersecurity.att.com/resource-center/insights-reports/cybersecurity-insights-report-edge-ecosystem](https://cybersecurity.att.com/resource-center/insights-reports/cybersecurity-insights-report-edge-ecosystem).

## 攻撃対象としてのKubernetesとコンテナ

コンテナはアプリケーションをデプロイするための一般的な手法であり、Kubernetesはコンテナのデプロイと管理に使用される、一般的なオープンソースソフトウェアの1つです。2023 Annual Cloud Native Computing Foundation (CNCF) Survey<sup>5</sup>によると、2023年には、潜在的または実際の消費者の66%がKubernetes (K8s) を実運用で使用しており、18%が評価しています。

関心が高まるにつれ、K8sのセキュリティに対する開発者の懸念も高まっています。Red Hatの「The State of Kubernetes Security Report」2024年版によると、コンテナやKubernetesのセキュリティ インシデントが原因で収益や顧客を失った組織は46%に上ります<sup>6</sup>。

この調査では、コンテナとKubernetesのリスクに関する懸念事項のトップは未公開の脆弱性であり、2023年にはKubernetesに関連する4つの脆弱性が見つかったと報告しています。この問題は、Windowsノード上のユーザーがポッドや永続ボリュームを作成できる場合に発生します。セキュリティ上の欠陥により、ユーザーは権限を管理者レベルに昇格することができます。この脆弱性は深刻と評価されていますが、Windowsノード用のインツリー ストレージ プラグインを使用している環境のみが影響を受けます。オープンソースのKubescape技術を開発したセキュリティ企業Armoによると、2023年に報告されたKubernetesの脆弱性の11%はKubernetesに直接関連するもので、残りはKubernetesと共に使用されるツールに関連するものでした<sup>7</sup>。

また、Red Hatの調査では、ベース イメージ、ライブラリ、依存関係などのコンポーネントの設定ミスも上位に挙げられています。例えば、Orca Securityの研究者は、Google Kubernetes Engine (GKE) の設定ミスの脆弱性の例を発見しました。研究者らは、何百もの組織の管理者が、組織内で認証されたユーザーだけがクラスタにアクセスできると想定して、クラスタに対し「すべてのユーザーにアクセスを許可する」設定をしていることを発見しました。実際には、組織外のユーザーも含め、Googleが認証したアカウントであれば誰でもリソースにアクセスできる状態となっていました<sup>8</sup>。

### デバイスの脆弱性

エンドポイント セキュリティは従来、PC、ノートパソコン、携帯電話などのデバイスと関連付けられてきました。エッジ コンピューティングにおいて、デバイス セキュリティは異なるのでしょうか？半自律走行するトレーラーが

<sup>5</sup> “CNCF Annual Survey 2023.” CNCF, [www.cncf.io/reports/cncf-annual-survey-2023/](https://www.cncf.io/reports/cncf-annual-survey-2023/).

<sup>6</sup> “The State of Kubernetes Security in 2024.” Red Hat, [www.redhat.com/en/blog/state-kubernetes-security-2024](https://www.redhat.com/en/blog/state-kubernetes-security-2024).

<sup>7</sup> “Kubernetes Vulnerabilities 2023: Main Takeaways.” Armo, [www.armosec.io/blog/kubernetes-vulnerabilities-2023/](https://www.armosec.io/blog/kubernetes-vulnerabilities-2023/)

<sup>8</sup> “Sys:All: How a Simple Loophole in Google Kubernetes Engine Puts Clusters at Risk of Compromise.” Orca Security, [orca.security/resources/blog/sys-all-google-kubernetes-engine-risk/](https://orca.security/resources/blog/sys-all-google-kubernetes-engine-risk/).

すでに米国の道路を走っており、規制が緩和される2024年にはその使用が拡大されることを考えてみてください<sup>9</sup>。この車両の例はエッジ コンピューティングの一例です。運転システムはカメラやその他のセンサーを使ってナビゲートしています。継続的なネットワーク接続を必要とせずに、デバイスのストレージとデータのセキュリティを確保するにはどうすればよいのでしょうか。

コンピュータ ビジョンやエッジ処理を使用するロボット システムについても考えてみましょう。金属をプレスしたり、部品を持ち上げたり動かしたりするための古い生産ライン システムが、レガシーな産業用制御システム (ICS) に接続されているかもしれません。

これらの例は、エッジ コンピューティングに固有の、セキュリティで考慮すべきシナリオです。ネットワークが停止した場合、レガシーICSはどうなるのか？サイバー攻撃でシステムが侵害されたらどうなるのか？古いシステムをネットワークに接続して近代化することには、メリットもある一方リスクもあります。

例えば、ICS技術の大手プロバイダーは、インターネット接続のための明確な設計がされていないシステムの接続をやめるよう、顧客に積極的な助言をしました。理由は、地政学的緊張の高まりと敵対的なサイバー活動のためです。これらのシステムには、過去に公表された多くの脆弱性があります。一方、セキュリティ検索エンジンShodanを使えば、アップデートも切断もされていない数千の脆弱性の影響を受けるシステムを見つけ出すことができます。

## 業界の取り組みとソリューション

エッジ コンピューティングの考え方の一つに、データの情報源にできるだけ近い場所で処理をするのが良いことであるという考えがあるため、様々なアプリケーションでAIやMLアルゴリズムの利用が急速に拡大していることは理にかなっています。このセクションでは、AIの使用に関する2つの基本的なシナリオと、それらのセキュリティへの影響について説明します。

### AIとエッジ セキュリティ

最初のシナリオは、アプリケーションやサービスにセキュリティを追加で搭載してAIをエッジで実行する（またはデバイスからのデータを使用する）事例です：

- デバイス上での生体認証では、AI や ML アルゴリズムを使用した顔認証で、デバイスやそこで動くアプリケーションへのアクセスを承認。
- 生体検出では、音声とビデオ認識に AI を使用し、（クローン音声やディープ フェイク動画ではない）権限のある人がデバイスにアクセスしていることを確認。

<sup>9</sup> “Tractor-Trailers with No One Aboard? The Future Is near for Self-Driving Trucks on US Roads.” AP News, <https://apnews.com/article/trucks-selfdriving-highways-automation-driver-083409631158f54d806d75309c4764e2>.

- ID アクセス管理システムでは、異常なアクセス パターンや時間など、デバイス上の不審な行動パターンを監視。19

**新しい点：** BrainChipやHiMaxなどの新世代の組み込みチップは、ウェアラブル機器やその他のIoT機器などのバッテリー駆動機器において、頭や体のポーズ、視線追跡、手のひら静脈画像などを使った生体認証検出のための、更に洗練されたAIやMLアルゴリズムを実行することができます。

2つ目のシナリオは、エッジ上でデータやアプリケーションを保護するために使用されるAI対応セキュリティ サービスです：

- エッジ ゲートウェイ デバイスやネットワーク スイッチ、ルーターなどのソフトウェアによって実行される、ネットワークやデータ パターン上での異常な動作分析。
- 仮想化されたセキュリティ機能。例えば、ファイアウォール、セキュア ウェブ ゲートウェイ、侵入検知/防止、ルーター、ゲートウェイ、エッジデータセンターにおけるアクセス/認証など。

**新しい点：** AIファイアウォールは、Cloudflareなどの企業が導入している新しいカテゴリーのサービスです。AIファイアウォールは、概念的にはネットワーク レベルの脅威に特化したファイアウォールに似ていますが、AIモデルに送信されるプロンプトやリクエストを分析する機能が追加されています。これらのサービスは、悪意のあるプロンプト、モデル操作、データ抽出、その他のAI特有の悪用など、潜在的な悪用を特定することができます。

昨年その他の動きとして、ネットワーク設定やエッジ デバイスのプロビジョニングなどのプロセスに対し、生成AIモデルを使用して製品やサービスに「コパイロット」機能を追加するクラウドやセキュリティのプロバイダーが増えています。これは、管理作業や基本的なコーディング、プロビジョニング作業にチャットボットを使用することで、手作業による設定に起因するエラーを減らすことができるというものです。その他のチャットボット機能には、データ分析クエリなどがあり、ユーザーはデバイスやポート構成などのデータをより簡単に照会して表示することができます。

### AI：近々、あなたの近くの携帯電話に登場します

また別の事例として、世界最大の携帯電話メーカーであるAppleとSamsungの2社が、AIをエッジに移行しています。またこれは、消費者にデータの安全性を担保する試みでもあります。両社は、一部の機能はクラウドで処理されるものの、可能な限りデバイス上で生成AIモデルを実行するように構築しています。セキュリティのそれ以外の考え方として、セキュア ブート、データ暗号化のためのセキュア暗号や他の処理機能から隔離された「セキュア エンクレーブ」を用いたアプリケーションの実行など、プライバシー ファーストのシステムを備えたデバイスからしかユーザー データにアクセスできないようにする取り組みがあります。

2024年6月に発表されたApple Intelligenceは、iPhoneやiPadなどのApple製のデバイス（デスクトップのMacも含む）に生成AIモデルを導入するシステムです。他の生成AIシステムと同様、Apple製デバイスは、音声の書き起こしや要約、テキスト プロンプトに基づく画像の生成などを行うことができるようになりました。オンデバイスAIでは、Appleが開発した小さな言語モデルを使用しています。同社はクラウド コンピューティングのプロセッサ パワーが必要なケース向けにLLMも開発しています。

2023年11月にSamsungがGalaxy AIを発表した際、同社はオンデバイスAIとクラウドベースAIの両方を使用して、コミュニケーションや生産性向上アプリケーションのモバイル体験を改善すると述べました。例えば、同社が今後発表するAIライブ翻訳通話機能は、内蔵の通話機能の一部として、通話中にリアルタイムの音声翻訳やテキスト翻訳を提供することができます。この機能は、端末上でGoogleのGemini Nanoを使用します。

画像生成などSamsungのGalaxy AI機能の一部は、クラウド上のGoogle Gemini ProとImagen2を使用します。また、Samsung ResearchはSamsung Gaussと呼ばれる独自の生成AIモデルを開発しており、これはデバイス上のローカルで動作するように設計されており、2024年後半からデバイスへの出荷が開始される予定です。

### データとモデルの保護

Appleは、プライバシーとセキュリティを自社製品の主要機能として展開してきましたが、AIも同様に展開しつつあります。オンデバイスAIでは、セキュア エンクレーブ（信頼された実行環境とも呼ばれる）の実装が主要機能の1つと位置づけられています。Appleのセキュア エンクレーブは、独自のセキュア エンクレーブ プロセッサとメモリ保護エンジンを搭載した専用サブシステムです。使用中のデータはこのサブシステムで暗号化/復号化され、認証されるため、アプリケーションは他の機能とは別の環境で実行できます。

Appleでは、LLMに使われるような高い計算能力を必要とする機能において、セキュリティとプライバシーを重要設計要素としてAIモデルを実行できるように開発された新しいPrivate Cloud Compute（PCC）サービスを使用します。AppleのオンデバイスAIと同様に、PCCはAppleのカスタム シリコンとハード化されたオペレーティング システムを使用し、ユーザーの個人データがユーザー以外の誰にもアクセスされないことを保証しています。

Appleによると、PCCはユーザー データに対してステートレスな計算を提供するように設計されています。つまり、データはリクエストを満たすためだけに使用され、セッション終了後は保持されません。PCCは、セキュリティのために外部コンポーネントを必要としないように設計されており（これは、モニタリングやロギングがPCCに直接リンクされていないという意味でもあります）、アドミニストレータのようなランタイム アクセスの機能はありません<sup>10</sup>。

<sup>10</sup> “Secure Enclave.” Apple Support, [support.apple.com/guide/security/secure-enclave-sec59b0b31ff/web](https://support.apple.com/guide/security/secure-enclave-sec59b0b31ff/web).

また、Appleは音声アシスタントのSiriを通じた問い合わせのサポートなどに対し、OpenAIのLLMモデルとChatGPTインターフェイスなどの生成AI機能の一部を活用する予定です。ChatGPTがAppleのサービスや製品と統合されても、IPアドレスは隠蔽され、OpenAIはリクエストを保存しません。OpenAIのモデルとLLM処理のセキュリティはOpenAI自身によって対応されています<sup>11</sup>。

### 徹底的な防御とゼロトラストでセキュリティを構築する

脆弱性が後を絶たず、さまざまなソリューションが提供される中、開発者や企業はエッジ コンピューティング プロジェクトのセキュリティにどのように取り組んでいるのでしょうか。

セキュリティ フレームワークや参照アーキテクチャという形で、リスクを軽減するためのアイデアや計画を整理する方法が展開されています。現在、業界や政府のセキュリティの議論では、「多層防衛 (DiD)」と「ゼロトラスト」という2つの戦略的アプローチが主流となっています。

最初に説明するのは2つのうち、より古いアプローチであるDiD (Defense-in-Depth) です。DiDは、軍事戦略に根ざした包括的なサイバーセキュリティ戦略であり、情報技術 (IT) システムを保護するために多層のセキュリティ管理を採用しています。これにより、1つのセキュリティ対策が失敗しても、他のセキュリティ対策により脅威を緩和することができます。アプリケーションを保護するために使用されるセキュリティ ツールは、スイス チーズのようなものだと考えてください。スイス チーズを何層にも重ねることで、最終的にはしっかりとしたチーズになります。同様に、複数のネットワークツール、モニタリング ツール、脅威検知ツールを併用することで、より強固な防御を実現することができます。

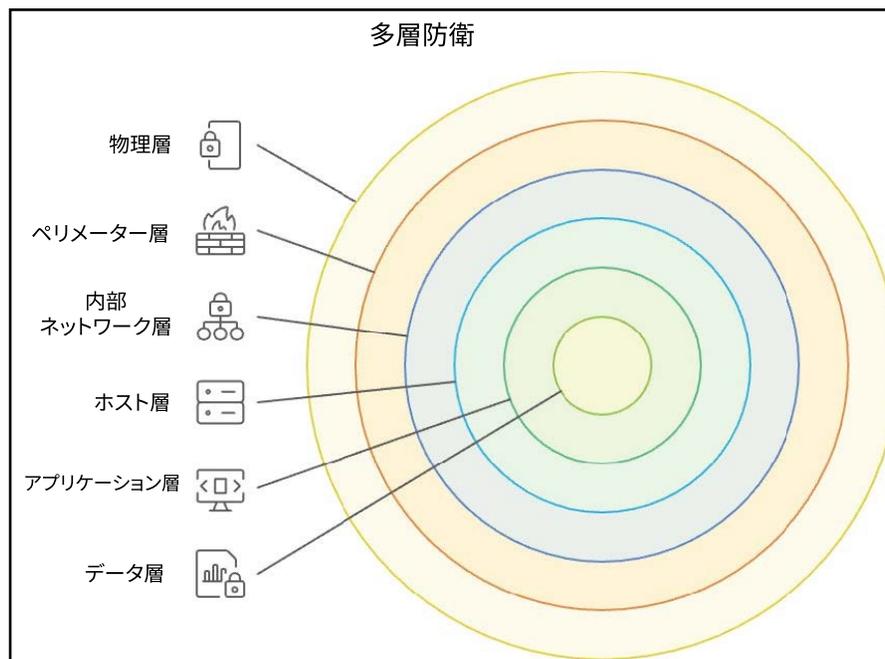


図2-2：多層防衛 (DiD) レイヤー

<sup>11</sup> "Reimagining Secure Infrastructure for Advanced AI." OpenAI, [openai.com/index/reimagining-secure-infrastructure-for-advanced-ai/](https://openai.com/index/reimagining-secure-infrastructure-for-advanced-ai/).

DiDのアプローチは、ある程度まではうまくいきます。多くの企業が非常に多くのセキュリティ ツールを導入しているため、ツールの実装と管理には多大なオーバーヘッドがかかり、セキュリティ運用担当者は製品の機能をフルに活用できていないことも多くあります。企業のエッジ ソリューションへのニーズに従って、エッジ コンピューティングでもこの課題が大きくなっています。つまり、従来からの企業のデータセンターやファイアウォールの外にあたる多くの場所にデバイスが分散しています。

デバイス数の増加により攻撃対象が増えることに加え、エッジ デバイスは物理的な改ざんや盗難の影響を受けやすい環境に配備されることが多くあります。前述したように、リモート デバイスへのアップデートを管理しなければならないという課題があるものの、断続的にしかネットワーク接続しない機器もあるため、管理が複雑化します。

現時点での業界トレンドの一つは、セキュリティにおける「プラットフォーム」アプローチへの移行です。セキュリティ プラットフォームでは、複数のセキュリティ機能をよりまとまりのある使いやすいシステムに統合します。また、ベンダーの数を減らすことで、コスト削減にもつながる可能性があります。ノートパソコンや携帯電話以外のエッジ デバイスのセキュリティは、最終的には従来の企業向けセキュリティ ベンダーが提供するプラットフォームに統合される可能性が高いと考えられます。一方、例えば産業用IoTシステムのセキュリティに代表される、産業用制御機器、医療機器、輸送システムなどの市場に特化した機器は、機器ベンダーやセキュリティ ベンダーによる独自のエコシステムによって提供され続けるでしょう。

では、エッジ コンピューティングはどこに向かうのでしょうか。その答えとなるセキュリティ強化策は、業界や政府で取り組まれる（ときには義務付けられる）、ゼロトラスト アプローチです。

### ゼロトラストとエッジ システム

ゼロトラストは、IT環境のセキュリティ態勢を「決して信用せず、常に検証する」という原則に基づく概念的枠組みです。

2023 State of the Edge報告書でも述べられているように、ゼロトラストに基づき、ITシステムは以下のような原則に従うべきであるとしています。

- 強力な ID 認証を使用することで、データやアプリケーションに安全にアクセスできるようにします。
- 使用する必要のないリソースにユーザーをアクセスできないようにするなど、アクセス許可を厳重に管理します。
- デバイスが危険にさらされていないこと、ソフトウェアがアップデートされていることを確認するため、環境を監視・管理します。

- ユーザーとデバイスがポリシーに準拠していることを確認するため、ネットワークトラフィックを継続的にログに記録し、検査します。
- データの流れをマッピングし、ネットワークをセグメント化することで、より高いアクセス権限を持つシステムにハッカーが移動できないようにします。

このアプローチは、不完全ながらも受け入れられています。Gartnerが2023年第4四半期に実施した調査<sup>12</sup>によると、世界中の組織の63%がゼロトラスト戦略を全面的または部分的に導入しています。しかし、回答者289人のうち58%は、適切なツールやテクノロジーによる自社環境のカバー率は半分以下であると回答しています。Gartnerのアナリストは、多くのリスク要素はゼロトラストアーキテクチャの範囲外であると指摘しており、適用が不完全な状態であると言えます。

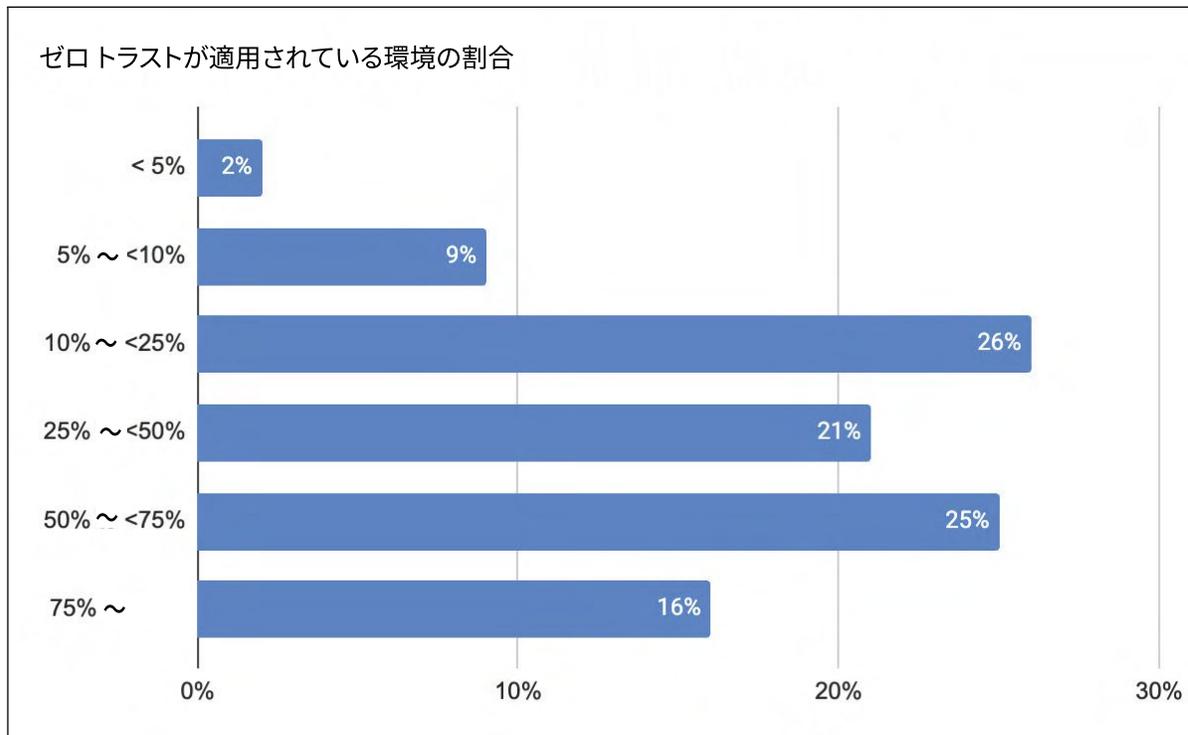


図2-3：ゼロトラストが適用されている環境の割合  
出典：2023 Gartner State of Zero Trust Strategy Adoption Survey

航空、エネルギー、公益事業、運輸、石油・ガス、製造業などの産業における運用技術（OT）環境にゼロトラストを適用する場合、産業用制御システムや機器のセキュリティの導入の検討を同様の観点で実施することができます。

<sup>12</sup> “Organizations Worldwide Have Implemented a Zero-Trust Strategy.” Gartner, [www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2024-04-22-gartner-survey-reveals-63-percent-of-organizations-world-wide-have-implemented-a-zero-trust-strategy](https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2024-04-22-gartner-survey-reveals-63-percent-of-organizations-world-wide-have-implemented-a-zero-trust-strategy).

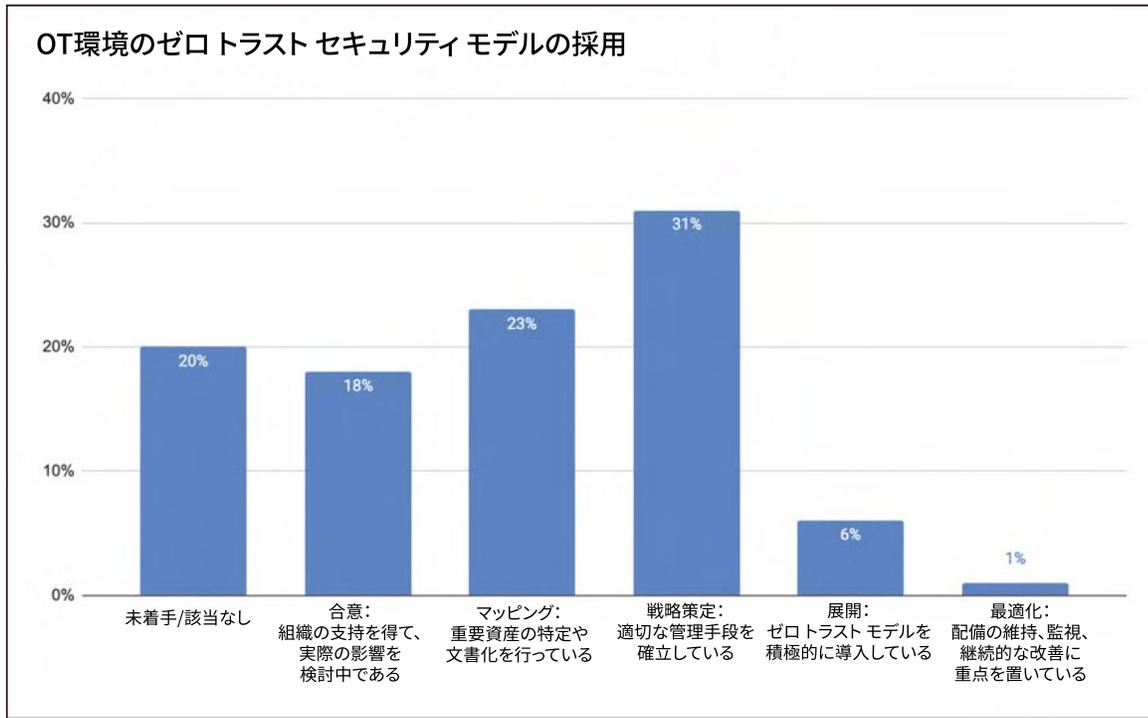


図2-4：OT環境へのゼロトラストセキュリティモデルの採用

出典：Takepoint Research, State of Zero Trust in the Industrial Enterprise

Xage SecurityのためにTakepoint Researchが実施した調査によると、回答者の72%が、OT環境のゼロトラストセキュリティモデルを開始したと回答しています。言い換えると、多くのプロジェクトが初期段階（経営陣の「合意」や資産の「マッピング」）か、「戦略策定」の段階であることを意味しています<sup>13</sup>。このモデルの適用を「展開」または「最適化」まで進めているという回答は、わずか7%しかありませんでした。

### ゼロトラストがSASEになる場所

ゼロトラストがセキュリティへのアプローチを定義しているのに対し、市場調査会社Gartnerはセキュリティモデルとしてセキュアアクセスサービスエッジ（SASE）とセキュリティサービスエッジ（SSE）を定義しました。この用語は、最新のネットワークを構築するためのアプローチを規定するもので、多くのベンダーがこれに準拠しようとしています。

<sup>13</sup> “State of Zero Trust in the Industrial Enterprise.” Xage Security, <https://info.xage.com/state-of-zero-trust-in-the-industrial-enterprise-report>

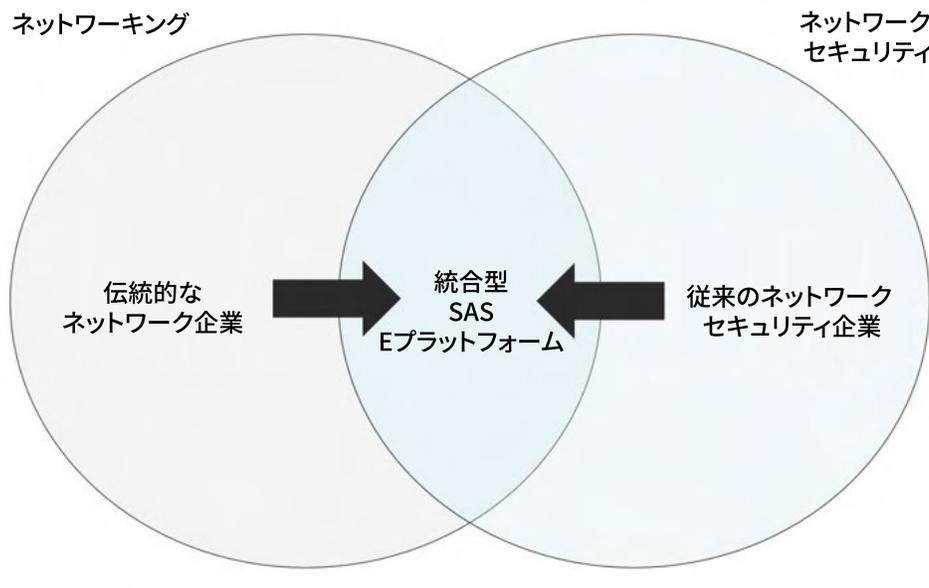


図2-5：従来のネットワークとネットワークセキュリティのベンダーが統合型SASE領域に進出

SASEは、ネットワークセキュリティとワイドエリア ネットワーキング（WAN）機能を単一のクラウドベースのサービスに統合した包括的なモデルです。セキュアで最適化されたネットワーク アクセスを提供するように設計されています。SSEはSASEの一形態で、クラウド アクセスセキュリティ ブローカー、セキュア ウェブ ゲートウェイ、ZTNAをクラウドベースで提供することに重点を置いています。

調査会社Dell'Oro Groupは、2023年のSASE市場は80億ドル以上に成長し、SSE領域は50億ドル近くに達すると予測しています。SASE市場は2028年までに160億ドルを超えると予測されています。

図2-6に示されるように、SASEはネットワーク領域（SD-WAN、CDN、ZTNAなど）とセキュリティ（WAF、CASB、ブラウザ分離）にまたがる多くの個別の機能を包含しています。理論的には、顧客に対し統合型SASEを提供することでネットワークとセキュリティの運用を簡素化することができますが、現実にはそれぞれのカテゴリーに秀でた単一のベンダーは存在せず、おそらく今後も存在しないでしょう。



図2-6：SASEアーキテクチャの主要コンポーネント

出展：Gartner

クラウドベースのSSE市場の成長は、顧客が独自のSASE環境を構築し、運用することの難しさの裏返しであると言えます。この傾向は、エッジ コンピューティング機能をより広範囲に展開しようとするにつれて強まる可能性があります。

SASE製品やサービスの評価を簡素化する取り組みが行われています。ネットワーク、クラウド、テクノロジー プロバイダーで構成される世界的な業界団体であるMetro Ethernet Forumは、顧客がSASEテクノロジーの有効性とアプリケーション パフォーマンスを検証するために利用できる規格に基づく認証プログラムを導入しました。SD-WAN、ゼロトラスト、SSEコンポーネントをカバーする認証は2024年10月に導入され、一般提供は2024年後半に予定されています。

### オープンソース プロジェクトとエッジセキュリティ

SASEとSSEフレームワークを見ることで、エッジ コンピューティング ソリューションのそれぞれのレイヤーにどのようなセキュリティ コンポーネントが適用されるかを理解することができます。ゼロトラスト モデルによるエッジセキュリティの強化において、オープンソース ソフトウェアはどのような役割を果たすことができるのでしょうか？

コンピューティング ソリューションの全レイヤーでセキュリティが必要とされているため、エッジセキュリティのイノベーションを推進するためのオープンソース コラボレーションへの注目が高まっています。最近のLinux FoundationやLF Edgeプロジェクトに注目が集まるとともに、それ以外にもオープンソース ソフトウェアに関する注目すべき動きがあります。Linux Foundationは、既存のイニシアチブにおけるアップデートの提供に加えて、2024年には新しいプロジェクトを追加しました：

### Margo (Linux Foundation)

[Margo](#) は、産業自動化エコシステムのためのエッジ相互運用性を実現するLinux Foundationの新しいイニシアチブです。ABB、Capgemini、Microsoft、Rockwell Automation、Schneider Electric、Siemensなどの企業がこの取り組みに参加しており、エッジ アプリケーション、エッジ デバイス、エッジ オーケストレーション ソフトウェア間の相互運用のメカニズムを定義しています。仕様で要求されているセキュリティ関連の特性には、次のようなものがあります。

- トラステッド プラットフォーム モジュール (TPM) のサポート
- セキュア ブートのサポート
- 認証
- ゼロトラスト ネットワーク アクセス (ZTNA)

### OpenBao (Linux Foundation / LF Edge)

2023年12月に発表されたLF Edgeの[OpenBao プロジェクト](#)は、シークレット、証明書、キーなどの機密データを管理、保存、配布するために設計されたソフトウェアです。OpenBaoはHashiCorpのVaultのオープンソース フォークであり、OSI公認のオープンソース ライセンスであるMozilla Public License v 2.0(MPLv2)の下で動作します。

### FIDO/FDO (Linux Foundation / LF Edge)

当初はセキュア デバイス オンボード (SDO) として知られていたこのプロジェクトは、2023年2月にFIDOデバイス オンボードにリブランドされました。LF Edge FDO (fast device onboard) プロジェクトは、FIDO (Fast Identity Online Alliance) 仕様に基づくソフトウェアを開発しています。FIDOは、独立した組織に属さない業界団体です。FDOは、デフォルトのパスワードでデバイスを出荷するような不十分なセキュリティ プラクティスを排除するゼロタッチ モデルにより、家庭および産業用IT環境へのデバイスの受け入れを簡素化し、安全にすることを目的としています。

### Project EVE's Sandbox (Linux Foundation / LF Edge)

EVE-OS Sandboxは、LF Edgeが2023年9月に導入したセルフ サービス プラットフォームです。このサービスにより、開発者はEVE OSを使用する様々なプロジェクトを試すことができます。このサービスは、ベア インストール、VM、コンテナ デプロイなど、複数のアーキテクチャと形式をサポートしています。

### StarlingX (OpenInfra Foundation)

StarlingXは、エッジコンピューティングのワークロードに着目したOpen Infrastructure Foundationのオープンソースプロジェクトです。主に5GとオープンRAN（O-RAN）ネットワークの展開をサポートするために使用されているStarlingXプロジェクトは、2024年にバージョン9をリリースしました。セキュリティの観点から、今回のアップデートには以下の機能が含まれています。

- FIPS 140-3 準拠：このプラットフォームは、連邦情報処理規格（FIPS）140-3 に対応し、より高いセキュリティ標準を保証します。
- セキュリティ プロファイル：セキュリティ設定の構成を簡素化するためのセキュリティ プロファイルを導入しています。
- 部分的なディスク暗号化のサポート：この機能は、Linux Unified Key Setup(LUKS)を使用して、ユーザーが機密ファイルを保存できる新しい暗号化ファイルシステムを自動的に作成します。

StarlingXバージョン9のリリースノートには、プラットフォーム ネットワーク（プロジェクトドキュメントによると、管理、運営、ストレージなど）のデフォルトファイアウォールルールが含まれることも示されています。

### AndroidOS

IDCなどの統計によると、2023年にはAndroid OSを搭載したデバイスがおよそ8億2300万台販売されています。エッジデバイスがこれほどあることを考えると、今年後半にGoogleがAndroid 15で提供するスマートフォンやタブレットへの新しいセキュリティ機能にも注目する必要があるでしょう。

アップデートされたオペレーティングシステムには、追加された行動シグナルを分析するオンデバイスAIが搭載され、機密性の高い権限へのアクセスや、他のアプリやサービスとの相互作用を分析します。Google Play Protectは、アプリをGoogleに送信して追加審査を受けさせ、悪質な動作が確認された場合はユーザーに警告を発したり、アプリを無効にしたりすることができます。それ以外にも、重要なGoogleアカウントや端末設定へのアクセスや変更には生体認証が必要になるなど、端末が盗難に遭った場合のセキュリティ向上を目的とした機能が盛り込まれています。

### オープンソースのアプリ開発プロセスとツール

アプリケーションレベルでのエッジセキュリティが必要なのは、ランタイムではありません。ベンダーのSaaSアプリケーションから重要なカスタムエンタープライズアプリケーションの過去の更新に至るまで、あらゆるものに組み込まれるオープンソースライブラリなどの外部ソースによるコードも含めた、アプリケーション開発のプロセス全体に対して考慮が必要です。

アプリ ライフサイクルにおける開発段階でセキュアな開発原則を適用する一例として、ベルギーを拠点とし、エッジソフトウェアやIoTソフトウェアを含む幅広いオープンソース プロジェクトをホストする非営利団体である Eclipse Foundationが行っている取り組みを紹介します。Eclipseでは、ツールやコード管理から開発者自身に至るまで、アプリケーション開発プロセスのさまざまな要素でセキュリティの改善が行われています。

セキュリティ対策には基本的なものも含まれていますが、これらも重要です。例えば、Eclipse Foundationは2023年に、プロジェクトに貢献度が高いアクティブな開発者に二要素認証の使用を義務付けました。2024年にはすべての開発者に義務付ける予定です。開発インフラはアップグレードされ、マイクロソフトやMacOSプラットフォーム向けのコード サイニング サービスがサポートされたほか、GitHub上でリポジトリ構成とポリシー施行を管理するツールの使用も開始されています。コード管理に対する一貫した取り組みにより、サプライチェーンの脆弱性が減少し、組織内のセキュリティ チームがホストしている170件のプロジェクト監視が改善されました。

## 規制の状況

このようなサイバーセキュリティの課題を踏まえ、米国と欧州ではコンピューティング環境の安全性と耐障害性を確保するため、より厳格な対策が実施されています。規制が必ずしもエッジ コンピューティングを明確に対象としていない場合であっても、これらの規制を理解することは、エッジ コンピューティング システムとアプリケーションを展開するベンダーや顧客にとって極めて重要です。

## EUの動向

欧州連合（EU）加盟国は、プライバシーやデータ保護などの問題に関して早くから取り組んでおり、2018年に施行された一般データ保護規則（GDPR）法はよく知られています。2024年、EUは2つの重要な新規制を制定しました。

- サイバーレジリエンス法（CRA）：CRAは、ハードウェアやソフトウェアを含め、EU市場におけるデジタル要素（PDE）を持つ製品の製造業者に適用されます。サイバーセキュリティの必須要件、適合性評価、脆弱性報告を義務付けています。ソフトウェアとクラウド サービスはCRAの対象となります。オープンソース ソフトウェアも[規制対象](#)であるものの、その最終的な影響は不明です<sup>14</sup>。

エッジ デバイスやシステムのベンダーは、2025年から新たな報告義務を負うことになります。その中には、「重大」な脆弱性は発見から24時間以内に報告しなければならないという規定も含まれています。新基準を満たさないデバイスは再設計と認証が必要となり、施行は2027年に開始される予定です。

<sup>14</sup> “EU Reaches Political Agreement on Cyber Resilience Act for Digital and Connected Products.” Data Matters Privacy Blog, [datamatters.sidley.com/2024/01/22/eu-reaches-political-agreement-on-cyber-resilience-act-for-digital-and-connected-products/](https://datamatters.sidley.com/2024/01/22/eu-reaches-political-agreement-on-cyber-resilience-act-for-digital-and-connected-products/).

- EUデータ法：データ法はデータの共有とポータビリティに焦点を当てています。ネットワーク接続を行う製品だけでなく、データを処理するサービス、要するにクラウドやSaaSサービスにも影響を与えます。機器メーカーは、ユーザーが作成したデータにユーザーや第三者がアクセスできるようにしなければなりません。クラウド サービスは、顧客がデータを他のサービス プロバイダーに移行しやすくする必要があります。

この法律がセキュリティに与える影響は間接的なものですが、メーカーやサービス プロバイダーは、データ管理を考慮に入れる必要があります<sup>15</sup>。証明書管理、DNS、暗号化に関する運用が、安全であることに加え、新たに必要となる報告や展開を効率的に満たすように設計されていることの確認が必要です。

医療機器、コネクティッド カー、その他いくつかの製品カテゴリーでは、EU規制のCRAや2024年のデータ法よりも優先される個別要件がすでに定められていることには留意が必要です。

### 米国の動向

米国では、証券取引委員会（SEC）が上場企業向けの新しいサイバーセキュリティ開示規則を採択し、2023年12月に発効しました。企業は現在、国家安全保障や公共の安全に関する特定のケースを除き、サイバーセキュリティ インシデントに対して、重要性（言い換えれば、企業の財務状況や事業運営への潜在的な影響）を判断してから4営業日以内に開示する必要があります。

エッジ コンピューティングとは直接関係ありませんが、例えばIoTデバイスにおいてセキュリティの考慮が重要なことは明確です。強力な規制が実施されていることから、セキュリティはもはやオプションではありません。EUが企業の総収入の最大2.5%までの金銭的罰則を規定しているのに対し、SECは、金銭的罰則とともに、幹部の指導的地位の禁止や詐欺罪の刑事告発など、さまざまな執行メカニズムを定めています。

---

<sup>15</sup> “EU Data Act: New Rules on Data Sharing and Portability of Cloud Services Now in Force.” Mayerbrown.com, [www.mayerbrown.com/en/insights/publications/2024/03/eu-data-act-new-rules-on-data-sharing-and-portability-of-cloud-services-now-in-force](https://www.mayerbrown.com/en/insights/publications/2024/03/eu-data-act-new-rules-on-data-sharing-and-portability-of-cloud-services-now-in-force).

## 結論

様々な業界でのエッジテクノロジーの採用は、残念ながら、産業用OTシステムを含むエッジシステムを標的としたサイバー脅威の高度化とともに発展しています。このようなセキュリティ課題には、企業のITチームが昔から直面しているネットワーク、デバイス、アプリケーションの管理の複雑さと同じような様々な問題が含まれます。更に現在では、今までのようなケースであってもより手がかりが分散しているため、一般的なデータセンターよりも物理的なセキュリティは悪化している場合もあります。

### 重要ポイント：

- 1) エッジコンピューティングの脅威は多様化・拡大しており、ネットワーク層やアプリケーション層への攻撃、コンテナの脆弱性、デバイスのセキュリティ懸念の分野が特に注目されています。
- 2) オープンソースイニシアチブは、エッジセキュリティにおけるイノベーションと標準化を推進する上で重要な役割を果たしており、Margo、OpenBao、FIDO/FDOなどのプロジェクトが、企業の重要なセキュリティ上の課題に対処する役割を担っています。
- 3) 業界では、より包括的なセキュリティアプローチへと徐々にシフトしており、エッジ環境を保護するフレームワークとして、ゼロトラストやSASE/SSEモデルが支持を集めています。
- 4) AIは、セキュリティツールであると同時に潜在的な脆弱性でもあり、デバイス上のAI機能は、データプライバシーとセキュリティに関する新たな問題を提起しています。
- 5) 特にEUと米国では規制の枠組みが厳しくなっており、企業はエッジの展開においてサイバーセキュリティとデータ保護を優先することが求められています。

エッジコンピューティングが成熟するにつれて、エッジアーキテクチャに対するセキュリティ対策の統合が進むと予想されます。

- AIとMLによって強化された、自動セキュリティ管理と脅威検出。
- データ保護とプライバシー対策の強化。規制要件に従ったものを含む。
- デバイスの更新など基本的なセキュリティ運用を容易にするため、エッジデバイスやプラットフォーム間の相互運用と標準化の必要性。
- LLMの保護に特化したAIファイアウォールなど、AI向けセキュリティソリューションへの関心の高まり。

組織は、エッジテクノロジーの利点を活用しつつ、進化し続ける脅威から身を守るために、イノベーションとリスク軽減のバランスを取る必要があります。

第3章

# 無線通信と エッジ コンピューティング

SALIH ERGUT, PHD.

## 第3章：無線通信とエッジ コンピューティング

### はじめに

エッジ コンピューティングは、通信業界の進歩する技術と補完し合う関係です。本章では、エッジ コンピューティングと、5G、6G、衛星通信などの無線通信技術との相乗効果について探ります。このような技術の相乗効果により、あらゆるものがこれまで以上に相互接続される世界になることで、データの処理、伝送、利用方法といったデータの扱い方が根本的に変わりつつあります。エッジ コンピューティングの台頭により、エッジ コンピューティングが無線ネットワークにどのような影響を与えるか、またこれらのネットワークがエッジ コンピューティングの発展にどのような影響を与えるかを理解することが重要です。

### エッジ コンピューティングと通信ネットワークの共生

エッジ コンピューティングと通信ネットワークの関係は非常に共生的です。代表的なエッジ コンピューティングのユースケースを調べてみると、その多くがベースとなるネットワーク技術に無線通信が必要であることがわかります。エッジ コンピューティングは、より高速で応答性の高い通信ネットワークの方が多くの恩恵を受けることができます。言い換えると、エッジ コンピューティングは、超低遅延でより高速かつ効率的なデータ処理を可能にすることで、これらのネットワークの能力を高めることができます。

この共生関係は、5G以降のネットワークで特に顕著に見られます。エッジ コンピューティングを統合したアーキテクチャによって、多くのユースケースの高速・低遅延性に対応することができます。エッジ コンピューティングは、AR（拡張現実）アプリケーションから産業オートメーションまで、リアルタイム処理と超低遅延を必要とする斬新なサービスを可能にします。

### 課題と機会

エッジ コンピューティングと通信ネットワークが多くの産業を変革する可能性を秘めているとはいえ、課題がないわけではありません。各ノードがデータ侵害の弱点になる可能性があるため、エッジ コンピューティングにおける高度な分散データ処理の安全確保は極めて重要です。もう1つの重要課題は、相互運用性を確保するための、エッジ コンピューティングにおける異なる技術間でのセットアップに関わるプロトコルとインターフェースの標準化です。

電気通信事業者やサービス プロバイダーは、ネットワーク内のエッジ コンピューティング システムを設定・管理する際に、新しいスキルの訓練や新しいツールの採用など総合的な対応を検討する必要があります。

このように課題はあるものの、こうした課題を克服することで多くのエキサイティングなチャンスが訪れるでしょう。ますます世界中の接続が進む中で、エッジ コンピューティングと高度通信ネットワークの組み合わせにより、都市の運営から、ヘルスケアや産業プロセスへの新たなアプローチの導入に至るまで、多くの分野に革命がもたらされることでしょう。

## 将来に向けて

本章の残りの部分では、モバイル ネットワークがどのように発展してきたかを振り返り、小規模な始まりから現在の5G技術まで、そして6Gに向けてどのように進化していくのか、そしてエッジ コンピューティングのサポートを受けてどのように業界を変革していくのかを説明します。また、各世代のモバイル ネットワークがどのように進化し、エッジ コンピューティングの可能性を高めてきたかを示します。

次に、NehpioやCAMARAのような重要なオープンソース プロジェクトについて説明します。これらのプロジェクトは、特にエッジ コンピューティングを扱う中で通信会社の業務管理や改善に活用されています。

最後に、6G革命と非地上系ネットワーク（NTN）が無線技術の未来をどのように形作ることになるかを探ります。NTNは、人工衛星や非陸上システムを利用することで、従来のネットワークでは不可能だったエリアまで通信範囲を拡大することが期待されています。

## 1Gから6Gへの進化：モバイル通信のマイルストーン

このセクションでは、私たちがどのようにして今に至ったかを理解するために、モバイル通信が世代を経てどのように進化してきたかを見ていきます。私がワイヤレス通信部門で働き始めた頃、通信の世界は2Gから3Gに移行したところでした。私にとっても、関わった全ての人にとっても、とても素晴らしい経験でした。モバイル ネットワークが長年にわたって進化するのを見ることができ、信じられない思いです。各世代の変化点では大きな変化をもたらし、私たちの電話の使い方や接続方法を一変させました。これらの進歩が私たちの世界をどのように形作ってきたかを振り返ってみましょう。

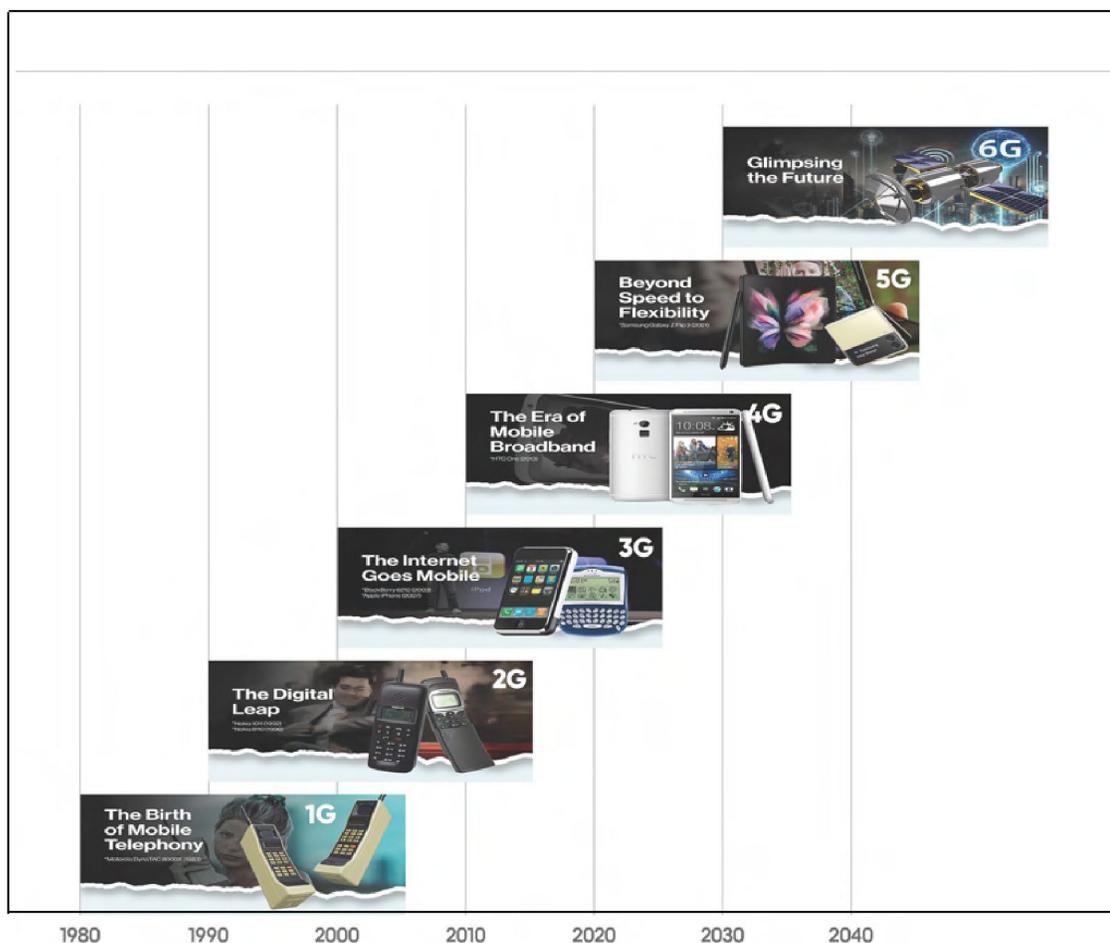


図3-1：1Gから6Gまでのモバイル通信のタイムライン概略

### 1G：携帯電話とアナログ音声の誕生

1980年代、第一世代ネットワーク（1G）はアナログ ワイヤレス通話を導入し、モバイル通信の幕開けとなりました。これらのネットワークでは音声通話のみがサポートされ、テキスト メッセージやインターネットはサポートされていませんでした。

- 1G の重要なイノベーションは、カバー エリアをセルに分割し（これが「セルラー」という名前の由来）、無線リソースの再利用を可能にしたことでした。
- もう1つの重要なコンセプトは、ユーザーがセル間を移動している間も通信を途切れさせないためのハンドオーバーの導入でした。

1Gは通話品質が悪く、セキュリティも弱かったものの、次世代のモバイル ネットワークの基礎を築きました。

## 2G：デジタルの飛躍

2Gモバイル ネットワークは1990年代に導入され、アナログ通信からより高度なデジタル技術へと移行し、重要な技術革新をもたらしました。

- デジタル エンコーディングにより音声通話はよりクリアな音質となり、傍受を困難にするためにセキュリティが導入されました。また、2Gはテキスト メッセージ、すなわちSMS（ショート メッセージ サービス）を初めてサポートし、後に限定的なデータ サービスもサポートしました。
- 2Gネットワークは、デジタルであることで、より多くのユーザーに対応し、より良いカバレッジを提供することができました。その結果、モバイル通信の利用者が増加しました。
- 2GのGSM (Global System for Mobile)規格により、国際ローミングを用いて、さまざまな国を旅行しながら携帯電話を使うことが可能になりました。

デジタル技術への移行とともに、2Gはモバイル通信の歴史を大きく飛躍する原動力となりました。

## 3G：インターネットがデータとマルチメディアでモバイル化

3Gの登場により、モバイル デバイスでインターネットにアクセスできるようになったのは2000年頃のことでした。主な特徴は以下のとおりです。

- データ通信速度が格段に速くなり、2Gではかなり制限されていたモバイル機器でのウェブ閲覧や電子メールの送受信が可能になりました。
- 初めて3Gネットワークでビデオ通話が可能になりました。
- 音楽ストリーミング、写真共有、ビデオ鑑賞など、さまざまなマルチメディア アプリケーションをサポートし、モバイル デバイスはより多機能になりました。

3Gは、携帯電話がミニコンピューターとして扱えるスマートフォンの時代をもたらし、今のアプリ主導の世界の基礎を築きました。

## 4G：モバイル ブロードバンドの時代

2000年代後半に導入された4Gモバイル ネットワークは、大容量のデータを処理するために特別に設計されたもので、高速インターネットを提供し、モバイル デバイスが、家庭やオフィスでの接続と同様に、高速で信頼性の高いブロードバンド インターネットにアクセスできるようになりました。主な特徴は以下のとおりです。

- 高速データ転送により、YouTubeやNetflixのようなスムーズなHDビデオ ストリーミングやオンライン ゲームが可能になりました。
- 4Gネットワークは、利用可能な無線周波数を（スペクトル効率において）より効率化し、より多くのユーザーとより多くのデータを同時に処理できるようになりました。

4Gにより、モバイル デバイスはパワフルで常時接続可能なツールとなり、ソーシャル メディア プラットフォーム、ライドシェアアプリ、モバイル アプリを中心に事業を展開するビジネスなど、新たな産業やサービスの台頭をもたらしました。4Gは、初期のエッジ コンピューティング アプリケーションの基礎を整えました。これは、センサーやスマート家電のような迅速で効率的なデータ処理を必要とするデバイスを用いた、コンテンツ配信ネットワーク（ユーザーへの動画ストリーミングなど）やIoT（モノのインターネット）の展開にとって特に重要でした。

### 5G：スピードから柔軟性へ

2020年代、5Gネットワークは多くの地域で展開され始めています。5Gはより高速なインターネット速度を提供する一方で、柔軟な設計や、単にブラウジングやダウンロードの高速化にとどまらないさまざまな業界にまたがる幅広いアプリケーションをサポートする能力によりブレークスルーをもたらしました。これらを実現するための、5Gの主な特徴は以下のとおりです。

- 超高信頼・低遅延通信（URLLC）：自律走行車や遠隔手術のようなリアルタイム アプリケーションを容易にします。
- 大量のマシンタイプ通信（mMTC）：（スマートシティやスマート工場のセンサーのように）同時に膨大な数のデバイスの接続を可能にします。
- モバイルブロードバンドの高度化（eMBB）：より高速なインターネット。

下図にまとめたこれらの機能は、特に企業のエッジ コンピューティングに有用で、データが生成場所の近くで処理されるため、より迅速な対応が可能になり、スマート工場やコネクテッドカーなどのアプリケーションのサポートに役立ちます。

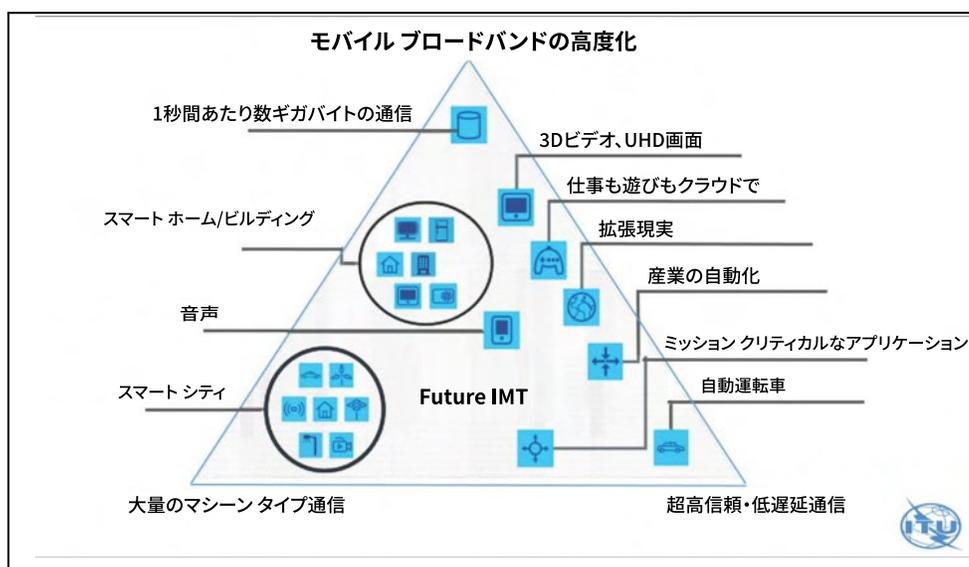


図3-2：ITUによるITU IMT-2020の要件と5Gのユースケース

5Gは「サービスファースト」アプローチを採用し、さまざまな業種のニーズを取り入れています。ネットワークスライシングにより、ネットワークの一部を特定のアプリケーションの要件（例えば、ビデオストリーミングの高速化、産業オートメーションの低遅延化）に合わせて調整することができます。一方、エッジコンピューティングにより、超低遅延とリアルタイム機能の実現が可能です。この柔軟性により、5Gは、自律走行車向けの低遅延やビデオストリーミング向けの広帯域など、それぞれ要求の異なる複数のアプリケーションを同時にサポートすることができます。5G技術については次のセクションで詳しく説明します。

## 6G：未来を垣間見る

5Gネットワークがまだ世界中で展開中である一方、研究者たちはすでに次世代のモバイルネットワークである6Gについて検討・計画中です。6Gの公式な規格はまだ確立されていませんが、6Gは5Gを大幅に改善し、概ね2030年代に展開されると予想されています。予想される革新的技術には以下のようなものがあります：

- AIネイティブネットワーク アーキテクチャ
- 100Gbpsを超えるデータ レート
- サブミリ秒のレイテンシー
- 非地上系ネットワーク（NTN）と携帯電話ネットワークの統合

技術革新に重点を置くだけでなく、6Gは、エネルギー効率や持続可能性といった世界的な課題に取り組み、サービスが行き届いていない地域にまでサービスを拡大することを目指しています。

## 絶え間ないイノベーションの道

1Gから6Gへの進化は、技術の進歩だけでなく、これらの技術が私たちのコミュニケーション、仕事、世界との関わり方、交流の仕方をどのように変えたかを表しています。モバイルネットワークの世代が新しくなるたびに、より高速で大容量の通信が可能になるだけでなく、新たなビジネスチャンスや用途が生まれてきました。

私たちは全力で5Gの可能性を探求し始めたばかりですが、6Gの登場によって更に多くのエキサイティングな発展が待っているでしょう。ネットワーク技術の進歩は、エッジコンピューティングやAIのイノベーションと相まって、ユビキタスでインテリジェントなコネクティビティを約束します。

以下のセクションでは、5Gの現状、6Gの可能性、そしてこれら2つの技術がどのように電気通信とエッジコンピューティングの未来を形成するかについて見ていきます。

## 5G：新しいワイヤレスの現実

私たちは現在、5G技術の普及を目の当たりにしていますが、6Gはまだコンセプト開発の初期段階にあります。これは、無線通信における大きな転換の始まりを告げるものであり、私たちの生活や働き方を一変させ、より良い接続性を提供し、さまざまな分野に新たなイノベーションの機会をもたらすでしょう。

世界的に5Gの導入は進んでいます。2024年までに、5Gネットワークは北米、ヨーロッパ、東アジア、中東とオーストラリアの一部の主要都市をカバーし、その地域の人々は5Gが提供する高速でレスポンスのよいインターネットの恩恵を受けることができるようになりました。

5Gの拡大は都市部だけにはとどまりません。韓国、中国、米国などの国々は、先進技術へのアクセスが従来困難であった農村部への5Gの導入に取り組んでいます。農村部への5Gの拡大は、技術的に取り残されてきた地域の接続性を改善し、サービスやビジネスチャンスへのアクセスを改善できる重要な取り組みです。

The Ericsson Mobility Report<sup>16</sup>では、今までの加入者数の推移から、2020年代末までに5Gがモバイル技術の中で最も普及すると予測しています。5Gは多くの人々に利用が進みつつあるものの、カバレッジと速度のバランスのとれたミッドバンド5Gの普及は、中国を除く世界全体でまだ25%しかありません。5Gが発展するにつれ、各社は画一的なアプローチではなく、さまざまなニーズに合わせてカスタマイズしたサービスを提供するようになるでしょう。

5Gによる影響はすでに多くの業界で現れ始めています。ヘルスケア分野では、5Gによって医師による遠隔医療（オンライン診療）や患者の遠隔モニタリングが可能になり、遠隔地の人々がより良い医療を受けられるようになりました。製造業では、5Gをスマート工場で使用して、拡張現実（AR）が作業員を支援したり、予測保守がデータを活用して生産ラインを円滑に稼働させたりしています。

5Gはスマートシティの発展を支える重要な技術になると考えられています。スマートシティにおける5Gの応用例としては、交通の流れをリアルタイムで管理し、渋滞の緩和や車両の排出量削減を実現するスマート交通システムなどが期待されています。5Gの高速・低遅延はエンターテインメント業界にも影響を与え、拡張現実（AR）やゲームの改善など、より没入感のある体験を可能にしています。これらの技術は、デジタルコンテンツを物理的な世界と融合させ、ユーザーにインタラクティブで魅力的な体験を提供します。

5G技術の開発と強化は、携帯電話標準の開発担当組織である第3世代パートナーシッププロジェクト（3GPP）によって指揮され、機能を改善・拡大するために活動中です。5G規格においては、最近、車両が相互に通信したり、周囲の環境と通信したりすることを可能にするV2X（Vehicle-to-Everything）通信が更新されました。これはエッジコンピューティングの重要ユースケースである自律走行車やスマート交通システムにとって不可欠な技術です。

<sup>16</sup> [Ericsson Mobility Report June 2024](#)

5Gの次のバージョンは5G Advancedと呼ばれ、現在の機能をさらに強化し、より高い性能を提供すると期待されています。



図3-3：ITUが提供する5Gと4G（LTE）技術の間の課題とギャップ

### 岐路に立つ通信事業者：5Gとエッジ コンピューティング革命をナビゲートする

通信業界は重大な転換期に直面しています。5Gネットワークの急速な展開とエッジ コンピューティングの台頭は、従来の通信事業者にビジネス モデルの見直しを迫っています。通信事業者が単なるデータのダムのパイプに過ぎなかった時代は過ぎ去り、今、先見の明を持つ事業者は、さまざまな高度なアプリケーションをサポートできるインテリジェント ネットワークを構築しています。

例えば、Verizonはモバイル エッジ コンピューティング（MEC）<sup>17</sup> に投資しており、これを用いることでリアルタイム処理と遅延の短縮を実現した新しいタイプのアプリケーションを実現できます。このイノベーションは、自律型ドローンやライブ イベントでの没入型AR体験など、エキサイティングな新たな用途を切り開く可能性を秘めています。

しかし、5Gの可能性の限界に挑んでいるのはVerizonだけではありません。AT&Tもエッジ コンピューティング<sup>18</sup> に多額の投資を行っており、協調的なアプローチをとっています。他のハイテク企業と提携することで、スマート製造やヘルスケアなどの分野でイノベーションを推進できるエコシステムを構築しています。

<sup>17</sup> [Verizon Business, 5G Edge with Public MEC](#)

<sup>18</sup> [AT&T Business, 5G Mobile & Edge Computing](#)

## 企業ユースケースへの転換

以前のモバイル ネットワーク技術では、高速なモバイル インターネットは、主に消費者のニーズを満たすために提供されてきました。しかし、5Gでは、通信会社はビジネス市場へのサービス提供に重点を移し、さまざまな業界向けのソリューションを提供しています。この変化は、消費者の代わりに企業をターゲットにすることだけでなく、モバイル ネットワークの設計と使用方法のより深い変化でもあります。5Gによって、ネットワークはもはや通信のためだけのものではなく、企業が業務を最適化し、イノベーションを起こすための重要なツールとなりつつあります。

5Gは、ネットワーク スライシング（同じ物理インフラ上にカスタマイズされた複数のネットワークを構築できる）や超高信頼の低遅延通信といった独自の機能を提供します。これらの機能は、スピード、信頼性、精度が不可欠な複雑なビジネス ユースケースに最適です。スマート工場では、通信会社がプライベート5Gネットワークを構築し、企業が生産プロセスをリアルタイムで監視・制御できるようになり、以前は不可能だった方法で精度や効率を改善しています<sup>19</sup>。

工場向けに設計された5Gネットワークは、汎用の画一的なものではなく、万能ソリューションとなるよう、各施設の実際の運用ニーズに合わせて高度にカスタマイズされています。

ある自動車工場では、プライベート5Gネットワークが、作業員の複雑な作業を支援する拡張現実（AR）システムの実現にも活用されています<sup>20</sup>。

通信事業者はヘルスケア産業でも活用が進んでおり、5Gが医療サービスをどのように強化できるか模索しています。5Gの低遅延により、遠隔手術が可能になり、離れた場所にいる医師が、病院にあるロボット手術器具を操作することができるようになります。5Gはほとんど遅延なくデータを伝送できるため、このようなことが可能になるのです。遠隔手術はまだ始まったばかりですが、専門医による医療へのアクセスを拡大することにより、遠隔地や十分なサービスを受けられない地域の人々が大都市と同じレベルの治療を受けられるようになります。

## 未来のためのパートナーシップ

通信業界における最も重要なトレンドは、通信事業者とクラウド プロバイダーとの協業が進んでいることでしょう。これらの企業は、クラウド コンピューティングとネットワークを新たな方法で組み合わせて機能を強化し、デジタル インフラの構築・管理方法を根本的に変えることで、サービスを向上させ、新たな可能性を生み出すために協力しています。

<sup>19</sup> [Ericsson, Using IIoT with Private 5G for smart factories](#)

<sup>20</sup> [Intel, 5G Private Network for Smart Factory](#)

Verizonと大手クラウド プロバイダーであるAmazon Web Services (AWS) との提携<sup>21</sup>はこのトレンドの一例です。この提携は、5G接続とクラウド コンピューティングの強力な組み合わせを象徴しています。この提携により、AWSのクラウド コンピューティングのパワーがVerizonの5Gネットワークと組み合わせたり、エッジ コンピューティングによる、より高速で信頼性の高いサービスとアプリケーションを実現できるようになります。

この連携により、従来は専用のハードウェアが必要だった複雑なアプリケーションをクラウドで直接実行できるようになり、開発者は恩恵を受けることができます。5Gはリアルタイムのパフォーマンスに必要な速度と低遅延を提供します。これにより、AI処理、ゲーム、リアルタイム データ分析などのアプリケーションをシームレスに実行できるようになります。

AT&TとMicrosoft Azureのパートナーシップ<sup>22</sup>も、同様の事例を示しています。このパートナーシップは、AT&Tのネットワークに関する専門知識とAzureのクラウド機能を統合し、革新的なエッジ ソリューションを実現します。AT&TとMicrosoftは、エッジ コンピューティングを利用して、自律走行車やスマートシティなどのアプリケーションを実現しようとしています。これらの技術にはリアルタイムのデータ処理が必須であり、エッジ コンピューティングはデータの通信距離を短くすることで効率的な技術の実現に貢献します。

### プライベート ネットワークの台頭

5Gの展望の中で最も注目すべき変化は、プライベート ネットワークの出現です。プライベート ネットワークは、一般向けに公開されるのではなく、カスタム構築され、特定の業界や環境に提供されます。プライベート ネットワークは、工場、大学キャンパス、港湾など特定の管理された場所に設置され、5Gの主たるメリット（高速、低遅延、多数の接続デバイスのサポートなど）を提供すると同時に、特定の環境特有のニーズに合わせてカスタマイズされます。また、セキュリティや制御も強化されているため、企業や組織にとって非常に魅力的なものとなっています。

プライベート5Gネットワークは、エンドユーザー（企業）が管理するため、短期的には通信事業者にとって損失のように思えるかもしれませんが、大企業や機関に特化したサービスを提供することで、収益源となる新たなチャンスをもたらします。単に標準的な接続サービスを販売するのではなく、通信事業者は企業特有のニーズに合わせたカスタムメイドのネットワークを販売できるようになりました。このようなネットワークにおけるネットワーク インフラの設定や管理には、通信事業者の専門知識が必要となります。

プライベート5Gネットワークの可能性は計り知れません。例えば、スマート ポートでは、プライベート ネットワークが自律走行車を管理し、リアルタイムで貨物を追跡し、物流を改善することで、港湾業務をより効率的かつ自動化することができます。大学キャンパスでは、プライベート5Gネットワークは、高度な研究プロジェクトのサポート、より良い遠隔教育の実現、リアルタイムのモニタリングやセキュリティ システムによるキャンパスの安全性の向上など、さまざまなタスクに利用できます。

<sup>21</sup> [Verizon launches the world's first MEC platform with AWS Wavelength](#)

<sup>22</sup> [Microsoft and AT&T are accelerating the enterprise customer's journey to the edge with 5G](#)

## 課題は山積、チャンスは広がっています

大きな期待があるにもかかわらず、5Gネットワークの展開において、通信事業者は新しいハードウェアやソフトウェアへの設備投資に大きな課題を抱えています。このような投資は、収益を生み出す新しいビジネスモデルによって説明できなければなりません。通信事業者は5Gとエッジ コンピューティングのポテンシャルについては楽観的であるものの、技術への投資に関しては慎重な姿勢を崩していません。

一方では、通信事業者各社は、スマートシティ、ヘルスケア、インダストリー4.0、メディアなど幅広い業界において、これらの技術が変革をもたらし、新たな収益源となる可能性があると認識しています。その一方で、すべての市場に対応できる万能のキラー アプリは存在せず、各市場はそれぞれの市場力学に基づいて、どのユースケースが成功するかを見極める必要があります。さらに、5Gのいわゆる「革命的」なユースケースの多くは、4G時代の従来環境ですでに期待されていたものです。そのため、一部の通信事業者はネットワークの変革にはいまだ懐疑的です。

もう1つの大きな懸念は、多くの地域で周波数帯の利用制約があることです。これは5Gを最大能力で運用したり、機能提供を実現する際に制約となる場合があります。政府や規制機関は、5Gに必要な周波数帯、特にmmWaveのような高い周波数の周波数帯の解放に時間がかかったり、場合によっては、通信事業者がこれらの免許を取得するために数十億ドルを支払う必要があるため、ネットワーク インフラへの追加支出を説明することが難しくなっています。高い周波数帯は非常に高速ですが、通信距離が限られ、建物などの障害物を通過するのが難しいため、より多くのインフラ（スモールセルなど）を必要とします。

ソフトウェア定義インフラやクラウドネイティブ インフラへのシフトに伴い、通信事業者のネットワークはITシステムと融合しつつあり、通信事業者は従来IT企業が支配していた領域でIT企業と競合するようになりました。通信事業者は新たな技術スキル（クラウドネイティブや分散アーキテクチャ、ネットワーク機能仮想化、ソフトウェア定義ネットワークなど）を習得し、IT企業やクラウド プロバイダーとパートナーシップを結び、組織文化をこの変化するエコシステムに適応させることが成功への鍵となります。新たなビジネスチャンスを見極め、セキュリティやプライバシーの問題に対応するためにクラウド プロバイダーと協力することで、通信事業者は次のステップに進むことができるでしょう。

## クラウドと通信の出会い：

### クラウド プロバイダーとAPIはどうやってコネクティビティを再構築するのか

このセクションでは、ネットワークの自動化と収益化を可能にするLinux Foundationの2つの主要プロジェクト NephioとCAMARAを紹介し、クラウドの巨大企業がどのように通信の世界に参入しているかを探ります。

Amazon、Google、Microsoftのようにハイパースケーラーと呼ばれる企業が通信事業に大きな動きを見せており、

業界に大きな変化をもたらしています。お気に入りのストリーミング サービスの実行環境と同じプラットフォームが提供するネットワークに、あなたのスマートフォンが接続される未来を想像してみてください。このような構想の実現を目指し、クラウド プロバイダーは企業にプライベート5Gネットワークを提供しています。

MicrosoftのAzure Private MECとGoogleのAnthos for Telecomは通信ネットワークにクラウドネイティブ技術を導入しています。これにより、企業が独自の5Gネットワークを容易に構築し、ハイパースケーラーのエッジ コンピューティングへのアクセスを拡大することが可能になります。

これらの取り組みは単なる実験的な試みではなく、ネットワーク インフラに対する考え方を変革し、エッジ コンピューティングとリアルタイムAI処理の新たな可能性を切り開くものです。

### プロジェクトNephio：クラウドネイティブ ネットワークの自動化

大手テック企業が通信業界に参入し、オープン コラボレーションの理念を持ち込もうとしています。 [Nephio](#)はLinux Foundationのプロジェクトで、通信事業の重要課題であるネットワーク機能の展開と管理の複雑さへの対策に取り組んでいます。

ギリシャ語で「クラウド」を意味するNephioは、通信技術の万能翻訳機のようなものです。これはKubernetesベースのシステムで、クラウドやエッジのインフラの設定や、ネットワーク機能の構成、適切なクラスタへの配信により、意図や目的を行動に変えることができます。通信事業者にとっては、新サービスの展開にかかる時間とコストを削減できる画期的なソリューションとなるでしょう。

しかし、Nephioは通信事業者の生活を便利にするだけではありません。5Gネットワークにおけるエッジ コンピューティングの展開を簡素化することで、新世代の低遅延・広帯域幅アプリケーションへの道を切り開いているのです。

Nephioは、分散クラウド環境におけるマルチベンダー、マルチサイト展開の管理という課題に取り組んでいます。初期のプロビジョニングに対応し、Kubernetesベースの調停機能（リコンシリエーション）により、障害、スケールリング イベント、環境変化に対して最適化し、ネットワークを安定的に保つことができます。

Linux FoundationのプロジェクトNephioについての詳細は、 <https://nephio.org> をご覧ください。

### プロジェクトCAMARA：APIエコノミーが通信事業に登場

クラウド プロバイダーが電気通信の世界に進出する中、ネットワークAPIの商用化という新たな革命が起こりつつあります。これは技術的な話に聞こえるかもしれませんが、しかし、間違いなくネットワーク サービスについての考え方や使い方を一変させるようなイノベーションの波が押し寄せようとしているのです。

従来、通信ネットワークはクローズドシステムであり、その内部は独自のインターフェースに隠ぺいされていました。しかし、ネットワークが今まで以上にソフトウェア定義型になり、クラウドのようになるにつれて、よりオープンでプログラマブルになりつつあります。そこで登場するのがAPI（Application Programming Interfaces）です。標準化されたAPIを通じてネットワーク機能を公開することで、通信事業者は実質的にネットワークの世界に開発者を招き入れることができます。

ネットワークの状況に応じて動的に動作を調整するアプリケーションを作りたいですか？そのためのAPIは用意されています。重要なビデオ通話での一定のサービス品質を保証する必要がありますか？APIがお手伝いできます。開発者の想像できることはなんでも実現することができるでしょう。

このAPIイノベーションの最前線にあるのが、Linux Foundation傘下のプロジェクトであり、Verizon、AT&T、T-Mobileといった大手企業が支援する共同の取り組みである [CAMARA](#) です。CAMARAは単にAPIを構築するだけでなく、通信APIの共通言語、つまり開発者がどのネットワークに準拠していても動作できるアプリケーションを作ることを実現する万能薬のようなものを作ろうとしています。

CAMARAの使命は、GSMA Operator Platform Groupと密接に協力しながら、これらのAPIを定義、開発、テストすることです。この標準化は、専門化が進む5Gネットワークの世界において極めて重要です。ネットワークスライシングのような技術によってカスタマイズされた仮想ネットワークが実現され、共通のAPI言語をつかうことで、基礎インフラに関係なくアプリケーションが機能を活用できるようになります。

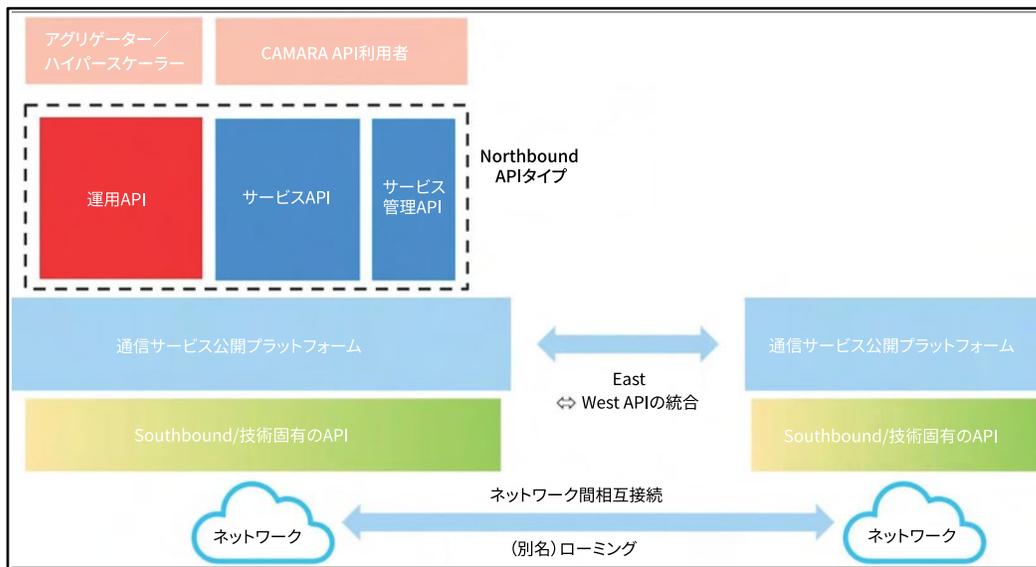


図3-4：CAMARAプロジェクトが提供するNaaSのインターフェースタイプとAPIタイプ

このプロジェクトには深い意味が込められています。CAMARAは、リアルタイムのネットワークに適応するスマートシティから、多様なネットワークでパフォーマンスを保証する産業用IoTセットアップまで、通信対応アプリケーションのまったく新しいエコシステムの基礎を築こうとしています。

Linux FoundationのプロジェクトCAMARAの詳細については、<https://camaraproject.org>をご覧ください。

### 通信革命の新篇章

クラウドプロバイダーの通信分野参入が増え、APIがネットワークサービスの新たな可能性を切り開く中、私たちは通信におけるイノベーションの新時代を迎えようとしています。

クラウドと通信、ソフトウェアとネットワークの間の古い境界線が崩れ、より統合された柔軟なデジタル サービスの環境が生まれつつあります。

このような融合に期待を寄せる一方、データ プライバシーやネットワーク セキュリティに関する懸念、少数の大手事業者による支配が強まる中での公正な競争環境の確保など、大きな課題も見えています。

こうした課題はあるとはいえ、メリットも明らかなです。クラウド技術を通信技術に統合することで、より効率的なネットワークや新しく革新的なサービスの創出、これまで不可能だった方法でのより多くの人々やデバイスの接続が可能となります。

未来の通信業界では、従来の通信企業だけでなく、クラウド大手や新興企業など、斬新なアイデアや技術を持ち込む幅広いプレイヤーが関わってくるでしょう。このような進化する通信業界において、イノベーションやパートナーシップの形成、ネットワーク技術で何が実現できるかを考える能力が企業の成功のカギになるでしょう。

### 6G：未来のワイヤレス世界を垣間見る

ホログラフィック電話が当たり前になり、自律走行車がほぼ完璧な精度で市街地をナビゲートし、個人向けAIアシスタントが、あなたの質問の前にあなたのニーズを予測する世界を思い浮かべてください。これはSFではなく、世界中の研究者やエンジニアが6Gネットワークで目指しているゴールです。

6Gは単なる5Gの高速版ではなく、ワイヤレス技術の大きな飛躍を意味します。それは、接続性に対する考え方を変えるパラダイム シフトです。単にデバイスをインターネットに接続するのではなく、6Gは人間、機械、デジタル世界を1つの相互接続されたエコシステムに統合し、人間と機械のニーズをリアルタイムで理解し応えることができる、よりスマートでインテリジェントなネットワークを構築します。

しかし、6Gネットワークはまだ構想段階であることに注意が必要です。5Gの展開はまだ多くの地域で不完全で、6Gのインフラ整備には巨額の投資が必要です。6Gの完全形を実現するには数年かかるかもしれませんが、グローバルな接続性と技術統合の次のフロンティアは、現在整備が進められている基盤をもとに形作られていくでしょう。

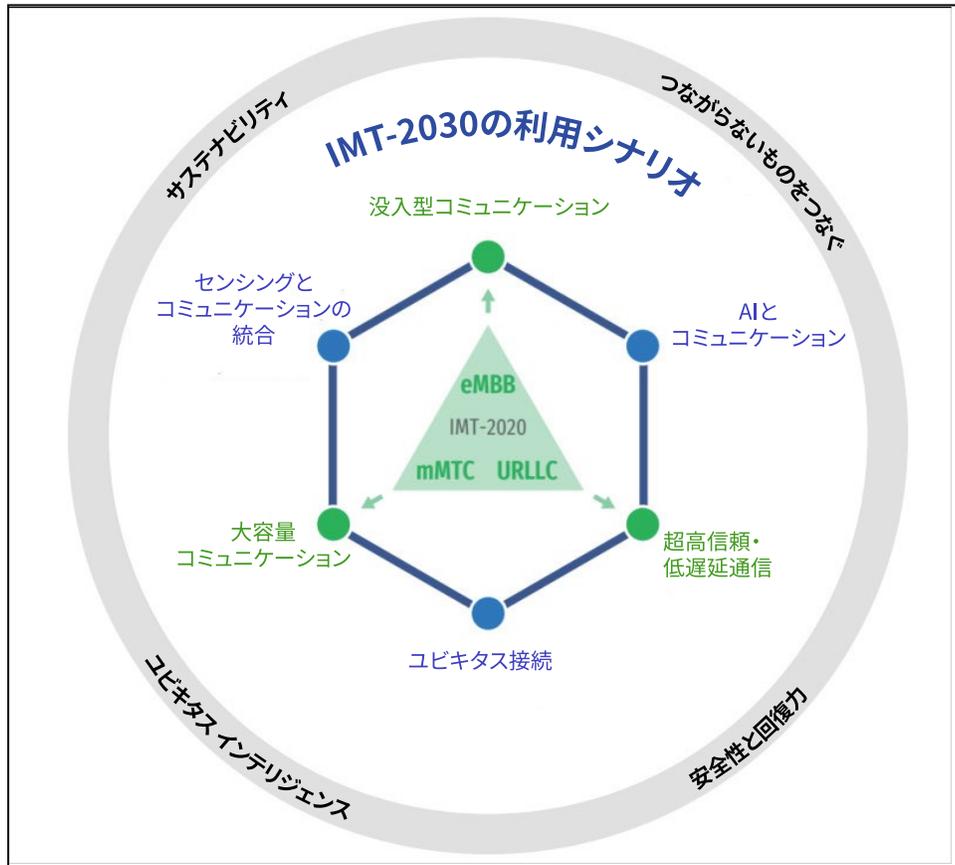


図3-5：ITUが提供するIMT-2030（6G）の利用シナリオ

### スピードの壁を超えて

6Gの目標は、100Gbpsを超えるデータ レートを実現し、超高速通信とデータ転送を可能にすることです。しかし、速度は6Gの可能性の一面に過ぎません。最も革新的な特徴は、AIの統合でしょう。単にデータを送信するのではなく、6GネットワークはAIを使ってデータを分析し、そこから学習し、さらにはデータに基づいて意思決定を行うようになるでしょう。

6G時代になると、ネットワークは「ダムのパイプ」の域を超え、デジタル体験を強化・最適化する能動的でインテリジェントなパートナーとなるでしょう。低遅延のゲームであれ、ヘルスケアデータのリアルタイム モニタリングであれ、ネットワークは特定のタスクに動的に適応し、さまざまなユースケースに最適なパフォーマンスを保証します。

こうした野心的な目標を達成するためには、6Gではテラヘルツ（THz）周波数帯など、より高い周波数帯へのアクセスが必要になります。これらの周波数は帯域幅を大幅に広げますが、高周波信号は長距離伝送が難しく、障害物に遮られやすいため、技術的な課題が伴います。

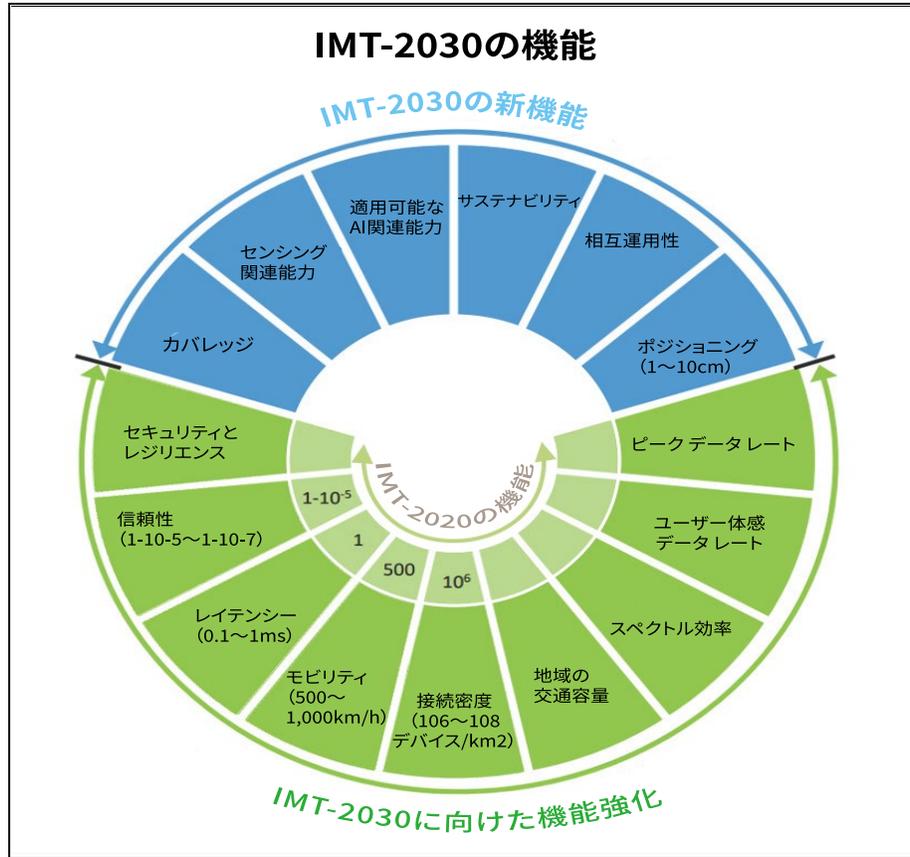


図3-6：ITUが提供するIMT-2030の機能

### 国境なきネットワーク

6Gの最も意欲的なビジョンのひとつは、地上、空中、衛星通信を統合してグローバルネットワークを構築することです。このグローバルネットワークは、都市部から遠隔地まで、信頼性の高いカバレッジと高速インターネットを提供することが期待されています。

これは単にどこからでもメールをチェックできるということではなく、ビジネス、科学、教育において世界中に対して新たなコラボレーションの機会を提供するということを意味しています。特に、リモートワークが当たり前になったパンデミック後の時代において大きな価値があります。自然災害で既存のインフラが被害を受けた場合でも、危機対応はより効果的になります。

このビジョンでは、接続性は空気のように不可欠なものとなり、私たちの生活のあらゆる部分にシームレスに統合され、世界との関わり方を変えることとなります。

### 未来への道

6Gの開発には時間と多大な労力がかかります。世界中の政府や企業は、ワイヤレス通信の未来をリードすることを目指し、研究開発に多額の投資を行っています。

主要な取り組みは世界的に広がっています。欧州のHexa-Xプロジェクトは、6Gの基盤を確立するために通信会社と学界が結束しています。中国は国家的な6G研究プログラムを立ち上げ、日本や韓国では技術的なリーダー層が次の目標として6Gに注力しています。Ericssonは6G研究の一部をサウジアラビアとトルコに集中させ、米国は6G開発における北米のリーダーを確保するためにNext G Allianceを結成しています。

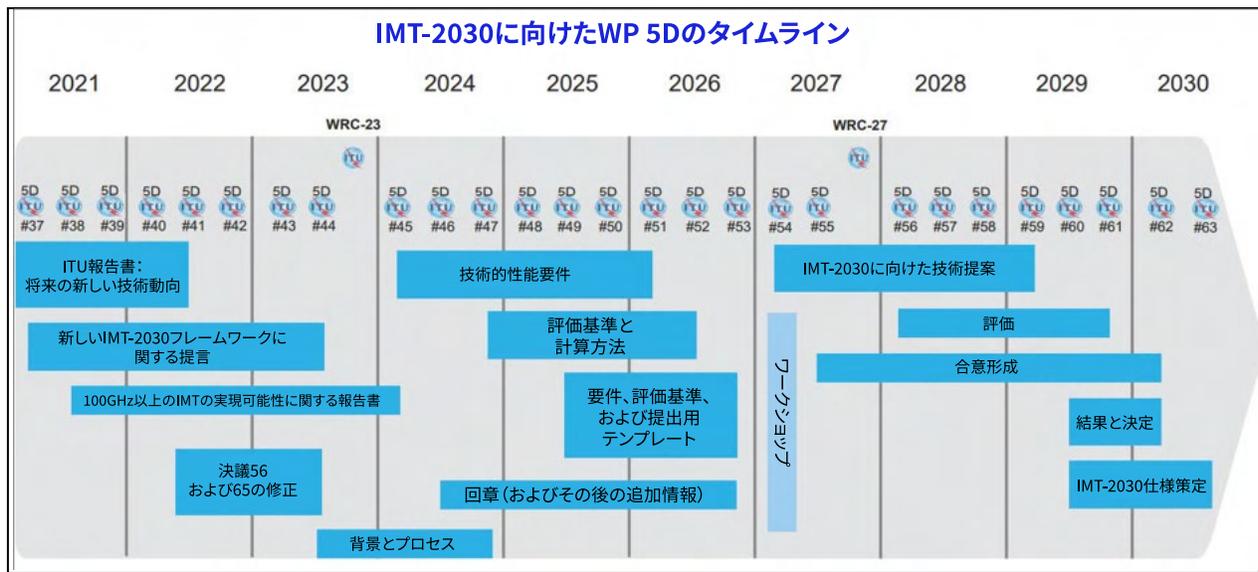


図 3-7：ITUが提供するIMT-2030（6G）に関するITU作業部会5Dのタイムライン

6Gは、技術的リーダーシップを競うだけでなく、世界的な課題、特にサステナビリティに関する課題に取り組むためのツールとしても注目されています。研究者たちは、6Gがスマートシティにおけるエネルギー消費をどのように削減し、資源をより効果的に管理できるかを模索しています。

6Gの標準化はまだ何年も先のことで、最初の仕様が発表されるのは2030年代と予想されています。しかし、初期の調査において、画期的なアプリケーションが登場する可能性があることが示唆されています。3Gの開発中に多くの3Gアプリケーションが予期できなかったように、6Gはまだ想像もつかないイノベーションを可能にする可能性もあります。6Gはブレインコンピューターインターフェースをサポートし、人々が思考を通じてデバイスを操作できるようになるかもしれないという期待もされています。

私たちが6G時代の入り口に立っている今、ひとつ確かなことがあります。それは、ワイヤレス技術の未来は、私たちの想像力次第で無限の可能性を秘めているということです。

### 可能性は無限大：グローバルコネクティビティを再定義する非地上系ネットワーク（NTN）

ニューヨークの中心部においても、サハラ砂漠の真ん中においても、スマートフォンが問題なく使える世界を想像してみてください。人里離れた山脈を越えても、自律走行車の接続が切れることはありません。遠い夢物語のように聞こえるかもしれませんが、これこそが非地上系ネットワーク（NTN）の公約であり、想像以上に現実に近づいてき

ています。

人工衛星や（気球やドローンのような）成層圏プラットフォームを利用するNTNは、活発に開発が進められている新興技術です。SpaceX（Starlink）やAmazon（Project Kuiper）のような企業はすでに衛星を打ち上げ、グローバルなインターネット カバレッジを提供しています。

何十年もの間、私たちは通信を地上インフラ（電波塔、光ファイバー ケーブル、地下ケーブル）に頼ってきました。このインフラは人口の多い地域ではうまく機能しますが、遠隔地での導入には限界があり、コストもかかります。5Gに始まり、6Gに向けて、カバレッジを拡大するために空中や宇宙ベースのシステムを統合することで、この伝統的なインフラを拡張しています。

NTNはグローバル通信の新たな中核となりつつあります。NTNは従来のネットワークの延長線上にあるものではなく、陸海空にわたる完全なグローバル カバレッジの実現を目指した新しいパラダイムです。デバイスは異なるシステムをシームレスに切り替えられるようになります。この3次元ネットワークは、地上ネットワーク（地上）、空中ネットワーク（空中）、宇宙ネットワーク（衛星）をひとつのまとまったシステムに接続します。その結果、世界中どこでも信頼できる接続性を保証する、ダイナミックで適応性の高いネットワークが実現します。

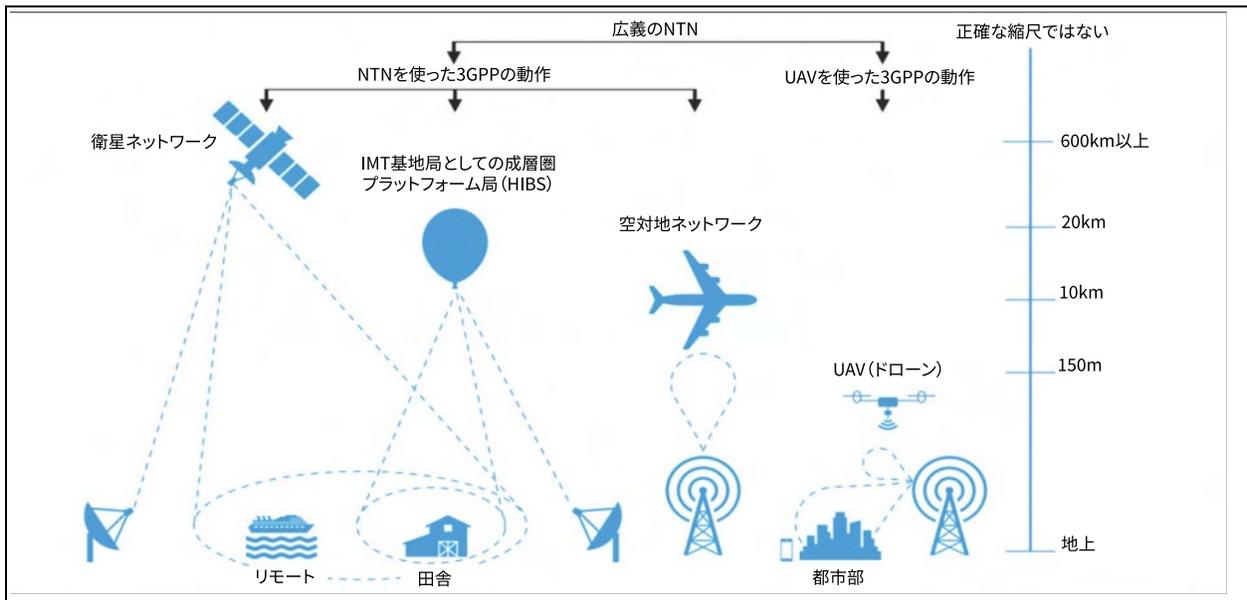


図3-8：5G Americasが提供する非地上系ネットワークの種類

## 世界接続競争

NTNの将来性により、ハイテク産業には宇宙開発競争のような新たな競争がもたらされており、宇宙ベースの技術を使った世界的な通信ネットワークを最初に確立しようと複数の企業が競い合っています。

SpaceX社のStarlink、AmazonのProject Kuiper、AST SpaceMobileは、この分野における注目プレーヤーです。AST SpaceMobileは大きな成長を遂げ、改造されていないスマートフォンを使って史上初の宇宙ベースの5G通話を実現しました。Lynk Global社は、宇宙から通常の携帯電話へ改造なしでテキストメッセージを送信することに成功しました。

IntelsatやSESのような古参の衛星会社も、静止衛星と低軌道衛星の両方を使用するハイブリッド ネットワークを開発することで適応しています。TelesatのLightspeedコンステレーションは、大容量、低遅延の接続をグローバルに提供することを目指しています。

## インターネットを越える：NTNの広範囲にわたる影響

遠隔地にインターネットを提供することは重要ですが、NTNは災害対応から環境監視まで幅広い分野に革命をもたらす可能性があります。災害時、NTNを利用することで、救援隊は壊滅的な被害を受けた地域で迅速かつ強固な通信ネットワークを構築することができます。また、環境モニタリングの分野では、NTNを利用することでグローバルなIoTネットワークが実現し、気候変動や野生生物の動き、地質活動などの重要なデータを世界の遠隔地から中継することができます。

大規模なスポーツ イベントの際に、スタジアムでの携帯通信サービスを提供するという課題を考えてみましょう。従来、通信事業者は通信量の急増に対応するために専用の基地局を設置していましたが、このような高価なリソースはほとんどの時間アイドル状態になっていました。これに対しNTNは画期的なソリューションを提供します。空中プラットフォームや低軌道衛星が、必要なときに必要な場所で、ダイナミックなオンデマンド通信を提供できるのです。試合終了後、ファンの退場が始まったら、これらの空中設備は需要の高い他のエリアに割り当てられます。このような柔軟性は、リソースの利用率を向上させるだけでなく、インフラ コストや環境への影響も軽減することができます。これは、NTNがネットワークの配備に革命をもたらし、これまで以上に迅速で効率的な配備を可能にする代表的な一例です。

NTNがもたらす影響は、単に人と人をつなぐだけではありません。この包括的な接続性は、世界規模のIoT展開の実現から、自律走行車やスマートシティに必要なユビキタス接続の提供まで、私たちが地球をどのように理解し、相互作用していくかに大きな影響を与えます。

## 地平線上の課題

シームレスにつながった世界というこのビジョンは、課題がないわけではありません。地上、空中、宇宙空間にまたがるダイナミックなネットワークを管理する複雑さは驚異的です。スペース デブリ（宇宙ゴミ）、周波数帯の割り当て、こうしたグローバル システムを管理するための新たな規制の枠組みに対する懸念は大きなものがあります。

ワイヤレス通信の第一人者であり、NTNの研究に深く関わっているCarleton Universityの教授であるDr.Halim Yanikomeroğluは、この複雑さについてユーモアを交えてこう語っています。「確かに、これらすべてのシステムをシームレスに連携させるのは大変な挑戦です。しかし、良い面もあります。優秀なエンジニアにとっては、確実に仕事が生まれるのです！」

おそらく最も差し迫った課題はアクセシビリティでしょう。テクノロジーは急速に進歩していますが、それを最も必要とする人々が手頃な価格で利用できるようにするには、依然として大きなハードルがあります。

## 未来は上を向いている

6Gへの移行に伴い、従来の地上ネットワークと非地上系ネットワークとの境界はますます曖昧になりつつあります。NTNを利用すれば、極めて離れた場所でも信頼性の高い高速インターネット アクセスが可能になり、「デッドゾーン」という言葉は使われなくなります。

こうした未来では、デバイスは、利用可能な地上、成層圏プラットフォーム（HAPS）、衛星のいずれか、最良のネットワークに自動的に接続することができます。衛星やHAPSは単に接続性を提供するだけでなく、エッジ コンピューティング ノードとして機能し、リアルタイム アプリケーションの待ち時間を短縮します。

AIシステムは、この複雑なネットワークを管理・最適化する上で重要な役割であり、リアルタイムに動的な調整を行うことで、トラフィックのバランス調整、効率の改善を行い、最適なサービス品質を保証します。

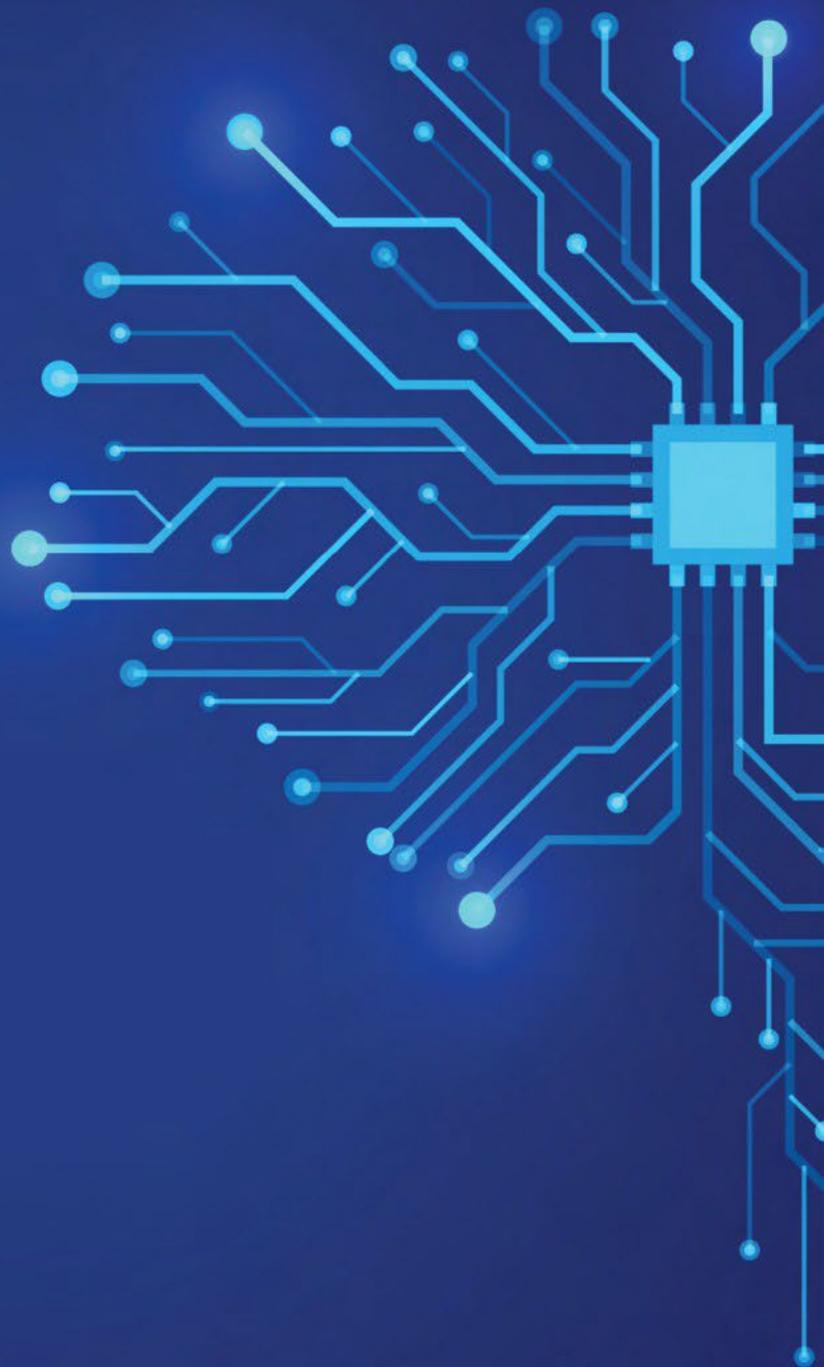
この変化が意味するところは非常に大きく、IoTや自律システムから災害対応やグローバルな資源管理に至るまで、さまざまな分野で新たな可能性を解き放つことが期待されています。

次に夜空を見上げるときは、思い出してください。星々のあいだで、新しいネットワークが構築されつつあることを。

# 第4章

# AI

VICTOR LU



## 第4章 エッジAI

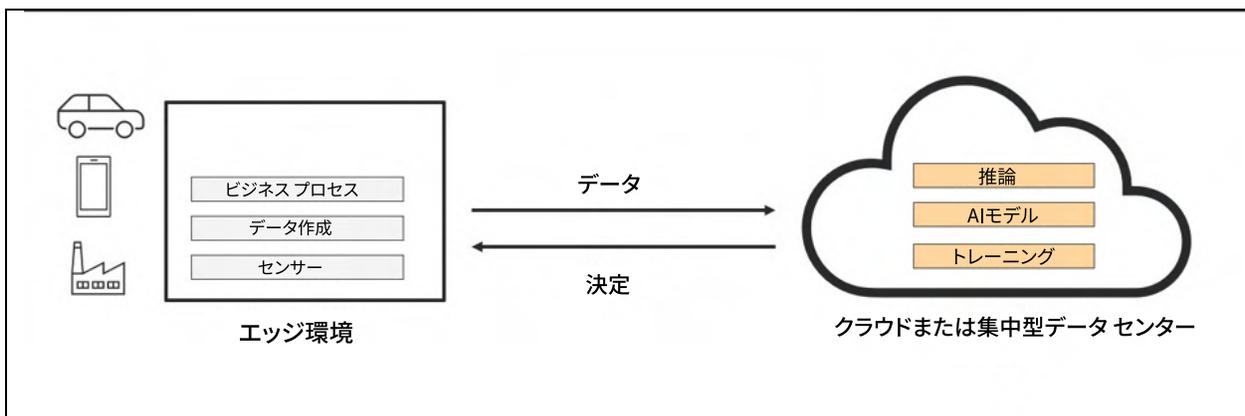
### はじめに

本章では、エッジAIの概念と、この領域でどのように連合学習が適用されているかを探ります。また、エッジAIをサポートする主要なオープンソースプロジェクト、著名なユースケースを紹介し、ハードウェア技術の進化についても議論します。さらに、デジタルツインの役割を探求し、エッジAIの推進に注力する組織やLF Edgeプロジェクトについても考察します。

まず、エッジAIとは何であるかを定義することから始めましょう。エッジ人工知能（AI）、またはエッジでのAIは、エッジコンピューティング環境でのAIの使用であり、データ処理がデータ収集ポイントの近くで行われるため、集中型データセンターやクラウド設備に依存する必要性が減少します。デバイスがクラウドにアクセスすることなく、よりスマートで迅速な意思決定を行えるようになることで、エッジAIは待ち時間を短縮し、アプリケーションのリアルタイムパフォーマンスを向上させます。

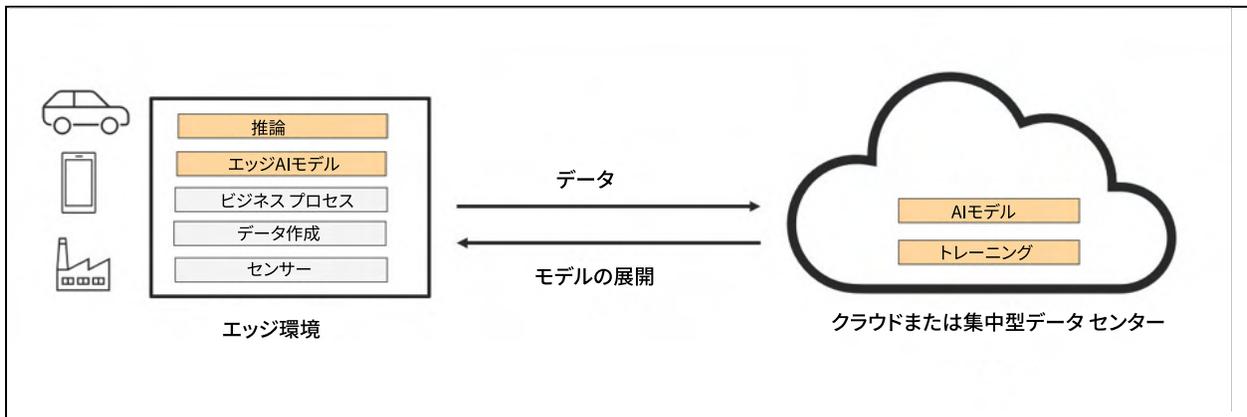
エッジAIは、エッジで生成されたデータがバックエンドのクラウドシステムに送られて処理される従来の（クラウドベースまたはデータセンターベースの）AIフレームワークとは異なります。エッジAIでは、AIモデルはエッジデバイスやローカルサーバーなどのエッジノードに直接展開されます。これにより、エッジに知能がもたらされ、デバイスがデータを収集するだけでなく、統合された機械学習（ML）モデルを使用してそれに対処することが可能になります。自律走行車、ファクトリーオートメーション、スマートシティなど、新たなエッジAIのユースケースによって、エッジコンピューティングの需要が急増しています。

エッジAIが従来のクラウドベースのAIとどのように異なるかを、以下の図を用いてさらに説明します。図4-1は従来のAIの構成を示しており、AIモデルとその学習・推論プロセスの両方がクラウドまたは集中型データセンターにホストされています。この構成では、センサーによって収集されたリアルタイムのデータと、ビジネスプロセスによって生成された学習データが、意思決定とモデル学習のためにクラウドに送信されます。クラウドベースの推論エンジンは、その後、決定や予測をエッジノードに送り返します。



図：4-1：従来のクラウドベースのAI設定

図4-2に描かれているように、エッジAIの構成では、推論はエッジ環境で直接行われます。エッジ環境は、クラウドからデプロイされた訓練済みAIモデルをホストします。エッジ環境がローカルでリアルタイム データを処理するため、クラウドの応答を待つ必要がなくなり、意思決定が高速化します。とはいえ、エッジ ノードは、AIモデルの再トレーニングと改良のために、ビジネス プロセス出力などの、一部の選択されたデータをクラウドに送信する必要があります。クラウドで精緻化されたAIモデルは、その後、エッジに展開され、パフォーマンスをさらに向上させることができます。次のセクションでは、分散型機械学習の実例である連合学習について説明します。



図：4-2：エッジAI環境

### 連合学習とエッジAI

このセクションでは、特にエッジAIと連合学習がどのように補完し合っているかに焦点を当てながら、連合学習の実例における大まかな概要を説明します。連合学習は、2016年にGoogleの研究者が"Communication-Efficient Learning of Deep Networks from Decentralized Data"という論文の中で紹介した比較的新しい概念です。このアプローチは、データの集中化を必要とすることなく、機械学習モデルを分散環境で学習させる方法について、大きな変革をもたらしました。

連合学習は分散型の機械学習アプローチであり、データがローカル デバイスやエッジ ノードに残ることを保証しながら、複数のデバイスや分散型データソースにまたがるモデル学習を可能にします。従来の機械学習では、データは収集され中央のサーバーに転送され、そこで様々なソースから集約されたデータを使ってモデルが学習されていました。対照的に、連合学習では、データはエッジ デバイスに分散されたままであり、重みまたは勾配のようなモデルの更新のみが中央のフェデレーションサーバーで共有されます。この構造により、機密データを集中管理する必要性が最小化され、データのプライバシーとセキュリティに関する懸念に対処できます。

エッジ コンピューティングと連合学習は、どちらも分散型コンピューティングの活用例であるため、密接に絡み合っています。両者は中央集中型のインフラだけに頼るのではなく、分散型の計算リソースとデータを活用することに重点を置いています。連合学習では、全体的なアーキテクチャは通常、中央インフラにあるフェデレーションサーバーの管理下にグローバルAIモデルを配置し、更にローカルAIモデルを様々なエッジデバイスや環境に配置し、分散環境のデータでトレーニングします。ローカルモデルは中央サーバーにアップデートを送信し、中央サーバーはそれを集約してグローバルモデルを改良します。

すべてのエッジAIユースケースが連合学習に依存しているわけではないことに注意が必要です。多くのエッジAIシナリオにおいて、エッジデバイスはモデルの再トレーニングや分析のために中央サーバーにデータを送信します。しかし、連合学習は、データ プライバシーの維持、ローカルAIモデルのパーソナライゼーションの実現、帯域幅の効率化などの理由から、エッジから中央のクラウドへのデータの流れを意図的に制限しています。このため、データの機密性やネットワークの制約が重要な要素となる環境では、特に高い価値があります。下図は、連合学習の設定を大まかに示したものです。

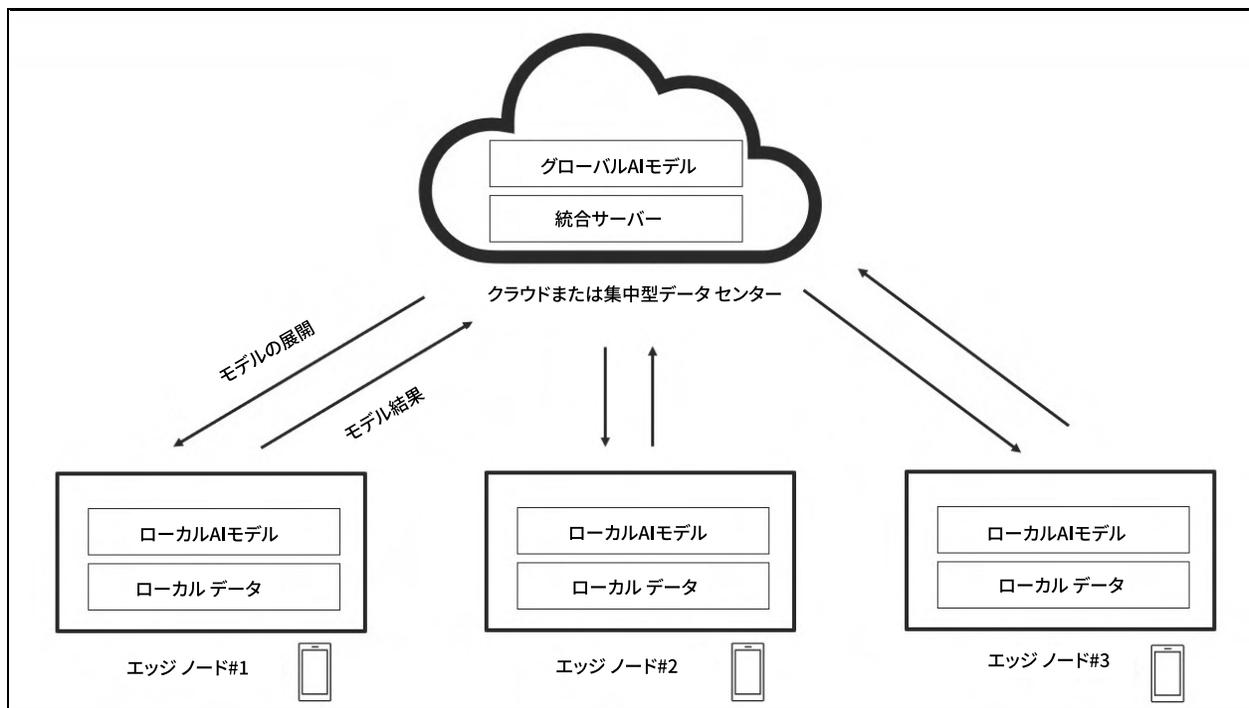


図4-3：連合学習の構成

### 連合学習サイクル

連合学習は、連合サーバーとローカル エッジ ノード間の継続的なフィードバックループなどの反復学習サイクルによって行われます。このセクションでは、エッジ ノードでのローカル学習と中央サーバーでのモデル集約がどのように相互作用してロバストなグローバルモデルを作成するのかに焦点を当てながら、連合学習サイクルの主要ステップの概要を説明します。下図は、連合学習サイクルの大まかな概要です。

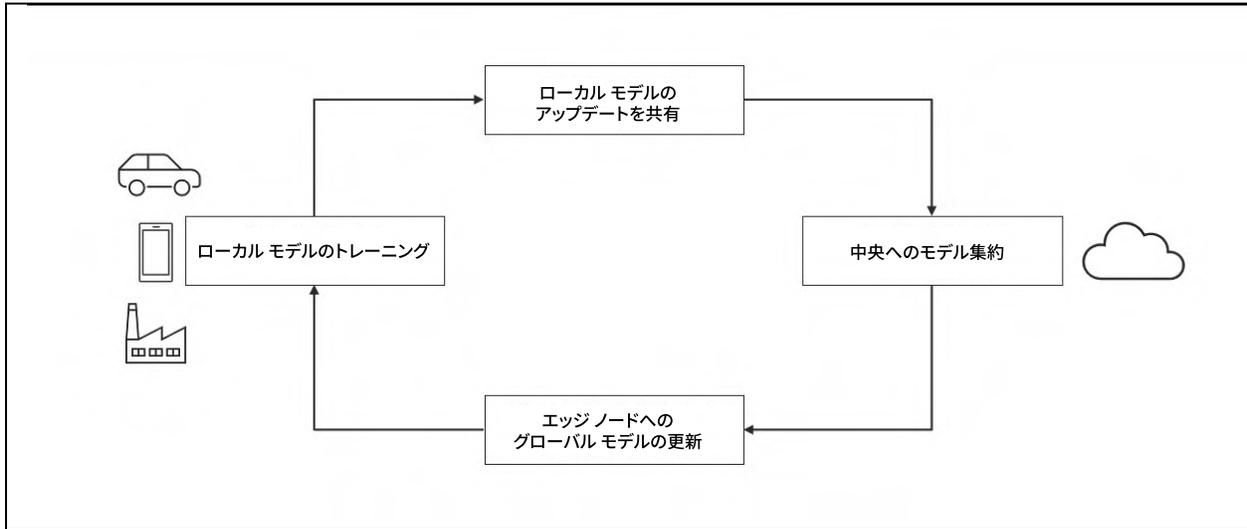


図4-4：連合学習サイクル

グローバルモデルの初期化：中央サーバー（連携サーバー）はグローバルな機械学習モデルを初期化し、参加するすべてのエッジノードやデバイスとモデルを共有します。

ローカルモデルのトレーニング：グローバルモデルの初期化後、クライアントとも呼ばれる各エッジノードは、自身のデータセットに対してローカルトレーニングを実行します。これにより、モデルはノード自体に存在するデータを使用して学習されるため、機密情報がプライベートかつ安全に保たれます。各エッジノードは、ローカルデータに存在する独自のパターンに基づいてモデルを更新します。

ローカルモデルの更新の共有：ローカルでのトレーニングが完了すると、各エッジノードはモデルの更新を行います。これらのアップデートは、生データそのものは送信せず、ローカルで加工したデータを中央サーバーに送信します。中央サーバーがデータに直接アクセスすることなく、幅広いデータソースから学習することを可能にするため、このステップは非常に重要です。

中央へのモデル集約：中央サーバーは、参加しているすべてのエッジノードからモデルの更新を収集し、それらを集約して新しいグローバルモデルを形成します。この集約プロセスには、すべてのエッジノードの集めた知識からグローバルモデルへ適切に反映されるように、加重平均やより複雑なアルゴリズムなどの技術が使用されます。

エッジノードへのグローバルモデルの更新：更新の集約に成功すると、中央サーバーは更新されたグローバルモデルを作成します。この新しいモデルはエッジノードに配布され、そこでプロセス全体が再び開始されます。各エッジノードは、改善されたグローバルモデルを使用してローカルトレーニングを継続し、時間の経過とともにモデルのパフォーマンスをさらに向上させることができます。

要約すると、連合学習サイクルはデータのプライバシーを保持し、大規模なデータ伝送の必要性を低減しながら、複数のエッジノードやデバイス間で協調的なモデル学習を可能にすることができます。このため、分散環境、特にプライバシーが重視される環境やリソースに制約のある環境において、機械学習モデルを開発するための非常に効果的なアプローチとなります。

### 連合学習のメリットと技術的課題

連合学習には、いくつかのメリットと技術的な課題があります。このセクションでは、これらの主なメリットと課題について説明します。ユーザーは、連合学習を導入することで、これらのメリットを活かすことができます。

- データのプライバシーとセキュリティ：データはローカルデバイスに保存されるため、機密情報（個人データ、医療記録、財務情報など）が中央サーバーに送信されることはありません。このメリットは、企業が医療分野のHIPAAやGDPRのようなデータ保護規制へのコンプライアンスを遵守する際に効果的です。
- ネットワーク効率：生のデータではなく、モデルの更新（重みや勾配など）のみが中央サーバーに送信されるため、連合学習は送信する必要のあるデータ量を大幅に削減することができます。そのため、帯域幅が限られていたり、接続が断続的であったりする環境に最適です。
- スケーラビリティ：連合学習は、巨大な中央集中型インフラを準備したり、中央のサーバーやネットワークに過負荷をかけることなく、膨大な数のエッジデバイスからの学習を可能にします。
- パーソナライゼーション：AIモデルは、汎用的なグローバルモデルに貢献しながらも、各デバイスの特定のデータパターンや個々のユーザーの行動に合わせてカスタマイズすることができます。

その一方で、連合学習の展開や運用において、いくつかの重要な技術的課題が発生する可能性があります。

- エッジノードとデバイスの不均一性：エッジノードの計算能力やネットワーク接続性はさまざまで、すべてのデバイスでトレーニングを同期させるのは困難です。
- non-IIDデータ：エッジデバイスのデータは、非独立同一分布（non-IID）であることが多く、各デバイスのデータが異なり、全体的な母集団をうまく表さない場合があります。これはモデルの偏りにつながり、ロバストなグローバルモデルの構築が困難になる場合があります。
- 通信オーバーヘッド：連合学習は生データを転送する必要はないものの、モデル更新の通信にはネットワークリソースが必要です。多数のデバイスを使用する大規模な展開ではなおさら、問題となる場合があります。
- 収束スピード：連合学習は、データの分布や品質が異なる多くの分散ソースから更新が行われるため、従来の集中型学習に比べて収束が遅くなる可能性があります。そのため、望ましい精度を達成するためには、より多くの反復が必要になるかもしれません。

## エッジAIユースケースにおける連合学習の応用

エッジAIのユースケースの多くは、特にユーザーにとってデータのプライバシーや保護が重要である場合、連合学習から大きな恩恵を受けることができます。ここでは、連合学習が適用可能で非常に有用な、エッジAIの用途をいくつか取り上げます。

**ヘルスケア：** 病院やウェアラブル フィットネストラッカーなどの医療機器は、機密性の高い医療情報を共有することなく、患者データを使ってローカル モデルをトレーニングすることができます。例えば、複数の病院が協力して、機密性の高い患者データを転送することなく、病気を診断するための機械学習モデルを改善することができます。

**スマートフォン：** 連合学習は、携帯電話の予測テキストやパーソナライズされたレコメンデーションなどのアプリケーションで採用されています。携帯電話は、タイピング パターンなどのユーザー固有のデータに対してローカルでモデルを学習し、データ自体をアップロードすることなくグローバル モデルに貢献します。

**自律走行車：** 各車両はローカルの走行データから学習し、時間とともに改善するグローバル モデルに貢献することができます。これは、生のセンサー データをクラウドに送信することなく、異なる環境での運転行動を学習するために特に有用です。

**スマート シティ：** 交通カメラや環境センサーなどのスマート シティのIoTセンサーは、ローカル データから学習し、交通最適化のためのグローバル モデルに貢献することができます。

**スマート ホーム デバイス：** 連合学習は、スマート ホームの音声アシスタント デバイスで使用することができ、ユーザーの対話に基づいて音声認識、ユーザー嗜好、自動化機能を向上させることができます。デバイスはユーザー固有の行動から学習し、プライベートな音声データを送信することなく、共有されたグローバル モデルに貢献しながら、よりパーソナライズされたサービスを提供することができます。

## エッジAIを支える主要なオープンソース フレームワークとツール

クラウドやデータセンター環境におけるAIのために開発された開発者向けフレームワークやオープンソース ライブラリは数多く存在しますが、これらは一般的にエッジ コンピューティング以外のユースケース向けに設計されています。そのため、これらのフレームワークがエッジ コンピューティング環境で効果的に機能するためには、エッジデバイス特有のニーズや特性に適合させる必要があります。クラウド環境とは異なり、エッジ コンピューティングは、計算能力、ストレージ、メモリが制限されることが多く、インフラもクラウドベースのデータセンターとは大きく異なっており、リソースに制約のある環境で動作させる必要があります。

エッジAIをサポートするには、多種多様なハードウェア構成、厳しい電力要件、断続的なインターネット接続、リアルタイム処理の必要性など、独自の課題が付きまといまいます。これらの制約により、これまではエッジ上でのAIソリューションはスケーラビリティやパフォーマンスを妨げられてきました。こうした問題を解消するため、業界で

はエッジに最適化されたAIフレームワークや移植性の高い開発者ツールを開発しており、開発者は生産性を犠牲にすることなくパフォーマンスを発揮できるソリューションの構築が可能になっています。

最近、PyTorch、TensorFlow、OpenShiftなど、人気の高いAIフレームワークやDevOpsツールのエッジ最適化バージョンが登場しています。これらのツールは、特にエッジ環境のニーズを満たすように設計されており、開発者が限られたリソースでデバイス上に機械学習モデルを展開することが簡単にできるようになっています。

本セクションでは、これらのAIフレームワークや開発者ツールを詳細に探り、それらがエッジコンピューティングの環境にどのように適合しているか、また効率的なエッジAIソリューションの構築に何が不可欠であるかを明らかにします。

ドメイン	親プロジェクト (オープンソース)	エッジ向けバリエーション
AIフレームワーク	PyTorch	<ul style="list-style-type: none"> <li>PyTorch Edge – ExecuTorch</li> </ul>
	TensorFlow	<ul style="list-style-type: none"> <li>Lite RunTime (LiteRT)</li> </ul>
コンテナ オーケストレーション	Kubernetes	<ul style="list-style-type: none"> <li>KubeEdge by CNCF</li> <li>MicroK8s by Canonical</li> <li>K3s by SUSE</li> <li>MicroShift by Red Hat</li> <li>K0s by Mirantis</li> <li>OpenYurt by Alibaba Cloud</li> </ul>
オペレーティングシステム	Linux	<ul style="list-style-type: none"> <li>Raspberry Pi OS Lite</li> <li>Ubuntu Core by Canonical</li> <li>In-Vehicle OS by Red Hat</li> <li>OpenWrt by OpenWrt Project</li> <li>Fedora IoT by Fedora Project</li> <li>Alpine Linux</li> </ul>

図4-5：エッジAIの導入をサポートする主要なオープンソースプロジェクトのエッジバリエーション

### PyTorch EdgeとExecuTorch

PyTorchもLinux Foundationの下でホストされており、主にディープラーニングモデルの開発とトレーニングに使用される人気のオープンソース機械学習フレームワークです。FacebookのAI研究所（FAIR）によって開発され、2016年にリリースされました。2022年、Meta（Facebookの親会社）はPyTorchプロジェクトのガバナンスをLinux Foundationに移管し、PyTorch Foundationを設立しました。このことは、オープンソース技術の育成で有名なLinux Foundationの傘下に移管することで、PyTorchが幅広いコミュニティからの支持と独立したガバナンスを持つオープンソースプロジェクトとして繁栄し続けることを保証するために実施されました。

PyTorchは、その使いやすさ、柔軟性、動的な計算グラフ機能で広く知られており、ニューラルネットワークの構築や実験を行う研究者や開発者の間で人気があります。PyTorchは、コンピュータビジョン、自然言語処理（NLP）、強化学習など、さまざまなアプリケーションをサポートしています。

エッジコンピューティング環境をサポートするために、PyTorchはエッジデバイス向けの革新的でプライバシーを意識したAI体験の構築を目的としたPyTorch Edgeを提供しています。PyTorch Edgeは、PyTorchの研究から生産までの機能をエッジデバイスに拡張し、多様なハードウェアプラットフォーム向けに最適化されたもので、優れた生産性、移植性、パフォーマンスを備えた革新的でプライバシーを意識した体験の構築が可能になります。

2023年、PyTorch Edgeエコシステムの一環として、PyTorch Foundationはエッジデバイス向けのランタイムであるExecuTorchを発表しました。ExecuTorchは、エッジデバイス上でPyTorchの推論を容易に実施できると同時に、ランタイムやフレームワークの負荷を抑え、ハードウェアプラットフォーム間での移植性を提供します。ExecuTorchは、Meta、Arm、Apple、Qualcommなどの業界リーダーとの共同開発によって開発されました。

ExecuTorchは、ウェアラブルデバイス、組み込みデバイス、マイクロコントローラなどのモバイルデバイスやエッジデバイスにおいて、デバイス上での推論機能を実現するエンドツーエンドのソリューションです。PyTorch Edgeエコシステムの一部であり、様々なPyTorchモデル（視覚、音声、生成AIなど）をエッジデバイスに効率的に導入することができます。ExecuTorchの主な価値は、移植性、生産性、パフォーマンスです。

### Lite Runtime（LiteRT）、旧TensorFlow Lite

TensorFlowもGoogle Brainによって開発された非常に人気のあるオープンソースの機械学習フレームワークであり、主に機械学習モデル、特にディープラーニングニューラルネットワークの構築とデプロイのためのソフトウェアです。TensorFlowは2015年にリリースされ、その柔軟性、スケーラビリティ、そして研究と本番環境の両方に対する機能の搭載により、瞬く間に一番人気のAI開発フレームワークとなりました。2019年にはTensorFlow 2.0がリリースされています。

LiteRT（Lite Runtimeの略称）は、Tensorflowエコシステムの一部であるオンデバイスAI用の高性能ランタイムです。Googleは2024年にTensorFlow Lite（TFLite）プロジェクトをLiteRTと改称しました。TFLiteは2017年に公開されました。開発者は、幅広いML/AIタスクへの利用において、即時実行できるLiteRTモデルを見つけることができたり、AI Edge変換・最適化ツールを使用してTensorFlow、PyTorch、JAXモデルをTFLite形式に変換したりして実行することができます。

LiteRTはGoogle AI Edgeツールの一部であり、開発者がMLやAIモデルをAndroid、iOS、組み込みデバイス上に展開するためのランタイムです。Google e suiteのロバストなモデル変換・最適化ツールと一緒に利用することで、開発者はオープンソースとカスタムモデルの両方をオンデバイス開発に適用させることができます。

LiteRTはオンデバイス機械学習（ODML）用に最適化されており、レイテンシー、プライバシー、接続性、消費電力、モデルサイズなど、エッジコンピューティングの主要な制約に対応しています。LiteRTは、AndroidやiOSモバイルデバイス、組み込みLinux、マイクロコントローラなど、複数のプラットフォームをサポートしています。LiteRTは、Python、Java、Swift、C++など、さまざまなプログラミング言語用のSDKを提供しています。また、GPUやiOS Core M/Lなどの専用デリゲートを用いたハードウェアアクセラレーションもサポートしています。

## Edge向けKubernetes

Kubernetesは、コンテナ化されたアプリケーションのデプロイ、スケーリング、管理を自動化するために設計された、一番人気のオープンソースコンテナオーケストレーションプラットフォームです。Kubernetes自体はEdge AIフレームワークではありませんが、現代のアプリケーションのほとんどはコンテナ化されたアーキテクチャで構築されているため、開発者がEdge AIアプリケーションを構築できるためには重要なプラットフォームです。

Kubernetesは2014年にGoogleによってオープンソースプロジェクトとして最初のリリースが実施されました。2015年、GoogleはKubernetesをLinux Foundation傘下のCloud Native Computing Foundation（CNCF）に寄贈し、最新のコンテナオーケストレーションエコシステムの基盤となりました。Kubernetesは、開発者や組織がコンテナのクラスターを効率的に管理し、分散環境全体で高可用性、負荷分散、自己修復、簡素化されたインフラ管理を保証することができるようにしています。

エッジデバイスや遠隔地など、リソースに制約のある環境でコンテナオーケストレーションを実行する際に発生する特有の課題に対処するため、Kubernetesの軽量でエッジに最適化されたバージョンがいくつか登場しています。これらのバージョンは、リソースのフットプリントを削減し、デプロイを簡素化し、エッジでKubernetesを実行する能力を向上させることを目的としています。

Edgeに最適化した人気の高いKubernetesディストリビューションには、CNCFのKubeEdge、CanonicalのMicroK8s、SUSEのK3s、Red HatのMicroShift、MirantisのK0s、Alibaba CloudのOpenYurtなどがあります。

## オペレーティングシステムのエッジバリエーション

軽量でエッジに最適化された汎用のAIフレームワークがあるように、Linuxベースのオペレーティングシステム（OS）には、エッジ環境やエッジデバイスで動作するように最適化されたものが数多くあります。これらのOSは、IoTデバイス、エッジサーバー、組み込みシステムなど、リソースに制約のある環境で動作するように特別な設計がされています。これらのOSは、少ないリソースでの利用、最小インストールサイズに重点を置いており、多くの場合、エッジでアプリケーションを効率的に展開するためのコンテナ化とオーケストレーションがサポートされています。

エッジに最適化されたLinuxベースのオペレーティング システムとしては、Raspberry Pi OS Lite、CanonicalのUbuntu Core、Red HatのIn-Vehicle OS、OpenWrtのOpenWrt、Project Linux、Fedora ProjectのFedora IoT、Alpine Linuxなどが有名です。

### 主なエッジAIの使用例

下図に示すように、AI/MLは多くの主だったエッジ コンピューティングのユースケースを実現できる基盤技術です。特に、ドローンから自動運転車まで、自律型デバイスの領域では、エッジAI技術がキーとなり実現されてきました。このセクションでは、急速に進展している主なエッジAIのユースケースをいくつか紹介します。

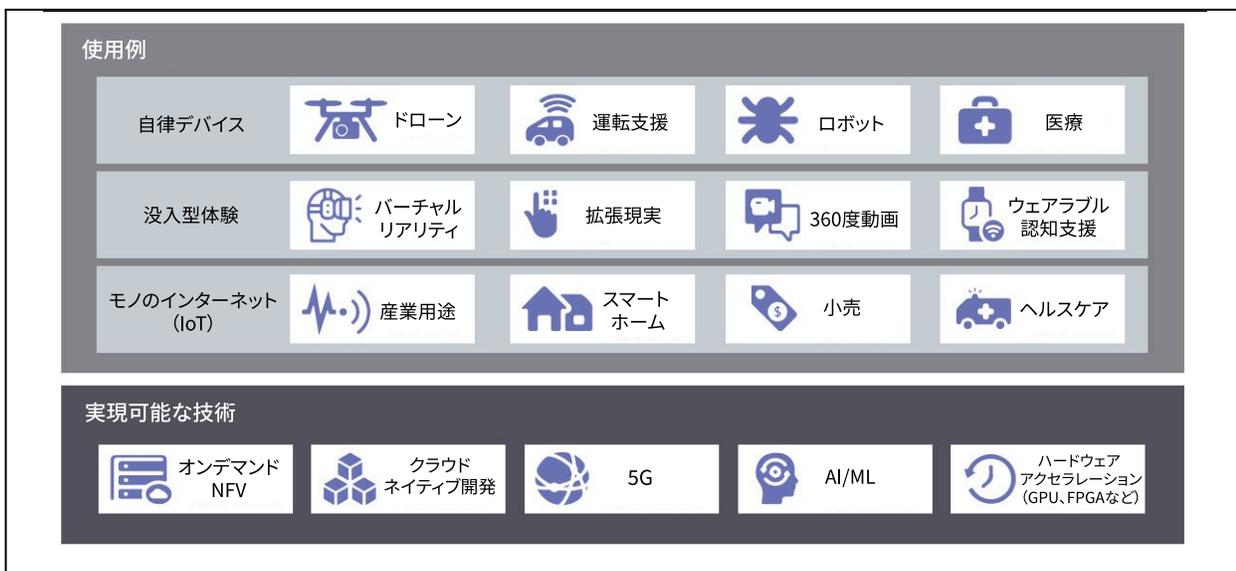


図4-6：LF Edgeが提供するエッジ コンピューティングの使用例

### 自律走行車

自律走行車、特に自動運転車は、リアルタイムの意思決定が進歩し、社会的関心が高まっていることから、エッジAIの代表的なユースケースであると言えます。2024年には、自律走行技術のリーダーであるWaymoによって、サンフランシスコ、ロサンゼルス、フェニックスなど米国の主要都市で商用ロボタクシー サービスが開始されました。

同時に、ChatGPTのような技術に代表される生成AIは、前例のないほど消費者への展開が進み、史上最速でソフトウェアが普及しました。自律型か否かにかかわらず、自動車との対話手段の変革には計り知れない可能性があります。しかし、自動車技術者協会（SAE）が定義するように、車両が自律的にすべての運転タスクを処理できるレベル5の自動化に到達するとなると、生成AIの能力には不確実性が残ります。

## AR/VR

ARとVRの技術は、私たちが認識している世界と想像で作られた世界の両方のデジタル化を象徴したものです。デジタルトランスフォーメーションという言葉は、2000年代前半から半ば頃に、企業がデジタル技術の事業や戦略への影響の大きさに気づき始めた頃に作られました。デジタルトランスフォーメーションが多くの組織でイノベーションを後押しし、それが近年AIによって劇的に強化されていますが、それと同様に、ARとVRの技術も社会に大きな影響を与える準備が整ってきています。また、AIはこれらの技術においても極めて重要な役割を果たすでしょう。

「XRはAIを待ち望んでいました」と、AR/VRテクノロジー企業であるMagic Leapの創業者Rony Abovitzは語っており、AIがAR/VRシステムの開発と適応における大きな推進力となっていることを力説しています。

## スマートシティ

スマートシティとは、さまざまな電子システムやセンサーを使ってデータを収集する、技術的に進んだ都市のことです。収集された情報は、資産、資源、サービスの効率的な管理に活用され、その恩恵として都市運営の改善に利用されます。

スマートシティでは、自動運転車は人の住む家を移動できるように拡張したものと捉え、都市そのものが自動運転車を運用する環境になると考えることができます。現在、5G携帯電話ネットワークのカバレッジは地球表面のわずか10%程度であり、スマートシティ構想には限界があります。しかし、来るべき6G技術は、地球低軌道（LEO）衛星や無人航空機（UAV）などの非地上系ネットワークを通じて、全世界をカバーすることが期待されています。6Gの登場により、「自宅のような場所」という考え方が、自動運転車だけでなく、自律飛行する航空機にまで適用されるようになる可能性があります。さらに、スマートシティ技術は、現在接続性の悪さにより実現が妨げられている地方にまで拡大する可能性もあります。

## エッジAIを支えるハードウェアの進化

本セクションでは、ハードウェアのイノベーションがエッジAIの開発をどのように推進しているかを探ります。オンデバイスAIパラダイムの出現、高度なAI動作のためのハードウェアとソフトウェアの協調設計、エッジコンピューティングのための分散データストレージアーキテクチャなどのトピックを取り上げます。

### オンデバイスAIの出現

近年、新しいAIのパラダイムがオンデバイスAIという形で出現しています。従来、AI/MLシステムは集中型データセンターの大容量サーバーに依存していました。対照的に、オンデバイスAIシステムは、スマートフォン、タブレット、その他のユーザーエッジデバイスなどのエッジデバイス上で直接実行されます。

私たちは、クラウドからエッジへのAIの移行を目の当たりにしてきました。計算能力の向上、豊富なセンサー データ、AIアルゴリズムの進歩によってこのトレンドが形成されてきました。その結果、機械学習はスマートフォンなどのデバイス上で直接実行されることが多くなり、クラウドベースの処理への依存度が低下しています。

オンデバイスAIアプリケーションの例としては、スマートフォン上の顔認識、音声アシスタント、画像処理アプリなどがあります。これらのアプリケーションは、最新の半導体技術による計算能力を活用し、ユーザーにリアルタイムAI機能を提供しています。Qualcomm、Samsung、Google、Apple、Nvidia、Arm、Intel、AMDなど、モバイルチップセットやモバイル デバイスを製造する企業は、この技術の最前線にいます。

### 高度なAI動作のためのハードウェア/ソフトウェア協調設計

ハードウェアとソフトウェアの協調設計は、システムのハードウェアとソフトウェアの両方のコンポーネントを独立して設計するのではなく、一緒に設計するというアプローチで、この手法はますます一般的になっています。このアプローチは、リソースに制約のある環境で効率的に動作するようにハードウェアとソフトウェアの両方を最適化することができ、エッジAIアプリケーションにとって特に有益です。

1960年代に最初のデータベース管理システム（DBMS）が開発された頃から、データベース アーキテクチャは、長年にわたりシングルコアCPUと限られたメイン デバイスなど、当時利用可能だった計算機ハードウェアに縛られてきました。その後、より強力なマルチコアCPU、より大容量のメモリ、より高速で大容量のディスクの導入に伴い、2種類のアプリケーションDBMS（ソフトウェア）が設計されました。一つは、より高速な情報の取り込みと処理を行うオンライントランザクション処理（OLTP）、もう一つは、大量のデータ保存と分析のためのオンライン分析処理（OLAP）です。リレーショナル データベースの場合、OLTPでは通常、少量の情報を素早く取り出すためにインデックス スキャンを使用するのに対し、OLAPデータベースでは、必要なときに大規模なデータ セットを処理するためにフル テーブル スキャンに頼ることが多くあります。同様に、ストレージは、最適なランダム インデックスIOとシーケンシャルなフル テーブル スキャンIOパターンの両方に対応し、より速い応答時間またはより高いIOスループットのいずれかを活用するように設計することができます。

2000年代、インターネット、SNS、モバイル機器からの爆発的なデータ量の増加は、機械学習アルゴリズムを進化させる原動力となり、ビッグデータと機械学習（ML）の台頭をもたらしました。近年では、オープンソース ソフトウェアとオープン ハードウェア イノベーションのコラボレーションにより、様々なハードウェア構成が実現可能となり、ソフトウェア設計のイノベーションが加速しています。生成AI、特に大規模言語モデル（LLM）は、AI/MLの研究と応用において支配的なトピックとなっています。また、特定のアプリケーション要件を満たすことができる柔軟なソフトウェアとハードウェア アーキテクチャを必要とするAI/MLワークロードも数多く存在します。

かつて、AIやML動作のほとんどの要件を、高速なプロセッサや並列処理数の増加が担ってきました。しかし、ムーアの法則の物理的限界に近づき、トランジスタの微細化が鈍化するにつれ、特定のAI/ML向けにハードウェアをカスタマイズすることで、ハードウェアの並列化、メモリ階層化、効率的なデータ移動のようなアルゴリズム最適化を

実現するなど、ドメイン固有のアーキテクチャの必要性が高まっています。また、このアプローチでは、スケーラビリティが高く、エネルギー効率に優れたシステムの構築を目指しています。

AI処理にとって不可欠な多くのハードウェア機能が、最新の技術によりすでに実現しています。例えば、大規模言語モデル（LLM）などのAIタスクは、膨大な量のデータを移動させます。そのため、計算ユニットがダイやチップ内で緊密に結合されていたとしても、サーバーのプリント基板（PCB）上に離れた場所に配置されていたとしても、サーバーラック間にまたがって配置されていたとしても、相互接続帯域幅が重要になります。ハードウェアアーキテクチャを設計する際には、チップレベル、サーバーレベル、大規模データセンター全体など、さまざまな階層において抽象化モデルが必要です。さらに、ネットワーク/ストレージにおける非ノイマン型計算の活用など、他のアーキテクチャの活用も有用です。

AI/MLの開発者やシステム管理者が、ハードウェア構成の選択や最適化に必要なワークロード詳細の分析に役立つ多くのツールが開発されています。そのようなツールの1つがPyTorch Profilerで、モデル演算子の時間とメモリ消費量を測定し、リソースを最も多く消費するコンポーネントを特定することができます。PyTorch Profilerの一部であるKinetoプロジェクトは、一般的なMLのボトルネックに対する性能確認と診断を行うことができ、課題に対して推奨される実用的な対策方法を提供してくれます。このツールは、AI/MLソフトウェアとアルゴリズムをより深く理解し、最先端の革新的ハードウェア技術を活用するために不可欠です。

ハードウェアの再構成機能により、性能向上のため、異種混合のドメイン固有のサブコンピューティングユニットを使用して、ディスクリットコンポーネントをシームレスに統合することができます。これらのユニットは、新たな論理計算ユニットに再構成され、新たなアプリケーションのための非ネイティブ演算をサポートすることができます。適応回復力や格子構造メモリ、動的精度を特徴とする次世代特殊ハードウェアが登場しつつあります。これらの進歩を最大限に活用するためには、AIアプリケーション固有の目標に沿ったハードウェア/ソフトウェアの共同設計が不可欠です。

### CXLによるエッジAI向け統合メモリストレージアーキテクチャ

エッジアプリケーションは地理的に分散しているため、耐久性や安全性が高く温度変動や耐振動性のあるストレージが必要です。エッジデータストレージは、最小限の消費電力で永続的に稼働しなければなりません。さらに、エッジアプリケーションは、特に人工知能（AI）処理をエッジで実行する場合、高速なストレージソリューションが必要になります。

AI処理を実行するエッジデータセンターにおけるコスト削減のため、Compute Express Link（CXL）技術の役割はますます重要になってきています。CXLは、プロセッサ、アクセラレータ、メモリデバイス間において低遅延のメモリキャッシュにおけるコヒーレントなつながりを提供できるように設計された、オープンな業界標準ソリューションです。

メモリシステムは、近くにあるCPUやアクセラレータがデータを処理する間、一時的にデータを保持します。メモリデバイスは高速で低遅延のアクセスを提供しますが、揮発性であるため、データを保持するために継続的に電力を必要とします。対照的に、ストレージは不揮発性で、電源が切れてもデータを保持しますが、レイテンシーは遅くなります。代表的なストレージの例としては、ハードディスクドライブ（HDD）やソリッドステートドライブ（SSD）があります。

バージョン3.0以降、CXLはコヒーレンスを意識せずに複数のホストでメモリを共有することができるようになり、ホストの介入なしにストレージがメモリに直接データを出し入れできるようになりました。CXLは多くの独自相互接続技術に取って代わり、多くのメモリへのアクセスを必要とするCPU、GPU、テンソル処理ユニット（TPU）であれば、業界標準のCXLインターフェイスで設計できるようになりました。CXLの低遅延やコヒーレンシー、メモリプール、共有能力の組み合わせは、システムアーキテクトが設計時に、揮発性メモリと永続性メモリの両方の大規模なプールを確保することを可能にする実用的な技術であり、複数インフラで確保したプールをまたいで拡張できるため、本当の意味で共有リソースとなります。

CXLにより、メモリとストレージ間で統一されたコヒーレントな高速接続ができるようになるため、従来あったメモリとストレージの境界がなくなります。この融合により、より柔軟で効率的な高性能計算環境を実現し、特に人工知能、ビッグデータ解析、エッジコンピューティングの分野におけるデータ集中型アプリケーションに恩恵をもたらします。

## デジタルツインとエッジAI

デジタルツインとエッジAIの領域では、データの品質がモデルやAI駆動の最終製品の性能と信頼性を大きく左右します。デジタルツインは、物理的な物体、プロセス、システムを仮想的に表現したもので、リアルタイムのモニタリング、分析、シミュレーションを可能にします。デジタルツインは、エッジAIテクノロジーを活用してデータをローカルで処理し、リアルタイムで応答性の高いシミュレーションと最適化を可能にします。

物理世界を効果的にバーチャル（デジタル）表現するためには、高品質なデータが不可欠です。物理世界をデジタルツインにマッピングするため高品質なデータには、正確性、再現性、完全性、適時性、整合性、信頼性、精密性、関連性、一貫性を兼ね備えることが要求されます。これらを満たすことで、デジタルツインは物理オブジェクトを忠実に反映し、価値ある分析結果を提供し、効果的な意思決定と最適化をサポートすることができます。

デジタルツインの概念は、2000年代初頭に航空宇宙産業にルーツを持つUniversity of MichiganのDr. Michael Grievesによって初めて紹介されました。強力な新しい生成AI技術の出現により、デジタルツインと生成AIの組み合わせによる相乗効果が期待でき、多くの産業で貴重な分析をもたらし、それぞれの価値を高めることに貢献しています。

Nvidiaは、デジタルツインにAIを活用するパイオニアです。NVIDIA OVX上で展開される同社のNVIDIA Omniverse Enterpriseプラットフォームは、AI対応のデジタルツインを作成する開発者をサポートし、工業製品やプロセスの

リアルタイムシミュレーションと最適化を可能にします。このような大規模シミュレーションは、製造業などの業界において、生産前に設備やワークフローを最適化するのに役立ちます。

Nvidiaのレポートによると、ヘルスケア分野は世界のデータの約3分の1を生み出しています。AI、アクセラレーションコンピューティング、リアルタイムセンシングの進歩は、創薬とヘルスケアに新たな可能性をもたらしています。TransformerモデルのAIは、生物学的な構造の解釈や、構造化されていない患者データの分析、医療画像の改善において研究者を支援しています。同時に、デジタルツイン技術の進歩により、研究者や臨床チームが細胞、臓器、外科手術のシミュレーションを行えるようになり、業務フローを深く理解することで、患者の転帰を改善することができるようになってきました。

AIチップセットは、数多くのデジタルツインのユースケースの原動力となっています。同時に、デジタルツイン技術は半導体の研究、開発、製造におけるイノベーションを促進しています。CHIPS for Americaの取り組みは、半導体製造、高度なパッケージング、組立、テスト工程におけるデジタルツインの開発、検証、応用に特化した研究所の設立を構想しています。

### 生成AIとデジタルツイン

生成AIにおいて実装ニーズやユースケースは、分析型AIとは異なります。分析型AIは広く導入され、過去のデータを利用して予測したり、プロセスや結果を改善したりするために利用されています。一方、生成AIは新たな可能性を切り開いています。生成AIは、現実世界では収集が困難だった合成データセットを生成し、デジタルツインの訓練に使用することができます。また、新しいデザインやプロトタイプを生成することで、物理的な作成に先駆けて、デジタルツインを使ってデザインを評価するのに活用できます。

生成AIは、現在のデータに基づいて将来のシナリオを数多く生成することができ、デジタルツインがそれを活用して準備や計画を立てることができます。複雑なシステム動作をモデル化し、より詳細で、微妙なシミュレーションをデジタルツインにより実現できます。生成AIは、デジタルツインがモデル化するシステムの最適な構成を見つけるために、大規模なパラメータ空間を探索することもできます。新しいプロセスフローを分析・生成することで、プロセスの改善を提案したり、それと同時にデジタルツインがテスト・検証することもできます。

### エッジAIに貢献する組織

エッジAIプロジェクトや標準化をサポートする組織や標準化団体がいくつかあります。LF Edge、LF AI and Data、PyTorch Foundationsは、Linux Foundation傘下で、エッジ上のデータやAIプロジェクトに取り組んでいる主要な組織です（第2章で既に述べた組織も同様です）。

### IEEE Standards Association

IEEE Standards Association (IEEE-SA) のProject 2805 (P2805) 傘下のワーキンググループは、P2805.3 Cloud-Edge Collaboration Protocols for Machine LearningやP2805.4 Standard for Edge Collaboration Protocols for Federated Learningなど、AIとエッジ コンピューティングを融合する複数のサブプロジェクトを主導しています。IEEE-SA P2805の詳細については、  
<https://standards.ieee.org/ieee/2805.1/7486> をご覧ください。

### Open Compute Project

Open Compute Project (OCP) は、エッジを含むスケーラブルで高性能なコンピューティングのためのオープンソースのハードウェアおよびソフトウェアソリューションの開発を推進する組織です。OCPは、AI処理を効率的に実行できるエッジ ハードウェアの開発を促進し、オープンで相互運用可能なハードウェア設計により、高性能なエッジAIソリューションを実現します。OCPの詳細については、  
<https://www.opencompute.org> をご覧ください。

### Eclipse Foundation

Eclipse Foundation傘下のEclipse IoTワーキンググループも、IoTおよびエッジ コンピューティングソリューションの開発を目的とした複数のオープンソース プロジェクトを主導するオープンソース組織であり、その多くはエッジにおけるAI機能の統合に焦点を当てています。Eclipse IoTの詳細については、  
<https://iot.eclipse.org> をご覧ください。

### TinyML Foundation

TinyML Foundationは、クラウドのエッジにおける低消費電力AIに焦点を当てた専門家、学術関係者、政策立案者のコミュニティーに力を注ぐ世界的な非営利団体です。TinyMLコミュニティーの技術範囲は、より高性能なAIシリコンや新しい仮想化、コンテナベースのアプローチなどが含まれており、小売業、ヘルスケア、農業、工業、海事産業まで幅広い業界のエッジAIソリューションを含んでいます。TinyML財団の詳細については、  
<https://www.tinyml.org> をご覧ください。

### Edge AI and Vision Alliance

2011年に設立されたEdge AI and Vision Alliance (旧Embedded Vision Alliance) は、エッジAIとビジョン技術の製品への採用を加速するために、技術提供者と最終製品の企業を結びつける世界的な業界パートナ

ーシップです。同アライアンスは、ビジョンアルゴリズム、カメラ、センサー、プロセッサ、開発ツール、ソフトウェアなどの技術に焦点を当てています。Edge AI and Vision Allianceの詳細については、<https://www.edge-ai-vision.com> をご覧ください。

## AIとデータに貢献するLF Edgeプロジェクト

エッジAI/MLは、ほぼすべてのLF Edgeプロジェクトにおいてコア コンポーネントとなっています。2024年や2023年後半、LF Edgeは4つの新しいプロジェクト**InfiniEdge AI**、**InstantX**、**EdgeLake**、**OpenBao**の編入を発表しました<sup>23</sup>。このうち、3つは、エッジAIやデータユースケースと密接に結びついたプロジェクトです。

- **InfiniEdge AI** は、リソースに制約のあるエッジ デバイスへの効率的かつ低遅延 AI モデルのデプロイを効率化することができる、統一オープン プラットフォームの確立を目指しています。スマートフォンやスマートスピーカーのようなデバイス向けに AI モデルを最適化することで、InfiniEdge AI は中央サーバーから独立して動作するリアルタイムアプリケーションの実現を可能にします。この取り組みにより、データトラフィックが削減され、ユーザーのプライバシーとセキュリティが大幅に強化されます。
- **InstantX**は、Vodafone Businessが初期コードを提供した新しいプロジェクトで、「far-edge」による計算能力を用いて、特定の地域のユーザー間でリアルタイムにデータを交換・配信するクラウドおよびエッジクラウドプラットフォームです。これは、同じ地域のクライアント間で非同期かつ瞬時にデータ交換を行いたいという課題を解決すると同時に、そのデータをオフライン処理や自己学習用に活用することで、さらなる付加価値を生み出すことができます。
- **EdgeLake**は、分散されたエッジ ノードを単一のマシンとして機能させ、データをそのソースでシームレスに取得、保存、管理します。。EdgeLakeは、分散エッジを仮想的で統合されたデータレイクに変化させ、SQLを使用してエッジ データからリアルタイムで分析結果を引き出すことを可能にします。

<sup>23</sup><https://www.linuxfoundation.org/press/open-edge-computing-hits-critical-mass-as-lf-edge-expands-technical-reach-with-4-new-projects-1>

第5章：

EDGE

*(POSTCARDS FROM THE EDGE)*



State of the Edgeの恒例企画として、2024年のエッジ コンピューティングの動向について、世界中の第一線で活躍する実務家に、企業や実務家にとって不可欠な見識を語ってもらいました。彼らのメッセージでは、最新のトレンドや、大きな課題、業界にとっての新たなチャンスについて語っています。本章では、彼らの見解を「Edgeからのポストカード」として紹介します。

これらの視点から、私たちが刺激を受けたように、あなたにも刺激となることを願っています。

Anthony Newman, Spectro Cloud

Michael Maxey, ZEVEDA

Edgeからのポストカード共同責任者

## 分散型アプリケーションが エッジを牽引

最近まで、エッジコンピューティングは解決策を探している問題のように思われていました。即ち、(集中型)クラウドでできなかったことのうち、エッジを使うことで実現できることは何か?と考えていました。

IBMでは、次世代プロジェクトやアプリ近代化プロジェクトにおいて、大企業との協業を信託されています。この中で、アプリケーションをコンテナに分割し、「スケールアウト」するため、分散させています。いまや公開されたアプリケーションは、新しいAIモデル、データ、機能が日々更新され、忘れ去られることはありません。物流拠点、オフィス、小売拠点、サプライヤーにおいて顧客が広く分散している場合、集中管理アプリケーションによる制約があると話になりません。顧客は、パフォーマンス、耐障害性、スケールを最適化するために、情報を収集、分析、配信するアプリケーションの一部をデプロイすることができる自由な動作を求めています。このような理由から、エッジコンピューティングは顧客にとって重要なインフラとなっています。



Andrew

**Andrew Coward**  
GM, IBM Software Defined Networking

## エッジの生活

私は、画期的なエッジ オーケストレーションのためのソリューション開発と展開を監督するという、またとない機会に恵まれています。ここZEDEDAでは、データが生まれ、意思決定が行われる現場にコンピューティングが近づいていくという革命の最前線にいます。

エッジ オーケストレーションの領域で仕事をするのは、爽快であると同時に挑戦的です。私たちは日々、分散コンピューティングの複雑さに取り組み、シームレスな接続性、セキュリティ、スケーラビリティを実現しています。私たちの使命は、エッジ コンピューティングを楽に、オープンに、そして本質的にセキュアにすることで、お客様に喜んでいただくことです。エッジの生活で最もやりがいを感じるこのひとつは、私たちの技術がもたらすイノベーションによる影響を実感することです。産業における業務効率の改善から、電気自動車・船舶の実現まで、エッジはイノベーションと現実が真に出会う場所なのです。



Eva

**Eva Feng**  
VP of Product, ZEDEDA

## K8sは簡単ではないが、 エッジに最適な プラットフォーム

Spectro Cloudでは、4回目となる「State of Production Kubernetes調査」を開始したばかりですが、収集した結果は、エッジがどのように成熟しつつあるかを示すもので、力強いストーリーを物語っています。

Kubernetesユーザーの27%が、エッジでのデプロイをフル稼働で行っていると回答しており、前年比4倍増となっています。また、AIの人気のエッジコンピューティングへの関心を高めていると答えたのは68%で、実際、エッジでK8sを実行しているユーザーの73%が、すでにエッジでAIを使用していると答えています！

しかし、まだ自画自賛はできません。セキュリティ、運用段階のオペレーション、フィールドエンジニアリングコストなど、エッジでの運営に関する懸念は年々高まっています。やるべきことはまだまだあります。



Saad

**Saad Malik**  
CTO and Co-Founder, Spectro Cloud

## アプリケーションの未来

アプリケーションの未来はエッジにあります。エッジでは、コンピューティング、ストレージ、データベース、AIが融合し、圧倒的なパフォーマンス、セキュリティ、信頼性を実現するとともに、開発の速度と運用の俊敏性を高めることができます。

アプリケーション開発の新たな標準となり、今や市場アナリストや影響力のある人々から認められています。この変化により、企業はイノベーションを加速させ、より迅速で拡張性の高いソリューションを提供することができます。



Rafael

Rafael Umann  
CEO, Azion

## 次世代オートメーションの要

プロセス製造が、より専門的でカスタマイズ可能なオペレーションを含むものに進化するにつれ、企業はシームレスなデータ モビリティという無限の自動化ビジョンを取り入れたソリューションを求めようになっています。この戦略において、エッジ技術は重要な役割を果たします。ネットワーク アーキテクチャを劇的に簡素化し、データの縦割りを排除し、データを民主化します。

リアルタイム制御や最適化データの安全な可視化機能がエッジソリューションにより情報の発信源に提供されることで、人材不足、サプライチェーンにおける問題、持続可能性への取り組み、クラウドに接続された世界に課題を抱えるチームが目標達成のために必要な次世代分析技術、シミュレーション、AI技術の導入が加速します。その結果、OTとITのイノベーションが融合し、制御、アナリティクス、コンテキスト化されたデータ モビリティが安全かつ直感的に結び付けられ、企業全体のパフォーマンスが改善されるでしょう。



Dave

Dave Denison  
VP Software Applications, Emerson

## エッジコンピューティングには、TCOを最適化した軽量でクラウドネイティブなインフラが必要

ソリューションは、さまざまな構成でネットワークリソース管理を最適化する必要があります。さまざまな業界で多様なデータ保護のニーズがあり、厳しいセキュリティ要件もあります。シリコンベンダーは、エッジコンピューティングの制約を満たすために、数多くのハードウェアプロセッシングユニットを開発しています。

成功の秘訣は、主要なオープンソース技術を組み合わせ、オーケストレーションし、一貫性のある汎用性の高いエコシステムとして保護するという総合的なアプローチです。このような協調的エコシステムにより、エッジやその先にあるあらゆるクラウド上で幅広く実行できるアプリケーションを実現する、拡張性の高い基盤を提供することができます。これこそが、オープンソースプラットフォームプロバイダーが目指し続けるゴールです。



Cédric

Cédric Gégout,  
VP of Products, Canonical

## 2026年までにエッジ収益の半分以上がAIのユースケースからもたらされるようになります

昨年、最大の市場の発展は、企業によるAIへの投資拡大でした。これがエッジインフラへの需要を刺激しています。

当社の市場予測では、2026年に特定可能なエッジの総売上50%がAIユースケースによるものになると推定しています。しかし、初期のユースケースで最も重視されるのは汎用AIではなく、高帯域、低遅延、データ主権を必要とするコンピュータビジョンのユースケースである可能性が高いと考えています。



Tilly

Tilly Gilbert,  
Director, Consulting & Edge Practice Lead, STL Partners

## より可用性の高いエッジへと進化

分析からサイバーセキュリティ、制御まで、増え続けるITとOTの処理を単一のプラットフォームでサポートするため、エッジに対してより強力なコンピューティングの需要が高まっています。

これらの処理の多くは業務に不可欠です。常にアクセスし続ける必要があるため、データとアプリケーションの可用性や信頼性の高さは、高評価を得るために重要です。企業は業務への影響を与えてしまう動作停止時間の削減を求めており、その新しいパフォーマンスベンチマークを達成するためにITインフラの近代化を進めています。年間わずか数秒のダウンタイムを達成することが急務となっています。

高可用性と耐障害性を備えたエッジコンピューティングに対する要求は、エッジAIの採用によってさらに加速するでしょう。



Stephen

**Stephen Greene,**  
VP, Global Marketing and Stratus Strategic Partnerships,  
Intelligent Platform Solutions, Stratus

## エッジはコンピューターに多くのものを求めています

分析からサイバーセキュリティ、制御まで、増え続けるITとOTの処理を単一のプラットフォームでサポートするため、エッジに対してより強力なコンピューティングの需要が高まっています。

これらの処理の多くは業務に不可欠です。常にアクセスし続ける必要があるため、データとアプリケーションの可用性や信頼性の高さは、高評価を得るために重要です。企業は業務への影響を与えてしまう動作停止時間の削減を求めており、その新しいパフォーマンスベンチマークを達成するためにITインフラの近代化を進めています。年間わずか数秒のダウンタイムを達成することが急務となっています。

高可用性と耐障害性を備えたエッジコンピューティングに対する要求は、エッジAIの採用によってさらに加速するでしょう。



Ross

**Ross Hamilton**  
Principal Systems Architect, OnLogic

## エッジルーティング、 IoT、IPv6 統合： 未来への相乗効果

当初、生成 AI は物理世界で作業する私たちにとって無関係に思えました。しかし、特定のユースケース向けに未来モデルを微調整する方法を学ぶにつれて、エッジでの AI の新たな出現が見られます。量子化された大規模言語モデルはモバイルデバイスやキオスクに登場していますが、真の力はセンサー フュージョンにあります。コンピューター支援によるオブジェクト検出から工場の現場での行動分析まで、大規模ビジョン モデルはリアルタイムの洞察の採用を加速し、はるかに堅牢なシミュレーションを可能にします。この変化は、AI を物理環境に統合する方法に革命をもたらし、テクノロジーをより適応的で現実世界のニーズに即したものにします。



Santiago

Santiago Blanquet  
VP of Growth, VyOS Networks

## エッジ技術により統一された データを統合

接続が進む世界において、クラウドにデータを拡張・公開できるオープンで統一されたシステムを開発するために、エッジ技術は極めて重要です。Losantでは、様々なデバイスやシステムの相互運用性とシームレスなデータ統合の推進が、エッジ コンピューティングによりもたらされると認識しています。

より発生源に近い場所でデータを処理・分析することで、リアルタイム分析力を獲得し、待ち時間の短縮や意思決定プロセスの改善ができます。また、エッジ技術は、クラウドの安全で効率的なデータ伝送を保証し、予知保全、ユーザー体験の向上、業務効率の合理化などのアプリケーションをサポートします。このような総合的なアプローチにより、リソースの利用が最適化され、拡張性と回復力のあるインフラが提供されるため、デジタル環境の進化し続ける需要に対応することができます。



Kevin

Kevin Niemiller  
Solutions Architect, Losant Enterprise IoT Platform

## エッジは私たちの周りにあります

現実世界は、データが生まれるエッジの周りに展開されています。これまでは、分散型AIインフラ、企業仕様のユースケース、クラウドの経済性がなかったため、データの可能性を最大限に活用することができませんでした。

しかし、こうした障壁は崩れ去りました。私たちがVapor IOで行ったようなインフラ投資により、消費に基づいて動作する狭領域AIファブリックが構築され、エッジインテリジェンスをサービスとして提供できるようになりました。同時に、IBM WatsonXのような強力なシステムが、すぐに利用できるAI機能を企業に提供し、何百万件ものエッジユースケースを引き寄せています。

この融合が、爆発的なイノベーションを引き起こしています。エッジデータと分散型AIの融合は、産業を変革し、新たな見識を生み出しています。私たちを取り巻く世界との関わり方に革命をもたらすことでしょう。



Cole

**Cole Crawford**  
Founder and CEO, Vapor IO

## 物理世界における生成AI： センサー フュージョンの 出現

当初、生成AIは物理的な世界で働く私たちには無関係に思えました。しかし、特定のユースケース向けにモデルをチューニングすることで、エッジによるAIが新たに出てくるようになりました。量子化された大規模な言語モデルがモバイル機器やキオスク端末に登場していますが、真の力を発揮するのはセンサーと結びついたときです。

コンピューター支援により物体検出から、工場現場での行動分析に至るまで、大規模なビジョン モデルはリアルタイムの分析結果の活用を加速し、従来に比べてはるかにロバストなシミュレーションが可能となります。この転換は、物理環境へのAIの適応方法に変革をもたらし、実世界のニーズに適応・反応させる技術にも変化をもたらすでしょう。



Daniel

**Daniel Feldhusen**  
Head of AI Solutions, Eviden

# 付録とクレジット

## 付録A：LF Edge サブプロジェクト ディレクトリ

このセクションでは、LF Edge傘下で活動中の各プロジェクトについて簡単に紹介します。読者のみなさんは、各プロジェクトで紹介されているウェブサイトを訪問し、詳細を確認し、ぜひ貢献者としてプロジェクトに参加することを検討してください。まず、LF Edgeのプロジェクトが成熟度別にどのように分類されているかを示し、次に各プロジェクトの詳細を説明します。

### LF Edgeプロジェクトの分類法（成熟度レベル別）

LF Edgeプロジェクトには成熟度レベルが設定されています。これは、正式なプロジェクト ライフサイクル文書（PLD）に定められたプロセスに従って投票され決定しています。成熟度レベルは、コミット数、POCでの使用、コミュニティへの参加、他のLF Edgeプロジェクトとの相互運用性/互換性、公開されているリリース サイクルなどに応じて、プロジェクトがライフサイクルのどの段階にあるかを示すものです。LF Edgeプロジェクトのステージに関する詳細は、[こちら](#)をご覧ください。

**ステージ1ー育成：**育成プロジェクトは、トップレベルのプロジェクトのエコシステムやエッジ エコシステム全体にとって重要であるもの、もしくはその可能性があるTACが認めたプロジェクトです。これらのプロジェクトは、開始されたばかりの初期段階のプロジェクトである場合もあれば、最小限のリソースで運用している既存プロジェクトである場合もあります。育成プロジェクトは、これらに有益で中立的な場を提供することで、協力的な開発を促進し、卒業プロセスを通じて他のFoundationプロジェクトとの連携を深める道筋を提供します。

**ステージ2ー成長：**成長プロジェクトは、影響力プロジェクトを目指し、そのための成長計画を明確にしたプロジェクトのステージです。成長プロジェクトは、TACから指導を受け、貢献者のコミュニティ、ガバナンス、プロジェクトの文書化、および成長計画で特定された広範な成功要因や採用要因となるその他の要素を積極的に開発することが期待されます。

**ステージ3ー影響力：**影響力プロジェクトは、成長目標を達成し、開発、メンテナンス、長期サポートの自立的なサイクルに入ったプロジェクトのステージです。影響力プロジェクトは、本番環境で広く使用されており、2つ以上の組織から多数の貢献者が参加する、大規模で確立されたプロジェクト コミュニティがあります。

**ステージ4ー名誉：**名誉プロジェクトとは、メンテナが、使用期間を終了させたり、もうすぐ終了すると考えているプロジェクトのことです。名誉プロジェクトは以前にエコシステムに貢献していたものの、より盛んにメンテナンスされている他のプロジェクトがあるなどの理由で、必ずしも今の開発で利用が推奨されていないものです。Foundationは、これらのプロジェクトやコミュニティが行ってきた貢献や、エコシステムの前進のために果たしてきた役割に対して感謝しています。

#### ステージ3-影響力プロジェクト



[Akraino](#) は、5G、AI、Edge IaaS/PaaS、IoTなど幅広いユースケースにまたがるエッジのためのオープンなインフラとアプリケーション設計案（BP）のセットで、プロバイダーと企業の両方のエッジドメインに対応しています。BPはAkrainoコミュニティによって作成され、あらゆる形態のエッジに特化したものがあります。これらのBPは、そのまま採用することも、カスタマイズにより新しいエッジBPに使用することもできます。現在、AkrainoのBPは20種類あり、ユーザーやコミュニティメンバーによっ

てサポートされた実際のハードウェア ラボでテストされ、検証されています。Akrainoコミュニティは、開発者やオープンソース参加者に共有リソースを提供することで、異なるハードウェア プラットフォームやアーキテクチャをまたぐ開発を容易にするために協力してきました。プロジェクトは、Airship、OpenStack、ONAP、ETSI MEC、GSMA、TIP、CNCF、ORANなど、複数の上流オープンソース コミュニティ/SDOと協力しています。Akrainoは、完全統合ソリューションを提供しており、統合スタックのゼロタッチ プロビジョニングやゼロタッチ ライフサイクル管理をサポートしています。



[EdgeX Foundry](#) は、エッジIoTプラグアンドプレイ、エコシステム対応の業界をリードするオープンソフトウェア プラットフォームです。EdgeXは、柔軟性と拡張性に優れたオープンソースのソフトウェア フレームワークで、IoTエッジにおけるデバイスとアプリケーション間の相互運用を促進します。デバイス データの取り込み、正規化、分析のための代替可能な参照サービスを提供することで、多くの専門的な市場でのIoTユースケースやビジネスのデジタル変革を加速します。また、EdgeX Foundryは、エッジでの自律運用やAIの実現など、新しいエッジ データ サービスや高度なエッジ コンピューティング アプリケーションもサポートします。

EdgeX IoTミドルウェア プラットフォームは、エッジのセンサー（つまり「モノ」）からデータを収集し、企業、クラウド、オンプレミスのアプリケーションとの間でデータを送受信するデュアル変換エンジンとして機能します。ステージ3のLF EdgeプロジェクトであるEdgeX Foundryは、コンテナのダウンロード数が700万を超えており、業界で幅広い支持を得ています。EdgeX Foundryは、Linux Foundationのもと、ベンダーに依存しないApache 2.0オープンソース ライセンス モデルとして提供されています。

LF EdgeのメンバーとEdgeX Foundryの貢献者は、商用サポート、トレーニング、顧客パイロット プログラム、デバイス接続、アプリケーション、データおよびシステム管理、セキュリティのプラグイン機能拡張など、さまざまな補完製品や補完サービスを生み出してきました。

さらにEdgeXは、Akraino、Home Edge、Open Horizonといった他のLF Edgeプロジェクトとも密接に連携しています。EdgeXは、Akraino Edge Lightweight IoT (ELIOT) のBP（設計案）の一部であり、Akraino Community Labの下でテストされています。Open Horizonは、コンテナ化されたソリューションとしてEdgeX Foundryの提供と管理を段階的に実証する統合プロジェクトを構築しています。Home Edgeとの連携により、一元管理されたデバイスをプライマリ デバイスとして指定し、さまざまなデバイスからのデータを保存することができます。



[Fledge](#) は成熟したIIoT（産業向けIoT）オープンソース プラットフォームで、2018年からプロセス製造業やディスクリット製造業で導入されています。オープンソース コミュニティであるLF Edge、LF Energy、OSDUの3つがこのプロジェクトに貢献しています。貢献者は多様で、産業ユーザー（RTE、Alliander、JEA、Honda Racing、Neuman Aluminum、BRP）、産業サプライヤー（AVEVA/OSIsoft、FLIR WAGO、Nexcom、Advantech）、機械学習イノベーター（Google、Dianomic、BIBA Research）などが含まれます。

Fledgeは、100以上の産業用プロトコル、データ マッピング、センサ プラグインを提供しており、OEE、ERP、ロジスティクス、MES、ヒストリアン、データベース、クラウド プロバイダー システムなどと接続する20以上の統合ソリューションです。Fledgeでプラグイン可能なマイクロサービスベースのアーキテクチャとUIは、データ パイプラインとワークロードのノーコード、

ローコード、ソースコード開発やプロビジョニングに対するOTユーザー コミュニティーの要件に対応しています。時系列データ、画像データ、ラジオメトリック データ、アレイ データ、振動データ、トランザクション データをサポートするFledgeは、OTエッジを統合し、スケーリング、管理のしやすさ、セキュリティを実現します。

開発者は、Fledgeのクイックスタート ガイドやコミュニティのサポートを活用することで、あらゆる産業資源や統合に対して、新しいプロトコルやデータ マッピングを迅速に単独で開発することができます。プラグインとして導入できるフィルター、ルール、MLランタイム、スクリプトを用いてエッジ アプリケーションを構築することで、OSSへの貢献やコラボレーションを容易に行うことができるようになります。

Fledgeは、EVEやAkrainoといった他のLF Edgeプロジェクトと深く連携しています。EVEはシステムとオーケストレーション サービスを提供し、Fledgeアプリケーションとサービスのためのコンテナ ランタイムを提供します。また、産業系オペレーターは、SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) に適用したものだけでなく、非SCADA接続マシン、IIoT、センサーを構築、管理、セキュア化し、サポートすることができます。FledgeはAkrainoとも統合されており、両プロジェクトは5GおよびプライベートLTEネットワークの展開をサポートしています。

## ステージ2-成長プロジェクト

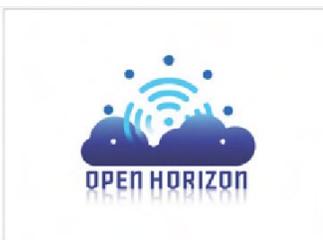


Project EVE は、従来のデータ センターと異なる、分散型エッジを用いたソリューション展開のため、オープンで厳選されたユニバーサルなオペレーティング システムを構築することで、Androidでモバイル向けに開発された機能を、エッジ向けに実現することを目指しています。Project EVE内で開発されたEVE-OSは、あらゆるアプリケーションとハードウェアのライフサイクル管理とリモート オーケストレーションを可能にし、制約のあるコンピューティング ノードまでスケールダウンし、ゼロトラストセキュリティ モデルを組み込むことで、現場でのエッジ コンピューティング展開特有の物理要件やサイバーセキュリティ要件を満たします。

プロジェクトの範囲：

- 柔軟でモジュール化されたセキュリティ内蔵の EVE-OS を提供
- リファレンス コントローラの実装を提供
- オープン オーケストレーション API の仕様と定義

Dockerコンテナ、Kubernetesクラスター、仮想マシンをサポートするEVE-OSにより、IoT、AI、ネットワーキング、セキュリティのユースケースにおいて、クラウドのような体験を分散型エッジ環境に拡張することができ、同時にレガシー ソフトウェアへのサポートにも対応します。EVE-OSは、エッジ ハードウェアの多様な構成からソフトウェアを切り離す抽象化レイヤーを提供し、アプリケーションの開発とデプロイをより簡単に、安全に、相互運用可能にします。LF Edgeの下でProject EVEをホスティングすることで、ベンダーに依存しないガバナンスとコミュニティ主導の開発が保証されます。



Open Horizon は、コンテナ化された処理と関連する機械学習資産のサービス ソフトウェア ライフサイクルを管理するためのプラットフォームであり、デバイスにデプロイされたアプリケーションだけでなく、分散されたウェブ規模のエッジ コンピューティング クラスター環境においても、すべて中央管理ハブが自律的に管理することができます。

Open Horizonは、ステージ1の育成プロジェクトとして2020年半ばにLF Edgeに参加しました。同時に3万台以上のエッジ デバイスを自律的に管理する機能を提供しています。また、1つのハブで最大1,000の組織（クライアント）のマルチテナントを処理する機能も備えています。

Open Horizonは、EdgeX FoundryやSecure Device Onboard（SDO）といった他のLF Edgeプロジェクトと連携しています。SDOは、エッジ ハードウェアにデバイスをより安全かつ自動的に立ち上げ、プロビジョニングする自動化された「ゼロタッチ」オンボード サービスです。Open Horizonとともに使用することで、インストーラの役割を簡素化し、コストを削減し、セキュリティの不備を軽減するゼロタッチ モデルを提供します。



[State of the Edge](#) は、エッジ コンピューティングに関するオープンな研究のためのベンダーに依存しないプラットフォームであり、エッジのための共有用語集をクラウド展開することで、イノベーションを加速させることを目的としています。このプロジェクトは、無料で共有可能な研究を行っており、エッジ コンピューティングと次世代インターネットが提供する魅力的なソリューションについて議論するために利用されています。

State of the Edgeプロジェクトは、LF Edge傘下で以下の資産を管理・生産しています。

- State of the Edge レポート：このドキュメントです。
- Open Glossary of Edge Computing（オープンなエッジ コンピューティング用語集）：エッジ コンピューティングに関連する用語を集めたフリーライセンスのオープンソース辞書です。
- Edge Computing Landscape：LF Edge プロジェクトをエッジ関連の組織やテクノロジーとともに分類し、エッジエコシステムの全体像をダイナミックにデータ駆動型で示したものです。

### ステージ1-育成プロジェクト



[eKuiper](#) は、Golangにより実装されたエッジ型の軽量IoTデータ分析/ストリーミングソフトウェアで、リソースに制約のある、あらゆる種類のエッジ デバイスで実行できます。eKuiperの目標の一つは、クラウド ストリーミングソフトウェアフレームワーク（Apache Spark、Apache Storm、Apache Flinkなど）をエッジに移行することです。eKuiperはこれらのクラウド ストリーミング フレームワークを参照しており、エッジ分析の特殊な要件を考慮して、Source、SQL（ビジネス ロジック）、Sinkに基づくルール エンジンを導入しています。ルール エンジンは、エッジ側でストリーミング アプリケーションを開発するために使用されます。

eKuiperは、2021年半ばにLF Edgeのステージ1の育成プロジェクトとして参加し、その後3回のメジャー リリースを行っています。Go言語に加え、Pythonによる外部システムとの接続や処理機能の拡張が可能です。その他、10以上の主要な機能により、ストリーム処理能力を強化し、使い方を簡素化しています。

eKuiperは、LF Edgeのプロジェクトに参加する以前から、一貫して他のプロジェクトと協力してきました。

eKuiperはEdgeX Foundryと密接に連携しています。2020年初頭からEdgeX Foundryのルール エンジン マイクロサービスとして参照されています。さらに、eKuiperはBeaetylにデプロイして実行することができます。



[Baetyl](#)（発音は「ビートル」）は、クラウド コンピューティング、データ、サービスをエッジ デバイスにシームレスに拡張し、開発者が軽量で安全かつスケーラブルなエッジ アプリケーションの構築ができる機能を提供します。

Baetylはエッジ コンピューティングのための汎用プラットフォームを提供しており、さまざまな種類のハードウェア設備とデバイス機能を標準化されたクラウドネイティブのランタイム環境とAPIで操作することで、クラウド上とオンプレミスの両方でリモート コンソールを介したアプリケーション、サービス、データフローの効率的な管理を可能にします。また、Baetylはエッジ オペレーティング システムに適切なツールチェーン サポートを搭載し、一連の組み込みサービスとAPIによってエッジ アプリケーション開発の難易度を下げることに貢献しています。



2021年にLF Edgeに参加した [Project Alvarium](#)は、Dell Technologiesによって初期のコードが生み出されたプロジェクトであり、デバイスからアプリケーションへのデータ配信を定量的な信頼性に基づき実行できるトラスト ファブリックのフレームワークと

SDKの構築を目的としています。シリコンからクラウドに至るトラスト インサクション技術を活用することで、相互接続されたエコシステムによって駆動されるビジネス モデルとユーザー体験の全く新しい時代を切り開くことができるシステムレベルのアプローチであるトラスト ファブリックを提供します。当初の参加企業には、Dell、IOTA Foundation、Intel、Arm、VMware、ZEDEDAなどがいました。

Alvariumは、その包括的な視点と、定量的な信頼性により、アプリケーションへのデータ提供を差別化しています。トラスト インサクション技術を刷新するのではなく統一することで、すべての市場やソリューション スタックに関連するシステムとして構築されています。

Alvariumのミッションは、トラスト インサクションのため、既存のオープンソースと商品の付加価値を結びつけるフレームワークとオープンAPIを作成し、信頼性スコア アルゴリズムを開発することです。また、他のLFプロジェクトや業界の取り組み（OSS、SDO）と協力して、既存のトラスト インサクション技術と新しいトラスト インサクション技術を統合し、スコアリング アルゴリズムを改良していきます。



[FIDO Device Onboard](#)は、自動化された「ゼロタッチ」立ち上げサービスで、エッジ デバイスを安全かつ自動的に立ち上げ、プロビジョニングします。デバイスは設置場所に提携先から直接導入され、ネットワークに接続され、電源が投入されるだけで、あとはSDOが行います。このゼロタッチ モデルは、インストーラの役割を簡素化し、コストを削減することができます。また、デフォルトのパスワードで出荷するような不適切なセキュリティ習慣を是正します。

FIDO Device Onboard（以前の名称はSecure Device Onboard）は、ステージ1の育成プロジェクトとして2020年半ばにLF Edgeに参加しました。FIDO Device Onboardは、より簡単、迅速、低コストでのセキュアなデバイス立ち上げを提供します。IoTデバイスのTAM（Total Available Market）を拡大することで、データ処理インフラのエコシステムを加速します。ほとんどの「ゼロタッチ」自動立ち上げソリューションでは、製造時にターゲット プラットフォームを決定する必要がありますが、SDOでは柔軟性が向上します。

## 付録B：オープンなエッジ コンピューティング用語集、バージョン2.0

オープンなエッジ コンピューティング用語集はLinux Foundationの公式プロジェクトであり、LF Edgeの設立プロジェクトでもあります。LF Edgeは、ハードウェア、シリコン、クラウド、オペレーティングシステムに依存しない、エッジ コンピューティングのためのオープンで相互運用可能なフレームワークを確立することを目的としたLinux Foundation内の統括組織です。

LF Edgeの一環である、オープン用語集は、エッジ コンピューティングと次世代インターネットのエコシステムに関する共通の理解を促進するために、組織やベンダーに依存しないプラットフォームを提供し、この共有用語集を開発し、改善するために様々なコミュニティを活用しています。このプロジェクトは、エッジ コンピューティング分野に関連する用語を厳選し、定義し、円滑化することを目指しています。プロジェクト参加者は、共通認識された定義をオープンライセンスのリポジトリに提出します。

この用語集は、使用と導入を奨励するため、Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International license (CC-BY-SA-4.0) の条件の下で自由にライセンスされています。マークダウン ファイルにクロスを構築するスクリプトや、プロフェッショナルなPDFを作成するスクリプトなどがあり、プロジェクトへのコードの貢献は、Apache License, version 2.0 (Apache-2.0) の下でライセンスされます。これらのライセンスは、公式にはプロジェクトのLICENSEファイルに記録されます。

- 用語集への投稿方法については [Contributing Guide](#) をご覧ください。
- 用語集のマークダウン版を見るには [edge-glossary.md](#) をご覧ください。

### 3G, 4G, 5G

それぞれ第3世代、第4世代、第5世代の携帯電話技術のこと。簡単に言えば、3Gはモバイルウェブ ブラウザを持ったスマートフォンの登場を意味し、4Gは現代の携帯電話技術です。来るべき5G携帯電話技術により、携帯電話は大きな帯域幅と低遅延を獲得し、スマートフォンから自律走行車や大規模IoTまで、さまざまなデバイスをサポートするようになります。インフラエッジを用いたエッジ コンピューティングは、5Gの重要な構成要素と考えられています。関連項目：インフラエッジ

#### Access Edge Layer (アクセス エッジ層)

例えば、携帯電話ネットワーク拠点に設置されているエッジデータセンターなどのように、エンドユーザーやデバイスに最も近いインフラエッジのサブレイヤーで、ラストマイルネットワークから0~1ホップ離れた階層のこと。アクセスエッジ層はインフラエッジの最前線として機能し、より上位階層であるアグリゲーションエッジ層に接続することができます。

関連項目：アグリゲーションエッジ層

#### Access Network (アクセス ネットワーク)

登録者やデバイスをローカル サービス プロバイダーに接続するネットワーク。サービス プロバイダー同士を接続するコアネットワークと対比されます。アクセスネットワークは、インフラエッジに直接接続します。関連項目：インフラエッジ

#### Aggregation Edge Layer (アグリゲーション エッジ層)

アクセスエッジ層から1ホップ離れたインフラエッジ層。中規模データセンターとして1カ所に存在することもあれば、複数のマイクロデータセンターを相互接続してアクセスエッジと階層型トポロジーを形成し、アクセスエッジ単独よりも高度な連携、処理のフェイルオーバー、スケーラビリティを実現する場合があります。関連項目：アクセスエッジ層

**Base Station (基地局)**

RAN内のネットワーク要素で、1つまたは複数のセルにおいて、ユーザー機器との間で無線信号の送受信を行います。基地局にはアンテナが内蔵されている場合もあれば、フィーダー ケーブルによってアンテナ アレイに接続されている場合もあります。専用のデジタル信号処理やネットワーク機能ハードウェアを使用します。最新のRANアーキテクチャでは、柔軟性、コスト、パフォーマンスを考慮して、基地局はソフトウェアで動作する複数の機能ブロックに分割されることもあります。

関連項目：クラウドRAN (C-RAN)

**Baseband Unit(BBU) (ベースバンド ユニット)**

ベースバンド無線信号処理を担当する基地局のコンポーネント。デジタル信号処理に特化したハードウェアを使用します。C-RANアーキテクチャでは、BBUの機能はVNFとしてソフトウェアで動作させることができます。関連項目：クラウドRAN (C-RAN)

**Central Office(CO) (セントラル オフィス)**

電話会社が歴史的に交換機を設置していた、特定の地域内に設置された電気通信インフラの集積ポイント。通信インフラ機器を設置するために物理的に設計されていますが、一般的には、床や暖房、冷房、換気、防火、電力供給システムが不十分なため、エッジ データ センター規模の計算機、データ ストレージ、ネットワーク リソースを設置するには適していません。ハードウェアがエッジでの利用を想定して特別に設計されている場合は、セントラル オフィスの物理的な制約に対応することができる場合があります。関連項目：データ センターとして再構築されたセントラル オフィス (CORD)

**Central Office Re-architected as Data Center(CORD) (データ センターとして再構築されたセントラル オフィス)**

CO内にデータ センター レベルの計算機とデータ ストレージ能力を配備する取り組みです。ただし、CO施設は一般的に、床や冷暖房、換気、防火、電力供給システムが不十分なため、エッジ データ センターのような規模の計算機、データ ストレージ、ネットワーク リソースを収容するには物理的に適していません。関連項目：セントラル オフィス (CO)

**Centralized Data Center (集中型データ センター)**

大規模なコンピューティング リソース、データ ストレージ、ネットワーク リソースを持ち、その規模の大きさから多くのテナントが同時に使用する、大規模な物理的構造体かつ論理的実体。大半のユーザーからは地理的に大きく離れた場所にあり、クラウド コンピューティングによく使用されます。関連項目：クラウド コンピューティング

**Cloud Computing (クラウド コンピューティング)**

ネットワーク、ストレージ、計算サービスを含む共有コンピューティング リソースへのオンデマンド アクセスを提供するシステム。現在では、少数の大規模集中型データ センターと地域データ センターを利用するのが一般的です。

関連項目：集中型データ センター

**Cloud Native Network Function(CNF) (クラウドネイティブ ネットワーク機能)**

クラウドネイティブ技術を使って構築・展開される仮想化ネットワーク機能 (VNF: Virtualized Network Function)。これらの技術には、コンテナ、サービス メッシュ、マイクロサービス、イミュータブル インフラ、宣言型APIなどが含まれており、疎結合かつ自動化されたシステムを通じて、パブリック、プライベートもしくはハイブリッドのクラウド環境への展開を可能にします。関連項目：仮想化ネットワーク機能 (VNF)

**Cloud Node (クラウド ノード)**

クラウド コンピューティング インフラの一部として運用される、個々のサーバーやその他のコンピューティング リソースのセットなどのコンピューティング ノード。通常、中央データ センター内に存在します。関連項目：エッジ ノード

### Cloud RAN(C-RAN) (クラウドRAN)

無線基地局の機能を実現するRANの進化系であり、リモート ラジオ ヘッド (RRH) と集中型BBUの2つに分類することができます。C-RANでは、各携帯電話無線アンテナにBBUを配置するのではなく、BBUをタワーからある程度離れたアグリゲーションポイントで動作させることができます。アグリゲーションポイントは、しばしば分散アンテナシステム (DAS) ハブ (distributed-antenna-system-das-hub) と呼ばれます。アグリゲーションポイントに複数のBBUを併設することで、インフラ効率が向上し、クラウドRANへの進化をよりスムーズに行うことができます。クラウドRANアーキテクチャでは、多くの場合、従来の基地局で実行されていたタスクを、汎用コンピューティング ハードウェア上のインフラ エッジ マイクロ データ センターで動作させるVNFとして実行します。これらのタスクは、高パフォーマンスかつ可能な限り低遅延で実行されなければならないため、それらをサポートするために携帯電話ネットワーク拠点でインフラ エッジ コンピューティングを使用する必要があります。関連項目：インフラ エッジ、分散アンテナシステム (DAS) ハブ

### Cloud Service Provider(CSP)

中央および地域のデータ センターで構成される、一般的に大規模なクラウド リソースを運用する組織のこと。パブリック クラウドの説明の中で非常に頻繁に使用されます。クラウド サービス オペレーター (CSO) とも呼ばれます。

関連項目：クラウド コンピューティング

### Cloudlet (クラウドレット)

学術界においてCarnegie Mellon UniversityのMahadev Satyanarayananによって広められたこの用語は、インフラ エッジにおけるモビリティを強化したパブリックまたはプライベート クラウドを指します。本用語集で定義するエッジ クラウドと同義です。また、文献ではエッジ データ センターやエッジ ノードと同じ意味で使われている場合もあります。3層コンピューティング アーキテクチャでは、「クラウドレット」という用語は中間層 (Tier 2) を指し、Tier 1はクラウド、Tier 3はスマートフォン、ウェアラブル デバイス、スマート センサーなど、重量/サイズ/エネルギーに制約のあるエンティティを指します。AkamaiのようなCDNの説明の中では、クラウドレットとは、CDNノードにセルフサービス可能なアプリケーションを配置することを指します。関連項目：エッジ クラウド、エッジ データ センター、エッジ ノード

### Co-Location (コロケーション)

異なる当事者が所有または運営する計算機、データ ストレージ、ネットワーク インフラを、同じ物理構造内など、同じ物理的な場所に配置するプロセス。コロケーションは、複数のテナントやユーザーを抱えるエッジ データ センターのようなインフラを必要としないため共有インフラとは異なります。関連項目：共有インフラ

### Computational Offloading (IT分野におけるオフローディング)

エッジ コンピューティングのユースケースで、タスクがエッジ デバイスからインフラ エッジに負荷を肩代わりし、リモート処理を行うこと。オフローディングは、例えば、タスク実行の待ち時間とモバイル デバイスのエネルギー消費を最小限に抑えることを目標に、計算をインフラ エッジにオフロードすることで、モバイル デバイスのパフォーマンス向上とエネルギー節約を目指します。また、オフローディングは、デバイス単体で利用できる能力を超える計算能力とストレージ容量を必要とする新たなレベルのモバイル アプリケーションの実現を可能にします (例えば、テザリングのないバーチャルリアリティ)。また、処理を集中型データ センターからエッジ データ センターにオフローディングし、パフォーマンスを向上させる場合もあります。この用語は、文献的にはクラウド オフローディングやサイバー フォージングとも呼ばれます。

関連項目：トラフィック オフローディング

### Content Delivery Network(CDN) (コンテンツ デリバリー ネットワーク)

ネットワーク全体に配置された分散型システムで、ストリーミング ビデオなどの人気コンテンツを、従来の集中型データ センターよりもユーザーに近い場所に配置することです。データ センターとは異なりCDNノードには通常、高密度な計算リソースを持たないデータ ストレージを持っています。インフラ エッジでのコンピューティングを使用する場合、CDNノードはエッジ データ センターのソフトウェアとして動作します。関連項目：エッジ データ センター

### Core Network（コア ネットワーク）

アクセス ネットワークやそれに接続された機器を、他のネットワーク事業者やサービス プロバイダーと接続するサービス プロバイダー ネットワークの階層。インターネットや他のネットワークとの間で使用されます。インフラ エッジの計算リソースから数ホップ離れている場合もあります。関連項目：アクセス ネットワーク

### Customer-Premises Equipment(CPE)（顧客構内設備）

ネットワーク サービスの加入者がサービス プロバイダーのアクセス ネットワークに接続するための、ケーブル ネットワーク モデムなどのローカル機器のこと。通常、インフラ エッジのコンピューティング リソースよりエンドユーザーに1ホップ近い位置にあたります。

関連項目：アクセス ネットワーク

### Data Center（データ センター）

複数の高性能計算ノードやデータ ストレージ ノードを配置し、大量の計算、データ ストレージ、ネットワーク リソースを1カ所に集約することを目的に設計された構造体。専用のラックや筐体システム、専用の床、適切な暖房、冷却、換気、セキュリティ、防火、電力供給システムなどが必要となることが多くあります。文脈によっては、計算ノードやデータ ストレージ ノードを指すこともあります。集中型データ センター、地域型データ センター、エッジ データ センターなど、規模によって異なります。 関連項目：集中型データ センター

### Data Gravity（データ重力）

データはネットワーク上を自由に移動できるわけではなく、データ量とネットワーク エンドポイント間の距離が遠くなるにつれて、そのコストと難易度が高くなります。大規模なデータ取り込みを必要とするアプリケーションでは重力が大きくなります。

関連項目：エッジ ネイティブ アプリケーション

### Data Ingest（データ インジェスト）

大量のデータを取り込んで保存し、その後処理するプロセスのこと。例えば、エッジ データ センターがビデオ監視ネットワークの映像を大量に保存し、それを処理して対象者を特定するようなケースのことを言います。関連項目：エッジ ネイティブ アプリケーション

### Data Reduction（データ削減）

データの生産者と最終的な受信者の間の中間点を利用して、データの意味を失うことなく、送信されるデータ量をインテリジェントに削減するプロセスのこと。例えば、スマート データ重複排除システムなどがあります。関連項目：エッジ ネイティブ アプリケーション

### Data Sovereignty（データ主権）

データは、その国、州、業界の法律や規制、またはその使用や移動に適用される法的枠組みに従うという概念のこと。

関連項目：エッジ

ネイティブ アプリケーション

### Decision Support（意思決定支援）

生データのインテリジェントな分析結果を使用して、人間のオペレーターにとって意味のある推奨情報を生成すること。例えば、インフラ エッジ内のIoTデバイスからの大量のセンサー データを処理したもから、人間のオペレーターや高度な自動化システムが解釈し、意味のある単一のステートメントを生成すること。関連項目：エッジ ネイティブ アプリケーション

### Device Edge（デバイス エッジ）

ラスト マイル ネットワークのデバイス側またはユーザー側のエッジ コンピューティング機能のこと。多くの場合、デバイスからデータを収集し処理するために、現場のゲートウェイまたはそれに相当するデバイスに依存します。また、エッジ コンピューティングを処理するために、スマートフォン、ノートパソコン、センサーなどのユーザー デバイスから、限られた範囲の予備の計算能力とデータ ストレージ能力を使用することもあります。デバイスのリソースを使用するため、インフラ エッジとは異なります。関連項目：インフラ エッジ

### Device Edge Cloud (デバイス エッジ クラウド)

エッジクラウドの概念を拡張したもので、特定の処理をデバイス エッジで利用可能なリソースで処理できるようにしたもの。通常、クラウドのような弾力的に割り当てられるリソースは提供されませんが、ゼロ遅延処理には最適な場合があります。関連項目：エッジクラウド

### Distributed Antenna System(DAS) Hub (分散アンテナ システム ハブ)

多数の無線通信機器の集約ポイントとして機能する場所であり、一般的に携帯電話ネットワークをサポートします。インフラ エッジに配置されたエッジ データ センターが含まれる場合と、直接接続されている場合があります。関連項目：エッジ データ センター

### Edge Cloud (エッジ クラウド)

インフラエッジに配置されるクラウドのような機能で、ユーザー視点で見た場合、弾力的な割り当てが可能な計算能力、データストレージ、ネットワークリソースへのアクセスのこと。多くの場合、集中型パブリッククラウドやプライベートクラウドのシームレスな拡張として運用されることが多く、インフラエッジに配置されたマイクロデータセンターから構築されます。分散エッジクラウドと呼ばれることもあります。

関連項目：クラウド コンピューティング

### Edge Computing (エッジ コンピューティング)

アプリケーションやサービスのパフォーマンス、運用コスト、信頼性を向上させるために、ネットワークの論理構成上での端々にコンピューターを配置すること。エッジコンピューティングは、デバイスとそれを提供するクラウドリソース間の距離を短縮し、ネットワークホップを減らすことで、現在のインターネットで発生する待ち時間や帯域幅の制約を緩和し、新しいレベルのアプリケーションを生み出します。実運用で言うと、現在はインフラ側とデバイス側の双方において、特にラストマイルネットワークの近くに集中して配置されていますが、それだけに限らず、集中型データセンターと、増加しているフィールドデバイスの間の経路に沿って、新しいリソースやソフトウェアスタックを配置することを意味しています。関連項目：インフラエッジ

### Edge Data Center (エッジ データ センター)

従来の集中型データセンターと比較して、ネットワークのエッジに可能な限り近い場所に配置されるデータセンターのこと。従来の集中型データセンターと比較して集中型データセンターと同じ機能を小規模ながら個別に実行できます。物理空間上で広く分散されているという特殊な制約により、エッジデータセンターでは自律的な運用、マルチテナント、分散型かつローカルな回復力、オープンスタンダードが採用されることが多くあります。エッジとは、一般的にこれらのデータセンターが配置される場所を指します。エッジデータセンターの規模は、50～150kW強の小規模です。複数のエッジデータセンターが相互接続することで、ローカルエリア内で容量増強、障害緩和、ワークロード移行を実現し、仮想データセンターとして運用されます。関連項目：仮想データセンター

### Edge Exchange (エッジ エクスチェンジ)

インフラのエッジデータセンター内でインターネット接続前通信として発生するトラフィックエクスチェンジのこと。この機能は通常、インフラエッジデータセンターのエッジミートミールームで実行されます。インターネット接続におけるトラフィックと同様にエッジエクスチェンジで宛先の場所が存在しない場合には、従来の集中型インターネットエクスチェンジポイントで補助的または階層的に動作することがあります。エッジエクスチェンジは、集中型インターネットエクスチェンジと比較して、エンドツーエンドでのアプリケーション遅延を改善する目的で使用されることがあります。関連項目：インターネットエクスチェンジポイント (IXP)

### Edge Meet Me Room (エッジ ミート ミールーム)

エッジデータセンター内に置かれるエリアで、テナントや通信プロバイダーが従来のミートミールーム環境と同じ方法で、エッジを除く他のエッジデータセンターと相互接続できるようにすること。関連項目：相互接続

### Edge Network Fabric (エッジ ネットワーク ファブリック)

ネットワーク相互接続システムで、一般的に余剰または使用中のファイバー ネットワークを使用し、インフラ エッジ データ センター間やエリア内の潜在的な他のローカル インフラ間の接続を提供すること。これらのネットワークは、その規模や運用頻度の高さから、メトロポリタン エリア ネットワークと表現されることもあり、通常は都心部にあり、地理的なエリア間にまたがっています。関連項目：エッジ エクスチェンジ

### Edge Node (エッジ ノード)

エッジ コンピューティング インフラの一部として運用される、サーバーやその他の計算機リソースのセットなどの計算ノード単体のこと。通常、インフラ エッジで動作するエッジ データ センター内に存在するため、集中型データ センター内のクラウド ノードよりも物理的に利用者に近い場所に存在します。関連項目：クラウド ノード

### Edge-Enhanced Application (エッジ拡張アプリケーション)

集中型データ センターで動作可能なアプリケーションだが、エッジ コンピューティングを使用して動作させると、パフォーマンス（通常はレイテンシー）や機能面で有利になるアプリケーション。このようなアプリケーションは、集中型データ センターで動作する既存のアプリケーションを転用する場合や、変更を必要としない場合もあります。関連項目：エッジ ネイティブ アプリケーション

### Edge-Native Application (エッジ ネイティブ アプリケーション)

集中型データ センターでの運用が現実的でない、または望ましくないアプリケーションのこと。低遅延や大量のデータ移動といった要件があったり、データのローカルでの作成や利用、規制上の制約など、さまざまな要因によることがあります。これらのアプリケーションは通常、インフラ エッジのエッジ データ センター向けに開発され、そこで動作します。大規模なデータ取り込み、データ削減、リアルタイムの意思決定支援、データ主権問題の解決などのためにインフラ エッジを利用する場合もあります。関連項目：エッジ拡張アプリケーション

### Fog Computing (フォグ コンピューティング)

分散コンピューティングの概念の一つで、パフォーマンスと冗長性を向上させる目的で、アプリケーションとそのデータだけでなく、計算リソースやデータ ストレージ リソースを、ユーザーとクラウドの間の最適な場所に配置させること。フォグ コンピューティングにより、クラウドからインフラ エッジまでの、計算リソースとデータ ストレージ リソースのグラデーションを活用して処理を実行することができます。フォグ コンピューティングという用語は、もともとCiscoによって提唱されました。集中型、地域型、エッジ型のデータ センターを利用することができます。関連項目：ワークロード オーケストレーション

### Gateway Device (ゲートウェイ デバイス)

デバイス エッジのサブカテゴリーで、他のローカル デバイスのゲートウェイとして動作するラスト マイル ネットワークのデバイス エッジ側のデバイスを指します。その目的は、ローカル デバイス間のデータ転送を集約および促進することです。関連項目：リソース制約デバイス

### Infrastructure Edge (インフラ エッジ)

エッジ コンピューティング機能のこと。通常、1つまたは複数のエッジ データ センターの形態で、ラスト マイル ネットワークの事業者側に配置されます。インフラ エッジに配置された計算機、データ ストレージ、ネットワーク リソースにより、リソースの弾力的な割り当てなど集中型データ センターと同様のクラウド的な機能が実現されますが、集中型や地域型のデータ センターよりもユーザーへの局所性が高いため、待ち時間を短くしたり、データ転送コストを低くすることができます。関連項目：デバイス エッジ

### Local Breakout (ローカル ブレイクアウト)

インターネットに接続されたトラフィックを、エッジ データ センターなどのエッジ ネットワーク ノードからインターネットに接続する機能

### Interconnection（相互接続）

インターネットピアリングポイント、ミートミールーム、キャリアホテルなどとも言い、ある当事者のネットワークを別の当事者のネットワークに接続する設備のことで、多くの場合光ケーブルを介した接続のこと。エッジミートミールームなど、2つのデータセンター間、またはデータセンター内のテナント間の接続を指すこともあります。

関連項目：エッジミートミールーム

### Internet Edge（インターネットエッジ）

インフラエッジ内のサブレイヤーで、インフラエッジとインターネットの相互接続が行われる設備のこと。エッジミートミールームや、高性能な相互接続を提供するために使用されるその他の機器を含む場合があります。関連項目：相互接続

### Internet Exchange Point (IXP)（インターネットエクスチェンジポイント）

大規模なネットワークプロバイダーなどがトラフィックを直接交換するために集積された場所のこと。一般的なサービスプロバイダーは、IXPを介して最上位層のグローバルプロバイダーとそのネットワークにアクセスしますが、IXPは同種のネットワークのミートポイントとしても機能します。IXPは組織によって、トラフィック交換やピアリングに利用できる場合もあり、キャリアホテルと呼ばれることもあります。インターネットエッジがIXPに接続することも多くあります。関連項目：インターネットエッジ

### IP Aggregation（IPアグリゲーション）

インフラエッジの計算リソース、データストレージリソースおよびネットワークリソースを使用して、携帯電話ネットワークのRANから受信したネットワークデータを可能な限り早い時点で分離し、ルーティングすること。IPアグリゲーションが使用されていない場合、このデータはインターネットまたは別のネットワークにルーティングされる前に、ローカルCOまたは他のアグリゲーションポイントまで長い経路を通る必要があります。ユーザーの携帯電話ネットワークのサービス品質を向上します。関連項目：サービス品質（QoS）

### Jitter（ジッター）

ある期間にわたって観測されるネットワークデータ伝送遅延の変動量のこと。測定期間中に記録されたレイテンシーの最低値から最高値までの範囲でミリ秒単位で測定されます。VoIP、自律走行、オンラインゲームなどのように待ち時間のばらつきがほとんどないリアルタイムアプリケーションにとって、この指標の変化は重要な指標となります。関連項目：サービス品質（QoS）

### Last Mile（ラストマイル）

サービスプロバイダーと顧客を結ぶ通信ネットワーク区分のこと。接続の種類や、顧客とインフラ間の距離によって、顧客が利用できるパフォーマンスとサービスが決まります。ラストマイルはアクセスネットワークの一部であり、サービスプロバイダーの管理下にあるユーザーに最も近いネットワーク区分でもあります。例えば、DOCSISヘッドエンドサイトからケーブルモデムまでの有線接続や、顧客のモバイル機器と携帯電話ネットワークサイト間の無線接続などがあります。関連項目：アクセスネットワーク

### Latency（レイテンシー）

ネットワークデータ通信において、単位データ（通常はフレームまたはパケット）が発信元デバイスから送信先デバイスに到達するまでにかかる時間のこと。2つ以上のエンドポイント間で、1回または繰り返しにより、ミリ秒単位で測定されます。最新のアプリケーションのユーザー体験を最適化するための重要な指標です。時間の経過に伴う遅延のばらつきを指すジッターとは異なります。ラウンドトリップタイム（RTT）と表現されることもあります。関連項目：サービス品質（QoS）

**Latency Critical Application (レイテンシー クリティカル アプリケーション)**

待ち時間が特定の閾値を超えると機能しなくなったり、または破壊的な動作をするアプリケーションのこと。レイテンシー クリティカル アプリケーションは通常、自律走行車のサポートやマシンツーマシン プロセスの制御などのリアルタイム タスクを担当します。レイテンシー センシティブ アプリケーションとは異なり、レイテンシー要件を超えると、多くの場合、アプリケーションの障害が発生します。

関連項目：エッジ ネイティブ アプリケーション

**Latency Sensitive Application (レイテンシー センシティブ アプリケーション)**

待ち時間を短縮することでパフォーマンスが向上するものの、待ち時間が要求より長い場合にも機能することができるアプリケーションのこと。レイテンシー クリティカル アプリケーションとは異なり、レイテンシー目標値を超えてもアプリケーションに障害が発生することはないものの、ユーザー体験が低下する可能性があります。例えば、画像処理やバルク データ転送などがあります。関連項目：エッジ 拡張アプリケーション

**Location Awareness (位置認識)**

RANデータおよびその他の利用可能なデータ ソースを使用して、ユーザーがどこにいるのか、また近い将来どこに向かう可能性があるのかを高精度で特定し、アプリケーションのパフォーマンスを最適化するために処理を変更すること。関連項目：位置ベースのノード選択

**Location-Based Node Selection (位置ベースのノード選択)**

アプリケーションの処理性能を向上させる目的で、デバイスの物理的な位置に対するノードの相対的な位置関係に基づいて、処理を実行する最適なエッジ ノードを選択する方法のこと。ワークロード オーケストレーションの一部です。関連項目：ワークロード オーケストレーション

**Micro Modular Data Center(MMDC) (マイクロ モジュラー データ センター)**

モジュラー データ センターのコンセプトを小規模に適用したデータ センターで、通常は50~150kW程度の容量の設備のこと。必要に応じて屋内や屋外に設置できるラック マウント キャビネットなど、さまざまな形態が考えられます。大型のモジュラー型データ センターと同様に、マイクロ モジュラー型データ センターも他のデータ センターと連携することで、特定地域で利用可能なリソースを増やすことができます。

関連項目：エッジ データ センター

**Mobile Edge (モバイル エッジ)**

リアルタイムの自律走行制御、自律走行経路探索、車内エンターテインメントなど、特定のユースケースをサポートするために調整されたインフラエッジ、デバイスエッジ、ネットワーク スライシング機能の組み合わせのこと。このようなアプリケーションでは、高帯域幅、低レイテンシー、シームレスな信頼性が求められることが多くあります。関連項目：インフラ エッジ

**Mobile Network Operator(MNO) (移動体通信事業者)**

携帯電話ネットワークの事業者で、通常、ネットワークの展開と効果的な運用に必要なRAN機器やネットワーク サイトなどの物理的資産に責任を持つ組織のこと。MNOは物理的なネットワーク資産に責任を持つ点が、MVNOとは異なります。インフラエッジに配置されたエッジ データ センターは、MNOの保有するセル サイト (基地局) に設置されるか、セル サイトに接続されます。通常、他のネットワークやインターネットへのアクセスを提供するサービス プロバイダーでもあります。関連項目：仮想移動体通信事業者 (MVNO)

**Mobile Virtual Network Operator(MVNO) (仮想移動体通信事業者)**

MNOと同様のサービス プロバイダーであるものの、MVNOは独自の携帯電話ネットワーク インフラを所有しておらず、また多くの場合、運営していない事業者のこと。MVNOは、利用するセル サイトに接続されたインフラ エッジに設置されるエッジ データ センターを所有していません。エッジ データ センター内のテナントである場合もあります。関連項目：移動体通信事業者 (MNO)

### Modular Data Center(MDC) (モジュラー データ センター)

可搬性を重視したデータセンターの展開方法のこと。高性能の計算、データストレージ、ネットワーク機能を、輸送用コンテナのような可搬構造内に設置し、必要な場所に輸送することができます。これらのデータセンターは、既存のデータセンターや他のモジュール型データセンターと組み合わせることで、必要に応じて利用可能なローカルリソースを増やすことができます。

関連項目：マイクロ モジュラー データ センター (MMDC)

### Multi-access Edge Computing(MEC) (マルチアクセス エッジ コンピューティング)

無線アクセスネットワーク (RAN) と緊密に結合したサービスの開発をサポートするETSI主催のオープンアプリケーションフレームワークのこと。2014年に正式な組織になったMECは、無線ネットワークのエッジでアプリケーションを構築・展開するための標準化されたソフトウェアプラットフォーム、API、プログラミングモデルにより、4Gや5Gの無線基地局を補強します。MECは、キャッシング、バッファリング、リアルタイムのトランスコーディングを利用して携帯電話ネットワークの混雑を緩和してユーザー体験を向上させたり、無線を意識したビデオ最適化などのサービス展開を可能にします。当初はモバイル エッジ コンピューティングとして普及したものの、2016年にETSIのワーキンググループは、MECを携帯電話だけでなく他のアクセス技術にも拡大することを示すため、マルチアクセス エッジ コンピューティングに名称を変更しました。インフラエッジに配置されたエッジデータセンターを活用します。関連項目：インフラエッジ

### Network Function Virtualization(NFV) (ネットワーク機能仮想化)

業界標準の仮想化技術やクラウド コンピューティング技術を使用して、ネットワーク機能を独自のハードウェア機器内の組み込みサービスから、標準的なx86サーバーやARMサーバー上で動作するソフトウェアベースのVNFに移行すること。多くの場合、NFVの処理とデータストレージは、インフラエッジ内のローカル携帯電話サイトに直接接続されたエッジデータセンターで行われます。関連項目：仮想ネットワーク機能 (VNF)

### Network Hop (ネットワーク ホップ)

ネットワーク上を通過するデータのルーティングまたはスイッチングが行われるポイントであり、通常はルーターなどの集約デバイスで、データの次の直接の宛先を決定するポイント。ユーザーとアプリケーション間のネットワークホップ数を削減することは、エッジコンピューティングにとってのパフォーマンス目標の1つです。関連項目：エッジコンピューティング

### Northbound vs Southbound(and east/west) (ノースバウンドとサウスバウンド (およびイースト/ウエスト))

クラウドが最上位、インフラエッジが中間、デバイスエッジが最下位という階層構造における、データの送信方向を表現したもの。ノースバウンド/サウスバウンドのデータ転送は、クラウドとエッジデータセンターの間の通信のこと。イーストバウンドとウェストバウンドのデータ転送は、処理の移行やデータの複製などの目的で、同じ階層のデータセンター間で発生する転送のこと。これは集中型データセンター間やエッジデータセンター間でも発生します。関連項目：仮想データセンター

### Over-the-Top(OTT) Service Provider (オーバーザトップ サービス プロバイダー)

アプリケーションやサービスをユーザーに提供するための基盤となるネットワークや、データセンターのインフラを所有していないまたは運用していないアプリケーションやサービスプロバイダーのこと。例えば、ストリーミングビデオサービスやMVNOが、現在最も一般的です。データセンターのテナントであることも多くあります。関連項目：仮想移動体通信事業者 (MVNO)

### Point of Presence(PoP) (ポイント オブ プレゼンス)

サービスプロバイダーが、ユーザーやパートナーによるネットワークへの接続を許可するネットワークインフラ内のポイント。エッジコンピューティングにおいては、IXPがローカルエリア内にない多くの場合、PoPがエッジミーティングルーム内に設置されます。エッジデータセンターはPoPに接続し、PoPはIXPに接続します。関連項目：相互接続

### Quality of Experience(QoE) (体感品質)

QoSの原理を高度に利用し、アプリケーションやネットワークのユーザー体験をさらに向上させることを目的として、アプリケーションやネットワークのパフォーマンスを詳細かつ厳密に測定すること。また、パフォーマンスをプロアクティブに測定し、必要に応じて構成や負荷分散を調整するシステムも指します。したがって、ワークロード オーケストレーションの構成要素と考えることもでき、インテリジェントなオーケストレーターのための高信頼性データ ソースとして動作します。関連項目：ワークロード オーケストレーション

### Quality of Service(QoS) (サービス品質)

ネットワークとデータセンターのインフラが、特定のアプリケーション（多くの場合、特定のユーザー）に対してどの程度のサービスを提供しているかを示す指標。スループット、レイテンシー、ジッターはいずれも主要なQoS計測基準であり、リアルタイムからバルク データ転送に至る様々なユースケースでエッジ コンピューティングを利用する際の改善指標となります。関連項目：エッジ コンピューティング

### Radio Access Network(RAN) (無線アクセス ネットワーク)

アクセス ネットワークの無線バリエーションで、通常、3G、4G、5Gなどの携帯電話ネットワークを指します。5GのRANは、NFVとC-RANを利用するため、インフラ エッジの計算、データ ストレージ、ネットワーク リソースによってサポートされます。関連項目：クラウドRAN (C-RAN)

### Regional Data Center (地域データ センター)

集中型データ センターとエッジ型データ センターの中間に位置するデータセンター。エッジデータ センターよりもエンドユーザーから物理的に遠く離れていますが、集中型データ センターよりもエンドユーザーに近い位置にあります。メトロポリタンデータ センターとも呼ばれます。従来のクラウド コンピューティングの一部です。関連項目：クラウド コンピューティング

### Resource Constrained Device (リソース制約のあるデバイス)

デバイス エッジのサブカテゴリで、ラスト マイル ネットワークのデバイス エッジ側のデバイスを指します。このデバイスはバッテリー駆動であることが多く、省電力モードで長時間動作することがあります。これらのデバイスは通常、ローカルからゲートウェイ デバイスに接続され、ゲートウェイ デバイスは、インフラ エッジのエッジデータ センターで動作するデータ分析アプリケーションなど、ローカル ネットワーク外のソースから、デバイスによって生成され、デバイスに指示されたデータを送受信します。関連項目：ゲートウェイ デバイス

### Service Provider (サービス プロバイダー)

顧客に自社のネットワークへのアクセスを提供する組織で、通常、顧客にインターネットへのアクセスを提供することを目的とします。顧客は通常、ラスト マイルのサービス プロバイダー側からアクセス ネットワークに接続します。関連項目：アクセス ネットワーク

### Shared Infrastructure (共有インフラ)

1つの計算、データ ストレージ、ネットワーク リソースを複数の関係者が利用すること。例えば、2つの組織がそれぞれ1つのエッジ データ センターを半分ずつ利用するような場合を指します。関連項目：コロケーション

### Software Edge (ソフトウェア エッジ)

ソフトウェア開発およびアプリケーション展開の観点から、アプリケーション処理を展開できるエンドユーザーに物理的に最も近いポイント。アプリケーション処理と計算リソースの現在の可用性によっては、このポイントはデバイス エッジになることもありますが、弾力的なリソースを提供するクラウド的な機能により、通常はインフラ エッジ内に設置されます。関連項目：ネットワーク機能仮想化 (NFV)

### Throughput（スループット）

ネットワーク データ転送において、2つ以上のエンドポイント間で転送可能な1秒あたりのデータ量。通常、必要に応じてメガビットまたはギガビット単位で測定されます。アプリケーションには、機能させるための最小スループットが設定されている場合が多く、これを下回ると一般的に待ち時間によりアプリケーションに制約が発生し、ユーザー体験を損なう要因となります。関連項目：サービス品質（QoS）

### Traffic Offloading（トラフィック オフロード）

長距離、混雑、高コストのネットワークなど、通常は効率的に配信できないデータを、よりローカルな別の配信先（CDNキャッシュなど）や低コストで効率的なネットワークに再ルーティングするプロセス。トラフィック オフロードにエッジ コンピューティングを使用することをローカル ブレイクアウトといいます。関連項目：ローカル ブレイクアウト

### Truck Roll（トラック ロール）

エッジ コンピューティングにおいて、問題が検出された際、解決・トラブルシューティングするために、エッジ データ センターなどのエッジ コンピューティング環境に人を派遣すること。このような場所は遠隔地であることが多く、大半は遠隔操作されており、現場の担当者がいないため、エッジ コンピューティング事業者にとって、トラック ロールのコストやその他の実務的な問題が潜在的なリスクとなります。

### Vehicle 2 Infrastructure(V2I)（車両インフラ間通信）

コネクテッド カーや自律走行車が、インフラ エッジのエッジ データ センターで動作するマシン ビジョンや経路探索アプリケーションなどのサポート インフラに接続するために使用される技術の集合体。通常、アクセス ネットワークとして5GやWi-Fi 6などの新しい携帯電話通信技術を使用します。関連項目：アクセス ネットワーク

### Virtual Data Center（仮想データ センター）

複数の物理的なエッジ データ センターから構築され、外部からは1つのデータ センターとみなされる仮想的なエンティティ。仮想データ センター内では、ロード バランシング、フェイル オーバー、または必要に応じてオペレーターの設定に基づくワークロードの特定のエッジ データ センターやアベイラビリティ ゾーン内へのインテリジェントな配置を行うことができます。このような構成では、エッジ データ センターは低遅延ネットワークによって相互接続され、冗長性と回復力のあるエッジ コンピューティング インフラを構築するように設計されています。関連項目：エッジ データ センター

### Virtualized Network Function(VNF)（仮想化ネットワーク機能）

専用の物理機器の代わりにNFVで使用される、汎用的な計算リソース上で動作するソフトウェアベースのネットワーク機能。多くの場合、複数のVNFがインフラ エッジのエッジ データ センターで動作します。関連項目：ネットワーク機能仮想化（NFV）

### Workload Orchestration（ワークロード オーケストレーション）

集中型および地域型のデータ センターから、インフラ エッジやデバイス エッジの両方で利用可能なリソースまでを用いて、計算、データ ストレージ、ネットワーク リソースの範囲で処理されるアプリケーションワークロードの最適な場所、時間、優先度を動的に決定するインテリジェント システム。ワークロードには、特定のパフォーマンスとコスト要件がタグ付けされることがあり、その要件を満たすリソースが使用可能になったときに、どこで処理されるかを決定します。関連項目：ソフトウェア エッジ

### xHaul（クロスホール）

2つ以上のネットワークまたはデータ センターのインフラの高速相互接続。バックホールやフロントホールなどがxhaulの一例。関連項目：相互接続

## クレジット

State of the Edgeはコミュニティ主導の取り組みであり、その専門知識の多くをメンバーの有能なスタッフや外部の専門家から収集しています。

**Hakan Sonmez**は、2024年版レポートの企画と編集を主導し、primary editorを務めました。Edge Research Groupの創設者でありprincipal analystである**Jim Davis**、国際電気通信連合（ITU）の自律型ネットワークおよび未来のネットワークのための機械学習に関するフォーカスグループの元Vice Chairmanである**Salih Ergüt**博士、Oracleの元senior solution specialistである**Victor Lu**が各章を執筆しました。本レポートはLinux Foundationのデザイン チームがデザインしました。Spectro Cloudの**Anthony Newman** とZEDEDAの**Michael Maxey**には共同で、今年の「エッジからのポストカード」の作成をリードしていただきました。

また、Linux FoundationのArpit Joshipura、Kendall Waters Perez、Sunny Cai、Jill Lovatoには、プロセス全体を通じてサポートとご指導をいただきました。

さらに、本レポートへの支援と貢献をいただいた以下の業界専門家の方々に感謝します：IBMのAndrew Coward、IBMのJoe Pearson、Cisco SystemsのMurali Gandluru、Spectro CloudのSaad Malik、ZEDEDAのEva Feng、AzionのRafael Umann、EmersonのDave Denison、CanonicalのCédric Gégout、STL PartnersのTilly Gilbert、StratusのStephen Greene、OnLogicのRoss Hamilton、VyOS NetworksのSantiago Blanquet、LosantのKevin Niemiller、Kinnami SoftwareのSujeesh Krishnan、Store GeniusのJacque Istok、Vapor IOのCole Crawford、Vapor IOのMatt Trifiro、EvidenのDaniel Feldhusen、以上の専門家には、本レポートの作成に時間と専門知識を提供いただきました。

### 本訳文について

この日本語文書は、**State of the Edge Report 2024** の参考訳として、The Linux Foundation Japanが便宜上提供するものです。英語版と翻訳版の間で齟齬または矛盾がある場合、英語版が優先されます。

翻訳協力：辻村幸弘



STATE OF THE  
**EDGE**  
2024

[www.stateoftheedge.com](http://www.stateoftheedge.com)

 LF EDGE

 THE **LINUX** FOUNDATION