

# ワットとビット：電カグリッドとクラウド・コンピューティングが 電脳統合による「Utility 3.0」をいかに実現するか？

東京電力パワーグリッド取締役副社長最高技術責任者 岡本浩

本稿は、国際大電力システム会議 CIGRE の機関誌 ELECTRA 2024 年 8 月号に掲載された筆者の寄稿論文“Watts & Bits: How Power Grids and Cloud Computing Are Working Together to Implement “Utility 3.0” Through Electro-Cyber Integration”を和訳したものです。原文は以下の HP に公開されています。

<https://electra.cigre.org/335-august-2024/global-connections/watts-bits-how-power-grids-and-cloud-computing-are-working-together-to-implement-utility-30-through-electro-cyber-integration.html>

デジタル化が進む世界において、クラウド・コンピューティングと電力網は、社会を再構築する可能性を秘めた形で融合しつつあります。クラウド・コンピューティングは、膨大なデータとコンピューティング能力を統合する能力を備えており、産業と日常生活を変革しつつあります。同様に、電力網も分散型エネルギー

ー資源とスマートデバイスを統合する形で進化し、エネルギー転換を推進しています。

本稿では、この2つの領域の間に生まれる強力な相乗効果について探ります。クラウド技術と電力網を統合することで、エネルギー需要のバランス調整、複雑な電力システムの管理、持続可能な未来の確保といった重要な課題に対処することができます。私が「電脳統合」と呼ぶこの融合は、人間中心の持続可能な社会を実現するための鍵となります。

以下では、エネルギー利用の最適化に人工知能(AI)を活用したり、送電網管理にクラウドベースのプラットフォームを活用したりするなど、この統合がどのように実現されるかについて、具体的な例を掘り下げていきます。また、サイバー空間とフィジカル空間が調和的に相互作用する「Utility 3.0」という未来のユーティリティを実現するための、東京電力パワーグリッド(PG)の革新的なMESH構想についても紹介します。

電気とサイバーの統合は、単なる技術の進歩にとどまりません。それは、エネルギーの生成、分配、消費の方法を根本から変えるパラダイムシフトであり、同時にデジタル技術の進歩も推進するものです。本記事は、明るい未来のために、この強力な融合を理解し、活用するためのガイドとなるでしょう。

## 1. クラウド・コンピューティングとエネルギー需要のバランス

### AI エネルギーのパラドックス：成長と持続可能性への懸念

AI、特に大規模モデル(LLM)の急速な成長は、電力消費量の急増を招いています。

これは、AI の利点と持続可能なエネルギー利用の必要性とのバランスを取ると

いう課題を提起しています。図 1 は、東京電力 PG のサービスエリアにおける

データセンターからの需要の高まりを示しています。

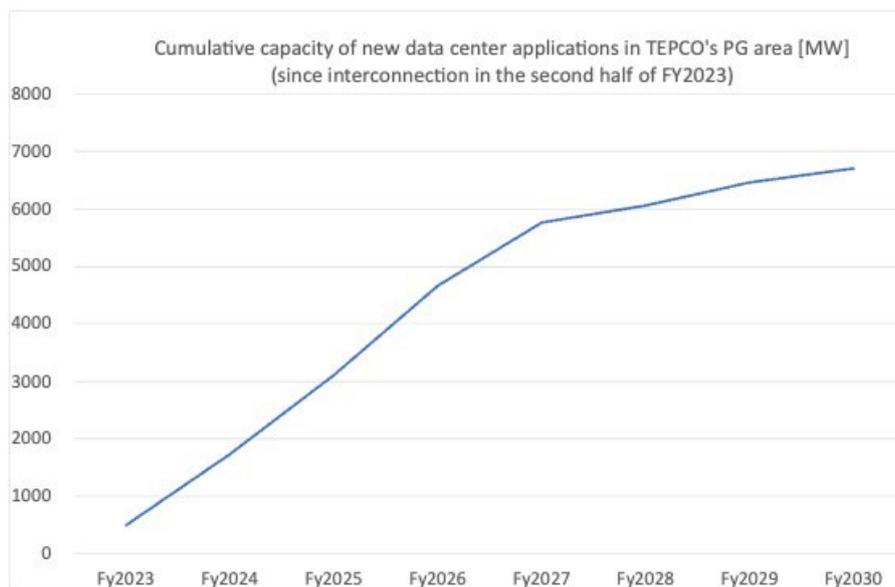


図 1.東京電力 PG 管内におけるデータセンターアプリケーションの成長 [1]

## ギャップを埋める：効率的なエネルギー利用のためのコロケーションとインテリジェントなワークロード管理

一つの解決策は、原子力発電所や再生可能エネルギー発電所などのエネルギー源とデータセンターを併設することです。これにより、送電損失を最小限に抑え、送電網の拡張の必要性を減らすと同時に、エネルギー集約型の施設への安定した電力供給を確保することができます。

クラウド・コンピューティングの柔軟性により、ワークロードの移行が可能になります。レイテンシー要件がそれほど厳しくないアプリケーションは、再生可能エネルギーが余剰となっている地域で実行することができます。東京電力 PG は、この柔軟性を活用し、送電網全体でエネルギー利用を最適化する戦略を開発しています。

大規模な AI モデルのトレーニングは、電力需要が少なく、CO2 排出量も少ない春や秋に戦略的にスケジュールすることができます。このアプローチは、インターネットの膨大なストレージ容量をエネルギー貯蔵の一形態として効果的に利用し、AI 処理を再生可能エネルギーの利用可能状況と一致させるものです。反対に電力需要が高まる夏や冬は、AI モデルのトレーニングを控えることにします。私はこの戦略を「AI 学生の夏休みと冬休み」と呼んでいます。

## ノードル・プライシング：より環境に優しい AI への鍵

ノードル・プライシングとは、高速道路の料金がピーク時に変動するのと同様に、場所や時間によって電気料金変動するシステムです。このダイナミックプライシングは、特に再生可能エネルギー源から、最も安価でクリーンな時間と場所で電気を使用することを促します。

クラウド・コンピューティングにとって、ノードル・プライシングは極めて重要です。AI のトレーニングのようなエネルギー集約型のタスクを、再生可能エネルギーが豊富な時間や場所にシフトさせるインセンティブとなります。これにより、クラウド・コンピューティングの持続可能性が高まるだけでなく、グリーンエネルギーの使用も最大化されます。

このメリットを分散コンピューティングにも拡大するために、私たちはノードル・プライシングを配電網にも適用することを提案しています[1]。これにより、炭素排出量を考慮した相互接続された市場が生まれます。この市場では、ノードプライシング内の炭素価格、または炭素排出量データの取引を行う別のシステムを使用することができます。このアプローチにより、データセンターの運営者や投資家は、自らの意思決定が環境に与える影響についてより明確な見通しを得ることができ、より持続可能な投資判断を行うことができます。

さらに、ノード制スポット市場から導き出され、二酸化炭素排出量データが組み込まれた正確なフォワードカーブは、データセンターの運営者や投資家が、施設をどこに設置するか、またエネルギー集約型の作業をいつスケジュールするかについて、情報に基づいた決定を行う上で極めて重要です。

ノード価格、フォワードカーブを活用し、ワークロードを戦略的に管理することで、クラウドはコストを最適化しながら脱炭素化の取り組みに積極的に貢献することができます。このアプローチは、AIの持続可能な成長と、より環境に配慮したデジタルインフラの実現に不可欠です。

## **2.クラウド技術によるグリッドの強化**

### **進化するグリッド：複雑性とデータへの挑戦**

電力システムをめぐる環境は、ますますダイナミックになっています。配電網に接続された分散型エネルギー資源、ヒートポンプ、電気自動車、ドローン、ロボットの急速な拡大により、複雑な双方向の電力の流れが生み出されています。従来の監視および制御システムは、変化のペースとデータ量の増加に追いつくのに苦労しています。

### **ソリューションとしてのクラウド：アジャイル開発とデータ管理**

クラウド・コンピューティングは、ますます複雑化する電力システムに対応する統合データインフラを構築し、疎結合アプリケーションを迅速に開発することで、この問題に対処することができます。日本では、10の送配電系統運用者からスマートメーターデータを集約するシステムがクラウド上で展開されており、その利点が示されています。

### **データと運用の主権：重要インフラにおける重要な考慮事項**

世界的に見ると、一部の公益事業者は、監視および制御システムなどの運用技術(OT)の領域でクラウド・コンピューティングの利用を開始しています。膨大な量の視覚データやセンサーデータを扱う運用・保守(O&M)のためのクラウドネイティブなITシステムは、AI/MLを活用することで運用を強化し、労働力を削減することができます。

電力網などの重要なインフラをクラウド化する上で最大の課題は、高い可用性と迅速な復旧が最も重要となる OT およびプライバシーデータ領域におけるデータおよび運用主権を確保することです。欧州で展開されているような主権型クラウドは、これらの懸念に対処する鍵となる可能性があります。

### **3.より良い未来のためのコラボレーション**

## MESH : エネルギー管理への総合的アプローチ

送配電事業者とクラウド事業者の連携は、相互に利益をもたらしますが、社会全体にもより幅広いメリットをもたらします。

図 2 は、東京電力 PG の MESH(Machine-learning Energy System Holistic)構想を示しています。この構想は、サイバー空間を神経系、フィジカル空間を筋肉系、電力網を血管系に例えたアナロジーに基づいています。発電における脱炭素化が進むにつれ、ベースロード発電に加えて、間欠的な再生可能エネルギー源のシェアが増加するため、需要側で調整を行い、供給と需要のバランスを取る必要があります。これは、人体が神経血管網を通じて恒常性を維持する仕組みに似ています(図 3)[3]。

卸電力取引所の市場メカニズムを活用することで、きめ細かい価格シグナルを伝達し、サイバー・フィジカル空間における自律的な行動変化を促すことができます。クラウド・コンピューティングは、膨大な数の分散型エネルギー資源や消費者向け機器のモニタリングだけでなく、ワークロード管理を通じて電力需要を柔軟にシフトさせることも可能にします。

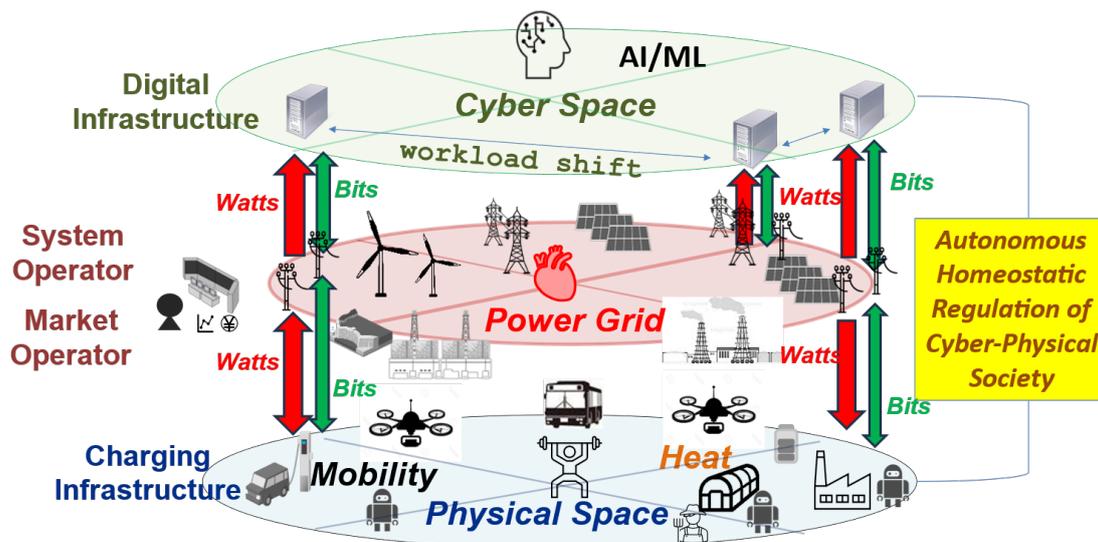
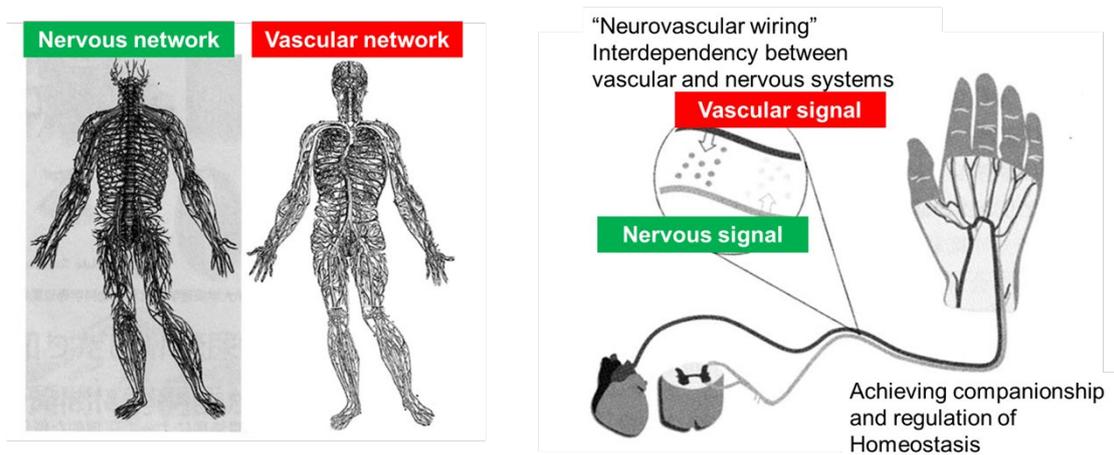


図 2.サイバー・フィジカル社会における恒常性制御のための MESH  
(Machine-learning Energy System Holistic)。



Source: Yoshiko Takahashi, "Regulatory Mechanism of Neuro-Vascular Wiring,"  
Vascular Medicine, Vol. 14, No. 3, September 2013 (in Japanese)

図 3.人体における恒常性調節のための神経-血管配線 [1]

## スマート・モビリティ：持続可能なエコシステムの構築

MESH の活用例として、当社が提唱する自動運転モビリティのオーケストレーションサービス(図 4)が挙げられます[4]。電力市場からの価格シグナルを統合することで、自動運転電気自動車の充電と放電、および充電スポットを制御し、グリッドを安定化させるとともに充電コストを最適化することができます。さらに、クラウド上のインフラのデジタルツインを使用することで、効率的なインフラ点検や地域物流のためのドローンの最適な飛行ルートを決定することができます。これらの要素を組み合わせることで、充電コストを最適化し、都市と農山村・漁村の維持・発展に役立てるためにモビリティデータをクラウド上に蓄積するモビリティプラットフォームが構築されます。

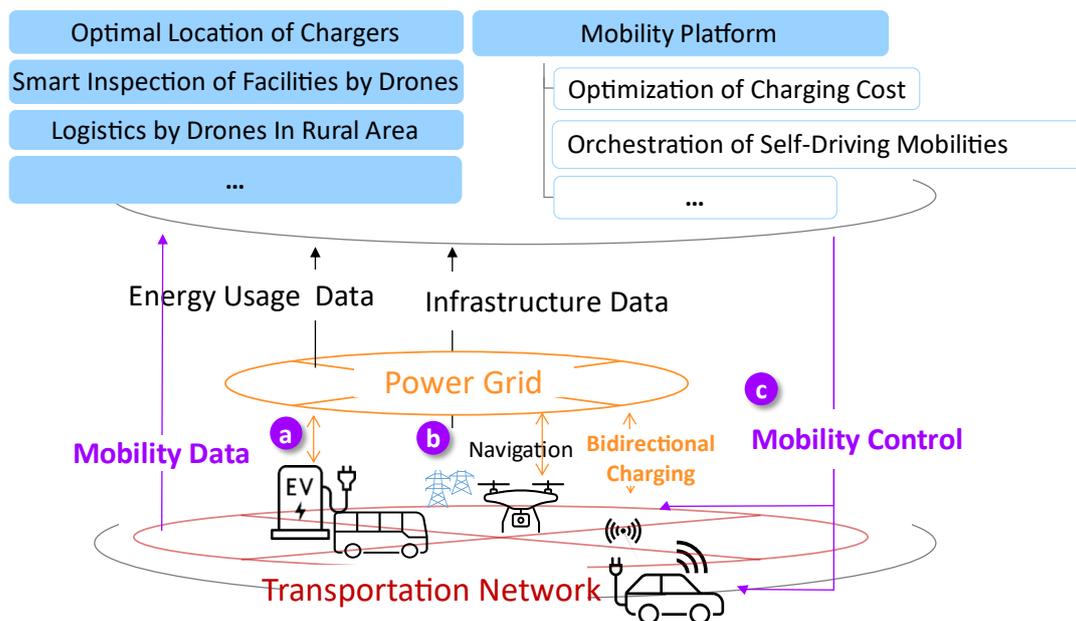


図 4.スマート・モビリティ・プラットフォーム

## グローバル・コネクティビティ：国境を越えたリソースの最適化

この概念は、都市や農山村・漁村、グローバルなつながり(図 5)を包括する概念として一般化することができます。サイバースペースは光ファイバーや衛星通信によってグローバルにつながっており、リソースをシームレスに活用することが可能になっています。例えば、フィンランドの余剰水力発電でトレーニングされた人工知能や機械学習(AI/ML)を東京のお客さまが使用するデジタルサービスに活用することができます。

物理的インフラと比較してデジタルインフラには大幅なコストメリットがあることを踏まえると、相互接続された世界の全体的な効率性と持続可能性を最大限に高めるためには、サイバーファーストのアプローチが不可欠です。

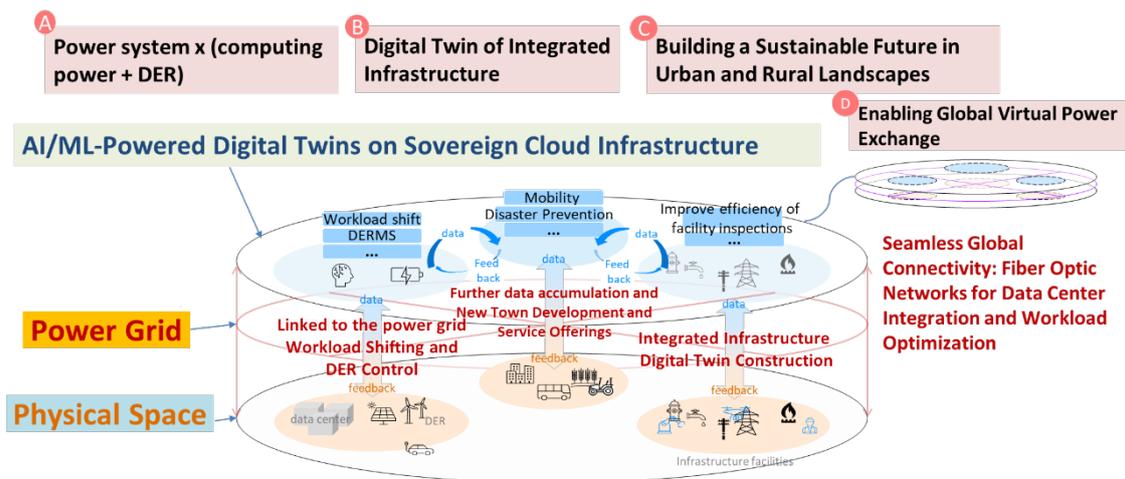


図 5.グローバル MESH 相互接続：リソース利用を最適化するサイバーファースト・アプローチ

### レイヤード・コラボレーション・フレームワーク：電腦統合の未来を築く

東京電力 PG は、電力網とマルチクラウド環境を統合するためのレイヤード・コラボレーション・フレームワーク(図 6)を提案しています。このフレームワークは、以下の要素で構成されています：

1. **基盤レイヤー**：電力グリッドとのインターフェースを持ち、複数のクラウド環境で動作するエネルギー管理プラットフォーム。
2. **ソブリン・クラウド・レイヤー**：基盤レイヤーの上に構築されたセキュアでプライベートなクラウドプラットフォームは、データ主権と規制コンプライアンスを確保します。
3. **GIS レイヤー**：地理情報システム(GIS)レイヤーは、基盤となるクラウドインフラを活用し、インフラの点検、モビリティサービス、デジタルツインと組み合わせた空間データ分析を可能にします。
4. **AI/ML レイヤー**：最先端の人工知能と機械学習（AI/ML）機能を SaaS（Software-as-a-Service）として提供するレイヤーであり、高度な分析および意思決定ツールにより、さまざまなアプリケーションを強化します。
5. **M2M レイヤー**：低遅延のマシン・ツー・マシン(M2M)通信のためのソフトウェア定義の基盤であり、電力網、モビリティデバイス(電気自動車など)、ロボット、その他の接続されたエンティティ間のリアルタイムのやりとりを促進します。

この階層型アーキテクチャにより、従来の送配電(T&D)業務、クラウド・コンピューティングを活用した需要側エネルギー管理のための革新的なT&Dソリューション

ション、スマートシティアプリケーション用の City OS プラットフォーム、先進的なモビリティプラットフォームなど、幅広いサービスの提供が可能になります。

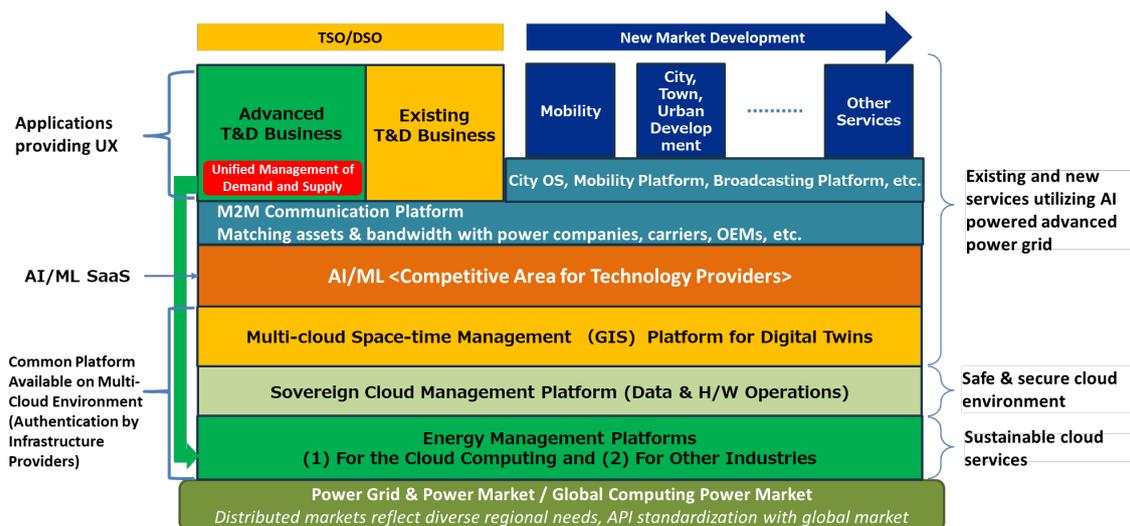


図 6. 電脳融合のための協カフレームワーク

#### 4. 結論

デジタル・プラットフォームの台頭は世界を変えました。しかし、将来のサイバー・フィジカル社会では、デジタル・プラットフォームと電力系統運用者の両方が、私が Utility 3.0 と呼ぶ人間中心の産業革命に向けたイノベーションを推進する上で重要な役割を果たすでしょう。私の結論は、この 2 つの領域の連携がより良い未来を形作る鍵となるということです。

関係者の皆様、特にサイバーファースト・アプローチをご教示いただいている東京大学の江崎浩教授、ハイパースケールクラウドプロバイダーの皆様、デジタルツインのGIS実装に関する示唆をいただいているEsri社創業者のジャック・デ  
ンジャモンド氏、東京電力パワーグリッド「電脳統合サブプロジェクトチーム」  
に感謝申し上げます。同プロジェクトはアクセンチュア株式会社、Kubernetes  
を用いたワークロードシフトに関する知見などを提供いただいております。また、山田  
光氏（スプリント・キャピタル）、井上学氏（三菱重工業）を中心とする分散型  
市場設計ワーキンググループの皆様には、配電系統におけるノード型価格市場  
の有効性について貴重な知見をいただいたことをお礼申し上げます。

## 参考文献

- [1] 岡本浩、他「Society 5.0における電力システムの新たな役割：地球の電化  
がもたらす人間中心の産業革命の未来」、IEEE Electrification Magazine（掲  
載予定）
- [2] [クラウド・ネイティブ・コンピューティング・ファウンデーション \(CNCF\)  
による Kubernetes ホームページ](#)

[3] 岡本浩「第 4 次産業革命がもたらす未来を描く：エレクトリフィケーション、ネットワーク・コンバージェンス、Vehicle to X、ユーティリティ 3.0"  
- ELECTRA N.330 - 2023 年 10 月

[4] 岡本浩「モビリティ X のカンブリア爆発」 - ELECTRA N. 333 - 2024 年  
4 月