

The Beyond Disciplines Collection

デジタル化とエネルギー

～ ICT セクターの持続可能な成長のために～

エグゼクティブサマリー

デジタル化の進展は、エネルギーシステム、交通などの社会インフラシステム、行政・住民サービスといった社会システムを改善し、高効率化・高付加価値化を実現する。しかし一方でデジタル化の進展は自身のエネルギー消費量増大という側面も持つ。本調査報告書はデジタル化に関連したエネルギー問題について、技術的課題だけでなく、デジタル化が及ぼす社会課題との分野融合・横断のテーマとして多面的視点からまとめたものである。

急速なデジタル化進展に伴うデータ量・計算量の指数的增加から、電力消費の爆発的増加といった持続可能性への懸念がこれまで言われ続けてきた。しかしICTセクターを代表するデータセンターと通信ネットワークの電力消費は2010年から現在まで大きな増加は見られていない。本報告書ではICT関連のエネルギー消費増大が言われてきた背景やその実情と対応について、1990年頃から現在までの振り返りを含めて調査を行った。本調査ではデジタル化推進の要であるICTセクターの持続可能な成長を担保するため、エネルギー視点からその課題と対応策の方向性、必要な研究開発を整理した。結論および結論を導く主要な要点は以下の通りである。

- 結論：デジタル化の進展はICTセクターの持続可能な成長とともにある。技術面からはエネルギー消費量削減技術を含めたコンピューティング（高性能計算）・通信技術について、継続的な研究開発が求められる。また今後のICTセクターのエネルギー消費量がどうなるかはデジタル化がもたらす社会変革にも大きく依存している。適切な対応策を考えるためには将来の社会システムなどの構造変化を考慮した評価・分析を行うことが必要になる。このためには社会シナリオ研究や経済学的手法も含めた多面的な影響評価に関わる研究を発展させることが重要であり、特にエネルギー削減効果を打ち消す方向に働くリバウンド効果は、エネルギー問題におけるリスク的課題として取り組む必要がある。
- ◇ 1990年のインターネット普及から最近まで、複数回に渡りICTセクター（PCやデータセンターなど）の電力消費量が過大評価されてきた。それらの原因は関連データの不足によるものやICTの電力消費に関する論文・報告書の特異的な部分だけをセンセーショナルな形で取り上げたことによる。いずれも経済的・物理的制約の観点から現実的ではないと考えられるレベルでの電力消費量の増加であったが、それにもかかわらず言われ続けた理由は、ICTがもたらす急速な社会変化に対する不安・懸念、あるいはその対策の必要性を電力問題や温暖化問題として訴求しやすい形で伝えようとしたことにある。一方でこれらを契機として国の研究開発投資が行われ、結果としてICT関連への対策技術、評価方法が進んできたという側面もある。
- ◇ 今後デジタル化はすべてのセクターに浸透し、その要のICTは汎用技術（GPT）として継続的に成長すると予想されている。デジタル化普及のためには大量のデータを高速かつ低コストで処理し、コストに見合う価値を生み出す必要がある。そのためにはコンピューティング（高性能計算）・通信技術の高性能化・エネルギー消費削減、ひいてはICTセクターのエネルギー消費削減のための継続的な研究開発が必須である。現状はICT関連技術が日欧米中の成長戦略・経済安全保障の中心技術として競争領域となっている。このため活発な投資や研究開発が実施されており、電力消費削減も大きな研究開発課題として進められている。
- ◇ エネルギー問題に軸足を置くとICTセクター自体のエネルギー消費量（Green of ICT）は、ICT利用がどのように社会に普及するか、それによる社会システム変化やエネルギーシステム構造変化、消費者行動変化（例えばテレワークや自動運転など）による需要構造変化に依存する。またICTの利用によるエネルギー消費量変化への影響（Green by ICT）はICTセクター自体のエネルギー消費量変化より大きいため、将来のICT関連のエネルギー問題を考える上には、ICT利用がおよぼす社会構造変

化まで考えた「正味」での効果を評価する必要がある。この中にはリバウンド効果と呼ばれるエネルギー消費削減を打ち消す影響も含まれ、今後それらの評価方法や対策等を検討することが重要になる。

- ◇ 今後ICTセクターにおける電力消費量はデジタル化の進展とともに新たな価値創造をしながら、経済合理性を持って徐々に増加するものと考えられる。またICTセクターでは低炭素電力への積極的な転換が行われており、CO₂削減の観点からは他分野に先駆けた削減が予想されている。
- ◇ なおデジタル化がもたらす負の側面、例えばTWI2050にも記載されている「デジタル格差」による社会的・経済的混乱や対立の可能性が、ICTへの不安・懸念を増幅しているそもその原因と考えられる。これはエネルギー問題などの環境の持続可能性と言うよりは繁栄、インクルーシブ、優れたガバナンスなどの社会的課題解決であり、この問題への対応を同時に進めていくことがデジタル化進展にとってさらに重要な課題と考えられる。

目次

1	調査目的	1
1.1	背景と目的	1
2	デジタル化とエネルギー：これまでの振り返り(レビュー)	5
2.1	ICTの国内外動向とエネルギー：ICTの要としての 通信およびコンピューティングの進展	5
2.2	ICTの電力消費問題に対するこれまでの国内外の歴史	6
2.3	過去におけるICTのエネルギー問題の 振り返りからの示唆および今後の方向性	22
3	将来のデジタル化進展におけるエネルギー問題：今後のICTの課題と対策 ..	29
3.1	デジタル化への期待と進展	29
3.2	デジタル化関連の国内外施策動向	36
3.3	デジタル化を支えるICTの性能向上・ 電力消費削減の継続的な研究開発	41
3.4	デジタル化による社会システムへの変革による 影響評価等	49
3.5	まとめ	54
4	参考	56
4.1	補足資料	56

コラム 1 情報通信ネットワーク構造

コラム 2 データセンターについて

コラム 3 グリーン IT イニシアティブ

コラム 4 ビットコインによる電力消費量

コラム 5 IEA「Digitalization and Energy」報告書

- コラム 6 需要曲線（価格と需要の関係）
- コラム 7 汎用技術（GPT：General Purpose Technology）
- コラム 8 EDNA Total Energy Model for Connected Devices:
（TEM: ICTの総エネルギー評価モデル）
- コラム 9 デジタル化で期待される新しい技術の普及推定
- コラム 10 TWI2050 イニシアティブ
- コラム 11 IOWN（Innovative Optical and Wireless Network）
構想
- コラム 12 ムーアの法則とCPU（マイクロプロセッサ）の
性能推移
- コラム 13 周波数による電磁波（電波、光）の分類
- コラム 14 産業連関表と応用一般均衡モデル

1 | 調査目的

1.1 背景と目的

1990年頃からのインターネットの普及、その後のモバイルの拡大など、情報通信技術（ICT：Information & Communication Technology）が急速に発展してきている。特に最近ではデジタル化、デジタルトランスフォーメーション（DX）、Society 5.0で表現される将来像、すなわちICTを利用して仮想空間と現実世界の融合による社会変革やビジネス変革への期待が高まっている。またSDGsが目指す持続可能な社会の達成においても、デジタル化は重要と考えられている。

その一方で急速なデジタル化進展によるデータ量・計算量の指数的增长に伴い、データセンターと通信ネットワークを中心としたICTの電力消費の爆発的増加を懸念した複数のレポートが発行されている。しかし、エネルギー関連情報で最も信頼できると考えられる国際エネルギー機関（IEA）のwebサイトの最新情報¹ではデータセンターで約200TWh、世界の総電力量の約1%で、2010年から現在までほぼ横ばい状態にあることが示された。エネルギー問題でこのように大きく見解の異なる議論、レポートがあることは稀であるが、ICTの進捗が通常のエネルギーシステム技術の進展に比べ極端に速く、また公開情報も多くないことから、エネルギー消費量推定の方法などに課題があったものと推察した。またICTによる急激な変化が及ぼす社会的な影響に対して、期待と懸念が交錯していることも遠因と考えられた。とは言え、デジタル化の要であるICTが各国・各地域の成長戦略の柱の一つとして研究開発が進展していくことは間違いなく、世界がカーボンニュートラルを加速する中でデジタル化が及ぼす環境・エネルギー問題という視点からもICTの課題を整理し、今後の対応策等の方向性を考えておくことが必要となる。

本報告書ではデジタル化の進展に伴う情報通信技術部門（ICTセクター）のエネルギー消費、電力問題について、1990年代から現在までの動向およびその対策に関してレビューする。その上で将来に向けたデジタル化が及ぼす環境・エネルギー問題について、デジタル化によるカーボンニュートラル等への貢献や懸念の一つであるICTセクターのエネルギー消費増大の可能性も踏まえ、今後の課題および研究開発の方向性についてまとめる。

（本調査で主に考慮するICTセクターの範囲）

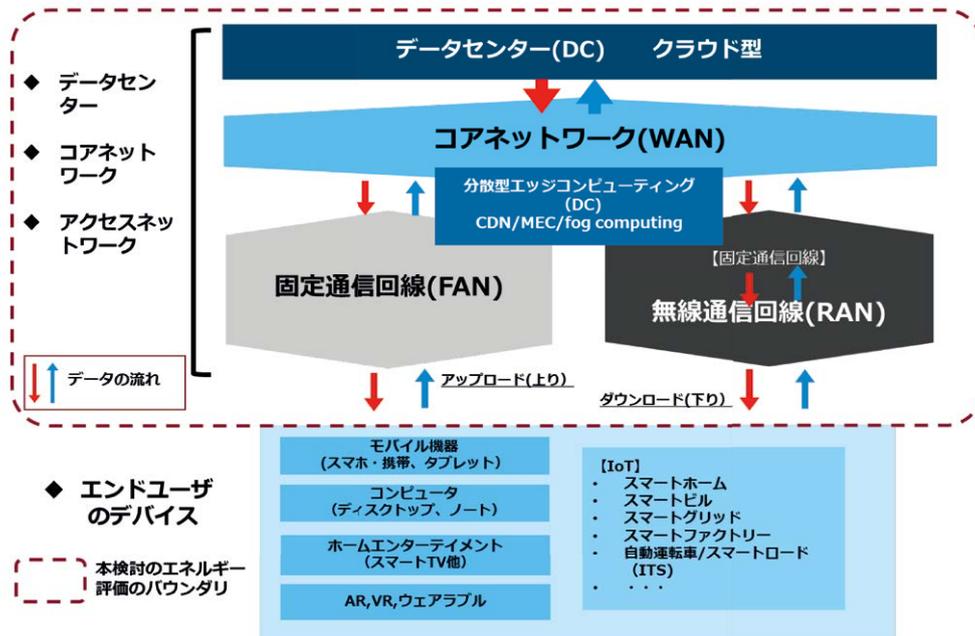
ICTセクターのエネルギー消費を考える場合、どこまで対象とするかの範疇（バウンダリー）を定義する必要がある。これまでの調査例を見ると、ライフサイクル評価としてICT機器製造まで含めている例²、あるいは通信ネットワーク、データセンター、およびエンドユーザが所有するインターネット機器（スマートフォン、Wi-Fi機器の電力、さらにはインターネットTVにおける通信関連装置の待機電力など）までの例³など、さまざまである。ここではICTセクターの中で上流側として特に電力消費について象徴的に注目、調査されてきたデータセンターおよび通信ネットワークを主たる範囲とする（図表1-1参照）。それ以外の範囲については必要に応じて説明を補足する。なお「データセンター」は事業系、自社所有などの形態があり、またその規模

1 <https://www.iea.org/reports/data-centres-and-data-transmission-networks>
(2021年11月25日参照/以降のURLはすべて同日付けのため省略)

2 https://theshiftproject.org/wp-content/uploads/2019/03/Lean-ICT-Report_The-Shift-Project_2019.pdf

3 <https://www.iea-4e.org/wp-content/uploads/publications/2021/02/EDNA-TEM2.0-Report-V1.0-Final.pdf>

も1台～数台のサーバによる小規模のものからハイパースケールと呼ばれる大規模なものまでさまざまである。本報告書ではデータセンター全体の電力消費量を前提としているが、統計値や推定方法の違いにより含まれるデータセンターの範囲（例えば事業系のみなど）が異なることがある。

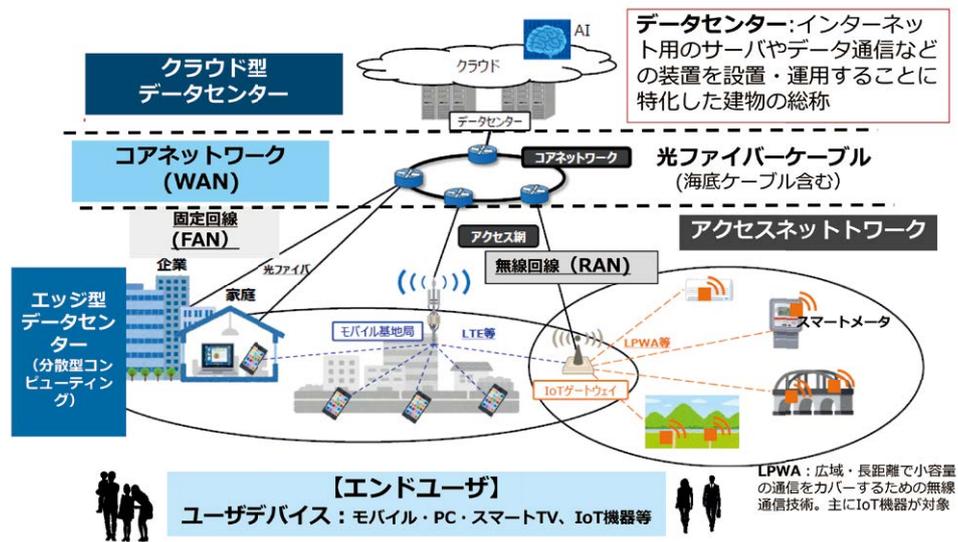


図表 1-1 ICTセクターと本調査での主たる範囲

なお、文中にはIT（情報技術）とICTの二つの用語が出てきており、過去はIT、通信の役割が大きくなっている最近では主にICTの用語が用いられている。本報告書内においては文献記載の通りで用いているが、両用語はほぼ同じ意味で使われている。なお国内では経産省がIT、総務省がICTを用いることが多い。

コラム1

情報通信ネットワーク構造



上図に情報通信ネットワークの構造を示す。ICTセクターにおいて、通信の要である無線、固定通信の通信システム、さらにはコンピューティングの要となるデータセンターがある。

- **アクセスネットワーク：**ユーザに近い通信ネットワーク。個人や企業などのエンドユーザでの端末をつなげている。無線通信としては携帯・スマホなどのモバイル高速無線回線（3G/4G/5G）やスマートメータなどのIoT機器などをつなぐLPWA（Low Power Wide Area）と呼ばれる広域・長距離かつ低消費電力の通信網がある。またに端末から直接またはWi-Fi経由で光ファイバーなども接続する固定通信がある。
- **コアネットワーク：**基幹通信網、バックボーンとも呼ばれる。光ファイバーにより国内の大都市間をつなげるとともに、海底光ケーブルを経由して全世界とつながっている。なお海底光ファイバケーブルの総延長は現在120万km、およそ地球30周分ある。また、コアネットワークとメトロネットワーク（複数のアクセスネットワークと接続）と二つに分類するケースもある。
- **データセンター：**データ保存・処理などのコンピューティングの要がデータセンターである（コラム2で説明）。また最近では自動運転など、リアルタイム性の必要なニーズに対応するためにエンドユーザに近い場所にデータセンターを設置する動きもあり、これらはエッジ型データセンターなどと呼ばれている。日本国内においてもエッジ型データセンターが増加しており、今後も拡大すると予想されている。

コラム2

データセンターについて



データセンター概観(Google(Iowa))

chaddavis.photography from United States, CC BY 2.0 , via Wikimedia Commons



データセンター内部

https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Data_centers#/media/File:Cern_datacenter.jpg



サーバ/サーバラック

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/6d/Multiple_Server_.jpg

データセンターは膨大な計算業務とデータ保管を行い、クラウドサービスの中核となっている。従来のWeb、メール、検索、各種ビジネス業務に加え、今後はAI、ビッグデータ解析、フィンテックなどの利用拡大が見込まれている。主要IT機器は、計算を担うサーバ、ストレージ（記憶装置）、ネットワーク機器であり、それ以外として、電力供給のための電源系（トランス、コンバーター、インバーター、無停電電源装置（UPS）など）、および空調装置などの付帯設備がある。

データセンターの電力効率を示す指標の一つとして、電力使用効率PUE（Power Usage Effectiveness）がある。PUEは以下の式で表され、1に近いほど効率的な値となる。

$$PUE = \frac{\text{データセンター全体の消費電力}}{\text{IT機器の消費電力}} = \frac{(\text{IT機器の消費電力} + \text{付帯設備の消費電力})}{\text{IT機器の消費電力}}$$

	構成	2017年 ³⁾	
ICT機器	CPU	61.0%	86.0%
	DRAM	18.0%	
	ストレージ	2.0%	
	ネットワーク	5.0%	
付帯設備	電源系	7.0%	14.0%
	冷却系	3.0%	
	その他	4.0%	

かつては付帯設備の電力消費が大きく、IT機器と同程度（すなわちPUE=2程度）であったものが、最新の大規模型のハイパースケールデータセンターではIT機器の1割程度（1.1以下）と効率が大きく改善している。（例：Googleの2020年の年平均PUE=1.1、Facebook（米オレゴン州プラインヴィルのデータセンター、2011年）:1.07）ただし、PUEはICTの消費電力の絶対値とは関係ないことに注意が必要である。

（参考文献）

1：LCS-FY2020-PP03

<https://www.jst.go.jp/lcs/pdf/fy2020-pp-03.pdf>

2：The Datacenter as a Computer: Designing Warehouse-Scale Machines, Third Edition

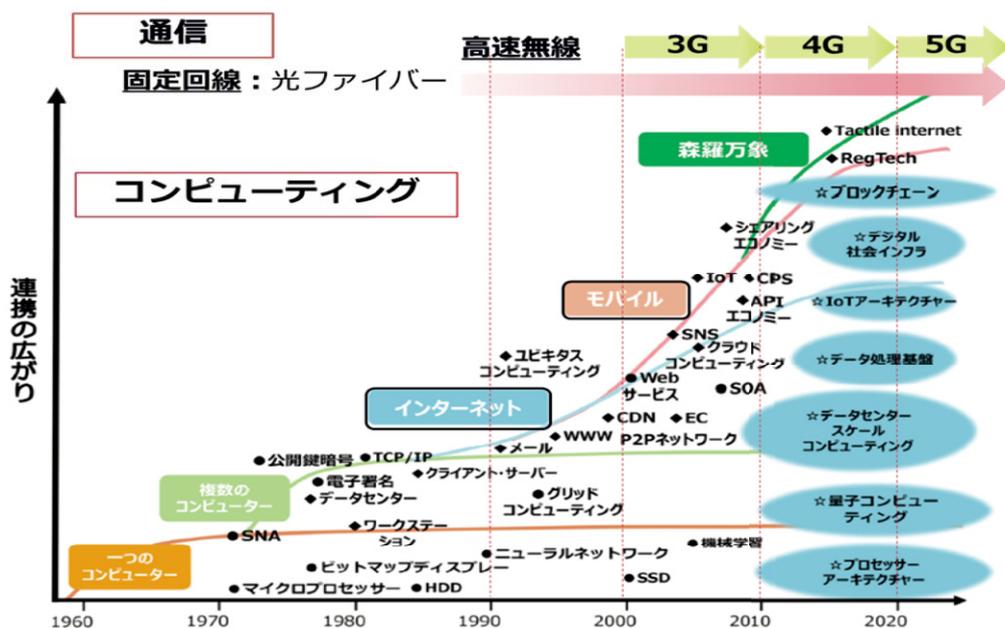
<https://www.morganclaypool.com/doi/10.2200/S00874ED3V01Y201809CAC046>

2 | デジタル化とエネルギー：これまでの振り返り（レビュー）

2.1 ICTの国内外動向とエネルギー：ICTの要としての通信およびコンピューティングの進展

デジタル化を支えるICTは通信および計算処理のコンピューティングの二つが両輪となって進展してきた。1990年頃から普及し始めたインターネットはコンピューティングの進化と共にデータ通信の高速化・大容量化・低コスト化が進むことで拡大した。米国では1980年代終わりにインターネット接続サービスが商用化されたが、国内でも1993年に商用サービスを開始した。当初は電話回線を用いたダイヤルアップ方式で、その後1999年には高周波数帯を使用したADSLが商用提供され、普及が拡大した。その後、高速化の競争の中で、光ファイバーを活用するFTTHサービスも普及が進み、2010年頃からは現在の固定系ブロードバンドサービスが主流となっている。

2006年頃からのクラウドサービスの普及・拡大に伴い、それまでユーザ側でコンピュータ・サーバ等を設置し、内部で対応していたデータ処理・保存についてもアウトソーシング化することで外部のデータセンターが拡大してきている。また無線通信においては2000年に3Gが登場、その後も約10年毎に4G、5G、その先に計画されているBeyond 5G（6G）と、より高速・大容量化、低遅延に向けて進展しており、モバイルの拡大がデジタル化をさらに加速させている。（図表2-1 参照）



図表2-1 通信とコンピューティングの進展

2.2 ICTの電力消費問題に対するこれまでの国内外の歴史

(米国におけるIT機器類の電力消費問題とその動き (1990年頃～2007年頃))

IT活用が進んでいた米国ではIT機器として増加していたPCとディスプレイ機器について、GHG (Green House Gas) 排出削減対策の一環として米国環境保護局 (EPA) が中心となり、1992年にEnergy Starと呼ばれる環境ラベリング制度が開始された⁴。これは消費電力基準に適合する省エネルギー機器に対して、ロゴを付けることができる任意制度であり、現在はIT機器以外にも家電製品、冷暖房機器、照明機器などに広がっている。なお、1995年にはオフィス機器の省エネルギー制度である国際エネルギースタープログラムが日米の国際連携で開始され、現在ではスイス、カナダ、台湾も参加した取り組みに広がっている。

IT機器による電力消費増大の懸念が大きな話題になったのは、1999年にMillsらのレポートで「インターネットやコンピュータによる米国の電力消費について、10年前までほぼゼロだったものが、1998年で295 TWh/年 (米国電力消費量3,400 TWh/年の約8%に相当) となり、今後10年で電力消費の半分を占める」と公表したことにある⁵。(なお、この議論で対象とした電力消費量はドットコム企業のメインフレーム・コンピュータ、webサーバ、電話局 (通信施設)、事務所用・家庭用PC (モニター、プリンター含む)、ルータ、IT機器の製造エネルギーである。) このレポートに対して同年、米国エネルギー省 (DOE) ローレンスバークレー国立研究所のKoomeyらが別途調査を行い、Millsらの主張は電力消費量として8倍程度過大評価しており、現状は36 TWh/年、総電力消費量の1%程度とする反論の報告書を出している⁶。これらの論争が過熱した背景の一つとして、当時の米国では発電の56%が石炭火力であり、また京都議定書 (1997年) 後のGHG排出削減が注目される状況下で、増加する電力確保のための石炭火力推進の政策的な思惑が見え隠れしたことも挙げられる⁷。ただこれらの議論を通じて、サーバ類を含むIT機器の電力消費推定に必要なデータ収集やその検証などの推定方法の検討が進み、さらには2006年には効率の良いサーバの研究・利用促進に関する法令 (Public Law 109-431 (H.R. 5646))⁸が成立するなど、結果的には米国内での対応策を促進するメリットも大きかったと言える。

この後、先の法令に基づいた議会への報告として2007年には、EPAがDOEの協力のもとで、ローレンスバークレー国立研究所が中心となり、データセンターの調査報告書⁹が作成された。これには米国でのデータセンターのエネルギー使用量およびエネルギーコストの現状を分析・評価し、エネルギー効率向上のための既存および新たな方策を概説している。なおこの時点では2006年頃からインターネットを介したクラウドサービスが拡大していることもあり、図表2-2に示す通り、データセンターの電力消費量も2000年の28 TWhから2006年時点で2倍程度の61 TWhと増加する状況にあった。また当時の効率化のトレンドのままだと、米国でのデータセンターによるエネルギー消費量は、2011年までに100 TWh/年以上になる可能性があるとしている。この効率改善の対策として3つのシナリオを想定し、その削減効果の推定も行っている。電力消費量削減の方策としてはサーバの仮想化^{※注}による機器数の削減、および付帯設備 (空調および電源装置など) や機器類の効率改善などが主に想定されている。

4 <https://www.energystar.go.jp/>

5 <https://www.forbes.com/forbes/1999/0531/6311070a.html?sh=7bec226e2580>

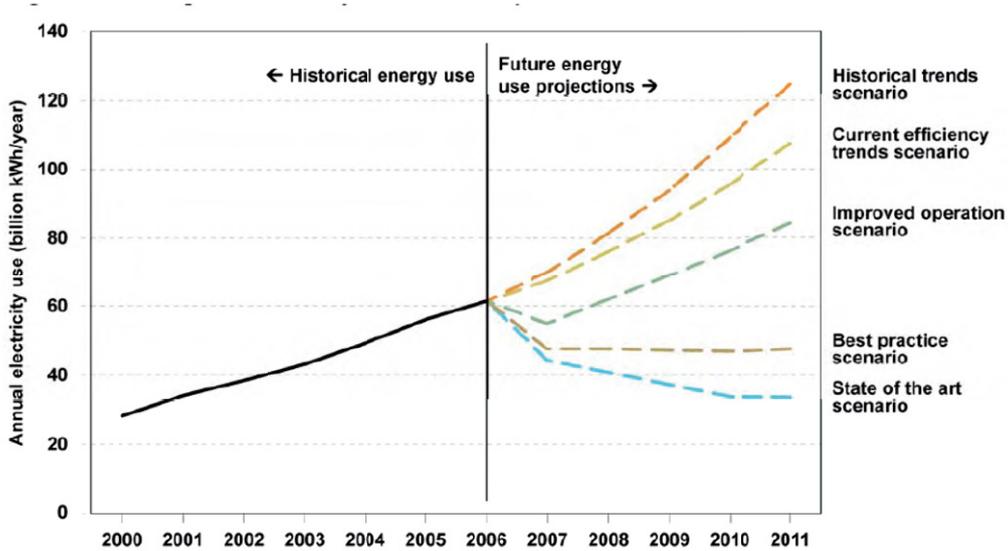
6 MEMORANDUM (LBNL-44698)
<https://eta-publications.lbl.gov/sites/default/files/lbnl-44698.pdf>

7 <https://rmi.org/insight/exchanges-between-mark-mills-and-amory-lovins-about-the-electricity-used-by-the-internet/>

8 <https://www.congress.gov/bill/109th-congress/house-bill/5646>

9 https://eta-publications.lbl.gov/sites/default/files/pdf_3.pdf

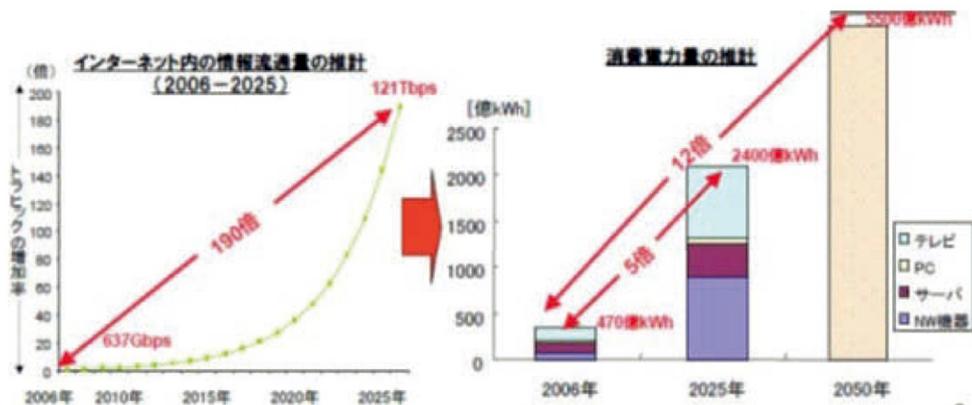
※注) 仮想化 (Virtualization) : ハードウェアリソース (CPU、メモリー、ディスクなど) を抽象化し、物理的な制限にとらわれず、ソフトウェア的に統合・分割できるようにする技術。1 台のサーバの上に複数の仮想サーバをソフトウェア的に作成し、同時に動かすことでサーバの稼働率向上や故障等に備えた予備設備を縮小できるため、サーバなどの機器数の削減が可能になる。



図表 2-2 米国データセンターの電力消費量の推移と予測値

(我が国における IT 機器類の電力消費問題とその対応 2007年頃～2013年頃)

我が国においても、IT 機器関連のエネルギー問題への対応 (グリーンIT (ICT)) の機運が盛り上がり、2007年には経済産業省の「グリーンITイニシアティブ」が開始された。当時の調査では2025年のインターネットのデータ量が2006年比で190倍に増加、それに伴いIT 機器 (PC、サーバ、ネットワーク機器、テレビ) の消費電力も5倍程度になると推定している (図表 2-3 参照¹⁰)。



図表 2-3 我が国のインターネットのデータ量とIT 機器消費電力の推移予測

10 http://www.env.go.jp/air/tech/model/heat_aeh-wg2-20_01/mat02.pdf

我が国のグリーンITは、IT自体の省エネ（Green of IT）に加え、ITによる省エネの実現（Green by IT）の両方を目的とした活動であったことが特徴と言える（コラム3：グリーンITイニシアティブ参照）。またIT機器のエネルギー問題について、PCは普及率が飽和状態かつ効率向上により影響が小さいと考えられており、次なる課題はデータセンター（2012年度推定値：157億 kWh/年）および通信ネットワーク（2010年度推定値：276億 kWh/年）¹¹にあるとされた。表2-4はグリーンIT推進協議会による調査報告書¹¹からのデータセンターの電力消費の推定結果（日本及び世界）を抜粋したものである。

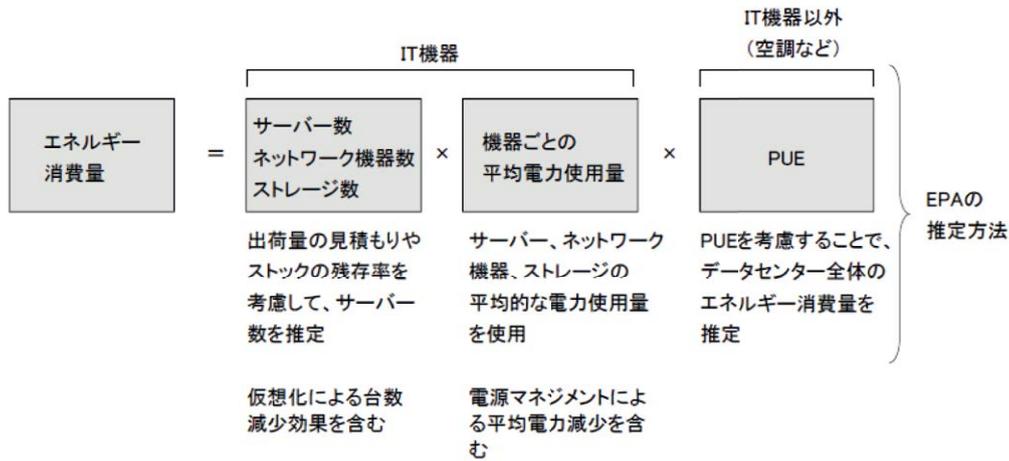
図表 2-4 日本および世界のデータセンター電力消費推定（2005年／2025年／2050年）

データセンター		【日本】			【世界】		
単位：億kWh/年 \ 年		2005	2025	2050	2005	2025	2050
IT機器（サーバ、ストレージ、ネットワーク機器）	ベースライン	77	335	689	750	4,194	15,025
	技術革新	77	125	123	750	1,556	2,662
PUE（全電力／IT機器電力）	ベースライン	1.9	1.8	1.7	1.9	1.8	1.7
	技術革新	1.9	1.28	1.14	1.9	1.28	1.14
データセンター合計	ベースライン	146	603	1,170	1,425	7,549	25,542
	技術革新	146	161	140	1,425	1,992	3,034

推定方法はサーバであればストックベースで保有台数を推定、また2025年、2050年についてはGDPを用いた推定式から保有台数を推定し、この値に1台当たりの電力消費量を乗じることでIT機器の電力消費量を求めている。表中の「ベースライン」は過去のトレンドからの1台当たりの電力消費量を用いて算出したもの、「技術革新」は技術ロードマップによる技術革新を考慮した1台当たりの電力消費量を用いて算出したものである。また付帯設備（電源、空調など）の電力消費については、PUE（電力使用効率、コラム2参照）を仮定して算出し、その総和をデータセンターの電力消費量としている。なおこの推定方法は基本的に米国ローレンスバークレー国立研究所の方法¹²に準じている。

11 「グリーンIT推進協議会 推進協議会調査分析委員会総合報告書（2008年度～2012年度）
<https://home.jeita.or.jp/greenit-pc/activity/reporting/110628/pdf/survey01.pdf>

12 LBNL-363E
https://eta-publications.lbl.gov/sites/default/files/pdf_3.pdf



図表 2-5 データセンターのエネルギー消費量予測方法

この調査結果から我が国でのデータセンターの電力消費量推定値は2005年に146億 kWh/年（14.6 TWh/年）であったものが、「ベースライン」のケースで2025年603億 kWh/年（60.3 TWh/年）、2050年1,170億 kWh/年（117 TWh/年）と大きく増加するのに対して、「技術革新」のケースで2025年161億 kWh/年（16.1 TWh/年）、2050年140億 kWh/年（14 TWh/年）となり、ほとんど増加しない予測となっている。

またデータセンターと通信ネットワーク（特にルータ）の省エネ対策の技術開発としては、NEDOによるグリーンITプロジェクトの中で2008年度より「グリーンネットワーク・システム技術研究開発プロジェクト」¹³が開始された。このプロジェクトではエネルギー利用最適化データセンター基盤技術および革新的省エネルギーネットワーク・ルータ技術についての研究開発が実施された。（5年間総事業額 76.6 億円） 研究開発の狙いとしてはPUEの低減を目的とした冷却効率、電源効率などが挙げられる。



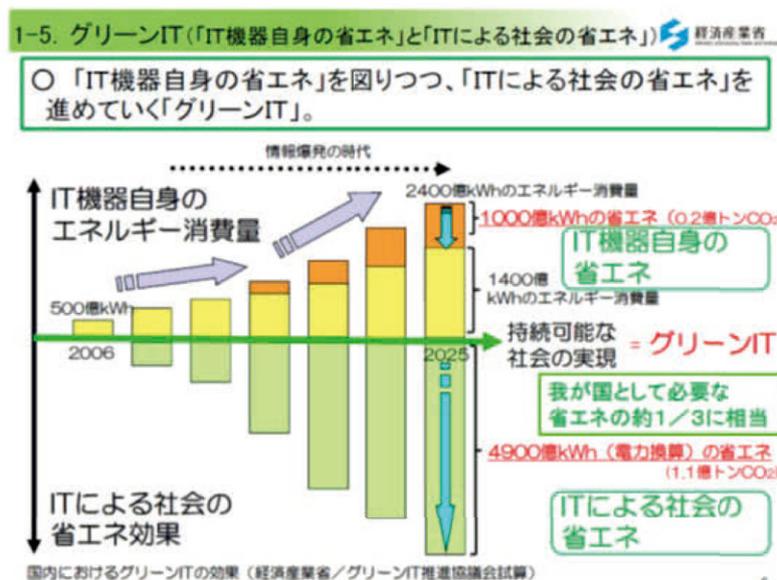
図表 2-6 グリーンネットワーク・システム技術研究開発プロジェクト (グリーンITプロジェクト)¹³

13 <https://www.nedo.go.jp/content/100548379.pdf>

コラム3

グリーンITイニシアティブ

地球温暖化問題への関心が高まる中、2008年のG8洞爺湖サミットで我が国がポスト京都議定書の枠組みとして「世界全体で、2050年までに温室効果ガス排出量を半減」の目標を提唱し、共同声明を行った。この施策の一つが経産省の「グリーンITイニシアティブ」であり、産官連携によるIT自体の省エネ（Green of IT）と、ITによる省エネの実現（Green by IT）を目的としたものである（下図参照）。2008年に連動して産業界によるグリーンIT推進協議会が設立され、2013年度末までの5年間にわたり、国内および海外（アジア等）において普及促進事業、各種の調査事業等を実施した。



2006年のIT機器（PC、サーバ、ネットワーク機器に加え、TVを含めた値）の電力消費量500億 kWh/年が2025年には従来のトレンドの場合で2,400億 kWh/年と試算。これがGreen of ITによる省エネ対策により1,000億 kWh/年の削減、さらにGreen by ITにより4,900億 kWh/年の削減効果を見込んだ。

なお報告書にはGreen of ITの対象機器として、IT機器5品目（PC、サーバ、ストレージ、ネットワーク機器）、エレクトロニクス機器5品目（民生家庭・業務のテレビ、DVD装置、照明機器、冷蔵庫、空調）が選ばれている。さらにGreen by ITとしては産業部門（高性能ボイラ、省エネ設備、エネルギー管理など）、業務部門（BEMS（ビル・エネルギー管理システム）、テレワーク、TV会議、ペーパーレスオフィス）、家庭部門（HEMS（住宅のエネルギー管理システム、デジタル家電）、オンラインショッピング、電子化、再エネ導入、スマートグリッド）、運輸部門（自

動車燃費向上、ITS、エコドライブ、流通の効率化) についての省エネ効果を推算している。またデータセンターの省エネとして検討された4つの指標はDPPE(Data Centre Performance Per Energy)として2017年までに我が国発の国際標準として発行された。

なお総務省でも「地球温暖化問題への対応に向けたICT政策に関する研究会」が発足し、ICTグリーンイノベーション推進事業などが実施された。

(参考文献)

- 1:「グリーンITイニシアティブの推進 平成21年6月(経済産業省)」
https://home.jeita.or.jp/upload_file/20130502100819_DAxFo0rkXW.pdf
- 2:「グリーンIT推進協議会 推進協議会調査分析委員会総合報告書(2008年度～2012年度)」
<https://home.jeita.or.jp/greenit-pc/activity/reporting/110628/pdf/survey01.pdf>

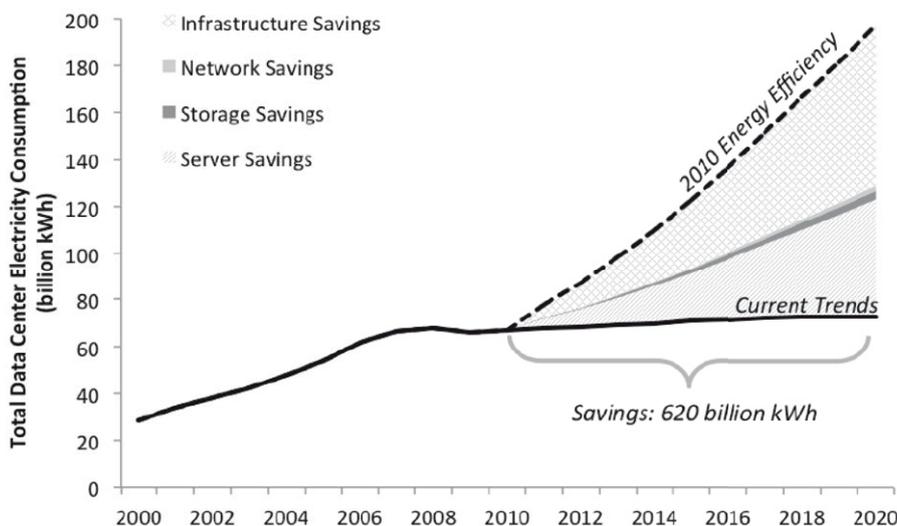
なおEUにおいてもグリーンITへの期待が高まり、欧州委員会で「エネルギー高効率な低炭素社会への移行を促進するためのICTの活用に関する勧告」を2009年10月に採択している。この中ではICTの果たす役割を「エネルギー効率改善の可能性」と「エネルギー消費の定量化」の二つの指針に大別している¹⁴。

(2013年頃～現在：データセンター・通信ネットワーク、そしてAIのエネルギー問題)

米国におけるデータセンターの電力消費については米国ローレンスバークレー国立研究所が2016年に新たな報告書¹⁵を公表し、2014年の電力消費は700億 kWh (70 TWh)、米国の総電力消費量の約1.8%であることを示した(図表2-7参照)。電力消費量は2000年～2005年で約90%増、2005年～2010年で24%増に対して、2010年～2014年では約4%増加と増加率が大きく減少している。電力消費が抑えられている理由として、サーバ数の増加が抑えられていることおよび付帯設備の効率化(PUEの低減)が主要因としている。サーバ数抑止は仮想化の進展によるものと考えられ、また効率の悪い小規模のデータセンターから超大型のハイパースケールデータセンター等のクラウドサービスへの移行が行われたためとしている。(なお、2009年、2010年についてはリーマンショック(2008年9月)の影響によるものとしている)

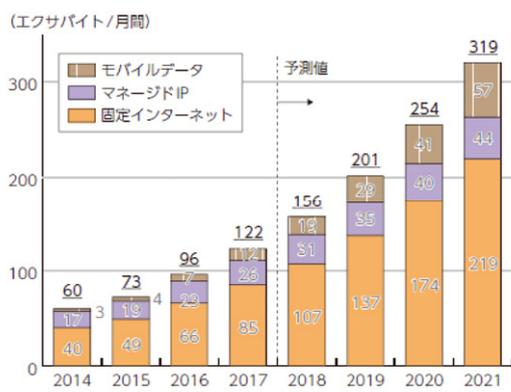
14 https://www.jetro.go.jp/ext_images/jfile/report/07000255/eu_greenict.pdf

15 LBNL-1005775
https://eta-publications.lbl.gov/sites/default/files/lbnl-1005775_v2.pdf



図表 2-7 米国データセンター電力消費量の推移および削減効果推定

一方でグローバルでのデジタル化に伴うデータ通信量はその後も指数的に増加しており、データ通信量を見ると直近では年率27%の増加となっている。これはストリーミングビデオなどの映像系データの増加によるものである。映像系データは映像以外のデータ量と比較して、図表2-8（右表）に示す通り、桁違いに大きく、例えば4K（UHD）のストリーミングビデオのデータ量は1時間で7 GB、4KのVR（バーチャルリアリティ）で500 GBとなる。



データ送信例	Mbps	GB/h	比率
スマートメーター1台 平均Mbps	0.9 bps	0.4 KB/h	1.78E-05
自動車プローブ情報データ/台(推定)	0.05	0.023	1
HDストリーミング	4	2	80
UHDカメラ(セキュリティ)	16	7	320
UHDストリーミング	16	7	320
VRストリーミング	17	8	340
自動運転車両診断	20	9	400
クラウドゲーム	30	14	600
UHD IP ビデオ	51	23	1,020
8K 壁掛けTV	100	45	2,000
HD VR	167	75	3,340
UHD VR	500	225	10,000

出典：R1 情報通信白書（元出典 Cisco VNI）

bps（秒あたりのビット数） /1バイト（Byte）は8ビット

図表 2-8 データ通信量の推移と各種データの通信量比較

2015年以降に発表されたデータセンターを含むICTの電力消費量の推定において、急激な電力消費の可能性を示して注目されたものは、大手通信会社の技術者である Andrae らの論文¹⁶と考えられる。この論文は2018年 Nature 誌に掲載された論説記事「データセンターが世界の電力を奪うことを防ぐ方法（How to

16 Challenges 2015, 6, 117-157; doi:10.3390/challe6010117
<https://www.mdpi.com/2078-1547/6/1/117>

stop data centres from gobbling up the world's electricity)¹⁷」の中でも米国ローレンスバークレー国立研究所の報告書（2016）¹⁵やIEAの報告書論文「Digitalization and Energy (IEA, 2017)¹⁸」などともに紹介されており、その概要は「データセンターの電力消費が2030年までに約15倍となり、全世界の電力消費量の8%になる」というものである（なおこのNature誌の論説記事にはビットコインの電力消費（2018年）が20 TWh/年との推定値も記載（ビットコインの電力問題についてはコラム4参照））。

Andraeらのこの論文を見ると、世界におけるデータセンター、通信ネットワーク、消費者ICTデバイス、ICT製造時エネルギーの4分野を対象として電力消費量を推定している。データセンターの電力消費量推定方法は、エネルギー原単位としてkWh/EB（単位データ量当たりの電力消費量）を用いて、これにデータ通信量（トラフィック）に乗じることで電力消費量を求める方法であり、米国ローレンスバークレー国立研究所の方法（原単位として機器1台当たりの電力消費量）とは異なっている。なお2030年の電力消費量は直近のデータ通信量（データセンター総IPトラフィック）の増加トレンドを延長して推算している。またデータセンターにおけるエネルギー原単位（kWh/EB）の年間改善率は最悪（Worst）で5%、中庸（Expected）で10%、最良（Best）で15%の3つのシナリオを設定し、中庸シナリオでの2030年の電力消費量が2,976 TWh/年（最悪で7,933 TWh/年、最良で1,137 TWh/年）と推定している。この値は2030年全世界の総電力消費推定値40,000 TWh/年の約8%に相当する。

なお通信ネットワークについても基本的にはデータセンターと同様な方法で推算しており、固定通信（有線、Wi-Fi経由）および各世代の無線通信（2G、3G、4G、5G）の各エネルギー原単位（kWh/EB）とその改善率を別途シナリオで与え、データ通信量に乗じることで算出している。図表2-9は中庸シナリオにおけるデータセンターおよび通信ネットワークのデータ通信量と電力消費量である。

図表2-9 データセンター・通信ネットワークの電力消費量推定

シナリオ：中庸 \ 年	2010	2015	2020	2025	2030
データセンター総IPトラフィック（EB/年） （データセンター内・間含む）→【データセンター評価用】	1,403	4,803	13,521	38,065	107,164
IPトラフィック→【通信ネットワーク評価用】(EB/年)	348	915	2,993	11,750	56,910
データセンター 電力消費（TWh/年）	196	397	660	1,362	2,967
通信ネットワーク（固定・無線）電力消費（TWh/年）	408	490	722	1,562	3,725

文献16よりCRDSで作成

なお、Andraeらは2017年に2015年版のアップデートの報告¹⁹を行っており、2025年時のデータセンターの電力消費量が中庸シナリオでの3,390 TWh（データセンター・通信ネットワーク合計で5,860 TWh/年）になると報告した。この報告を元にしたリスクを懸念する記事「2025年までにデータの津波が世界の電力の5分の1を消費」²⁰も見られた。

17 <https://www.nature.com/articles/d41586-018-06610-y>

18 <https://www.iea.org/reports/digitalisation-and-energy>

19 https://www.researchgate.net/publication/320225452_Total_Consumer_Power_Consumption_Forecast/link/59d5ee16aca2725954c78d15/download

20 <https://www.theguardian.com/environment/2017/dec/11/tsunami-of-data-could-consume-fifth-global-electricity-by-2025>

2019年3月にポスト炭素社会を目指したフランスのシンクタンクであるThe Shift Project が実施した報告書「Lean ICT - Towards digital sobriety (無駄のないICT-デジタル節約への道)」²¹ を発刊した。この報告書はデジタル化によるエネルギー増加、ICT機器製造における希少資源問題、およびデジタル化における先進国と開発途上国の格差などを含む持続可能性に焦点を当てた課題整理とその提言を行ったものである。ここでも主要課題の一つとして電力消費増大の問題が言及されているが、その電力消費量はAndraeらの論文からの引用のため、デジタル化移行に際して先進国による電力消費が過度に大きくなり、それに伴うGHG排出増加が多くなることを前提としている。このため、報告書の結論は例えばなるべく電力を使わないICT機器を長く利用する、さらに先進国の利用データ量を抑制して、開発途上国のデジタル化推進に振り向けることを提言している。ただしこの報告書に対しては、米国のITIF (The Information Technology and Innovation Foundation) が技術的間違いがあること (例えばNetflix のストリーミングビデオのデータ量を50倍多く評価している。これはIEAからのFactcheckを受けて修正²²。) を示すレポートを公表している²³。

2

デジタル化とエネルギー…これまでの振り返り(レビュー)

コラム4

ビットコインによる電力消費量

2008年に誕生したビットコイン (Bitcoin) は、仮想通貨 (現在は暗号資産と呼称) であり、ブロックチェーン技術によりネットワーク上での取引履歴をブロックとして台帳に記録し、その同じ台帳をすべてのノード (参加しているコンピュータ端末) が保有することで信頼性や耐改ざん性を担保する仕組みになっている。この中央管理者を持たない仕組みを維持するためにビットコインでは「Proof of Work」と呼ばれる合意形成システムを採用している。これはコンピュータの計算力 (ハッシュパワー) を競わせるパズルを解かせることで、最初に解答を出したマイナー (採掘者 (miner)) がブロックを作成するとともにビットコインでの報酬 (BTC) を受け取るようになっている。なおプログラムでブロックの作成間隔が約10分になるようになっており、マイナーの平均計算力が向上するとそれに合わせてパズルも難しくなる。現在はマイナーらが専用計算機 (過去はGPU・FPGA、現在はASICが主) を用いて、多大な電力を消費しながら報酬を得るための競争をしている。

なおブロックチェーンの合意形成方法として、電力消費の多い「Proof of Work」以外にもさまざまな方法があり、検討されている状況にある。(「ブロックチェーン=ビットコイン」として、ブロックチェーンすべてが多量の電力消費をする仕組みとの誤解もあるが、多量の電力消費は「Proof of Work」によるものである。)

21 https://theshiftproject.org/wp-content/uploads/2019/03/Lean-ICT-Report_The-Shift-Project_2019.pdf

22 <https://www.iea.org/commentaries/the-carbon-footprint-of-streaming-video-fact-checking-the-headlines>

23 <https://itif.org/publications/2020/07/06/beyond-energy-techlash-real-climate-impacts-information-technology>

【報酬と電力消費量の関係】

- ・報酬：現在6.25 BTC（約10分毎）→年間報酬総額： $6.25 \times 365 \times 24 \times 6 = 328,500$ BTC
- ・ビットコイン市場価格：2018年1月に3,800 米ドル/BTCであったものが2021年は最高で約60,000米ドル/BTCに高騰。2021年9月1日時点：48,839 米ドル/BTCを基準とすると年間報酬額：約160億米ドル
- ・電力消費量試算：（仮定）報酬の3割相当分が電気代コストかつ電気代5セント/kWh
→ 年間電力消費量推定値：96 TWh/年
- ・ケンブリッジビットコイン電力消費指数（CBECI）：2021年9月1日時点：90 TWh/年（年間値に換算）

【現状の電力消費と今後】

CBECIの推定値もビットコイン市場価格と連動する推定方法であり、現状のビットコイン市場価格の推移が続くと過去（2018年推定値：20 TWh/年）以上の90 TWh/年レベルの電力消費となる可能性がある。またマイニングの報酬額のかかなりの割合（推定では3割程度）が電気代コストとなっていることが推察される。ただしビットコインの報酬額は約4年毎に半分になるような仕組みになっており、2024年半ばには現在の半額（3.125 BTC）になり、さらにその先の2028年半ばも半減する。これらのことからビットコイン市場価格の低下あるいは報酬半減時期（4年毎）に応じてマイニングの収益性の観点から大きなコストである電力消費量が下がっていく可能性も考えられる。

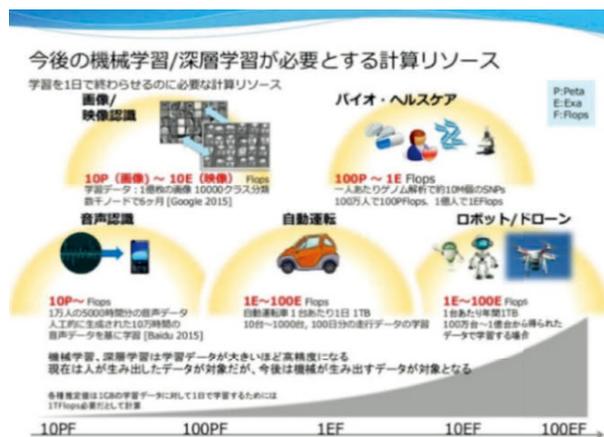
（参考文献）

- 1 : <https://gaiax-blockchain.com/halving>
- 2 : CBECI <https://cbeci.org/>

データ通信量増加のみならず、デジタル化進展のキーとなる技術として人工知能（AI）、特に機械学習として深層学習の進展もエネルギー問題に大きな課題を投げかけている。データセンターでは従来の処理に加え、人工知能（AI）、特に計算負荷が高い機械学習、中でもニューラルネットワークを用いた深層学習（ディープラーニング）の利用が増大している。これによるデータセンターでの計算量の増加は明確ではないが、AI用チップセットの出荷数の伸び率が年率42.2%²⁴と、データ通信量よりも大きな値となっており、計算量についても急激に増加していると推察される。このようにデータ通信量および深層学習による計算量は指数的に増加し、今後も継続すると考えられている。図表2-10は機械学習／深層学習における計算量を示した例である²⁵。

24 LCS-FY2020-PP03
<https://www.jst.go.jp/lcs/pdf/fy2020-pp-03.pdf>

25 https://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/joho/conference/semicon_digital/0002/03.pdf



- ・ Green500 (2020.11) での高性能計算機のワット当たりの計算処理能力の最高値は26 GFLOPS/W。この値と左図の1 GBの学習データに対するエネルギー原単位を求めると約1 kWh/GBに相当。
 - ・ この値は、データセンター平均のエネルギー原単位(2018年0.111 kWh/GB) よりも高く、現状ではAIの学習計算はより多くのエネルギーを消費する。
 - ・ なお2021年最新GPU単体のスペック性能は1500 GFLOPS/Wまで向上している。
- GFLOPS: コンピュータの1秒間の処理可能な浮動小数点演算のギガ単位の数。

図表 2-10 AI / 機械学習 / 深層学習が必要とする計算量

AIに必要な電力消費についてはMITのコンピュータサイエンス分野の研究者 Strubellらが2019年6月に発表した論文²⁶が注目された。これは4つのNLP（自然言語）用ニューラルネットワークモデルの学習にかかる経済的・環境的コストを定量化しており、最小ケースでは電力消費が27 kWh、CO₂排出量が11.6 kgに対して、最大ケース（NAS（ニューラル・アーキテクチャー・サーチ）という精度を高める処理を実施）では、学習に27万時間以上かかり、電力消費が656,347 kWh、CO₂排出量が283トンになると試算した。この最大ケースのCO₂排出量は米国の平均的な乗用車1台が製造から廃車までに排出する量の約5倍に上るとし、機械学習モデルによっては学習に大量の電力を消費することを示した。この論文の結論は、モデル間の比較を可能にするために学習時間などの報告書への記載、学術研究者が計算機資源を公平に利用できること、計算効率の高いアルゴリズムやエネルギー消費の少ないハードウェア・ソフトウェアの研究の必要性を提言したのになっている。ただこの論文を引用した記事の多くは「AIが乗用車5台分のCO₂排出」の部分センセーショナルに強調した内容^{27, 28}となっている。

またAIを含むデジタル化への批判的論説もあり、例えば、2019年には英国紙のwebサイトでは「To decarbonize we must decomputerize: why we need a Luddite revolution（脱炭素には脱コンピュータが必要-ラダイト※注）革命がなぜ必要か）」²⁹との見出しによる記事が掲載された。この記事にはデータ量増加およびAIによるエネルギー問題に加え、デジタル化による監視強化（監視カメラなどによる顔認識など）などのリスクを含めた内容となっている。

※注）ラダイト：1810年代の産業革命期に英国中部・北部の織物・編物工業地帯に起こった機械破壊運動

（IEAによるICTのエネルギー消費に関する調査の公表）

IEAではICTに関するエネルギー問題への高まる懸念の動きに対して、2017年発刊の「Digitalization and Energy」¹⁸でデータセンターの電力消費量が2010年より現在までほぼ一定の約200 TWhレベルであ

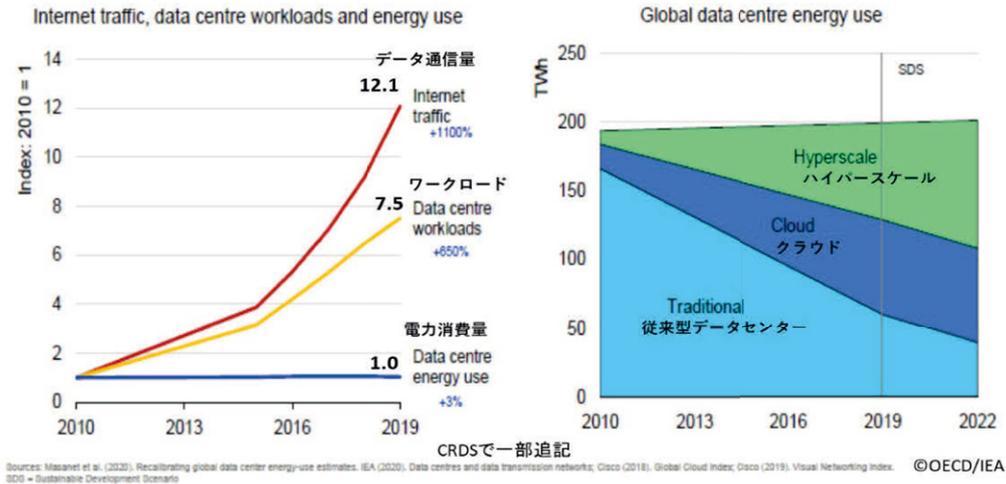
26 E.Strubell et al.
<https://arxiv.org/pdf/1906.02243.pdf>

27 <https://towardsdatascience.com/artificial-intelligence-has-an-enormous-carbon-footprint-239290ebffe>

28 <https://www.newscientist.com/article/2205779-creating-an-ai-can-be-five-times-worse-for-the-planet-than-a-car/>

29 <https://www.theguardian.com/technology/2019/sep/17/tech-climate-change-luddites-data>

ることを示した。またIEAのWebサイトの最新情報として2020年の電力消費量推定値が、データセンターで200 TWh～250 TWh(総電力量の約1%)、通信ネットワークで260 TWh～340 TWh(総電力量の1.1%～1.4%)を示した。通信ネットワークについては2015年が185 TWhであったことを考えると上昇傾向にはあるものの、極端な増加予測にはなっていない。(コラム5参照)



図表 2-11 データ通信量、ワークロード、データセンターの電力消費・タイプの推移

図表 2-11 に示すようにデータ通信量は2010年を基準とすると指数的に増加しており、2019年で12.1倍、またデータセンターのワークロードも7.5倍と増加している。一方でデータセンターの電力消費量は2010年からほぼ一定で、約200 TWh、総電力量の約1%を保ち続けているおり、またハイパースケールデータセンターが増加していることが示された³⁰。

このIEA報告でのデータセンターの電力消費量の推定方法は米国ローレンスバークレー国立研究所の方法に基づいたものであり、サイエンス誌に掲載されたMasanet, Koomeyらの論文³¹をベースとしている。図表 2-12にこの論文からの2010年と2018年の比較を示す。この結果よりエネルギー効率改善がデータ増加の影響を打ち消していることがわかる。例えばデータセンターの電力の多くを消費するサーバについては市場の保有台数が3,580万台から1.3倍の4,510万台と比較的小幅な増加である。これはサーバの性能向上に加え、データセンター内の仮想化により全体としての稼働率が向上したためである。またストレージの電力効率も10倍程度の大規模な改善がある。さらに空調や電源系の付帯設備の効率向上としてPUEの値が下がっており、結果として全体の電力消費がほぼ同じと推定している。またデータセンターのサーバ機器の使用期間は3年～5年、データセンター内の通信機器も3年～7年と、車の平均13年よりも非常に短く、データセンター内のICT機器が最新技術に置き換えられていることも電力消費を抑えている重要な要因である。

30 <https://iea.blob.core.windows.net/assets/c497a97a-9ab4-43be-ab66-bff5a1adfae9/TotalDevices28AprilPPTGeorge1.pdf>

31 “Recalibrating global data center energy-use estimates”; Science, 367 (6481), 984-986 (2020) /データファイル:GitHub (doi: 10.5281/zenodo.3668743) .

図表2-12 データセンター：2010年・2018年比較（論文³¹よりCRDSで作成）

データセンターのトレンド	単位	2010	2018	(2010年比) 2018指数
IPトラフィック	ZB/年	0.254	1.872	7.4
データセンター総IPトラフィック* ¹	ZB/年	1.1	11.6	10.5
サービス需要（ワークロード・計算インスタンス）	百万件	58	372	6.5
総サーバー数	百万台	35.8	45.1	1.3
総ストレージ容量	EB	41	1043	25.8
ワークロード当たりのサーバー数	台	0.62	0.12	0.19
代表的サーバー電力強度	W/計算	1.00	0.24	0.24
ストレージドライブ平均エネルギー利用効率	kWh/TB	197.4	22.0	0.11
平均電力利用効率（平均PUE）	-	2.10	1.58	0.75
データセンター総エネルギー消費量（年間）	TWh	193.7	205.2	1.06

*1 Cisco global cloud index(2015-2020)によれば、データセンター総IPトラフィック(2020)のうち、ユーザーとのトラフィックが14%であり、データセンター内77%、データセンター間9%である。

また論文の結論ではサーバ仮想化の更なる進展や低電力ストレージデバイスへの移行など、ITデバイスの効率向上の可能性が残っていること、また付帯設備側では小規模でPUEが大きい従来のデータセンターから最高レベルでPUE1.1のハイパースケールデータセンターへのシフトが予測されていることなどからサービス需要が2倍になっても電力消費を現状に抑えることができるとしている。今後の研究開発の主要な例として、超高密度ストレージ用材料、コンピュータチップの用途に応じた専門化、AIによるコンピューティングリソースとインフラ管理、液冷却却技術、量子コンピューティングなどが挙げられている。一方で量子コンピューティングなどの長期的なエネルギー効率を予測することは困難としている。

コラム5

IEA「Digitalization and Energy」報告書

2017年にIEAが発刊した「Digitalization and Energy」は、エネルギーに対するデジタル化の影響についての情報提供を目的としたIEAの最初のレポートの位置づけとなっている。内容としてはデジタル化によるエネルギー需要部門（運輸部門、ビルディング、産業部門、資源採掘、電力部門、スマートデマンドレスポンスなど）でのエネルギー消費削減などの分析を行っている。またデータセンターや通信ネットワーク自体のエネルギー消費量についても推定しており、データセンターの電力消費は2014年194 TWh、2020年200 TWhとしている。また通信ネットワークの電力消費は2015年約185 TWhであり、2021年では保守的な中程度での10%改善率で2021年約320 TWh、過去を考慮した20%改善率で約160 TWhになると推定している。

またこの報告書の興味深いものとして、例えば自動車の自動運転やシェアリングによる効果について、エネルギー消費が半減するとの楽観的シナリオに加え、利便性やコストが削減し需要が喚起されることで逆にエネルギー消費量が2倍に増加するとした悲観的シナリオも着目している点にある。この「リバウンド効果」はこれまで十分考慮されておらず、今後重要な視点と考えられる。

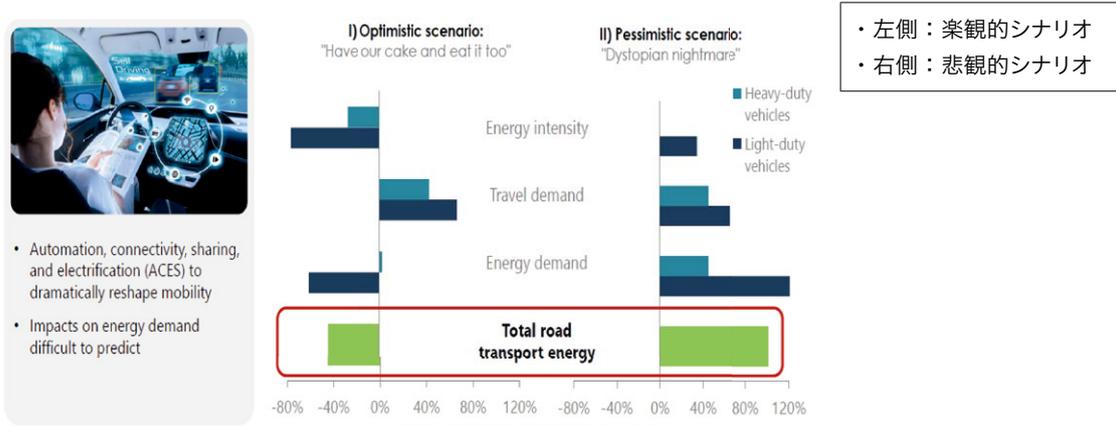


図 自動運転・シェアリング等の乗用車のエネルギー消費量へのインパクト (IEA)

また電力システムにおいて再エネ変動電源の増大により供給と消費のシステム全体をデジタル化で統合することで、柔軟性を高め、エネルギー部門間の境界を打ち破るとしている。

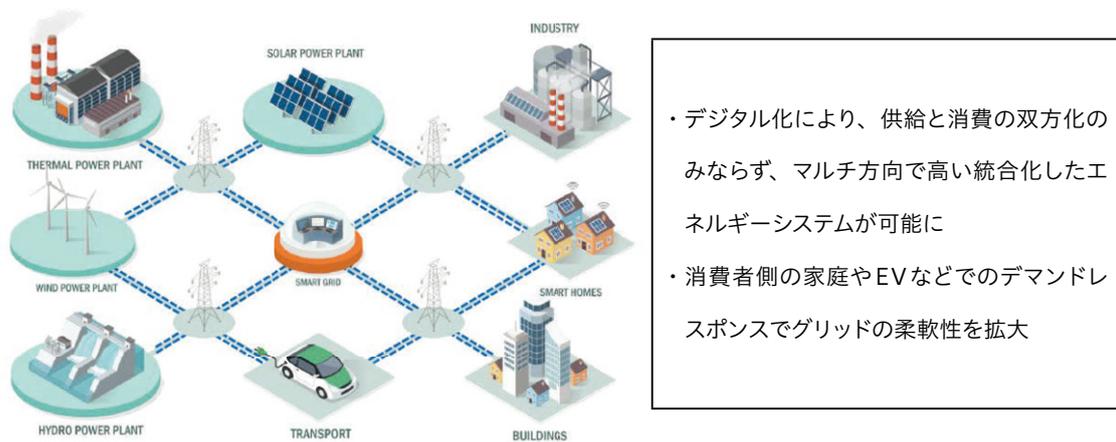


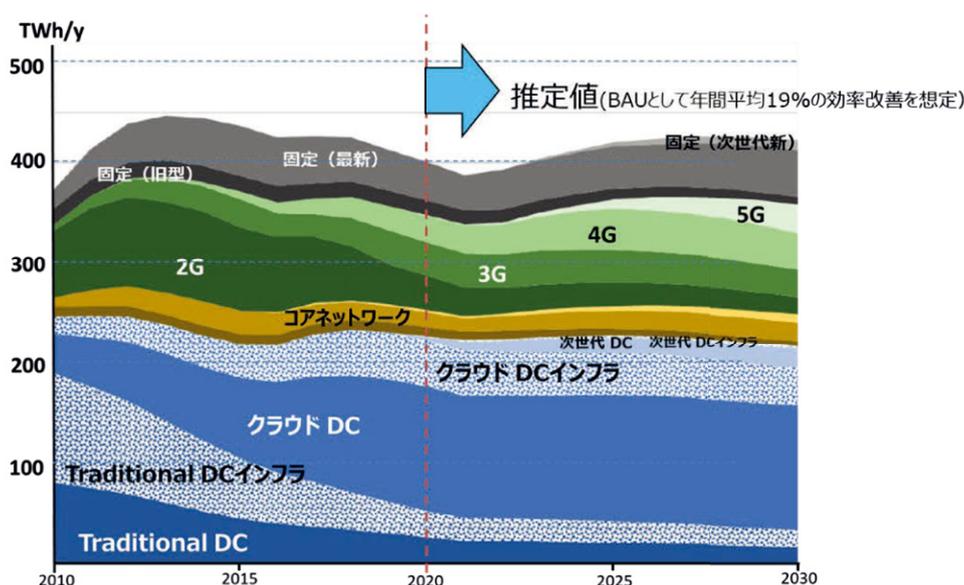
図 エネルギーシステムのデジタル化による変革 (IEA)

(参考文献)

1 : Digitalization and Energy Webinar (2018年2月7日資料) <https://iea.blob.core.windows.net/assets/e5ffa993-ef78-49f7-8cfa-5375a41d074e/ieadigitalizationandenergywebinar-180220161419.pdf>

またIEAではそのフレームワークである国際技術共同プログラム（4E-TCP：エネルギー効率が高い最終使用機器に関する技術共同プログラム）の下での作業プログラムにおいて、EDNA（Electronic Devices and Networks Annex）³²が実施されている。このEDNAの活動自体はIEAと協力関係にありつつも独立して実施されているが、通信ネットワークに接続される機器などのエネルギー関連の技術分析と政策ガイダンスの提供をタスクとしており、その一つとしてネットワークに接続された機器の総エネルギー消費量の推定結果が報告されている（2021年2月に改訂版³³）。

この報告書による電力消費量推定は、ネットワーク上流側であるデータセンターおよび通信ネットワーク、下流側であるネットワークとの接続機器が対象となっている。下流側の接続機器についてはグローバルでの条件別（地域、機器の種類など）で推計した保有台数より電力消費量を推定している。一方、データセンター・通信ネットワークの電力消費量は下流の各機器別のデータ通信量を求め、上流側のエネルギー原単位（kWh/GB）を乗ずることで算出している。この結果ではデータセンター・通信ネットワークのエネルギー原単位の削減が今後も従来通り平均19%削減（BAU）するとした場合、2030年までの電力消費量は2020年と同程度と見積もっている。（図表2-13参照）



図表2-13 データセンター・通信ネットワークの電力消費量推移（区別詳細）

DC：データセンター 資料³¹をベースにCRDSで追記

このEDNAでのデータセンター・通信ネットワークの電力推定方法によれば、データセンターの電力消費が2010年-2020年で250 TWh程度となり、米国ローレンスバークレー国立研究所の推定値より少し高めとなっている。これは両者の推定方法が異なっており、エネルギー原単位として前者がデータ量当たりの電力消費量（kWh/GB）、後者が各種機器別にその1台当たりの電力消費量（kWh/台）を用いているためと考えられる。

32 <https://www.iea-4e.org/edna/>

33 <https://www.iea-4e.org/wp-content/uploads/publications/2021/02/EDNA-TEM2.0-Report-V1.0-Final.pdf>

34 <https://iea.blob.core.windows.net/assets/9ba6c246-589c-4e8a-af4e-1a7aafe227d3/TotalDevices28AprilPPT2.pdf>

さらにデータセンター・通信ネットワークの効率改善策として、EDNAからの報告書³⁵も発刊されており、特にワークロードと機器をアクティブに監視・管理できる新しい「インテリジェント効率」技術により電力消費量の大幅改善（最大で75%のエネルギー削減）が可能としている。

他の報告書として国連のICT分野の専門機関である国際電気通信連合（ITU）の標準化部門は2030年までのデータセンター・通信ネットワークのCO₂削減目標値として2020年1月に勧告ITU-TL.1470³⁶を公表した。この勧告書では、IPCCの特別報告書で示された1.5°C目標達成に向けてICTセクター（利用時、製造時、ユーザ端末含む）の1.5°C軌跡への追従目標（2030年CO₂排出削減率58%（2015年比））を設定しており、その目標値の達成は継続的な高効率化対策および低炭素電力の利用拡大により可能としている（詳細は4章の補足資料参照）。

35 https://www.iea-4e.org/wp-content/uploads/2021/01/A1b_-_DC_WAN_V1.0.pdf

36 <https://www.itu.int/rec/T-REC-L.1470-202001-I>

2.3 過去におけるICTのエネルギー問題の振り返りからの示唆および今後の方向性

前項では電力消費量について2000年頃のインターネット普及によるIT機器・サーバ類などの問題、2015年頃からのデータセンターの問題、さらには最近のAI（深層学習）による問題など、複数回に渡るICT関連の電力消費増大に対する懸念の動きとその実情について記載した。この電力消費量の過大評価は関連データの不足によるものや、特定の条件下で電力消費が増大するとした論文の一部をセンセーショナルな記事として取り上げたことなどによる。とは言え、例えばAndraeらの2025年最悪ケース3,390 TWh（2020年全世界の電力消費：22,632 TWhの15%に相当）などは単純に電力単価10円/kWhと仮定して計算すれば約3,000億ドルになるのに対して、データセンター市場（2020年：事業系のみ）が492億ドル³⁷であることを考えると、このレベルの電力消費増大は市場規模が最低でも10倍以上拡大する必要があり、価値の高いニーズの出現による市場の牽引がない限り、経済合理性を持たないことがわかる。また電力消費増大にはリードタイムが必要な電力インフラの拡充も必要となり、物理的にも急激な増加対応を困難なものにする。このようなコスト的、物理的制約があるにもかかわらず電力問題として言及されるのは、ICTがもたらす急速な社会変化に対する不安・懸念、あるいは対策の必要性をエネルギー問題・CO₂問題として訴求しやすい単純な形で表現にしたものと言える。ただ最近のAIの電力問題に関しての2020年の論文³⁸では「深層学習が計算機性能に依存しており、現状のままでは計算コストが掛かりすぎる」といった、コスト問題としての論調で言及し、またその論文を取り上げた記事³⁹でも「AIが研究開発のような特異的な領域では強力なツールであるが、一般に広がるためには計算コストや通信コストがリーズナブルなレベルにまで低減することが必要」とした、冷静・客観的な内容のものも見られるようになってきている。

一方で今後カーボンニュートラルに向けて、エネルギーシステムを大きく変換する必要がある中で2050年頃までの将来のエネルギー消費量を推定することが環境・エネルギー政策を決める上でもますます重要になっている。このためICTセクターの長期的な電力消費量についても適切に評価できる方法の確立が望まれる。次に評価の現状と今後方向性について述べる。

（ICTセクターの将来の電力消費の評価方法）

データセンターや通信ネットワークの電力消費量推定方法、加えてネットワークに接続される機器類のエネルギー消費推定方法については、いくつかの方法が見られ、これまでもかなり検討が進んでいる。一般に今回のICT関連のみならず、車、建物などのエネルギー消費の推計のベースとなる考え方を単純化すると、式1の形になる。

$$\text{「エネルギー消費量」} = \text{「需要量」} \times \text{「エネルギー原単位」} \quad \dots \text{（式1）}$$

ここで

- ・ 需要量：ICT関連の各機器の保有台数（台）、延床面積（m²）、データ量（GB）など
- ・ エネルギー原単位：上記の基本単位当たりの各エネルギー消費量（保有台数の場合、kWh/台）など
- ・ 実際は分類を細分化（例えばデータセンターであればサーバ・ストレージなど、通信ネットワークであれば

37 <https://www.gii.co.jp/report/mama996316-green-data-center-market-by-component-solutions.htm>

38 <https://arxiv.org/pdf/2007.05558.pdf>

39 <https://www.wired.com/story/prepare-artificial-intelligence-produce-less-wizardry/>

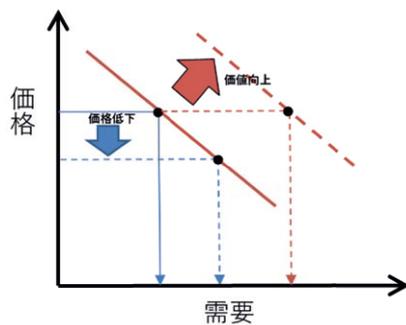
ば固定、無線（2G、3G、4G、5Gなど）して、その総和を求めることで推定

将来推定の難しいところは、将来時点における需要量およびエネルギー原単位を予測するところにある。当然正確に予測することはほぼ不可能なため、予測に対する考え方や方法論に妥当性・納得感があることが必要となる。エネルギー原単位は技術に依存していることから技術的ロードマップ（目標値など）を用いることで妥当性・納得感のある推定が可能と考えられる。一方で需要量増減は社会ニーズやコストに関連しており、生み出す便益・価値、コストなど技術と経済の要因が複合したものであり（コラム6参照）、推定がより困難である。従来のエネルギー集約セクターである素材産業（鉄鋼、非鉄、化学、セメント、紙・パルプ）の素材需要については一般に人口やGDPなどの経済的要因を含めた統計的推定式（計量経済学）を用いることが多い。ただICTセクターの技術進展の速度は非常に速く、素材産業のような大型装置・インフラように比較的ゆっくりとした技術進展となるセクターとは様相が異なる。特にICTは社会システムを構成するほぼすべてのセクター中に汎用技術（コラム7参照）として取り込まれ、社会システムを大きく変革していく可能性がある。このため社会がどのように変革するかをシナリオとして与えた上で具体的な社会システム構造とそのエネルギーシステム構造を踏まえながら需要量を予測していく必要がある。その意味ではEDNAの報告書³²の方法が比較的妥当性・納得感のある方法と考えられる。この方法は下流側のネットワークに接続されるユーザの機器すべてを機器の用途・種類・接続先別に細分化し、それら個別のデータ量と電力消費をボトムアップ的に推定した上で、算出したデータ量により上流側のデータセンター・通信ネットワークのデータ量当たりのエネルギー原単位を用いて電力消費量を推定する方法である（コラム7参照）。詳細で精緻なデータベースが必要になるものの、需要量として、ユーザ側の将来像をイメージしながら各接続機器の出荷台数・普及率などをシナリオとして与えることができることから、より現実感を持った推定方法になると考えられる。

以上のように「Green of ICT」としてICT自体の将来エネルギー消費を予測するためには、「by ICT」としてICTがどのように利用され、その拡大に伴う社会システムやエネルギーシステムの構造変化を予測しながら、データ通信量を推定する必要がある。すなわちICTセクターの電力消費量は、ICTによる社会システムやエネルギーシステムの構造の変化に依存するため、これらを考察した上で推定する必要がある。特にICTによるエネルギー消費量変化は、人の行動変容の影響も含めると大きいと推定され、ICTの将来エネルギー問題はICT利用が及ぼす社会への影響推定に帰着する。この課題は本報告書の目的である「ICT自体のエネルギー消費量」という範疇を超えることになるが、エネルギー問題を考える上で必須となることから、3章の検討項目として記載する。

コラム6

需要曲線（価格と需要の関係）



経済学的には左図の通り、需要量は価格と連動し、トレードオフの関係にある。さらにデータセンターの電力コストがライフサイクルコストの半分ほど占める^{*1}とすると、価格は電力コストと相関するため、結果としてエネルギー原単位と需要量は一定程度トレードオフの関係を持つ。エネルギー消費量は需要量とエネルギー原単位を乗じた

値であり、新たな価値向上が伴わない場合、極端な変化は起きにくいことになる。データセンターの電力消費が2010年から現在まで一定であったことは、コストと需要量のトレードオフ関係によることも考えられる。このことから将来のICT自体のエネルギー消費量がどれだけ増加するかはICTによる今後の新たな価値創造によると言える。

(参考文献)

1 : https://www.jdcc.or.jp/wp/wp-content/themes/jdccTheme/pdf/rd/houkoku_20210423.pdf

コラム7

汎用技術（GPT：General Purpose Technology）

・ GPT：広範囲で多様な用途に使用され得る基幹的な技術（厳密な定義はない）

GPTの代表である電気技術の歴史（1882年エジソンが送電事業開始から140年経過）が示すように、今後ICTが社会基盤を支える基幹技術として大きく成長する分野と期待されている。

過去の代表的なものとしては蒸気機関、電気技術、最近では「コンピュータ」と「インターネット」のICTの技術が取り上げられている。（最近ではAIもGPTとして取り上げられ始めている）

No.	GPT	時期	分類	No.	GPT	時期	分類
1	植物の栽培	紀元前9000～8000年	プロセス	13	鉄道	19世紀半ば	プロダクト
2	動物の家畜化	紀元前8500～7500年	プロセス	14	鋼製汽船	19世紀半ば	プロダクト
3	鉱石の精錬	紀元前8000～7000年	プロセス	15	内燃機関	19世紀終わり	プロダクト
4	車輪	紀元前4000～3000年	プロダクト	16	電気	19世紀末頃	プロダクト
5	筆記	紀元前3400～3200年	プロセス	17	自動車	20世紀	プロダクト
4	青銅	紀元前2800年	プロダクト	18	飛行機	20世紀	プロダクト
7	鉄	紀元前1200年	プロダクト	19	大量生産	20世紀	組織
8	水車	中世初期	プロダクト	20	コンピュータ	20世紀	プロダクト
9	3本マストの帆船	15世紀	プロダクト	21	リーン生産方式	20世紀	組織
10	印刷	16世紀	プロセス	22	インターネット	20世紀	プロダクト
11	蒸気機関	18世紀末 19世紀初頭	プロダクト	23	バイオテクノロジー	20世紀	プロセス
12	工場	18世紀末 19世紀初頭	組織	24	ナノテクノロジー	21世紀	プロセス

(出典) Richard G. Lipsey, Kenneth I. Carlaw, and Clifford T. Bekar, (2005) . Economic Transformations: General Purpose Technologies and Long Term Economic Growth., Oxford University Press より三菱総合研究所作成)

(参考文献)

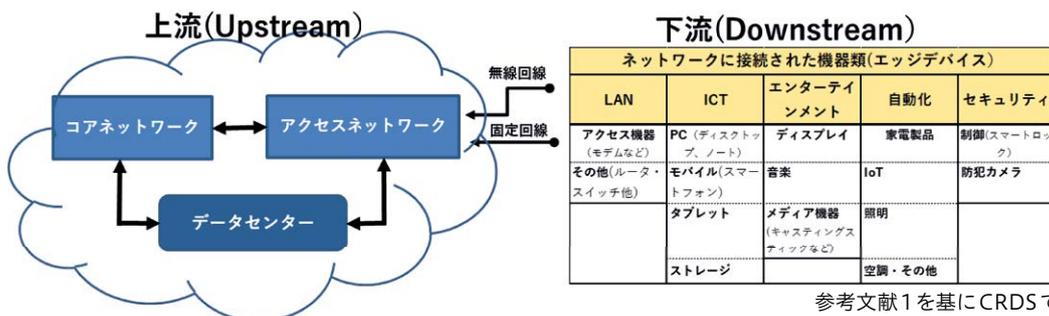
- 1: ICTによるイノベーションと新たなエコノミー形成に関する調査研究 (2018年3月)
https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/linkdata/h30_02_houkoku.pdf

コラム8

EDNA Total Energy Model for Connected Devices : (TEM : ICTの総エネルギー評価モデル)

(モデルの構造)

EDNAのICTの総エネルギー評価モデルであるTEMは下流として通信ネットワークと接続された機器類と上流側であるデータセンター・通信ネットワークに分けて評価している。



参考文献1を基にCRDSで作成

(電力消費量の推定方法概要)

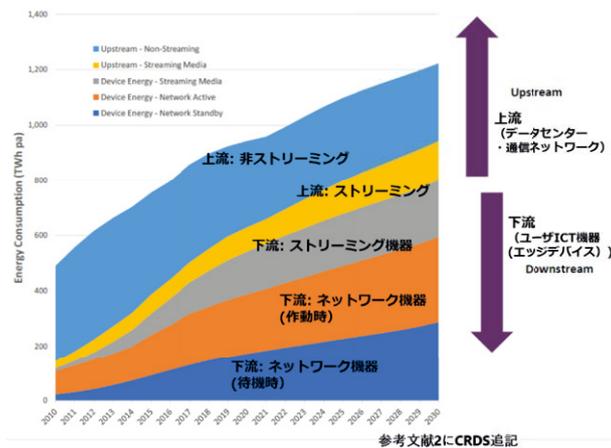
下流のネットワークとのユーザの接続機器類を用途・種類・接続先別に細分化し、グローバルでの条件別（地域、機器の種類など）で推計した保有台数や利用状況、地域特性などを推定している。その上で、エネルギー原単位として各機器類の消費電力量を乗じて、それらの総和を下流での電力消費量としている。その際に消費電力量と共に各機器類からのデータ通信量も算出し、それらデータのタイプ（ストリーミング/非ストリーミング*注）なども加味した上で、上流の通信ネットワークおよびデータセンターでの各データ量当たりのエネルギー原単位（kWh/GB）を乗ずることで算出している。

*注）ストリーミング（動画配信）でコンテンツ配信ネットワーク（CND）の場合、ユーザ近傍にコンテンツのコピーを取得したキャッシュサーバを設けることで、ホップ数（経由する中継器数（ルータ数））を1～4程度に削減、一方で非ストリーミングの場合、ホップ数は15程度。ホップ数は遅延、電力消費に影響する。このことからストリーミングでのエネルギー原単位（kWh/GB）は非ストリーミングよりも小さい。

(主な推定結果)

2030年における上流（データセンター・通信ネットワーク）の電力消費量は422 TWh、下流（ユーザICT機器）の電力消費量は799 TWhである。その内訳は、上流について非ストリーミングで280 TWh、ストリーミングで142 TWh、下流についてストリーミング機器で204 TWh、ネットワーク機器の作動時で307 TWh、ネットワーク機器の待機時で287 TWhとなる。2010年の上流の電力消費は373 TWhであることから上流の増加は少なく、増加の大部分は下流のICT機器数の増加によるものである。

またストリーミング関連のエネルギー原単位（kWh/GB）は全体平均よりも大幅に小さいと推定され、このため全体のデータ通信量は大きいが、電力消費量は小さい。さらに通信ネットワークにおいて固定通信の総電力消費量は少ないが、ユーザエッジ



デバイスの総消費量は比較的多い。一方で無線通信（モバイル）の総電力消費量は多いが、ユーザ機器は主にバッテリー駆動で低電力消費設計になっているため電力消費量は少ない。

なおユーザ機器の中には自動運転などの車両搭載に関連したICT機器は含まれていない。

(参考文献)

1 : <https://www.iea-4e.org/wp-content/uploads/publications/2021/02/EDNA-TEM2.0-Report-V1.0-Final.pdf>

2 : <https://iea.blob.core.windows.net/assets/9ba6c246-589c-4e8a-af4e-1a7aafe227d3/TotalDevices28AprilPPT2.pdf>

(統計データを用いた我が国のICTセクターの電力消費量推定の可能性)

我が国のデータセンターの電力消費量について推定した例として、前述の2008年のグリーンIT推進協議会¹¹と2018年のJST低炭素社会戦略センターが実施した調査⁴⁰が挙げられる。それらはいずれもボトムアップ的方法として、データセンターのIT機器の保有台数を推定することで算出した値であり、その調査時直近の結果としてそれぞれ2005年146億 kWh、2017年164億 kWhと推定している。一方で過去の値、すなわち実際の電力消費量の実績値としての統計データがあれば、これを用いたトップダウン的な推定も可能である。またこの方法はボトムアップ的推定値の結果検証の意味でも重要になる。このことから、現在入手できる国内統計データからの推定を試みた。

我が国のエネルギー消費量については資源エネルギー庁による「総合エネルギー統計」が毎年作成されている。この目的は国内のエネルギー需給の概要を示し、エネルギー・環境政策の企画立案やその効果の実測・評価などに貢献するとともに、エネルギー需要に対する定量的な理解や情勢判断を支援することである⁴¹。データ収集方法として、エネルギー多消費産業である「パルプ・紙・板紙製品」、「化学工業製品」、「化学繊維製品」、「石油製品」、「窯業・土石製品」、「ガラス製品」、「鉄鋼」、「非鉄金属地金」、「機械器具」の分類については経済産業省特定業種石油等消費統計調査規則により報告義務がある調査対象事業所から収集している。一方でデータセンターや通信ネットワークの多くは「情報通信業」に分類される。このようなエネルギー多消費産業以外の分野は無作為抽出による標本調査でその値を推定しており、その意味でエネルギー消費量の精度面では前者よりも不確かさがある。とは言え、総合エネルギー統計（エネルギーバランス表）⁴²はこれらをエネルギー供給と消費の両面から整合性を取りながら総合的な表としてまとめており、一定の精度は担保されていると言える。しかしながらデータセンターの場合、自社所有のものは各事業分野に分類され、またスーパーコンピュータの富岳（理研）に代表される研究用データセンターも他の分類（学術研究・専門・技術サービス業）となっていることから、統計上の「情報通信業」の分類には事業系データセンターに限定されていると考えられる。

それ以外の利用可能な統計データとしては「経団連低炭素社会実行計画」における各業界団体の調査結果⁴³が挙げられる。これは経団連の各業界団体において参加各社からのエネルギー消費量（各社の環境報告書などがベース）を集計したデータである。ただしすべての会社が参加しているわけではなく、また重複等によるデータの補正はしていない。しかしながら例えば電気通信業者協会のように電気通信業（地域通信事業、長距離・国際通信事業、移動通信事業、データ通信事業等）の場合、売上規模（低炭素社会実行計画参加企業）で90%以上の集計値となっていることから、通信分野・通信ネットワークの参考データとして利用できると考えられる。一方でデータセンターの場合は業界団体（テレコムサービス協会、インターネットプロバイダー協会）は参加企業の割合が低く、全体の統計値としての現時点での利用は困難と考えられる。

2019年の総合エネルギー統計と経団連低炭素実行計画の統計データの結果を比較してみると、前者での情報通信業の電力消費量は142億 kWh、そのうちの通信業（中分類）は80億 kWh、一方で後者の電気通信業者協会での電力消費量（実績値）は104億 kWhとなっている。通信同士の比較では総合エネルギー統計の通信業の値は電気通信業者協会の値よりも2割程度低い。電気通信業者協会にはデータセンターを運営する企業も含まれている影響も考えられるが、概略値として電気通信業での電力消費量が80億 kWh～100億 kWh程度と推定できる。ここでの値は通信ネットワークの直接的な電力消費以外に事務所等の間接的電力消費も含まれるため、我が国における通信ネットワークの電力消費量そのものを示すものではないが、今後

40 <https://www.jst.go.jp/lcs/pdf/fy2018-pp-15.pdf>

41 https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/summary.html#headline1

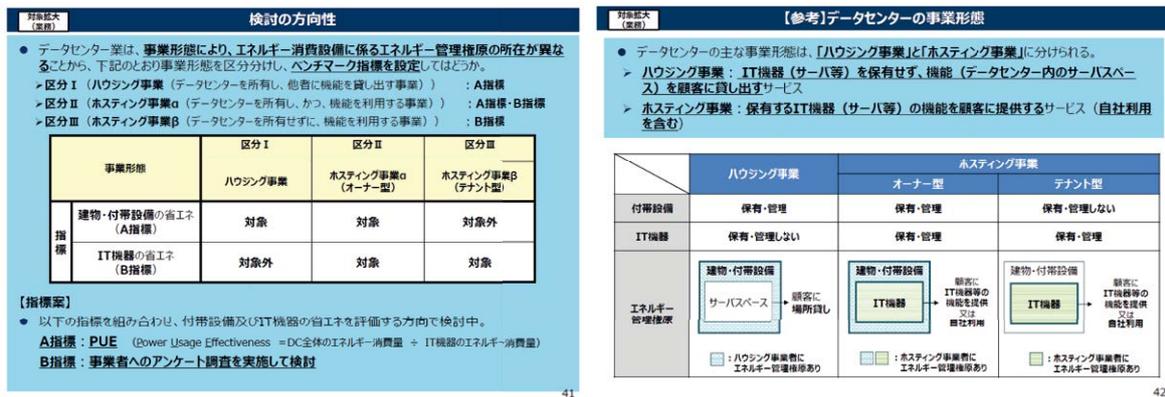
42 https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/total_energy/results.html#headline2

43 <https://www.keidanren.or.jp/policy/2021/007.html>

のボトムアップ的推定を補完するトップダウン的な推定値として参考になると考えている。

以上のように統計データより電力消費量を推定できる可能性はあるが、現状では限定的であり、さらにその統計データについてエネルギー消費量が懸念される業種・分野についての補充・整備が求められる。

なおデータセンターについては「エネルギーの使用の合理化等に関する法律（通称、省エネ法）」においてエネルギー消費機器等（トップランナー制度）に係る規制を新たに設置することを検討中（図表2-14参照）であり、そのベンチマーク指標の設定や対象とするデータセンター業の定義について議論が行われている状況（2021年10月時点）にある⁴⁴。これによりベースとなるデータが集計されることから、今後データセンターに関する国内エネルギー消費量についてはより精度の高いデータが確保できることが期待できる。



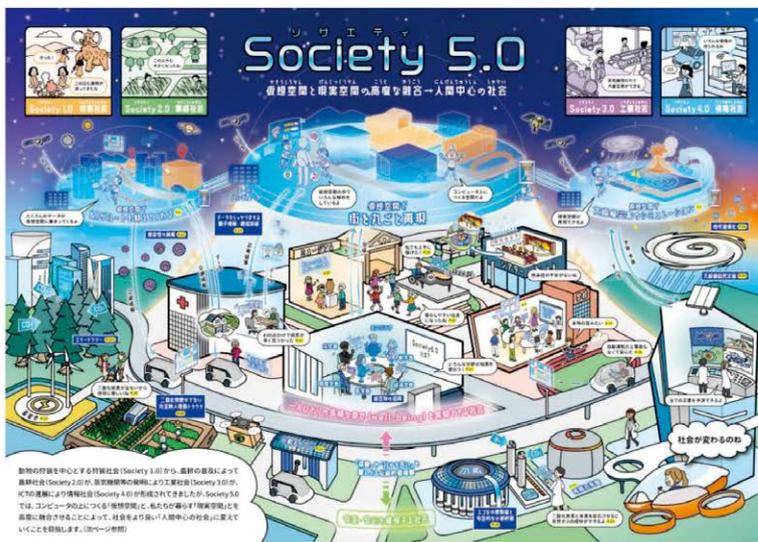
図表2-14 データセンターの省エネ法適用に関する検討

44 https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene_shinene/sho_energy/kojo_handan/pdf/2021_001_04_00.pdf

3 将来のデジタル化進展におけるエネルギー問題：今後のICTの課題と対策

3.1 デジタル化への期待と進展

最近ではデジタル化、デジタルトランスフォーメーション（DX）、Society 5.0で表現される将来像⁴⁵、すなわちICTを利用して仮想空間（サイバー）と現実世界（リアル）の融合による社会変革やビジネス変革への期待が高まっており、さまざまな新しい価値創造が期待されている。またSDGsが目指す持続可能な社会の達成においても、デジタル化は重要と考えられている⁴⁶。

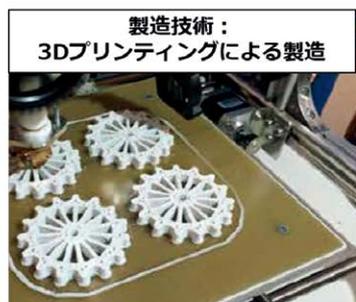


令和3年度科学技術・イノベーション白書
扉絵（イラスト）：Society 5.0
（仮想空間と現実空間の高度な融合
→人間中心の社会）



その他

- 自動運転（CASE）
- 工場の製品検査
- 電力マネジメントシステム
- エネルギーシステム
- デジタルツインによる設計
- フィンテック（金融のDX）
- 治水管理／気象予測



写真元出典

左：STEMShare NSW on Unsplash

中：<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=372212840>

右：<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3915436>

図表3-1 デジタル化で期待される新しい活用例

45 https://www.mext.go.jp/b_menu/hakusho/html/hpaa202101/1421221_00023.html

46 “The Digital Revolution and Sustainable Development: Opportunities and Challenges (TWI2050)”, <http://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/15913/1/TWI2050-for-web.pdf>

デジタル化により様々な分野で新しい価値創造や利便性向上、高効率化、コスト削減などが期待されている（CRDS 報告書参照⁴⁷）。またエネルギー分野のデジタル化による効果についてはIEA 報告書¹⁸に詳しく記載されており、例えば運輸分野では、自動車、トラック、飛行機、船、鉄道、およびそれらを支えるインフラがデジタル化によりスマートになり、安全性と効率が向上することが期待されている。特に自動運転では電動化、シェアリングとともに運用を含めたエネルギー効率の大幅な改善が期待できる（これについては後述）。建物ではデジタル化により、リアルタイムデータによる運用効率改善で、エネルギー消費量が約10%削減できる。産業分野でのデジタル化では、センサーとデータ分析を組み合わせ、プロセス制御や機器の故障予測などで費用対効果の高い省エネの実現が可能である。またデジタルツインによる設計⁴⁸や3Dプリント⁴⁹を使用して早期の製品化（例えば航空機を軽量化など）で省エネを加速できる。さらに電力分野では、発電・配電部門における運用と保守のコスト削減、発電所とネットワークの効率を改善、資産の運用寿命の延長などが達成でき、約5%の総発電コスト削減が可能と試算している。

我が国も含めて世界的に2050年カーボンニュートラルに向けては、太陽光、風力などを主力電源化する方向で進んでいるが、これら大量の自然変動電源を電力ネットワークに安定的に取り込むためにはデジタル化を前提として、供給および需要（一般家庭のような分散的消費者含む）の機器類・システムを協調的に最適化するエネルギーマネジメントシステムの構築、さらには電気利用拡大を通じて需要の各分野（運輸、熱など）を統合化（セクターカップリング）することが重要になる。このデジタル化のエネルギーシステムの統合化はエネルギー分野でのデジタル化による最大の変革ともいえる。これらの実現には需要家のエネルギー消費パターンの変化などのデマンドレスポンスも含まれ、一般消費者の行動変容も重要な要素となる。ただしエネルギー消費は本来、派生需要すなわち食料のように直接消費される財ではなく、その消費行動の裏には別の動機（暖かさ、移動、情報入手など）があるため、人の行動そのものの研究（エネルギー需要科学）のような人文・社会系との分野融合研究も重要となる⁵⁰。これらの分野融合研究の推進においてもIoTによる行動データ収集やビッグデータ解析などのデジタル化が重要な手段として期待されている。

（将来期待される技術例：自動運転）

デジタル化による新たな価値創造の観点から数多くのものが期待されているが、その一つとして自動運転が挙げられる。しかしこの自動運転の実現のためにはデータ通信の高速・大容量・低遅延・同時多接続、さらには低消費電力などの高い要求性能が必要と考えられている。以下に自動運転における期待とデータ通信およびその処理についての今後の課題について述べる。

自動運転は交通事故の低減や交通渋滞の削減、高齢者や移動制約者の方々のモビリティの確保といった社会的課題の解決に加え、物流や移動に係る新たなサービスやビジネスの創出などをもたらすと期待されている。また自動運転はCASE^{※注}と呼ぶ「エネルギーインフラとしてのクルマ」、「移動ソリューションとしてのクルマ」「走る情報端末としてのクルマ」を標榜したクルマの新しい価値創造のための次世代の中核技術として総合的に推進されている⁵¹。

※注）CASE:Connected（コネクティッド）、Autonomous/Automated（自動化）、Shared（シェアリング）、Electric（電動化）

47 CRDS 調査報告書「デジタルトランスフォーメーションに伴う科学技術・イノベーションの変容」
<https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2020/RR/CRDS-FY2020-RR-01.pdf>

48 CRDS 戦略プロポーザル「革新的デジタルツイン」
<https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2017/SP/CRDS-FY2017-SP-01.pdf>

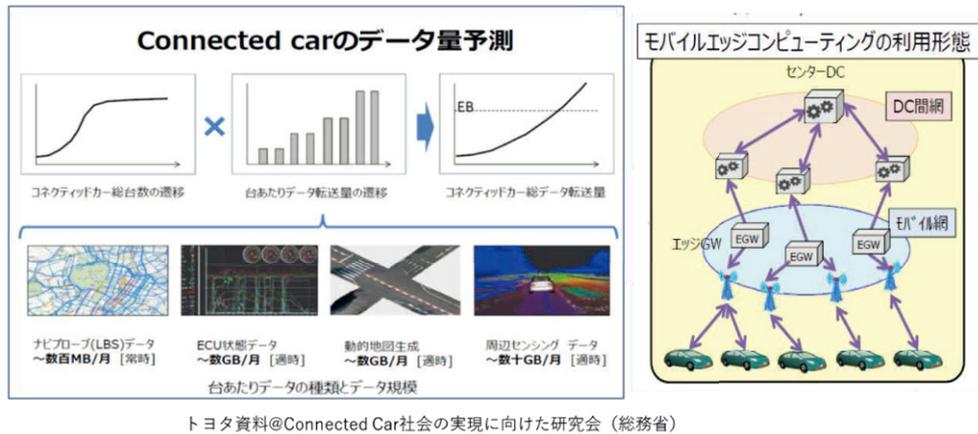
49 CRDS 俯瞰ワークショップ報告書
<https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2018/WR/CRDS-FY2018-WR-02.pdf>

50 CRDS 戦略プロポーザル「未来エネルギーネットワークの基盤技術とエネルギー需要科学」
<https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2016/SP/CRDS-FY2016-SP-04.pdf>

51 https://www.meti.go.jp/shingikai/mono_info_service/jidosha_shinjidai/pdf/003_01_00.pdf

を表す造語、なお米国ではACESと呼んでいる

現在の自動運転のターゲットはレベル4と呼ばれる限定領域での自動走行である。地域限定型でのレベル4の技術開発の方向は主にAIを用いた学習制御によるものであり、この学習のための膨大なデータが必要とされる。例えば図表3-2に示すようにコネクテッドカーとして転送される周辺センシングデータ量は1台あたり数十GB/月台になるとされている⁵²。データ通信量を10GB/月台として、国内で仮に500万台の車の情報を集めるとすると50PB/月のデータ通信量になる。(参考：現在の移動通信量は1,400PB/月、固定通信量は8,600PB/月(総務省トラヒック調査(2021年5月)⁵³のデータより換算))



図表3-2 デジタル化で期待される新しい活用例⁵²

自動運転において、衝突防止などの安全性に直接かかわる部分は信頼性の観点より車のスタンドアローンでの対応になると考えられるが、それ以外については車内の消費電力の制約(特にEVの場合は電池容量の制約)や車が入手するデータ情報の活用のため、車車間や高度交通システム(ITS)と通信(無線)で連携することが考えられている。例えば、周辺情報の先読みから防げる事故(出会い頭、歩行者など)や運転の快適性のための情報(スーパー等の駐車場待ちの渋滞行列レーンを避けるなど)は通信を経由した情報処理が重要になる。一方でダウンロードが中心のインターネット利用とは異なり、自動運転(コネクテッドカー)の場合は、車からのデータのアップロードとその処理後データのダウンロードとなるため、低遅延性確保とネットワークの負荷低減のためにユーザ近傍に分散的な計算処理を行う必要があり、そのためのデータセンターとして、エッジクラウド(エッジコンピューティング)が必要になる。このような状況から自動車会社、テレコム・機器会社、通信会社、データ処理会社などがコンソーシアムを作り、自動車ビッグデータの処理を実現するためのエッジコンピューティングのインフラ検討を推進する動きがある⁵⁴。このように今後はユーザ近傍の比較的小規模なエッジコンピューティングと従来の大規模なクラウドコンピューティングとの住みわけが進むと考えられている。

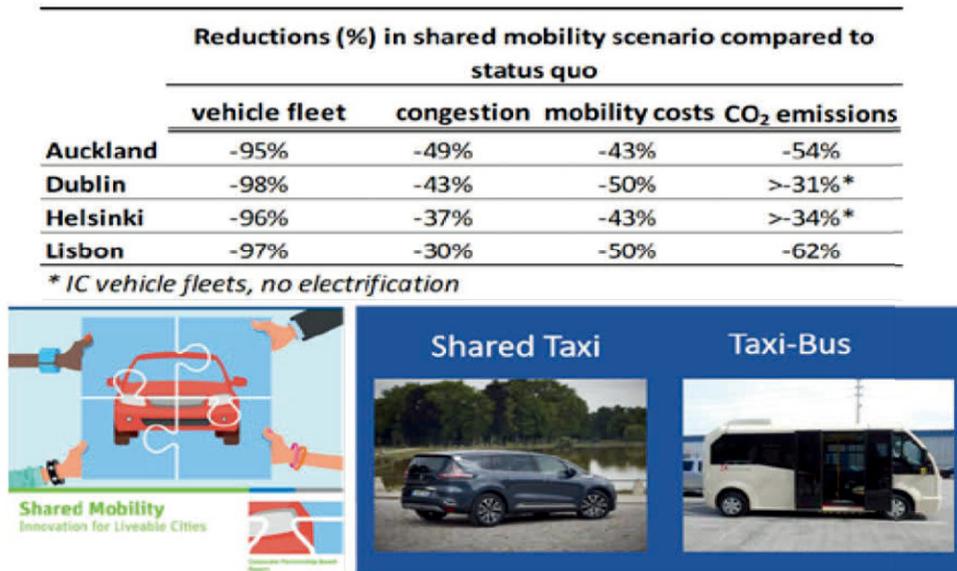
なおカーボンニュートラルの観点からは自動運転を含むCASEの進展によるエネルギー消費の大幅削減が期待されている。特に乗用車は時間換算で94%が利用されていない状態と推定されており、交通需要を一定

⁵² https://www.soumu.go.jp/main_content/000483331.pdf

⁵³ https://www.soumu.go.jp/main_content/000761096.pdf

⁵⁴ Automotive Edge Computing Consortium
<https://aecc.org/>

と仮定すると個人所有からシェアリング利用、移動のデマンドサービスであるMaaS（Mobility as a Serves）への転換により理想的には1/10以下に乗用車台数を減らすことができると言われている⁵⁵。これにより車の利用時のエネルギー消費削減に加えて、理想的には車自体の生産台数を1/10に削減、それに伴う材料生産量の削減、さらには駐車場の削減やその跡地の利用などさまざまな変化が考えられている。このようにデジタル化は、従来の自動車所有のパラダイムから自動運転によるMaaSの提供へのシフトに貢献する可能性がある。



図表 3-3 デジタル化で期待される新しい活用例

(元資料：ITF（OECD国際交通フォーラム）)

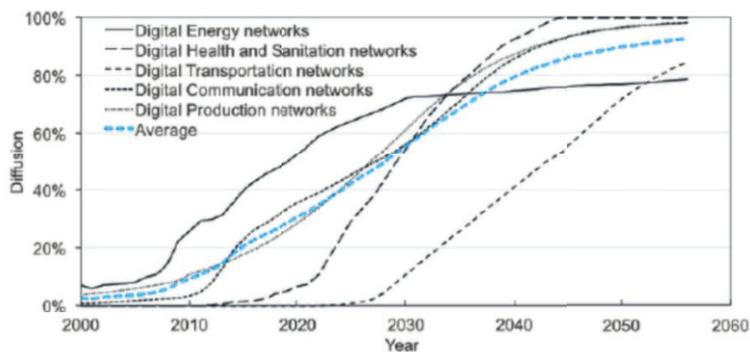
図表 3-3は4つの都市例におけるシェアリングサービスによる車両数、渋滞、モビリティコスト、CO₂排出量への削減効果を示したものである。車両数は95%～98%削減、CO₂排出で31%～62%の削減を予測している。しかしながらコラム5に示したように渋滞削減、コスト削減によりリバウンド効果として交通需要が喚起され、期待ほど低減しない可能性も言及されている。このリバウンド効果については3-4項で記述する。

55 <http://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/15913/1/TWI2050-for-web.pdf>

コラム9

デジタル化で期待される新しい技術の普及推定

自動運転などのデジタル化を用いた新しい技術の普及速度は将来の電力消費量の増加を考察する上で重要な要因の一つである。この普及速度を現状の技術トレンドや過去の類似した技術の普及トレンドから考察した例を下図に示す。これはデジタル化が中核となるエネルギーシステム、ヘルスケア、交通（自動運転）、通信、生産の5つの技術の米国での普及率について推定したものである。



元文献：Sanjeev, et al., Bell Labs Technical Journal 22: 1–18.

米国でデジタル化によるこれら技術の平均的な普及率が50%になるのは2030年頃と推定している。すなわち2030年頃までは普及率も指数関数的に増加するがそれ以降の増加率は飽和状態に向けて低下していく。このことはデジタル化拡大によるデータ量について、いつかの時点（米国では2030年頃以降）で増加率が緩和されることを示唆している。このように普及率を推定することもデータ量推定、電力消費量推定の上で重要となる。

(参考文献)

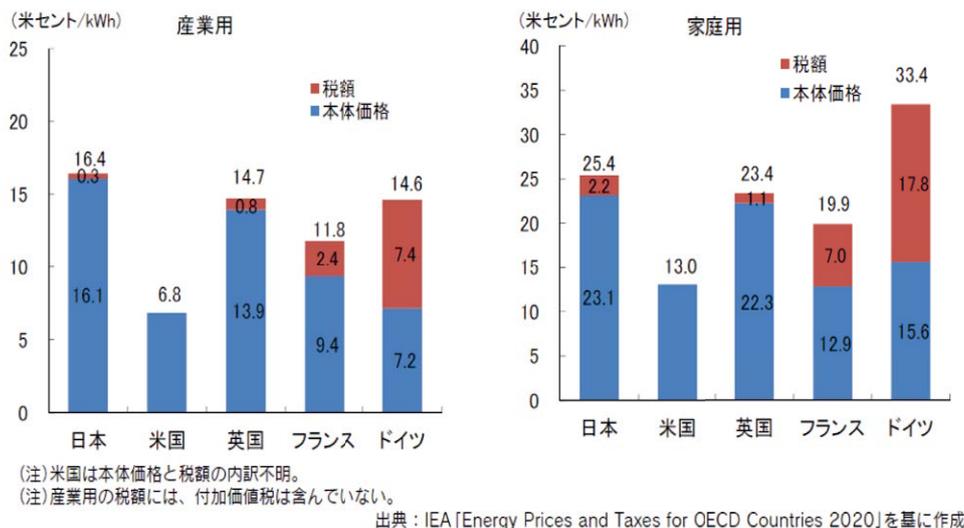
1：TWI2050「The Digital Revolution and Sustainable Development」
<http://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/15913/1/TWI2050-for-web.pdf>

(デジタル化進展を支えるためのエネルギー消費削減の重要性)

デジタル化進展に伴い将来に向けて、ICTの性能向上および電力消費削減を継続させることがデジタル化を広く普及させるために重要となる。通信ネットワーク事業者の運営費用の20%～40%が電力コスト⁵⁶とされている中で、電力消費削減が継続的に達成されない限り、Society 5.0の社会実現も絵に描いた餅になっ

56 https://www.gsma.com/wp-content/uploads/2019/04/The-5G-Guide_GSMA_2019_04_29_compressed.pdf

てしまう。特に我が国の高い電力コストを考えるとエネルギー消費削減は特に重要な研究開発課題と言える(図表3-2参照⁵⁷)。



図表3-4 世界各国の電気料金比較 (2019年)

以上のことからICTの性能向上・電力消費削減のための継続的な研究開発に加えて、Society 5.0の実現による個人・社会への便益・価値創造やそれらがもたらす社会システムへの変革による影響評価をしていく必要がある。これらについて、3.2項でデジタル化の国内外の政策動向を示したうえで、3.3項でデジタル化を支えるICTの性能向上・電力消費削減の継続的な研究開発、3.4項でデジタル化による社会システムへの変革による影響評価等について記述する。

3

将来のデジタル化進展におけるエネルギー問題…今後のICTの課題と対策

コラム10

TWI2050 イニシアティブ

TWI2050 (The World in 2050) イニシアティブ：国連持続可能な開発目標 (SDGs) 達成に向け、必要となる構造的転換を行うためのバックカスティング・モデリング分析プロジェクト。SDGs制定直後の2015年に国際応用システム分析

57 https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2021/pdf/2_2.pdf

研究所（IIASA）等が中心になり設立。日本を含む20カ国以上が参加。

2018年7月に最初のレポートとして「Transformations to achieve the Sustainable Development Goals」を発刊し、SDGsと2050年以降の長期的な持続可能性を達成するための6つの重要な変革として「人間の能力と人口動態」、「消費と生産」、「脱炭素とエネルギー」、「食品・生物圏・水」、「スマートシティ」「デジタル革命」を特定している。



2018年には第2報のレポートとして6つの重要な変革の内、デジタル革命を取り上げた「The Digital Revolution and Sustainable Development」が発刊された。ここではSDGs達成を導くためにはデジタル化の原動力としての潜在的なプラス面を強く肯定する一方で、デジタル化のマイナス面も着目しており、このマイナス面への対応がないと社会的・経済的混乱、対立をもたらす可能性に言及している。これは過去の大規模で根本的で破壊的な技術革新、例えば印刷機の発明（1456年頃）が、啓蒙、科学、民主主義、産業革命をもたらす一方で、欧州での宗教戦争（1618年-1648年）や工業化による大規模な搾取、社会的対立、階級闘争をもたらしたことになぞらえたものである。特に開発途上国の貧困層など「デジタル格差(digital divide)」の影響を受けやすい層にも対応して、繁栄、インクルーシブ、環境の持続可能性、優れたガバナンスの必要性など、デジタル変革を成功させるための前提条件や、デジタル化進展による未来の社会の劇的な影響に言及したものになっている。

(参考文献)

1 : https://www.jst.go.jp/sdgs/pdf/sti_for_sdgs_report_nov_2019.pdf

2 : <https://iiasa.ac.at/web/home/research/twi/TWI2050.html>

3 : <http://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/15913/1/TWI2050-for-web.pdf>

3.2 デジタル化関連の国内外施策動向

半導体技術・デジタル化に関しては国際的に競争領域の技術であり、特に最近の半導体不足の影響により経済安全保障の観点から日欧米中において産業政策を含めた施策⁵⁸が進められている。

世界の半導体・デジタル産業に関する産業政策

- これまで、デジタル化は主に民間主導で実現。他方、**デジタルが経済・社会を支える重要基盤となったことで、その成否が国民生活に与える影響が格段に増大。**
- また、経済安全保障上も、デジタル化が無視できない存在、国力の源泉となる中で、**資本主義経済を採用する国においても、次元の異なる半導体・デジタル産業に関する産業政策が開始**されている。
- 我が国としても、これまでのやり方にとらわれず、**政策ターゲットを戦略的に絞り込んだ上で、地域社会から世界経済まで真にインパクトある政策を企画・実施していくことが必要。**



ジョー・バイデン米大統領は、スピーチで半導体チップを示しながら、半導体の重要性を熱弁。半導体サプライチェーンの調査を指示する大統領令に署名

(出典) SAUL LOEB/AGENCE FRANCE-PRESSE/GETTY IMAGES

各国・地域の半導体・デジタル産業に対する政府の支援（例）

米国	研究開発投資や設備投資など520億ドル（約5.7兆円）を半導体産業に投資（上院で審議中）。（2021.5）
欧州	半導体を含むデジタル分野に今後2-3年で1350億ユーロ（約18兆円）以上を投資。（2021.3）
中国	中央政府は2014年から基金を設置し、半導体関連技術へ計5兆円を超える人規模投資を実施。これに加えて、地方政府で計5兆円を超える半導体産業向けの基金が存在。（合計10兆円超）
台湾	台湾への投資回帰を促す補助金等の優遇策を始動し、ハイテク分野を中心に累計で2.7兆円の投資申請を受理。（2019.1）

5

図表 3-5 世界の半導体・デジタル産業への産業政策

我が国の半導体産業は1990年以降国際的にシェアが低下しており、後述する「半導体・デジタル産業戦略」を打ち出し、数々の対応を進めようとしている。またデジタル化に伴うデータセンターや通信ネットワークは2050年カーボンニュートラル社会の実現においても重要とされており、グリーン成長戦略における柱としても考えられている。

（我が国のデジタル化関連の政策動向）

ここでは我が国の政策的対応の現状と具体的な研究開発のファンディング等について記述する。

• グリーン成長戦略

2020年10月の我が国の「2050年カーボンニュートラル」の宣言を受けて、2020年12月に内閣府の経済財政諮問会議の「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」が採択された。この総合的政策の中の対象14業種の一つとして半導体・情報通信が挙げられている。また半導体・情報通信産業はグリーンとデジタルを同時に進める上での鍵の位置づけであり、デジタルによるグリーン化（Green by digital）とデジタルのグリーン化（Green of digital、ICT自体のグリーン化）を両輪として推進するとしている。具体的にはデジタル化を支えるデータセンター、情報通信インフラなどの国内整備、地域も含めたデジタル活用・省CO₂化などに取り組むとともに、あらゆる産業分野においてデジタル化、デジタルトランスフォーメーション（DX）

58 <https://www.meti.go.jp/press/2021/06/20210604008/20210603008-3.pdf>

を後押しすることが必要としている。その中にはデータセンターの立地（国内立地・誘致、最適配置）、高度情報通信インフラ（5G、ポスト5G）が挙げられており、このためにデータセンターのゼロエミッション化・レジリエンス強化のモデル創出や再エネなどの脱炭素電源導入のための実証・補助事業・制度支援を行うこととなっている。また2030年までに新設データセンターの30%省エネ化、2040年に、半導体・情報通信産業のカーボンニュートラルを目指すとしている。

• 半導体・デジタル産業戦略

新型コロナ対応によるデジタル化の進展、2050年カーボンニュートラルに向けた動き、世界的な半導体需給状況のひっ迫、半導体・デジタル関連技術などの貿易問題、経済安全保障など、デジタル産業やデジタルインフラ、その基盤となる半導体を取り巻く環境の大きな変化に対応するために経済産業省が2021年6月に半導体・デジタル産業戦略⁵⁹として、半導体・デジタルインフラ・デジタル産業のそれぞれの個別戦略を策定した。エネルギー消費削減を言及している内容としては、「半導体」では、省エネ・低消費電力化を可能にする革新素材（SiC、GaN、Ga₂O₃）によるパワー半導体の促進、および光配線化によるデータセンターの省エネ化、Beyond5G/6Gのオール光時代を見据えた光エレクトロニクス・デバイス、光電融合プロセッサ（“Post Moore”）等の開発が挙げられている。「デジタルインフラ」については我が国がアジアの中核データセンターハブ（立地拠点）となることを目指すとともに、次世代グリーンデータセンターといった省エネ技術の開発を進め、使用する電力を再エネ化していくとしている。また次世代技術としてハイパフォーマンスコンピュータ、量子コンピュータ等への研究開発への支援、さらにはポスト5G技術の高度化、高効率化、グリーン化を促進するための技術開発の支援を行うとしている。「デジタル産業」においてはデータ通信量の急増の中でも、エッジ側の分散クラウド上でのデータ処理をソフトウェアによって最適化し、省エネ化・高性能化を図っている。また今後の施策にはポスト5G基金（2000億円）、グリーンイノベーション基金（2兆円）、産業競争力強化法などを活用する予定である。



図表 3-6 デジタルインフラにおけるデータセンターの位置づけとデータセンターの最適配備

• 国内の研究開発プログラム（ファンディング）

前述の2つの戦略に沿ったファンディングには、データセンター・通信ネットワークに対して、省エネ対策・高効率化が含まれる研究開発プログラムが実施（予定含む）されている。

図表 3-7にこれらの主な研究開発プログラムを示す。

59 <https://www.meti.go.jp/press/2021/06/20210604008/20210604008.html>

3 将来のデジタル化進展におけるエネルギー問題…今後のICTの課題と対策

図表3-7 国内のICT関連の研究開発プログラム（目的に省エネ対策・高効率化を含むもの）

ファンディング機関名	プロジェクト・事業名	内容	期間	予算（概略）
NEDO	グリーンイノベーション基金事業／次世代デジタルインフラの構築	①次世代グリーンパワー半導体開発(SiC,GaN) ②次世代グリーンデータセンター技術開発(光電融合技術等により2030年までに40%以上省エネ)	2021年度～2030年度	10年間総額 ①518億円 ②892億円
	ポスト5G情報通信システム基盤強化研究開発事業	①ポスト5G情報通信システムの開発、②先端半導体製造技術の開発、③先導研究	2020年度～	基金総額2000億円 R2:35件採択 R3:35件採択予定
	超低消費電力型光エレクトロニクス実装システム技術開発	①光配線技術、②光電子融合システム	2013年度～2021年度	2021年度予算: 15億円
	高効率・高速処理を可能とするAIチップ・次世代コンピューティングの技術開発	①超低消費電力なAIコンピューティング技術、 ②新原理による次世代コンピューティング技術、 大量データの効率的かつ高度な利活用を可能とする収集、蓄積、解析、セキュリティ等に関する横断的技術	2016年度～2027年度	2021年度予算: 99.8億円
	省エネエレクトロニクスの製造基盤強化に向けた技術開発事業	①新世代パワー半導体の開発、②半導体製造装置の高度化に向けた開発	2021年度～2025年度	2021年度予算: 20.5億円
総務省(NICT)	Beyond 5G 研究開発促進事業	Beyond 5Gの実現に必要な要素技術について、民間企業や大学等への公募型研究開発 ① Beyond 5G 機能実現型プログラム、 ② Beyond 5G 国際共同研究開発プログラム、 ③ Beyond 5G シーズ創出型プログラム	2021年度～	2021年度予算: 140億円 ①は原則5億円以下/年、 最大10億円/年 研究開発期間:2～4年程度
総務省	情報通信技術の研究開発(2021年度公募)	①次世代省エネ型デバイス関連技術の開発・実証事業、②脳の仕組みに倣った省エネ型の人工知能関連技術の開発・実証事業、③グローバル量子暗号通信網構築のための衛星量子暗号技術の研究開発	2021年度～①、 ②2023年度、 ③2025年度	2021年度予算: ①2.5億円、 ②2億円、③15億円
JST	未来社会創造・大規模型	スピントロニクス光電インターフェースの基盤技術の創成(トポロジカル材料による高速化・低消費電力化の両立)	2020年11月～(最大10年程度)	総額27億円程度/課題
	CREST	①次世代フォトニクス(16課題) ②コンピューティング基盤(8課題) ③トポロジー(10課題)	①2015年度～ ②2018年度～ ③2018年度～(5.5年以内)	1.5億円～5億円程度/課題

上記の研究開発で例えば次世代グリーンデータセンターの開発では光エレクトロニクス技術の開発、光に適合したチップ等の高性能化・省エネ化技術の開発、ディスクアグリゲーション技術（ディスクアグリゲーションコンピューティング※注）の開発によりデータセンターの40%以上の省エネ化を実現するとしている⁶⁰。

※注）ディスクアグリゲーションコンピューティング：リソース間の通信にプロトコル変換を行わず、より細かい単位で電力制御・ハードウェア追加を可能にする新しいアーキテクチャ（NTT・IOWN構想より：コラム11参照）

なおデータセンターについては研究開発支援以外の施策としても、2021年度度からの環境省が再生可能エネルギーを活用したデータセンターの新設・移設・改修を支援する「データセンターのゼロエミッション化・レジリエンス強化促進事業」、また経産省における省エネベンチマーク制度の対象化（2.3項で記載）なども検討中である。

60 https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/green_innovation/industrial_restructuring/pdf/004_03_00.pdf

コラム11

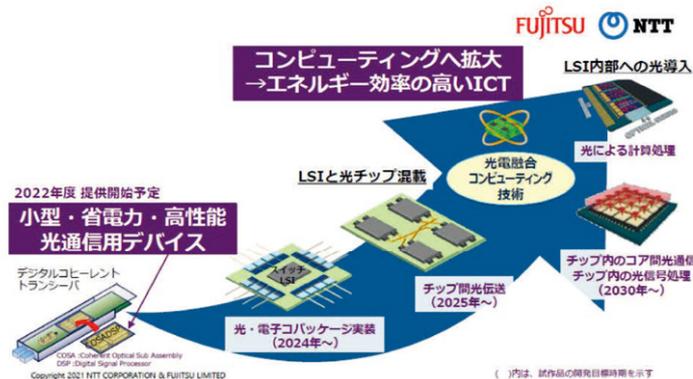
IOWN（Innovative Optical and Wireless Network） 構想

NTTが提唱する光ベースの革新的なネットワークの構想。NTT、ソニー、Intelが中心となりその実現を目指す業界団体「IOWN Global Forum」を2020年4月に設立。2024年の仕様確定、2030年の実現をめざして、活動を実施している。

IOWN構想は3つの主要技術分野から構成されており、①情報処理基盤のポテンシャルの大幅な向上として「オールフォトニクス・ネットワーク」、②サービス、アプリケーションの新しい世界として「デジタルツインコンピューティング」、③すべてのICTリソースの最適な調和として「コグニティブ・ファウンデーション」により、スマートな社会を実現することが目的である。

これら技術のうち、最初のオールフォトニクス・ネットワークはエレクトロニクス（電気）からフォトニクス（光）へという、光を中心とした革新的技術を活用することで従来のネットワーク比較で、伝送容量125倍、電源効率100倍、エンド・ツー・エンド（端末から端末）の遅延1/200の目標を掲げている。

（参考）光電融合デバイスの進化



25

一般に高速・大量データ伝送の方向性は高周波利用となるが、電気信号は理論上、高周波ほど減衰し限界が数10 cm程度と言われる一方で、光信号（光ファイバー）は1kmでも減衰が非常に小さい利点を持つ。このような光利用の長距離伝送の利点やエネルギー消費が小さいという利点をコンピューティングにも利用するための光電融合デバイス（低電力消費の光電変換素子など）、およびその能力を発揮するためのディスアグリゲータッド・コンピューティングを融合させる研究開発が進められており、これらにより通信・コンピューティングの小型、高性能化、低消費電力、低遅延を可能にするとしている。

3

将来のデジタル化進展におけるエネルギー問題…今後のICTの課題と対策

(参考文献)

1 : <https://www.rd.ntt/iown/0001.html>

2 : <https://journal.ntt.co.jp/article/5995>

3 : https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/green_innovation/industrial_restructuring/pdf/004_03_00.pdf

(ICT企業のCO₂削減に関する自主的な対応動向)

データセンターを運営するICT企業では、GAFGAを中心に再エネ利用によるCO₂排出ゼロを目指した取り組みを行っている。例えばGoogleは2018年から再エネ100%、Facebookも2020年に100%、マイクロソフトは2025年、Amazonは2030年までに100%を目標としている⁶¹。またICT企業は、再エネ投資の主要なプレーヤーでもあり、再エネ電力事業者からの長期電力購入契約（通常10～25年）であるコーポレートPPA（Corporate Power Purchase Agreement）の半分近くをICT企業が占めている⁶²。このコーポレートPPAの新規契約は2019年1,950万kWであり、これまでの累積で5,000万kWと増加しており、太陽光・風力の発電コストが他の発電コストよりも安くなったことも理由である。これ以外に認証による再エネ電力購入もあり、資金力を持つICT企業が率先して再エネ利用の拡大に向かっている。さらにGoogleでは再エネ発電の変動に応じたデータセンターの処理を行い、2030年までに時間的プロファイルを含めた常時再エネ100%利用を達成するとしている⁶³。またマイクロソフトも同様な目標を掲げた⁶⁴。

なおIEA・Tracking Clean Energy Progress（2020）レポート⁶⁵で、全体で40のクリーンエネルギー技術の進捗を評価しており、「進捗が順調」とされる6つの技術分類の1つがデータセンター・通信である。これらも含めるとICT関連企業はCO₂排出削減の観点から優等生と言える。

3

将来のデジタル化進展におけるエネルギー問題…今後のICTの課題と対策

61 <https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2020/SP/CRDS-FY2020-SP-06.pdf>

62 <https://www.iea.org/reports/data-centres-and-data-transmission-networks>

63 <https://sustainability.google/intl/ja/progress/projects/announcement-100/>

64 <https://blogs.microsoft.com/blog/2021/07/14/made-to-measure-sustainability-commitment-progress-and-updates/>

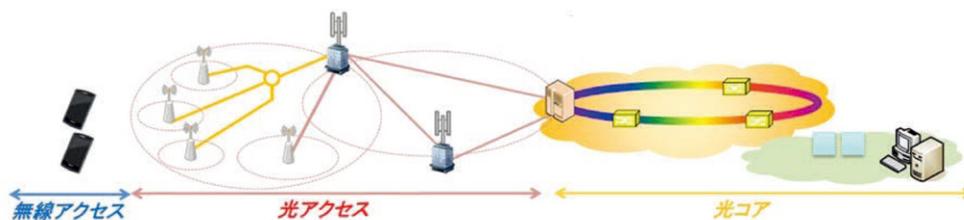
65 <https://www.iea.org/reports/tracking-buildings-2020/data-centres-and-data-transmission-networks#abstract>

3.3 デジタル化を支えるICTの性能向上・電力消費削減の継続的な研究開発

データセンター、通信ネットワークのいずれも高速・大容量・低遅延・低消費電力が継続的に要求されている。これらに対応して以下のような領域での研究開発を継続的に進める必要がある。

- ・データセンター：サーバ、ストレージ、データセンター内通信ネットワーク、付帯設備（空調、電力）、仮想化技術
- ・通信ネットワーク：コア通信ネットワーク（海底光ケーブル等含む）、アクセスネットワーク（無線通信、固定通信）

上記を補足するとデータセンターについてはコンピューティング技術の高性能化やデータセンター内通信ネットワークを対象とした光通信技術、仮想化などのソフト技術、さらには付帯設備としての空調等の冷却システムや電源システムが重要とされている。また通信ネットワークはシステム・オブ・システムズとしてより複雑なシステムになっており、電力消費のためにはコアネットワークを構成する光ファイバー技術の進化、またアクセスネットワークにおいては無線アクセスと光アクセスのシームレスな連携⁶⁶が必要としている。



図表 3-8 無線通信における各システムとの連携

このように固定通信・無線通信の個別技術の進化とともにこれらのシステムを融合したシステム化技術が重要となる。またこの中には今後のデータセンターにおけるクラウドとエッジの機能分担のようなデータセンター・通信ネットワーク全体の通信・データ処理システム構築に係るものも含まれる。なお一つの大きな方向性としては高速・大容量のデータ伝送・処理に対して消費電力も含めて優位性を持つ光通信技術をコンピューティング、通信ネットワークに適用することが着目されてきている（コラム11参照）。

データセンターや通信ネットワークにおける高性能化（低消費電力化含む）を支えるコンピューティング技術、フォトニクス技術、光通信技術、無線技術、さらにはそれらのシステム化技術に対して多くの研究開発が進められている。またこれらの研究開発の方向性については、国際的にも関心が高く、例えば電子デバイスやシステムの一連の開発の可能性を示したロードマップであるIEEE-IRDS（International Roadmap for Devices and Systems）などでも議論されている。当センター（CRDS）ではこれら分野について調査を行い、「研究開発の俯瞰報告書（2021年）」、および個別技術の研究開発戦略の提案書（CRDS戦略プロポーザル）として発刊しており、本報告書ではそれらの内容を中心に研究開発の方向性を記載する（詳細については各報告書を参照）。

66 https://www.soumu.go.jp/main_content/000496761.pdf

(コンピューティング関連)**• データセンタースケール・コンピューティング⁶⁷**

ハイパースケールデータセンターでは数十万台以上のサーバを設置し、それをつなぐネットワーク、ストレージなどが数百メートル四方の広さの建屋に設置されている。このような大規模データセンターにおいては、従来のラックスケールの考え方だけでは不十分であり、物理的な制約も考えて、サーバ、ネットワーク、ストレージの配置や処理方法を最適化する必要がある。また、情報処理では、計算よりもデータの記憶・移動に要する時間がボトルネックとなる。そのため、プロセッサを中心とするコンピューティング（プロセッサ・セントリック・コンピューティング）だけでなく、メモリーを中心とするコンピューティング（メモリー・セントリック・コンピューティング、あるいはデータ・セントリック・コンピューティング）が必要になる。磁気メモリー（MRAM）、抵抗変化型メモリー（ReRAM）、相変化メモリー（PCRAM）といった高速な不揮発性メモリーや、光通信技術などの登場により、従来のFlash/HDDデバイスや電気通信と比較してデータを高速に転送・記憶することが可能になりつつある。

• コンピューティング技術⁶⁸

ロジック回路の主流であるCMOS（相補型金属酸化膜半導体）は半導体の微細加工技術の進展、いわゆる「ムーアの法則」をベースとして3年または2年で4倍の集積度と20%～30%の動作速度向上および低消費電力化を達成してきた。しかしその微細化は限界に直面しており、従来のノイマン型のコンピューティング技術だけではさらなる性能向上が困難になってきている。当面はEUV（極端紫外線）などの露光技術で1nmレベル（現状はTSMCによる5nm）まで進むと想定されることや3次元化集積技術の導入により、ムーアの法則は延長されると予想されるが、集積回路の性能向上、消費電力低減の傾向は確実に鈍化している状況であり、新たな方向性で性能向上をめざす動きが活発化してきている。

半導体の微細化限界を突破するためには3つの方向性があるとされる。1つ目は、さまざまな機能のデバイス（CMOS、スピンドバイス、フォトニックデバイスなど）を3次元的に集積化する流れである。2つ目は、ニューロモルフィックコンピューティング、量子コンピューティングなどに代表される、新計算原理・新アーキテクチャを取り入れるアプローチによるものである。3つ目は、デバイスを構成する材料の見直しであり、近年ではトポロジカル絶縁体やグラフェンのような新物質の持つ電子的特性を活かし、消費電力低減と超高速化を同時に実現する革新デバイスの創製をめざす流れである。すでにメモリーでは3次元に積層したデバイスが量産され、ロジックデバイスでもチップを積層する技術が導入されている。なお、上記の2つ目の方向性に相当するものとして、用途（計算ドメイン）に応じた各計算機能に最適なコンピューティング技術を技術レイヤー（アルゴリズム・ソフト、回路・アーキテクチャ、デバイス・材料）から垂直統合的に技術開発することの提案⁶⁹やAI処理に特化した専用のハードウェア（アクセラレータ、チップ）を開発し、柔軟で高度な情報処理と低消費電力化の両立を目指す方向の提案⁷⁰などがCRDSより研究開発戦略として発刊されている。また量子コンピューティングも、古典力学系では実現できない情報処理機能を実現するものとして、近年、特に注目を集めている。

67 CRDS俯瞰報告書「システム・情報科学技術分野（2021年）」
<https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2020/FR/CRDS-FY2020-FR-02.pdf>

68 CRDS俯瞰報告書「ナノテクノロジー・材料分野（2021年）」
<https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2020/FR/CRDS-FY2020-FR-03.pdf>

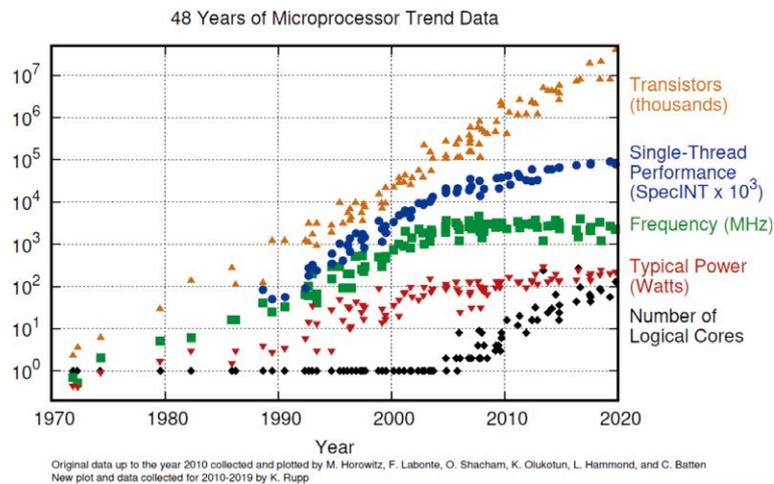
69 CRDS戦略プロポーザル「革新的コンピューティング」
<https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2017/SP/CRDS-FY2017-SP-02.pdf>

70 CRDS戦略プロポーザル「脳型AIアクセラレータ」
<https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2020/SP/CRDS-FY2020-SP-04.pdf>

コラム12

「ムーアの法則」とCPU（マイクロプロセッサ）の性能推移

2010年代後半、半導体の開発ペースが鈍化し始め、ムーアの法則（3年または2年でトランジスタ集積度が4倍）のペースが維持できなくなると言われてきている。図は1970年から2020年までのCPU性能の推移を示したものである。この図からは、トランジスタ数で示されるムーアの法則は2020年時点でも継続していることがわかる。一方でクロック周波数上昇によりCPUの性能向上を図ってきたが2004年あたりからはクロック周波数の抑止が見られる。これはクロック周波数増加による発熱量増加で徐熱が困難になったことなどが原因とされる。



このクロック周波数の抑止と同時にコア数増加が見られ、この時期からCPU性能向上をコア数増加でカバーするマルチコアへの変更が始まったことがわかる。なお電力消費については数百Wレベルで若干の上昇傾向が見られる。

(参考文献)

1: DOI 10.5281/zenodo.3947824

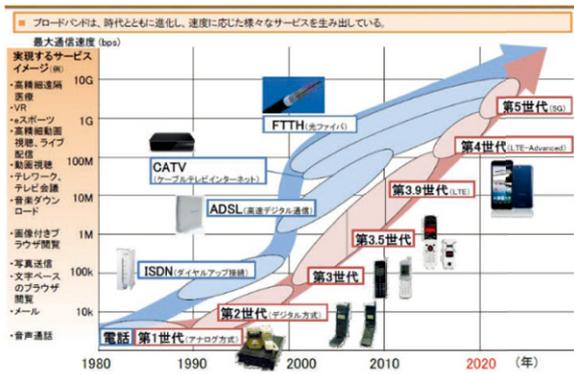
• 集積フォトニクス技術⁶⁸

光の高速性と低遅延性、低消費電力性、コストの低減を実現する基盤となるシリコンフォトニクスやナノフォトニクスなど集積フォトニクス技術が注目されている。これらは光通信・光配線、光コンピューティング、光センシングなどの応用領域に対して期待される技術である。集積フォトニクスの主要ターゲットの1つが、光配線・光インターコネクトであり、将来的にはチップ内への導入も期待されている。この光配線の実現に向け

た研究開発は国内外で継続的に進められており、シリコンフォトニクス技術を用いた多チャンネル光送受信機や光モジュールなど、各国で多くの取り組みが進んでいる。国内でもJST-CREST「新たな光機能や光物性の発現・利活用を基軸とする次世代フォトニクスの基盤技術（略称：次世代フォトニクス）」で低遅延の光パルスゲート論理回路などの研究が進んでいる。この光論理回路と電子回路（CMOS回路）を緊密に連携した情報処理は光-電気変換デバイスの消費エネルギーが高いため困難とされてきたが、電気-光変換（E-O変換）を行う光変調器や光-電気変換（O-E変換）を行う受光器にフォトニック結晶によるナノスケール技術を用いることで素子サイズや消費電力を従来技術の1/100にすることが可能としており、この技術が先のIOWN構想（コラム11参照）におけるコアとなる技術の一つとなっている⁷¹。また量子情報の分野でも集積フォトニクスの活用が進んでいる。

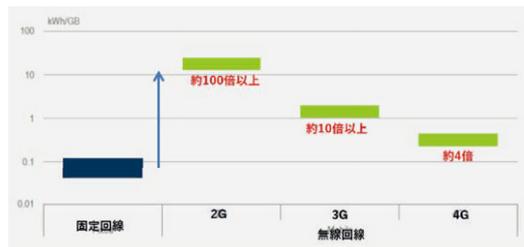
(通信ネットワーク関連)

高速・大容量のインターネット接続サービスであるブロードバンドは通信ネットワークにおける固定通信および無線通信の進化と共に拡大してきた。特に無線通信（移动通信システム）では第2世代のデジタル化より世代を重ねるに従い、データ通信速度⁷²やエネルギー原単位（kWh/GB）の大幅な改善が認められる。



左図（出典）総務省

下図：© OECD/IEA Digitalization and Energy
日本語はCRDS追記



図表3-9 ブロードバンドの高速・大容量化に伴う無線・固定通信の進化
(エネルギー原単位改善)

図表3-9に示す通り、無線通信のエネルギー原単位は固定通信と比較してまだ高いが、改善は確実に進んでおり、第5世代（5G）では4Gよりもエネルギー効率が20倍改善（エネルギー原単位が1/20）になることが期待されている⁷³。以下にはその主たる技術である光通信、無線通信の将来技術の方向性について記載する。

• 光通信

光通信のコアネットワーク（基幹光伝送システム）においては光ファイバーの1チャンネル当たり1Tbit/sを超えるような高速化が実現されている。大容量・長距離光伝送の3つの方式としては、①1波長あたりの大容量化、②波長多重数の拡大（複数バンド帯を利用）、③空間多重による多重数の拡大であり⁷⁴、現在のリサーチトレンドは空間分割多重技術である。

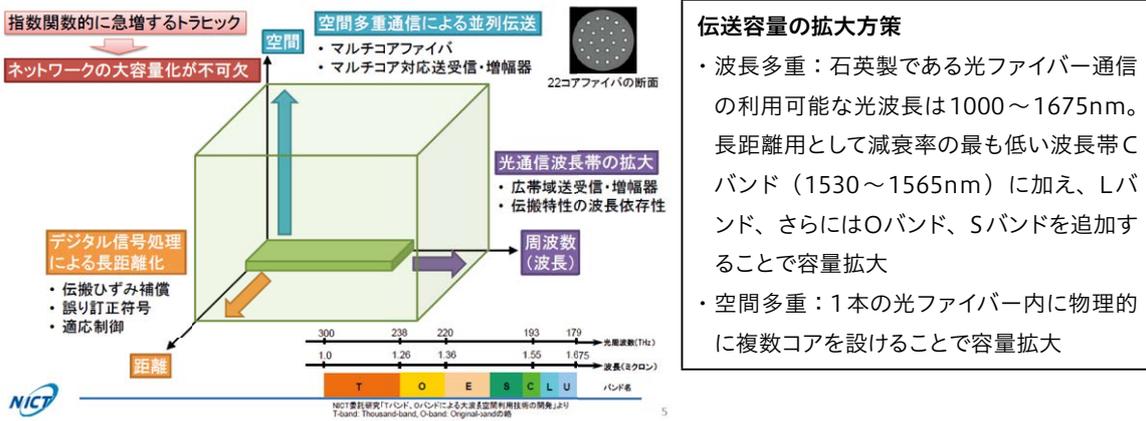
71 <https://www.rd.ntt/research/CT99-348.html>

72 https://www.soumu.go.jp/main_content/000680621.pdf

73 <https://hellofuture.orange.com/en/5g-energy-efficiency-by-design/>

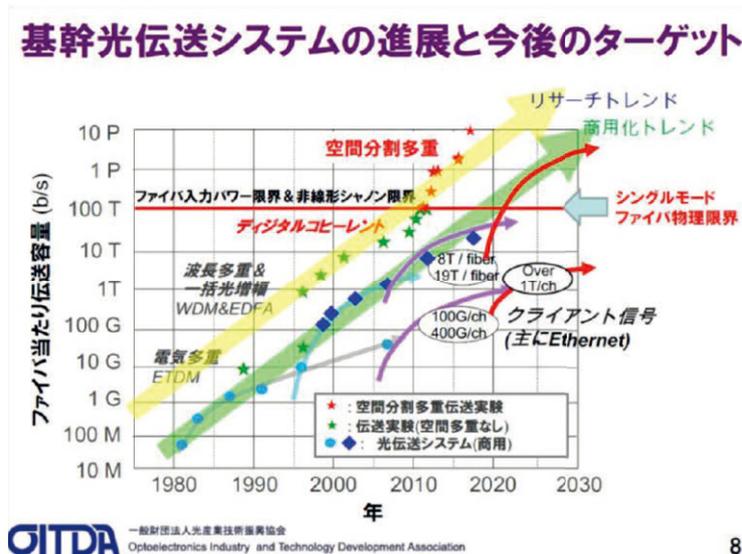
74 https://www.soumu.go.jp/main_content/000477961.pdf

3 将来のデジタル化進展におけるエネルギー問題…今後のICTの課題と対策



図表 3-10 光通信（光ファイバー）の大容量・長距離伝送の方向性

上記の技術によりシングルモードファイバの物理限界を超えて進展しており、商用化の方も物理限界の近くまで来ている状況にある⁷⁵。



図表 3-11 光通信の進展と今後のターゲット

• 無線通信（移動通信システム）

2020年に登場した第5世代移動通信システム（5G）は、高速・大容量・低遅延・同時多接続・低消費電力が求められている。これに対応するために2つの高周波帯（サブ6 GHz帯（6 GHz以下）とミリ波帯（30 GHz -300 GHz））を利用しており、理論上4G比較で、通信速度は20倍・遅延は10分の1・デバイス接続数は10倍になる。この実現のために高周波帯の新たな無線技術（5G NR）およびMassive MIMO^{※注}とビームフォーミング技術の導入が行われている。また5G/Beyond 5Gのような高周波数帯を用いる場合は電波の届く範囲が狭くなることから通常の基地局（マクロセル）を補完するためにスモールセルと呼ばれる多数の基

伝送容量の拡大方策

- 波長多重：石英製である光ファイバー通信の利用可能な波長は1000～1675nm。長距離用として減衰率の最も低い波長帯Cバンド（1530～1565nm）に加え、Lバンド、さらにはOバンド、Sバンドを追加することで容量拡大
- 空間多重：1本の光ファイバー内に物理的に複数コアを設けることで容量拡大

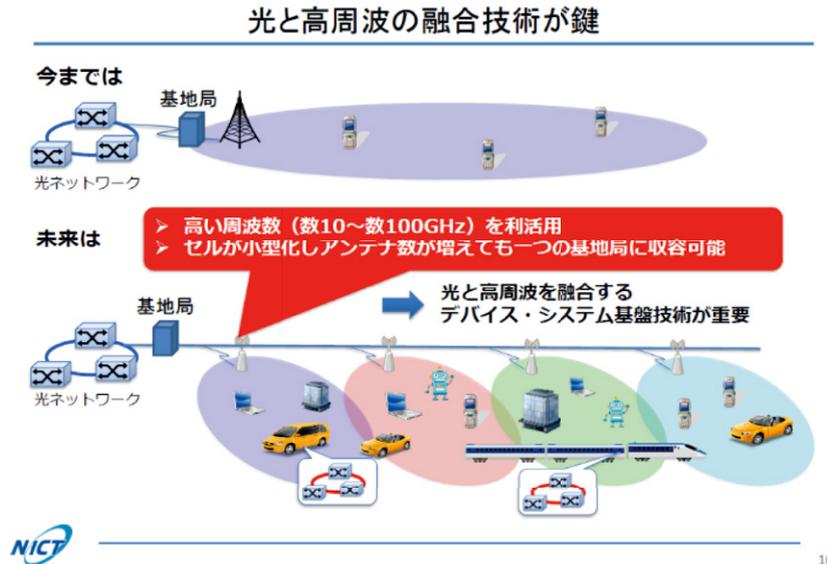
3 将来のデジタル化進展におけるエネルギー問題…今後のICTの課題と対策

（元資料）光産業技術振興協会 技術動向調査委員会（第2分科会）

75 CRDS 光技術俯瞰WS <https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2019/WR/CRDS-FY2019-WR-06.pdf>

地局が必要となり、光と高周波を融合するデバイス・システム技術が必要⁶³となる。

※注) Massive MIMO：無線通信の高速化技術のひとつ。基地局で指向性の高いアンテナを増やして通信をするMIMO（マイモ）のうち、数十から100以上のアンテナを用いて通信を多重化し、高速化するもの。



図表 3-12 無線通信における方向性：光と高周波の融合

3

将来のデジタル化進展におけるエネルギー問題…今後のICTの課題と対策

5Gの先の世代の無線技術として2030年頃の実用化に向けたBeyond 5G/6Gの議論が始まっている。このBeyond 5G/6Gについては国際基準としての具体的な仕様は決定していないが、国や各社がそのコンセプトを公開するなど、その特徴と技術的な方向性⁷⁶（図表3-13参照）も発表されている。

これによればさらに高周波帯であるテラヘルツ波利用が一つの大きな検討課題になっている。テラヘルツ波は隣の周波数帯は赤外領域であり、極めて光の特性に近い波長である。このことは無線通信と光技術に用いられる電波と光の利用領域が極めて近くなることから、電波と光との融合技術がBeyond 5G/6G およびその先を見据えても重要になると考えられている。またIEEE-INGRではBeyond 5Gの将来ネットワーク効率化における重要な課題として、①ネットワークの効率化：インフラを安定させるために、周波数利用効率、低消費電力動作モード、Massive MIMOの改善、エネルギーハーベスティングなどを活用、② スマールセルへの移行への対応、③基地局のエネルギー消費削減を挙げている。

76 https://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01kiban09_02000364.html

Beyond 5G に求められる技術

16

- Beyond 5Gでは、5Gの特長（超高速、超低遅延、多数同時接続）の更なる高度化に加え、高信頼化やエネルギー効率の向上など新たな技術革新が期待される。
- AIやクラウドコンピューティングを利用した信号処理についても、今後無線部分と一体となった技術開発が進められる見通し。

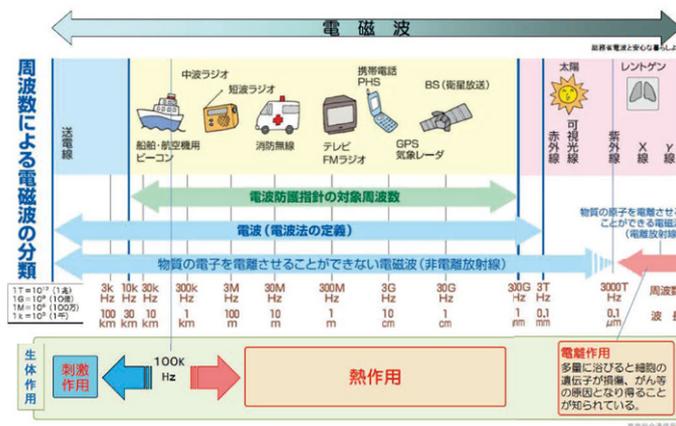


図表 3-13 Beyond 5G に求められる技術

コラム 13

周波数による電磁波（電波、光）の分類

我が国の電波法による「電波」の定義は「300万 MHz（3 THz）以下の周波数の電磁波」をいう。（それ以上の周波数のものは光の扱い）



電波は理論的に距離と周波数の二乗に比例して減衰する。すなわち高周波数帯ほど情報伝送量が大きいが高減衰率も高く、また光のように直進性が高くなる。逆に周波数が低いほど情報伝送量が小さいが、直進性が弱く、障害物の裏に回り込むことができる。5G/Beyond 5Gのような高周波数帯を用いる場合は通常の無線基

3 将来のデジタル化進展におけるエネルギー問題…今後のICTの課題と対策

地局（マクロセル）を補完するためにスモールセルと呼ばれる基地局が必要となる。

（高周波数帯）

- ・ミリ波：波長で1 mm～10 mm（周波数 30 GHz～300 GHz）。現在、日本での5Gの利用周波数帯である28 GHzもミリ波と呼んでいる。今後さらに高周波のミリ波帯が新たな5Gでサポートされる予定。
- ・サブミリ波：波長で0.1 mm～1 mm（周波数 300 GHz～3 THz）。光に近い性質の電波で、水蒸気による吸収が大きいという性質があり、現在は通信用としてはほとんど利用されていない。ただしミリ波と同様に電波望遠鏡による天文観測が行われている。この周波数帯の今後の無線通信への利用も期待されている。
- ・テラヘルツ波：1 THz（波長300 μm）近傍以上で、一般に通信利用では100 GHz～10 THzまでの範囲の周波数帯を指し、サブミリ波を含む広い範囲となっている。サブミリ波同様に水蒸気による吸収が大きく、光のように直進性が強いいため、通信に利用する場合は波長の選択も含めて新たな研究開発課題がある。

（参考文献）

- 1：総務省：https://www.tele.soumu.go.jp/resource/j/ele/body/emf_pamphlet.pdf
<https://www.tele.soumu.go.jp/j/adm/freq/search/myuse/summary/>

3.4 デジタル化による社会システムへの変革による影響評価等

ICTの導入、すなわちデジタル化がおよぼすエネルギー消費量への影響については、CO₂削減の観点から、デジタル化による社会システムが変革する中で社会の「正味」のエネルギー消費量を推定する必要がある。ここでは現状での調査・研究とその課題から整理する。

(デジタル化によるエネルギー消費削減効果とリバウンド効果)

デジタル化がおよぼす社会の「正味」のエネルギー消費量を推定しようとした例として、我が国でもグリーンITイニシアティブの調査（コラム3参照）がある。この調査ではエネルギー消費についての直接的影響である「Green of IT」、および間接的影響である「Green by IT」の両方の影響を調査している。しかしながら、一般にエネルギー高効率化や代替方法で達成されたエネルギー削減は、コスト削減や使いやすさ向上による追加的な消費増加により相殺される、いわゆる「リバウンド効果」があることが知られている。図表3-14はリバウンド効果を含めたエネルギー消費への影響について文献（Hornerら、Hookら）^{18, 77, 78}をベースに分類したものである。

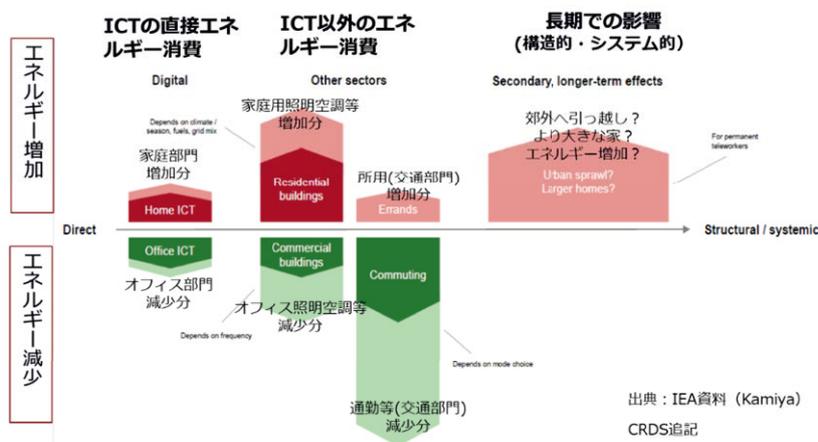
図表3-14 デジタル化によるエネルギー消費への影響に関する分類

分類	視点	影響	範囲	(テレワークでの例)
一次 (直接的影響)	技術 視点	製造エネルギー (+)	直接	テレワークに必要なICTおよび関連インフラ製造時のエネルギー
		運用エネルギー (+)		クラウドストレージやビデオストリーミングなど、テレワークに必要なICT機器を運用するためのエネルギー
		廃棄エネルギー (+)		テレワークのためのICT機器を廃棄するために使用されるエネルギー
二次 (間接的影響)	ユーザ 視点	効率 (-)	間接： 単一サービス	(本例では、利用場所で機器効率に大きな差がないため、適用なし)
		代替 (+/-)		オフィスへの通勤を避けることのエネルギー
三次 (構造的&行動的影響)	ユーザ 視点	直接的リバウンド (+)	間接： 補完サービス	テレワーク普及で自宅から離れた場所で仕事をするようになり、結果、通勤時間が長くなるために消費されるエネルギー
		間接的リバウンド (+/-)		自宅で仕事をしている日の家庭の暖房（または冷房）に使われるエネルギー
	システム 視点	経済全体のリバウンド (構造変化) (+/-)	間接：経済全体	経済全体の価格と量の調整により、複数の市場で使用・節約されるエネルギー（例：自動車産業への投資が、ICTに）
		システム転換 (+/-)	間接：社会全体	どこに住み、どこで働くかなど、社会の空間構造が広範囲に変化することで使用されるエネルギーと節約されるエネルギー

77 <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/11/10/103001/pdf>

78 <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ab8a84/pdf>

図表3-15は⁷⁹テレワークを例としてリバウンド効果を含むエネルギー消費の影響を示したものである。テレワークでは、オフィスへの通勤が削減されることによるエネルギー消費削減が期待できる一方で長期的な投資の変化や勤務地と住居との空間的な構造変化などでエネルギー消費構造そのものが変化する可能性があることを示している。



図表3-15 テレワークがおよぼすエネルギー消費への影響

このようなテレワークのエネルギー消費への影響については持続可能性の観点から多くの研究が実施されており、最近ではそれらの研究を体系的にレビューした研究⁷¹がある。このレビューでは、多数の論文をベースに包括的に検索して得られた39件の実証研究の結果をまとめている。これら39件の研究のうち26件はテレワークによりエネルギー消費削減、8件はエネルギー消費で増減なし、または増加との集計であったが、より高次元の影響（仕事以外の移動や家庭でのエネルギー使用など）を含む詳細な研究では削減量が小さく、必ずしもテレワークがエネルギー消費削減に寄与するとは言えないと結論付けている。なおレビューに用いた研究の多くは主に自動車通勤を前提とした米国での調査研究が主であり、我が国の首都圏のような電車通勤が多い場合についてはエネルギー消費削減への寄与は小さくなる可能性もあり、我が国の実態に基づいた研究が今後必要と言える。

参考：日本における2019年度の輸送機関別のCO₂排出原単位（g-CO₂/人km）は自家用乗用車で130 g-CO₂/人km、鉄道で17 g-CO₂/人km、鉄道は自家用乗用車のCO₂排出量で13%程度⁸⁰

このリバウンド効果の問題は「Jevonsのパラドックス」として知られており、1865年にJevonsが「効率的なエネルギー技術が導入されると、エネルギー使用量は減少するのではなく増加する」と提唱したことによる。その後も現在に至るまで、技術の進展が持続可能性に結び付くかという観点からリバウンド効果についての研究が実施されており、多くはリバウンド効果の問題について指摘している。

またICT関連のリバウンド効果の調査研究として材料消費量（生産量）ではあるが、電子デバイス（4品目：DRAM、ハードディスク、レーザダイオード、トランジスタ）について、需要の所得弾性率（所得増加割合に

79 <https://iea.blob.core.windows.net/assets/c497aae7-a9ab-43be-ab66-bff5a1adfae9/TotalDevices28AprilPPTGeorge1.pdf>

80 https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei_environment_tk_000007.html

対する需要増加割合の比率)を用いて評価した研究事例⁸¹がある。この研究では電子デバイスの4品目、およびそれ以外の化学品等を含めて57品目について、過去からの統計データより品目ごとの需要の所得弾性率を解析し、それらの値からリバウンド効果の有無を求めている。結果は化学品における規制物質(例えばアスベスト)などの特殊な6例を除くすべてにおいて、リバウンド効果が認められている。電子デバイスの4品目の需要の所得弾性率については0.94～2.1の範囲にあり、相対的に高い値となり、材料消費削減の視点については技術進展の利得を打ち消す方向性があるとの結果が得られている。このことは経済成長に応じて、ICTデバイス生産量が増加方向にあることを意味しており、デバイス数の増加は結果としてエネルギー消費量増加にもつながると考えられる。

以上のことから考察すると、技術進展によるエネルギー消費削減や物質消費削減で得られた利得はリバウンド効果によりその削減が縮小、場合によっては増加することが当たり前になると考えられる。特にICTのような汎用技術で広範な利用への展開が予想される場合、エネルギー消費削減や物質消費削減が困難であり、持続可能性の観点からは別の根本的な変革を行う施策として、例えば物質的なものであれば循環型社会などへの転換、エネルギー消費量であれば従前の省エネ対策ならびにCO₂フリー電源利用を推進するなどのCO₂削減を目的とした総合的対策として推進することが必要と考えられる。

またデジタル化によるエネルギー消費量増加が即、問題というわけではなく、デジタル化が経済成長や社会・個人のwell-beingにつながるのであればエネルギー消費量増加が何らかの価値向上に活用されていると言える。このようにデジタル化の影響の評価はエネルギー以外にも多面的視点が重要であり、次項ではその一つの方法として経済学的な評価法について記述する。

(デジタル化がおよぼす影響についての経済学的アプローチ)

将来のデジタル化がおよぼす影響を評価する方法については、経済学モデル、特に応用一般均衡モデルを用いたトップダウン型の評価方法がある。経済学モデルを利用する最大の利点は、技術的評価のみでは抜け落ちてしまう経済合理性の観点からの評価が可能になる点である。例えば先の高次のリバウンド効果の例のように、デジタル化で節約された時間や費用が別な部門に消費されることなどが評価できる可能性がある。

応用一般均衡モデルは、生産関数、家計効用関数、産業連関表などの経済学的ツールに基づくモデルである⁸²。このモデルはさまざまな部門の財・サービスの市場の価格と需給量を同時に決定することができ、経済活動と各需給を総合的かつ整合的に把握できる特徴を持つ。一方で、過去の統計データに基づいた回帰分析やパラメータ調整でモデルが構成されるため、過去に実績がないものは基本的には取り扱うのが困難である。また集計された経済指標などを変数とするため、具体的な技術などを直接的に評価し難い課題があるが、最近の分析では部門や財・サービスを細分化し、個別技術の効果を考慮できるまで解像度を高める方法などが検討されている。このような方法で我が国においてもデジタル化による影響を評価した事例がいくつか見られる^{83,84}。例えば国環研、東工大、NTT共同研究ではICT利用(ネットバンキング、テレワーク、オンライン誌ショッピングなど)による環境および経済への影響を応用一般均衡モデル(AIM/CGE(Japan))を適用してその影響を調べている。例えば文献83はモデルにICT利用による費用・時間節約で発生する活動を最終需要部門の財の需要変化として組み込むことで、リバウンド効果(一次)と波及効果を融合した場合のCO₂削

81 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040162516308022>

82 CRDS-FY2011-SP-07「エネルギー政策のための科学：技術・経済モデルの研究開発」
<https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2011/SP/CRDS-FY2011-SP-07.pdf>

83 第8回横幹連合コンファレンス(2017.12.2-3)
https://www.jstage.jst.go.jp/article/oukan/2017/0/2017_C-5-3/_pdf/-char/ja

84 Society 5.0 for SDGs - 創造する未来の経済評価 -
<http://www.21ppi.org/pdf/thesis/200708.pdf>

り込むことで動学モデルとして将来推計に利用している。さらに将来の技術進展による経済効果を算出するためには経済構造の変化をモデル内に取り込む必要があり、このため部門や財・サービスについて、評価対象となる技術の役割が見える程度まで細分化して解像度を高める方法などが用いられている。その上で対象技術を導入しない参照ケース（BAU）と技術導入により経済構造変化があるケースとの比較分析により、技術の効果を求めることなどの手法がとられている。

（参考文献）

1 : https://www.soumu.go.jp/toukei_toukatsu/data/io/index.htm

2 : CRDS-FY2011-SP-07 「エネルギー政策のための科学：技術・経済モデルの研究開発」

その他の応用一般均衡モデルをICT関連部門に適用した事例としては文部科学省「科学技術イノベーション政策における『政策のための科学』」推進事業（SciREX）の一つとしてSPIAS（SciREX 政策形成インテリジェント支援システム）がある。これは国の研究開発投資が論文・特許等の知識ストックを拡大させることで、経済成長にどのように結びつくかを評価するための応用一般均衡モデル（SPIAS-e）のモジュールとしてのツールであり、事例としてICT分野への将来に向けた国の研究開発投資の効果の評価を行っている⁸⁵。

なお応用一般均衡モデルはエネルギー分野の経済モデルとしても用いられており、ボトムアップ的な技術最適化モデルと融合して、想定した社会シナリオの詳細な解析に用いることも検討されている⁸⁶。これらモデルは評価と実際の結果をフィードバックすることで精度を高めながらモデルを改善していくことで、経済成長や環境問題を含めた影響を事前評価できるようなツールとして利用することが期待される。

今後はカーボンニュートラルに向けたエネルギー構造変化が進展する中でデジタル化による影響評価が可能なモデル構築が求められる。

85 CRDS 調査報告書「科学技術イノベーション政策の科学における政策オプションの作成～ICT分野の政策オプション作成プロセス～」
<https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2015/RR/CRDS-FY2015-RR-07.pdf>

86 <https://www.jst.go.jp/lcs/pdf/fy2018-pp-21.pdf>

3.5 まとめ

3章ではICTを活用したデジタル化によるエネルギー削減（Green by ICT）や新しい価値創造への期待、エネルギー消費削減の対策（Green of ICT）、さらにはデジタル化で得られたエネルギー消費削減などの利得を打ち消すリバウンド効果の課題や評価ツールとしての経済評価について記載した。以下にまとめを記す。

- ・ ICTを利用して仮想空間（サイバー）と現実世界（リアル）の融合するデジタル化により社会変革やビジネス変革への期待が高まっている。デジタル化は世界各国・各地域の成長戦略としてビジネス投資が行われており、研究開発にも政府からの多大な投資が行われている。我が国でも Society 5.0の実現として新しい価値創造や高効率などさまざまなイノベーションの期待から民間・政府の投資が行われている。
- ・ 電力コストはデータセンターや通信ネットワークの運営において数十%の大きな割合であり、電力コストの高い我が国では Society 5.0の普及拡大のために低消費電力の研究開発は特に大きな課題である。
- ・ デジタル化による新しい価値創造をもたらす自動運転の例ではデータ通信の高速・大容量・低遅延・同時多接続の要求により、ユーザ近傍のアクセスネットワークに分散型データセンターとしてエッジコンピューティングの設置拡大が進められている。今後はエッジとクラウドの二つのデータセンターとの住み分けが進むと考えられ、配置を含めてシステムとしての最適化が求められる。
- ・ データセンター・通信ネットワークの研究開発としては、低消費電力への貢献も大きい高周波利用、光利用が大きな方向性となっている。
- ・ 将来のデジタル化進展で期待されるエネルギー消費量削減はその削減コスト・削減時間によるリバウンド効果の影響でエネルギー消費削減に結び付くかは不透明であるが、デジタル化が経済成長や社会・個人のwell-beingにつながるのであればデジタル化に意味があると言える。このようにエネルギー視点以外も含めた全体を評価する方法としてはトップダウン型の経済学的手法の応用一般均衡モデル活用が検討されており、今後はボトムアップ型の技術モデルとの融合により詳細な解析手法の研究開発が求められる。

本報告書の結論とその結論を導く要点は以下の通りとなる。

- **結論：** デジタル化の進展はICTセクターの持続可能な成長とともにある。技術面からはエネルギー消費量削減技術を含めたコンピューティング（高性能計算）・通信技術について、継続的な研究開発が求められる。また今後のICTセクターのエネルギー消費量がどうなるかはデジタル化がもたらす社会変革にも大きく依存している。適切な対応策を考えるためには将来の社会システムなどの構造変化を考慮した評価・分析を行うことが必要になる。このためには社会シナリオ研究や経済学的手法も含めた多面的な影響評価に関わる研究を発展させることが重要であり、特にエネルギー削減効果を打ち消す方向に働くリバウンド効果は、エネルギー問題におけるリスク的課題として取り組む必要がある。
- ◇ 1990年のインターネット普及から最近まで、複数回に渡りICTセクター（PCやデータセンターなど）の電力消費量が過大評価されてきた。それらの原因は関連データの不足によるものやICTの電力消費に関する論文・報告書の特異的な部分だけをセンセーショナルな形で取り上げたことによる。いずれも経済的・物理的制約の観点から現実的ではないと考えられるレベルでの電力消費量の増加であったが、それにもかかわらず言われ続けた理由は、ICTがもたらす急速な社会変化に対する不安・懸念、あるいはその対策の必要性を電力問題や温暖化問題として訴求しやすい形で伝えようとしたことにある。一方でこれらを契機として国の研究開発投資が行われ、結果としてICT関連への対策技術、評価方法が進んできたという側面もある。
- ◇ 今後デジタル化はすべてのセクターに浸透し、その要のICTは汎用技術（GPT）として継続的に成長すると予想されている。デジタル化普及のためには大量のデータを高速かつ低コストで処理し、コスト

に見合う価値を生み出す必要がある。そのためにはコンピューティング（高性能計算）・通信技術の高性能化・エネルギー消費削減、ひいてはICTセクターのエネルギー消費削減のための継続的な研究開発が必須である。現状はICT関連技術が日欧米中の成長戦略・経済安全保障の中心技術として競争領域となっている。このため活発な投資や研究開発が実施されており、電力消費削減も大きな研究開発課題として進められている。

- ◇ エネルギー問題に軸足を置くとICTセクター自体のエネルギー消費量（Green of ICT）は、ICT利用がどのように社会に普及するか、それによる社会システム変化やエネルギーシステム構造変化、消費者行動変化（例えばテレワークや自動運転など）による需要構造変化に依存する。またICTの利用によるエネルギー消費量変化への影響（Green by ICT）はICTセクター自体のエネルギー消費量変化より大きいと見られるため、将来のICT関連のエネルギー問題を考える上には、ICT利用がおよぼす社会構造変化まで考えた「正味」での効果を評価する必要がある。この中にはリバウンド効果と呼ばれるエネルギー消費削減を打ち消す影響も含まれ、今後それらの評価方法や対策等を検討することが重要になる。
- ◇ 今後ICTセクターにおける電力消費量はデジタル化の進展とともに新たな価値創造をしながら、経済合理性を持って徐々に増加するものと考えられる。またICTセクターでは低炭素電力への積極的な転換が行われており、CO₂削減の観点からは他分野に先駆けた削減が予想されている。
- ◇ なおデジタル化がもたらす負の側面、例えばTWI2050にも記載されている「デジタル格差」による社会的・経済的混乱や対立の可能性が、ICTへの不安・懸念を増幅しているそもその原因と考えられる。これはエネルギー問題などの環境の持続可能性と言うよりは繁栄、インクルーシブ、優れたガバナンスなどの社会的課題解決であり、この問題への対応を同時に進めていくことがデジタル化進展にとってさらに重要な課題と考えられる。

4 | 参考

4.1 補足資料

ここではデータセンター、通信ネットワークに関連した参考となる補足情報を記載する。

• 光ファイバー技術

光ファイバーを用いた光通信ネットワークは世界中の陸上および海底にはりめぐらされ、コアネットワーク、バックボーンと呼ばれる基幹伝送システムが構築されており、通信データ量の拡大とともに増強強化されている。

長距離伝送には1.55 μm 付近の近赤外光による石英製のシングルモード光ファイバー（SMF）が用いられている。またその伝送損失を補うための光増幅装置（光中継器）が陸上で80 km～100 km、海底で50 km～80 kmの間隔で設置されており、増幅装置としてエルビウム添加光ファイバー増幅器（EDFA）が用いられている⁸⁷。この希土類添加光ファイバー増幅器は励起光を投入するだけの非常に簡単な原理で信号光を増幅でき、その利得は20dB（100倍）から構成によっては40dB以上（1万倍）にすることが可能である。また信号光を電気に変換せずに光のまま増幅できるため、従来の光⇄電気変換を必要とした増幅に比べて装置構成が簡単で、励起光に対する増幅効率も80%以上と非常に高効率な増幅が可能であり、エネルギー消費量が抑えられる。今日の高速度大容量光通信システムは光ファイバー増幅器、特にEDFAがあっちはじめて可能になったと言える。海底ケーブルの海底機器への電力供給は、陸揚げ局舎に設置する定電流給電装置が用いられており、この装置の仕様（給電電圧15,000 V（両端で30,000 V）／給電電流0.6 A～1.6 A）より必要電力を算出すると48 kW程度となる。この値は電気自動車1台の最大出力（70 kW）よりも低く、また電力消費量は一般家庭の約100軒分程度（1軒当たりの電力消費を約300 kWh/月）となる。

また波長によりファイバー内の速度が異なることによる波長分散補償が必要であり、従来は逆の特性を持つ分散補償ファイバーを交互に配置することで対応してきたが、太平洋間の海底ケーブル（交互配置が100回以上）では信号劣化、コスト増が課題であった。現在は受信端のデジタル処理技術により波長によるずれを一括して補償が可能になっている⁸⁸。

• 無線技術（5G）

5Gの超高速（10Gbps）・超低遅延（1ms）・多数同時接続（100万台/km²）の特徴を生かしたニーズ、特に産業用途への展開の期待が高まってきている。以下には今後期待されるニーズと必要な要件について記載した表である。これらのいくつかの用途は一部のエリアまたは建物・敷地内に限定されるケースがあるため、必ずしも公衆無線（5G）を用いるのではなく、ローカル5Gと呼ばれる通信事業者ではない企業や自治体が専用の5Gネットワークを構築する方法が検討されている。

⁸⁷ <https://www.fiberlabs.co.jp/tech-explan/about-amp/>

⁸⁸ <http://seasat.iis.u-tokyo.ac.jp/WS20180919/5.Takahashi.pdf>

(NTTドコモ資料より)

	用途	サービス提供場例	通信速度・容量	遅延サービス許容範囲	コネクティビティ	留意点
可住場	3Dサイバーコミュニケーション	可住地	60cm 四方ホログラム映像 132億画素 (8K×400) DL 100Gbps	100ms ・聴覚：2ms ・視覚：20ms ・順応速度：100ms	講演 (1対多) 会議 (多対多)	-
	マルチアングルビューング	東京ドーム 0.047平方 km	8K 120fpsストリーミング 圧縮：UL 250Mbps (非圧縮：25Gbps)	100ms ・聴覚：2ms ・視覚：20ms ・順応速度：100ms	視聴者 対 カメラ (数百万人) (数百台)	信頼性
	遠隔医療・診察	手術室： 約55.74m ²	8K 120fpsストリーミング 圧縮：UL 250Mbps (非圧縮：25Gbps)	10ms ・聴覚：2ms ・視覚：20ms ・順応速度：100ms	患者 対 医者 (数名) (数名)	信頼性
	ドローン宅配	国土全面積 39万平方 km	8K 120fpsストリーミング 圧縮：UL 250Mbps (非圧縮：25Gbps)	100ms 遅延時間の許容範囲	2017年 宅配便取扱数 43億便/年	エネルギー 信頼性
	自動運転無人バス	総延長： 121万 km	8K 120fpsストリーミング 圧縮：UL 250Mbps (非圧縮：25Gbps)	100ms 遅延時間の許容範囲	9万台/12h 大東鶴見IC～ 東大阪北IC 1.3km	信頼性
非可住場	スマートファクトリー	1.1ha/工場	(例)・ロボット：製造自動化 ・センサー：ビックデータ解析	遅延 1ms	製品にセンサーを付けた場合、膨大な数	遅延 コネクティビティ
	スマート林業	山林： 25万平方 km 国土： 39万平方 km	(例)・ドローン：資源量調査 ・重機：造材、計測、仕分け ・輸送：製材所	UL 1.5Gbps (5kbps/本)	木材にセンサーを付けた場合、膨大な数 30万本/平方 km	カバー範囲 コネクティビティ
	スマート農業	農地： 4.5平方 km	(例)・ドローン：農薬散布、施肥 ・重機：田植え、収穫		農作物にセンサーを付けた場合、膨大な数	カバー範囲 コネクティビティ
	スマート漁業	450平方 km 漁港数： 2800	(例)・ドローン：魚群探知 ・重機：自動釣り機 ・ブイ：水温、塩分濃度		魚にセンサーを付けた場合、膨大な数	カバー範囲 コネクティビティ

・勧告ITU-TL.1470概要⁸⁹

勧告ITU-TL.1470は国際電気通信連合 (ITU) が2020年1月に公表した2030年までのデータセンター・通信ネットワークのCO₂削減目標値である。この報告書では、IPCCの特別報告書で示された1.5°C目標達成に向けてICTセクターの1.5°C軌跡への追従目標を設定したものである。ICTセクターとしては無線通信 (モバイル)、固定通信、データセンター、ユーザ機器が対象であり、また運用時 (利用時)、オーバーヘッド (オフィスなど) のエネルギー消費 (電力、熱など)、製造時のエネルギー消費に関連するCO₂排出量を含めたものとなっている。以下の表は本報告書の数字との整合性を持たせるために運用時 (利用時) のみでオーバーヘッドを含まない直接消費部分を取り上げてまとめた (当該文献のAnnex Aより作成)。

89 https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-L.1470-202001-I!!PDF-E&type=items

\ 年		2015	2020	2025	2030
電力CO ₂ 排出原単位【t CO ₂ e/MWh】	想定値	0.484	0.480	0.281	0.160
2030年電力CO ₂ 排出原単位削減率：想定値（2015年比）					67%減
総発電量【TWh/年】		24,185	26,013	27,841	30,478
総電力量の増加率推定値（2015年比）		—	8%増	15%増	26%増
2030年総電力のCO ₂ 排出削減率目標値（2015年比）					58%減

\ 年		2015	2020	2025	2030	2015	2020	2025	2030
範囲	条件	電力消費量【TWh/年】				CO ₂ 排出量【Mt CO ₂ e】			
モバイル回線	運用時	90	115	125	131	48	46	35	21
固定回線	運用時	85	100	89	88	43	38	25	14
データセンター	運用時	205	215	235	257	91	84	60	40
合計	合計	380	430	449	476	182	168	120	75
(参考) ユーザ機器	利用時	345	335	409	450	169	161	115	72

具体的には基準年の2015年の電力消費量（利用時）はデータセンターで205 TWh、通信ネットワークで175 TWh（固定：85 TWh、無線：90 TWh）、合計380 TWhとなる。一方、2030年はデータセンターで257 TWh、通信ネットワークで219 TWh（固定：88 TWh、無線：131 TWh）、合計476 TWhの25%増（2015年比）が目標としている。一方で発電量と電力のCO₂排出原単位は2015年で24,185 TWhと0.484 tCO₂/MWh、2030年で30,478 TWhと0.160 tCO₂/MWhと想定しており、これら値から総電力に対するデータセンター・通信ネットワークの合計電力消費量の割合にはほぼ変化がなく（約1.6%程度）、CO₂排出量は2015年184 Mtから2030年76 Mtと59%減である。この目標に対しては、①エネルギー効率の高いネットワークの運用、②建物とサービスの効率化、③再エネ等代替エネルギーの供給、④製品・サービスへの循環経済の適用の以下に示す4つの領域への対応により可能としている。

① エネルギー効率の高いネットワークの運用

- ・複数の省電力機能：ネットワーク、特にモバイルネットワークの変化の大きいトラフィック負荷に対して、動的な電力配分やアクティブアンテナなどの省電力機能による低負荷時のエネルギー消費量を削減
- ・エネルギー供給方法変更：電力供給に直流（400 V）利用。熱電併給（CHP）プラントの導入も3 統合と仮想化
- ・データセンターの統合：物理サーバの再編成とサーバの仮想化
- ・フリークーリングとロケーションの最適化：外気利用および水噴霧による冷却。気温が比較的低い地理的な地域の設置による場所。

② 建物とサービスの効率化

- ・効率的な建物のためのモニタリングソリューション：ビルの換気、照明、電源システム、セキュリティシステムなどを制御・監視するビル管理システムにAI活用。
- ・省エネルギー対策への注力：エネルギー効率の高い天井照明の新設、暖房システムの変更、人感センサーの設置、必要な照明を調整する可変照明コントロールなどの省エネルギー対策の導入。
- ・代替モビリティコンセプト：電気自動車やハイブリッド車の使用、共有フリート、自動化された車両メンテナンスの警告、全地球測位システム（GPS）のルーティング
- ・ビデオ会議等：ビデオ会議やオーディオ会議を利用による出張や通勤に伴うCO₂排出削減。

③ 再エネの供給

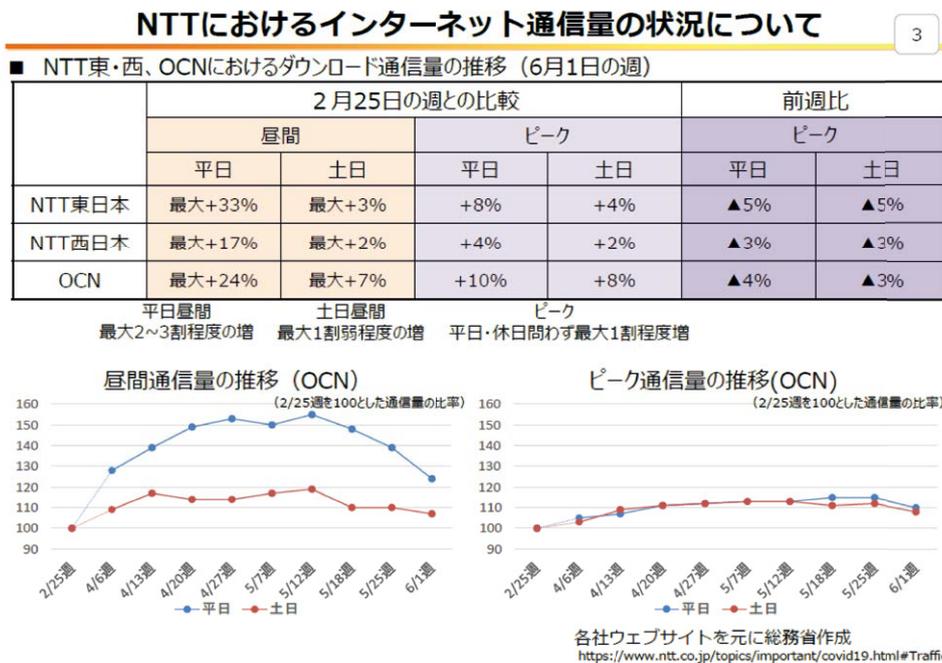
- ・再生可能エネルギーの自給自足：基地局、データセンターなどに太陽光発電システムを設置する。
- ・再エネ認証とPPAによる再生可能エネルギーの購入：再生可能エネルギー証書（REC）の購入や電力購入契約（PPA）の利用による再エネ調達。
- ・エネルギー供給の革新：水素燃料電池、エネルギーを貯蔵する新技術や分散型エネルギー貯蔵など

④ 製品・サービスへの循環経済の適用

- ・製品およびサービスのエココンセプト、ネットワークおよび顧客機器の再利用、修理可能な製品の販売を含む顧客製品のライフサイクルの最適化など

・Covid-19による通信量影響

2020年のCovid-19による我が国の緊急事態宣言時の通信量についてはテレワークや学習・余暇のための通信の利用増により、昼間の時間帯の通信量は大きく増加している（平日昼間：2割～3割程度増加、休日昼間：1割～2割程度増加⁹⁰）。



ただし通信量のピークは夜間であり、設備はピーク通信量（ピークトラヒック）に応じて構築されていることから、そのピーク通信量に大きな増加が無い状況ではマクロ的に大きな問題はないとされている。一方で、Covid-19の影響を除いても通信量が継続して増加の状況において、ネットワーク事業者の設備投資による対応だけでなく、コンテンツ・配信サイドからの取組が重要であり、レイヤーを超えた連携体制が必要となる⁹¹。

90 https://www.soumu.go.jp/main_content/000692609.pdf

91 https://www.nii.ac.jp/news/upload/20200417-4_Mic.pdf

•用語

- ◇ ASIC (Application Specific Integrated Circuit) : 特定用途向け集積回路
- ◇ GPU (Graphics Processing Unit) : 元々はグラフィック処理を高速で行う、並列計算を得意とするアクセラレータで、深層学習の計算も得意のため、現在は主にGPUを利用して計算性能を向上
- ◇ FPGA (Field Programmable Gate Array) : 書き換え可能な集積回路
- ◇ Green by ICT/IT/デジタル : ICT/IT/デジタル化によるエネルギー消費やCO₂排出削減
- ◇ Green of ICT/IT/デジタル : ICT/IT/デジタル化本体のエネルギー消費やCO₂排出削減
- ◇ GPT (General Purpose Technology) : 汎用技術、汎用目的技術。電気やICTなど社会・経済全体に影響を与える可能性のある技術
- ◇ PUE (Power Usage Effectiveness) : データセンター全体の消費電力を、サーバなどのICT機器の消費電力で割った数値。データセンターの電力使用効率を示す指標の一つ。

- ◇ IEA (International Energy Agency) : 国際エネルギー機関

作成メンバー

総括責任者	佐藤 順一	上席フェロー	環境・エネルギーユニット
リーダー	尾山 宏次	フェロー	環境・エネルギーユニット
メンバー	中村 亮二	フェロー／ユニットリーダー	環境・エネルギーユニット
	竹内 良昭	フェロー	環境・エネルギーユニット
	関根 泰	フェロー	環境・エネルギーユニット／早稲田大学
	青木 孝	フェロー／ユニットリーダー	システム・情報科学技術ユニット
	高島 洋典	フェロー	システム・情報科学技術ユニット
	日江井 純一郎	フェロー	科学技術イノベーション政策ユニット
	越 光男	副センター長	低炭素社会戦略センター
	三枝 邦夫	上席研究員	低炭素社会戦略センター
	渡邊 康正	企画運営室長（2021年6月まで）	低炭素社会戦略センター
	坂井 琢磨	副調査役（2021年6月まで）	低炭素社会戦略センター

The Beyond Disciplines Collection

CRDS-FY2021-RR-03

デジタル化とエネルギー

～ICTセクターの持続可能な成長のために～

令和4年3月 March 2022

ISBN 978-4-88890-770-5

国立研究開発法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター

Center for Research and Development Strategy, Japan Science and Technology Agency

〒102-0076 東京都千代田区五番町7 K's 五番町

電話 03-5214-7481

E-mail crds@jst.go.jp

<https://www.jst.go.jp/crds/>

本書は著作権法等によって著作権が保護された著作物です。

著作権法で認められた場合を除き、本書の全部又は一部を許可無く複写・複製することを禁じます。

引用を行う際は、必ず出典を記述願います。

This publication is protected by copyright law and international treaties.

No part of this publication may be copied or reproduced in any form or by any means without permission of JST, except to the extent permitted by applicable law.

Any quotations must be appropriately acknowledged.

If you wish to copy, reproduce, display or otherwise use this publication, please contact crds@jst.go.jp.

FOR THE FUTURE OF
SCIENCE AND
SOCIETY



<https://www.jst.go.jp/crds/>