

# デジタル化の進展による電力消費量の変化と 1.5°C目標実現への示唆

## データセンターの電力消費量増加に関わる不確実性の対応に向けて

栗山昭久<sup>1</sup>・田中勇伍<sup>2</sup>・岩田生<sup>3</sup>・田村堅太郎<sup>1</sup>

IGES<sup>1</sup> 気候変動とエネルギー領域、<sup>2</sup> 関西研究センター、<sup>3</sup> ビジネスタスクフォース

### 主要メッセージ

- デジタル・トランスフォーメーション(DX)とも呼ばれる高度なデジタル化の進展は、情報通信技術(ICT)によるエネルギー消費効率の改善、交通需要の回避や産業構造の変化によってエネルギー消費量を減少させる側面だけでなく、データセンター(DC)や情報通信機器の製造など情報通信部門における直接的なエネルギー消費量の増加や関連経済活動の拡大を促すことでエネルギー消費量を増加させる側面もある。1.5°C目標に日本がより大きな貢献を果たすための道筋を描いた「IGES 1.5°Cロードマップ」では、それらの複合的な効果をできるだけ踏まえた結果、デジタル化などの社会経済構造の変化<sup>1</sup>によるエネルギーの減少を戦略的に取り入れることが1.5°C目標の実現に重要な役割を果たすことを示した。
- 一方で、とりわけデジタル化に伴うDCにおける電力消費量増加量の推計値は、想定によって大きく変化する。そのため、推計値の振れ幅(上限値と下限値の双方)を認識したうえで対応できる手段を検討することが重要である。なお、過去にも度々ICTの普及による電力消費量の増大が懸念されてきたが、データ処理量の爆発的な増加を上回るペースでのICT分野の技術発展により、DCの電力消費量は予想されたほど増加してこなかった事実もある。電力消費量の増加の懸念だけを強調するのではなく、DCにおける電力消費量の増加分を、クリーンな電源による電力供給が可能な水準にどのようにして抑えていけるか<sup>2</sup>、という論点を中心に政策の場で議論することが建設的であろう。
- 本稿では、世界及び日本のDCにおける将来の電力消費量について過去に推計を行った文献に関してレビューを行い、それらの推計における試算前提を整理した。次に、DCの電力消費量削減に向けた様々な対策や技術開発の動向と照らし合わせ、再エネによる電力供給が可能な水準にDCの電力消費量の増加を抑えることで、1.5°C目標の実現を追求していけるかを考察した。特に、日本においては国内DCの老朽化が進んでいることから、これらの設備更新時には、エネルギー効率の高い機器やエネルギー管理手法、エネルギー消費性能に優れたデータ処理に関わるアルゴリズムの採用を促すといったデータセンターのエネルギー消費性能を向上させることが重要と考えられる。

<sup>1</sup> 無形資産投資の増加による高付加価値化や、製造業のサービス産業化、ビッグデータや自動運転技術を活用した人流・物流の合理化、効率的で循環的なエネルギー・素材利用などが含まれる。

<sup>2</sup> 例えば、2050年までに導入しうる洋上風力発電は、50GW(175TWh相当)から360GW(1260TWh相当)という試算があるなかで、DCの電力消費量を100TWh前後に抑えることが一つの目安として考えられる。詳細は本文参照。

## 1. 背景と目的

1960年代後半にインターネットが誕生して以来、情報通信技術(ICT)は目覚ましい発展を遂げ、生産プロセスの自動化など社会の大きな変化を引き起こしてきた。近年では、テクノロジーの融合と人工知能(AI)の進展などにより、現実世界(フィジカル空間)にあるさまざまなデータをIoT機器で収集し仮想世界(サイバー空間・バーチャル空間)で処理・分析される。サイバー空間でのサービスや活動・交流などがフィジカル空間における人の行動や認知を変化させるなど、フィジカルとバーチャルの境目が曖昧になることや、仮想世界で処理・分析された結果が現実世界にフィードバックされることで、産業だけでなく行政や市民生活を含めた社会経済システム全体に及ぶ根本的な変革がもたらされつつある<sup>3</sup>。第四次産業革命とも呼ばれるこうした変化は、単なるICTの導入だけではなく、デジタル・トランスフォーメーション(DX)とも呼ばれるように、ビジネスモデルや社会経済構造自体の抜本的な変化をもたらしている。また、日本においても、長期的な施策の方向性として、社会課題解決を起点とした高付加価値分野での新たな需要喚起と、それを支えるデジタル技術を通じたデータドリブンでの新たな価値創出を起点とした豊かな社会や経済成長の実現が、政府によって掲げられている<sup>4,5</sup>。著者らは、「IGES 1.5°Cロードマップ：日本の排出削減目標の野心度引き上げと豊かな社会を両立するためのアクションプラン<sup>6</sup>」において、こうした変化に関するシナリオを構築し、デジタル化を起点とする社会経済構造の変化<sup>7</sup>を戦略的に取り入れることによって、より早期かつ大幅にエネルギー消費量を削減できることを示した。また、それが世界全体の平均気温上昇を産業革命前と比較して1.5°C以下に抑える国際目標(以下、1.5°C目標)の実現において重要な役割を果たす、と結論づけた。

一方、デジタル化がエネルギー消費量に与える影響を検討する際、以下の4つの効果が複合的に影響することと留意が必要である<sup>8</sup>。すなわち、①情報通信部門の直接的な電力消費量の増加(情報通信機器の生産やデータ処理にかかる電力消費量の増加など)、②デジタル化による経済のエネルギー消費効率の改善(生産・制御・輸送に関わる新たな形態の構築や効率の改善、物質消費や移動需要の減少など)、③経済成長・経済活動拡大に伴うエネルギー消費量の増加(所得の増加による消費行動の拡大など)、④産業構造の変化に伴うエネルギー消費量の削減(相対的にエネルギー消費量の少ないサービス産業へのシフトなど)、である。

①情報通信部門の直接的なエネルギー消費量の増加について、総合科学誌Natureに掲載された論文<sup>9</sup>では、データセンター(DC)が消費する電力、ユーザーが使用する電子機器が消費する電力、ネットワーク機器(有線機器及び無線機器)が消費する電力、これらのICT製品を製造する際の電力の4つに分類している。2010年におけるこれらの世界全体の電力消費量は、2,000TWh程度であり、ユーザーが使用する電子機器が消費する電力が1,100TWh程度と大半を占めていた。なお、2010年における世界全体の電力消費量は、22,500TWhであった

<sup>3</sup> Klaus Schwab, "The Fourth Industrial Revolution: what it means, how to respond." World Economic Forum, 2016. URL: <https://www.weforum.org/agenda/2016/01/the-fourth-industrial-revolution-what-it-means-and-how-to-respond/>

<sup>4</sup> 産業構造審議会経済産業政策新機軸部会 [https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/shin\\_kijiku/021.html](https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/shin_kijiku/021.html)

<sup>5</sup> 科学技術・イノベーション白書 [https://www.mext.go.jp/b\\_menu/hakusho/html/kagaku.htm](https://www.mext.go.jp/b_menu/hakusho/html/kagaku.htm)

<sup>6</sup> IGES 1.5°Cロードマップ：日本の排出削減目標の野心度引き上げと豊かな社会を両立するためのアクションプラン

<sup>7</sup> 無形資産投資の増加による高付加価値化や、製造業のサービス産業化、ビッグデータや自動運転技術を活用した人流・物流の合理化、効率的で循環的なエネルギー・素材利用などが含まれる。

<sup>8</sup> Lange et al., 2020. "Digitalization and energy consumption. Does ICT reduce energy demand?" Ecological Economics, vol. 176. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2020.106760>.

<sup>9</sup> Jones, N. (2018). How to stop data centres from gobbling up the world's electricity. Nature, 561(7722), 163-166.

ことから、情報通信部門の直接的なエネルギー消費量が占める割合は、9%程度であった。2030年になると、ICT技術による世界全体の電力消費量合計は、Expected Case(原典となる論文<sup>10</sup>での中庸的なシナリオ)では、8,000TWhと4倍程度に増加すると推計している<sup>11</sup>。このうち、DCの電力消費量(2010年200TWh程度から2030年3000TWh程度と約15倍)とネットワーク機器の電力消費量(2010年400TWh程度から2030年3500TWhと約9倍)の増加量が顕著である。また、2030年の世界全体の電力消費量は約40,000TWhと推計されていることから、情報通信部門の直接的なエネルギー消費量が占める割合は、20%へと上昇する推計となっている。

とりわけ、DCにおける電力消費量の増加については、例えば、エネルギー基本計画の審議を行う総合資源エネルギー調査会基本政策分科会(第54回会合)において、デジタル化に伴う電力消費量の大幅な増加を見込んだうえで2050年までの長期的シナリオを描くべき、といった意見が複数の委員から出されるなど、関心が高まっている<sup>12</sup>。また、電力広域的運営推進機関は、将来の電力需給シナリオを検討する中で、このDCにおける電力消費量にも焦点を当て、複数の専門機関に対して推計結果の報告を求めている<sup>13</sup>。

上記の「IGES 1.5°Cロードマップ」においては、産業連関表などを用いた分析を通して、①～④の効果を総合的に評価することを試みている<sup>14</sup>。その結果、2050年時点におけるグリーン水素製造用電力を除く電力消費量は942～1,349TWh(シナリオによって異なる)となり、いずれのケースでも再生可能エネルギー導入の拡大などにより電力の安定供給が可能であることを示している。ただし、①のうち、DCにおける電力消費量については、既往研究<sup>15,16</sup>を参考に、新たな計算原理の実装や量子コンピューティングといった革新的な技術発展により、現状から大きく変化しないという想定<sup>17</sup>を置いており、想定通りにならないリスクやそれを低減する方策の検討については今後の課題としていた。また、②のうち、デジタル化による価格低減や付加価値向上により人々の製品やサービスの消費量が増大し、エネルギー消費効率の改善効果(の一部)が打ち消される「リバウンド効果<sup>18</sup>」についても、十分に検討できておらず今後の課題としている。そこで本稿では、これらの課題のうち前者に焦点を当て、デジタル化によるDCにおける電力消費量の増加分が将来のエネルギー消費においてどの程度のインパクトを持ちうるかを分析したうえで、デジタル化による社会経済構造の変革を促進しながら1.5°C目標を追求しつつ、DCにおける

<sup>10</sup> Andrae, A. S., & Edler, T. (2015). On global electricity usage of communication technology: trends to 2030. Challenges, 6(1), 117-157.

<sup>11</sup> なお、Best Caseでは、2,500TWh程度となっている。

<sup>12</sup> 総合資源エネルギー調査会基本政策分科会(第54回会合)令和5年12月18日URL: [https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic\\_policy\\_subcommittee/2023/054/054\\_010.pdf](https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/2023/054/054_010.pdf)

<sup>13</sup> 電力広域的運営推進機関 将来の電力需給シナリオに関する検討会(第4回)令和6年3月5日 URL: [https://www.occto.or.jp/iinkai/shorai\\_jukyu/2023/2023\\_shorai\\_jukyu\\_4\\_haifu.html](https://www.occto.or.jp/iinkai/shorai_jukyu/2023/2023_shorai_jukyu_4_haifu.html)

<sup>14</sup> 産業連関表を用いることにより、ある産業の需要が増減した場合に他の産業の生産額にどのように波及していくかを総体的に分析することができる。例えば、デジタル投資が拡大することで情報通信部門の生産額が増加するだけでなく、それによって誘発される電子機器などの生産増なども評価される。「IGES 1.5°Cロードマップ」では、過去の産業連関表における投入係数に対してデジタル化の影響を考慮した将来の投入産出構造などを想定し(例えば、公務部門で紙製品への投入が減少し情報通信への投入が増加する)、国内総生産(GDP)の総額を設定することで、あるシナリオのもとでの各産業の将来の生産額を推計している。これらの生産額に加え、業種ごとにエネルギー効率の改善などを考慮して電力消費量の推計を行うことで、デジタル化による複合的な効果を捉えて電力消費量を推計している。

<sup>15</sup> 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「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～」2022年3月 URL: <https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2021-RR-03.html>

<sup>16</sup> IEA, 2023 "Data Centres and Data Transmission Networks." URL: <https://www.iea.org/energy-system/buildings/data-centres-and-data-transmission-networks>

<sup>17</sup> 得られる情報の制約から、海外サーバーと国内サーバーの利用比率は変わらないという想定になる。

<sup>18</sup> これらのリバウンド効果は、社会が変化する過程で一時的なもの(オンライン会議と対面式会議の混在。この場合、会議場利用に関わるエネルギー消費量に加えて、データ通信に関わるエネルギー消費量が発生する)と、社会が変化を遂げた後にも継続するもの(例えば、余暇の増加に伴う観光・娯楽施設の増加)があることから、時間軸を伴った議論を展開することが必要と考えられる。

電力消費量の増加分をクリーンな電源による電力供給が可能な水準に抑えるために講じるべき施策を検討することを目的とする<sup>19</sup>。

## 2. 世界のデータセンターの電力消費に関する推計

IEAによると、2022年時点で、世界全体の電力消費量のうち1.0-1.3%にあたる240-340TWhがDCにおける消費<sup>12</sup>であった。図1に示す通り、過去10年の間にインターネット上でやり取りされるデータ量(トラフィック)は指数関数的に増加しているが、DCにおける電力消費量は殆ど増加していない。まず、スマートフォンの普及やオンラインコンテンツ充実化などで2020年のインターネット・トラフィックは2010年と比較して17倍になったが、仮想化による負荷分散やデータセンターの冷却方法改善、などオペレーションの改善により、DCの計算負荷自体は10倍弱の増加に収まっている。さらに、クラウドへの移行やDCの大規模化、施設の省エネ化の進展などにより、DCのエネルギー消費量は1割程度の増加に留まっている。

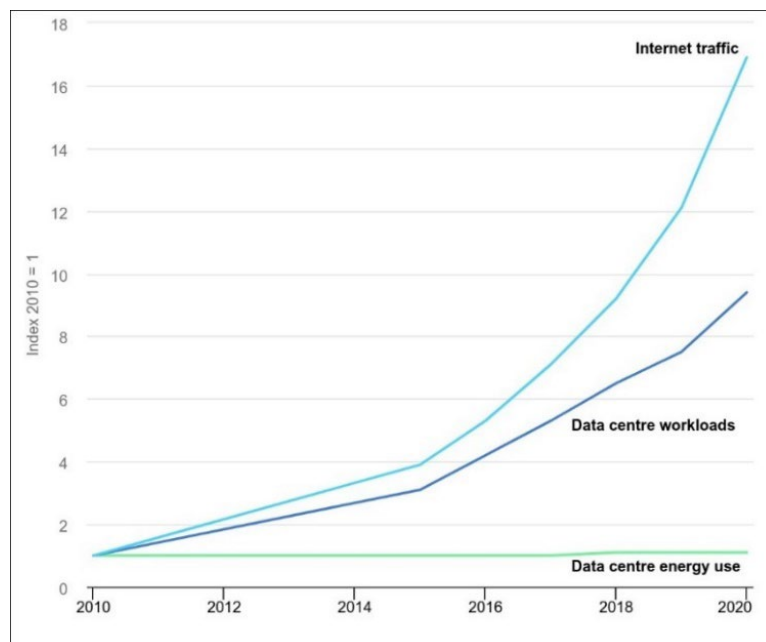


図 1 世界の DC のエネルギー消費量の推移(出典:IEA<sup>12</sup>)

一方、IEA(2024)<sup>20</sup>は、技術発展やサービス普及のペースによるため予測は困難としながらも、2026年には、DC及び生成AIや暗号通貨による電力消費量が、2022年の1.3～2.3倍程度にまで増えうるとしている(図2)。世界の電力消費量が30,600TWhと推計されていることから、デジタル化が進展することにより全体の2.6%程度を

<sup>19</sup>後者についても重要な研究課題であり今後深掘りが必要であるが、既往研究を踏まえると、エネルギー課税や炭素課税といった施策を導入して、エネルギー効率性と資源効率性を高めるのみならず、リバウンド効果起きないような行動を誘導するような施策の組み合わせをデザインすることによりリバウンド効果を抑制することはできると考えられる。出典:Lange, et. al, 2023. "The induction effect: why the rebound effect is only half the story of technology's failure to achieve sustainability" Front. Sustain. 4:1178089.

doi: 10.3389/frsus.2023.1178089.

<sup>20</sup> IEA, 2024 "Electricity 2024: Analysis and forecast to 2026."



DCほかの電力消費量が占めるようになると考えられている。

ここで、生成AIや暗号通貨は、膨大なデータの学習や推論、ブロックチェーンの演算などを伴うため、インターネット上で単純な情報のやり取りを行う技術とは異なる性質を持つ。そのため、それらの普及に伴う電力消費量の増加について慎重に検討する必要があることは論を俟たない。一方、過去にもデジタル化に伴うDCの電力消費量の増加について懸念する指摘は度々行われてきたが、新規電源開発を正当化する政策的意図をもって推計された事例があったことや<sup>21</sup>、多くの将来推計においてICT分野における技術革新やエネルギー効率改善が現実よりも大幅に過小評価される傾向もあり(参考資料1を参照)、推計値は十分に注意して理解する必要がある。

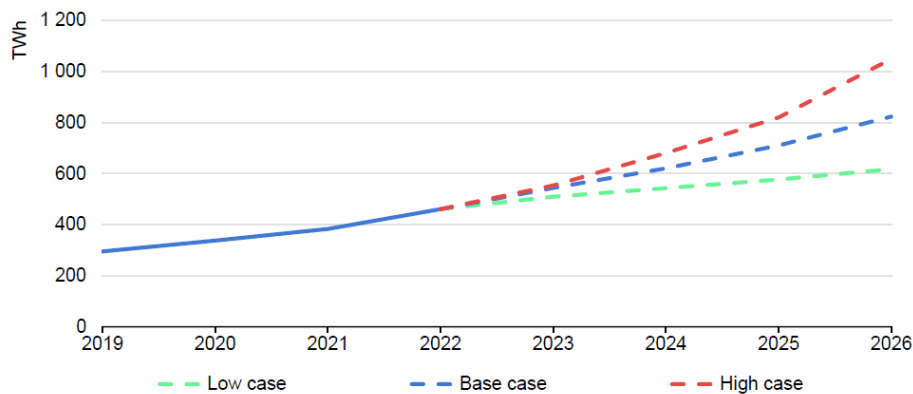


図 2 世界の DC、生成 AI、暗号通貨の電力消費量の将来推計(出典:IEA<sup>15</sup>)

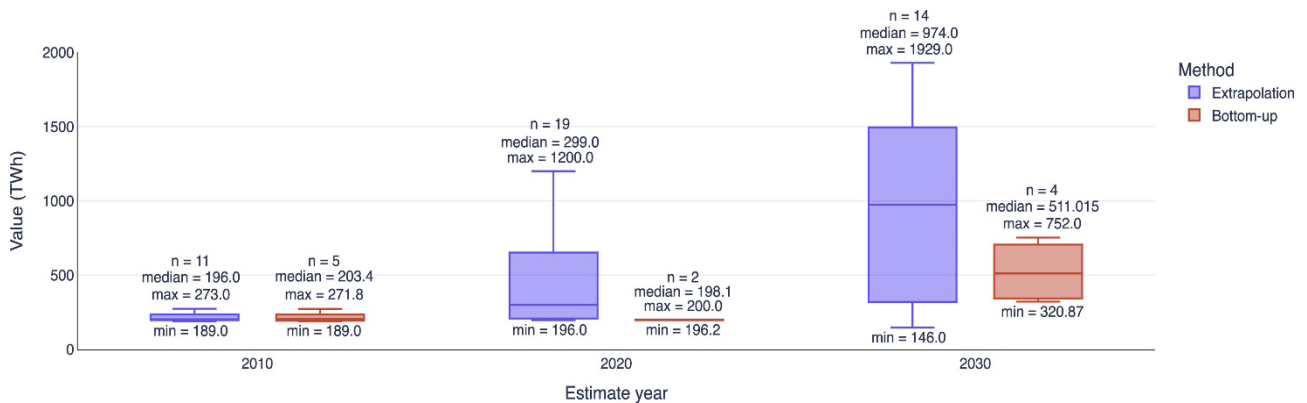


図 3 世界の DC の電力消費量に関する推計値の範囲(出典:Mytton&Ashtine<sup>18</sup>)

Mytton&Ashtine (2022)<sup>22</sup>は、2007年から2021年に公表された46の機関による258本の論文が示す世界全体のDCの電力消費量推計結果をレビューし、推計方法及び推計対象年別に推計値の分布を示している(図3)。

<sup>21</sup> Amory Lovins, 1999. "Exchanges between Mark Mills and Amory Lovins about the electricity used by the Internet." URL: <https://rmi.org/insight/exchanges-between-mark-mills-and-amory-lovins-about-the-electricity-used-by-the-internet/>

<sup>22</sup> David Mytton & Masao Ashtine, 2022. "Sources of data center energy estimates: A comprehensive review." Joule, vol.6 (9) p2032-2056. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2022.07.011>

図3の青色で示されている外挿(Extrapolation)アプローチは、計算需要と電力消費量の相関関係を仮定し、計算需要の成長率とエネルギー効率の改善率などを想定することで、将来の電力消費量を予測するものである。これらのパラメーターは既往研究等を参照して設定されるが、信頼性の低いデータも多く、文献独自の仮定やデータ根拠を十分批判的に評価せずに引用すると、バイアス、推定誤差、範囲の制約(地理的または時間的)を本質的に取り込むことになり、推計の不確実性が大きくなるとしている。一方、図3の赤色で示されているボトムアップ(Bottom-up)アプローチは、機器仕様(サーバーの消費電力など)やDCのインフラ特性(空調など施設全体のエネルギー効率)、出荷台数などをもとに、将来の変化を想定することで、電力消費量を予測するものである。ボトムアップアプローチはその性質上、数年先までの予測に用いられるのが通常であるとされるが、各種パラメーターに長期的な想定を与え、数十年先の予測を行うこともある。いずれのアプローチにおいても、将来のパラメーターの設定には大きな不確実性が伴うが、特に外挿アプローチにおいて最大値と最小値の差が大きくなっている(例えば、2030年の推計値には13倍以上の差がある)。また、外挿アプローチとボトムアップアプローチの推計結果は長期の推計になるにつれて、乖離していく傾向が示されている。この論文では、電力インフラの構築とICT部門の成長を両立させるために、DCのエネルギー消費等に関する義務的な情報開示などを通して信頼性の高い予測ができるようにしていくことの必要性が指摘されている。このように、とりわけ長期的なDCの電力消費量について、現状では信頼性の高い予測が非常に困難な状況にあることを理解しておく必要がある。

### 3. 日本のデータセンターの電力消費に関する推計

それでは、日本においてデジタル化が進展していくに伴い、DCの電力消費をどのように想定し、電力インフラの構築を進めればよいのだろうか。日本のDCの電力消費量は2021年度に約20TWhであったとされており、国内の電力消費量の約2%を占めている<sup>23</sup>。計算需要の増加に対応するためにどこにDCが立地するかは不明であるが、経済安全保障の観点等から政策的に国内への立地が進められており、一定のDCの増加は想定する必要がある。日本における将来のDCの電力消費量については、表1及び図4に示す通り、これまで複数の文献において推計が行われているが、その結果にはやはり相当の幅がある。

<sup>23</sup> デロイト・トーマツミッド・エシエンティアルズ研究所「省エネ・ゼロエミッション化に向けたデータセンター市場の実態と将来予測【2022年度版】」URL: <https://mic-r.co.jp/mr/02480/>

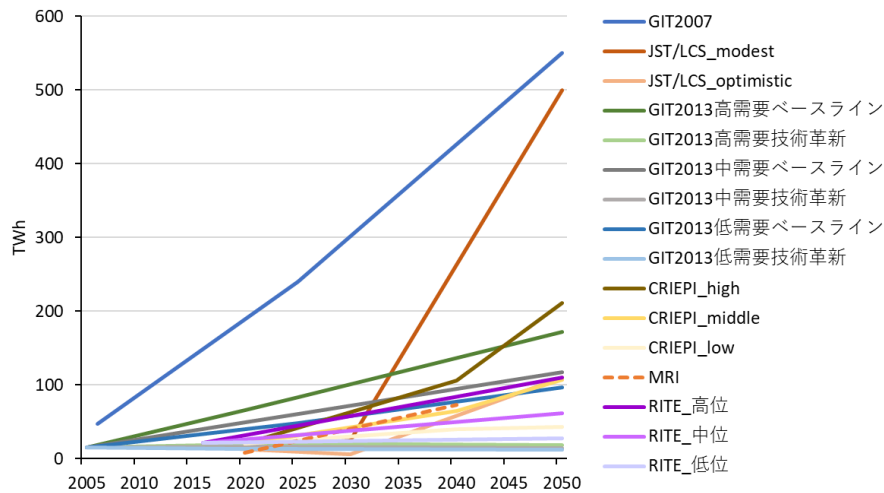


図 4 各種文献における日本の DC 電力消費量の将来推計値の比較

表1. 日本におけるDCの電力消費量の将来推計事例

| レビューを行った文献                  | DC 電力消費量の将来推計方法                                                                                                                                          |
|-----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| GIT (2007) <sup>24</sup>    | 詳細不明であるが、データ情報量と IT 機器(PC、サーバ、ネットワーク機器、テレビ)の消費電力量の相関関係に基づくと読み取れる。                                                                                        |
| GIT (2013) <sup>25</sup>    | 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 <sup>26</sup> 。                                                      |
| JST/LCS(2022) <sup>27</sup> | 将来の処理データ量とデータ演算あたりの CPI 消費電力をもとに推計。CPU 消費電力は、CPU が処理するデータ量、データ演算定数との比例関係にある。                                                                             |
| MRI(2023) <sup>28</sup>     | データ情報量(総データトラフィック数)と通信業の電力消費量の相関関係に基づく。なお、エネルギー効率の改善率を年率 1.2 倍と想定している。                                                                                   |
| CRIEPI(2024) <sup>29</sup>  | 床面積と平均電力密度の関係性によって、DC の電力消費量を推計。平均電力密度はデータセンターの電力需要を床面積で除した指標であり、想定ではサーバー 1 台当たりの電力需要や、電力効率(PUE)等の様々な変数を考慮。シナリオに応じて、データ処理の効率改善や光電融合技術などの新規技術導入効果を想定している。 |
| RITE(2024) <sup>30</sup>    | DC 需要を Masanet et al.の成長率を基に想定し、ベースラインとなる DC の電力消費量を推計。さらに、炭素価格により誘発される電力価格上昇に伴う追加的省エネ量を価格弾力性を用いて推計。                                                     |

2050年時点のDCの電力消費が現状の規模と変わらない結果になっているのは、いずれも大きな技術革新を見込んでいるシナリオ群である(GIT2013高需要・中需要・低需要技術革新、CRIEPI\_low、RITE低位)。一方、

<sup>24</sup> 経済産業省グリーン IT イニシアティブ 会議資料 URL: [https://www.env.go.jp/air/tech/model/heat\\_aeh-wg2-20\\_01/mat02.pdf](https://www.env.go.jp/air/tech/model/heat_aeh-wg2-20_01/mat02.pdf)

<sup>25</sup> グリーン IT 推進協議会調査分析委員会, 2013 “グリーン IT 推進協議会調査分析委員会 総合報告書(2008 年度～2012 年度)～低炭素社会に向けたグリーン IT の貢献～” URL: <https://home.jeita.or.jp/greenit-pc/activity/reporting/110628/pdf/survey01.pdf>

<sup>26</sup> 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「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～」2022年3月 URL: <https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2021-RR-03.html>

<sup>27</sup> 三枝, 2022 “情報化社会の進展がエネルギー消費に与える影響(Vol.4)ーデータセンター消費電力低減のための技術の可能性検討ー” URL: <https://www.jst.go.jp/lcs/pdf/fy2021-pp-01.pdf>

<sup>28</sup> MRI, 2023 “ICTインフラの三重苦を回避する” URL: <https://www.mri.co.jp/knowledge/mreview/202307.html>

<sup>29</sup> 間瀬, et al., 2024 “2050年度までの全国の長期電力需要想定 ー基礎的需要・追加的要素(省エネ・電化)の暫定試算結果ー” URL: [https://www.occto.or.jp/iinkai/shorai\\_jukyu/2023/files/shoraijukyu\\_03\\_02\\_01.pdf](https://www.occto.or.jp/iinkai/shorai_jukyu/2023/files/shoraijukyu_03_02_01.pdf)

<sup>30</sup> 秋元, et al., 2024 “2050 年に向けた日本の電力需要の見通し(データセンター、半導体、自動車、鉄・化学等、自家発を中心に)” URL: [https://www.occto.or.jp/iinkai/shorai\\_jukyu/2023/files/shoraijukyu\\_04\\_02\\_02.pdf](https://www.occto.or.jp/iinkai/shorai_jukyu/2023/files/shoraijukyu_04_02_02.pdf)

500TWh以上の大幅な増加を見込んでいるのは、いずれも過去の電力消費量とデータ処理量等との単純な相関関係をもとに推計を行っているシナリオ群である（GIT2007、JST/LCS\_modest）。その他の8本シナリオは80～210TWh程度の範囲内に収まっており、そのうち6本シナリオは100TWh程度の増加を見込んでいる。

GIT2013 高需要・中需要・低需要技術革新、CRIEPI\_low、RITE 低位の6本のシナリオを低位群とし、JST/LCS\_optimistic、GIT2013 高需要・中需要・低需要ベースライン、CRIEPI\_high、CRIEPI\_middle、RITE\_高位の7本のシナリオを高位群としてまとめたものを図 5で示す。低位群では、現状と同程度の規模に収まる程度である。電力消費が上振れする高位群でも100TWh～200TWh程度である。いずれの推計結果にも不確実性が伴うが、楽観的なケースでは現状と同程度の規模に収まる可能性を見据えつつ、電力消費が上振れするケースとして4本のシナリオの結果が示す100TWh程度（最大で200TWh程度）の電力消費量の増加に対応する方策を検討しておくことが現実的ではないかと考えられる。

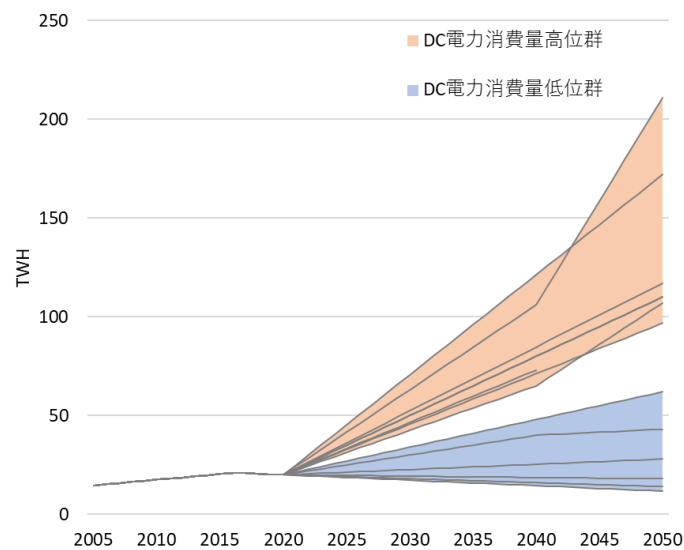


図 5 各種文献における日本の DC 電力消費量の将来推計値 IGES まとめ<sup>31</sup>

## 4. データセンターの電力消費量増加への対応

将来のDCIによる電力需要増を、前節で議論した範囲（現状程度、あるいは上振れするケースとして100TWh程度（最大で200TWh程度））に抑えるため（言い換えると、極端な電力消費量増加を回避するため）には、DCIによる電力消費量増加分をクリーンな電源の供給可能な水準に抑える視点が不可欠となる。ここでは、DCの電力消費量増加を抑える視点から重要なポイントをあげるとともに、100TWhのクリーンな電源を確保できるかについて考察する。

<sup>31</sup> GIT2013の各シナリオについては、文献の発表年から時間がたっているところから、2050年の推計値のみを用いた。2020年から2050年までの値は、CRIEPIシナリオの2020年の値を用いて線形補完した。



## 4.1 既存の最新技術の普及拡大

クラウド型のDCは、オンプレミス型のDCと比較して7～9割程度エネルギー消費量を削減できるとされている<sup>32</sup>。飛躍的なエネルギー効率改善の要因として、動的なプロビジョニング<sup>33</sup>やマルチテナンシー<sup>34</sup>などによるIT運用の効率化、サプライヤーとの協力によるIT機器の効率化、照明・冷却など間接的なタスクに必要な電力を削減することによるDC・インフラの効率化、が挙げられる<sup>35</sup>(図 6)。

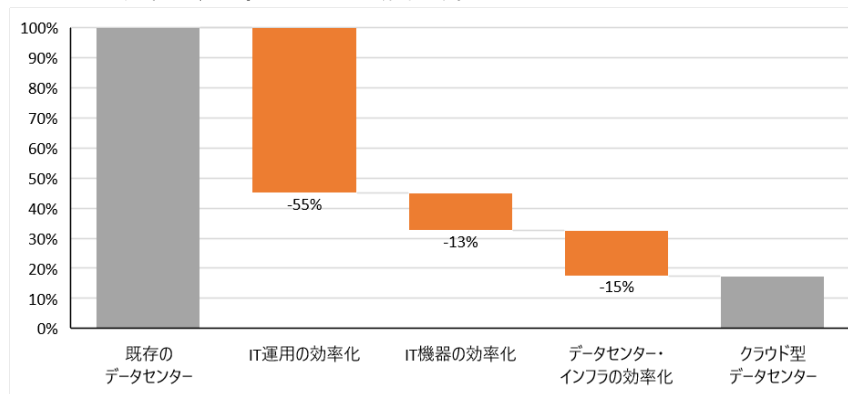


図 6 クラウドコンピューティングへの移行によるエネルギー効率改善(出典:Accenture,2020<sup>21</sup>をもとに著者作成)

ソフトウェアやアルゴリズムの改善により必要な計算量を減らすことも重要である。例えば、ディープ・ニューラル・ネットワークを応用したスパース・モデルでは、ベースラインモデルと比較して、同レベルの出力品質を維持しながら計算量を約5分の1～10分の1まで減らすことができるとされる<sup>36</sup>。また、Chat GPTなどの対話型AIを実現している言語モデルは、大規模なデータセットと計算リソースを活用して学習された膨大なパラメーター数を用いている。近年は、性能向上に向けてパラメーター数を増やすことがトレンドとなっており、計算量増加に伴い、DCの電力消費量の増加につながっている。これに対して、日本ではNTTが日本語版大規模言語モデル(LLM)「tsuzumi」を開発し、パラメーター数をOpenAI社 GPT-3の1750億(175B)に対して、およそ300分の1(超軽量版)および25分の1(軽量版)のサイズに抑えつつ、実用上必要となる追加学習や推論に必要な能力を確保している<sup>37</sup>。

集積度等に伴う半導体チップ性能のさらなる改善も望むことができる。ムーアの法則の終焉により、データセンターのコンピューティング効率の進歩は停滞していることも指摘されている一方で、NVIDIAは従来のCPUよりも2倍の効率を実現したことを2023年3月に発表した<sup>38</sup>。また、東工大発のベンチャー企業が次世代三次元集積向

<sup>32</sup> Accenture, 2020. "The green behind the cloud." URL: <https://www.accenture.com/us-en/insights/strategy/green-behind-cloud>

<sup>33</sup> サーバーやネットワークなどのITインフラ設備や、システムを管理する設備を顧客の要望に応じて調達・提供するプロセス。

<sup>34</sup> クラウドベンダーの複数の顧客が同じコンピューティングリソースを使用すること。

<sup>35</sup> Microsoft, 2020. "The carbon benefits of cloud computing: A study on the Microsoft Cloud in partnership with WSP."

<sup>36</sup> Google and Boston Consulting Group, 2023. "Accelerating Climate Action with AI." URL: <https://web-assets.bcg.com/72/cf/b609ac3d4ac6829bae6fa88b8329/bcg-accelerating-climate-action-with-ai-nov-2023-rev.pdf>

<sup>37</sup> NTT, 2023 "NTT版LLMの概要" URL: [https://www.rd.ntt/research/LLM\\_tsuzumi.html](https://www.rd.ntt/research/LLM_tsuzumi.html)

<sup>38</sup> NVIDIA, 2023 "NVIDIA Grace CPU があらゆるデータセンターでエネルギー効率に優れたコンピューティングを実現", URL: <https://blogs.nvidia.co.jp/2023/03/29/grace-cpu-energy-efficiency/>

け製造ラインを台湾で構築<sup>39</sup>し始めるなど、今後の半導体チップ性能が向上する余地も大いに残されている。

## 4.2 革新的技術の開発促進

**ニューロモーフィックデバイス**は従来型(ノイマン型)のアーキテクチャに代わる次世代コンピューティングの中核技術として開発が進められており、人間の脳を模倣した超並列処理により、消費電力の大幅な削減が可能になる。インテル社は2024年4月18日に世界最大規模のニューロモーフィック・システムの構築を完了したと発表した。ここでは、従来のCPUやGPUのアーキテクチャと比べて消費電力を100分の1に抑えながら、約50倍の高速スピードでAI推論を実行し、最適化の問題を解決できるとしている<sup>40</sup>。

**アルゴリズム**に関する研究開発も重要である。マイクロソフト社の研究チームは、2024年2月27日に論文を公開し、LLMにおいて従来のモデルでは必要であった行列のかけ算が不要になり、全ての計算をシンプルな行列の足し算で行えるモデルを開発した、と発表した<sup>41</sup>。このモデルが実用化されれば、従来のLLMと比較して、計算量及び電力消費量が激減する。ただし、この論文は、まだ技術評価が始まったばかりで、効果検証が終わったわけではない。しかし、少なくとも、このような研究的知見が積み重なり、生成AI技術をはじめとするLLMに必要な電力消費量を大幅に減らす新たな製品の開発が加速していくと考えられる。

DCで処理する情報量が増えるにつれて、ネットワークの負荷も高まり、**ネットワーク**に関わる電力消費量の増大も懸念される<sup>42</sup>。これに対して、NTTデータ社は、IOWN(Innovative Optical and Wireless Network)構想の2026年までの商用化を目指している<sup>43</sup>。IOWNは、NTTデータ社独自の光技術である「光トランジスタ」による伝送技術と、電子技術による「処理」を融合(光電融合)したものである。これにより、ネットワーク・コンピューティング・端末に至るまで光を活用し、電力消費量を100分の1に削減するとともに、これまでの125倍の大容量の情報を遅延なく処理することが可能になるとしている。開発はいくつかの段階に分けて進められている<sup>44</sup>。初期段階では、計算チップと周辺機器を光で接続する。最終段階では、計算チップそのものを光回路で構成し計算を行う光電融合チップの実用化となる。現時点では、都市部のDCと郊外のDC間のネットワークに光技術を導入する実証実験を成功させている<sup>45</sup>。

**量子コンピューティング技術**についても、DCの電力消費量削減に大いなる可能性があるが、現在のコンピューターの上位互換である量子ゲート方式と組み合わせ最適化問題などに特化した量子アニーリングの2種類がある

<sup>39</sup> 東京工業大学, 2023 “東京工業大学のBBCube技術に基づく次世代三次元集積向け製造ラインが構築”URL: <https://www.titech.ac.jp/news/2024/069211>

<sup>40</sup> インテル株式会社, 2024. “インテル、世界最大規模のニューロモーフィック・システムを構築してサステナビリティの高いAIを実現” URL: <https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000076.000009705.html>

<sup>41</sup> Shuming Ma, et al., 2024. “The Era of 1-bit LLMs: All Large Language Models are in 1.58 Bits.” URL: <https://arxiv.org/abs/2402.17764>

<sup>42</sup> 国立研究開発法人科学技術振興機構低炭素社会戦略センター「情報化社会の進展がエネルギー消費に与える影響(Vol.3)ーネットワーク関連消費エネルギーの現状と将来予測および技術的課題ー」(令和3年2月)

<sup>43</sup> NTT “NTT,「IOWN構想」に見る脱炭素実現への本気度 環境課題の解決と、経済成長の同時実現とは?” URL: [https://www.rd.ntt/iown/column/article\\_carbon-neutral.html](https://www.rd.ntt/iown/column/article_carbon-neutral.html)

<sup>44</sup> リコー経済社会研究所, 2022 “データセンターを省エネ化、「光電融合」とは” URL: [https://blogs.ricoh.co.jp/RISB/technology/post\\_773.html](https://blogs.ricoh.co.jp/RISB/technology/post_773.html)

<sup>45</sup> NTT Data, 2024. “イギリス・アメリカ各国にて遠距離データセンタ間を接続する実証実験に成功” URL: <https://www.nttdata.com/global/ja/news/topics/2024/041200/>

ことに留意が必要である。量子ゲート方式はGoogle, IBM, Microsoft社などが開発中であるが、実用化に至るまでは、長期的な研究が必要とされており、本稿での説明は省略する。後者の量子アニーリングは、1998年に東京工業大学の西森秀稔氏によって提案され、D-Wave System社やNEC社によってハードウェアが開発され商用化されており、D-Wave社のシステムは、冷却用以外にほとんど電力が消費されていないことが報告されている<sup>46</sup>。すでに、物流業における積み荷・ルート最適化や配送計画の最適化、製造業における少量多品種生産の最適化<sup>47</sup>や画像分類・音声分類といったAI & 機械学習の分野への応用も研究されている<sup>48,49</sup>。これらのいずれも、計算量が多いプロセスであるが、量子アニーリング技術を用いる場合は、少ない電力消費量で計算結果が得られる。

### 4.3 情報開示や効率基準を通じた DC のエネルギー管理の強化

EUでは、2020年からDCのエネルギー消費効率基準が定められている。また、2024年からは、DCの管理者に対してエネルギー消費及び排出量の報告義務が課され、大規模なDCには技術的・経済的に可能な場合は排熱回収設備の設置が求められている。日本でも2023年度からDC業が省エネ法のベンチマーク制度の適用対象となり、エネルギー消費効率基準が定められている。日本のDCの約半分が老朽化しているとの報告もあり<sup>50</sup>、インフラ更新による効率改善ポテンシャルが大きいと考えられることから、事業者によるデータ取得や自主的な管理を促すとともに、こうした制度を適切に運用して最新技術の導入を促すことが重要であると考えられる。

また、電力インフラの構築には時間を要することから、将来のDCの電力消費量に関する推計は引き続き必要であり、その精度を向上させることが求められる。精度の高い情報を基に適正なインフラを構築していくために、IT機器の出荷台数や導入台数、ネットワークトラフィックや電力消費などに関するデータの質と利用可能性を高めること、場合によっては、DCの管理者やICT機器製造事業者等から必要な情報の開示を求める仕組みを構築することも有効であると考えられる<sup>18</sup>。

### 4.4 クリーンな電源の確保

3節で論じた通り、国内のDCの電力消費量は、楽観的なケースでは現状と同程度の規模に収まり、上振れするケースとして100TWh程度(最大で200TWh程度)の電力消費量の増加可能性を想定しておくことは現実的に必要であろう。ただし、その他の様々な要素に関しても将来見通しには不確実性が伴うことを踏まえ、状況に応じてバランスの取れた判断をしていく必要がある。例えば、各業界団体が目標として掲げる再生可能エネルギーの将

<sup>46</sup> D-WAVE, “量子コンピューティング” URL: <https://dwavejapan.com/system/>

<sup>47</sup> 西原, 2022. “量子コンピューティングの早期産業化に向けたNECの取組と提言” URL: [https://www8.cao.go.jp/cstp/ryoshigijutsu/jitsuyo\\_wg/3kai/siryo2-4.pdf](https://www8.cao.go.jp/cstp/ryoshigijutsu/jitsuyo_wg/3kai/siryo2-4.pdf)

<sup>48</sup> 浅岡 & 工藤 (2023) 量子アニーリングを活用した行列因子分解手法による画像分類、情報処理学会 13, P1-P8

<sup>49</sup> 斎藤, et al., 2022 “データ工学における量子コンピューティング” URL: [https://event.dbsj.org/deim2022/post/tutorial/deim2022\\_tutorial\\_T4\\_slides.pdf](https://event.dbsj.org/deim2022/post/tutorial/deim2022_tutorial_T4_slides.pdf)

<sup>50</sup> 株式会社日本政策投資銀行「データセンター業界レポート～データセンター業界の最新の動向～」(2021年11月) URL: [https://www.dbj.jp/upload/investigate/docs/3f613b233aa36faadfa0eb987d3a4cf5\\_1.pdf](https://www.dbj.jp/upload/investigate/docs/3f613b233aa36faadfa0eb987d3a4cf5_1.pdf)

来の発電電力量についても、数百TWh規模の幅が存在する。太陽光発電協会<sup>51</sup>は2050年までに386GW(ACベース)の太陽光発電の設備容量(年間発電量では500TWh相当)を見込み、風力発電協会<sup>52</sup>は2050年までに陸上風力発電40GW(88TWh相当)、洋上風力発電100GW(360TWh相当)から190GW(714TWh相当)を見込んでいる。また、海洋技術フォーラム<sup>53</sup>は2050年までに50GW(175TWh相当)から360GW(1260TWh相当)の浮体式洋上風力の導入目標値を有している。このように再生可能エネルギーの2050年の導入見通しの幅は、DCの電力消費量の増加幅以上に大きい可能性がある。また、仮に100TWhの電力を浮体式洋上風力発電(設備利用率を40%と想定)で供給する場合、28.9GWの設備容量に該当する。海洋技術フォーラムの資料では、意欲的目標では2045年に年間26GW、高位目標では年間10GWの新規設備導入を想定していることから、28.9GWの追加的な再エネ電源の開発は、可能な水準の範囲内にあると考えられる。

なお、IGES 1.5°Cロードマップでは、複数のシナリオの分析をもとに、2050年時点における電力消費量を942～1,349TWh(グリーン水素製造用電力を除く)と推計している。デジタル化を起点とする社会経済構造の変革が最大限進むシナリオが最も電力消費量が少ない。このシナリオでは、主に太陽光・洋上風力などの再生可能エネルギーの導入が、業界団体が掲げる目標値を下回る水準になる場合でも、安定供給が可能であるとの結果が示されている。一方、デジタル化が殆ど進まないシナリオが最も電力消費量が多くなる。このシナリオでは、再生可能エネルギーの導入が、業界団体が掲げる目標値の水準で行われ、かつ、政府が掲げる水準で水素輸入が行われることで、安定供給が可能である、との結果が示されている。IGES 1.5°Cロードマップにおける電力需要の推計ではDCの大きな電力消費増は見込んでいないが、仮に前章で述べた水準で増加、すなわち100TWh程度(最大で200TWh)上振れしたとしても、複数シナリオにおいて検討した電力需給の想定範囲内である。さらには、電力消費量増加をグリーン水素輸入量の増加(及びバックアップ用の水素火力発電の稼働率増加)によっても吸収できる構造である。そのためDCの電力消費量がIGES 1.5°Cロードマップの想定よりも上振れし、国内の再エネによる電力供給が不足する場合にも、電力需給を保つことができることから、ロードマップが想定している以上に大規模集中電源の容量を想定する必要はないと考えられる。

従って、将来のDCの電力消費量がどのような水準になるのかという論点と同様に、クリーン電力をどのように確保するのかという論点も重要であるといえよう<sup>54</sup>。

## 5. まとめ

本稿では、まず、世界及び日本のDCにおける将来の電力消費量について過去に推計を行った文献に関してレビューを行い、それらの推計における試算前提を整理した。次に、DCの電力消費量削減に向けた様々な対策や技術開発の動向と照らし合わせ、どのようにしてDCの電力消費量増加分を持続可能な水準に抑えつつ、

<sup>51</sup> 太陽光発電協会, 2023, “PV OUTLOOK 2050” URL: [https://www.jpea.gr.jp/wp-content/uploads/sympo40\\_s1\\_doc5.pdf](https://www.jpea.gr.jp/wp-content/uploads/sympo40_s1_doc5.pdf)

<sup>52</sup> 日本風力発電協会, 2023 “JWPA Wind Vision 2023” URL: [https://jwpa.jp/cms/wp-content/uploads/JWPA-Wind-Vision-2023\\_20230529\\_Full.pdf](https://jwpa.jp/cms/wp-content/uploads/JWPA-Wind-Vision-2023_20230529_Full.pdf)

<sup>53</sup> 海洋技術フォーラム, 2022, “我が国の浮体式洋上風力発電導入の数値目標に関する提言(詳細版)” URL: “<https://blog.canpan.info/mt-forum/img/E6B5B7E6B48BE68A80E8A193E38395E382A9E383BCE383A9E383A0E6B5AEE4BD93E5BC8FE6B48BE4B88AE9A2A8E58A9BE695B0E580A4E79BAEE6A899EFBC88E8A9B3E7B4B0E78988EFBC89EFBC88Ver0420EFBC89E38080.pdf>”

<sup>54</sup> なお、デジタル化によって情報通信処理量が増加したとしても、DCの全てが日本国内に立地するとは限らない点にも留意が必要である。より安価で大量の再エネにアクセスできる海外にDCの立地が進む可能性も想定され、その場合は電源の確保は不要になる。

1.5°C目標の実現を追求していけるかを考察した。特に、日本においては国内DCの老朽化が進んでいることから、これらの設備更新時に、エネルギー効率の高い機器やエネルギー管理手法、エネルギー消費性能に優れたデータ処理に関わるアルゴリズムの採用を促すといった、データセンターのエネルギー消費性能を向上させる様々な取り組みを進める施策が重要である。

1.5°C目標の実現においてデジタル化の進展による社会経済構造の変化とエネルギー消費量の減少を戦略的に取り入れることは重要であるが、DCの電力消費量を増加させる側面もある。ただし、その懸念だけを強調するのではなく、DCにおける電力消費量の増加分を、クリーンな電源による電力供給が可能な水準にどのように抑えていけるか、という論点を中心に政策の場で議論することが建設的であろう。



## 参考資料 1. DC の電力消費量推計値の不確実性の事例

DCの電力消費量推計値は大きな不確実性があることについて、米国の事例が参考になる。図A 1は、米国環境保護庁(EPA)と米国エネルギー省(DOE)の協力のもとでローレンスバークレー国立研究所が2007年に公表した調査報告書<sup>55</sup>が示すDCの電力消費量の推計結果である。当時は、インターネットの普及拡大期であり、インターネットを介したクラウドサービスによるDCの電力消費量が増加するトレンドにあった。そのため、ローレンスバークレー国立研究所が示す5つのシナリオのうち、3つのシナリオにおいて、電力消費量が増加していく推計結果を示し、残りの二つが減少していく結果を示している。なお、Kooimey (2011)<sup>56</sup>による推計結果も、ローレンスバークレー国立研究所のCurrent Efficiency trends scenarioに近い推計値をとっている。

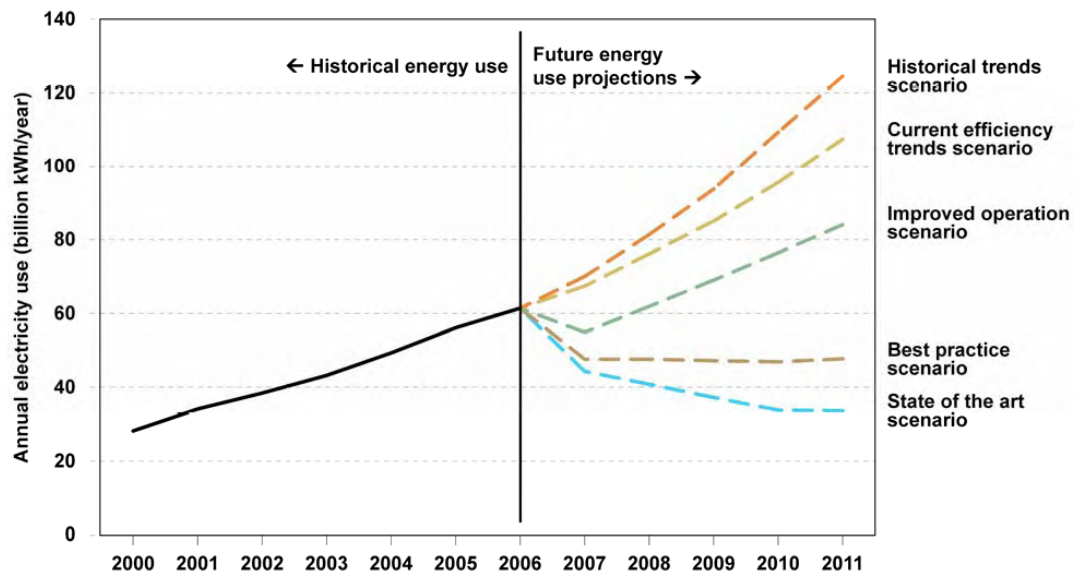
これに対し、図A 2は、ローレンスバークレー国立研究所が2016年に公表した調査報告書<sup>57</sup>が示すDCの電力消費量の推計結果であり、2014年までは実績値を示している。図A 1の2007年時の推計結果とは裏腹に、DCの電力消費量の実績値は、2006年から2014年にかけて一定の値を推移した。2006年から2007年にかけて、DCの電力消費量の落ち込みが実績値よりは大きいものの、全体的な傾向としては2008年時推計のBest Practice Scenarioに近い状態になった。この要因について、2016年の調査報告書では以下のように説明している。

- **サーバーの生産性と稼働率の向上**: 2000年から2005年にかけて、サーバー出荷台数は毎年15%ずつ増加し、DCで稼働するサーバーはほぼ倍増した。2005年から2010年にかけては、年間出荷台数の増加率は5%に低下したが、これはこの間の景気後退とサーバー仮想化の台頭によるところが大きい。2010年以降は、サーバー出荷台数の年間成長率はさらに低下し、3%になった。このサーバー出荷台数の年間成長率3%と比較的低い水準で推移する傾向は、ハイパースケールDCの台頭と、以前は分散的に配置されていたDCを集約化した傾向と一致している。実際、2010年以降のサーバー出荷台数の伸びは、ほぼすべてハイパースケールDC向けのサーバーで発生している。なお、ハイパースケールDCでは、サーバーが最大限の生産性を発揮できるように構成され、高い稼働率で運用されることが多いため、従来の小規模なDCで同じサービスを提供するのに必要なサーバーよりも少ない台数で済む。
- **サーバーのエネルギー効率の向上**: サーバーに必要な電力は、2000年から2005年にかけて増加していることが観察されたが、電力消費量は2005年以降、ほぼ一定に保たれていた。理由として、サーバーのパワースケーリング能力が向上したため、アイドル時や低稼働時の電力消費量が減少したことが指摘されている。また、DCのインフラ運用(冷却など)に対する意識向上により、DCの種類を問わず効率性が向上した。つまり、DCのエネルギー効率改善に資する技術革新の度合いが、2007年の推計時の想定よりもはるかに上回ったと考えられる。

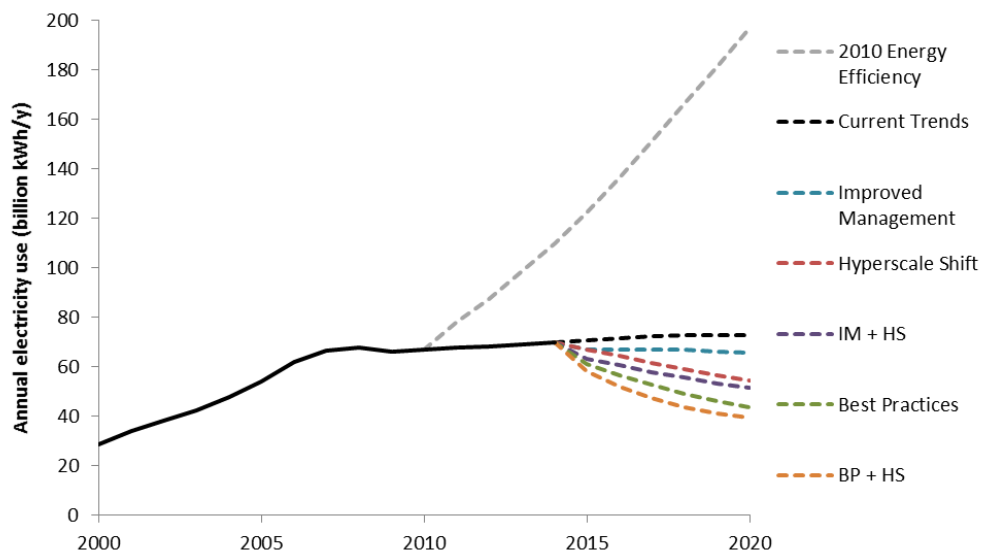
<sup>55</sup> Brown, R. et al, 2007. "Report to Congress on Server and Data Center Energy Efficiency: Public Law 109-431"

<sup>56</sup> Kooimey, 2011, "Growth in data center electricity use 2005 to 2010" URL: [https://alejandrobarrros.com/wp-content/uploads/old/4363/Growth\\_in\\_Data\\_Center\\_Electricity\\_use\\_2005\\_to\\_2010.pdf](https://alejandrobarrros.com/wp-content/uploads/old/4363/Growth_in_Data_Center_Electricity_use_2005_to_2010.pdf)

<sup>57</sup> Shehabi, A. et al., 2016. "United States Data Center Energy Use Report."



図A 1 DCの電力消費量のシナリオ別推計値比較(2007～2011年、2007年推計時、出典:Brown, R. et al, 2007)



図A 2 DCの電力消費量のシナリオ別推計値比較(2015～2020年、2016年推計時、出典:Shehabi, A. et al., 2016)

本稿のレビュー及び有用な情報提供を頂きました。

IGES 松尾直樹上席研究員をはじめとする IGES 内外のレビュワーの皆様により感謝申し上げます。

公益財団法人 地球環境戦略研究機関（IGES）

気候変動とエネルギー領域

〒240-0115 神奈川県三浦郡葉山町上山口 2108-11

E-mail: [ce-info@iges.or.jp](mailto:ce-info@iges.or.jp)

[www.iges.or.jp](http://www.iges.or.jp)

この出版物の内容は執筆者の見解であり、IGES の見解を述べたものではありません。

©2024 Institute for Global Environmental Strategies. All rights reserved.