

低炭素社会の実現に向けた
技術および経済・社会の定量的シナリオに基づく
イノベーション政策立案のための提案書

情報化社会の進展がエネルギー消費に与える 影響 (Vol.2)

—データセンター消費エネルギーの現状と将来予測および技術的課題—

令和3年2月

Impact of Progress of Information Society on Energy Consumption (Vol. 2):
Current Status and Future Forecast of Data Center Energy Consumption and Technical Issues

Proposal Paper for Policy Making and Governmental Action
toward Low Carbon Societies

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

LCS-FY2020-PP-03

概要

2018年度提案書 [1] では情報化社会の進展に伴う世界の IP トラフィックが 2030 年に現在の 30 倍以上、2050 年に 4,000 倍に達する予想を前提として、それに伴う膨大な消費電力増加の可能性を指摘した。本提案書では、データセンターの消費電力について、その構成機器に着目してどのような設備・機器がどの程度消費電力の増大に寄与しているかを検討した。また、トラフィックの増加と計算負荷が関連する業務をベース業務とし、近年比重を増しているディープラーニングなど、トラフィック量とは直接関連しないと思われる業務を AI 業務とし分けて検討した。

その結果、2018 年のデータセンターの消費電力は国内 14 TWh、世界が 190 TWh と推定された。さらに、現在の計算負荷の増大傾向が将来にわたって継続し、現在入手可能な最新機器を用いたと仮定したときの（将来の技術進歩は織り込まない）消費電力は、国内が 90 TWh (2030)、12,000 TWh (2050)、世界が 3,000 TWh (2030)、500,000 TWh (2050) と推定された。

データセンター消費電力の 50% をサーバが、25 ~ 30% を電源と冷却系が、次いでストレージが 10% 程度を占める。特にサーバは将来的にはデータセンター消費電力の 60 ~ 80% を占めると推定され、この消費電力の低減が最も重要である。消費電力低減効果が大きいデバイスは CPU、GPU であり、消費電力性能 (Gflops/W) として 2030 年に現在の 3 ~ 10 倍程度、2050 年には 1,000 倍程度が目標となる。またメモリ、電源、ストレージも 2030 年に 1/10、2050 年に 1/1,000 程度への消費電力低減が目標となる。

Summary

In our FY2018 report, the possibility of a huge increase in power consumption was pointed out when the world's IP traffic is to surge by a factor of 30 by 2030 and 4,000 by 2050 due to the development of the information society. In this report, regarding the power consumption of data centers, we focused on the equipment and examined what kind of equipment contributed to the increase in power consumption. The load of a data center was divided into 2 tasks. One is a basic task which is related to the IP traffic, and another is an AI task which is not directly related to the traffic volume such as deep learning.

As a result, the power consumption of the data center in 2018 was estimated to be 14 TWh in Japan and 190 TWh in the world. Assuming that the current trend of computational load increase continues in the future and the latest equipment currently available is used (not incorporating future technological progress), the power consumption will be 90 TWh (2030) and 12,000 TWh (2050) in Japan, and 3,000 TWh (2030) and 500,000 TWh (2050) in the world, respectively.

Currently, servers account for 50% of data center power consumption, followed by power and cooling systems with 25-30% and storage systems with about 10%. Servers are expected to make up 60-80% of data center power consumption in the future. It is thus most important to reduce the power consumption of this particular component. CPUs and GPUs have great potential to reduce power consumption. The energy efficiency (Gflops/W) needs to be about 3 to 10 times higher than the current one in 2030, and 1,000 times higher in 2050. The power consumption of memory, power supply, and storage should also target to be 1/10 in 2030 and 1/1,000 in 2050.

目次

概要

1. はじめに	1
2. データセンターの構造	2
3. 消費エネルギーの内訳と考え方	3
3.1 PUE	3
3.2 消費電力の内訳	3
3.3 サーバ消費電力と IP トラフィックの関係	4
4. サーバ	6
4.1 CPU	6
4.2 メモリ	7
4.3 ベース業務部分	7
4.4 AI 業務部分	8
4.5 サーバ総消費電力	10
5. ストレージ	10
6. ネットワークスイッチ	11
7. 補機	12
7.1 空調	12
7.2 UPS	12
8. データセンター総消費電力の現状と将来予測	12
9. 消費電力低減のための課題	13
10. まとめ	14
11. 政策立案のための提言	14
参考文献	15

1. はじめに

情報化社会の進展に伴って ICT 関連の消費電力が膨大になることを 2018 年度提案書 (Vol.1) [1] で報告した。これに引き続き、データセンター、ネットワーク、エンドユーザーの 3 つのセクターに分けてより詳細に検討を進める。これらのうち、データセンターとネットワークという情報化社会のインフラストラクチャを優先して検討することにした。本提案書 (Vol.2) はデータセンター、2020 年度提案書 (Vol.3) [2] で通信ネットワークについて報告する。エンドユーザーについては、その利用形態も多岐にわたり、省エネルギー効果も併せて検討すべきと考えられるので、後日検討することとした。

検討方法としては、現状については可能な限り主要機器の消費電力と情報処理量の関係を定量的に関連付けるようにした。将来の消費電力の増大を探るのが目的であるから、厳密な関係というよりは、大まかな関係性を捉えることとした。次に得られた関係を用いて、現状技術水準のままであるとすると将来の情報量の増大時に、どの程度の消費電力の増大が予測されるかを計算した。

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して近年極めて高いペースで拡大が続いている。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、SaaS、IaaS、セキュリティなどの利用拡大が見込まれ、そのニーズは高い水準を維持するものと考えられる。これら用途では膨大なデータを扱い、しかも画像認識や機械学習、AI などは膨大な計算量が必要と考えられることなどから、トラフィックデータ増加量以上の負荷増大の可能性がある。これらの問題意識から、データセンターの消費電力の低減のための検討は数多くなされていて、本提案書でも検討の参考とした個々のデータセンターに着目した詳細な報告 [3-5]、具体的なクラウドサービス事業者による消費電力低減の報告 [6, 7]、包括的なデータセンターの消費電力低減に関する報告 [8-11] などがある。



図 1 データセンター内部 [4]

これらの報告では、著しいデータ量の増加はあるものの、これまでは、技術の進歩による機器の効率化により、ほとんどエネルギー消費の増加はなく、この傾向は 2020 年ごろまで続くという報告が多い。ただ、効率化によるデータ量増加の影響の吸収はいつまでも続かないということも同時に述べられている。もっとも、2030、2050 年までを視野に入れた検討はされていない。

本提案書では長期的なデータセンターの消費電力の推測を試みた。そのためにデータセンターでの消費電力を、トラフィックデータ量の増大に関連して消費電力が増加すると仮定できる部分をベース業務部分とし、ディープラーニングなどトラフィック量と関連するか明確でない部分を AI 業務部分として別々に検討した。なお、自動運転や IoT などではエッジコンピューティングの導入も提唱され、データセンターの負荷が下がる方向の検討もなされていて、情報システムがダイナミックに変革されて行く途中であり、将来予測には困難があることも付け加えておく。

2. データセンターの構造

データセンターの主要 IT 機器は、サーバとストレージとネットワークスイッチである。これらに系統から電力を供給するための電源系（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も相当の電力を消費する。

サーバは CPU とメモリを主要構成要素とし、通常高さ 4.5 cm、幅 19 インチを 1U と呼ぶサイズに規格化されている。このサーバを 30 ～ 40 台収納するラックがある。そしてこのラックが数百から数千集合してデータセンターが形成される。

サーバの発熱量は膨大なため、ラックを空冷し、熱せられた空気をラック上部の熱交換器で水冷する。加熱された水はチラーで冷却されて循環する。ハイエンドの CPU や GPU は空冷では追いつかないために直接水冷される。また別途室内は空調される。

データセンターにかかる負荷は年々著しく増大している。この要求に効率的に応えるために、データセンターそれ自身があたかも一つのコンピュータのように設計され、内部の各サーバはネットワークファブリックと称されるネットワーク網で少なくとも複数の経路を通して相互に接続可能となっている [3, 4, 12, 13]。これは 1 か所の経路がトラブルを起こしても業務に影響しないというレジリエンスとセキュリティの向上とともに近年の仮想化マシン技術をサポートするものでもある。これにより物理的なサーバ数の 5 倍程度の仮想マシンを動かすことが可能となり、より少ない物理サーバで極めて効率的に運用されている。このために IP トラフィックの 70% がデータセンター内（ラック間）で発生している。ラック内サーバのトラフィックについてはデータはないが、ラック間の 2 倍程度との推定がある [4]。

ネットワークファブリックの構造を図 3 に示す。稠密かつ膨大なネットワーク網を形成するために多数のネットワークスイッチが必要になり、また仮想サーバを動かすためにはサーバ間の通信のレイテンシーも問題になり、高速ネットワークスイッチが必要になる。

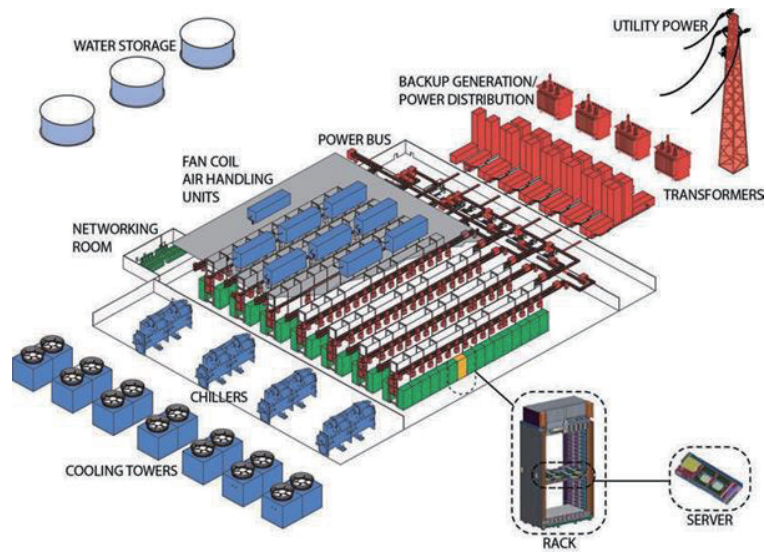


図 2 データセンター構成図 [4]

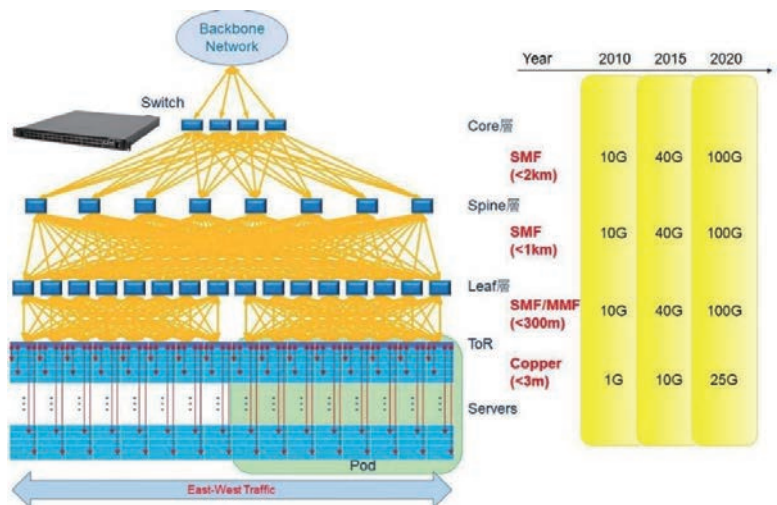


図 3 データセンターネットワークの構造 [13]

具体的には、各サーバユニットにはNIC（ネットワークインターフェースカード）があり、またラック内の全てのサーバはラック上部のTOR（Top Of Rack）と呼ばれるスイッチに銅線ケーブルで接続される。ラックが数台集合した設備をRowと呼び、Rowに対応してLeafスイッチが配置される。LeafスイッチはRow内のすべてのTORに接続し、この構造をPodと呼ぶ。さらにこの上位にSpineスイッチが置かれ、Spineスイッチは各PodのLeafスイッチに接続している。これでデータセンター内の各サーバは複数の経路で相互に接続していることになる。近年採用されているスパインリーフ構造の場合にはTORとリーフスイッチは兼ねられている。その上の場合によりコアスイッチまたは外部との通信用のルーターが設置されている [12, 13]。

このような構造を実現するために、データセンターには極めて多数の高速スイッチが設置されている。

3. 消費エネルギーの内訳と考え方

3.1 PUE

データセンターのエネルギー効率の指標としてはPUE（Power Usage Effectiveness）が一般に用いられている。これはデータセンター全体の消費電力とIT機器による消費電力の比で表される。

この分野の技術進歩は著しく、10年ほど前はPUEは2～3であったが、近年は省電力化が進み、中小規模データセンターで1.5～2程度、大規模なデータセンターでは1.2程度、最新のクラウド用のデータセンターでは1.1近辺という報告もある [3-8]。図4に2012年の、図5に2017年のGoogleのデータセンターの機器別消費電力の内訳例を示す [3, 4]。図4はPUE=1.38に、図5はPUE=1.16に相当し、エネルギー効率の改善が著しいことが分かる。図5のように極めてエネルギー効率の高い場合、CPUとDRAMで全体の消費電力の80%を占めている。

3.2 消費電力の内訳

データセンターの消費電力内訳の詳細データは入手困難であり、また本提案書は将来予測である点を考慮して、簡略化して考える。IT機器の消費電力（Wit）、冷却設備等の消費電力（Wa）、照明他の消費電力（Wb）、電力変換部の消費電力（Wt）とすると、データセンターの消費電力（Wd）は

$$Wd=Wit+Wa+Wb+Wt$$

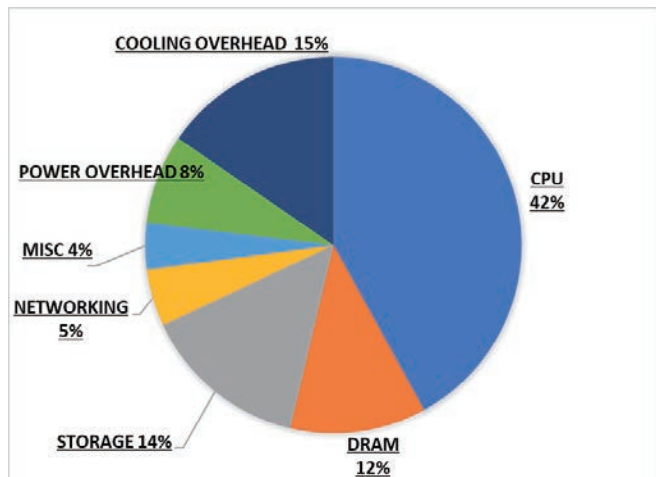


図4 データセンターの消費電力の機器別内訳（2012） [3]

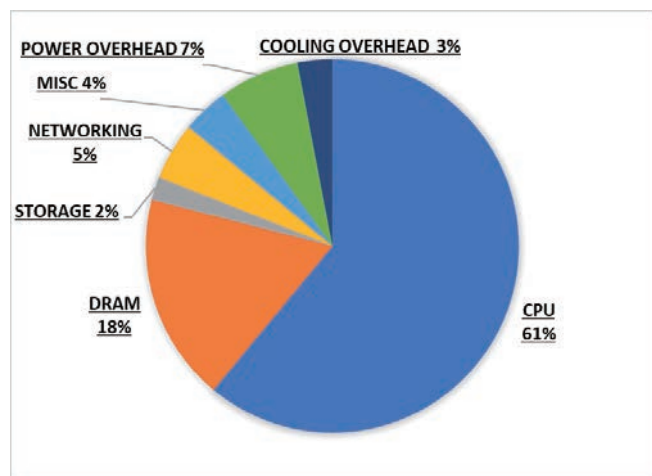


図5 データセンターの消費電力の機器別内訳（2017） [4]

ここで照明の消費電力はデータ量に直接関係なく、全体の2%程度という報告があるので、無視できるとする。また、電力変換効率 α として $W_t \doteq (1-\alpha)W_{it}$ とすると、

$$W_d = W_{it} + W_a + W_t = W_{it} + W_a + (1-\alpha)W_{it} = (2-\alpha)W_{it} + W_a$$

となる。

次に系外に放出されるエネルギー (Q_o) は、ほぼ冷却による除熱量と等しいと仮定する。このほかに換気、放射による放熱が考えられるが冷却熱に比べて無視しうると考える。

ラックは通常は空冷であり、加熱された空気は熱交換器で水冷し、その温水の除熱にクーリングタワーが使用される。冷却設備の主要機器は冷却水循環ポンプ、空冷チラー、冷水ファンである [4]。熱負荷に応じて冷却設備の消費電力は変わり、熱交換の効率を η として ηW_a とすると、

$$Q_o = \eta W_a$$

$$W_d = (2-\alpha)W_{it} + W_a = (2-\alpha)W_{it} + Q_o / \eta$$

結局 W_d を小さくするには IT 機器の消費電力を小さくし、冷却設備の冷却効率を高め、電力変換の効率を向上させることになる。

これらのうち冷却に必要な電力は最新設備では図5から3%程度であり、相当高効率と考えられるので、今後の改善余地は一定程度にとどまる。電力変換部についての効率 α は後述するが現状0.8程度であり、この20%のロスが図5から7%程度の電力消費に相当している。この部分の電力ロスを0にできれば最大7%程度の効果がある。また、寒冷地に立地すれば除熱上は有利と考えられる。もっとも、除熱量 Q_o の全てはIT機器の消費電力であるから、大幅な省電力のためにはIT機器消費電力の減少が必要である。

本章で具体的な消費電力の検討に入るが、これらは収集された現時点での知見に基づいたものである。またデータセンターのインフラは10～20年程度の耐用年数といわれているが、サーバの耐用年数は通常3～4年といわれているため、設備の更新はかなり早く、最新の技術が導入されるタイムラグは小さく、サーバの省電力化速度は速い。データセンターの規模に応じて集積されるサーバの数も大きく異なるが、近年、クラウドサービスや消費電力効率の観点から市場で支配的な大規模データセンターを主に考える [14]。

3.3 サーバ消費電力とIPトラフィックの関係

サーバのデータ処理量とサーバ消費電力の関係を検討するにあたり、サーバが処理する業務の内、Webサービス、検索、メールなど通常のIPトラフィックに比例して電力消費が増大すると期待される部分を「ベース業務」とし、ディープラーニングなどのように、与えられたデータに対して桁違いの(百万回以上)オーダーで演算が生じる部分を「AI業務」として検討する。CPU消費電力 W_c (W) は、原則としてそのCPUのメーカー公表TDP (Thermal Design Power) により、サーバに組み込まれている場合でサーバメーカーが独自に規定する場合はそれによった。またCPUの演算能力は浮動小数点演算速度 (flops: floating-point operations per second) で表される。IPトラフィック量とサーバ消費電力のベース業務部分の関係を求めるために、一定量のデータを処理する演算量を定数とみなせると仮定して、データ演算量定数 δ (flop/B) を導入した。すなわち、CPU処理データ量 N_d (GB) とCPU演算能力 C (Gflops) の間に、処理時間 t (sec) として単位時間あたりCPUデータ処理量は N_d/t だから、

$$C = \delta * (N_d/t)$$

の関係を仮定する。

そうすると Nd に対する Wc は、消費電力性能 Ep (Gflops/W) として、

$$Wc = C / Ep = \delta Nd / t / Ep$$

この δ というデータ演算量定数が定まると処理データ量と演算回数から CPU 消費電力が求められ、付随してサーバのメモリ、電源などの消費電力も求められる。

上記 δ を求めるための具体的なデータは乏しいが、Google は 2007 年で 20 PB/日 (=230 GB/s) のデータを処理していた [15]。当時の Google の平均的なサーバはインテルの 2 GHz ハイパースレッドの CPU と 4 GB のメモリ、160 GB の HDD で、サーバ数は 90 万台であったという [16]。当時のインテルの 2 GHz の CPU の演算能力は $C=12$ Gflops (Pentium E2180, 2 GHz 2thread, TDP=65 W [17]) 程度であったから、これを基準サーバとして、 $Nd=230$ GB, $t=1$ sec、900 千台の CPU とすると、データ演算量定数 $\delta=47,000$ (flop/B) 程度となる。

表 1 2007 年当時の Google のサーバ数と処理データ量

Year	Data Processed	No. of CPUs	Searches	δ , Data Processing constant	Data size per search	C, CPU Processing speed	CPU Power consumption	Ep, energy efficiency	Total CPU energy consumption
	GB/s	10^3	$10^9/D$	flop/B	MB/search	Gflops	W	Gflops/W	GWh/Y
2007	230	900	1	46,800	20	12	65	0.2	510

2007 年の Google でのサーチ数は図 6 のように約 3700 億件 / 年 (10 億件 / 日、[18]) であったので、1 検索当たりのデータ処理量は 20 MB / サーチとなる。サーバ 1 台 (CPU1 台とする) 当たり、1 日の検索処理は 1,100 件 / 日 / 台、処理データ量は 20 GB / 日 / 台となる。当時は機械学習もほとんど行われてなかったと考えられるので、これがサーバのベース業務の計算負荷と考える。当時の消費電力は CPU のみで 500 GWh / 年と推定される。

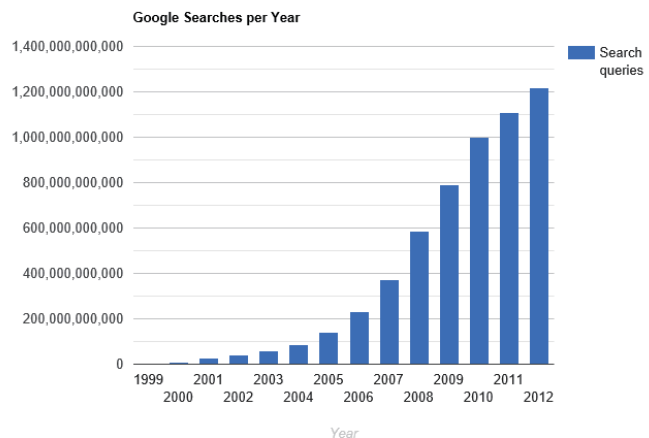


図 6 Google 年間サーチ数 [18]

これが 2018 年においてはクラウドサービスによる AI 業務が相当部分を占めていると推定される。Google では 2018 年当時、検索件数 54 億件 / 日、約 2 兆件 / 年 [19] であり、直近の 2016 年に 250 万台程度のサーバを持っていたと推定されている [20]。これから 1 検索当たりのデータ処理量が 20 MB / サーチのままであれば年間検索データ処理量は 40 EB / 年と推定される。ただし 2018 年当時の平均的なサーバとして量産品 CPU (300 Gflops) が使われているはずで、この性能を基準とすると、データ演算量定数 $\delta = 600,000$ (flop/B) と処理データ量に対しての計算要求量が 1 桁増加している。

一方で、先に求めたデータ演算定数 $\delta = 47,000$ のままとすると、年間処理データ量は 500EB / 年、一検索あたりのデータ処理量が 260 MB / サーチと 2007 年の 10 倍となる。検索処理に必要な計算量が 10 年間で一桁上がるとも考えにくいので、検索件数の伸びを上回る計算負荷の上昇はクラウドサービスによる AI や機械学習などの業務によるものと考えられる。消費電力は CPU のみで 3,300 GWh / 年と推定される [21-23]。

4. サーバ

サーバはデータセンターの大部分の電力を消費する。サーバの消費電力はCPU、メモリ、電源他（電源+NIC）の3要素について検討し、HDD、SSD等はストレージとして別にまとめて検討した。電源他の消費電力はCPU+メモリの消費電力の20%とした。

4.1 CPU

CPU や最近 AI で多用される GPU の消費エネルギーを考慮する。ちなみに最新のサーバ用プロセッサで CPU では例えばインテルの Xeon、GPU で例えば Nvidia TeslaV100 を例にとると、表 2 のようになる。比較のためにパソコン用の CPU である intel Core i9 も示した。

表 2 現行プロセッサの演算能力と消費電力例

processor		Clock	TDP	Processing speed	Energy efficiency	core
		GHz	W	Gflops	Gflops/W	
intel Core i9 10980x	CPU	3	150	459	2.8	18
intel Xeon Gold 6242	CPU	2.2	150	1000	6.7	16
Nvidia TeslaV100	GPU		278	15000	54	

CPU の性能は浮動小数点演算速度（flops: floating-point operations per second）で表され、それを消費電力で除した消費電力性能 E_p (Gflops/W) は処理量によらず一定とする。すなわち消費電力は演算回数に比例するとして、これらの数値をもとにデータ処理における CPU の消費電力を推定する。なお、CPU の演算速度は倍精度浮動小数点演算（64 bit）で、GPU は単精度浮動小数点演算（32 bit）であらわされることが多いので、CPU との演算能力の比較では GPU の値を 1/2 ~ 1/4 とすべきといわれている。

表 3 サーバの構成機器と消費電力例 ([24] を利用)

device	type	specification	power consumption(W)	without GPU		two GPUs	
				quantity	power consumption(W)	quantity	power consumption(W)
CPU	Xeon Gold 5220R	2.2GHz*24core	166	1	150	1	150
memory	RDIMM	8GB	4	0	0	0	0
	RDIMM	64GB	5	0	0	0	0
	RDIMM	128GB	6	12	72	24	144
storage	SAS-HDD	1.2TB	8	2	16	2	16
	SATA-HDD	2TB	6	0	0	0	0
	SSD	800GB	8	2	16	2	16
		3.2TB	8	0	0	0	0
LAN card	Dual port	10GBase-T	22	0	0	0	0
	Quad port	10GBase-T	32	1	32	1	32
	Dual port	40GBase	20	1	20	1	20
network adaptor		25GBASE	16	0	0	0	0
GPU	Nvidia	TeslaV100	278	0	0	2	556
Graphics card	NVidia	Quadro P5000	200	0	0	0	0
power supply					108		108
total					414		1042

4.2 メモリ

DRAM (RDIMM) の消費電力 (Wdram) は容量 8 GB/セットで 4.5 W、128 GB/セットで 5.6 W 程度であるので、容量にかかわらず 1 セット 5 W 程度のベースの消費電力とみなされる [24]。

このようにメモリの組み合わせで消費電力は変わるが、IP トラフィックデータ量により消費電力が変わるというよりは、むしろ間接的に CPU のデータ処理量増大に伴う利用 DRAM または不揮発メモリのモジュール数の増大に消費電力が依存すると考える。

メモリ容量は大きくて困ることはないが、高価であり、電力も消費するので、CPU に対して必要十分な容量が選定される。Google で 2007 年ごろに用いられたサーバでは 2 GHz (12 Gflops 程度) に 4 GB のメモリの組み合わせであった。これをベース業務用途におけるサーバの基準として、CPU の計算能力比例でメモリ容量を推定する。現在、平均的なサーバでは 300 Gflops 程度の CPU で、100 GB (16 GB メモリ 8 セット = 128 GB) 程度、1,000 Gflops では 333 GB (32 GB メモリ 12 セット = 384 GB) 程度となる。消費電力はサーバ 1 台当たり 40 W ~ 60 W となる。これを年間電力量に換算すると 350 ~ 530 kWh/台/年となる。

実際に Xeon スケーラブルプロセッサを使用する場合、DRAM 容量は 92 ~ 512 GB の例がある。電力当たり容量は 6 GB/W である。

さらにサーバには他のサーバとの接続のための LAN カードと、電源ユニットが付属する。これらの消費電力は概ねサーバ機器の 20% 程度とする。

4.3 ベース業務部分

(1) 世界 (表 4 参照)

2018 年の IP トラフィックは 10.8 ZB/年といわれている。世界のサーバ数は、2018 年度提案書 [1] で約 4500 万台と推定した。ここで、「当時 CPU」の平均計算能力を 300 Gflops、消費電力を 150W と仮定すると、IP トラフィックに対するデータ演算量定数 δ は 39,500 (flop/B) となる。この値は前章で計算した 2007 年の Google における $\delta = 47,000$ (flop/B) とも比較的良好一致している。

ここから表 4 のように CPU は 60 TWh/年の消費電力となり、サーバ消費電力としては約 90 TWh/年と見積もられる。これは 2018 提案書 [1] の 111TWh より少ないが、この理由は 2018 提案書 [1] ではサーバ消費電力を 2012 年ごろのサーバの 2,450 kWh/年/台と見積もったのに対して、今回は 2018 年ごろの平均的なサーバを考えた (2,000 kWh/年/台) ためであるが、概ね推算値としては整合していると考えられる。また後述するようにこのサーバ数に AI サーバが上乘せされるとほぼ 2018 提案書 [1] と同じ 112 TWh 程度となる。

さらに技術進歩を織り込んで、最新の CPU (表 2 intel Xeon Gold 6242 (計算能力: 1,000 Gflops、消費電力 150 W)) をボリュームクラスのサーバ用「標準 CPU」とした場合を現状標準技術として固定し、現在および将来の消費電力を計算する。この場合現在でも必要サーバは 1,400 万台と大幅に減少し、消費電力も 30 TWh/年となる。結果を表 4 に (2018) として示してある。これは 2030、2050 年と同じ CPU を使用した場合の結果で、参考のために示した。

2030 年: 推定 IP トラフィック 170 ZB 時には「標準 CPU」で約 2 億台が必要となり、その CPU 消費電力は 280 TWh/年、サーバ消費電力は 450 TWh/年と推定される。

2050 年: 推定 IP トラフィック 20,200 ZB/年では「標準 CPU」使用時に 253 億台が必要となり、CPU 消費電力は 33,000 TWh/年、サーバ消費電力は 53,000 TWh/年と推定される。

(2) 国内 (表4参照)

2018年のサーバ稼働台数は300万台見積もられる[1, 25]。この時に採用されるCPUは前出「当時CPU」とする。CPU消費電力は4TWh/年、サーバ消費電力は6TWh/年となる。「標準CPU」採用時には90万台で済むために、消費電力は1.2TWh/年まで減少すると推定される。以下、結果を表4に示してある。また、世界と同様に「標準CPU」を利用した場合を(2018)として比較のために示した。以下、2030、2050も「標準CPU」を使用するとして計算した。

2030年：国内トラフィック、サーバ数ともに世界に比例して増加するとしてCPU消費電力は19TWh/年、サーバ消費電力は30TWh/年と推定される。

2050年：同様にCPU消費電力は2,200TWh/年、サーバ消費電力は3,500TWh/年と推定される。

表4 ベース業務部分のサーバ消費電力

Year		domestic				global			
		2018	(2018)	2030	2050	2018	(2018)	2030	2050
IP traffic	EB/Y	720	720	11,000	1,400,000	10,800	10,800	170,000	20,200,000
CPU processing speed	Gflops	300	1,000	1,000	1,000	300	1,000	1,000	1,000
No. of CPUs	10^6	3	1	14	1,700	45	14	213	25,300
power consumption of CPUs	TWh/Y	3.9	1	20	2,200	60	20	280	33,000
power consumption of memories	TWh/Y	1.1	0.5	7	890	16	7	112	13,300
power consumption of storages	TWh/Y	0.2	0.1	1	119	3	1	15	1,800
power consumption of servers	TWh/Y	6	2	30	3,500	87	30	450	53,000

4.4 AI業務部分

ディープラーニングでは、誤差を伴いながら結果を収束させるため、例えば誤差を11%から5%にする時に計算回数は 10^{14} GFLOPs ~ 10^{19} GFLOPsになるという報告がある[26]。そのために計算負荷は与えられる学習用データセットの大きさ、種類、求める結果の精度、推論の方法によって極端に変わることになる。このように、この分野はまだ発展の初期段階で手段の進歩が著しく、需要も拡大しているため、現段階において将来的にどの程度の計算量が生じるのか見極めるのは困難である。そこで本提案書ではディープラーニング用途の現在のサーバ数と直近の伸び率を外挿して将来予測をすることにした。

計算量については、他にもResNetでは98MBの入力に対して8Gcycleのoperation[4]、440MBのパラメータに対して21GFLOPs[27]、1GBに対して86TFLOPs(プリファードネットワークス)など様々である。

表5 AIサーバの構成 (モデル)

		quantity	power consumption (W)	total power consumption (W)	processing speed (Gflops)	energy efficiency (Gflops/W)
CPU	intel Xeon Gold 5220R	1	150	150	1690	11.3
GPU	Nvidia TeslaV100	3	278	834	15000	18
memory	RDIMM 128GB	24	6	144		
HDD	SATA 2TB	1	8	8		
SSD	3.2TB	1	8	8		
LAN Card		1	22	22		
power supply		1	100	100		
server				1266		

ここでこの分野で慣用的に用いられる FLOPs は CPU の演算能力の flops (floating-point operations per second) と異なり、計算回数 (floating-point operations) を表していることに注意が必要である。

AI サーバを 2U サイズ、1CPU (Xeon Gold 5220R)、3GPU (Tesla V100)、128 GB-DIMM*24 枚、32 TB SSD1 枚、LAN カードの構成とすると約 1,300 W の消費電力となる。これで行える計算能力は 45 Tflops となる。2U であるから 1 ラックに最大 20 台のサーバが収納できるとする。

(1) 世界

世界の AI サーバ数は不明であるが、Tractica によると、右図のように、ディープラーニングチップセットの出荷が 2016 年に 863,000 台であり、2025 年に 4120 万台の出荷が見込まれている [28]。その間の伸び率は年率 42.2% である。このセットが AI サーバ数に等しいとして AI サーバ数を見積もった。

将来の設置台数の伸び率は、下記日本のデータを参考にして年率 30% として 2030 年、2050 年を推計した。結果を表 6 に示すが 2018 年に 23 TWh、2030 年に 1,740 TWh、2050 年に 331,000 TWh と推計された。

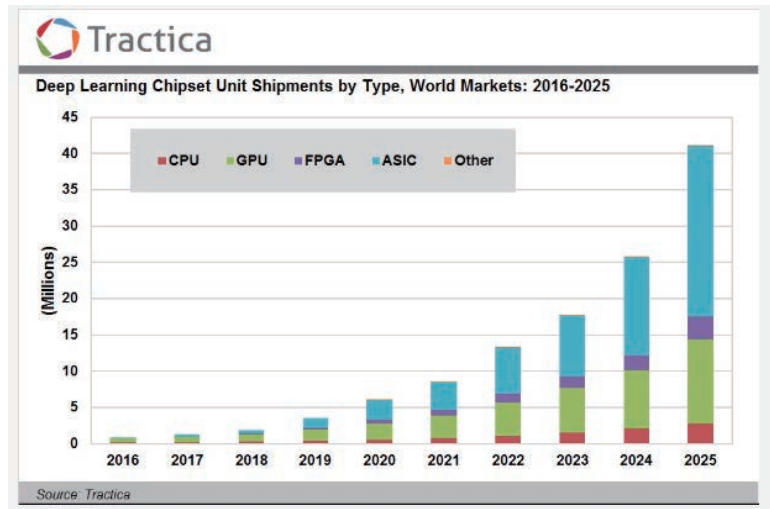


図7 ディープラーニングチップセットの出荷台数 (世界) [28]

(2) 国内

国内 AI ラック数は 10,188 (2020) から 36,136 (2024) へと見込まれている [29]。この伸びは年率約 30% に相当する。これから逆算すると 2018 年には約 6,000 ラックであったと推定される。1 ラックに 10 台の 2U サーバとして、6,000 ラックで約 60,000 台のサーバとなり、対応可能計算負荷は 2,700 PFLOPs となる。AI の需要の伸びは不明だが、年率 30% を採用すると表 6 のように 2030 年に 63 EFLOPs、2050 年に 12,000 EFLOPs となる。これに対応する消費電力は 2018 年に 0.7 TWh、2030 年に 16 TWh、2050 年に 3,000 TWh と計算される。

表 6 AI 業務サーバの消費電力

		domestic			global		
		2018	2030	2050	2018	2030	2050
work load	EFLOPs	2.7	63	12,000	90	7,000	1,300,000
AI racks	10^3	6	141	26,700	200	15,300	2,910,000
AI servers	10^3	60	1,405	267,000	2,000	153,000	29,100,000
power consumption: of servers	TWh	0.7	16	3,000	23	1,740	331,000
of CPUs	TWh	0.5	12	2,300	17	1,320	251,000
of memories	TWh	0.1	1.8	340	3	190	37,000
of others	TWh	0.1	2.1	400	3	230	44,000

Nvidia の GPU は 15,000 Gflops / 台の演算能力なので、3 台では 45 Tflops、消費電力は 900 W となる。最新の GPU で 312 Tflops という記事もある (Nvidia A100 tensor core GPU)。

4.5 サーバ総消費電力

以上をまとめると、表 7 のような消費電力が予測される。国内は 7 TWh (2018) となり、これは 2018 年度提案書報告値の 7.4 TWh[1] と近く、本提案書での個別機器消費電力の積み上げ計算方法が妥当なものと考えられる。将来的には 46 TWh (2030)、6,500 TWh (2050) へと増大が予想される。世界では、113 TWh (2018) と推定され、さらに 2,190 TWh (2030)、384,000 TWh (2050) と推定された。

全体に AI 業務の伸びが著しく、将来的に消費電力においてベース業務を超えることが予想される。

表 7 サーバ総消費電力

		domestic			global		
		2018	2030	2050	2018	2030	2050
Basic task	TWh	6	30	3,500	90	450	53,000
AI task	TWh	0.7	16	3,000	23	1,740	331,000
total	TWh	7	46	6,500	113	2,190	384,000

5. ストレージ

大容量データを長期間保管するためにストレージ (サーバ) というものが存在し、速度は遅いものの大量のデータを低コストで保管する。データ処理用の CPU とメモリ、SSD、HDD または磁気テープなどで構成される。SSD はフラッシュメモリが用いられ、HDD よりも高速であり、高価である。HDD は大容量で最も多く用いられている。なお磁気テープは大容量であっても消費電力は極めて小さいとされるので、本提案書では検討対象外とする。CPU、メモリも高速データ処理を行うわけではないので対象外とする。HDD の容量としては、データセンター外から入るデータのうち、短～中期にわたり保存すべきデータサイズで決まる。

ここでは簡単のためにストレージ容量を情報処理量に比例すると仮定するが、今後の情報量の増大に比例してストレージ容量が増えなければならぬかは検討の余地がある。

メモリと同様に、容量と消費電力は単純な比例関係にはなく、むしろユニット数で消費電力が決まる傾向にある。2018 年度提案書 [1] では HDD は容量によらず 1 ユニット 10 W 程度としたが、近年のストレージの容量は大きく、1 基で 4 ~ 10 TB にまで拡大していて、1 ユニットは 8 W 程度である。これを基準に年間消費電力は 70 kWh/ 台とする。SSD については前回と同じく 26 kWh/ 台とする。

(1) 世界

HDD のデータセンター向け出荷台数は約 7 千万台 / 年程度で、ここ数年大きな変化はない [30, 31]。そこで、稼働中の HDD 台数は 5 年の使用期間として、2018 年度提案書 [1] よりやや少ない 3 億 5 千万台と推定した。この結果、消費電力は 25 TWh / 年となった。

また、データセンター向けの SSD の出荷台数は急伸している。直近 5 年間の累積値は約 6 千万台と推定されるので [30, 31]、これを稼働台数とする。消費電力は約 2 TWh / 年となった。

合計でデータセンターのストレージの消費電力は 27 TWh / 年となった。2030、2050 についての台数はトラフィック量に比例するとして計算した。現状の機器能力で固定して将来の消費電力を推定すると下表 8 のようになる。なお、AI 用途とストレージ容量需要の関係は現在明確でないため、この影響については考慮していない。

(2) 日本

データセンター向け HDD は国内市場の 20% 程度 [25] であり、640 万台 / 年として 5 年の使用期間として 3200 万台を稼働台数とした。これは結果として 2018 年度提案書 [1] と同じ稼働台数である。これから 2 TWh / 年 (2018) となり、世界と同様の計算方法で 37 TWh / 年 (2030)、4,800 TWh / 年 (2050) となった。また SSD の台数は世界の SSD と HDD の比率を適用して 2018 年に 600 万台、消費電力は 26 kWh / 年 / 台とした。

表 8 ストレージ消費電力

		domestic			global		
		2018	2030	2050	2018	2030	2050
IP traffic	ZB	0.7	11	1,400	11	170	20,200
No. of HDDs	million	32	503	64,000	350	5,500	654,000
power consumption	kWh/Y/set	70.0	70	70	70	70	70
	TWh/Y	2.2	35	4,500	25	390	46,000
No. of SSDs	million	6.0	94	12,000	60.0	900	107,000
power consumption	kWh/Y/set	26	26	26	26	26	26
	TWh/Y	0.2	2	310	1.6	23	2,800
total power consumption	TWh	2	37	4,800	27	413	48,800

6. ネットワークスイッチ

データセンターの構造の項で述べたように、稠密かつ膨大なネットワーク網を形成するために多数のネットワークスイッチが必要になり、また仮想サーバを動かすためにはサーバ間の通信のレイテンシーも問題になり、高速ネットワークスイッチが必要になる。

ここではリーフスイッチに 48 個の 10 G SFP+ポートで 48 個のサーバに接続し、6 個の 40 G QSFP+ポートでスパインスイッチに接続するとする (例えば S5850-48S6QP FS.COM 社)。またスパインスイッチは 20 個の 40 G QSFP+ポートでリーフスイッチ 20 台に接続し、4 個の 100 G QSFP でコアスイッチまたはルーターを介して外部と接続する (例えば S8050-20Q4C FS.COM 社)。この場合、リーフスイッチ 20 台で 960 台のサーバに接続し、例えば 4 台のスパインスイッチでそれぞれ 20 台のリーフスイッチに接続するネットワークファブリックが形成される。

この時の消費電力は、リーフスイッチが 150 W、スパインスイッチが 160 W であるから、960 台のサーバを接続するスイッチは約 3.64 kW の消費電力となる。

これを単位としてスイッチの個数は国内、世界ともにサーバ数に比例するとしてネットワークスイッチの消費電力を年間で計算すると表 9 のようになる [32]。

表9 ネットワークスイッチ消費電力

		domestic			global		
		2018	2030	2050	2018	2030	2050
No. of Basic servers	10 ⁶	3	14	1,700	45	210	25,000
No. of AI servers	10 ⁶	0	2	350	5	390	74,000
total No. of servers	10 ⁶	3	16	2,050	50	600	99,000
power consumption of switches for a set of 10 ³ servers	MWh/Y	33	33	33	33	33	33
total power consumption	TWh/Y	0.1	1	70	2	20	3,400

7. 補機

補機としては代表的なものは空調、UPS、電源などであるが、これは付随的な設備であるので、PUE の中にすべて含める。ここでデータセンターの電源系、冷却系、配線損失等について、2018 年に関して日本は PUE=1.58 を仮定して IT 機器の 58%、世界はハイパースケールデータセンターの高比率を加味して PUE=1.3 として計算した。2030、2050 については両者ともに PUE=1.15 を仮定した。ここは 2018 年度提案書 [1] で仮定した一律 PUE=1.5 と異なる。

7.1 空調

発生する熱は CPU、メモリ、ストレージ、スイッチの消費電力のほぼ全量である。特に CPU の動作環境を一定に保つために除熱用の空調が設置されている。通常はラック内を空冷し、その空気を熱交換器で冷却水によって冷却し、その冷却水を空冷チラーで冷却して循環するシステムである。この消費電力はトラフィック量に直接関係しないので、ここでは検討対象外とする。

7.2 UPS

予備電力としての発電機が起動して給電を開始するまでの間を UPS で電力供給する。UPS は通常蓄電池であり、直流給電方式をとれば電力ロスはほとんどないといわれていること、および IP トラフィック量とは直接関係しないので検討対象外とする。

8. データセンター総消費電力の現状と将来予測

以上をまとめると表 10 のように、2018 年にデータセンター消費電力は国内 14 TWh、世界が 190 TWh と推定された。この数値は 2018 年度提案書 [1] の推定値の 16 TWh (国内)、238 TWh (世界) よりも低くなった。これは今回 PUE の値を変更したためで、前回通り PUE=1.5 とすると国内は 14 TWh、世界は 206 TWh となり、前回推定値と近くなる。なお、世界のデータセンターの消費電力については 200 TWh[33] という記載があることから妥当な数値と思われる。

さらに、消費電力は 2030 年に 90 TWh (国内)、3,000 TWh (世界)、2050 年に 12,000 TWh (国内)、500,000 TWh (世界) と推定された。なお、データセンターが 2030 年に 3,000 TWh の電力を消費するというレポートもある [34]。

ここでデータセンターの電源系、冷却系、配線損失等について、2018年に関しては日本はPUE=1.58を仮定、世界はハイパースケールデータセンターの高比率を加味してPUE=1.3として計算したため、若干2018年度提案書[1]の数値と異なっている。2030、2050については両者ともにPUE=1.15を仮定した。

現時点でデータセンター消費電力の50%をサーバが、25～30%を電源と冷却系が、次いでストレージが10%程度を占める。さらにサーバの消費電力の70%程度をCPUが占めることから、機器としてはCPU、ストレージ、メモリと電源（インバータ、コンバータ）の省エネルギーが重要である。今後トラフィックの増加あるいはAI業務の増加により、ますますこれら機器の省電力が重要と見込まれる。

AI業務部分については、現状で世界、日本ともにサーバ消費電力の20%程度を占める結果となっている。AIやディープラーニングの範囲は不明確であり、また収束の誤差を小さくするためには莫大な計算量が必要とされており、この技術の将来予測は困難であるが、30%の年平均成長率を仮定すると世界では2030年にはデータセンターの大部分の電力はAIに使われるという予測となった。今後の消費電力の抑制にはCPU、GPU等のプロセッサの省エネルギー化が最重要と考えられる。

表 10 データセンター消費電力の現状と将来

		domestic			global		
		2018	2030	2050	2018	2030	2050
IP traffic	ZB	0.7	11	1,400	11	170	20,200
power consumptions of data centers	TWh	14	90	12,000	190	3,000	504,000
power consumptions of server	basic task	TWh	6	30	3,500	90	450
	AI task	TWh	0.7	16	3,000	23	1,740
	total	TWh	7	46	6,500	113	2,190
CPUs	basic task	TWh	4	20	2,200	60	280
	AI task	TWh	0.5	12	2,300	17	1,320
	total	TWh	4	32	4,500	77	1,600
memories	basic task	TWh	1	7	890	16	110
	AI task	TWh	0.1	2	340	3	190
	total	TWh	1	9	1,230	19	300
power supply etc	basic task	TWh	1	3	410	14	60
	AI task	TWh	0.1	2	400	3	230
	total	TWh	1	5	810	17	290
power consumptions of storages	TWh	2	29	3,700	27	430	
power consumptions of switches	TWh	0.1	1	70	2	20	
power supply, cooling, etc	TWh	5	11	1,500	43	400	

9. 消費電力低減のための課題

今後の計算負荷の増大を考慮すると、データセンターの消費電力の低減は極めて重要な課題である。

現状技術でも対応可能な短期的対策としては、PUEの低下につながるサーバやラックの冷却方法の改善による冷却用電力の低減や、電力変換ロスを下げるための高電圧直流給電システムや高効率インバータの採用などがあげられる[35]。中長期的にはCPU、GPU等のプロセッサの省電力化が最重要課題と考えられる。特に今後爆発的な増大が予想されるAI用途における省電力化のためのGPU、ASIC、TPUなどのプロセッサにおけるチップ構造や論理演算処理、推論エンジンなどの開発が重要と考えられる。また、メモリ、ストレージの省電力化も重要な課題で、DRAMとして使える不揮発メモリとしてフラッシュメモリや磁気メモリなど様々な提案がなされている。

今回の検討結果によると、消費電力性能（Gflops/W）として2030年に現在の3～10倍程度、2050年には1,000倍程度が目標となる。またメモリ、電源、ストレージも2030年に1/10、2050年に1/1,000程度の消費電力低減が目標となる。

上記課題の具体的対策については対象技術が基礎研究段階のものが多く評価が難しいこと、内容が高度に技術的なことから、今回の報告では詳細な検討に至らなかった。今後検討を進めたい。

10. まとめ

データセンターの消費電力は、現時点（2018）で国内が 14 TWh、世界で 190 TWh と推定された（表 10）。さらに、現在の計算負荷の増大傾向が将来にわたって継続し、現在入手可能な最新機器を用いたと仮定したときの（将来の技術進歩は織り込まない）消費電力は、国内が 2030 年に 90 TWh（2030）、12,000 TWh（2050）、世界が 3,000 TWh（2030）、500,000 TWh（2050）と推定された。

現時点でデータセンター消費電力の 50%をサーバが、25～30%を電源と冷却系が、次いでストレージが 10%程度を占める。特にサーバは将来的にデータセンター消費電力の 60～80%を占めると推定され、この消費電力の低減が最も重要と考えられる。

データセンターの PUE は一部では 1.1 という低い値もあるが、全体としてはまだ改善の余地も大きく、冷却や電源システムでも改善の可能性がある。将来的には IT 機器自身の省電力が進展しないと消費電力の大幅な低下は期待できない。機器としては CPU、ストレージ、メモリと電源（インバータ、コンバータ）の省エネルギーが重要であるが（表 10）、特に今後は AI 業務用の増加による計算量の著しい増大が予想されるので、CPU、GPU の省電力化が重要である。

なお、ディープラーニングでは学習データセット、目標精度の設定、用いるパラメータ数、推論方法などが計算負荷に著しい影響を与えることがわかっている。今後実用化の進展、応用分野の拡大とともにシステムや推論方法などのハードウェア以外の検討も重要になると考えられる。

11. 政策立案のための提言

データセンターは IaaS、SaaS、MaaS などの新たなクラウドサービスの進展に伴い今後も膨大な計算負荷が発生すると考えられる。また全世界的な COVID-19 の蔓延にともなう仕事や学習形態のリモート化はそれに拍車をかけるものと思われる。さらに医療画像診断やセキュリティの顔認識なども膨大な計算量の発生が予測される。

これらの状況を考えると従来以上にデータセンターにおける計算負荷が上昇しそうである。一方で、供給電力には限りがある。また、現在世界中で急速に低炭素エネルギーに向けてエネルギーポートフォリオの見直しが進められていて、供給電力の大幅な増大は期待しがたい。

低炭素社会へ歩を進めつつ、社会に必要とされているサービスを提供するためにはデータセンターの省エネルギー化を進める必要がある。本提案書では 2030、2050 年も見据えて現状技術で固定された場合の電力需要を計算した。

その結果、電力需要低減にもっとも効果が大きい機器としては CPU、GPU であり、2030 年に現在の 3～10 倍程度の消費電力性能（Gflops/W）が、2050 年には 1,000 倍程度の消費電力性能の達成を目標とすべきという結論になった。またメモリ、電源、ストレージも 2030 年に 1/10、2050 年に 1/1,000 程度への消費電力低減が目標となる。

上記目標を達成するための研究の支援が重要と考える。

参考文献

- [1] 低炭素社会実現に向けた政策立案のための提案書, “情報化社会の進展がエネルギー消費に与える影響 (Vol.1) —IT 機器の消費電力の現状と将来予測—”, 科学技術振興機構低炭素社会戦略センター, 2019年3月.
- [2] 低炭素社会実現に向けた政策立案のための提案書, “情報化社会の進展がエネルギー消費に与える影響 (Vol.3) —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—”, 科学技術振興機構低炭素社会戦略センター, 2021年2月.
- [3] L. A. Barroso, et al., "The Datacenter as a Computer: Designing Warehouse-Scale Machines, 2nd ed.", Morgan & Claypool Publishers (2013).
- [4] L. A. Barroso, et al., "The Datacenter as a Computer: Designing Warehouse-Scale Machines, 3rd ed.", Morgan & Claypool Publishers (2018).
- [5] P. Sharma, et al., “Design and Operational Analysis of a Green Data Center”, IEEE Internet Computing, July/August 16-24 (2017).
- [6] S. Kanev, et al., “Profiling a warehouse-scale computer”, ISCA '15 158-169 (2015).
- [7] Google, “Data Centers Efficiency”, <https://www.google.com/about/datacenters/efficiency/>, (アクセス日 2020年9月30日).
- [8] E. Ayanoglu, “Energy Efficiency in Data Centers”, IEEE ComSoc Tec. Committees Newsletter, Nov. (2019).
- [9] A. Shehabi, et al., “Data center growth in the United States: decoupling the demand for services from electricity use”, Environ. Res. Lett. 13, 1-11, 24030 (2018).
- [10] A. Shehabi, et al., “United States Data Center Energy Usage Report”, LBNL-1005775 (2016).
- [11] E. Masanet, et al., “Recalibrating global data center energy-use estimates”, Science vol.367 [6481], 984-86 (2020).
- [12] T. P. Morgan, et al., “Inside a Decade of Google Homegrown Datacenter Networks”, The Next Platform June 19, 2015 (2015).
- [13] 高井 厚志, “データセンターを支える光伝送技術—ハイパースケールデータセンター編”, EE Times Japan (2018). https://eetimes.jp/ee/articles/1809/20/news011_2.html#1_mm3017_1809201optical2.jpg&_ga=2.69970384.1564204948.1600387258-101647056.1575274243, (アクセス日 2020年9月30日).
- [14] Data dock, <https://www.datadock.co.jp/service/housing/>, (アクセス日 2020年9月30日).
- [15] N. Kennedy, “Google processes over 20 petabytes of data per day” (2008). <https://www.niallkennedy.com/blog/2008/01/google-mapreduce-stats.html>, (アクセス日 2020年9月30日).
- [16] R. Miller, “Report: Google Uses About 900,000 Servers”, Data Center Knowledge (2011) <https://www.datacenterknowledge.com/archives/2011/08/01/report-google-uses-about-900000-servers>, (アクセス日 2020年9月30日).
- [17] 青山 貞一, “パソコン CPU の浮動小数点演算速度” (2013), <http://eritokyo.jp/independent/aoyama-col8025.html>, (アクセス日 2020年9月30日).
- [18] Internet live stats, Google Search Statistics <https://www.internetlivestats.com/google-search-statistics/>, (アクセス日 2020年9月30日).
- [19] Kenshoo, “Marketing Metrics: Daily Searches on Google and Useful Search Metrics for Marketers” (2019), <https://kenshoo.com/monday-morning-metrics-daily-searches-on-google-and-other-google-facts/>, (アクセス日 2020年9月30日).
- [20] Wikipedia, “Google data centers”, https://en.wikipedia.org/wiki/Google_data_centers, (アクセス日 2020

- 年9月30日).
- [21] SiSoftware, “Intel Core i9 10980x (Cascade Lake) Review & Benchmarks” (2019)
<https://www.sisoftware.co.uk/2019/11/20/intel-core-i9-10980x-cascade-lake-review-benchmarks-cpu-18-core-36-thread-avx512-performance/>, (アクセス日 2020年9月30日).
 - [22] Intel, “インテル Xeon Gold 6126 プロセッサ”
<https://www.intel.co.jp/content/www/jp/ja/products/processors/xeon/scalable/gold-processors/gold-6126.html>, (アクセス日 2020年9月30日).
 - [23] Nvidia, Cloud & Data Center, “NVIDIA V100”
<https://www.nvidia.com/ja-jp/data-center/v100/>, (アクセス日 2020年9月30日).
 - [24] Fujitsu, “Primergy RX2520 M5 (2.5 インチ) 消費電力 / 質量計算ツール” (2020)
<https://jp.fujitsu.com/platform/server/primergy/technical/calculate/rx2520m5-25/>, (アクセス日 2020年9月30日).
 - [25] 富士キメラ総研, “データセンタービジネス市場調査総覧 2019年版”, (2019).
 - [26] Neil C. Thompson, “The Computational Limits of Deep Learning”, MIT INITIATIVE ON THE DIGITAL ECONOMY RESEARCH BRIEF 2020 Vol. 4 (2020).
<http://ide.mit.edu/sites/default/files/publications/RBN.Thompson.pdf>, (アクセス日 2020年9月30日).
 - [27] Programmer Sought, “The number of parameters and FLOPS calculation in deep learning (taking the classic AlexNet network structure in CNN as an example”
<https://www.programmersought.com/article/1732544989/>, (アクセス日 2020年9月30日).
 - [28] Tractica, “Deep Learning Chipset Unit Shipments by Type, World Markets: 2016-2025”, (2017)
<https://tractica.omdia.com/newsroom/press-releases/deep-learning-chipset-shipments-to-reach-41-2-million-units-annually-by-2025/>, (アクセス日 2020年9月11日).
 - [29] IDC Japan, 2020年10月「2020年国内DX指向型データセンターファシリティ動向：エッジコンピューティングおよびAIシステム」(J45699720).
 - [30] ELINFOR, “With the rapid growth of large-capacity SSD in storage market, will it replace HDD?” (2019)
<https://www.elinfor.com/knowledge/with-the-rapid-growth-of-large-capacity-ssd-in-storage-market-will-it-replace-hdd-p-11265>, (アクセス日 2020年9月30日).
 - [31] TechTarget ジャパンプレミアム, “「HDDはSSDに負けた」が間違いであるこれだけの根拠”, (2019).
 - [32] FS コミュニティ, “リーフスパインアーキテクチャの定義及び設計方法について”, FS.COM (2017) <https://community.fs.com/jp/blog/leaf-spine-with-fs-com-switches.html>, (アクセス日 2020年9月30日).
 - [33] N. Jones, “The information factories”, Nature vol. 561 163-66 (2018).
 - [34] A. S. G. Andrae, “On Global Electricity Usage of Communication Technology: Trends to 2030”, Challenges 2015, 6, 117-157 (2015).
 - [35] ICT分野におけるエコロジーガイドライン協議会, “データセンターの省電力化施策による消費電力削減効果” (2015).

低炭素社会の実現に向けた
技術および経済・社会の定量的シナリオに基づく
イノベーション政策立案のための提案書

情報化社会の進展がエネルギー消費に与える
影響 (Vol.2)

—データセンター消費エネルギーの現状と将来予測および技術的課題—

令和3年2月

Impact of Progress of Information Society on Energy Consumption (Vol. 2):
Current Status and Future Forecast of Data Center Energy Consumption and Technical Issues

Proposal Paper for Policy Making and Governmental Action
toward Low Carbon Societies,
Center for Low Carbon Society Strategy,
Japan Science and Technology Agency,
2021.2

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

本提案書に関するお問い合わせ先

- 提案内容について・・・低炭素社会戦略センター 上席研究員 三枝 邦夫 (SAEGUSA Kunio)
- 低炭素社会戦略センターの取り組みについて・・・低炭素社会戦略センター 企画運営室

〒102-8666 東京都千代田区四番町5-3 サイエンスプラザ4階
TEL : 03-6272-9270 FAX : 03-6272-9273 E-mail : lcs@jst.go.jp
<https://www.jst.go.jp/lcs/>

© 2021 JST/LCS

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。