

解説

コロナ禍が加速させる カーボンニュートラルby&ofデータセンター

東京大学 江崎 浩

● はじめに ：データセンターとは

Wikipediaによると、データセンターとは、「各種のコンピュータ（メインフレーム、ミニコンピュータ、サーバー等）やデータ通信などの装置と設置・運用することに特化した施設の総称。データセンターの中でも、特にインターネット用のサーバーや通信設備・IP電話等の設置に特化したものはインターネットデータセンター（iDC）と呼ばれる」と定義されている。この定義によれば、各組織に存在する昔の「計算機室」や「サーバー室」もデータセンターのインスタンスととらえることができる。データセンターでは、多様なIT/ICT機器（=モノ）が稼働し、プログラムという「指示書」に従ってコンピューティングを行いながら目的の「コト」が実現される。「コト」の実現には、大量の電力エネルギーが消費され、多量の熱が発生する。「熱」は、IT/ICT機器の誤動作を発生させるとともに、場合によっては動作を停止させてしまうので、データセンターでは、IT/ICT機器が発生させる熱エネルギーの外部への排出を実現させなければならない。人間が、食物と酸素を摂取し、取り出されたエネルギーを用いて、脳や筋肉を稼働させ「コト」を実現し、排泄物や二酸化炭素あるいは熱などを排出するのと同じである。人間が骨や臓器などから構成されているように、データセンターもさまざまな構成要素から構成されている。

● 最近10年の データセンター産業

データセンターの歴史は、コンピュータ・ネットワークの歴史と同期しており、その構造の進化・成長とともに、さまざまな変化を経験してきた。しかし、変化してない要求条件は、安定稼働（=BCP：Business Continuation Plan）と効率性である。すなわち、自然災害や人的災害・障害への対応能力を持ち、これを、より低コストで実現しなければならない。

まず、最近10年のデータセンターの経験と知見の獲得を整理してみよう。

(1) 2011年3月11日：東日本大震災

日本のデータセンターは、大きな地震と広域停電、それに続く計画停電にもかかわらず、そのサービス提供を継続することができた。これは、世界最高品質のJapan Qualityの実装と運用を日本のデータセンターが実現していたことを世界に示すこととなった。さらに、省エネへの取り組みが加速された。

(2) コロケーションからクラウドへ

各ユーザーが所有するハードウェアをデータセンター内に設置するコロケーションという運用形態は、近年急速に、仮想化技術を用いたクラウドコンピューティングの運用形態へと進化している。データセンターを用いたIT/ICT機器の運用は、当初から、シェアリングエコノミーによるコスト削減を実現するものであった。コロケーションでは、各ユーザーが持ち込む機器は

シェアリングの対象ではなかったが、機器を収容する施設（や空調・電源・外部接続機器）をシェアリングする形態であった。このような運用形態が、クラウド技術の導入によって、データセンター内に存在するIT/ICT機器すべてがユーザー間でのシェアリング対象となり、劇的な資源利用の効率化が実現されることになったのである。

(3) バックエンド技術の民主化

コンピュータ・ネットワークは、垂直統合型の排他的集中型システムの構築による顧客の物理的なロックオンのビジネス構造が、自律分散協調型システムへと進化した。これは、技術のオープン化と標準化によって、非透明で排他性を持っていたバックエンドシステムで利用されていた先端技術が、一般化・民主化することで、フロントエンドシステムでも自由に利用可能となったことを意味している。技術の一般化・民主化によって、ブラックボックスであったIT/ICT機器やデータセンターの設備機器の、オープン化すなわち、WhiteBox化が進行することになった。IBM互換のコンピュータによるコンピュータのオープン化と、インターネットを構成するICT機器のオープン化が1990年後半から2000年代に進行した。この動きが、ハイパージャイアントであるGAFA+M/BATによって、データセンターを構成するすべてのIT/ICT機器とデータセンターの設備に適用されるに至った。バックエンド技術のオープン化と民主化によって、データセ

ンターの急激なコスト削減と効率性向上が実現されることになった。2020年12月25日に経済産業省から発表された「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」^(※1)の中では、データセンターの戦略的利用が提案されており、「デジタル化・DXの省エネ効果は大（クラウド化で8割省エネ達成）」との記述も行われている。この8割の省エネ達成は、クラウド化のみでは実現不可能であるというのが実際である。8割の省エネの達成には、先端技術のオープン化と民主化によるすべての構成要素の効率化とイノベーションが必要であったことを、正確に認識する必要がある。

(4) グローバルシステム化

データセンターのネットワーク化は、インターネットがグローバルシステムであるがゆえに、必然性を持った進化であり、グローバルなものとなった。すなわち、地球の地理的特性を考慮したグローバルなデータセンターネットワークとして、その効率性の向上とサービス品質の向上が取り組まれているのである。

実例として、ドイツの自動車会社によるアイスランドのデータセンターの戦略的利用が挙げられよう。アイスランドは、人口は約35万人（新宿区と同じくらい）、GDPは5兆円（鳥取県と同じくらい）で、ほぼ100%再生可能エネルギーによる電力供給が行われている。気候は、極寒な環境ではなく、一年を通して“クール”な環境で、冬季は北海道よりも暖かい（＝寒くない）気候となっており、ほぼ冷房が必要な

い状況で、外気空調（直接と間接の両方）のみでデータセンターを運用することができる。欧州本土からのアイスランドへの通信遅延は30msec程度であることなどを考慮し、リアルタイム性が要求される事業ではなく、リアルタイム性が要求されず、計算量や記憶量が要求される人工知能やビッグデータ処理などに注力し、アイスランドの利点である、長期に安定な低電力価格と安価な地価、税制優遇を利用して事業企画が作成されている。近年の高密度&多量の電力を必要とする新しいアプリケーションの事業にとっては、魅力的である。ドイツの自動車メーカーでは、CAD/CAMを用いた自動車の設計・評価には、リアルタイム性と従来のデータセンターのHigh Availabilityは要求されない。さらに、自動車は地球温暖化ガスの主要な発生源であるので、地球温暖化ガスの削減を実現するために、大きな電気エネルギーを必要とする自動車の設計・評価をすべて再生可能エネルギーで行うという会社イメージの向上に貢献させることで、投資のMultiple-Payoffを実現させている^(※2)。

(5) 大規模システム化

データセンターに必要なコンピュータ資源の量は、社会・産業のデジタル化・ネット化とともに、指数関数的な増加を続けている。このような状況に対応するために、データセンターの大規模化も同時に進行している。近年では、数十MWクラスのデータセンターが日本でも一般化しているが、米国や中国では、数百MWクラスのデータセンターが構築・運用されている。

● コロナ禍以前の社会

我々は、コロナ禍の発生以前から、物理空間を基本にした社会・産業システムのトランスフォーメーションを実現させてきた。デジタル技術とネットワーク技術は、すべての産業・社会に

導入され、その活動の効率化と新しいサービスの創生を通じた、社会・産業活動の「効率化」と「進化」に貢献してきた。第5次総合科学技術戦略において提唱されたSociety5.0は、情報化を梃子にして、社会・産業活動の「効率化」と「進化」を加速させ、わが国の国際競争力を増強させるという方向性を示した。CPS（Cyber Physical System）とも呼ばれる、実空間（物理空間）と情報空間（サイバー空間）の融合である。

インターネットは、地球上のすべてのコンピュータを相互接続する自律分散協調システムであり、国境を容易に越え、デジタル情報の送受信や共有を可能にした。インターネットが国境を跨ぐグローバルな情報インフラであるがゆえに、さまざまな新しい課題・問題が発生してきた。情報の流通コストは、物理的なモノの流通コストと比較して、ムーアの法則にしたがった電子機器の高性能化と低価格化によって、劇的に安価な流通システムを構築可能にしたのである。しかも、このデジタルデータの流通システムは、国を跨ぎ自由に流通可能である。その結果、さまざまな「サイバー空間での紛争」が発生することになった。

このような、各国にとって不都合な現象の発生によって、国家間の非対称性を増加させる、「自国ファースト」の考え方や施策がとられるようになってきていた。これまでの「Chin America」と呼ばれる米中を核にしたグローバルなサプライチェーンの構造の崩壊は、この構造変化の象徴的現象であろう。その結果、国家間での調整やルールの形成と監視を行う国際機関への貢献と影響力に大きな変化が発生してきていた。「自国ファースト」の傾向と、組織(国や企業)の短期利益を最優先にしたKPIの設定は、国境を跨ぐ重要課題に対して、対策の適用に積極的にすることの大きな障害となる。具体的に

※1 : <https://www.meti.go.jp/press/2020/12/20201225012/20201225012.html>

※2 : もう一つの特長は、電力価格が長期間（10年や15年）変化しないという条件を提供可能な点である。ほとんどの国では、再生可能エネルギーの導入のために、電力価格は非常に不安定にならざるを得ない。これは、企業経営における財務的観点からはリスク要素となる。安定な低価格の長期間の保証は、財務的には歓迎される要素になる。

は、以下に挙げる地球・人類の存続や持続性に関する重要課題である。

- ① 環境・エネルギー問題
- ② 宇宙空間問題
- ③ 食料問題
- ④ 水問題

特に、長期的利益ではなく、短期的利益の優先度が上がれば上がるほど、上記の問題解決に向けた、国を跨るグローバルでの協力・連携が必要な活動の実施へのインセンティブが小さくなってしまふ。

● コロナ禍以後の社会

コロナ禍によるパンデミックは、2008年のリーマンショックをはるかに超える経済的な大打撃を与えることになるのみならず、社会の政治・経済・社会行動を大変革させることになる。しかし、一方では、社会に展開された情報基盤（特に、グローバルにすべての組織・個人をデジタル・ネットワーク技術を用いて相互接続したインターネット）の存在が、社会・産業活動に致命的かつ破壊的な状況に至ることを回避することに貢献した。すなわち、社会のデジタル化、そしてインターネット技術を用いた各組織の個別システムのオンライン化とその国境を越えたグローバルなネットワーク化が、コロナ禍による社会・産業の壊滅的崩壊を防止することに大きな貢献を行ったことが広く認識され、今後は、「オンライン社会の存在を前提にしたサイバー・ファーストの社会産業インフラ」への進化が加速されなければならないと考える。

(1) 持続的成長と地球との共存・共生を目指すSDGsの実現

(1-1) サイバー・ファーストへの進化

コンピュータは、すべての物理インスタンスを抽象化（＝デジタル化）し、その管理制御をデジタルのプログラムで実現可能にしつつある。すなわち、

サイバー空間と物理空間の融合・融合（CPS：Cyber Physical System）である。しかし、近年では、CPSの状況は、急激に、「サイバー・ファースト（Cyber First）」に進化しつつある。

コンピュータ上に、物理製品とその製品が存在する物理空間の物理法則も定義・模擬（＝デジタル試作）することで、その製品の挙動や特性をシミュレーション（simulation）することが可能になってきた。すなわち、物理実体を用いた“実験”を行うことなく、デジタル空間に構築された模擬空間でのシミュレーションによる“模擬実験”を行うことで、高精度の評価が可能となった。さまざまなコンピュータ上での“模擬実験”で候補となったモノを、実空間に展開（＝物理的試作）し、物理実体を用いた実験評価を行うという製品の研究開発が一般化してきた。サイバー空間・デジタル空間の能力の劇的な向上によって、ほぼ、正確な物理空間に存在するインスタンスの模擬化が可能となり、その結果、サイバー空間・デジタル空間での評価が、物理空間での評価よりも先に行われるようになってきたのである。

21世紀型の都市・街のグランドプランとしては、国土交通省による「コンパクト&ネットワーク」と、環境省による「地域循環共生圏」の考え方が提唱されている。各地域にコンパクトでSDGsを実現する都市・街を創り、それをネットワーク化するという、自律分散型ネットワークの創成である。自然災害などによる非常事態への対応能力とリスク管理能力を持ちつつ、グローバルなネットワークが可能な都市づくり・街づくりである。リスク管理能力の観点から自給自足能力の必要になるが、各都市・街が「Me First」になり、排他的あるいは非対称な関係をその他の都市・街を形成するという考え方ではない。

このような観点に立脚して、データ

センターの貢献とデータセンターに係る物理インスタンスとのエコシステムの創成に関して、以下の三つのポイントに関する議論を行いたい。

- ① 高性能・高機能のインターネットの存在が前提
- ② 戦略的データセンターネットワークの必要性
- ③ エネルギーシステムにおける戦略性

(1-2) 高性能・高機能の

インターネットの存在が前提
すべての都市・街における社会・産業活動は、インターネットの存在を前提とすることになる。活動の多様度は大きくなることは自明であり、高性能で高機能のインターネット基盤をすべての都市・街に整備しなければならない。

インターネットは、有線ケーブルと無線の両方を組み合わせてコンピュータを相互接続する。したがって、有線ケーブルの敷設や必要な周波数の無線の利用が、公平・公正にかつ効率的に行うことができるようなルールの整備が、企業間のみならず行政においても行われなければならない。2000年頃に実施されたブロードバンドインターネット環境の整備を進める施策であるe-Japan構想においては、NTTの施設・設備の他事業者による利用の公平性・公正性の確認と徹底が、その成功の大きなポイントとなった。このような観点から、2009年に決定されたローカル5Gに対する四つのメジャー携帯網キャリア以外の事業者への周波数資源の解放は、無線によるブロードバンドインターネット環境の整備に貢献する可能性を持った施策の一つであると捉えることができよう。

(1-3) 戦略的データセンターネットワークの構築

グローバルなインターネット上には、地球上のすべての都市・街で稼働するサービスを稼働させるグローバルなデ

ータセンターネットワークが形成されることになる。このデータセンターネットワークは、多様なサービスの要求を満足させる必要があり、地球上に一つあるいは少数のデータセンターがあれば実現可能というわけではない。特に、以下の要求を満足するような、データセンターネットワークが構築されなければならない。

(1-3-1) 遅延特性

データは光速以上の速度では転送することができない。日本国内では数十ミリ秒程度、米国や欧州などとの通信では、100ミリ秒から数百ミリ秒程度の遅延となってしまう。さらに、ミリ秒以下の遅延が要求されるアプリケーションに対しては、オンサイト (=On-the-Premise) に設置されたサーバーあるいは都市・街内に存在するデータセンターの利用が必須となる。すなわち、おおまかに、Global-Scale、State-ScaleそしてLocal-Scaleの3階層のデータセンターネットワークが形成されることになる。

(1-3-2) 建設・運用コスト

データセンターの建設と運用に必要な費用は小さくなく、長期視点にたったコスト比較がその設置場所の選定において重要な要素の一つとなる。建屋(躯体)工事、通信ケーブル、電力ケーブルに関する初期費用と長期の固定費、さらに、人件費やデータセンター利用者の移動費等が挙げられる。十分な電力が利用可能であっても、十分な容量の通信ケーブルがなければ、データセンターの候補地としては不適切となってしまう。

(1-3-3) 災害対応性

災害の発生への対応のために、複数のデータセンターを地理的に分散させる必要がある。特に、地震や水害などの自然災害、電力システムおよび通信システムの障害への対応のために、物理的に、かつ論理的に、複数のデータセンターが地理的に分散されなければ

ならない。

(1-3-4) プライバシー

データセンターには、企業や個人のデータが保存される。すなわち、個人情報情報が保存されることになる。個人情報情報が不適切にアクセス・利用されることがないように、各国において、プライバシーの保護、個人情報の保護に関する法律やルールが作られている一方、海外諸国においては、「テロ対策」を名目にして、国家による強制的なデータの閲覧・検閲、さらにフィルタリングなどが可能となってきた。日本では、第2次世界大戦以前の国家権力による検閲の反省からも、通信の秘匿性の堅持が維持されている世界でも稀有な国である。日本国内のデータセンターは、プライバシーデータなどの重要情報保護という観点から、国際的な競争力を持っていると捉えることができる。

(1-4) エネルギーシステムにおける戦略性

データセンターは、莫大な電力を継続的に利用する事業所であり、電力会社にとっては、重要需要家/重要顧客という位置づけになる。また、データセンターの運用費(固定費)に占める電力調達コストは、非常に大きく、安価な調達が、その設置場所の選定にとって、大きな要素の一つとなる。当然、継続的な安定運用は最重要課題の一つであり、複数系統の電力確保も設定場所の選定にとって重要要素となる。

データセンター設置場所の選定にあたって、データセンターへの電力提供コストだけでなく、発電システムと熱の移動システムを含んだ、マルチステークホルダー型のエコシステムを構築することが挑戦・実現されつつある。データセンター単独で捉えるのではなく、SDGsを念頭においた都市・街づくりの中に、データセンターをはめ込む取り組みである。

超大規模のデータセンターを必要と

するハイパージャイアント(GAFA+M、BAT)は、都市部へのデータセンターの設置が困難になってきたこともあって、郊外への設置を行うことになった。郊外への設置にあたっては、安価な安定電源が確保可能な場所にデータセンターを設置することが、重要な要素となる。さらに、SDGsに関する社会的な観点からは、大量の電力を消費し、さらに、大量の熱を放出するデータセンターは、地球温暖化防止にとっては、「ダークサイド」の事業者となってしまう。このような二つの観点から、ハイパージャイアントは、再生可能エネルギーの利用を推進している。具体的には、水力発電、風力発電、さらに太陽光/熱発電である。特に、安定的に低コストの電力供給が可能な風力発電と水力発電の積極利用が進められている。また、アップルとアマゾン、リチウムイオン蓄電池や水素燃料電池を積極的に利用した太陽光/熱発電を積極的に利用している。

日本においては、今後、戦略的な洋上風力発電設備が、主に日本海沿岸に整備される計画であるし、多くの大規模太陽光発電プラントが存在しているとともに、水力発電所も多数存在している。このような、発電設備の近くに、データセンターを設置する選択肢は、上述したように米国のハイパージャイアント(GAFA+M)では採用されているし、中国においては、国家电网(全国の送配電網を所有運用している企業)とデータセンターが連携して、超高压送電系統と大規模発電所と連携したデータセンターの設置が推進されている。需要と供給とのマッチングである。

次に、熱の除去に関しては、効率的なヒートシンクが存在すれば、熱の除去(移動)効率は向上することになる。寒冷な空気の利用(北海道石狩市のさくらインターネット)、あるいは積雪の利用(北海道美唄町)など、寒冷地にデータセンターを設置することで、熱

の除去（移動）効率の向上によるコスト削減を実現するのも一般的な方法である。これが、Go Northの方向性である。データセンター内のサーバーが生成した熱は、低温の熱という制限条件の下での熱利用のサイクルが考えられなければならない。

● おわりに：むすび

新型コロナウイルス感染症（COVID-19）は、コロナ禍が発生する前の社会

が抱えていた問題を拡大・顕在化させたとともに、これを解決するために必要とされていた、社会のデジタル化・オンライン化、さらにDXを急加速させることになる。このポストコロナ社会の最重要インフラとなるのがデータセンターである。ポストコロナ社会において、グローバルな競争力を持ち、地球と人類の持続的な発展と共生の実現のために、我々はデータセンターのさらなる進化を実現しなければならない。

筆者紹介

江崎 浩

東京大学大学院
情報理工学系研究科
創造情報学専攻 創造情報学講座
教授