



寄稿

Future of Energy:テクノロジーがもたらす価格破壊と近づく限界コストゼロ社会

東京ガス株式会社 ソリューション共創部 北澤英理子 様

目次

I センター情報

1. 「システム構築のための最適化講座～ソルバーを用いた実践力養成講座～」開催案内
2. 統計数理研究所主催 SIC 後援「データサイエンスから見た人工知能」講演会開催案内
3. **祝** 木村英紀 SIC 理事・副センター長 IEEE Control Systems Award 受賞(2021年)

II 活動報告

1. 会合予定

- ① 2021年度第2回 SIC フォーラム(3月15日 14:00-15:15 SIC 会員限定:オンライン開催)
＜講演タイトル＞ 東芝のデジタル戦略 CPS 企業への道
講師: 株式会社東芝 執行役上席常務 最高デジタル責任者 島田太郎 様 (SIC 理事)
(兼)東芝デジタルソリューションズ株式会社取締役社長、東芝データ株式会社代表取締役 CEO

他

2. 会合報告

III 正会員一覧

アブストラクト

人類は過去二度に渡り、産業革命という既存社会の創造的破壊により、近代工業化社会の礎を築いた。Rifkin[1]の分析によれば、①情報伝達、②エネルギー、③輸送の三つの分野の飛躍的技術革新と、それらの奇跡的融合が、いずれの産業革命でも重要な役割を果たしている。

18世紀後半にイギリスで発祥した第一次産業革命では、三つの分野それぞれで、①蒸気輪転機、②石炭、③蒸気機関車への転換が同時進行することによって、近代社会の第一歩を踏み出した。

19世紀後半からの第二次産業革命では、場所をアメリカに移し、①電話、②石油、③内燃機関によって現代社会へと発展した。

21世紀に入り、①インターネット、②再生可能エネルギー、③自動運転が指数関数的に進化し、次の10年には社会システムが新たな創造的破壊の局面を迎える。

本稿では、再生可能エネルギーの現状と将来について解説し、自動運転にも触れたうえで新たな社会パラダイムについて言及する。

Disclaimer:本稿は筆者の個人的見解に基づくものであり、所属団体の公式見解を必ずしも反映していない。

0. エネルギーとは

エネルギーは物理学的には、光らせる、音を出す、発熱する、モノを動かすという働きをする力を指す。本稿で用いる「エネルギー」は、それらの力をもたらすエネルギー源を意味する。

中世の農耕社会では、人馬が最も経済的で利便性の高いエネルギー源で、「国力＝人口」の時代であった。二度の産業革命を経て、機械化・自動化と石炭・石油へのエネルギー源の転換により、工業化社会が実現した。現代では、「国力＝生産量(GDP)」であり、そこにおいては、エネルギーの本質は労働力の代替・拡張である。本稿ではエネルギーの物理的な性質には触れず、「経済性」と可用性に代表される「利便性」の側面から解説する。

1. 21世紀のエネルギー:再生可能エネルギー

1.1 情報化社会とエネルギー

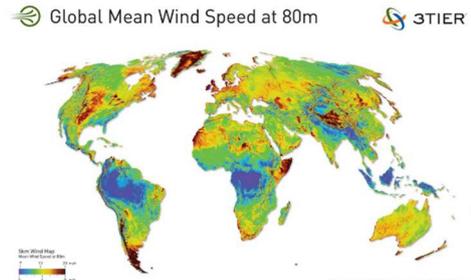
現在はテクノロジーと情報化の時代で、それを支えるエネルギーのバックボーンは電力システムであり、経済性と利便性の観点から、石油・石炭・天然ガスを燃料とする火力発電が主流である。

発電に占める化石燃料の変動費は¥4～10/kWh程度であり、従来は資本費も含めて¥6/kWh程度の石炭火力が最も経済的、というのが世界共通の認識であった。近年では、シェール革命により、米国ではガス火力が石炭火力の価格を下回り、さらに指数関数的な技術革新により、一部の地域では再生可能エネルギーが最も経済的な発電手段となっている。以下、(1)陸上風力、(2)洋上風力、(3)太陽光の現状を俯瞰する。

1.2 再生可能エネルギーの現状と進行する価格破壊

(1) 陸上風力

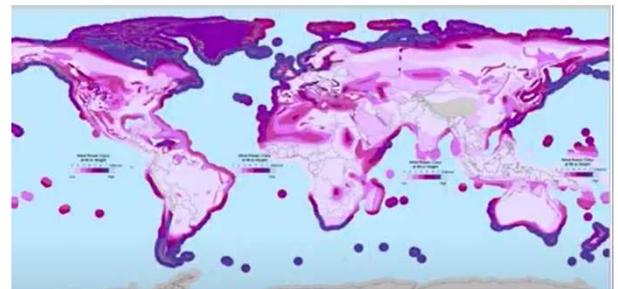
世界では、北ヨーロッパ、南米の南、アフリカ西岸のモロッコ、東岸のソマリア、中国の内陸などが風況に恵まれている。技術革新により陸上風力は急激なコストダウンが進み、例えば、アメリカでは、1980年には ϕ 57/kWhであった卸売価格が2018年には20分の1の ϕ 3/kWhにまで下落し、現在も価格低減が進んでいる。アメリカよりも更に安い地域がいくつもあり、モロッコでは ϕ 2.8/kWh、ブラジルでは ϕ 2.0/kWh、メキシコでも ϕ 2.0/kWhという卸売価格で取引されており、既存の石炭火力すら代替するだけの経済性がすでに実現している。



世界の陸上風況
出典：Ramez Naam[2]

(2) 洋上風力

洋上の風は陸上よりも発電に適しており、北極と南極に近い海上は特に風況が良い。洋上風力の価格は10年で4分の1まで下落しているものの、石炭火力の変動費を下回る低コストを実現できているサイトはまだない。しかしながら、2016年には既に2025年の業界到達目標価格 ϕ 11/kWhをクリアする洋上風力が出始めており、各国がこぞって開発に血道をあげている。



世界の洋上風況
出典：Ramez Naam[2]

現時点のコストが高くても各国が洋上風力に取り組む

理由は、潜在的な魅力にある。洋上では一定方向に強く連続した風が吹くため、陸上に比べて出力が安定しており、グリッドへの負荷も小さく、稼働率は最大65%にも達する。また、風は夜に強い傾向があり、太陽光と補完関係にある。さらに、一つのサイトに広い面積が確保できるので、多くのタービンを設置できるうえに、騒音や振動の問題がないことから、大型化による出力アップも可能である。このようなことから、将来のコストダウンの余地が非常に大きく、太陽光に恵まれていない地域では再エネの本命と言われている。

(3) 太陽光

太陽光発電のコストの大部分を占めていたパネルの価格は、1977年には1Wp(約10cm×10cm)あたり\$77もしたが、2019年には ϕ 22と、42年間で350分の1にまで下落し、現在も指数関数的に下落し続けている。その結果、世界各地で太陽光発電のコストは、火力発電の燃料費すら大きく下回り始めている。

具体的なサイトの例を挙げると、チリ： ϕ 2.15/kWh、メキシコ： ϕ 2.0/kWh、ブラジル： ϕ 1.75/kWh、またポルトガルでは ϕ 1.48/kWhという価格破壊が実現している。



太陽光パネルのコスト
出典：Ramez Naam[2]

1.3 再エネの課題(可用性)とそれを補完するバッテリー

これまで見てきたように、自然に恵まれた地域では既に再エネは経済性で火力発電を上回っているが、課題もある。第一に、広大な設置面積が必要で人口密度の高い地域には向かない。また、現在の交流送配電システムにおいては、ネットワークに慣性力が必要なため、再エネの導入には上限がある。最大の課題は可用性で、太陽光・風力は発電量が天候に左右され出力の制御が難しく、大量に導入されると停電を引き起こす恐れがある。それを補完するのがバッテリーである。

再エネと同様、バッテリーの技術も指数関数的に進化を続けている。例えば、リチウムイオン電池は10年前には\$1160/kWhもしたが、2018年にはその6分の1以下になり、現在もさらに下落が続いている。ただし、リチウムイオン電池はモバイル向けが主な用途なため、エネルギーシステムにはオーバースペックで、まだ価格が高い。2018年の価格でも一回の充放電のバッテリーコストは¥6/kWh以上であるため、現状の電力ネットワークでは、コストが問題とならない周波数調整などのアンシラリーサービスにしか使われていない。

しかし、バッテリー技術の進化は半導体におけるムーアの法則と同様の経験則(収穫加速の法則)が成り立ち、それを織り込んで今後の価格を予測すると、2030年までにさらに3分の1から5分の1に下落する。このレベルにまで来ると、一回の充放電コストは¥1/kWhで、再エネの発電コストを加えても¥3/kWhを下回る。これは既存の火力発電所を廃炉にして、新たに再エネ+バッテリーのシステムを構築する方が経済的であることを意味する。詳しくは2章で解説する。

1.4 日本の再エネとゼロエミ社会に向けた選択肢

(1) 日本の再エネ

日本では、残念ながら、この再エネとバッテリーの技術の進化の恩恵にはあまり預かれれない。現時点の日本の再エネのFIT買取価格は、陸上風力が¥18/kWh、洋上風力が¥36/kWh、太陽光が約¥13/kWhで、いずれも火力発電の燃料費を大きく上回り、経済性に乏しい。その理由を太陽光発電を例に説明する。

<太陽光システムの原価構成>

(千円/kW)

造成	架台	パネル	PCS	BOS	設置工事	その他	総額
5.3	32	114	28	27	86	3	295.3
2%	11%	39%	9%	9%	29%	1%	

出典：太陽光発電競争力強化研究会 報告書 平成28年10月 (造成費以外)
調達価格等算定委員会 平成29年度以降の調達価格等に関する意見(案) (造成費)

上表は2016年時点での原価構成の公表値である。パネル本体の価格には、収穫加速の法則が成り立ち、今後もコストダウンが進むことが予想されるが、設備工事や架台といった周辺要素が占める割合が既に6割を超えているため、システム全体のコストダウンは進みにくい。

加えて、日本は日射に恵まれず、赤道の南北に位置する日射量の多い地域と比較すると半分程度の発電量しか収穫できないため、kWhあたりの発電単価は2倍になる。

陸上風力や洋上風力にも、システム価格のコストダウンが進まないことと風況に恵まれないことで、海外ほどの経済性は出ない。地熱やその他の再エネにも課題が多く、人口密度の高い日本では再エネを将来のエネルギーシステムの主軸に据えることは難しい。

(2) ゼロエミ社会実現に向けた日本の選択肢

菅政権が世界に公約しているカーボンニュートラルを実現するためには、再エネ以外に日本が取り得る手段としては、原子力、化石燃料+CCS(CO₂ Capture & Storage)などが候補として挙がっている。

原子力については、現在の既設の発電所で賄える発電量は、日本の総電力消費の20%以下なので、原子力を主力とするためには新規の発電所を建設する必要がある。イギリスで現在建設中のヒンクリーポイントCサイト(160万kW×2基)の政府買取保証価格は¥14.6/kWhであり、日本では震災対策等の費用が上乗せされるため、経済性の面で競争力がない。原子力に対する国民感情を度外視したとしても、原発に頼るといふ選択肢は現実的ではない。

化石燃料+CCSという選択肢については、捕捉したCO₂の貯蔵が大きな課題となる。CCSが成り立つ地域とは、CO₂を埋め戻すことができる既存のガス田や油田を保有する地域で、それらを利用して貯蔵のコストを抑えることができるが、化石燃料資源に恵まれない日本で貯蔵地を探すのは、かなりの難題である。代替案として、CO₂を液化して貯蔵コストが安い海外に輸送し埋設するという方法も論理的には可能であるものの、安全性と経済性の面が未解決である。

唯一、経済的にも成り立つ日本の選択肢は海外の安価なCO₂フリーの電力を水素又は水素化合物に変換して輸入することである。その手段については、水素の液化、メチルシクロヘキサンの利用、空中のCO₂と水素を反応させるメタン合成、そして窒素と水素を反応させるアンモニア合成といった四つの方法が実用化に向けて実証段階にある。このうち、私見ではアンモニア合成が本命と考えている。

2. 再エネとバッテリーが変える21世紀の社会

2.1 再エネ+バッテリー(Solar Wind & Battery:以下SWB)による創造的破壊

1章で見てきたように、既存の火力発電所を廃炉にしてSWBを新たに構築する方が合理的な地域が出現している。実際に既存のビジネスがディスラプトされた例を紹介する。

(1) 石炭火力・石炭産業

2018年にインディアナ州の電力会社(Northern Indiana Public Service Co.)が石炭火力からSWBへの転換計画を公表した。石炭火力はこの電力会社の65%の発電量を占めていたが、10年以内にすべてを廃炉にしてSWBに転換することにより、5%の料金値下げを公約した。SWBが石炭火力よりもすでに経済的であるという事実が全米を驚かせ、多くの州がこれに追随している。

石炭は魅力を失い、2008年に741.46の最高値を記録したダウジョーンズの石炭インデックスは2021年2月現在7.5前後で推移しており、最高値から99%も下落した。石炭産業は既に終わっている。

(2) ガス火力

2017年にTESLAが南オーストラリア州のホーンズデールに100MWのバッテリーを新設し、同州の周波数制御市場に参入した。同市場に参加していた発電所の総容量は5000MWで、TESLAの規模は市場の2%に過ぎないが、運転コストが安いいため、同市場の総取引量の55%を奪い取った。平均の市場価格も90%下落し、価格競争力のない老朽ガス火力の多くが廃炉となった。

(3) 発電機メーカー

110年の長きにわたって、DJIA30種に採用され続けてきたGEも再エネの影響を受けている。2010年代にOECD諸国の政府は一斉に再エネに補助金をつけた。その煽りを受けて、GEの原子力と火力

の発電システムの販売が大打撃を受け、2017年に株価が急落した。いずれは再エネへの補助金が無くなり、導入量が頭打ちになると判断したGEは、再エネビジネスへの進出が遅れた。

しかし、指数関数的な技術革新により、再エネは補助金なしでも既にその時点で火力・原子力に対して十分競争力を有しており、GEの予想に反して導入に一層の加速が付き、同社の発電システムの受注はさらに激減して、株価も74%下落し、DJIA30種からも除外された。

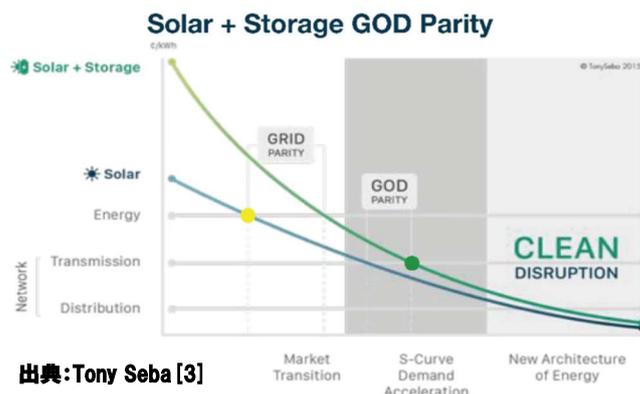
1970年代にデジカメを発明したコダックは、同社の主力製品である銀塩フィルムにこだわり、デジタル技術の指数関数的な革新を読み誤ったために、2012年に経営破綻した。SWBも指数関数的に技術が進化しており、これからも多くの産業をディスラプトするだろう。

(4) GOD(Generation On Demand) Parity

電力会社の販売価格は送配電コストに発電コストを加えたもので、それと太陽光発電のコストがイーブンになるところをGRIDパリティ(黄色の点)という。ソーラーがこの価格を下回ると、パネルを屋根につけることで、電力会社から買うよりも電気を安く調達できる。実際には太陽光だけでは夜や雨の日は使えないので、GRIDパリティが実現しても電力会社から電気を買い続ける必要がある。

しかし、ソーラーとバッテリーを設置すれば、いつでも使えるようになる。この価格が送配電コストと対等になるところをGeneration on Demand略してGODパリティという(緑色の点)。この価格をソーラー+バッテリーが下回ると、電力会社から電気を買う経済合理性がなくなり、送配電網がディスラプトされる。

送配電網のコストは場所によって異なるが、かなり高い地域も多く、日射に恵まれている地域では、送配電網がディスラプトされるのも時間の問題となる。



(5) 変わる世界の産業地図

これまで日本の素材産業は技術力を背景に輸出産業であったが、これからは技術に加えて人件費とエネルギーコストの勝負となる。現在は例えば中国や韓国のエネルギーが安く、粗鋼は中国、半導体は韓国に後れをとっている。

今後は、日本や韓国といった再エネに恵まれない東アジアから東南アジアの地域では、電力料金が高止まりし、素材産業の競争力は徐々に失われていくと予想される。代わって台頭するのは豪州、南アフリカ、チリ、中東などの再エネ先進国で、既にそういった変化は始まっている。

具体的には、アイスランドは、ボーキサイトを輸入して安い地熱電力でアルミを精錬している。イスラエルは、太陽光発電で海水を淡水化し水大国となっている。また、アフリカでも、太陽光発電を利用して空気中の水蒸気から水を製造する技術も実用段階に入っている。

素材産業の世界地図は変わりつつある。

(6) SWBによる電力システム再構築

既存の発電所を廃炉にし、SWBで新たな電力システムを構築する未来の社会について言及したが、そのフィージビリティについて検討を加える。

Dorr[4]は、SWBだけで全ての電力を賄い、他の電力ネットワークからの調達や需要抑制などは行わ

ないということ、技術革新については収穫加速の法則が継続するという前提の下で、新たなシステムの構築コストを試算している。

右の図の横軸は、既存の発電所の総容量に対する新設すべき再エネ(Solar & Wind:以下 SW)の比率を表す。例えば、"4x"は既存の発電所総容量の4倍を意味する。縦軸は、SWを補完するのに必要なバッテリー(以下 B)も含めた総コストを表す。SWの規模が小さい時には大量のBを必要とするが、SWが大きくなるにつれて、Bの容量が減り、総コストはSWの大きさに対して下に凸の曲線(以下 Uカーブ)を描く。このUカーブの最小点を見つけることが、筆者の専門であるオペレーションズ・リサーチ(OR)のテーマの一つである。

Dorr[4]は、カリフォルニア、テキサス、ニューイングランドの三つの独立系統運用機関(ISO)について SWB の最適点を試算した。その結果、SWの規模は既存の発電容量の3.5~5倍でBの容量は35~90時間であった。この試算値を全米50州に適用した結果、アメリカ全土をSWBで賄うために必要な投資は200兆円、1年間に20兆円の投資を継続すると10年で完成する。これはアメリカの年間GDPの1%に過ぎないので、意外と現実的な数字である。

しかも、SWBシステムは冗長性の塊なので、実際に発電される電力は、全米の電力消費量の約2倍となる。加えて注目すべきは、Uカーブは最小点近傍で非常に勾配が緩やかなため、僅か20%の追加投資でさらに総消費量の100~200%の電力を発電できる。このことは、非常に安いマージナル投資で大量のエネルギーを得られることを意味しており、一度はアジア諸国に奪われた素材産業すら、復活の可能性を秘めている。

Seba[5]は日射の強いインドで同じ試算をし、必要なSW容量が既存の発電所総量の4.8倍で、Bの容量は21時間分、投資規模は37兆円、その時の余剰電力量が365TWhで年間消費量の約36%と報告している。さらに20%(7兆円)の追加投資によって余剰電力は852TWhに増加、ほぼ日本の年間電力消費量に相当し、この時の発電コストは僅か¥1.0/kWhである。

2.2 CASE から TaaS(Transportation as a Service)へ

CASE(Connected, Autonomous, Shared, Electrified)は次世代の輸送の四つのトレンドを一つの言葉にまとめたものである。自動車産業の枠を超えて、輸送サービスやエネルギー、ITも巻き込んで、100年に一度の大変革をもたらし、TaaSという巨大市場に成長することが期待され、自動車メーカーのみならず、異業種からも多くの企業が参入の機会を狙っている。まずCASEについておさらいをする。

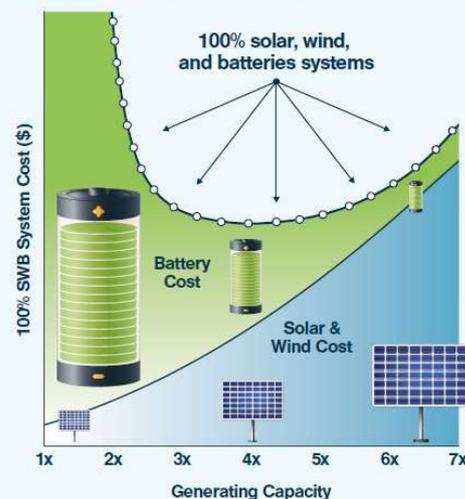
(1) Connected

車は今や車輪の上に乗ったコンピュータとソフトウェア、そして多数のセンサーの集合体で、常時ネットワークに繋がっていて、ソフトはサーバーからインターネットでダウンロードされる。

(2) Autonomous

自動運転はAIをはじめとする情報技術の集積であり、現在はそれらを効率的に機能させる、いわば新たなOS開発の段階にある。PCではMacとWindows、スマホではiOSとAndroidなどOSを制するものが勝者総取りを実現しているが、一方でOSはせいぜい二つしか併存できない。自動運転に関しても例

Figure 7. The Clean Energy U-Curve



出典：Adam Dorr & Tony Seba[4]

外ではなく、覇権をめぐる開発競争に、様々な分野の有力企業がしのぎを削っている。

主なプレーヤーは、GM(Cruise)、BMW や TOYOTA(PONY-AI)に代表される自動車メーカー、TESLA などの EV メーカー、AMAZON(Zoox) 、Nuro といった物流企業、Google(Waymo)、Apple などの巨大IT、それに、Uber(2020 年に撤退)、Lyft といったライドシェアサービスなどである。

現在、リードしているのは Google で、それを追うのが TESLA や GM である。自動運転を実現する AI は、サーバーにオンラインでつながった車の事故情報を世界中から吸い上げ、毎日学習して進化する。TESLA は「2018 年時点で同社の自動運転が、人間の運転よりも既に 6.4 倍安全であった」という実績を公表している。自動運転が普及する近い将来は、交通事故がほぼ無くなる。

(3) Shared

Shared の代表は Uber や Lyft で、その実体はオンデマンドの白タクだが、従来のタクシーよりも遥かにレベルの高いサービスを実現している。具体的には、車を呼ぶと最短時間で最寄りの場所にピックアップに来る。しかも安価で、多くの利用者を運転という付加価値を生まない単純労働から解放した。

ライドシェアは 2016 年に多くの大都市でタクシーの航行を上回り、2017 年にはサンフランシスコで、Uber+Lyft が全乗用車の総航行マイルの 20% を占めるまでに至っている。米国における 2012 年のタクシーの総利用回数は 14 億回で、2018 年には半減したものの、ライドシェアと合わせると 48 億回に増加しており、新たなライドの需要を創出している。

(4) Electrified

数年前まで電気自動車(EV)は趣味の車という位置付けであったが、今は実用化が進んでいる。現状の EV の性能を、複数の観点からガソリン車(ICE:Internal Combustion Engine)と比較する。

EV の電気代は ICE のガソリン代の 10 分の 1、可動部品の点数は EV が 20 点以下でメンテナンスフリーなのに対して、ICE は 2000 点近くもあり定期的なメンテナンスが必要。生涯走行可能距離は EV が 50 万マイルもあるのに対して、ICE は 15 万マイル。自家用車の年間走行距離は 1 万マイル程度なので、この距離の違いはほとんど無意味だが、商用車は年間に 10 万マイル走るため、ICE は 1 年半に一度の買い替えが必要だが、EV は 5 年に一度で済むので、この違いは大きい。

発売当初には EV の新車価格は ICE の 2 倍以上であったが、現在ではほぼ同額で、2030 年には半額以下となると予想されている。唯一、一回の充電での航続距離は、EV は ICE に及ばない。しかし、これも次節で解説する TaaS が実現すれば、大きな問題とはならないため、EV は経済性と利便性の面から 2030 年までには ICE を駆逐する。

ちなみに、EV にはバッテリー駆動の BEV と水素駆動の FCV があるが、車体価格、燃費、充填インフラ、加速応答性など、ほとんどすべての面で BEV が優位なため、世界は BEV にシフトしている。

(5) TaaS

CASE が実現して花開く TaaS の最も有望なアプリケーションは自動運転 EV タクシーで、その市場は世界で 200 兆円と予測されている。Google は 2018 年 12 月にアリゾナ州フェニックスで商用サービスを開始しており、他社も追随している。

魅力は安価なこと。アメリカのタクシーのコストは\$3.5/マイル、Uber などのライドシェアは\$1.5/マイルに対して、自動運転タクシーは\$0.35/マイルである。これは ICE を維持するコストよりも安いので、ICE の自家用車を保有する合理的な理由がなくなる。

TESLA は\$0.18/マイルで自動運転タクシーを提供すると公言しており、この価格は東京 23 区内のタクシーの 30 分の1で、東京の近郊電車の運賃よりも安い。ドア to ドアのサービスが前提の自動運転タクシーが実現すれば、鉄道を使う機会も激減する。

2.3 TaaS がもたらす破壊

自動運転タクシーが実現すると、自家用車はディスラプトされ、アメリカを例にとると、年間で 1 兆ドルの家計支出が減る。加えて、運転時間を他の生産的な仕事に充てることで、さらに 1 兆ドルの付加価値が生まれ、これらを併せるとアメリカの GDP の 10%に相当する。

また、駐車専用スペース(アメリカでは都市部の 18%)が不要となり、都市は緑地公園、遊歩道、共用スペース、新ビジネスの拠点、住宅などの新たな用途に再設計される。

さらに、都心部と郊外の不動産価格にも変化が起きる。今は都心部へのアクセス時間が不動産価格を決める最大要因だが、TaaS は移動を快適にするため、都心からの距離は不動産価格の決定要因にならなくなる。その結果、郊外の地価が上昇し、都心の地価が下落する。アメリカを例にとった試算では、郊外の地価合計が 100 兆円上昇し、逆に都心の地価の合計が 100 兆円下落する。エレベータの発明によって昇降の不便さが解消し、高層階の価格が低層階より高くなったのと同様に、環境のよい郊外の方が、ごみごみした都心よりも地価が高い時代がくるかもしれない。

環境面をみると、80%の省エネルギー、90%の CO2 削減が実現するとともに、大気も浄化され、WHO の推計では世界で年間 600 万人とも言われる大気汚染による死亡者が救済される。

自動運転は事故を起こさないので交通事故も激減し、世界の年間死者 120 万人、負傷者 2000~4000 万人がほぼゼロになる。

これまでは、TaaS のポジティブな効果について紹介したが、ネガティブな側面もある。交通事故関連の産業は想像以上に多く、GDP の 3%に相当するが、それが消滅する。全労働人口の 1%を占めるドライバーは全員失業する。自動車の保有が減り、車の販売台数は 7 割減少することで、GDP は 2%減り、日本にとっては大打撃となる。

各国の政府は、今すぐにも、TaaS がもたらす負の経済影響に対する政策を講ずる必要があるが、これに気付いている指導者はいない。

TaaS が破壊するもう一つの代表例が石油産業である。現在世界で一日に 1 億バレルが消費されているが、輸送用(60%)、石油化学製品の原材料(13%)、電力・空調用燃料(14%)などが主な用途である。TaaS の実現により乗用車・小型トラックの燃料需要(36%)が無くなり、再エネにより電力・空調用需要(14%)が無くなるので、ほぼ確実に半分の需要が消える。さらに、潤滑油(5%)と大型トラックの燃料(8%)も需要が無くなる可能性があり、合計で三分の二の需要が消失する可能性すらある。長年に渡ってサウジの石油相を務めたヤマニ氏の予言:”The stone age didn't end for lack of stone, and the oil age will end long before the world runs out of oil.” が正に現実となる。

3. 限界コストゼロ社会の到来とパラダイムシフト:GDP から QOL へ

2020 年からの 10 年にエネルギー(再エネ)と輸送(自動運転)に飛躍的な技術革新が起きることを見てきたが、加えて AI をはじめとする情報通信技術のさらなる発展が融合し、これまで人類が SF の世界だと考えていた新たな未来の到来が現実味を帯びてきた。その一つは、レイ・カーツワイルが主唱するシンギュラリティの実現であるが、それが起きるかどうかは別として、2020 年代における情報伝達(IoT)、エネルギー(SWB)と輸送(TaaS)の共通点は、限界コストがほぼゼロに収束することである。この三つの分

野に限らず、教育、音楽・映像の分野では、既にコストがゼロに近づいており、今後は食料、医療の分野もこれに続いていく。

コストがゼロに近づくことは、人類にとって福音であるが、資本主義にとっては脅威となる。自由競争下における資本主義では、売上げから得られる利益で投下資本を回収するが、限界コストがゼロに近づくと短期価格もゼロに近づき、利益で投下資本を回収できなくなる。資本主義社会と限界コストゼロ社会は相容れないパラダイムの可能性がある。

具体的な例として、アメリカの PJM の卸電力市場での出来事を紹介する。PJM とは(Pennsylvania-New Jersey-Maryland)の略で、三つの州を中心とする地域の送配電を管轄している ISO である。アメリカの卸電力市場のしくみは、シングルプライスオークションで、発電事業者は限界コストでの入札が義務付けられている。

PJM に卸電力市場が導入された当初、競争原理が機能し、卸価格は順調に下落、多くの老朽火力は市場から淘汰された一方で、新規の発電所に対する投資意欲は減退した。そのため、短期的に需給が逼迫し、卸価格は再び高騰したが、それでも発電所への投資は生まれなかった。新設の発電所が増えれば、市場価格が再び下落して、発電所の投資コストを回収できないということを投資家が知っていたからだ。その結果、電源が不足する事態をまねき、絶えず停電の危機に直面するようになった。

卸電力市場の設計に失敗し、停電の危機を招きながらも、対応策として容量市場という新たな市場を創設し、投資を促がしたが、未だに問題は解決していない。市場に任せればすべてうまくいくという市場原理主義に基づいた資本主義の限界が見える。

これは、遠いアメリカだけの話ではなく、日本でも九州電力管内では、太陽光発電の出力が高くなりすぎると、卸価格は 0.01 円で清算されており、いつ PJM の二の舞となってもおかしくない。

もう少し身近な例に日本の携帯電話サービスがある。これまでは DOCOMO、AU、SOFTBANK の寡占による暗黙の協定で、価格は高止まりしてきたが、現在は楽天の新規参入や政府主導の値下げにより、価格破壊が起きようとしている。将来、顧客争奪戦が起こると、携帯電話サービスの限界コストはほぼゼロなので、値下げのスパイラルに歯止めがかからず、利益が大幅に減少するリスクがある。そうなると、次世代の設備投資が不可能となり 5G、6G への投資に支障が出るかもしれない

このように、限界コストがゼロになると資本が投下されなくなるものの、水、電力、通信、食料、交通、教育などの必要財には初期投資が不可欠である。必要財の初期投資を継続する策の一つとしてコモンス化という概念がある。企業所有ではなく、国家所有でもない運営のありようで、日本で古くから「いりあい」というしくみで実現してきた考え方と同様だ。詳細は Rifkin[1]

これまで私たちは生きるために必要な財・サービスを獲得するため、効率的な生産を目指して仕事をしてきた。第一次産業革命では、水力・石炭蒸気による軽工業の機械化、第二次では石油による重工業の機械化と電化、さらに、情報技術と自動化によって、飛躍的に生産効率を向上させてきた。しかし、今後、AI とロボットが、現在の私たちの仕事のほとんどを、限界コストゼロで肩代わりしてくれる時代が来れば、生産の効率性は大きな問題ではなく、GDP は人類の目標とはなりえない。

古代ギリシャでは、奴隷制の発達により、市民の多くは肉体労働から解放され、時間に余裕ができたことから、民主政治と学問、芸術が発展した。

近い将来には、テクノロジーの力で人類は労働から解放され、多くの仕事は人間を必要としなくなる。人々の価値観が急変し、従来の教育はほぼ無意味となる中で、テクノロジーの進化は、我々人類に人間としての本来の生き方(Quality of Life :QOL)を再定義することを迫るだろう。それに成功することこそが国家、社会、個人の目標となる。

参考文献

- [1] Jeremy Rifkin, Can a Green New Deal Save Life on Earth?,
<https://www.youtube.com/watch?v=11LJBsTugWo> (参照 2021-1-30)
- [2] Ramez Naam, “Energy Disrupted” Singularity University Global Summit 2019
- [3] Tony Seba, Rethinking The Future - Clean Disruption and the Collapse of the Oil, Coal and ICEV Industries, <https://www.youtube.com/watch?v=yYFbnrBrbhs> (参照 2021-1-20)
- [4] Adam Dorr & Tony Seba, Rethinking Energy 2020-2030, A Rethink X Sector Disruption Report, October 2020
- [5] Tony Seba, Rethinking Energy - 100% Solar, Wind, and Batteries is Just the Beginning, https://www.youtube.com/watch?v=TStotTZseiw&trk=organization-update-content_share-embed-video_share-article_title (参照 2021-2-08)

著者プロフィール

北澤 英理子(きたざわ えりこ) 様

東京ガス株式会社 ソリューション共創部

1985年東京大学工学部卒業、東京ガス株式会社入社。

専門はOR、データサイエンスとファイナンスで、東京ガスにおいて、エネルギー需給分析、電力トレーディング、天候デリバティブ取引、市場リスク管理などの実務に適用。

最近の関心事はテクノロジーの指数関数的な進展がもたらす、エネルギー、輸送、医療、教育などの未来社会。博士(Ph.D.)

(2021年2月12日原稿受領)

I センター情報

1. 「システム構築のための最適化講座～ソルバーを用いた実践力養成編～」

開催案内

主催： SIC 人財育成協議会
開催日時： 2021年3月27日(土) 9:30-17:30
講義形式： Microsoft Teams によるオンライン講義
定員： 30名(SIC 非会員も参加可)
受講料： 5,000 円(SIC 正会員企業の方は 2 名様まで無料)

開催趣旨

システムイノベーションセンター(SIC)人財育成協議会では、2020年1月に開催した「システム構築のための最適化講座」の続編としまして、**ソルバーを用いて数理最適化問題の解決を実践する講座**を企画しました。

卓越したシステムを構築するには、大量のデータに基づいて対象の振る舞いを適切に予測するモデルを作り、目的に合わせて政策変数の全体最適化をはかる必要性が頻繁に生じます。具体例としては、スケジューリング、マーケティング、生産計画、人員配置、医療システム、介護システム、自動車や飛行機の形状設計や物質設計、ネットワーク設計、センサー配置、避難計画立案、交通システム制御、web 上のマッチングシステム、リコメンデーションシステムなどがあげられます。このように、最適化はシステム構築にとってはもっとも重要なツールであるといつてよいでしょう。しかも近年の計算機の数値処理速度、記憶容量の増大によってこれまで解けるとは思われなかった複雑で巨大な最適化問題も短時間で解くことが出来るようになり、そのソルバーも比較的簡単に入手できるようになりました。このことはシステム化の可能性を大きく広げつつあります。

今回オペレーションズ・リサーチ(OR)学会の最適化分野等の第一線でご活躍中の3名の先生方に講師をお願いしました。受講者には**推奨のソフトウェアがインストールされ、インターネットに接続されているPCを準備していただき**、最適化問題の解決を実践し、受講者がより理解を深めることを目的としています。

コーディネータ兼講師 後藤順哉 様 (中央大学理工学部経営システム工学科教授)

講義概要と講師

① 数理最適化概論とExcelソルバーの紹介(10:00-12:00)

講師: 後藤順哉(中央大学理工学部経営システム工学科教授)

本講座全体の導入として、数理最適化が意味するものや分類および特徴を概観する。その上でそれを実践的に解くためのソフトウェアであるソルバーについて、ソルバーの種類、ソルバーができたこと・できないことを概観する。 使用ソルバー: [Microsoft Excel](#)

② 整数最適化問題: 簡単な定式化とソルバー演習(13:00-15:00)

講師: 宮代隆平(東京農工大学工学研究院准教授)

数理最適化問題のうちでも実用性が高い整数最適化問題について扱う。まず整数最適化問題に関して概要を述べた後、実問題に現れることの多い制約条件について、整数最適化問題として定式化するテクニックを紹介する。 使用ソルバー: [GLPK\(Gnu Linear Programming Kit\)](#)

③ 発見的解法入門—配送計画問題および配置問題を例として—(15:30-17:30)

講師: 橋本英樹(東京海洋大学海洋工学部准教授)

発見的解法について配送計画問題および配置問題を例に概観する。社会における多くの場面で最適化問題が現れるが、それらはしばしばNP困難な問題であり、問題例の規模が少し大きくなるだけで厳密な最適解を得ることは現実的に極めて困難であると考えられている。そのような問題に対する妥協策として発見的解法がある。 使用ソルバー: [Python](#)

講義前に受講者の自己紹介、講義後には講師との質疑応答の時間を設けています。

詳細および申し込み方法は下記URLから開催案内を参照ください。

https://sysic.org/center_activity/2218.html

2. 統計数理研究所主催 SIC 後援「データサイエンスから見た人工知能」

講演会開催案内

【主催】大学共同利用機関法人 情報・システム研究機構 統計数理研究所(ISM)

【後援】SIC（統計数理研究所とSICは連携協定を締結しています）、他

【開催日時】3月19日(金曜)14:00-16:30（終了時刻は延長する可能性があります）

【開催形式】オンライン（ZOOMウェビナー、500名まで参加可能）

（YouTube Liveとの接続も検討します）

【参加費】無料(文科省事業)

【参加申込】以下のURLから参加申込可能です

https://zoom.us/webinar/register/WN_DdzBmQaCSiihdzqm3Pf8Bg

【プログラム】

14:00-14:05 オープニング ご挨拶(九州大学IMI、統計数理研究所)

14:05-14:15 コーディネータから 椿広計(統計数理研究所長、SIC学術協議会会員)

14:15-15:00 講演「データ取得の方法論・機械学習と人工知能からのアプローチ」

講師 日野英逸(統計数理研究所モデリング研究系教授)

15:00-15:10 休憩

15:10-16:30 パネル討論

パネリスト

丸山宏(花王(株)エグゼクティブフェロー、Preferred Networks PFN Fellow)

堤富士雄(電力中央研究所エネルギーイノベーション創発センター副所長、研究参事)

津本周作(島根大学教授(医学部医学科医療情報学講座))

赤津雅晴((株)日立製作所 システム&サービスビジネス統括本部 CTO、SIC正会員)

モデレータ

椿広計(統計数理研究所長、SIC学術協議会会員)

※ クロージングは、パネル討論の中でモデレータ(椿所長)が行います。

【問合せ先】

大学共同利用機関法人 情報・システム研究機構

統計数理研究所 運営企画本部 企画室 URAステーション

特命URA 北村浩三

〒190-8562 東京都立川市緑町10-3, 勤務先: 050-5533-8580,

携帯: 080-5011-4595, 070-7601-7827, e-mail: kitamuk@ism.ac.jp

以上

3. 祝 木村英紀 SIC 理事・副センター長 IEEE Control Systems Award 受賞(2021年度)

SIC 理事・副センター長の木村英紀先生が、2021年度 IEEE Control Systems Award を受賞され、今年はコロナ禍で授賞式が中止となりましたが、この度表彰状とメダルが木村先生のもとに届きました。SIC としても大変喜ばしい限りです。木村先生おめでとうございます。

なお、公益社団法人自動制御学会(SICE)主催 第8回 制御部門マルチシンポジウム(オンライン開催) MSCS(Multi-Symposium on Control Systems) 2021で、3月3日(水)15:50~16:40 に木村先生の受賞記念講演が企画されています。

講演タイトル「システムイノベーションとシステム科学」
(詳細および申込み等は、以下 URL を参照ください)

<http://mscs2021.sice-ctrl.jp/program#s1>



SIC 理事・副センター長 木村 英紀(きむら ひでのり) 先生 プロフィール

1970年東京大学工学博士。早稲田大学招聘研究教授、理研 BSI-Toyota 連携センターセンター研究アドバイザー。東京大学名誉教授、大阪大学名誉教授。制御工学最高の賞である IFAC(国際自動制御連合)の Giorgio Quazza Medal でアジア初の受賞をはじめ、Automatica Paper Prize Award を2回、IEEE-CSS Outstanding Paper Award など国内外において多数受賞。計測自動制御学会会長、日本学術会議会員、アジア制御協会初代会長、IEEE CSS 理事、IFAC(国際自動制御連合) Council メンバーを歴任。

Ⅱ 活動報告

1. 会合予定

① 2021年度第2回 SIC フォーラム開催案内

開催日時： 2021年3月15日(月) 14:00–15:15

開催形式： Microsoft Teams によるオンライン開催

参加対象者： SIC 会員限定

定員(目安)： 40名

<講演タイトル> 東芝のデジタル戦略 CPS 企業への道

講師： 株式会社東芝 執行役上席常務 最高デジタル責任者 島田太郎 様 (SIC 理事)
(兼)東芝デジタルソリューションズ株式会社取締役社長、東芝データ株式会社代表取締役 CEO

<講演概要>

東芝は、2018年11月にNextPlanを発表し、2030年に向けてCPSテクノロジー企業へと変貌を遂げると宣言しました。

過去10年間、サイバー企業がサイバー to サイバーの情報収集により、巨大な企業価値を作ってきましたが、これらの企業がフィジカル側に進出しています。東芝は、フィジカルから出る情報を活用して、サイバー企業が作ってきたような企業価値を提供していこうと考えています。この戦略の中身を具体的な例を挙げながら説明します。

参加申し込みは事務局までお願いします。

e-Mail office@sysic.org

以上

② SIC2020 年度(2020.1-2020.12)定時社員総会開催予定

開催日時： 2021年3月10日(水) 11:00より1時間程度

開催形式： 開催形式 オンライン開催とします。

ただし、事務局は事務局会議室で運営します

参加対象者：SIC 理事、監事、SIC 正会員代表者(議決権保有者)

その他 SIC 会員もオブザーバーとして参加可能

開催通知は、定款に定める期限までに正会員企業代表者あて事務局から連絡予定

以上

2. 会合報告

① 2021. 2. 24 15:00-17:00 2021年度第2回実行委員会開催報告

開催形式： Microsoft Teams によるオンライン開催

出席者： 副センター長、実行委員(15名)、事務局(2名)
計18名

司会： 松本隆明実行委員長

議題

- | | |
|-----------------------------|------------|
| 1. 2020年度第4回理事会(みなし理事会)報告 | 出口光一郎事務局長 |
| 2. 第2期定時社員総会(3・10 開催)について | 同上 |
| 3. 総会後の 2021 年度第 1 回理事会について | 同上 |
| 4. 実行委員の継続承認について | 同上 |
| 5. 戦略委員会の構成について | 木村英紀副センター長 |
- 確定済みの木村英紀副センター長、松本隆明実行委員長、藤野直明実行委員に加え、浦川伸一氏(損害保険ジャパン株式会社)、島田太郎氏(株式会社東芝)の2名の SIC 理事から参画の承諾を得た。他の委員は近日中に選定予定。
3月末か4月初めに初回委員会を開催し、2か月に一回の継続開催を目指す。
当面の課題は、①会員増強、②11月開催予定の国際シンポジウムの企画
- | | |
|-----------------------------|-----------|
| 6. 2021年度 SIC の主要な行事 スケジュール | 松本隆明実行委員長 |
|-----------------------------|-----------|

以上

② 2021. 2. 24 2020年度第4回理事会(みなし理事会)報告

メールにより審議いただいていた下記の2議案について、2021年2月24日をもって、議長のセンター長をのぞき全理事より「承認」の票決を頂き、また、監事より本理事会の成立について異議なしの評を頂きました。
(注:みなし理事会は全員合意でのみ成立となる)

議題1 第2期(2020年度)SIC決算報告の承認

承認する:議長をのぞく理事 14名

承認できない、保留:なし

議題2 第2期定時社員総会の議題

承認する:議長をのぞく理事 14名

承認できない、保留:なし

以上

Ⅲ 正会員一覧

インタセクト・コミュニケーションズ株式会社
NTTコミュニケーションズ株式会社
KDDI株式会社
株式会社構造計画研究所
株式会社テクノバ
株式会社ニューチャーネットワークス
株式会社日立製作所 横浜研究所
株式会社三井住友銀行
損害保険ジャパン株式会社
デンソー株式会社
日鉄ソリューションズ株式会社
富士通株式会社
三井不動産株式会社
三菱電機株式会社

SCSK株式会社
NTTコムウェア株式会社
株式会社 NTT ドコモ
株式会社 JSOL
株式会社東芝
株式会社野村総合研究所
株式会社日立物流
株式会社三菱 UFJ 銀行
帝人ファーマ株式会社
トヨタ・リサーチ・インスティテュートインク
ファナック株式会社
マツダ株式会社
三菱重工業株式会社 ICT ソリューション本部
横河電機株式会社

以上28社(五十音順)

©SIC2021

発行者: 一般社団法人 システムイノベーションセンター(SIC)

代表理事・センター長 齊藤 裕

編集者: 広報担当実行委員 中野一夫 (株式会社構造計画研究所)

事務局 〒160-0023 東京都新宿区西新宿 6-12-7 ストック新宿 1F B-19 号

URL: <https://sysic.org> E-mail: office@sysic.org Tel.Fax: 03-5381-3567