

脱炭素社会の実現に向けた ICT の役割と可能性

Roles and potential of ICT towards realizing a decarbonized society

張 曉曦*・篠塚 真智子・原 美永子

Xiaoxi ZHANG*, Machiko SHINOZUKA and Minako HARA

NTT 宇宙環境エネルギー研究所
NTT Space Environment and Energy Laboratories

摘 要

この 20 年間、ICT サービスは凄まじいスピードで発展を遂げてきた。Covid-19 の影響を受け外出自粛が続く中で、多くのオンラインサービスは飛躍的に拡大してきた。ICT の発展に伴い、ICT インフラの拡張や ICT 機器の使用など ICT 分野自体の電力需要増加による環境負荷増大が大きな懸念となる一方で、ICT 導入による生産効率化やエネルギー利用効率の向上、移動削減などが社会の環境負荷削減に大きく貢献してきた。本稿では、ICT 分野の発展動向及び ICT に関する環境影響評価手法の関連研究をレビューするとともに、今後の ICT 導入による社会の環境負荷削減ポテンシャル及び経済発展への効果を推計した。ICT サービスの導入により、BAU シナリオと比較して 2030 年までに GDP の 1.3% 増加、GHG 排出量の 4.7% 削減が見られたことから、経済発展と環境負荷のデカップリングの可能性が示された。今後も ICT の導入拡大による経済発展のみならず、脱炭素社会の実現に向けたグリーン ICT の普及が大きく期待される。

キーワード：ICT, 環境影響評価, GHG, 脱炭素, デジタル技術

Key words：ICT, environment impact assessment, greenhouse gas (GHG), decarbonization, digital technology,

1. 背景

近年、気候変動に伴う様々な影響が懸念されている。2015 年に合意されたパリ協定では、世界全体の平均気温上昇を産業革命以前に比べて 2℃ より十分低く保つとともに、1.5℃ に抑える努力を追求することが示されたが (UNFCCC, 2015)、さらに、IPCC 1.5℃ 特別報告書及び IPCC 第六次評価報告書では、甚大なりリスクを回避するために 1.5℃ に抑える必要性が示された (IPCC, 2018; IPCC, 2022)。1.5℃ 目標の実現に向けては、21 世紀中盤までにグローバルレベルでのカーボンニュートラルの達成が必要とされており、2020 年後半から 2021 年後半にかけて米国、EU、日本をはじめ、世界中多くの国がカーボンニュートラルに向けた温室効果ガス (GHG) 排出削減目標を掲げた (Whitehouse, 2021; EC, 2018; 外務省, 2021)。

こうした中、多くの産業分野・企業では野心的な GHG 排出削減目標が発表され、それを実現するための様々な気候変動対策が講じられてきた (Google, 2022)。情報通信技術 (Information and Communication Technology; ICT) 分野においては、近年第 4 世代移

動通信システム (4G) サービスの広範囲での普及、第 5 世代移動通信システム (5G) サービスの商用化開始、さらに、人工知能 (AI) やモノのインターネット (IoT) 技術の進化によるインターネット接続デバイスの急増などが情報トラフィック量の爆発的な増加をもたらしており (Cisco, 2021)、さらに情報処理に必要なデータセンター需要も増大している。同時に ICT デバイスの電力効率も目覚ましいスピードで向上しているが (Google, 2019)、ICT 分野全体を俯瞰した場合には、今後 ICT 分野のエネルギー消費量の増加による GHG 排出の増加が懸念されている。一方で、ICT の利用によって他の産業分野や家庭・運輸部門などに生じる生産・消費の効率向上、エネルギー利用効率の改善、資源利用のシェアリングを通じた生産抑制、人・物の移動削減などが GHG 排出をはじめとする環境負荷の削減にも大きく貢献している (Nagao *et al.*, 2017; GeSI, 2015; JEITA, 2021)。例えば、グローバルレベルでスマートアグリ、スマートモビリティ、スマートビルディングなどを含めた 8 分野に ICT を導入すると、2030 年に 1250Mt-CO₂ が削減できると試算されていた (GeSI, 2015)。この貢献分が ICT 分野自身の GHG 排出量を大きく上回

受付：2022 年 3 月 17 日、受理：2022 年 6 月 22 日

* 〒180-8585 東京都武蔵野市緑町 3-9-11, E-mail: xiaoxi.zhang.bc@hco.ntt.co.jp

ることができれば、ICTの普及が今後の脱炭素対策の一助にもなり得る。

本稿では、第2章においてICT分野の発展動向を概説し、第3章ではこれまでのICTの環境影響評価手法についての関連研究を解説する。また、第4章においてICT分野の電力消費将来推計とICTによるGHG排出削減効果の将来ポテンシャルの推計方法と結果を述べる。最後に、ポストコロナ時代の脱炭素社会の実現に向けてICTが担う役割と可能性、今後の課題などを展望する。

2. ICT分野の発展動向

この20年程、インターネットの普及に伴い、E-commerce、シェアリングサービス、テレワークなどの身近なICTサービスをはじめ、様々な産業・生活分野においてICTが急速に普及してきた。特に新型コロナウイルスの感染拡大に伴う外出自粛などの移動制限が設けられた2020年初頭からは、テレワークやE-commerce、電子決済などのオンラインサービスの利用率が更に大きく上昇してきた(総務省, 2021; OECD, 2021)。さらに、サービス業などにおける接客ロボット、ICTプラットフォームを利用した食事の宅配サービス、拡張現実／仮想現実(AR/VR)技術などを活用したオンライン観光サービスなどの新しいICTサービスも急速に進展してきた(総務省, 2021)。一方、製造業では、AI・IoTの技術進歩によって、スマート農業や、自動ロボット、自動走行車、自動倉庫、3Dプリンター技術、高度な生産情報管理システムなどの利用が拡大し、様々な製造分野における大幅な生産効率の向上と労働代替が実現されつつある(緒方ほか, 2020)。このような変化は、Society5.0で提唱したサイバー空間とフィジカル空間を高度に融合させたシステムによって開かれる社会の実現に向けて少しずつ進んでいると考えられる。ICTの進展が前述のように生産効率や生活の便利さを向上させているのみならず、それらを通じて環境負荷の削減にも貢献している。

3. ICTの環境影響評価手法

ICTの利用に伴う環境影響については、いくつかの種類が考えられる。まず、ICT機器を利用する際には、パソコンやネットワーク機器の電力使用によってGHGを排出する。このようなGHG排出はICT利用の一次効果(あるいは直接効果)と定義されることが多い(情報通信技術委員会, 2013)。一方でICTを利用する分野におけるエネルギー利用効率の向上、及び生産・消費の効率化などを通じてGHG排出を削減する効果があり、これらはICT利用の二次効果と定義されることが多い(情報通信技術委員会, 2013)。さらに、そのほかの効果としては、ICTが

ライフスタイルや多くの産業分野と関連しているため、産業分野間にわたって波及する効果や、より長期的な生産・消費構造の変化がもたらす社会構造の変化による効果、またはエネルギー利用の効率化や移動代替等によって生じたコストや時間の余剰が誘発する新たな活動やエネルギー需要によって引き起こされたGHG排出などといったICT利用のリバウンド効果が挙げられる(張ほか, 2016)。このようにICT利用による環境影響への効果にはいくつかの種類があるが、環境影響への効果を評価する手法についても十数年にわたって開発されてきた(GeSI, 2015; Johanna, 2019; ITU, 2014; ITU, 2019; Nathaniel ほか, 2016)。個別のICTサービスや製品の利用といったミクロレベルにおいては、最もよく使われる手法としてライフサイクルアセスメント(Life Cycle Assessment; LCA)手法が挙げられる(情報通信技術委員会, 2013)。LCA評価においては、対象ICTサービス・製品の環境負荷量と、基準となるICTサービスもしくは従来手段の環境負荷量の差分を評価することで、ICTサービス導入による環境負荷低減効果を算出することができる。LCAを活用した研究例は多数存在している。例えば、Moberg ほか(2011)は、書籍と電子書籍のそれぞれのLCA評価を行い、電子書籍利用による環境影響を試算した。Julia *et al.* (2010)は、従来のショッピング手段と比較したオンラインショップサービスの利用による環境影響の評価を行った。次に、一国やグローバルを対象範囲としたマクロレベルのICT利用による環境影響の評価手法をいくつかをレビューする。Nagao ほか(2017)は、23種のICTサービスを対象として、ICT普及率、該当活動の活動量に対して単位活動による二酸化炭素(CO₂)排出削減量を掛け合わせることで、日本全国におけるICT利用によるCO₂排出削減効果が約4,000万トンであると推計した。JEITA(2021)は脱炭素化に貢献できる5つのデジタル分野を絞って、2030年までの世界需要額の見通しとともに、CO₂削減ポテンシャルを示した。一方で、リバウンド効果に着目した研究として、Ray(2015)は、8つのケーススタディを題材にICT/電子機器の利用によるリバウンド効果は115%~160%にのぼると推計した。

これらの研究は一次効果や、二次効果、リバウンド効果のどれかの側面に着目にした研究がほとんどであり、産業分野をまたいで発生した波及効果及び長期的な生産・消費構造の変化を含めた社会構造変化による影響まで考慮したうえでICTの利用による環境影響の全体像を捉えた研究は少ない。著者ら(Zhang, 2020)は、中長期におけるICTの導入による産業分野をまたいだ波及効果、及び長期的な社会構造変革の影響も評価できるように応用一般均衡モデルを用いた評価モデルを開発した。本稿では、開発したモデルを用いた上で、これまでに大きく懸念

されている今後の ICT 分野電力消費量の推計も検討に加え、ICT 利用による 2030 年までの GHG 排出削減ポテンシャルの分析を行った結果について報告する。

4. ICT 分野の電力消費将来推計と GHG 排出削減効果の将来推計

4.1 ICT 分野の電力消費将来推計

1 章で述べたように、近年の ICT の急速な普及による ICT 分野の電力消費や GHG 排出が大きく懸念されている。グローバルレベルの ICT 分野の電力消費推計として、国際電気通信連合(ITU, 2020)が 2020 年に発行した勧告 L.1470 では、今後、電力のグリーン化(電力分野での排出係数改善)を考慮せず、ICT 機器のエネルギー利用効率改善やネットワーク接続人口・デバイスの増加など ICT 分野のトレンドのみを考慮した場合、2030 年における ICT 分野の GHG 排出は 2015 年の約 1.3 倍になると予測されている。一方、日本国内においては、ICT 分野の電力消費量や GHG 排出量の予測に関する検討事例は非常に少ない(国立研究開発法人科学技術振興機構(JST), 2021)。

そこで本研究では ICT 分野の関連市場レポートから、2005 年からの十数年間における各種 ICT 機器の稼働台数及び電力消費量などを調査し、経年変化の傾向に基づき 2030 年までの ICT 分野の電力消費量を推計した。ICT 分野の推計範囲として、固定／移動ネットワーク機器、データセンターとエンドユーザー機器とした。今回対象とした主な機器及び今後の推計を主に考慮したトレンドを表 1 に示す。ICT 機器ごとの稼働台数の変化は、生産動態統計

(経済産業省, 2021)から過去の年間出荷台数に ICT 機器ごとの寿命を加味した上で表 1 に示した今後の ICT 分野における市場動向を考慮して推計した。ICT 機器ごとの電力消費の変化については、機種ごとの消費電力量から推計する場合には調査が広範にわたるとともに ICT 機器による電力消費の全体像が把握しにくいことから、サーバ機器を代表として ICT 機器の電力消費量と稼働台数の関係を調査することとした。図 1 は過去約 10 年間におけるサーバ機器の稼働台数及び総電力消費量の推移である。対象期間においてはいずれもほぼ横ばいであることが示された(JEITA, 2016)。これは、近年の情報処理量の増加、ICT 機器の情報処理能力の向上及び機器の省エネ性能の改善などの主要要因がほぼ相殺された結果であると考えられる。この結果を踏まえて、本研究では 2030 年までの ICT 分野の電力消費を推計する際に、ICT 機器の単位ユニットあたりの電力消費は現状のまま、+1%/年、+2%/年の 3 つのケースを想定した。それぞれのケースに ICT 機器ごとの稼働台数を乗じることによって、2030 年までの ICT 分野の総電力消費量を推計した。推計結果では、

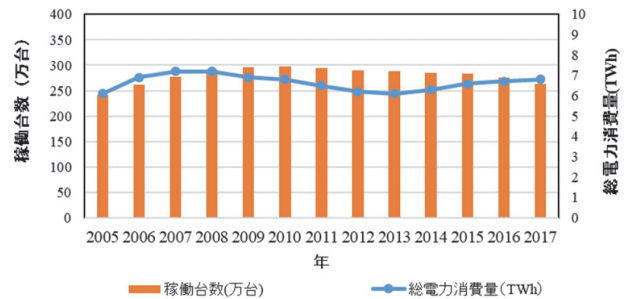


図 1 サーバ機器の稼働台数と総電力消費量。

表 1 対象とした主な機器と主な市場動向。

機器分類		機器種類	今後 ICT 分野における市場動向予想
データセンター	サーバ機器類	汎用コンピュータ(メインフレーム)	NTT グループ(2010)の PSTN から IP 系への移行にあわせて生産量の減少傾向が止まり 2025 年ごろまで生産量が維持される。2025 年以降は、再び減少する。
		ミッドレンジコンピュータ	2017 年まで緩やかに生産量が減少しており、今後もその傾向が続く。
		パーソナルコンピュータ(サーバ機器用)	データセンターについては、2024 年まで年率 14.4% で成長すると予測され(MIC, 2018)、パーソナルコンピュータ(サーバ機器用)も同等で成長する。2025 年～2030 年は横ばい。
ネットワーク	ネットワーク設備	デジタル伝送装置	NTT グループ(2010)の PSTN から IP 系移行にあわせて 2025 年がピーク。
		基地局通信装置	現状のレベルでリプレイスが続く(横ばい)。
エンドユーザー機器	通信用端末	電話機 携帯電話	携帯電話の普及も落ち着き、また、端末持ち込みで携帯電話番号ポータビリティといった販売方法に変更されたことにより新規スマートフォン需要が減少し、生産量が増加することはなく、同等。
	PC	パーソナルコンピュータ	横ばい。
	IoT 用途	テレメータ・テレコントロール、デジタル計装制御システム	年率 5% で成長。

2030 年における ICT 分野の電力消費量は 2020 年の約 1.2～1.5 倍となった。

4.2 ICT 利用による GHG 排出削減量の推計

4.2.1 推計モデル

ICT 機器自身が電力を消費する一方で、多くの利用分野においてはエネルギー利用効率の向上や、人・物の移動削減によるエネルギー消費削減などの効果が見込まれる。著者らは、日本を対象とした応用一般均衡モデル AIM/CGE[Japan] (Masui ほか, 2003) を基に ICT 利用による GHG 排出削減ポテンシャルと経済への貢献を推計するためのモデルを開発した。そして、36 種類の ICT サービスを対象に、2030 年までの GHG 排出削減ポテンシャルと経済成長への効果を推計した。

開発したモデルは逐次均衡型動学応用一般均衡モデルである。モデルは 2005 年を基準年とし、2005 年の産業連関表を使用して 49 部門 43 財・サービスに統合した。モデルは生産部門、最終消費部門、各市場と外国部門の 4 ブロックによって構成されている。各生産部門は、資本、労働、原材料、エネルギーを投入要素として、代表的な財を産出している。最終消費部門では、保有する資本、労働を生産部門に提供し、その対価として所得を得る。各市場では、価格メカニズムに基づいて需給をバランスし、財・サービスの価格を決定する。ICT のモデルへの組み込みについては、ICT サービスを導入した生産部門と最終消費部門では生産消費効率が向上されるものとした。生産消費効率の向上とは、例えば、単位生産あたりの原材料投入、あるいは労働力投入の削減などが挙げられる。

動学過程では、基準年である 2005 年について計算を行い、投資等によって翌年である 2006 年の資本ストックが決定され、また、新規及び既存の資本

ストック量と各ストック量に対する技術水準から 2006 年の各種効率水準を算出した。準備した技術水準を用いて 2006 年の均衡計算を行ない、2006 年の結果を用いて 2007 年の計算を行なった。このように、1 年ごとに均衡計算を行なった (図 2)。また、将来の技術進歩についてのシナリオは、新規に投入される資本を対象に想定し、資本投資が各部門に蓄積されることで技術進歩が実現するものとしている。ICT サービスが普及する過程も同様に、ICT サービスを提供する資本が新規投資として投入されることを通じて実現されている。

4.2.2 対象 ICT サービス

本研究における推計では、6 産業分野における 36 種類の ICT サービスを対象とした。表 2 では各産業分類から 1, 2 サービスを代表として選び、ICT 導入による想定効果及び 2030 年までの普及率の想定を示した。普及率については、過去の統計データがあるサービスに対しては普及率近似曲線を外挿することによって、2030 年までの普及率を推計した。過去データが揃わないサービスに対しては、市場予測レポートを参考に普及率を仮定した (NEDO, 2016; 総務省, 2021)。

4.2.3 将来シナリオ

将来における ICT の利用による環境及び経済への影響を推計するために、ここでは 2030 年までに ICT サービスの普及が現状から進展しないなりゆき (BAU) シナリオ、ならびに ICT サービスの提供が可能な資本が導入される ICT 進展シナリオの 2 種類のシナリオを設定した。また、分析を行うための GDP 及び人口などの前提条件は、国連気候変動枠組条約第 21 回締約国会議 (COP21) に日本政府から提出された約束草案 (環境省, 2015) を決定した際に用いた想定を利用した。ICT 進展シナリオでは、2030 年ま

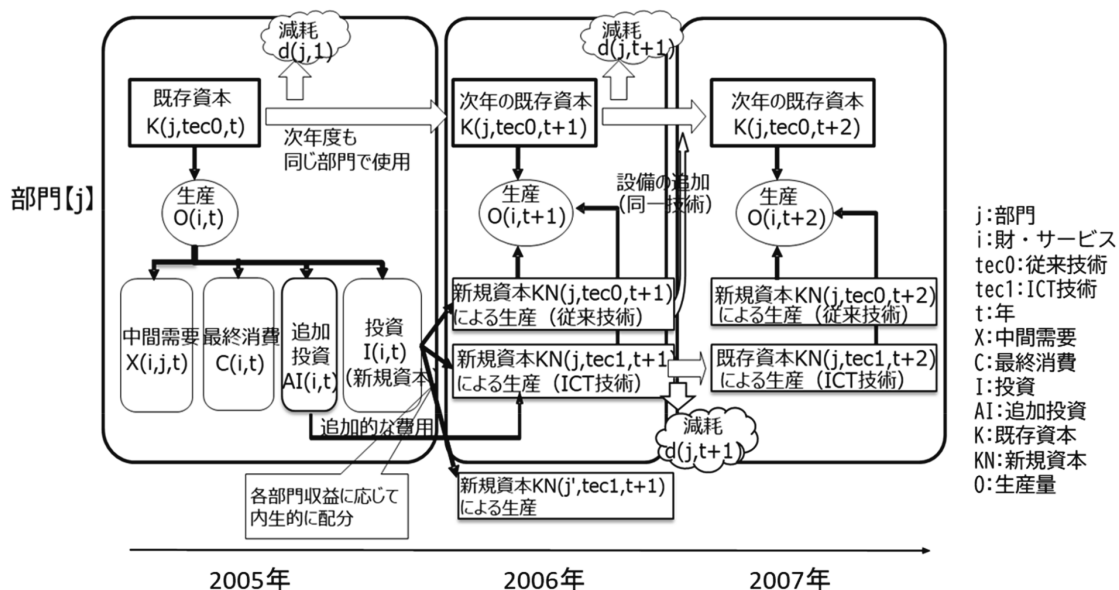


図2 モデルの動学過程。

表2 代表的な対象 ICT サービス・導入効果及び各サービスの普及率推計.

産業分類	ICT サービス	主な導入効果	2030 年までのシナリオ		
			普及率 指標	BAU シナリオ (2015 水準)	ICT シナリオ
(A)金融	キャッシュレス 決済	店舗の日常的な業務管理のコスト削減と運営 効率向上, 銀行の ATM 管理・運営コスト削減	導入率	18%	50%
(B)公共サービス	電子入札	移動削減	電子入札 件数	83,000	960,000
(C)製造	スマート工場	生産性改善, 設備稼働率向上	普及率	0%	50%
	電子調達	運用コスト削減	普及率	0%	50%
(D)流通	B to C E-commerce (EC)	中間流通, 小売り販売の不要化, 在庫スパー ス増加, 販売物流増加	EC 率	6%	12%
	無人店舗	小売業の労働力投入削減	普及率	0%	10%
	AI 物流	物流の自動化による労働生産性向上	普及率	0%	50%
(E)社会インフラ	AI による 電力需要予測	電力需要予測の高度化による発電効率の向上	導入率	0%	50%
(F)その他 農業, 医療	スマートアグリ	センサーデータの分析による収穫量向上, ロボットの導入による省力化・労働力削減	普及率	0%	50%
	電子処方箋 薬手帳	紙の削減	普及率	0%	100%
(M)共通	テレワーク	通勤移動削減, オフィス需要削減	利用率	15%	34%

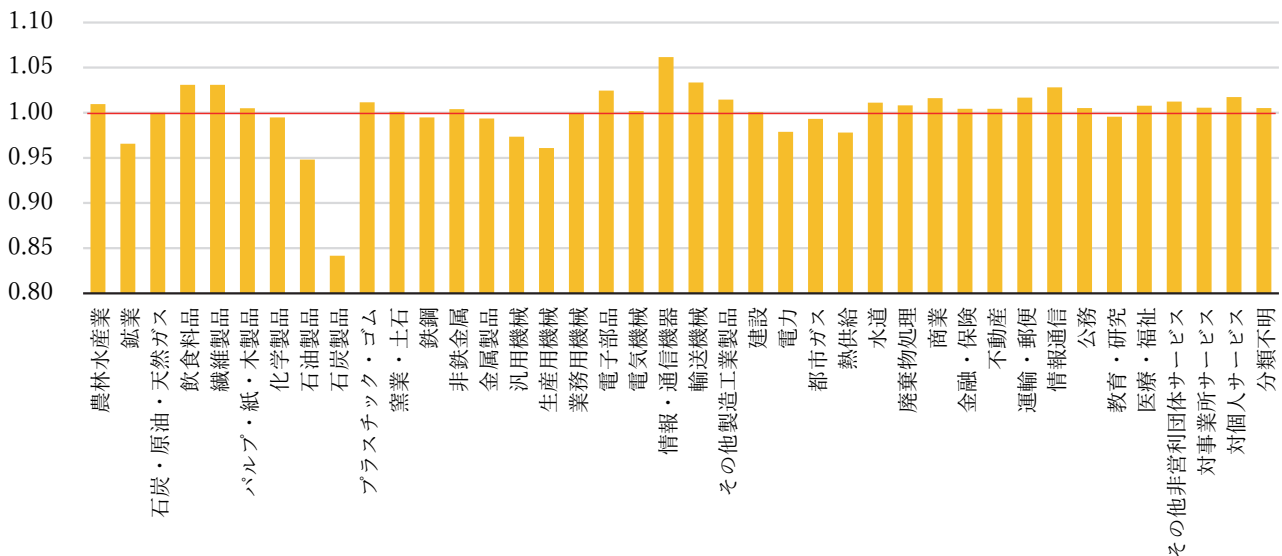


図3 2030 年に BAU シナリオでの部門別生産額を 1 とした場合の ICT 進展シナリオでの生産額相対値.

での各種 ICT サービスの普及率や導入効果(表2), また4.1節で述べた ICT 分野自身の電力消費量の増加(+2%/年)を各種投入係数としてモデルに組み入れた。

4.2.4 推計結果

ICT 進展シナリオでは, BAU シナリオと比較すると, 2030 年において総 GDP の 1.3% の増加と GHG 排出量の 4.7% の減少が見られ, 経済成長と環境負荷発生のデカップリングの可能性が示された。主な原因としては, ICT 分野の電力消費が日本の電力消費のうちのわずか数パーセントにしか満たない量であるため, その増加が ICT の導入により他の部門における中間投入の減少でオフセットされたと考えら

れる。図3は部門別生産額のシナリオ相対比較を示す。ICT 推進シナリオにおいては情報通信機器及び情報通信部門の生産額が増加するだけでなく, 多くのサービス部門において生産額の増加が見られた。この理由としては, AI などの ICT サービスの導入により, 単位あたりの生産に必要なとなる労働力が減るため, 生産効率が向上したことが考えられる。また, GDP 総額の増加により家計の所得も増加し, 最終消費に直接つながる飲食料品などの部門においても生産額の増加が見られた。一方で ICT の導入に伴い, 生産の効率化による中間投入の削減や, 移動需要削減に伴う輸送需要の削減などにより, 鉱業や石油石炭及び生産機械などの部門においては生産額の

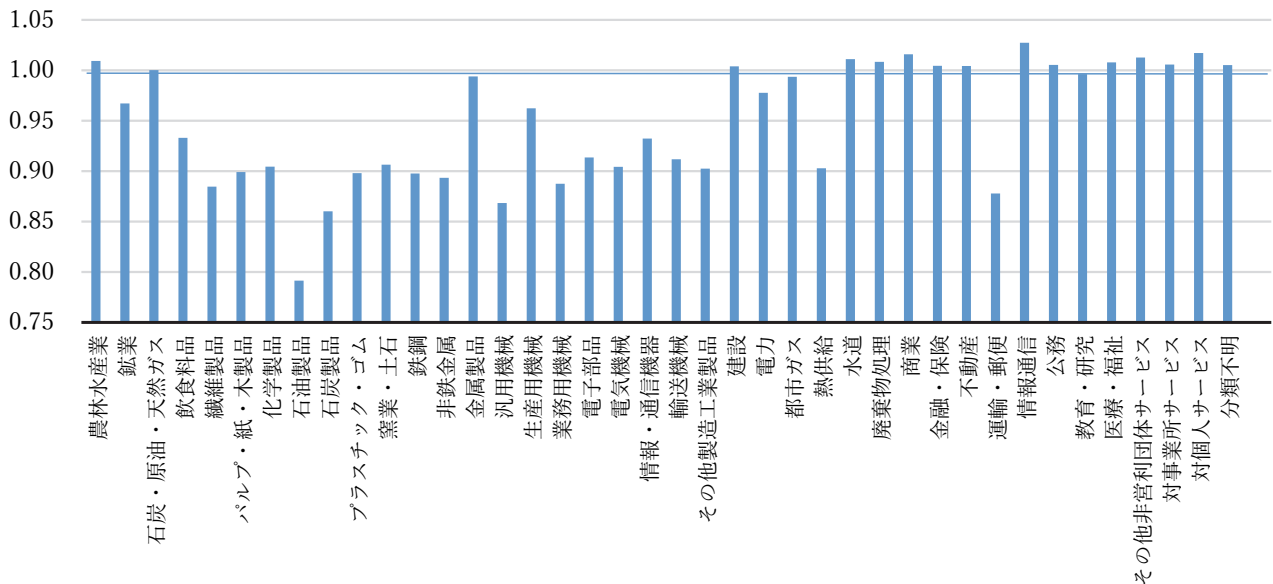


図4 2030年にBAUシナリオでの部門別GHG排出量を1とした場合のICT進展シナリオでの排出量相対値。

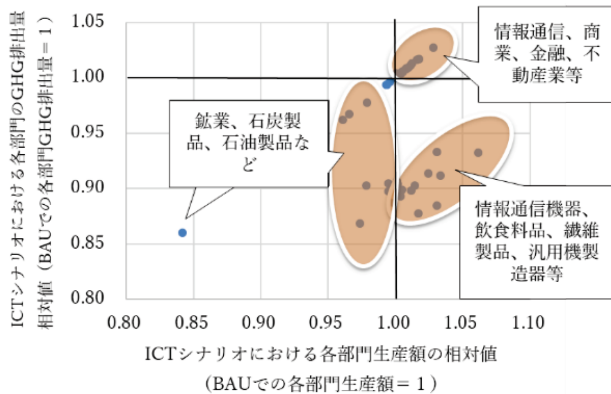


図5 2030年ICT進展シナリオにおける各部門の生産額・GHG排出量変化率。
(BAUシナリオでの各部門の生産額・GHG排出量=1)

減少が見られた。2030年における部門別GHG排出量のシナリオ相対比較(図4)においては、過半数の部門においてGHG排出が減少しており、特に、石油石炭、鉄鋼、非鉄金属、輸送部門における減少が顕著であることが分かった。また、2030年におけるBAUシナリオでの各部門の生産額・GHG排出量を1とした場合のICT進展シナリオにおける各部門の生産額・GHG排出量の相対値を示した図5からも前述した傾向がよく読み取れた。

今回の推計結果から、ICTの導入が生産性を向上させるとともに、石油や石炭関連部門の需要を抑えられる可能性が示唆され、今後、脱炭素社会の実現に向けたICTの役割を示すことができた。

5. 終わりに

本稿では、ICTの環境影響評価手法の解説と共に、中長期におけるICT分野の将来電力消費を考慮

した上で、ICT利用による社会のGHG排出削減量ポテンシャルについて日本国内における36種類のICTサービスを対象として推計した。推計結果から、ICTの導入により、生産効率の向上、労働力削減、及び移動の削減などを通じてGDP成長を推進すると同時にGHG排出量を削減できる可能性が示された。

今後、Covid-19を経てICTがこれまで以上の速度で普及されることが予想される中で、様々な可能性を含めてICT導入による環境影響の評価・推計に関しても企業活動やライフスタイルなど様々な観点からより多くの研究が進展することが期待される。ICTの利用により、経済発展や生活の利便性向上のみならず、今後の持続可能な社会発展の実現に向けても大きな貢献が期待される。

謝 辞

本研究は、(独)環境再生保全機構の環境研究総合推進費JPMEERF20201002により実施した。ここに謝意を表する。

引用文献

- Åsa M., Clara B. and Göran, F. (2011) Books from an environmental perspective – Part 2: ebooks as an alternative to paper books. In: *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 16, 238-246.
- Cisco (2021) Cisco Annual Internet Report. <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/executive-perspectives/annual-internet-report/index.html> (2022年6月28日確認)
- EC (European Commission) (2018) A Clean Planet

- for All. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52018DC0773>
- Edwards, J. B., McKinnon, A. C. and Cullinane, S. L. (2010) Comparative analysis of the carbon footprints of conventional and online retailing: A last mile perspective. *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, 40, 103-123.
- 外務省(2021)日本のNDC(国が決定する貢献). <https://www.mofa.go.jp/mofaj/files/100285591.pdf>(2022年6月28日確認)
- Google (2019) Google environmental report. <https://sustainability.google/reports/environmental-report-2019/#data-centers>(2022年6月28日確認)
- Google (2022) GHG emission reduction targets. <https://sustainability.google/commitments-europe/>(2022年6月28日確認)
- GeSI (Global e-Sustainability Initiative) (2015) SMARTer2030-ICT Solutions for 21st Century Challenges. <http://smarter2030.gesi.org/>(2022年6月28日確認)
- Horner, N. C., Shehabi, A. and Azevedo, I. L. (2016) Known unknowns: indirect energy effects of information and communication technology. *Environmental Research Letters*, 11, 103001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/10/103001>
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2018) Special Report Global Warming of 1.5°C. <https://www.ipcc.ch/sr15/>(2022年6月28日確認)
- IPCC (2022) Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-ii/>(2022年6月28日確認)
- ITU (International Telecommunication Union) (2014) L.1410: Methodology for environmental life cycle assessment (LCA) of information and communication (ICT) goods, networks and services, Geneva: ITU.
- ITU (2019) L.1451: Methodology for assessing the aggregated positive sector-level impacts of ICT in other sectors, Geneva: ITU.
- ITU (2020) L.1470 Greenhouse gas emissions trajectories for the information and communication technology sector compatible with the UNFCCC Paris Agreement, Geneva: ITU.
- JEITA(2016)IT機器のトレンド・エネルギー効率の現状と今後. <https://home.jeita.or.jp/greenit-pc/activity/seminar/160708/pdf/3-1.pdf>(2022年6月28日確認)
- JEITA(2021)注目分野に関する動向調査 2021. <https://www.jeita.or.jp/cgi-bin/public/detail.cgi?id=846&cateid=1>(2022年6月28日確認)
- 情報通信技術委員会(2013)JT-L1410 ICT製品・ネットワーク・サービスの環境影響評価手法.
- 環境省(2015)Submission of Japan's Intended Nationally Determined Contribution (INDC). <https://www.env.go.jp/en/earth/cc/2030indc.html>(2022年6月28日確認)
- 経済産業省(2021)生産動態統計調査. <https://www.meti.go.jp/statistics/tyo/seidou/index.html>(2022年6月28日確認)
- 国立研究開発法人科学技術振興機構(JST)(2021)情報化社会の進展がエネルギー消費に与える影響(Vol.3). <https://www.jst.go.jp/lcs/pdf/fy2020-pp-03.pdf>(2022年6月28日確認)
- Masui, T., Rana, A. and Matsuoka, Y. (2003) AIM/Material Model. In: Kainuma, M., Matsuoka, Y. and Morita, T. (eds.) *Climate Policy Assessment*, 177-196. <https://doi.org/10.1007/978-4-431-53985-8>
- ミック経済研究所(MIC)(2018)クラウドSI市場の実態と展望 2018年版.
- Nagao, T., Hara, M., Hannoe, S. and Nakamura, J. (2017) Estimation of reduction in CO₂ emissions by using ICT throughout Japan. In: Matsumoto, M., Masui, K., Fukushige, S. and Kondoh, S. (eds) *Sustainability through Innovation in Product Life Cycle Design*, 633-649. https://doi.org/10.1007/978-981-10-0471-1_43
- NEDO(2016)次世代人口知能技術実装ビジョン. <https://www.nedo.go.jp/content/100782828.pdf>(2022年6月28日確認)
- NTT(2010)PSTN Migration General Outlook. https://www.nttwest.co.jp/news_e/1011/pdf/101102a_1.pdf(2022年6月28日確認)
- OECD(2021)Teleworking in the COVID-19 pandemic: Trends and prospects. <https://www.oecd.org/coronavirus/policy-responses/teleworking-in-the-covid-19-pandemic-trends-and-prospects-72a416b6/>(2022年6月28日確認)
- 緒方真一ほか70名(2020)テクノロジー・ロードマップ 2020-2029, ICT融合新産業(編), 東京.
- Pohl, J., Hilty, L. M. and Finkbeiner, M. (2019) How LCA contributes to the environmental assessment of higher order effects of ICT application: A review of different approaches. *Journal of Cleaner Production*, 219, 698-712. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.018>
- Ray G. (2015) The ICT/electronics question: structural change and the rebound effect. *Ecological Economics*, 120, 23-31. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2015.08.020>
- 総務省(2021)令和3年版情報通信白書, 東京.
- UNFCCC(2015)The Paris Agreement. <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>(2022年6月28日確認)
- Whitehouse (2021) The Long-term Strategy of the

United States. <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2021/10/US-Long-Term-Strategy.pdf>(2022年6月28日確認)

張 曉曦・原 美永子・篠塚真智子・飯橋真輔(2016) ICT利用によるリバウンド効果の評価に関する検討, 電子情報通信学会 2016年ソサイエティ大会講演論文集.

Zhang, X., Shinozuka, M., Tanaka, Y., Kanamori, Y. and Masui, T. (2020) Forecast of future impacts of using ICT services on GHG emissions reduction and GDP growth in Japan. *In*: Kishita, Y., Matsumoto, M., Inoue, M. and Fukushige, S. (eds.) *EcoDesign and Sustainability II. Sustainable Production, Life Cycle Engineering and Management*, 207-222. https://doi.org/10.1007/978-981-15-6775-9_14



張 曉曦／Xiaoxi ZHANG

NTT 宇宙環境エネルギー研究所 ESG 経営科学技術グループ 主任研究員。2009 年東京工業大学社会理工学研究科修士課程修了。同年 NTT に入社後、通信設備のリスクベースマネジメント手法や、ICT の環境影響評価手法などの研究開発及び国際標準化活動に従事。現在、ESG 経営科学・未来予測技術に関する研究を中心に取り組んでいる。2019 年 Ecodesign 国際会議 Best paper Award を受賞。



篠塚 真智子／Machiko SHINOZUKA

2015 年に慶應義塾大学大学院理工学研究科博士前期過程修了。修士(工学)。

現在は、日本電信電話株式会社 宇宙環境エネルギー研究所・レジリエント環境適応研究プロジェクトに所属。入社以来 ICT サービスの環境影響評価に従事し、現在は人々のライフスタイルに着目した環境・社会シミュレーションの研究を行っている。



原 美永子／Minako HARA

東京大学大学院工学系研究科応用科学専攻後期博士課程修了。専門分野は、環境影響評価手法(LCA)、リサイクル技術。東京大学生産技術研究所、科学技術振興機構プロジェクト研究員を経て、2006 年より日本電信電話株式会社(NTT)にて環境、エネルギー分野の研究及び国際標準化活動に従事。

2016 年 7 月より西日本電信電話株式会社にて NTT 西日本グループの環境経営戦略策定に従事、2019 年 9 月に脱炭素を軸とした新たな環境目標を策定。2020 年 8 月より NTT 宇宙環境エネルギー研究所に転籍、2021 年 4 月より ESG 経営科学技術グループリーダー。