



The Canon Institute for Global Studies

CIGS Working Paper Series No. 17-006J

汎用的技術の進歩による地球温暖化 問題解決への展望について

杉山大志

キャノングローバル戦略研究所

2017.11

※Opinions expressed or implied in the CIGS Working Paper Series are solely those of the author, and do not necessarily represent the views of the CIGS or its sponsor.
※CIGS Working Paper Series is circulated in order to stimulate lively discussion and comments.
※Copyright belongs to the author(s) of each paper unless stated otherwise.

General Incorporated Foundation

The Canon Institute for Global Studies

一般財団法人 キャノングローバル戦略研究所

Phone: +81-3-6213-0550 <http://www.canon-igs.org>

要約

情報通信技術（ICT）等の汎用的技術(GPT)の急速な進歩が、温暖化対策技術のコスト低下をもたらしている。これにより、自動車部門を初めとした経済活動全般において、大規模な温室効果ガス排出削減が可能になりつつある。温暖化防止政策はこの構造を理解した上で設計しなければならない。必須の要件は、汎用的技術の進歩を促進し、妨げないことである。

目次

1	なぜイノベーションが必要か	1
2	現在起きている急速な技術進歩の本質	1
3	汎用的技術の急速な進歩による大規模な温室効果ガス排出削減の見通し	2
4	温暖化対策を直接の目的としたイノベーション推進における政府の役割	5
5	汎用的技術イノベーションの推進における政府の役割	6
	参考文献	6

1 なぜイノベーションが必要か

地球温暖化問題を解決するためには、大幅な温室効果ガス排出削減が必要とされている(Cl Clarke et al., 2014)(杉山大志, 2017d)。このためには、エネルギー分野等における様々な技術のイノベーションが欠かせない(van Sluisveld et al., 2015)(Peters et al., 2017)(杉山大志, 2017c)。

2 現在起きている急速な技術進歩の本質

ここ10年ほどの間に、太陽光発電のコストは急速に減少してきた(IEA, 2017)。だが、これは例外的なものではない。急激なコスト減少は、蓄電池(Nykvist & Nilsson, 2015)、車載用燃料電池(Iguma, 2015)、シェールガス・オイル開発技術(Mills, 2015)等の他のエネルギー技術についても見られた。のみならず、急激なコスト減少は、人工知能（Artificial Intelligence, AI）、センサー、インターネット通信、情報記憶装置、MEMS(Micro Electro

Mechanical Systems)等の多くの情報通信技術(Information and Communication Technology, ICT)でも観察されている(Holdowsky, Mahto, Raynor, & Cotteleer, 2015)(Manyika et al., 2015)。これらは通常は所謂「温暖化対策技術」とは分類されないが、例えばエネルギー効率の高い空調・照明技術や、温室効果ガスの少ない精密農業などの形で、温室効果ガスの削減に大きく寄与する。

以上のような急速な進歩の原動力は、ICT (AI, IOT 等)、ナノテクノロジー、バイオテクノロジーなどの汎用的技術の共進化である(OECD, 2017)(World Economic Forum, 2015)。汎用的技術とは、1) 多くの経済部門で共通して利用されるもので(pervasive)、2) それ自体に長足の進歩の可能性があり、かつ3) 補完的なイノベーションを誘発し収穫逓増をもたらす技術、と定義される(Bresnahan & Trajtenberg, 1995)。新しい技術は古い技術の組み合わせで生まれる。技術システムは全体として、複雑系として共進化する。技術進歩には蓄積性があり、技術は互いに影響を与えながら、進歩をますます加速させる(Arthur, 2009)(Kauffman, 2000)。共進化の簡単な例を挙げると、計算機の発達によって、材料のナノスケールのシミュレーションができるようになり、これによって微細加工技術が発達し、更に計算機の能力が発達してきた。以上を活用して、太陽電池、燃料電池、シェールガス・石油採掘技術等が進歩してきた。

3 汎用的技術の急速な進歩による大規模な温室効果ガス排出削減の見通し

汎用的技術について急速な進歩が現に観測され、今後も加速すると見られていることから、その活用によって大規模な温室効果ガス削減が可能ではないかという議論が起きている。

産業界のビジョン

産業界のビジョンを示すものとしては、例えば世界のエレクトロニクス産業の業界団体である Global e-Sustainable Initiative (GeSI)は ICT による 2030 年における温室効果ガス排出の削減ポテンシャルを、世界全体の4分の1に上ると推計している(GeSI, 2015)。これは利用事例毎の積み上げによって求めた数値である。利用事例としては、例えば ICT の使用によって病院における医療行為を代替する「e-Health」によって、病院における温室効果ガス排出削減量を削減するとしている。また世界規模の業界団体である World Business Council for Sustainable Development (WBCSD)は農業のスマート化によって、2030年までに農業起源の温室効果ガス排出量をベースライン比で30%以上削減するという目標を掲げている(WBCSD, 2015)。

運輸部門

学術的な検討としては、運輸部門については、自動運転・電気自動車・カーシェアリングの3つの組み合わせによって、乗用車部門からの温室効果ガス排出削減を大幅に減らすこ

とができるとする見積もりがある (Viegas, Martinez, Crist, & Masterson, 2016) (Greenblatt & Saxena, 2015) (OECD/ITF, 2015)。中には、2050 年時点で、世界全体の乗用車による温室効果ガス排出の 80% を削減できるとする報告もある (Fulton et al., 2017)。大幅な排出削減が可能になるのは、電化によって低炭素の電源を活用すること、自動運転やカーシェアリングによって渋滞の緩和等による効率向上が図れるためとされる。ただし、利便性の向上によって温室効果ガス排出がかえって増大する可能性もあり、大幅な排出削減を可能にするには、リバウンド効果を抑制する適切な政策介入が必要となる (Wadud, MacKenzie, & Leiby, 2016)。貨物部門についても、ICT の活用による効率向上と物流の最適化、電化等の燃料転換によって、75% の温室効果ガス排出削減が可能という見積もりがある。大型トラックの電化としては、高速道路へ架線を設置し給電するシステムが有望とされている (IEA, 2017b)。架線から給電する自動運転トラックは既に鉱山で利用されている。

産業部門

汎用的技術の活用による生産性の向上は、産業部門や民生部門でも同様に起きており、また今後も急速な発展が期待される (World Economic Forum, 2015) (Snatkin, Karjust, Majak, Aruväli, & Eiskop, 2013)。温室効果ガス排出の削減は、運輸部門と同様に、エネルギー・資源の利用効率向上に加えて、①電化、②自動化、③コネクティビティによって可能になる。②の自動化とは換言すれば知能化ないし AI の活用であり、③のコネクティビティとは換言すれば IOT であり、機器のシェアリングもこれによって可能になる。より印象的に言えば、①電化、②AI、③IOT と言っても良い。

例えば IOT によって工場の操業の効率最適化がなされるようになった (Manyika et al., 2015)。ICT の利用には勿論電力消費を伴うが、その利用で実現される省エネ効果の方が大幅に大きいのが普通であったし、計算能力の向上により今後はさらなる向上が期待される (Kooimey, Matthews, & Williams, 2013) (GeSI, 2015)。IOT の活用で企業は製品を売るだけでなくサービスを売ることが出来るようになり、これはライフサイクルベースで見たエネルギー・資源効率の向上に寄与する (IEA, 2017)。産業用ロボットの導入は自動車、電機産業を中心に進んできたが、今後はより広範な産業部門への導入が期待されており (World Robotics Organization, 2014)、これもエネルギー・資源効率の向上に寄与する。これらの技術進歩によって経済システム、特に雇用に大きな影響が出ることが予想されているが (Brynjolfsson & McAfee, 2011) (M. R. Ford, 2009)、それだけ大きな経済的な変化が起きるということは、裏を返せば、エネルギーおよび温室効果ガス排出への影響も大きいということであろう。

既に航空機部品の多くは 3D プリンタと遺伝的アルゴリズムの活用によって生産されるようになり、機体の軽量化による省エネを実現している。3D プリンタには多様な技術があり、製造時には電力多消費の場合もあるが、斬新な設計が可能になることから、軽量化や流体力学的特性の向上によって、使用時のエネルギー消費を減らすことが出来て、ライフサイ

クルベースでは大幅な温室効果ガス削減をもたらす(OECD, 2017)(Beyer, 2014)(Faludi, Bayley, Bhogal, & Iribarne, 2015)。

農業部門では家畜からのメタン排出抑制剤等のバイオテクノロジーや ICT を活用した精密農業(precision agriculture)によって、コスト低減と温室効果ガス削減の同時達成が可能になる(Wollenberg et al., 2016)。精密農業では、最適化された農薬投入・散水によってエネルギー・資源効率が高まるとともに、過剰な農薬投入を避けることで温室効果ガスの1つである亜酸化窒素の発生が抑制できる(Brown, Dillon, Schieffer, & Shockley, 2016)。米国ではすでにトウモロコシ農家等において精密農業が普及しているが、これは経済利潤が動機になってきた(Schimmelpfennig & Ebel, 2016) (Pierpaoli, Carli, Pignatti, & Canavari, 2013)。

民生部門

民生部門においても、アマゾン効果と言われるように、e-コマースによって、物流の効率が向上し、これによる排出削減の可能性がある。医療、教育、他の公共サービスも電子化されることで公立が向上し、排出削減につながる(IEA, 2017)(GeSI, 2015)。照明(IEA, 2016)や空調(IEA, 2017)のスマート化による省エネも図られている。

エネルギー部門

エネルギー部門については、既述の再生可能エネルギー・蓄電・省エネの他に、核融合のためのプラズマ閉じ込めへの人工知能の応用や(Baltz et al., 2017)、IOT による原子力発電・火力発電・送配電システムの維持管理の向上等、あらゆる技術への応用が進んでいる。なお原子力発電は米仏などでは安全規制強化などでコストが向上しているが、韓国・ベトナムなどをふくめた世界全体で見れば、あらゆる技術がそうであるように、コストは低減している(Lovering, Yip, & Nordhaus, 2016)。再生可能エネルギー100%のエネルギーないし電力システムは、現在の技術では実現困難であるが(Heard, Brook, Wigley, & Bradshaw, 2017)。今後、蓄電池や電力系統管理等のイノベーションによるブレークスルーが期待されている(IEA, 2017)。

小括

以上に述べたような技術は何れも温室効果ガスの排出削減につながると期待できる。だが、排出削減量を見積もるとなると、個々の技術の仕様・コスト・普及量の見通しや、誘発される人間活動の変化を推計しなければならず、容易ではない。仮に良い技術が出来ても上手くビジネスモデルが確立出来ない場合もある(Linder & Williander, 2017)。以上の理由により、大幅な排出削減という推計から、リバウンド効果によって逆に排出が増加するという推計まで、計算結果には大きな不確実性が伴う(Larson & Zhao, 2017)。

のみならず、2030年、2050年ともなると、どのような技術が普及をするか予想すること

も出来ないが、しかしながら、それによるエネルギー消費・温室効果ガス排出への効果が極めて大きい可能性がある。例えば、人工知能を搭載したロボットがオフィスや家庭に普及すると、大幅な省エネが可能になるのではないかと。あるいは、太陽光発電等の設置工事の大半をロボットが担うようになれば、太陽光発電は更に安価になるのではないかと。2030年や2050年のAIがどの程度賢いかは予言できないため、これによる排出削減量もコストも予言は難しい。

このような不確実性があるため、運輸部門を例外として、経済全体あるいは部門全体としての程度の温室効果ガス排出削減が可能であるかという定量的な見積もりは、今のところ学術論文としては殆ど存在しない。これに挑む野心的な研究が待たれるところである。

なお地球温暖化によって自然災害が引き起こされた場合の適応(adaptation)についても、汎用的技術の進歩による便益は大きいと思われる。既に、ICTの活用によって、暴風雨、害虫被害、大気汚染等の災害の予測、早期警報、緊急情報通信、事後検証、及び予防教育は長足の進歩を遂げ、これによって災害への脆弱性は大幅に軽減した。今後もその寄与は極めて大きいと思われる(Eakin et al., 2015)(Upadhyay & Bijalwan, 2015)(Lu et al., 2016)(J. D. Ford et al., 2016)(Kryvasheyev et al., 2016)。

4 温暖化対策を直接の目的としたイノベーション推進における政府の役割

エネルギー技術進歩をもたらすための政府の役割としては、研究開発補助金等によるテクノロジー・プッシュと、設備導入補助金等によるデマンドプルが必要である。これは、環境外部性と、専有可能性¹という二重の外部性に対処するために必要である(Ottmar Edenhofer, 2014)(Global Energy Assessment, 2012)(Mazzucato & Semieniuk, 2017)。ただし政府は技術の選択に成功するとは限らないため、既存技術に偏重することなく広範なポートフォリオを持つ必要がある(Kverndokk & Rosendahl, 2007)。

各国は技術開発を国益と考えて推進するため、技術開発には自然と国際協調が芽生え、排出削減交渉やカーボンプライシングが典型的に直面する共有地の悲劇の問題から解放されるというメリットがある(Fischer, Greener, & Rosendahl, 2017)(Faehn & Isaksen, 2016)(Lachapelle, MacNeil, & Paterson, 2017)(杉山大志, 2017a)。例えばブラジルは国益としてバイオ技術開発と技術移転を推進した(Favretto, Stringer, Buckeridge, & Afionis, 2017)。また国際条約とは無関係に新興国への技術移転は進んだ。新興国政府は技術の吸収に熱心であり、私企業も競争力確保のために技術移転を盛んに行ったためである(Glachant & Dechezleprêtre, 2016)。これに対してEUETSの技術開発への効果は限定的だった(Calel & Dechezleprêtre, 2016)。諸国政府は、ICTなどの汎用的技術の推進により、経済便益を

¹ 政府介入が無い場合、技術開発の費用は一企業が負うが、技術開発の便益は社会全般に広まるため、技術開発投資の総計は社会全体から見た望ましい水準を下回ることになる。これを専有可能性の問題という。

含む多くの社会的課題の解決を目指しており、温暖化問題はそのような社会的課題の一つと位置付けられている(OECD, 2017)。

なお、温暖化対策イノベーションを促すための投資には、他の政策課題とのシナジーのみならず、トレードオフもあるので、配慮が必要である。大規模な温室効果ガス排出削減のための巨額の投資は、コベネフィット、つまり他の政策課題とのシナジーを実現しつつ可能であるという考え方が、しばしば主張される(IPCC, 2014)(Kennedy & Corfee-Morlot, 2013)。しかし、多くの場合に、トレードオフも存在する。例えば新たなエネルギー技術導入のために、逆進性のある形で生活費が高くなり、貧困問題が悪化する危険が指摘されている(Herrero, Strengers, & Nicholls, 2018)。また、都市計画は温暖化対策と密接に関わり、そこでは政府の役割が重要になるが、多様な利益とのトレードオフがあるために、温暖化対策を理由として大規模な変革をすることは難しく、漸進的なインフラの改善が見られる傾向にあるという(Monstadt & Wolff, 2015)。

5 汎用的技術イノベーションの推進における政府の役割

以上はいわゆる温暖化対策技術の推進に関する議論であったが、前述したように、今後は、汎用的技術の進歩がますます急速になり、多くの優れた温暖化対策の技術イノベーションがそこから派生するという構図で現れることになるだろう。このため、政府の役割としては、地球温暖化という単一の政策目的を追求する技術開発だけではなく、むしろ、汎用的技術を核として科学技術全般を推進することが重要であり、そのための制度設計が望まれる(杉山大志, 2017b)(Sugiyama & Laitner, 2017)。ここでは、基礎研究の推進によって全く新しい技術の開発を促すことや(Shayegh, Sanchez, & Caldeira, 2017)、多彩な分野の技術を持った大小様々な企業の蓄積からなるイノベーション・エコシステムが活発に活動できるような経済環境を作ること、等が重要である(Tassef, 2014)。最後の点については、温暖化対策が、かかる経済環境の形成を阻害しないように配慮が必要である。

今後も、これまで同様、汎用的技術を核とした科学技術全般の進歩によって、所得向上を筆頭として、人類のあらゆる福祉の向上が期待されている(WIPO, 2017)(WorldBank, 2016)。なお ICT は GDP 向上をもたらしていないという意見もあるが(Šmihula, 2009)、これには現在の GDP の計測上の課題もあり(Mandel, 2012)、福祉の水準としては確実に向上している。結局のところ、温暖化対策技術の進歩や、それによって可能となる排出削減の規模は、汎用的技術の進捗の如何に大きく依存するだろう。

参考文献

Arthur, W. B. (2009). *The nature of technology: What it is and how it evolves*. New York:

Free Press.

- Baltz, E. A., Trask, E., Binderbauer, M., Dikovsky, M., Gota, H., Mendoza, R., ... Riley, P. F. (2017). Achievement of Sustained Net Plasma Heating in a Fusion Experiment with the Optometrist Algorithm. *Scientific Reports*, 7(1), 6425.
<https://doi.org/10.1038/s41598-017-06645-7>
- Beyer, C. (2014). Strategic Implications of Current Trends in Additive Manufacturing. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 136(6), 64701.
<https://doi.org/10.1115/1.4028599>
- Bresnahan, T. F., & Trajtenberg, M. (1995). General purpose technologies “Engines of growth”? *Journal of Econometrics*, 65(1), 83–108.
- Brown, R. M., Dillon, C. R., Schieffer, J., & Shockley, J. M. (2016). The carbon footprint and economic impact of precision agriculture technology on a corn and soybean farm. *Journal of Environmental Economics and Policy*, 5(3), 335–348.
<https://doi.org/10.1080/21606544.2015.1090932>
- Brynjolfsson, E., & McAfee, A. (2011). *Race against the machine: How the digital revolution is accelerating innovation, driving productivity, and irreversibly transforming employment and the economy*. Digital Frontier Press.
- Calel, R., & Dechezleprêtre, A. (2016). Environmental Policy and Directed Technological Change: Evidence from the European Carbon Market. *Review of Economics and Statistics*, 98(1), 173–191. https://doi.org/10.1162/REST_a_00470
- Clarke, L., Jiang, K., Akimoto, K., Babiker, M., Blanford, G., Fisher-Vanden, K., ... van Vuuren, D. P. (2014). Assessing transformation pathways. In T. Z. and J. C. M. (eds. . Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow (Ed.), *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 413–510). Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- Eakin, H., Wightman, P. M., Hsu, D., Gil Ramón, V. R., Fuentes-Contreras, E., Cox, M. P., ... Kammen, D. M. (2015). Information and communication technologies and climate change adaptation in Latin America and the Caribbean: a framework for action. *Climate and Development*, 7(3), 208–222.
<https://doi.org/10.1080/17565529.2014.951021>
- Edenhofer, O. (2014). *IPCC AR5 WG3*. Retrieved from <http://igitur-archive.library.uu.nl/copernicus/2013-0704-200540/UUindex.html>
- Faehn, T., & Isaksen, E. T. (2016). Diffusion of Climate Technologies in the Presence of

- Commitment Problems. *The Energy Journal*, 37(2), 155–180.
<https://doi.org/10.5547/01956574.37.2.tfae>
- Faludi, J., Bayley, C., Bhogal, S., & Iribarne, M. (2015). Comparing environmental impacts of additive manufacturing vs traditional machining via life-cycle assessment. *Rapid Prototyping Journal*, 21(1), 14–33. <https://doi.org/10.1108/RPJ-07-2013-0067>
- Favretto, N., Stringer, L. C., Buckeridge, M. S., & Afionis, S. (2017). Policy and Diplomacy in the Production of Second Generation Ethanol in Brazil: International Relations with the EU, the USA and Africa BT - Advances of Basic Science for Second Generation Bioethanol from Sugarcane. In M. S. Buckeridge & A. P. De Souza (Eds.), *Advances of Basic Science for Second Generation from Sugarcane* (pp. 197–212). New York: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-49826-3_11
- Fischer, C., Greaker, M., & Rosendahl, K. E. (2017). Robust technology policy against emission leakage: The case of upstream subsidies. *Journal of Environmental Economics and Management*, 84, 44–61. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2017.02.001>
- Ford, J. D., Tilleard, S. E., Berrang-Ford, L., Araos, M., Biesbroek, R., Lesnikowski, A. C., ... Bizikova, L. (2016). Opinion: Big data has big potential for applications to climate change adaptation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(39), 10729–10732. <https://doi.org/10.1073/pnas.1614023113>
- Ford, M. R. (2009). *The lights in the tunnel: Automation, accelerating technology and the economy of the future*. Acculant Publishing.
- Fulton, L., Davis, U., Mason, J., Meroux, D., Hughes, C., Gauthier, A., ... Chang, K. (2017). *Three Revolutions in Urban TRANSPORTATION*. UC Davis. Jarret Walker Jamie Knapp. Retrieved from <https://www.itdp.org/wp-content/uploads/2017/04/UCD-ITDP-3R-Report-FINAL.pdf>
- GeSI. (2015). *SMARTER2030: ICT Solutions for 21st Century Challenges*. Retrieved from http://smarter2030.gesi.org/downloads/Full_report.pdf
- Glachant, M., & Dechezleprêtre, A. (2016). What role for climate negotiations on technology transfer? *Climate Policy*, 16(1), 1–15. <https://doi.org/10.1080/14693062.2016.1222257>
- Global Energy Assessment. (2012). *Global Energy Assessment—toward a sustainable future*. Cambridge, UK, and Laxenburg, Austria: Cambridge University Press and the International Institute for Applied Systems Analysis.
- Greenblatt, J. B., & Saxena, S. (2015). Autonomous taxis could greatly reduce greenhouse-gas emissions of US light-duty vehicles. *Nature Climate Change*, 5(9), 860–863. <https://doi.org/10.1038/nclimate2685>
- Heard, B. P., Brook, B. W., Wigley, T. M. L., & Bradshaw, C. J. A. (2017). Burden of proof: A comprehensive review of the feasibility of 100% renewable-electricity systems.

- Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76(March), 1122–1133.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.114>
- Herrero, S. T., Strengers, Y., & Nicholls, L. (2018). Can smart home control address global energy challenges ?
- Holdowsky, J., Mahto, M., Raynor, M. E., & Cotteleer, M. (2015). Inside the Internet of Things (IoT). *Deloitte University Press*, 54. <https://doi.org/10.5120/19787-1571>
- IEA. (2016). IEA 4E Solid State Lighting Annex Task 7: Smart Lighting – New Features Impacting Energy Consumption First Status Report, (September), 41. Retrieved from <http://ssl.iea-4e.org/>
- IEA. (2017). *Digitalization & Energy*.
- IEA. (2017). The Future of Trucks.
- Iguma, H. & H. K. (2015). *Why Toyota could sold Mirai at 7 million yen*.
- IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. (O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, ... J. C. Minx, Eds.). Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- Kauffman, S. A. (2000). *Investigations*. Oxford University Press.
- Kennedy, C., & Corfee-Morlot, J. (2013). Past performance and future needs for low carbon climate resilient infrastructure- An investment perspective. *Energy Policy*, 59, 773–783. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.04.031>
- Koomey, J. G., Matthews, H. S., & Williams, E. (2013). Smart everything: Will intelligent systems reduce resource use? *Annual Review of Environment and Resources*, 38, 311–343.
- Kryvasheyev, Y., Chen, H., Obradovich, N., Moro, E., Van Hentenryck, P., Fowler, J., & Cebrian, M. (2016). Rapid assessment of disaster damage using social media activity. *Science Advances*, 2(3), e1500779–e1500779. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1500779>
- Kverndokk, S., & Rosendahl, K. E. (2007). Climate policies and learning by doing: Impacts and timing of technology subsidies. *Resource and Energy Economics*, 29(1), 58–82. <https://doi.org/10.1016/j.reseneeco.2006.02.007>
- Lachapelle, E., MacNeil, R., & Paterson, M. (2017). The political economy of decarbonisation: from green energy “race” to green “division of labour.” *New Political Economy*, 22(3), 311–327. <https://doi.org/10.1080/13563467.2017.1240669>
- Larson, W., & Zhao, W. (2017). Telework: Urban Form, Energy Consumption, and Greenhouse Gas Implications. *Economic Inquiry*, 55(2), 714–735. <https://doi.org/10.1111/ecin.12399>

- Linder, M., & Williander, M. (2017). Circular Business Model Innovation: Inherent Uncertainties. *Business Strategy and the Environment*, 26(2), 182–196.
<https://doi.org/10.1002/bse.1906>
- Lovering, J. R., Yip, A., & Nordhaus, T. (2016). Historical construction costs of global nuclear power reactors. *Energy Policy*, 91, 371–382.
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.01.011>
- Lu, X., Wrathall, D. J., Sundsøy, P. R., Nadiruzzaman, M., Wetter, E., Iqbal, A., ... Bengtsson, L. (2016). Unveiling hidden migration and mobility patterns in climate stressed regions: A longitudinal study of six million anonymous mobile phone users in Bangladesh. *Global Environmental Change*, 38, 1–7.
<https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.02.002>
- Mandel, M. (2012). Beyond Goods and Services: The (Unmeasured) Rise of the Data-Driven Economy, (October), 1–13.
- Manyika, J., Chui, M., Bisson, P., Woetzel, J., Dobbs, R., Bughin, J., & Aharon, D. (2015). The Internet of Things: Mapping the value beyond the hype. *McKinsey Global Institute*, (June), 144. https://doi.org/10.1007/978-3-319-05029-4_7
- Mazzucato, M., & Semieniuk, G. (2017). Public financing of innovation: new questions. *Oxford Review of Economic Policy*, 33(1), 24–48. <https://doi.org/10.1093/oxrep/grw036>
- Mills, M. P. (2015). Shale 2.0: Technology and the Coming Big-Data Revolution in America's Shale Oil Fields. *Trends Magazine*, (147), 21–26. Retrieved from <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=plh&AN=109071233&site=eds-live>
- Monstadt, J., & Wolff, A. (2015). Energy transition or incremental change? Green policy agendas and the adaptability of the urban energy regime in Los Angeles. *Energy Policy*, 78, 213–224. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.10.022>
- Nykvist, B., & Nilsson, M. (2015). Rapidly falling costs of battery packs for electric vehicles. *Nature Climate Change*, 5(4), 329–332.
- OECD. (2017). *The Next Production Revolution. The Next Production Revolution*.
<https://doi.org/10.1787/f69a68e9-en>
- OECD/ITF. (2015). *Urban Mobility System Upgrade: How shared self-driving cars could change city traffic. Corporate Partnership Board Report*.
<https://doi.org/10.1007/s10273-016-2048-3>
- Peters, G. P., Andrew, R. M., Canadell, J. G., Fuss, S., Jackson, R. B., Korsbakken, J. I. I., ... Nakicenovic, N. (2017). Key indicators to track current progress and future ambition of the Paris Agreement. *Nature Climate Change*, 7(2), 118–122.
<https://doi.org/10.1038/nclimate3202>

- Pierpaoli, E., Carli, G., Pignatti, E., & Canavari, M. (2013). Drivers of Precision Agriculture Technologies Adoption: A Literature Review. *Procedia Technology*, 8(Haicta), 61–69. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2013.11.010>
- Schimmelpfennig, D., & Ebel, R. (2016). Sequential adoption and cost savings from precision agriculture. *Journal of Agricultural and Resource Economics*, 41(1), 97–115.
- Shayegh, S., Sanchez, D. L., & Caldeira, K. (2017). Evaluating relative benefits of different types of R&D for clean energy technologies. *Energy Policy*. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.05.029>
- Šmihula, D. (2009). The Waves of the Technological Innovations of the Modern Age and the Present Crisis as the End of the Wave of the Informational Technological Revolution. *Studia Politica Slovaca*, 11(1), 32–47.
- Snatkin, A., Karjust, K., Majak, J., Aruväli, T., & Eiskop, T. (2013). Real time production monitoring system in SME. *Estonian Journal of Engineering*, 19(1), 62. <https://doi.org/10.3176/eng.2013.1.06>
- Sugiyama, T., & Laitner, J. A. “Skip.” (2017). Rapid innovation to mitigate global warming. *CIGS Working Paper*, 17(005E). Retrieved from <http://www.canon-igs.org>
- Tassey, G. (2014). Competing in Advanced Manufacturing: The Need for Improved Growth Models and Policies. *Journal of Economic Perspectives*, 28(1), 27–48. <https://doi.org/10.1257/jep.28.1.27>
- Upadhyay, A. P., & Bijalwan, A. (2015). Climate Change Adaptation: Services and Role of Information Communication Technology (ICT) in India. *American Journal of Environmental Protection*, 4(1), 70–74. <https://doi.org/10.11648/j.ajep.20150401.20>
- van Sluisveld, M. A. E., Harmsen, J. H. M., Bauer, N., McCollum, D. L., Riahi, K., Tavoni, M., ... Zwaan, B. van der. (2015). Comparing future patterns of energy system change in 2 °C scenarios with historically observed rates of change. *Global Environmental Change*, 35, 436–449. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.09.019>
- Viegas, J., Martinez, L., Crist, P., & Masterson, S. (2016). *Shared Mobility: Innovation for Liveable Cities*. International Transport Forum’s Corporate Partnership Board. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1787/5jlwvz8bd4mx-en>
- Wadud, Z., MacKenzie, D., & Leiby, P. (2016). Help or hindrance? The travel, energy and carbon impacts of highly automated vehicles. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 86, 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.12.001>
- WBCSD. (2015). Climate Smart Agriculture, (November), 40.
- WIPO. (2017). World Intellectual Property Report. Retrieved from http://www.wipo.int/edocs/pubdocs/en/wipo_pub_944_2015.pdf
- Wollenberg, E., Richards, M., Smith, P., Havl??k, P., Obersteiner, M., Tubiello, F. N., ...

- Campbell, B. M. (2016). Reducing emissions from agriculture to meet the 2C target. *Global Change Biology*, 22(12), 3859–3864. <https://doi.org/10.1111/gcb.13340>
- World Economic Forum. (2015). Industrial Internet of Things. Retrieved from http://www3.weforum.org/docs/WEFUSA_IndustrialInternet_Report2015.pdf
- World Robotics Organization. (2014). Executive Summary - World Robotics (Industrial & Service Robots) 2014. *World Robotic Report*, 11–18.
- WorldBank. (2016). Digital Dividends. World Development Report 2016.
- 杉山大志. (2017a). PVコスト低減は誰の手柄か?. 国際環境経済研究所. Retrieved from <http://ieei.or.jp/2017/08/sugiyama170829/#more-41017>
- 杉山大志. (2017b). イノベーションによる温暖化問題解決のあり方は：イノベーションシステム論から複雑系理論へ. 環境情報科学, 46(3). Retrieved from http://www.canon-igs.org/research_papers/energy/20170524_4348.html
- 杉山大志. (2017c). 地球温暖化対策におけるイノベーションーどのような期待があるのか、如何なる技術が想定されているか. 日本原子力学会誌, 59(7). Retrieved from http://www.canon-igs.org/research_papers/energy/20171019_4527.html
- 杉山大志. (2017d). 地球温暖化問題のリスクと対応戦略. 安全工学会誌, 56(2). Retrieved from http://www.canon-igs.org/research_papers/energy/20170518_4334.html