

科学技術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

Mobilizing Technological Innovation for Mitigation of Global Warming: From the Innovation Systems Theory to the Complex Systems Theory

杉山 大志^{*}
Taishi SUGIYAMA

はじめに

まず本稿の要約を述べる。地球温暖化対策の解決に向けたイノベーションのためには、政府の積極的な介入が重要とされてきた。すなわち、太陽電池等の有望技術を特定したうえで、研究開発補助や再エネ全量買取制度等の技術開発政策を実施することが広く行われてきた。この理論的根拠となってきたのは、「イノベーションシステム論」であった。だが近年のICT等のイノベーションを観察すると、温暖化対策技術のイノベーションにとってより実効性が高いのは、対象を特定した政府の技術開発政策ではなく、科学技術全般の進歩であることが強く示唆される。この状況を記述する適切な枠組みは「複雑系理論」であり、これに立脚すると、まったく異なる政策的示唆が得られる。すなわち、温暖化対策技術のイノベーションを起こすためには、科学技術全般のイノベーションが重要であり、後者は経済成長との好循環において実現される。ゆえに、温暖化対策は、経済成長と調和する形で実施することが、長期的な実効性の鍵となる。

なお、本稿はキャノングローバル戦略研究所のワーキングペーパーとして発表した原稿¹⁾に若干の修正を施したものである。

1. 既存の統合評価モデル (IAM) による2℃シナリオ

既存のIAMによる2℃シナリオ (= 地球温暖化による温度上昇を産業革命前から比べて2℃以下に抑制

するシナリオ) では、政治的には完全な国際協力、経済的には高い限界費用、技術的にはバイオエネルギーおよびCO₂回収貯留技術 (BECCS) の多用という、いずれも困難な仮定を置いている (IPCC, 2014)。この困難な仮定はいずれも実現されないだろうことを踏まえると、その分を補うためには、BECCS以外のイノベーションが必要となる。

IAMにおいてイノベーションは多様な方法で表現されてきた。マクロには過去の計測等に基づいて全要素生産性の一定率の改善を想定したり、計量経済的に計測される弾性値を用いた推計をしてきた。ミクロには、個別の技術予測に基づいたり、時間とともに技術コストが一定率で低減すると想定したり、累積生産量に応じてコストが「べき乗則」に沿って低下するという習熟曲線が用いられた。だが将来の事象には不確実性があり、これらの方法論による表現方法には限界がある。とくに、ミクロでの個別技術については、既存技術に基づいた予測にとどまり、未知の技術について取り扱うことはできなかった。では未来技術の前駆として、ここ数年ではどのようなイノベーションがあっただろうか。

2. 近年のイノベーション

ここ数年のイノベーションについて、温暖化対策に関係する目立ったものを挙げてみる。太陽電池のコストは急激に下がった (NREL, 2016)。アラブ首長国連邦 (UAE) では3セント/kWhという入札価格が実現した。携帯機器用途の技術開発によってバッテリー技術が進み、電気自動車のコストも急激に下がった (Nykqvist and Nilsson, 2015)。AIはディープラーニングで劇的に発達し、IOT・ロボット技術等との相乗効

果を生み出して、自動運転車を実現した。これは渋滞や空ぶかしをなくすのみならず、自動車の数も激減させ、カーシェアリングや電気自動車の導入も誘発して、大幅なCO₂削減につながる可能性がある (Wadud, 2015)。工場・オフィス・家庭でも空調や照明の知能化を活用した革新的な省エネが実現しつつある (GeSI, 2015; JEITA, 2016)。さらに、計算機能力の発達により、材料や構造のシミュレーション等を通じ、高機能かつ安価な材料が実現され、水素燃料電池自動車のコストも急激に下がった (井熊・木通, 2016)。

以上の特徴として、半導体・AI・IOT・ロボット等のICTを初めとした科学技術全般が急速に進歩しており、その恩恵を受ける形で温暖化問題に関係するエネルギーの生産・利用システムにも急激な進歩がみられる (経済産業省, 2016)。では、かかるイノベーションは、どのように理論的に整理できるのか。

3. イノベーションシステム論と複雑系理論

温暖化問題の文脈でイノベーションを扱う伝統的な方法はイノベーションシステム論であった (GEA, 2012 24章; IPCC, 2014 15.5.8; 木村, 2015 1章)。そこでは、ある技術に注目して、研究開発・実証・普及の段階に応じて、それぞれに政府介入の適切なあり方があるとする。政府介入が必要なのは、「研究開発の便益は社会全般が広範に受けるので、民間の一企業がその負担を担うのでは、社会全体からみて研究開発投資が不足する」という「専有可能性の問題」があるためである。温暖化対策については、これにさらに環境外部性の内部化という理由が付け加わることになる。

他方でAIによる省エネのように、現実を観察すると、温暖化対策技術の進歩といっても、温暖化問題とは直接関係のない、科学技術全般の進歩の恩恵を大きく受けている (Nemet, 2012; 杉山, 2016a・2016b)。とくに近年ではこの傾向が顕著である。このような事象を記述する枠組みとしては、以下に見るように、イノベーションシステム論よりも複雑系理論が適切である。

4. 複雑系理論における温暖化対策イノベーション

複雑系理論におけるイノベーションの扱いはKauffman, Arthurらによって始められた。新しい技

術は古い技術の組み合わせで生じて、生物進化と類似の様相を持つ。生物進化同様、偶然性と経路依存性が存在するため、どのような技術が将来に実現するかを予言することはきわめて難しい (Kauffman, 1995・2000; Arthur and Polak, 2006; Arthur, 2009・2015; Solée *et al.*, 2013)。既存技術の蓄積が進み、またICTが発達したことで、イノベーションはますます加速している (Kelly, 2010・2016)。

複雑系理論の観点からは、温暖化対策イノベーションはそれが単独で起きるものではなく、科学技術全般の進歩の中でその1つの組み合わせとして誕生することが、当然のこととして理解される。そしてこれは近年のイノベーションの動態をよく表している。

たとえばAIの中核技術であるディープラーニングは、ゲーム機の技術であるグラフィックプロセッシングユニット (GPU) やウェブ上のホビー目的のビッグデータ等が先行技術となって「隣接可能性 (Kauffman, 2000; Jonson, 2010; Montemurro and Zanette, 2016)」が成立し、実現した (Kelly, 2016)。これを活用して、自動運転・革新的な省エネ等の、広範な温暖化対策技術が可能になりつつある (GeSI, 2015; JEITA, 2016; NEDO, 2016)。

一度隣接可能性が成立した技術については、活発な研究開発が行われ、速やかにイノベーションが起きることが観察されてきた。この現象は「同時発生」「発明の同時性」「発見の複数性」等、さまざまな呼称で研究された (Ogburn and Dorothy Thomas, 1922; Voss, 1984; Ridley, 2015; Jones, 2016)。将来においてもAIやIOTの発達によって隣接可能性領域が拡大することで、革新的な温暖化対策技術が生まれ、大規模な温室効果ガス排出削減が可能になることが予想される。

以上で説明したイノベーションの動学について図1に例示する。近年、企業はプラットフォームの活用やビジョンの共有等の手段を通じて産業エコシステムを形成することを重視しているが、これは、自社のイノベーションのために、固有の技術に加えて、他者の所有する技術を積極的に取り込むことを重視するからにはほかならない。これはイノベーションシステム論の用語で言えばスピルオーバーが重要な役割を果たしている、ということになる。

^{*}すぎやま たいし・キャノングローバル戦略研究所 上席 研究員

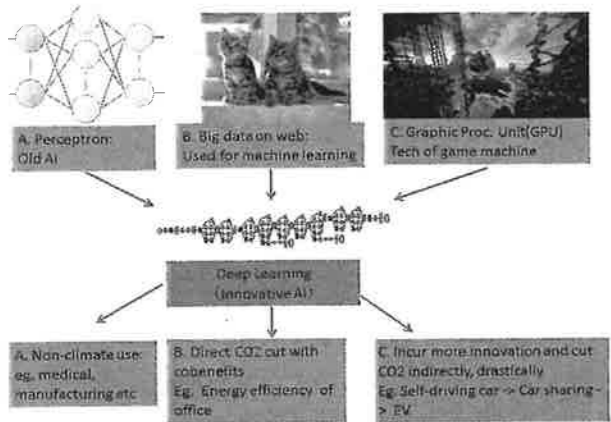


図1 科学技術全般のイノベーションの恩恵を受けて、温暖化対策技術のイノベーションが起きる（ディープラーニングの例）

イノベーションシステム論においても、スピルオーバーの重要性はたびたび指摘されてきた（Clark *et al.*, 2002・2006; 今中, 2009・2010）。しかし、とくに政策論争となると、スピルオーバーは特段の理由なくア prioriに捨象され、イノベーションシステム論がデフォルトの枠組みとして選択されたがゆえに、半ば自明な結論として、積極的な技術開発政策介入が正当化されてきた（GEA, 2012; IPCC, 2014 15.5.8）。

だが、実は先行技術からのスピルオーバーが十分に存在することこそが、当該イノベーションにとっての鍵である、ということが近年のICT革命の示唆するところである。そこでスピルオーバーといった名前が暗示するような副次的な位置づけではなく、それこそが本質的である、と位置づけると、これが複雑系理論の枠組みとなる。以上の対比を図2、図3に整理する。

イノベーションは、先行する科学技術の組み合わせで生じる。この場合は革新的な人工知能技術であるディープラーニングが、先行する人工知能技術であるパーセプトロン(A)、ウェブ上にホビー目的で蓄積された画像データ(B)と、ゲーム機での利用で発達した並列計算技術であるGPU(C)の組合せで誕生している。以上の技術は、いずれも地球温暖化問題とはまったく関係ない理由で開発されてきた（Kelly, 2016）。

さらに、ディープラーニングには、温暖化対策以外の用途も多くある(A)が、温暖化対策技術のイノベーションをもたらす。直接的なCO₂削減技術としては、たとえば居室の画像解析によって空調機器の負荷を推計し制御してオフィスでの省エネをもたらすことがで

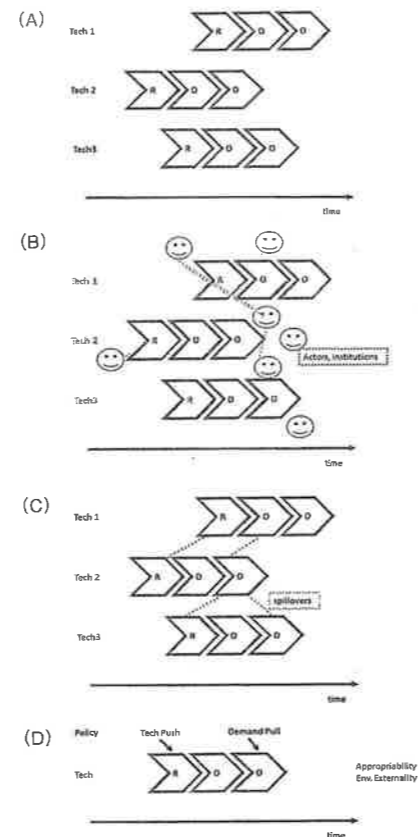


図2 イノベーションシステム論の概念図
注) (A) 各技術に研究開発 (Research & Development)、実証 (Demonstration)、普及 (Diffusion) の3つの段階がある。(B) これを推進するプレーヤーや制度のあり方が「イノベーションシステム」として議論されてきた。(C) 異なる技術間での知見の波及はスピルオーバーとして研究されてきた。だが、(D) 政策論争においては、スピルオーバーの役割は特段の理由なくア prioriに捨象され、テクノロジーブッシュ (補助金等による研究開発促進) およびデマンドプル (全量買取制度等による需要創出) といった積極的な政策介入の重要性を論じるものが主流だった (GEA, 2012; IPCC, 2014 15.5.8)。

きる(B)。さらに、自動走行技術に活用されると、カーシェアリングや電気自動車の推進にも繋がり、大規模なCO₂排出を削減するポテンシャルを持つ(C) (NEDO, 2016; JEITA, 2016; GeSI, 2015)。

5. ICTによる温室効果ガス排出削減ポテンシャル推計事例

ICTによる温室効果ガス排出削減ポテンシャルの推計はLaitnerを嚆矢とする（Laitner, 2003）。GeSI (2015)はICTによって、経済成長を促進し、人類のあらゆる福祉を向上させる一方で、その言わば副産物としてエネルギー効率の大幅改善とCO₂の大規模削減が可能になる、という考え方を提示した。ICTによって省エネや農業部門の温室効果ガス排出削減が可能であり、2030年時点における世界の温室効果ガス排出量

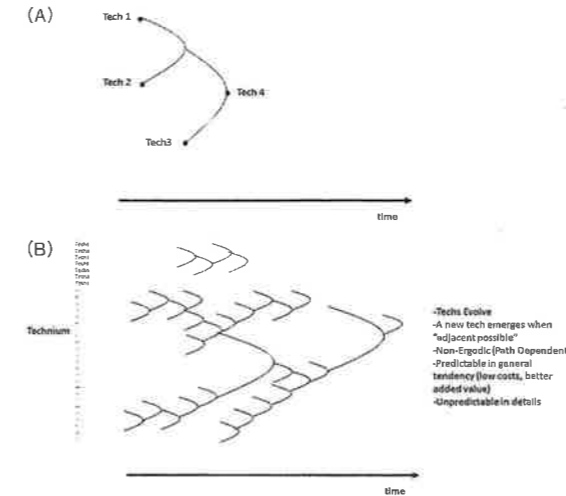


図3 イノベーションについての複雑系理論の概念図
注) (A) あらゆる新技術は先行技術の組み合わせから生まれる。(B) 技術の組み合わせは無限に連鎖し、次々に新しい技術が生まれる。この過程は生物系の進化に似る (Kauffman, 2000; Johnson, 2010; Montemurro and Zanette, 2016)。(図2(C)において、羽根型に書いたRDDのプロセスを1点に縮約し、スピルオーバーの線のみを取り出すと、このダイアグラムになる)。

の20%が削減できるという。

この推計は部門別・技術別にベースラインに対する削減量積み上げを行ったものである。ただしこれでは方法論的に過小評価であるという指摘がある。ICTの本領は経済活動全般の効率を高めることによってGDPとエネルギー消費量のデカップリングを起こすことにある、と考えられるからである（Laitner, 2010）。これはすでに先進国で観察されつつあるとする見方もある（Laitner, 2015）。だが具体的な推計はまだ研究途上であり、論争されている。

他方で、経済活動が高まることによってかえってエネルギー消費が増大するというリバウンド効果の存在も懸念されるが、これについてはあまりまだ議論が深まっていない（GeSI, 2015; Wadud, 2015）。

6. 地球規模での急減な温室効果ガス排出削減への寄与

ICTをはじめとした科学技術全般の急速な進歩によって地球規模での急減な温室効果ガス排出削減が起きる可能性はある。たとえば、太陽電池、電気自動車等のコストがさらに下がり、既存技術とコスト的に遜色がなくなり²⁾、爆発的な普及が起きるかもしれない。AI, IOTを駆使した省エネ、自動運転を活用した運輸部門の再編は、いずれもエネルギー消費を劇的に削減

する可能性がある。

省エネの主要な障壁は情報の非対称（簡単に言えば、省エネをどのように進めていけばコスト削減になるかといった情報の収集と分析能力の不足のこと）であったが、ICTはこれを取り除く（Rogers *et al.*, 2015）。

これらはいずれも2030年といった早い段階でも大規模な排出削減のポテンシャルを持つが、その推計は難しい。というのは、AIひとつをとっても、2030年に今程度の実力なのか、それとも多くの局面で人間を凌駕する（Ford, 2009; Brynjolfsson and McAfee, 2011）のかわからないからである。人間を凌駕するならばあらゆる劇的な省エネができるし、太陽電池の製造工程を改善し、設置工事もロボットが行うことで、太陽電池のコストはさらに激減するだろう。

7. 科学技術全般の進歩と経済成長

経済成長のためには技術進歩が重要であることは、「成長会計」において全要素生産性の改善が経済成長に寄与することなど、経済学者の間で広い見解の一致がある。他方でその逆として、経済成長率が高い方が技術進歩は早いという点は、成長会計においては自明ではあるが、そのメカニズムについて統一的に論じたものは、意外なことにはないようだ。その代わりに、以下の3つが経済成長と科学技術全般の進歩の好循環のメカニズムとして知られている。

第1は汎用的技術の理論であり、蒸気機関、電気技術、ICTの3つが、おのおのの時代における汎用的技術として、技術進歩が経済成長を促し、また経済活動が技術進歩を促すという、好循環の核になった（Bresnahan *et al.*, 1995; Helpman, 2004; 井熊・木通, 2015）。第2は産業集積の理論であり、たとえば米国西海岸等に地理的に産業が蓄積することで、やはり好循環の核となった（Florida, 2008; Moretti, 2012）。第3に、市場経済では、常に断片的な知見を組み合わせさせて新しいものを生み出すことが行われており、市場経済が活発に活動するとイノベーションが創出される（Read, 1958; Friedman, 1980; Ridley, 2015）。

8. 政策的含意

以上の考察の政策的含意として、まず第1に、IOT,

AI, ロボット等のICTをはじめとした科学技術全般の進歩が重要であることがわかる。この促進のためには経済活動が活発であることと、適切な規制体系が必要である。自由な企業活動を阻害する規制によって欧州でのICTイノベーションは米国に大きく遅れたとされる(Thierer, 2014)。

伝統的なイノベーションシステム論に立脚した、たとえば太陽光発電の温暖化対策技術に特化した技術開発政策は、当該技術についての隣接可能性領域を探る意味で有益である。ただしそれは必ず科学技術全般の進歩から恩恵を受けるものであることから、当該技術だけに予算をつぎ込めば目的が達成されるというものではない。のみならず、温室効果ガス削減を目的とした政策介入が不適切であると、科学技術全般の進歩が妨げられたり、マクロ経済が悪化したりして、かえって温暖化対策イノベーションを妨げてしまう可能性もあるため、注意が必要である(杉山, 2016a; 2016b)。

なお、イノベーションは温暖化対策のコストを下げ、大規模な排出削減を可能にするポテンシャルを秘めているが、そのようなイノベーションが実現するということは未曾有の経済的豊かさがもたらされる、ということでもある。このため巨大なリバウンド効果を起こして、むしろエネルギー消費量と温室効果ガス排出量を増大させる可能性もある。実際に過去の蒸気機関と電気技術はいずれもエネルギー利用効率を飛躍的に高めたが、その結果莫大なエネルギー消費増大に帰結した。今進行しているICTのイノベーションでこれが起きないようにするためには、イノベーションを妨げないようにしつつ、何らかの政策介入によって温室効果ガスを削減するというバランスが必要である。

最後に理論的な面でいくつか補足する。本稿で論じたように、イノベーションシステム論が複雑系理論かという選択によって、政策提言の方向は大きく影響を受ける。理論枠組みの選択が政策提言のあり方を変えるのは経済理論ではよくあることだが、この場合もその例に漏れないということだ。対象となる系をよく観察して、その現実に即した枠組みを選ばないと結論を誤ることになる。

なおイノベーションについて複雑系理論自体は目新しいが、イノベーションとは技術の新しい組合せで起

きるということは、元々シュンペーターが言い出したことであり(Schumpeter, 1926)、複雑系理論は衣替えした先祖返りでもある。

本研究は、温暖化対策技術政策を対象として、イノベーションシステム論に代えて複雑系理論を適用した初めての試みであった。

謝辞：本稿がなるにあたっては経産省地球温暖化対策プラットフォーム、RITE ALPS II 委員会、およびIPCCにおける議論・情報交換がきわめて有益だったことを関係者に感謝する。なお本研究の一部は筆者が前職である一般財団法人電力中央研究所において実施したものを含んでいる。本稿の責任は、いかなる団体機関でなく、筆者個人に帰するものである。

補注

- ¹⁾ http://www.canon-igs.org/workingpapers/170524_sugiyama.pdf
- ²⁾ 化石燃料利用等の既存技術のコストも下がるので、必ずしも再生可能エネルギー等のほうが安くなるとは限らない(Covert *et al.*, 2016; Mills, 2015) が、イノベーションは再生可能エネルギー等のコスト増分を受容可能なコストまで低減させることになるだろう。

引用文献

Arthur, B. (2009) *The Nature of Technology: What It Is and How It Evolves*, Free Press, New York, 256pp. (邦訳：有賀裕二監修, 日暮雅通訳 (2011) 「テクノロジーとイノベーション—進化/生成の理論」, みすず書房)

Arthur, W. B. (2015) *Complexity and the Economy*, Oxford University Press, 211pp.

Arthur, W. B. and W. Polak (2006) The evolution of technology within a simple computer model. *Complexity*, No. 11, 23-31.

Bresnahan, T. F. and M. Trajtenberg (1995) General purpose technologies: 'Engines of growth?'. *Journal of Econometrics*, 65(1), 83-108.

Brynjolfsson, E. and A. McAfee (2011) *Race Against The Machine: How the Digital Revolution is Accelerating Innovation, Driving Productivity, and Irreversibly Transforming Employment and the Economy*, Digital Frontier Press, 92pp. (邦訳：村井章子訳 (2013) 「機械との競争」, 日経BP社)

Covert, T., M. Greenstone and C. R. Knittel (2016) Will We Ever Stop Using Fossil Fuels? *Journal of Economic Perspectives*, 30 (1), 117-138.

Florida, R. (2008) *Who's Your City?* Basic Books, 384pp. (邦訳：井口典夫訳 (2009), 「クリエイティブ都市論：創造性は居心地のよい場所を求める」, ダイアモンド社)

Ford, M. (2009) *The Lights in the Tunnel: Automation, Accelerating Technology and the Economy of the Future*, Acculant Publishing, 253pp. (邦訳：松本剛史訳 (2015), 「ロボットの脅威—一人の仕事がなくなる日」, 日本経済新聞社)

Friedman, M. and R. Friedman (1980) *Free to Choose*, Mariner Books, 338pp. (邦訳：西山千明訳 (2012), 「選択の自由 [新装版]—自立社会への挑戦」, 日本経済新聞社)

GeSI (2015) SMARTer2030 <http://smarter2030.gesi.org/downloads/Full_report.pdf>

GEA (2012) *Global Energy Assessment—Toward a Sustainable*

Future, Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA and the International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, 113pp.

井熊 均・木通秀樹 (2015) 燃料電池がブレイクした理由, 『なぜ、トヨタは700万円で「ミライ」を売ることができたか? 技術革新のメガトレンドが市場構造を変える』, 2章, 日刊工業新聞社, 176pp.

今中健雄 (2010) 技術進歩の諸要因と取り巻く構造に関する予備的検討, 電力中央研究所報告, Y09026, 25pp.

今中健雄 (2009) 蛍光灯高効率化を促進した技術的背景—高付加価値化との相乗効果とスピルオーバー技術の享受—, 電力中央研究所報告, Y08053, 22pp.

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*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1435. (第5次評価第3部会報告書) <<http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3/>>

JEITA (2016) *I Tソリューションによる温暖化対策貢献 調査報告書—2030年に向けた温室効果ガス削減ポテンシャル*. 一般社団法人 電子情報技術産業協会 (JEITA), 46pp.

Johnson, S. (2014) *How We Got to Now: Six Innovations that Made the Modern World*. Riverhead Books, 304pp.

Johnson, S. (2010) *Where Good Ideas Come From: The Natural History of Innovation*, Riverhead Books, 344pp. (邦訳：松浦俊輔訳 (2013) 「イノベーションのアイデアを生み出す七つの法則」, 日経BP社)

Kauffman, S. (1995) *At Home in the Universe: The Search for the Laws of Self-Organization and Complexity*, Oxford University Press, New York, 336pp. (邦訳：米沢富美子監訳 (2008) 「自己組織化と進化の論理」, 日本経済新聞社)

Kauffman, S. (2000) *Investigations*. Oxford University Press, New York, 304pp. (邦訳：河野至恩訳 (2002) 「カウフマン, 生命と宇宙を語る」, 日本経済新聞社)

経済産業省 (2016) 新産業構造ビジョン 中間整理. 産業構造審議会 新産業構造部会, 平成28年4月27日. 本文: <http://www.meti.go.jp/committee/sankoushin/shin_sangyou_koukouzou/pdf/008_04_00.pdf>, 資料: <http://www.meti.go.jp/committee/sankoushin/shin_sangyoukouzou/pdf/008_05_01.pdf>

Kelly, K. (2016) *The Inevitable: Understanding The 12 Technological Forces That Will Shape Our Future*, Viking, New York, 336pp. (邦訳：ケヴィン・ケリー, 「インターネット」の次に来るもの: 未来を決める12の法則, NHK出版)

Kelly, K. (2010) *What Technology Wants*, Penguin Books, 416pp. (邦訳：服部桂訳 (2014) 「テクニウム—テクノロジーはどこへ向かうのか?」, みすず書房)

木村 幸 (2015) 公的支援が技術の実用化・普及に及ぼす影響: エネルギー技術開発プログラムに関する事例研究. 東京大学大学院工学系研究科先端学際工学専攻 博士論文.

Laitner, J. A. "Skip" (2015) Linking Energy Efficiency to Economic Productivity: Recommendations for Improving the Robustness of the U.S. Economy, *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, No. 4, 235-52.

Laitner, J. A. "Skip" (2010) "Semiconductors and Information Technologies: The Power of Productivity", *Journal of Industrial Ecology*, 14(5), 692-695.

Laitner, J. A. "Skip" (2003) Information Technology and U.S. Energy Consumption, *Journal of Industrial Ecology*, 6 (2), 13-24.

Mills, M. P. (2015) SHALE 2.0: Technology and the Coming Big-

Data Revolution in America's Shale Oil Fields, *Manhattan Institute*, No. 16 May, 17pp.

Montemurro, M. A. and D. H. Zanette (2016) Complexity and Universality in the Long-range Order of Words. In: Esposti, M. D. *et al.* eds. "Creativity and Universality in Language", Springer, 208pp.

Moretti, E. (2012) *The New Geography of Jobs*, Mariner Books, 304pp. (邦訳：池村千秋訳 (2014) 「年収は住むところで決まる: 雇用とイノベーションの都市経済学」, プレジデント社)

NEDO (2016) 「次世代人工知能技術社会実装ビジョン」次世代人工知能技術社会実装ビジョン作成検討会. 平成28年4月21日, 10pp. <<http://www.nedo.go.jp/content/100782828.pdf>>

Nemet, G. F. (2012) Inter-technology knowledge spillovers for energy technologies, *Energy Economics* No. 34, 1259-1270.

NREL (Fu, R., D. Chung, T. Lowder, D. Feldman, K. Ardani and R. Margolis) (2016) U.S. Solar Photovoltaic System Cost Benchmark: Q1 2016 Technical Report, National Renewable Energy Laboratory (NREL), NREL/TP-6A20-66532 September 2016, <<http://www.nrel.gov/docs/fy16osti/66532.pdf>>; <<http://www.nrel.gov/docs/fy16osti/67142.pdf>>

Nykqvist, B. and M. Nilsson (2015) Rapidly falling costs of battery packs for electric vehicles, *Nature Climate Change*, No. 5, 329-332.

Ogburn, W. F. and D. Thomas (1922) Are Inventions Inevitable? A Note on Social Evolution, *Political Science Quarterly*, 37(1), 83-98.

Ridley, M. (2015) *The Evolution of Everything: How New Ideas Emerge*, Harper, 368pp.

Rogers, E. A., Carley, E., Deo, S. and Grossberg, F. (2015) How Information and Communications Technologies Will Change the Evaluation, Measurement, and Verification of Energy Efficiency Programs, Research Report IE1503, American Council for an Energy-Efficient Economy, Washington DC.

Read, L. E. (1958) I, Pencil—My Family Tree as told to Leonard E. Read, Irvington-on-Hudson, NY: The Foundation for Economic Education, Inc.

Schumpeter, J.A. (1926) *Theorie der Wirtschaftlichen Entwicklung*, pp.100-101 (塩野谷祐一訳 (1977) 「経済発展の理論」岩波文庫, 上 183頁)

Solée, R. V., S. Valverde, M. R. Casals, S. A. Kauffman, D. Farmer and N. Eldredge (2013) The evolutionary ecology of technological innovations. *Complexity*, No. 18, 15-27.

杉山大志 (2016a) 地球温暖化とICTイノベーション. オーム, 2016年4月号, 4~7.

杉山大志 (2016b) イノベーションを起こすには: 経産省長期温暖化対策プラットフォーム投資拡大タスクフォース第一回会合資料 5-1, 21pp. <http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy_environment/ondanka_platform/kokunaitoushi/pdf/001_05_01.pdf>

Thierer, A. D. (2014) *Permissionless Innovation: The Continuing Case for Comprehensive Technological Freedom*, Mercatus Center at George Mason University, 106pp.

Voss, C.A. (1984) Multiple Independent Invention and the Process of Technological Innovation, *Technovation*, 2(3), 169-184, p172.

Wadud, Z., D. MacKenzie and P. Leiby (2015) Help or hindrance? The travel, energy and carbon impact of highly automated vehicles, *Transportation Research Policy and Practice*, No. 86, 1-18.