

RIETI 前理事長 矢野 誠 と RIETI 元ファカルティフェロー 古川雄一の共同論文が総合科学学術誌 *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)* に掲載

RIETI 前理事長 矢野 誠 と RIETI 元ファカルティフェロー 古川雄一の共同論文, "Two-dimensional constrained chaos and industrial revolution cycles," が総合科学学術誌 *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)* のオンライン版に掲載されました。オープンアクセスですので、下記リンクより無料でダウンロードできます。冊子体出版も予定されております。

18世紀以来の近代経済は、ほぼ100年を周期に、急激な技術革新と深刻な停滞を繰り返してきました。本研究は、それを「産業革命サイクル」という新しい用語でとらえ、そのメカニズムを市場の質と技術の希少性の相互関係によって説明するものです。「産業革命のような大規模なイノベーションは高質な市場に宿る」ことを本論文は示します。

1979年末以降、米国と英国は、それぞれレーガン大統領、サッチャー首相という強力なリーダーのもとで、市場改革を断行し、市場の高質化を推進しました。それが第三次産業革命の基礎を作ったということを歴史は如実に示しています。1990年ごろから続く我が国の長期停滞を乗り越えるためには、社会のすみずみにいきわたるイノベーションの推進が不可欠です。そのための基礎作りに向けて市場の高質化を進めよ、というのが本研究の示唆するところです。

「産業革命サイクル」という考え方は、慶應義塾大学経済学研究科・商学研究科・京都大学経済研究所連携グローバルCOEにおける研究の一環として、矢野(2005, 『「質の時代」のシステム改革』, 岩波書店)で提唱されました。本研究はその考え方の中核をなす部分をモデル化し、説明するものです。

(詳細は別紙参照)

Makoto Yano and Yuichi Furukawa, "Two-dimensional constrained chaos and industrial revolution cycles," *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, January 27, 2023, 120 (5) e2117497120, <https://www.pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.2117497120>

なお、本論文はRIETI ディスカッション・ペーパー (19-E-008, 2019) を発展させたものです。

矢野 誠 (RIETI 前理事長, 日本学士院会員, 京都大学経済研究所特任教授, 上智大学特任教授)

古川 雄一 (RIETI 元ファカルティフェロー, 中央大学経済学部教授)

【本リリースに関するメディアの方からのお問い合わせ先】
独立行政法人経済産業研究所 国際・広報グループ副ディレクター 谷本
クロスメディア担当 渡邊
Eメール: pr-general@rieti.go.jp

Makoto Yano and Yuichi Furukawa, “Two-dimensional constrained chaos and industrial revolution cycles,” *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, January 27, 2023, 120 (5) e2117497120,
<https://www.pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.2117497120>

矢野誠，古川雄一著『制約条件付き二次元カオスと産業革命サイクル』，要旨

1. 背景

18世紀以来，人類は少なくとも三回の産業革命を経験してきました．知的財産保護が第一次産業革命の主因であるという見方は，1997年にノーベル賞を受けた経済史家ダグラス・ノースらによって提示され，学界でも広く受け入れられています．ロシア革命直後の時代に，ニコライ・コンドラチェフはコンドラチェフの波と呼ばれる50年から60年を周期とする技術革新の波を発見し，その波が経済学的メカニズムによって引き起こされている可能性を予想しました．しかし，繰り返し起きてきた産業革命が単一の市場メカニズムに導かれている可能性を立証した研究はこれまでもありません．本研究は，産業革命サイクルの背後にある市場メカニズムの示すものです．

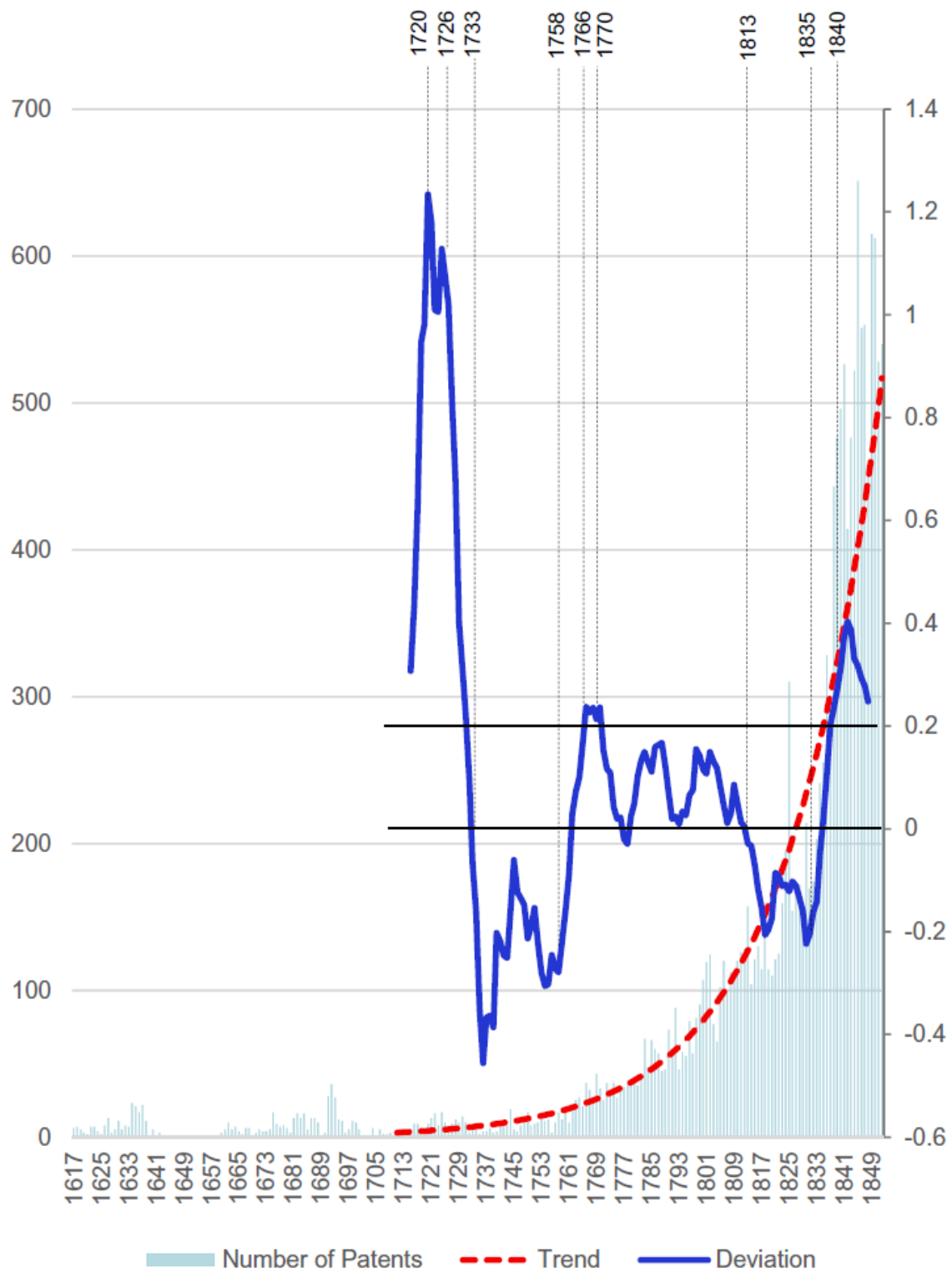
産業革命は画期的な新技術を開発した個人や企業の資質と結び付けられて説明されるのが普通です．第一次産業革命を先導したジェームズ・ワットの蒸気機関，第二次産業革命をけん引したヘンリー・ベッセマーの鋼鉄転炉やヘンリー・フォードのオートメーション，第三次産業革命のきっかけとなったIBMPCなど，それぞれの産業革命をけん引した有名な技術をすぐに思いだします．そうした大発明や大発見は単なる偶然の結果として，産業革命を確率事象と見る研究者も少なくありません．

本研究では，これまでの見方を転換し，産業革命サイクルを（１）多数の無名の発明家たちによる技術独占と創業者利益の追求，および（２）技術を利用する多数の人々の経験の蓄積による生産性向上，という二つの要因の相互関係の結果として説明します．

2. 産業革命サイクルと発明数

過去の産業革命が多数の「無名」の発明家によって集中豪雨的にもたらされた発明群に支えられてきたという本研究の見方は次のような発見に基づきます．Fig 1（図1）をご覧ください．

この図は，第一次産業革命期の特許に関して，1854年にウッドクロフトがまとめた記録に基づくものです．この記録は1617年から1852年にかけて英国で与えられた16000件にのぼる特許をすべて網羅しています．図1の棒グラフは，各年の特許数を示します．また，赤い点線は，特許数の趨勢を示すために，各年を中心とした前後9年の平均（移動平均）を示しています．さらに，青い曲線は各年の特許数が，どの程度，趨勢から乖離したかを示すものです．



- (1) The raw patent data is taken from Woodcroft (1854).
- (2) Deviation refers to the ratio between 9 year moving average and trend.

Fig. 1. Number of patents.

図を見て驚くのは、趨勢からの乖離がイノベーションの歴史と極めて整合的だということです。一般に第一次産業革命は、1760年ごろから1830年ごろにかけての技術革新を指しています。特に1760年ごろからの10年間がその出発点だとされることもよくあります。この事実は、図の青い曲線と見事に呼応しています。曲線を見ると1758年から1766年にかけて急速に技術革新が進み、1770年ごろまでのピークに至ります。第一次産業革命が完了したとされる直後にあたる1835年から発明数は急激に増え、第二次産業革命に続いていきます。

第三次産業革命がすすむ現代経済でも観察されることですが、産業革命のきっかけとなる大規模な技術革新のあとには、大きな落ち込みと第二波が続くものです。第三波がくることもあります。2008年の世界金融危機後のビッグデータの応用技術の波は第三次産業革命の第二波とみることができます。第一次産業革命の第一波の後には、1772年の金融危機、1796-97年の恐慌がおきました。図では、第二波が1770年代末、第三波が1790年代末に来たことを示しています。第二波と第三波の間の落ち込みはアメリカの独立戦争後のイギリス経済を反映しているのでしょう。

さらに、図1は、比較的長い停滞の時期を経なくては産業革命の第一波がこない可能性も示しています。図では、この事実が1720年から1758年まで続く落ち込みと停滞、さらには1813年から1835年にかけての落ち込みと停滞によって示されます。

1617年から1852年の間に、約16000に上る特許が取得されましたが、そのほとんどが1700年代に入ってからのものでした。また、特許数は、第一次産業革命の開始時点でさえ年間数十にのぼり、19世紀にはいって百を超し、その50年後には数百に達しました。こうした事実から、産業革命が、単に少数の有名な大発明だけではなく、互いに独立した多数の発明家の努力にけん引されたことが見てとれます。有名な発明は大切な要素です。しかし、そうした大発明の陰に無数の発明家の努力が隠れていることを図は示唆しています。

3. イノベーションと市場の質のダイナミクス

本研究では、こうした歴史的事実を反映する動学モデルを構築し、新技術への需要と供給の関係によって産業革命サイクルが生成されることを示されます。モデルでは、たくさんの同質な発明家が、技術の独占的利用から発生する創業者利益を求め、製品の差別化によって、少しずつ異なる生産技術を開発すると仮定されます。同時に、発明や生産に携わる労働者は、経験を通じて、その生産性を徐々に高めていくという仮定がおかれます。

経済に存在する既存技術が比較的少数である場合、技術の希少性が高いということになります。その結果、発明家は発明の独占的利用により、莫大な独占的創業者利益を得ることができます。これは独占度の高まりと市場の質の低下を意味します。現代社会で考えると、アマゾンやグーグルといった少数の企業が少しずつ異なるサービスを提供し、それぞれの分野で情報産業を独占し、莫大な利益を得ている状態を描写しています。

独占的創業者利益が大きいことは、新たな技術開発と市場参入の誘因を高めます。開発が進むとともに、技術の希少性は解消し、技術革新の誘因は薄れます。もし、労働者の生産性が上昇しなければ、そのまま、技術革新の誘因が薄れていき、定常的な状態に移行していくはずですが、しかし、人間は経験を通じて、常に生産性を高めていく生き物です。

現代社会でも、1980年代には考えもしなかったコンピュータ技術を多くの人々が身につけています。レストランに連れきてもらった三歳児がスマートフォンやタブレットに熱中している光景をよく見かけます。そういう子供たちが大人になり、働きはじめるときの生産性は昔とはくらべものにならないでしょう。これは、人間が意識せずに新しい技術を身に着けていくことを示しています。

人間の持つ能力・生産性が向上すると、いったん希少性を失った技術も次第に希少性を高めます。発明家やR&D企業はそこに再び創業者利益の源泉を見出すわけです。それが次の産業革命の原動力となります。これを図式化すると、

- 技術の希少性の増大
- ⇒ 新技術への需要の拡大
- ⇒ 新技術の独占による創業者利益の拡大（市場の質の低下）
- ⇒ 多数の新技術の開発（産業革命）と市場参入
- ⇒ 独占利潤と技術の希少性の低下（市場の質の向上）
- ⇒ 人間の能力・生産性の向上
- ⇒ 技術の希少性の増大

というプロセスを通じて、産業革命サイクルが発生するというのが本研究の発見です。

本研究のモデルは、人間の能力・生産性の向上、多数の技術の間の代替性、長期利子率を定める将来所得の割引因子といった変数をパラメーターとして持っています。それらのパラメーターが現実の実証研究で示された値に設定され、さらに、発明から十分な創業者利益が保証される期間が8年から10年程度である場合、100年に一度の産業革命が観察されるというのが本研究の結果です。

上の図式は産業革命サイクルを技術の希少性の変動という視点から説明したのですが、同時に、市場の質の変動を示すものとも解釈できます。多数の技術革新をもたらす産業革命は、新技術の独占度を高め、市場の質を低下させます。しかし、そういう状態は、新しい技術を作る企業のさらなる参入によって、徐々に解消されます。その結果、技術の希少性は解消され、独占度が下がることで市場の質が向上します。その背後で、人間の能力・生産性は不断に向上しているわけで、それが技術の希少性を高めていきます。この市場の質の向上と技術の希少性の上昇が次の産業革命の導火線の役割を果たすわけです。

つまり、産業革命のような大規模な技術革新は高質な市場に支えられるということです。現在、我が国は30年以上に及ぶ長期停滞に悩まされています。長期停滞の原因として、高度成長期に形成された非競争的な市場環境を転換できなかったことも指摘されてきました。高質な市場づくりによって、次の産業革命の基礎が作られるということは、レーガン改革、サッチャー改革の経験からも明らかです。

長期停滞の結果、世界の最先端を走っていた産業技術も少しずつ衰退をつづけています。この趨勢を逆転し、新たな成長経路に経済を乗せるためには、広範囲にわたるイノベーションが不可欠です。そのために今望まれるのは、高質な市場環境づくりだということを本研究は示唆しています。

4. 二次元のカオス現象としての産業革命サイクル

本研究のもう一つの発見は、産業革命サイクルを説明するための数学的メカニズムにあります。話は少し込み入ってしまいますが、最後に、この点を簡単にご説明します。

現実経済における産業革命サイクルのように、不規則でもあり、かつ、一定の規則性も持つ現象を説明するには、カオス理論を応用するのが最も適切です。カオス理論は、非常に単純な非線形モデルからきわめて複雑な時系列データが生成されるという現象です。この現象は20世紀の後半、自然科学の諸分野で同時並行的に発見されました。さらに、経済学に応用しやすい形でのカオス理論として、制約付きカオスという現象も報告されています (Nishimura and Yano, 1995)。

産業革命サイクルをカオス現象として説明することが難しいのは、既存技術と新技術を区別し、二つの変数として取り扱う必要があるためです。実際、本研究が取り扱うモデルを解くと、次のような式に帰着することがわかります。

$$n_t = \frac{1}{\alpha}(n_{t-1} + z_{t-1}) \quad (1)$$

$$\beta \frac{n_{t-1} + (1-\theta)^{\frac{1-\theta}{\theta}} z_{t-1}}{n_{t-1} + z_{t-1} + \alpha(1-\theta)^{\frac{1-\theta}{\theta}} z_t} \cdot \alpha \frac{(1-\theta)^{\frac{1-\theta}{\theta}} (E - \theta\kappa) z_t}{n_{t-1} + (1-\theta)^{\frac{1-\theta}{\theta}} z_{t-1}} \leq \kappa \quad (2)$$

ここで取り扱う変数 n_t は第 t 期における既存の技術の数、 z_t は新技術の数を示しています。また、(1) と (2) 式をよくみると、 n_{t-1} 、 z_{t-1} という $t-1$ 期の二つの変数の値が決定されると、 n_t 、 z_t という次の期の変数の値が決定されることがわかります。このように、今期の変数の値が来季の変数の値を定める方程式体系は動学システムと呼ばれます。カオスは動学システムに発生する現象です。

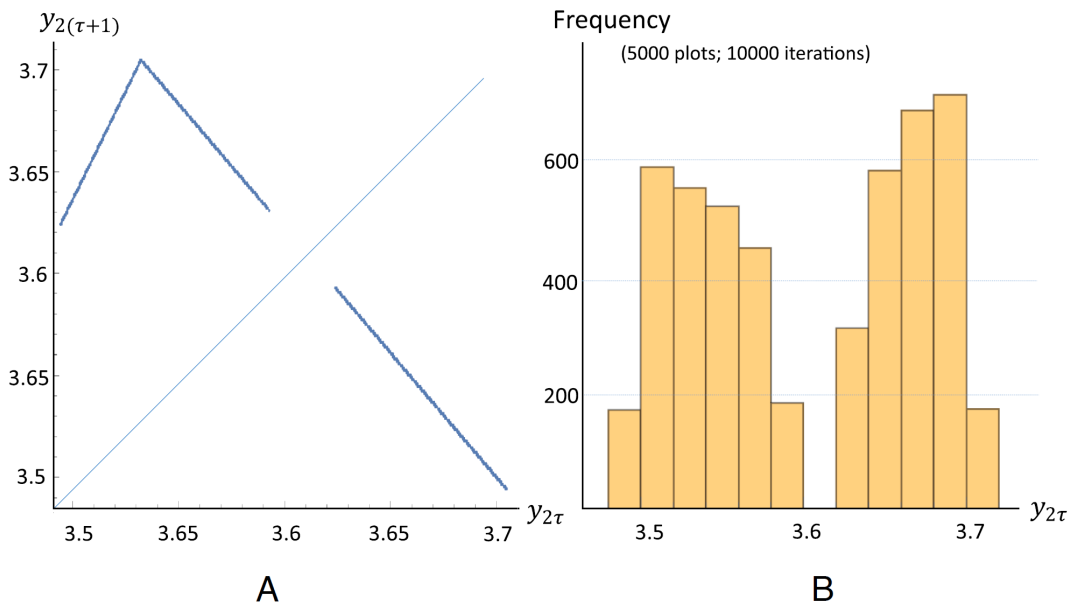


Fig. 2. Double-period plots of innovation dynamics.

上記のシステムは非常に複雑なように見えますが、二つの変数の初期の値(n_0, z_0)を適宜設定してやれば、そこから順に(n_t, z_t)の値を生成することができます。そこで、片方の変数(例えば n_t)だけに着目して、一期間置きに $n_0, n_2, n_4, n_6, \dots$ の値を拾い、(n_0, n_2), (n_2, n_4), (n_4, n_6), ...を順に二次元平面上にプロットすると Fig2 (図 2) A の山形の強い非線形性を持つグラフが形づくられます。

この非線形グラフはテントマップと呼ばれる一次元カオスを生成するシステムのグラフと一致しています。ここで、 $n_0, n_2, n_4, n_6, \dots$ という時系列データが図 2A に示されるシステムによって生成されているとしましょう。その場合、横軸を任意の区間に分け、それぞれの区間に時系列データがおちる相対頻度を計算すると、初期値の設定とは全く無関係に定まることがわかります。さらに、区間の分け方と相対頻度の関係は、確率論的性質を満たします(たとえば、一つの区間をどのように細分化しても、細分化した区間にデータが落ちる頻度の合計は元の区間にデータが落ちる頻度と同じになるといった性質です)。つまり、時系列データの値の相対頻度は確率密度関数で示すことができますと言い換えることができます。この性質はエルゴード性と呼ばれ、1930 年代にバーコフとフォン・ノイマンという高名な数学者によって証明が与えられました。

本研究の発見は、もとのシステム自体は二次元の非常に複雑なシステムであっても、一期間置きに時系列データをとると Fig2 (図 2) B のような相対頻度のグラフが書ける場合があるということです。この発見に基づき、どのような場合に、二次元の動学システムが図に示すような性質を持つかを、制約付きカオスを二次元に拡張することによって、示したのが本研究の数学的貢献です。

注記：本研究は、RIETI の古川プロジェクトにおいて執筆されたディスカッション・ペーパー RIETI DP, 19-E-008, 2019, “Two-dimensional Constrained Chaos and Time in Innovation: An analysis of industrial revolution cycles” を発展させたものです。

参考文献

矢野 誠『「質の時代」のシステム改革』, 岩波書店 (2005)

K. Nishimura, M. Yano, Nonlinear dynamics and chaos in optimal growth: An example. *Econometrica* 63, 981–1001 (1995).

B. Woodcroft, *Alphabetical Index of Patentees of Inventions: From March 2, 1617 (14 James I.) to October 1, 1852 (15 Victoria)*, London (1854).