論　説

AI が経済成長に与える影響

―― モデル化とシンギュラリティに関する概説 ――

濱　田　弘　潤*

概 要

本論文は，AI（人工知能）が経済成長にどのような影響を与えるのかに関する既存の理論研究を概観し，モデル化の課題と起こり得る結論について概説する．また AI がもたらすシンギュラリティについても考察し，どのようなモデルを検討するのかによって起こり得る経済成長の帰結が異なることを説明する．AI が経済成長に大きなインパクトをもたらす可能性は，近年研究者のみならず世間一般でも共通認識が形成されつつある．しかし，経済理論を用いてこのインパクトをどのように説明し評価するのかについては，経済学者の間で必ずしも結論が定まっている訳ではない．本論文では，Aghion, Jones, and Jones (2017) の論文を紹介し，AI が経済成長に与える影響を経済理論ではどう捉えるべきかについて考察することで，AI が経済成長に与える可能性のいくつかを議論する．さらに，AI が近い将来，シンギュラリティ(singularity) に到達すると予想する研究者も多い．シンギュラリティを経済成長理論ではどのように捉えるのかについて，4 つのシナリオを分類し，それぞれの下で生じる未来について要約する．

Keywords: AI（人工知能），経済成長，自動化，シンギュラリティ，生産関数

JEL classifications: E13, E23, O14

* 住所：〒 950-2181 新潟市西区五十嵐 2 の町 8050 新潟大学経済科学部
Tel. and Fax: 025-262-6538
Email: khamada@econ.niigata-u.ac.jp

1　はじめに

最近，AI という言葉を見聞しない日はない．AI は artificial intelligence の略で，日本語で人工知能と訳されることは多くの人が知っている．実は AI の厳密な定義は専門家の間でも明確には定まっていないが，簡潔な一つの定義を紹介すると AI とは,「言語の理解や推論，問題解決などの知的行動を人間に代わってコンピュータに行わせる技術」である.[1] 2006 年にトロント大学の英国人研究者，ジェフリー・ヒントン (Geoffrey E. Hinton) がディープラーニングの手法を発明して以来，第 3 次 AI ブームが起こり，2005 年に米国人未来学者のレイ・カーツワイル (Ray Kurzweil) が著書で，2045 年にシンギュラリティが訪れるという説を発表するなど，現代における AI 技術の進展が，我々の生活にこれまでと違う大きなインパクトを与えるという認識が，世間一般で形成されつつある．シンギュラリティ(singularity) は，日本語では技術的特異点と訳され，こちらも AI と同様に明確な定義がないが，AI が知識・知能の点で人間を超越し，科学技術の進歩を主体的に担い世界を変革する時点を指す．この「2045 年問題」が果たして生じるのかについては，研究者間で賛否どちらの意見も存在する．いずれにせよ，近年脚光を浴びている AI について，特に経済的観点から，AI が経済成長にどのような影響を与えるのかについて考えることは，我々の未来を予測する上で非常に重要な課題である．本論文は，AI と経済成長の関係を考察する経済成長理論の既存研究をサーベイし，AI と経済成長について考えるための簡潔な枠組みを提示することを目的とする．

一部の専門家を除く大多数の人々にとっては，AI が何であるのかについて未知の要素や不確実性が強い．このため必要以上に，AI がもたらす未来について不安や懸念が増幅される傾向にある．AI を経済学的に分析する際も，AI が未知なるものであるためにどう分析すればよいか，分析手法が分からないように一見したところ感じられるかもしれない．しかしながら，我々人類の経済史を紐解けば,「天が下に新しきものなし」と言うことができる．このことわざに従って人類のこれまでの経済史の知見を活用しつつ，AI と経済成長の関係について簡潔かつ十分な形で考察することができる．経済成長理論では近年，上記の考えに従い，AI が経済成長にもたらすインパクトを実際に分析しようとする考え方が起こっている．本論文ではこうした先行研究の中でも，AI と経済成長の関係について最も簡潔に複数のシナリオを提示した Aghion, Jones, and Jones (2017) に基づき，AI と経済成長の関係を分析する先行理論研究をサーベイし，AI のモデル化の違いによって起こり得る未来像が異なるのを示すことを試みる．

経済史からいくつかの事例を挙げて考えてみよう．18 世紀イギリス産業革命において，工場制手工業（マニュファクチュア）から工場制機械工業へ生産過程が変化する時期，綿織物工業では，ジェニー紡績機 (1764)，水力紡績機 (1771)，ミュール紡績機 (1779) が綿織物の生産性を飛躍的に高めた．同じ時期に，ジェームズ・ワット (James Watt) の蒸気機関 (1769) は，人力や水力に変わる動力源として産業革命を支えると同時に，交通機関に利用され人々の移動の利便性を飛躍的に高めた．19 世紀に入ると内燃機関が発明され，馬力からトラクターへの移行による農工業の生産

[1]『ASCII.jp デジタル用語辞典』による（2021 年 3 月 31 日閲覧）.

性向上，馬車から自動車への移行による利便性の向上をもたらした．このように経済社会に大きなインパクトを与える重要な技術革新は非連続的・間欠的に生じており，当時を生きた人々も技術革新がもたらす未来を適切には予測できなかったという点で，現代の AI と似た面がある．このように大規模な技術革新がもたらす非連続的なインパクトは，飛行機，半導体，コンピュータ，インターネットと，我々の時代にまで連綿と続くものであり，AI は我々が現時点で直面している最新の技術革新と言えるであろう（但しそのインパクトの大きさは当然異なる）．

ところで人類の歴史において，過去の様々な技術革新が AI と同様に生産性を大きく向上させるという類似性に加えて，これまでの人類の技術革新には一貫した共通の特徴が一つある．これまで牛馬を用いた農作業をトラクターに代替することは，紡績機，半導体，コンピューターの発明と共通点がある．それは，従来人間が行ってきた仕事を機械が代替するという共通点である．この人間の仕事（労働）を機械（資本）が代替するという技術革新の特徴は,「オートメーション (automation)」（自動化）と呼ばれる．すなわち，これまでの技術革新は全てオートメーションとして，共通した観点から統一的に考察することができる．そして，近年の AI 技術の普及もまた，オートメーションの一形態として，これまでの技術革新の分析と同様に分析することが可能である．勿論，そのインパクトの大きさについて，またオートメーションが従来の技術革新とは異なる形で起こる可能性については，十分な検討が必要である．しかしながら，AI の持つ本質的機能の一つがオートメーションであると考えることにより，これまでの経済分析と共通の分析基盤の下で，AI と経済成長の関係を分析できることになる．

本論文の構成は以下の通りである．第 2節では，オートメーションの観点から AI の進展に伴う生産技術の変化を捉えるモデルを紹介し，既存の経済成長との関係及び，得られる結論について説明を行う．第3節では，AI を生産技術におけるオートメーションの進展としてではなく，知的活動を変革させるものとして捉えることで，AI の普及が経済成長に与える影響について説明を行う．第 4節では，生産技術や知的活動の漸進的変化による分析という考えを超えて，シンギュラリティの観点から AI を捉える考え方を紹介し，起こり得るシンギュラリティをいくつかに分類し，それぞれのケースで起こり得る経済成長の将来について概観する．第5節では，シンギュラリティへの反論に関する観点をいくつか紹介する．第6節では，まとめと今後の課題を述べる．

2　オートメーションとしての AI

初めに本節では，オートメーションを促進するものとして AI を捉える．すなわち，AI がこれまでの技術革新（イノベーション）と同様に，基本的にはオートメーションの進展として捉える考えである．第 1節でも述べたように，人類が行ってきた技術革新の共通した特徴は，人間が行ってきた仕事を機械が代替するという意味で「オートメーション（自動化）」である．この考え方に立てば，程度の差こそあれ AI も他の技術革新とは定性的な違いがない．従ってこの立場から眺め

れば，産業革命以来の 200 年の経済史の経験を踏まえて，AI が経済成長に与える影響についての未来像を描くことができる．表 1に産業革命以降の主な技術革新について列挙するが，これらのほぼ全てがこれまで人間が行ってきた仕事を，機械が肩代わりする形で生産性の向上に活用されてきた．そして AI についても，過去から断絶した非連続的変革と考えるより，これまでの技術革新と同様にオートメーションが進行する最新のプロセスと考えるのが，分析の第一歩として有効である．またこの分析視点は，起こり得る AI の影響について，過去の歴史的経験と照らし合わせて考察することを可能とする．

西暦	技術	主な産業・用途
1760-80 年代	ジェニー紡績機 (1764)，ミュール紡績機 (1779)，力織機 (1785)	綿織物工業
1776 年	蒸気機関	動力源，輸送
1860 年代	内燃機関	動力源，輸送
1870-90 年代	電球 (1879)，発電所 (1882)，無線電信 (1894)	照明，動力，通信
1946 年	コンピュータ (ENIAC)	情報処理
1959 年	集積回路 (IC)	情報処理
1969 年	インターネット (ARPANET)	通信
1980 年代	産業用ロボット	製造業
2000 年代	クラウドコンピューティング (SaaS)	情報処理
2020 年代	人工知能 (AI)	???

表 1: 産業革命以降の主な技術革新の一例

2.1　コブ・ダグラス型生産関数

はじめに，コブ・ダグラス型 (Cobb-Douglas) 生産関数を用いて，オートメーションと経済成長との関係を最も簡潔に分析する枠組みを考える．機械の普及が経済成長に与える関係を分析する枠組みとして，Zeira (1998) によって初めて示されたものである．

n 種類の生産要素から生産される，次のコブ・ダグラス型生産関数を考える．

$$Y = AX_1^{\alpha_1}X_2^{\alpha_2} \times \cdots \times X_n^{\alpha_n} = A\sum_{i=1}^{n} X_i^{\alpha_i}. \tag{2.1}$$

A は全要素生産性，X_i は i 番目の生産要素，Y は生産量，$\alpha_i \in (0,1)$ は第 i 生産要素の要素分配率である．規模に関する収穫一定として，$\sum_{i=1}^{n} \alpha_i = 1$ を仮定する．Zeira (1998) は生産要素 X_i を中間財と考えたが，仕事（タスク）と解釈することもできる．Acemoglu and Author (2011) は X_i をタスクと解釈するが，どちらの解釈も可能であり，以下本稿では主に X_i をタスクと解釈して議論を進める．

X_i を第 i 番目のタスクに必要な生産要素投入量と考える時，まだ自動化されていないタスクは労働力を用いて生産される．一方，オートメーションが進みタスクが自動化されると，機械設備のような資本を用いて生産される．従って，自動化前後でタスク i に必要な生産要素は以下の通り

となる．

$$X_i = \begin{cases} L_i & \text{自動化前} \\ K_i & \text{自動化後} \end{cases} \tag{2.2}$$

ここで，L_i と K_i はそれぞれ，タスク i の生産に必要な労働と資本の投入量である．全てのタスク $i = \{1, \cdots, n\}$ についても同様に考えれば，総資本量 K と L が全てのタスクに適切に配分され，t 期の生産関数は次式の通りとなる．

$$Y_t = A_t K_t^{\alpha} L_t^{1-\alpha}. \tag{2.3}$$

ここで (2.3) の α は，オートメーション化されたタスクのシェアを反映する指標となる．従って，オートメーションの進展は α の増加として捉えることができる．

以下では当面，α を外生変数として，α の増加に関する比較静学を考える．すなわち，オートメーションの進展がもたらす影響を考える．標準的な新古典派成長モデルで資本投資率を一定として簡単化した状況を考えると，コブ・ダグラス型生産関数で α は，資本要素への支払いシェアそのものであり，全要素生産性の成長率を g，1 人当り生産量 $y \equiv Y/L$ の長期の経済成長率を g_y とおくと，次式が成立する．

$$g_y = \frac{g}{1-\alpha}. \tag{2.4}$$

オートメーションの進展は資本シェア α を増加させ，資本蓄積による乗数効果のため長期の成長率 g_y を上昇させる．AI もオートメーションの一種と考えるならば，上記の枠組みに従って議論する場合，AI 技術の普及は長期の成長率を上昇させると言える．

Zeira (1998) は，オートメーションが産業革命以降現在もなお進行中である点を強調しており，我々は上述の簡潔な設定で，オートメーションの本質を理解することが可能である．しかしながら，この単純な設定には問題点が一つある．オートメーションの進展に伴い資本シェアと成長率が上昇するという (2.4) から得られる結論は，現実の実証データと整合的でない．英国の経済学者ニコラス・カルドア (Nicholas Kaldor) は，Kaldor (1961) の中で，経済成長率と資本シェアが時代を超えて一定で安定的に推移する点を指摘した．また例えば Jones (2016) では，20 世紀米国のデータで資本シェアが安定的で増加傾向にないことを指摘している．このため Zeira (1998) のモデル化は，歴史的事実と整合的になるように修正する必要がある．

2.2 CES 生産関数

上記の問題を解決するために，Acemoglu and Restrepo (2018) は，コブ・ダグラス型生産関数に代えて CES(constant elasticity of substitution) 生産関数を考えた．タスクの数とオートメーションの進展を内生化することにより，歴史的事実と整合的な分析を行った．CES 生産関数は生産要素の

代替の弾力性が一定となる生産関数である．具体的には，各タスク i が労働と資本を用いて CES 生産関数に従って生産され，最終財 Y は全タスクを用いて生産される．

次の生産関数を考える．

$$Y_t = A_t \left(\int_0^1 X_{it}^{\rho} \mathrm{d}i \right)^{\frac{1}{\rho}}. \tag{2.5}$$

$\rho < 0$ を仮定し，代替の弾力性 $\sigma = 1/(1-\rho)$ が 1 未満であるとする．A_t は t 期の全要素生産性，X_{it} は t 期のタスク i で，全タスクを用いて最終財が生産される．タスクは $i \in [0,1]$ 区間上を一様分布しているものとする．

タスク i は労働と資本を用いて，次の CES 生産関数に従って生産される．

$$X_{it} = B_t \left(\alpha_t^{1-\rho} K_{it}^{\rho} + (1-\alpha_t)^{1-\rho} L_{it}^{\rho} \right)^{\frac{1}{\rho}}. \tag{2.6}$$

B_t はタスクに依存しない生産性のパラメータ，K_{it} と L_{it} は t 期の資本と労働投入量，α_t は CES 生産関数の生産要素のシェア・パラメータである．ここで Zeira (1998) と同様に，α_t をオートメーションの進展度と考えることができる．

Acemoglu and Restrepo (2018) は，タスクの数とオートメーションの進展を内生化したモデルを考えることで，研究活動には既存タスクの自動化と新タスクの発見という異なる 2 つの方向性が内在する状況を分析した．彼らの定式化は，Zeira (1998) モデルの欠点を克服し，経済成長率と資本シェアが一定という Kaldor (1961) の指摘と整合的なモデル構築を可能にする．すなわち，古いタスクの自動化と同じスピードで新しいタスクを発明できれば，自動化されるタスクの割合は一定となり，資本シェアと経済成長率の安定的推移を説明できる．

2.3　ボーモルのコスト病

産業構造の変遷に関する過去のデータが示唆するように，GDP や雇用における第 1 次産業（農林水産業）のシェアは減少している．同様に，製造業を含む第 2 次産業のシェアも多くの国で減少している．[2] オートメーションの普及は農業や製造業の資本シェアを増加させるので，資本シェアが時間を超えて安定的である状況であることは，農業や製造業の資本シェアの増加とこれらの産業の GDP シェアの減少との間でバランスが取れていることを意味する．

こうした産業構造の変化と整合的なモデルを用いてオートメーションを考察する際に，「ボーモルのコスト病 (Baumol's cost disease)」または「ボーモル効果 (Baumol effect)」が生じる可能性がある．ボーモルのコスト病とは，生産性が相対的に低い産業で生産費用が持続的・累積的に上昇する影響のことを指す．ウィリアム・ボーモル (William J. Baumol) は Baumol (1967) の中で，技術革新により資本集約的な製造業で生産性が向上するのに対し，労働集約的なサービス業では生産

[2] 経済発展に伴い，第 1 次産業から第 2 次産業，第 3 次産業へと GDP 及び雇用のシェアが変化する法則を，「ペティ＝クラークの法則」と呼ぶことがある．

性がほとんど向上せず，非生産的部門のコストが経済成長を制約することを論じた．言い換えれば，ある部門での生産性の急激な向上は，生産性の向上が進まない部門の経済への重要性を高める．同じことが，AI による生産性向上にも当てはまる可能性がある．

以下ではモデルを用いて，ボーモルのコスト病が生じる可能性を検討する．GDP を Y で表し，(2.5) と同じ CES 生産関数を用いて生産されるものとする．代替の弾力性を 1 未満とする ($\rho < 0$)．簡単化して，t 期の全要素生産性が次式のように外生的に成長すると考える．

$$A_t = A_0 \exp(gt). \tag{2.7}$$

A_t は技術変化を表し，その変化率は $g > 0$ である．代替の弾力性が 1 未満という仮定は重要で，この仮定が成立する時，各タスク X_{it} 間は粗補完性 (gross complements) の関係がある．タスク間に粗補完性が存在するということは，この生産関数の下で GDP は，最も生産性の低いタスクによって生産制約を受けるということを意味する．もし最も生産性の低いタスクが，主に労働を用いて実施されるタスクであるならば．この生産関数の下ではボーモル効果が発生する．

2.1節の Zeira (1998) の議論に従い，AI による技術革新が生産の自動化にあるとしよう．自動化前に財（タスク）は労働 1 単位を用いて生産されていたが，自動化後に資本 1 単位を用いて生産されるとすれば，(2.2) と同様に自動化前後の t 期のタスク i は以下の通りとなる．

$$X_{it} = \begin{cases} L_{it} & \text{自動化前} \\ K_{it} & \text{自動化後} \end{cases} \tag{2.8}$$

通常の新古典派経済成長モデルを考えると，経済は以下の 4 本の方程式で表現される．

$$Y_t = C_t + I_t, \tag{2.9}$$

$$\dot{K}_t = I_t - \delta K_t, \tag{2.10}$$

$$K_t = \int_0^1 K_{it} \mathrm{d}i, \tag{2.11}$$

$$L = \int_0^1 L_{it} \mathrm{d}i. \tag{2.12}$$

(2.9) は財市場の均衡式，(2.10) は資本蓄積方程式で δ が資本減耗率，(2.11) は総資本の各タスク i への分配式，(2.12) は総労働の各タスクへの分配式である．簡単化のため，総労働 L は一定とする．

資本と労働がタスク間で対称的に配分されていると仮定すると，自動化の進展は全タスクの生産における労働から資本への生産要素のシフトとみなすことができる．β_t を t 期に自動化されるタスクの割合とすると，自動化されたタスクでは K_t/β_t 単位の資本が使用され，自動化されていないタスクでは $L/(1-\beta_t)$ 単位の労働が使用される．(2.5) と (2.8) を用いて生産関数を書き換えると，

次式を満たす．

$$Y_t = A_t\left[\beta_t\left(\frac{K_t}{\beta_t}\right)^{\rho} + (1-\beta_t)\left(\frac{L}{1-\beta_t}\right)^{\rho}\right]^{\frac{1}{\rho}} \tag{2.13}$$

$$= A_t\left(\beta_t^{1-\rho}K_t^{\rho} + (1-\beta_t)^{1-\rho}L^{\rho}\right)^{\frac{1}{\rho}}. \tag{2.14}$$

従って以下の議論は，新古典派経済成長モデルで生産関数を (2.14) に特定化した設定とみなすことができる．均衡上で，自動化されたタスクの GDP に占めるシェアは，要素支払いに占める資本シェアに等しい．同様に，自動化されていないタスクの GDP に占めるシェアは，要素支払いに占める労働シェアに等しく，以下の式を満たす．

$$\alpha_{K_t} \equiv \frac{\partial Y_t}{\partial K_t}\frac{K_t}{Y_t} = \beta_t^{1-\rho}A_t^{\rho}\left(\frac{K_t}{Y_t}\right)^{\rho}, \tag{2.15}$$

$$\alpha_{L_t} \equiv \frac{\partial Y_t}{\partial L_t}\frac{L_t}{Y_t} = (1-\beta_t)^{1-\rho}A_t^{\rho}\left(\frac{L_t}{Y_t}\right)^{\rho}. \tag{2.16}$$

(2.15) と (2.16) より，自動化タスクの非自動化タスクに対する比率は，次式を満たす．

$$\frac{\alpha_{K_t}}{\alpha_{L_t}} \equiv \left(\frac{\beta_t}{1-\beta_t}\right)^{1-\rho}k_t^{\rho}. \tag{2.17}$$

$k_t \equiv K_t/L_t$ は，t 期の労働 1 単位当たりの資本量である．

タスク間の代替の弾力性が 1 未満という仮定 ($\rho < 0$) の下で，(2.17) は，要素支払いに占める資本シェア，言い換えれば自動化タスクのシェアに，2 つの効果が影響することがわかる．第一の効果は，1 人当り資本量 k_t を一定として，自動化されたタスクの割合 β_t の増加が，GDP に占める自動化タスクのシェアを増加させ，資本シェアを増加させるという効果である．この効果は，既に Zeira (1998) のモデルで示されたものと同じである．しかしながら第二の効果として，k_t が増加するにつれて，GDP に占める資本シェアすなわち自動化された部門のシェアが減少するという効果が存在する．特に，代替の弾力性が 1 未満という仮定は，生産要素の価格効果が大きいことを意味する．具体的には，生産性向上による急激な資本蓄積に伴い，自動化タスクの価格が非自動化タスクの価格に比べて大幅に下落する．需要が非弾力的であるため，タスクへの支出シェアも同様に減少する．[3] この結果，第一の効果を第二の効果が上回る．従って，タスク間の代替弾力性が 1 を下回る時，AI によるオートメーションの進展は，ボウモルのコスト病を引き起こす．すなわち，第 1 次産業（農業）や第 2 次産業（製造業）での AI の導入は，これらの産業部門の生産性向上を促すが，これらの部門の GDP に占めるシェアを急激に減少させる結果となる．もし第 3 次産業（サービス業）の GDP に占めるシェアが急激に増加し，この産業が労働集約的で低生産性部門であるならば，こうした産業がボトルネックとなり却って経済成長を低下させることになりかねない．以上が，AI の進展に伴ってボーモルのコスト病が生じる可能性についての説明である．

[3] 生じるロジックは次の通りである．AI による自動化の進展→ $\beta_t \Uparrow$ →自動化タスクと資本シェア $\Uparrow$ →自動化タスクと資本の価格 $\Downarrow$ →自動化タスク（による財）価格 $\Downarrow$ →代替弾力性 1 未満なので GDP に占めるシェア $\Downarrow$

2.4 均衡成長経路

2.3節で，タスクの自動化を考慮した生産関数 (2.14) が，新古典派モデルの生産関数の一つの特定化であることを確認した．実は，より一般的な生産関数を考えることで，オートメーションがもたらす影響をより包括的な形で分析することができる．

以下の生産関数を考える．

$$Y_t = A_t F(B_t K_t, C_t L_t), \qquad B_t \equiv \beta_t^{\frac{1-\rho}{\rho}},\ C_t \equiv (1-\beta_t)^{\frac{1-\rho}{\rho}},\ \rho < 0. \tag{2.18}$$

関数 $F(\cdot,\cdot)$ は通常の生産関数の性質を満たす資本と労働の 2 変数関数である．(2.18) の生産関数は，CES 生産関数の特殊ケースとして (2.14) を含んでいる．$\rho < 0$ の仮定の下で，オートメーションの進展（β_t の増加）は，係数 B_t を減少させると同時に，係数 C_t を増加させる．すなわち驚くべきことに，オートメーションは，資本の生産性を減耗し労働の生産性を増大させる技術変化の組合せに等しい．一見した限りでは，我々はオートメーションは資本の影響を高める技術と考えがちだが，実際のところは労働増強型で資本の影響を薄める技術となっている．[4]

オートメーションが資本消耗型技術であるという驚くべき結論は，次の理由による．自動化に伴う β_t の増加は 2 つの効果をもたらす．第一の効果は，資本がより多くのタスクに使われる効果で，これは資本増強的である．しかし一方でもう一つの効果として，一定量の資本が多様なタスクに利用されることでタスク当たりの資本量が希薄になり，資本消耗的になる効果がある．タスク間で補完性がある場合，第二の資本消耗的効果が第一の資本増強的効果を上回り，オートメーションは資本を消耗させる．反対に労働については逆の力が働き，少ない数のタスクに多くの労働を集中投下できるので，労働増強的技術となる．

それでは，β_t が一定のスピードで 1 に近づき，経済が完全自動化に向けて収束していく際に，均衡成長経路 (balanced growth path) では何が起こるであろうか．[5] Aghion, Jones, and Jones (2017) はシミュレーションを行い，3 つの異なる均衡成長経路の状況を導出し説明を行った．第一に C_t が一定の指数関数的速度で増加するケース，第二に生産要素のシェアが時間を通じて一定であるケース，第三に第一と第二のケースを組み合わせ，2 つのレジーム間をシフトするケースである．シミュレーション結果の詳細は彼らの論文を参照して頂くこととし本稿では省略するが，第一のケースでは，時間を超えて GDP 成長率が一定となる状況が起こり得る．毎年自動化が進展していくが経済成長率は一定であり，興味深いことに自動化が 100%近くになっても ($\beta_t \to 1$)，要素支払いに占める資本シェア α_K はおよそ 1/3 に留まる．この理由は，自動化されたタスクが安価な資本を用いて生産される際，要素間の代替弾力性が 1 未満であるので労働が使い続けられるためであ

[4] 但し注意点として，この結論はタスク間の代替の弾力性が 1 未満という仮定 ($\rho < 0$) に依存しており，もし弾力性が 1 を超えるならば結論は逆転する．

[5] β_t が一定の指数関数的速度で 1 に収束するということは，$1-\beta_t$ が 0 に収束し，(2.18) の労働投入量の係数 C_t が一定の比率で成長することを意味する．具体的に，$\gamma_t \equiv \beta_t$ とおくと，$C_t = \gamma_t^{(1-\rho)/\rho}$ であり，γ_t が一定の指数関数的速度で減少すると，C_t は一定の指数関数的速度で増加する．これより，γ_t の一定の成長率を $g_\gamma = -\theta$ とおくと，$\dot{\beta}_t = \theta(1-\beta_t)$

る．この結論はボーモル効果に起因している．GDP に占める自動化生産のシェアは約 1/3 に留まり，残りの 2/3 は労働によって生み出される．[6]

続いて第二のケースとして，生産要素のシェアが時間を通じて一定である状況を考える．自動化タスクの非自動化タスクに対する比率，(2.17) を一定として，対数を取り全微分をすると β_t の成長率 g_{β_t} に関して次式を得る．

$$g_{\beta_t} = -\frac{\rho(1-\beta_t)}{1-\rho} g_{k_t}. \tag{2.19}$$

g_{k_t} は労働 1 単位当り資本量 k_t の成長率であり，生産が自動化されるスピードとも言える．(2.19) が満たす状況は，ナイフ・エッジ的 (knife-edge condition) である．β_t の成長率 g_{β_t} が k_t の成長率 g_{k_t} とちょうど同じ率で成長する必要がある．この状況で，全要素生産性が一定率で外生的に成長するケースを考えると，ある数値計算結果では，生産要素シェアは一定であるにもかかわらず，GDP 成長率が上昇する．第一のケースでは，経済成長率一定で資本要素シェアが増加したので，第二のケースでは，経済成長率が減少するように見受けられるが，経済成長率は上昇する．全要素生産性が成長するということは，自動化以外の技術革新経路が存在することを意味する．例えば，人間による労働がコンピュータに置き換えられるだけでなく，コンピュータ自体の性能が向上することを意味する．この時たとえ生産要素シェアが一定であっても，第一のケースと異なり経済成長率は上昇する．しかしながらこのケースでは，経済が均衡成長経路をとることはない．

最後に第三のケースとして，第一と第二のケースを組み合わせて，自動化のプロセスが 2 つのレジーム間を移動する状況を考察する．全要素生産性が成長し，タスクの一定比率が自動化する第一のケースが生じるレジームと，β_t が一定で自動化が起こらないレジームを行き来するシミュレーションを行うことで，経済成長率や資本シェアについて様々な結論を得ることができる．こうした自動化が断続的に行われる状況では，レジームチェンジに伴い経済成長率や資本シェアが上昇・下落と変動する結果が生じ得る．このケースでは，資本シェアの上昇とそれに続く経済成長の低迷が生じるので，現実の経済成長率のデータと合致する一つの説明を与えることができるかもしれない．

3　知的活動としての AI

第 2節では，AI の普及を生産活動におけるオートメーションの一つの形態として，既存研究の議論を概観した．しかしながら，AI を単なる生産のオートメーションと同一視するのは適切ではない，と考える研究者も少なくない．AI は生産活動への技術革新に影響を与えるのに留まらず，我々の知的活動全般にも影響をもたらす可能性が高いからである．本節では，これまで人間が行っ

[6] このような結果が生じるためには，議論上本質的ではないが，付加的な条件を仮定する必要がある．本稿では省略する．

てきた知的活動を AI が代行し，イノベーションのアイディア創造自体が AI によって自動化される場合に，何が起こるのかについて紹介する．新しいアイディアの生産に AI を導入し，AI がこの経路を通じて経済成長にいかなる影響を及ぼすかを考察する．

3.1 アイディア生産関数

現実に，量子コンピュータを用いた計算を通じて新薬開発や新素材開拓など，様々なイノベーションが AI を通じて実現しつつある．AI により，イノベーションのアイディア創造自体が自動化される状況を，どのようにモデル化できるだろうか.「アイディア生産関数」というものを新たにモデルに導入し，調査研究のタスク (research task) のオートメーションを考えることで，前節と同様の議論を展開し，知的活動への AI の普及の影響を分析することができる．

最も単純化したモデルを考え，財の生産が労働とアイディアのみを用いて行われるものとする．生産関数は次式の通りである．

$$Y_t = A_t L_t. \tag{3.1}$$

ここで A_t と L_t はそれぞれ，アイディアの量と労働量に対応する．

アイディアは様々なタスクを用いて生み出される．この「アイディア生産関数」を次式のように定義する．

$$\dot{A}_t = A_t^{\phi}\left(\int_0^1 X_{it}^{\rho}\,\mathrm{d}i\right)^{\frac{1}{\rho}}. \tag{3.2}$$

$\phi > 0$ は全要素生産性の成長率である．前節 (2.18) と同様，タスク間の代替弾力性が 1 未満であると仮定する ($\rho < 0$)．β_t の割合のタスクが自動化されるとすると，前節と同様に CES 生産関数の設定に従えば，アイディア生産関数は次式の形で表現される．

$$\dot{A}_t = A_t^{\phi}\left[(B_t K_t)^{\rho} + (C_t S_t)^{\rho}\right]^{\frac{1}{\rho}} \equiv A_t^{\phi} F(B_t K_t, C_t S_t). \tag{3.3}$$

S_t は，アイディアを創造するためのリサーチに必要な労働力である．(2.18) と同様に，$B_t \equiv \beta_t^{(1-\rho)/\rho}$，$C_t \equiv (1-\beta_t)^{(1-\rho)/\rho}$ である．

上記のアイディア生産関数の下で，以下のことが言える．第一に，β_t が時間を通じて一定で，ある時点に増加する状況を考える．その時点において B_t の減少と C_t の増加を伴う．アイディア生産関数は 1 次同次の CES 生産関数なので，(3.3) は $\dot{A}_t = A_t^{\phi} S_t F(BK_t/S_t, C)$ と変形できる．リサーチ労働 1 単位当り資本量 K_t/S_t が増加するならば，CES 生産関数は漸近的に C に比例的に増加する．言い方を変えれば，定常状態近傍で C に関して正の傾きで線形近似できる．このため，アイディア生産は，希少な生産要素であるリサーチ労働により制約を受ける．従って，自動化はソローモデル (Solow model) におけるレベル効果 (level effect) を生むが，アイディア生産の係数 ϕ が 1 を下回

るならば，長期の経済成長率は不変である．一方，$\phi = 1$ の時は，内生成長モデルと同様に，自動化は長期の経済を成長させる．

第二に，上で述べた状況と同様に，β_t が一時点だけジャンプする状況を考える．アイディア生産関数が通常の生産関数と同じとは限らないので，$\rho < 0$ の仮定を変えて，アイディア生産関数の代替の弾力性が 1 に等しい時 $(\rho \to 0)$ を考える．この時には，2.1節で説明した Zeira モデルと同様のケースとなり，アイディア生産の一時点の増加は長期の経済成長率を高める．アイディア生産要素の長期的な蓄積が乗数効果を生み，経済成長を促進する．さらに，代替の弾力性が 1 より大きいケース $(\rho > 0)$ を考えると，$\rho < 0$ とは逆のロジックが成立する．すなわち，アイディア生産関数は漸近的に豊富な生産要素である資本に比例する．この時，ある追加的条件下では，爆発的経済成長が生じ，有限期間内に所得が無限になる（第 4節で説明するシンギュラリティの状況である）．但し，爆発的成長は自動化なしでも $\rho > 0$ の下で発生し，リサーチのための労働は必要な生産要素とは言えない．このため，アイディア生産関数についても $\rho < 0$ を仮定するのが自然である．

3.2　知的活動の連続的自動化

前節では，アイディア創造の自動化が一回限り改善してジャンプする状況を考察した．続いて，アイディア生産の自動化が一定の比率で連続的に生じる状況に分析を拡張する．知的活動の自動化により，新たに自動化されるタスクが，自動化されていないタスクの一定割合を占める連続的な自動化プロセスを考える．CES 生産関数の性質を利用して (3.3) を変形すると，$\dot{A}_t = A_t^{\phi} C_t S_t F(B_t K_t / C_t S_t, 1)$ と変形できる．多くのパラメータの範囲で成立するように，$B_t K_t / C_t S_t \to +\infty$ と発散するならば，定常均衡近傍で $\dot{A}_t$ は，$A_t^{\phi} C_t S_t$ に漸近的に比例する．

この分析は，Jones (1995) が分析した「経済成長の R&D ベースモデル」と同様の設定となる．$\dot{A}_t$ が $A_t^{\phi} C_t S_t$ に比例する時，次式が成立する．

$$\frac{\dot{A}_t}{A_t} = \frac{C_t S_t}{A_t^{1-\phi}} \Rightarrow g_A = \frac{g_C + g_S}{1-\phi}. \tag{3.4}$$

ここで，$g_i, i = \{A, C, S\}$ は各変数の成長率を表す．AI によるアイディア生産の自動化がない状況では $g_C = 0$ が成立し，リサーチ労働の成長率 g_S がアイディア生産の成長率を決定した．Jones (1995) のモデルでは $g_C = 0$ であり，リサーチ労働すなわち人口の成長率が経済成長率を決定した．しかし，自動化の下では $g_C > 0$ であり，知的活動の促進により経済成長が高まる．これにより，人口成長率やリサーチ労働の成長率に制限されることなく，AI によるリサーチの自動化により，指数関数的な急激な経済成長率の達成が可能となる可能性がある．より具体的に言えば，たとえ研究者数が一定でも，タスク当たりの研究者数が急激に増加し，各研究者が自分のタスクにより一層集中して従事できるようになる．

4 シンギュラリティ

Kurzweil (2005) が，2045 年にシンギュラリティが訪れるという説を発表して以来，シンギュラリティが経済成長に与える影響についても近年，活発な議論が行われている．[7] これまでの議論では，AI が財の生産または知的活動におけるアイディア創出をオートメーション化するという観点で捉えてきたが，自動化の進展の漸進的な効果として考察してきた．しかしながら，シンギュラリティを議論する多くの研究者は，AI による生産活動及び知的活動への技術革新について，連続的・漸進的なものではなく，過去の技術革新と比べて断層的かつ非連続的にジャンプするものとして捉えている．この「技術的特異点」を超えた後は，経済成長率が指数関数的に爆発するという将来予測を立てる研究者もいる．米国の数学者・計算科学者であり，SF 作家として技術的特異点という概念の普及に貢献したヴァーナー・ヴィンジ (Vernor Vinge) は，Vinge (1993) の論文において，自己変革型 AI が人類の知性を遥かに超えた「知的爆発 (intelligence explosion)」をもたらし，有限時間内に無限の知性が出現する未来を予想している．

本節でシンギュラリティを扱う際には，これまでの節で導入した生産活動または知的活動の生産関数に関する議論を行う．標準的経済成長理論では，定常状態での経済成長率一定や，カルドアが指摘した経済成長率と資本シェアが時間を通じて安定的といった，歴史的データと整合的な理論の考察を行ってきた．シンギュラリティを分析する時には，従来の分析とは異なり，将来にわたり経済成長率が急激に増加するシナリオを考察する必要がある．定常状態の経済成長と異なる成長シナリオを分析するために，経済成長のレジームを次の 2 つのタイプに分けて考える．第一のタイプのレジームは，経済成長率が上限なしで増加するが，有限時間の各時点では有限の成長率に留まる成長レジームである．第二のタイプのレジームは，無限の生産量が有限時間内で達成可能となる成長レジームである．

実際のところ，シンギュラリティに関心を持つ未来学者が，どちらのタイプの成長レジームを想定しているかについて，意見が一致していないかもしくは曖昧のままであることが多い．[8] 以下では，どちらのタイプの成長爆発が到来するかを予測するのは，現時点では若干ナンセンスかつ著者の手に余るので，シンギュラリティが経済成長にもたらす起こり得るシナリオを 4 つほど例示するのに留める．

4.1 生産活動の完全自動化

一番目のシンギュラリティの例として，AI による生産活動の完全自動化の実現を考える．全ての生産活動のタスクは労働力ではなく AI に置き換えられる．財の生産を完全自動化することにより，第一のタイプのシンギュラリティが生じる．第一のタイプが生じることは，内生的経済成長論で技術革新の成長率が正の AK モデルにより明らかである．第 2節と同様の設定を考え，全てのタ

[7] Nordhaus (2015) は，シンギュラリティと経済成長の関係をまとめた近年のサーベイ論文である．

[8] 例えば Vinge (1993) は，第二のタイプの成長爆発を議論しているように思われる．一方 Kurzweil (2005) は，第一のタイプのシンギュラリティの到来を 2045 年と予想しているように思われる．

スクが自動化された後の生産関数は，$Y_t = A_t K_t$ とまさに AK モデルそのものに他ならない．経済成長率は全要素生産性 A_t の増加と共に指数関数的に上昇する．A_t の増加に加えてさらに，新技術の発見に伴う生産性の成長が見込めれば，時間と共に経済成長率はさらに加速し得る．具体的には，通常の資本蓄積方程式 $\dot{K}_t = sY_t - \delta K_t$（$s$ は貯蓄率，δ は資本減耗率）の下で，GDP 成長率は $g_Y = sA_t - \delta$ である．さらに技術進歩率 g が追加されると，経済成長率は $g_Y = g + sA_t - \delta$ となる．

4.2　知的活動の完全自動化

二番目のシンギュラリティの例は，AI による知的活動の完全自動化である．全ての知的活動は人間ではなく AI に置き換えられる．財の生産のみならずアイディア生産が自動化されると，経済成長率が加速度的に上昇する結果が起こりやすくなる．実際，国民所得が有限期間内に無限になるような第二のタイプのシンギュラリティが数学的には起こり得る．第3節と同様のモデルを考える．ひとたび全ての知的生産活動が AI によって自動化され，人類に代わり AI が全てのアイディア生産に携わるならば，(3.3) のアイディア生産関数は次式に置き換えられる．

$$\dot{A}_t = A_t^{\phi} K_t. \tag{4.1}$$

$\phi > 0$ より，この A_t に関する微分方程式の下で A_t は加速度的に増加し，爆発的な経済成長が起こり得る．

資本蓄積方程式に財の生産関数 $Y_t = A_t L$ を代入した $\dot{K}_t = sA_t L - \delta K_t$ と，(4.1) の 2 式からなる，A_t と K_t の 2 次元微分方程式体系を式変形し，A_t と K_t の成長率に関して次式を得る．

$$g_{At} \equiv \frac{\dot{A}_t}{A_t} = \frac{K_t}{A_t} \times A_t^{\phi}, \tag{4.2}$$

$$g_{Kt} \equiv \frac{\dot{K}_t}{K_t} = sL\frac{A_t}{K_t} - \delta. \tag{4.3}$$

(4.2) と (4.3) を満たすためには，$g_{At} > g_{Kt}$ が成立しなければならず，資本蓄積により g_{Kt} は時間と共に上昇するので，アイディア生産の成長率 g_{At} も時間と共に上昇する．簡単な数値例で資本減耗率 $\delta = 0$，$sL = 1$ として，(4.2) と (4.3) より g_{At} と g_{Kt} を掛け合わせると，次式を得る．

$$g_{At} g_{Kt} = A_t^{\phi} \;\Rightarrow\; g_{At}^2 > A_t^{\phi} \;\Leftrightarrow\; g_{At} > A_t^{\frac{\phi}{2}}. \tag{4.4}$$

A_t の成長率 g_{At} は，少なくとも $A_t^{\phi/2}$ 以上のスピードで成長する．このことは，A_t が加速度的に増加し，成長爆発が起こることを意味する．すなわち，知的活動の完全自動化はシンギュラリティを生み出す．[9]

[9] Aghion, Jones, and Jones (2017) は，こうした状況を「数学的特異点」と呼ぶ.「アイディア」は非競合性を持つ公共財であるとみなせるので，ローマーモデル (Romer model) 流の収穫逓増がシンギュラリティをもたらすと言える．

4.3 完全に自動化しない場合のシンギュラリティ

三番目のシンギュラリティの例として，自動化が進展するが，完全自動化には到達しない場合に起こるシンギュラリティのケースがある．これまで説明してきた4.1節と4.2節は，完全自動化の場合の例を説明してきた．CES 生産関数で代替弾力性が 1 未満のモデルでは，シンギュラリティが生じて成長爆発が実現するためには，全タスクの完全な自動化が必要であった．一部のタスクが自動化されない場合，既に 2節で論じたように，希少な生産要素の労働がボーモル効果を生み，経済成長の制約となる．仮にカルドアの歴史的データの事実を無視して，コブ・ダグラス型生産関数の下で議論をするならば，たとえ全タスクが自動化されていなくとも，シンギュラリティが起こるかもしれない．

2.1節で説明した，Zeira (1989) と同様のコブ・ダグラス型生産関数 (2.3) を考える．但し，全要素生産性を A_t^σ とし，簡単化のため労働力（人口）を一定とする ($L_t = L$)．従って，生産関数は $Y_t = A_t^\sigma K_t^\alpha L^{1-\alpha}$ である．一方，アイディア生産関数 (3.3) もコブダグラス型とし，人口一定よりリサーチ労働も一定とすると ($S_t = S$)，$\dot{A}_t = A_t^\phi K_t^\beta S_t^\lambda$ と書ける．アイディア生産関数と資本蓄積方程式から，A_t と K_t の 2 次元微分方程式体系は次式を満たす．

$$\dot{A}_t = S^\lambda A_t^\phi K_t^\beta, \tag{4.5}$$

$$\dot{K}_t = sL^{1-\alpha} A_t^\sigma K_t^\alpha - \delta K_t. \tag{4.6}$$

$\alpha \in (0,1)$ と $\beta \in (0,1)$ はそれぞれ，財生産とアイディア生産における自動化の割合である．(4.5) と (4.6) より，A_t と K_t の成長率に関して次式を得る．

$$g_{At} \equiv \frac{\dot{A}_t}{A_t} = S^\lambda \frac{K_t^\beta}{A_t^{1-\phi}}, \tag{4.7}$$

$$g_{Kt} \equiv \frac{\dot{K}_t}{K_t} = sL^{1-\alpha} \frac{A_t^\sigma}{K_t^{1-\alpha}} - \delta. \tag{4.8}$$

成長率が時間と共に無限に上昇していくには，全ての期間 t において $g_{At} > g_{Kt}, g_{At} = g_{Kt}, g_{At} < g_{Kt}$ のいずれかしかない．簡単化のため (4.7) と (4.8) において，$S = 1, sL^{1-\alpha} = 1, \delta = 0$ として，$g_{At} > g_{Kt}$ のケースを考える．g_{At} と g_{Kt} を掛け合わせると次式を得る．

$$g_{At} g_{Kt} = \frac{K_t^\beta}{A_t^{1-\phi}} \frac{A_t^\sigma}{K_t^{1-\alpha}} \tag{4.9}$$

$$\Rightarrow g_{At}^2 > \frac{K_t^\beta}{A_t^{1-\phi}} \frac{A_t^\sigma}{K_t^{1-\alpha}} > A_t^{\gamma-1} \Leftrightarrow g_{At} > A_t^{\frac{\gamma-1}{2}}, \quad \gamma \equiv \frac{\beta\sigma}{(1-\phi)(1-\alpha)}. \tag{4.10}$$

従って $\gamma > 1$ ならば，経済成長は A_t が $(\gamma-1)/2$ で成長する以上に上昇する．4.2節の (4.4) での議論と同様に成長爆発が起こる．反対に，$g_{At} \leq g_{Kt}$ のケースを考えても同様に，K_t が加速度的に成長することが示せるので成長爆発が起こる．具体的な数値例で $\alpha = \beta = \phi = 1/2$ とし，生産活動

及び知的活動で自動化されたタスクの割合が半分に留まる場合でも，$\gamma = 2\sigma$ となり，$\sigma > 1/2$ ならば $\gamma > 1$ を満たし，第二のタイプのシンギュラリティ，すなわち爆発的な経済成長が生じる．

4.4　スーパーインテリジェンス

四番目の例として，スーパーインテリジェンス (superintelligence)，敢えて日本語で訳せば「超知性」の存在を考えるものである．これまでに論じた 3 つの例は全て，オートメーションの進展による説明である．実際に自動化の帰結として，スーパーインテリジェンスが生み出されると考えるならば，これまでの自動化の議論はスーパーインテリジェンスの存在と両立する．全てのアイディア生産のタスクを人間に代わり AI が肩代わりするということは，認知に関する仕事を司る，人類と異なる新たな存在の誕生と同一視できるからである．結果として起こるシンギュラリティも，スーパーインテリジェンスによる知的爆発が引き起こすものと解釈できる．しかし未来学者の中には，異なる未来像を描くものも多い．それは，自動化の帰結としてスーパーインテリジェンスが誕生するのではなく，知的爆発が起こりスーパーインテリジェンスが誕生した後，技術的特異点が達成されるというストーリーである．見方を変えれば，AI が自己反復的に自らを改善するというストーリーである．

このような，認知的機能に関する再帰的プロセスを通じて AI が自己改良を進めて進化するというシナリオも，基本的には生産性の改善を微分方程式体系で記述することで，分析することが可能である．[10] まず，2 種類のタスクが存在し，それぞれ物理的タスクと認知的タスクに分類する．認知的タスクに必要な知性の水準を生産性で測り，A_{cog} で表す．同様に物理的タスクの生産性の水準を A_{phy} で表す．AI が自己改善する状況を考える．自己改善のプロセスは次の微分方程式で表現できる．

$$\dot{A}_{cog} = A_{cog}^{1+\eta}. \tag{4.11}$$

既に4.2節や4.3節では，生産性の微分方程式体系を (4.1) や (4.5) で記述しているが，同様の議論が当てはまる．すなわち AI の生産性向上のスピード η が正ならば，自己改善のプロセスは指数関数的に増進し，有限期間内に無限の知性を実現する．ただし，前節と異なり全タスクの進化ではなく認知的タスクに限った議論である．

次に，AI の自己改善による認知的タスクの爆発的成長が，物理的世界の生産性にもシンギュラリティをもたらすかを検討する．シンギュラリティについては，既に説明した4.1節と4.2節の議論に従い，財生産とアイディア生産との 2 つの経路で発生し得る．財の生産関数に関しては，物理的タスクが本質的でない場合 ($\rho \geq 0$)，認知的タスクの知的爆発は生産量のシンギュラリティをもたらすが，財生産に物理的タスクが本質的でないと仮定するのは現実的でない．このため，財の生産活動の経路からは，あまり急激な生産性向上の効果は得られない．

[10] しかしながら，より深く掘り下げた分析を行うことは今後の研究課題である．

一方，アイディア生産関数からのシンギュラリティの経路を考える．物理的タスクの生産性が，認知的タスクの生産性向上に伴い増加するのであれば，次のアイディア生産関数を考えることができる．

$$\dot{A}_{phy} = A_{cog}^{\gamma} F(K, L). \tag{4.12}$$

4.3節で議論したように $\gamma > 0$ ならば，A_{phy} は認知的タスクの自己成長と共に加速度的に増加する．つまり見方を変えて言えば，スーパーインテリジェンスを持つ AI が，物理的タスクに関する技術革新を行い劇的に生産性を高める方法を，（人類に代わり）知的に探求できることを意味する．

以上，4 通りの可能性について例示した．基本的な結論として，AI によるタスクの完全自動化は，爆発的な経済成長を導き得るというものである．しかし一方で，完全自動化を実現せずともシンギュラリティを考えることはできる．またスーパーインテリジェンスを直接考えることで，シンギュラリティによる爆発的な経済成長を説明することもできる．

5　シンギュラリティへの反論

しかしながら他方で，多くの未来学者はシンギュラリティの存在およびシンギュラリティへの到達には懐疑的である．以下では主な 5 つの反論を紹介する．これらの反論は全て，ボトルネック (bottleneck) の存在に起因する．ボトルネックが存在する限り，AI の力だけではシンギュラリティは実現できない．

第一のボトルネックは，生産に不可欠な生産要素の存在である．4.1節や4.2節の議論では，完全自動化がシンギュラリティに必要であることを論じた．また4.3節でも，コブ・ダグラス型生産関数の要素代替の弾力性は常に 1 である．例えば，生産活動に対して何らかの人的労働が依然必要であり，AI による認知的タスクの完全自動化を阻むならば，たとえ自動化の進展が経済成長率を高めたとしても，人間の労働力を必要としないシンギュラリティは実現できない．

第二のボトルネックとして，知的探索活動が収穫逓減的である可能性が挙げられる．この場合，たとえ完全自動化が実現したとしても，シンギュラリティは訪れない．4.2節のアイディア生産関数の議論では，完全自動化でシンギュラリティの実現を説明した．(4.4) より $g_{At} g_{Kt} = A_t^{\phi}$ であり，説明の簡単化のため K_t の成長率を 1 とすると ($g_{Kt} = 1$)，次式が成立する．

$$g_{At} \equiv \frac{\dot{A}_t}{A_t} = A_t^{\phi} \;\Leftrightarrow\; \dot{A}_t = A_t^{1+\phi}. \tag{5.1}$$

成長爆発が起こる条件は $\phi > 0$ であるが，$\phi \leq 0$ となることも十分に起こり得る．それは，アイディアが豊富に存在するに従い，アイディアの限界生産性が低下する状況である．現実の実証デー

タも，時間が経つにつれて平均的なイノベーションの成功率が低下していく可能性を支持している．[11] 特に，もし知的資源が枯渇していくのであれば，人間か AI かを問わず新たなアイディア探索は益々困難になる．さらに，枯渇資源としてのアイディア探索プロセスが収穫逓減的であるという問題は，生産活動や知的活動の自動化の問題に留まらず，スーパーインテリジェンスの出現によっても解決されない可能性が高い．4.4節の (4.11) で，$\eta < 0$ ならば AI の自己改善プロセスは逓減的となり，シンギュラリティによる爆発的経済成長は起こり得ない．

第三のボトルネックは，本質的な生産要素に関するボーモルのコスト病に起因するものである．これまで2.2節で示したように財の生産関数が (2.5) に従うとして議論してきた．そこでは，全タスクに影響する共通の生産性 A_t を前提としてきた．この前提を変更して，タスクごとに生産性が異なる状況を考える．この時，財の生産関数は次式のように変更される．

$$Y_t = \left[\int_0^1 (a_{it}X_{it})^{\rho}\,\mathrm{d}i\right]^{\frac{1}{\rho}}. \tag{5.2}$$

以前と同様 $\rho < 0$ とし，a_{it} は各タスク i の t 期の生産性パラメータを指す．(5.2) のように，タスク特殊的な生産性パラメータを生産関数に導入すると，タスク間の代替弾力性が 1 未満の状況では，財の生産や経済の成長率が，技術進歩が急激なタスクによってではなく，本質的だが改善の困難なタスクによって決定される．タスク特殊的生産技術の下では，タスク間の技術革新の差がボーモルのコスト病によるボトルネックを生む．[12] 仮にスーパーインテリジェンスが出現し，一定シェアのタスクの生産性を無限に向上できたとしても，残りのタスクの生産性が有限である限り，生産量も有限に留まる．従って，第二のタイプのシンギュラリティは起こり得ない．この反論は，大規模集積回路の製造に関するムーアの法則 (Moore's law) に基づき，計算能力が指数関数的に増加したにもかかわらず，経済成長率が上昇せず反対に停滞傾向にある事実と合致する．

第三のボトルネックと関連して，第四のボトルネックは物理法則や自然法則である．結局のところ，経済成長は最も困難なタスクの改善能力により制約を受ける．そして最も改善が最も困難な課題は，物理法則およびそれに支配された自然法則である．どのような物理現象も熱力学第二法則を逸脱することはできないし，特殊相対性理論からは正の質量を持った物質は光速度以上になれない．物理的な限界があれば，4.4節でスーパーインテリジェンスが存在する場合の財の生産関数には，何らかの物理的制約 ($A_{phy} \leq \overline{A}_{phy}$) があることを前提としなければならない．

最後に第五のボトルネックとして，ヨーゼフ・シュンペーター (Joseph A. Schumpeter) が提唱した概念である「創造的破壊 (creative destruction)」に起因するものが挙げられる．[13] 創造的破壊とは，新たなイノベーションが古い技術を駆逐していく新陳代謝を意味し，シュンペーターは創造的破壊が資本主義発展の原動力と考えた．しかしながら，完全自動化に到達する前のイノベーションには人間の関与が必要であるとすると，創造的破壊が経済成長率を低下させる可能性がある．こ

[11] これについては例えば，Gordon (2016) を参照せよ．

[12] Aghion, Jones, and Jones (2017) では，コンピュータの計算速度が第二次大戦後に 10 の 11 乗倍に上昇したのに対し，発電所の改善は熱力学第二法則の制約下にあることを例として挙げている．

[13] Schumpeter (1942) の第 7 章で初出されている．

の結果が生まれるロジックは，一種「イノベーションのジレンマ (innovator's dilemma)」と似ている．新技術が旧技術に置き換わる創造的破壊を考え，技術革新には AI だけでなくリサーチのために人的資本が必要とされるとする．技術革新は人的資本の収益率をゼロに収束させるので，結果的に人的投資が行われなくなる．人的投資の低下がボトルネックとなり，経済成長率は低下しシンギュラリティは訪れない．[14]

6 結論と今後の課題

本論文は，AI（人工知能）が経済成長にどのような影響を与えるのかに関する既存の理論研究をサーベイし，モデル化の課題と起こり得る結論について概説を行った．また AI がもたらすシンギュラリティについても考察し，どのようなモデルを検討するのかによって起こり得る将来が異なることを説明した．本論文では，Aghion, Jones, and Jones (2017) の論文に基づき，AI が経済成長に与える影響を経済理論ではどう捉えるべきかについて，いくつかの可能性を提示した．さらに，シンギュラリティが生じる可能性を経済成長理論でどのように捉えるのかについて，4 つのシナリオを分類し，その下で生じる未来について説明を行った．

筆を擱くにあたり，さらなる研究に向けた将来の方向性について論じる．第一に，本論文では AI と経済成長のマクロ的関係のみに焦点を当てて，先行研究の分析枠組みを紹介した．しかしながら，AI が我々個人や企業の経済活動にどのような影響をもたらすのかについて，ミクロ的な観点から分析を行うことも重要である．個々の経済主体の経済活動の分析によって，ミクロ的基礎付け (microfoundation) を行うことで，AI が経済成長に与えるマクロ経済分析を実施していくことが，今後の課題の一つである．実は既にミクロ経済学においても，AI の進展が経済主体に与える影響の分析が蓄積されつつある．[15] こうした経済学の最新の知見を取り込んで，経済成長への影響分析を精緻化させることは今後の研究の一つの方向である．

第二に，本論文のサーベイでは AI と経済成長についての簡単な概要紹介に留まり，他の重要な研究課題については扱えなかった．経済成長と並んで重要な研究テーマに，所得格差の問題である．AI が熟練・非熟練労働者間の賃金格差拡大をもたらし，二極化を進展させると同時に，雇用の喪失をもたらす可能性は，Autor (2015) をはじめとする多くの研究者が議論しているところである．本論文では，基本的な分析枠組みの提示のみを目的とし，分析の発展可能性を網羅した先行研究の紹介はできなかった．しかしながら，労働者の異質性を導入した経済成長モデルの検討や，さらには労働者の人的資本形成を内生化した AI と経済成長の関係の分析は，この分野での今後の研究の方向性として益々研究が進展する重要分野であることは疑いの余地がない．

[14] Aghion, Jones, and Jones (2017) の Appendix では，創造的破壊のあるシュンペーター・モデルで，創造的破壊が人的投資のインセンティブを低下させ，結果的に経済成長率がゼロに収束するという結論を導いている．

[15] 例えば，2014 年のノーベル経済学賞受賞者であるジャン・ティロール (Jean Tirole) は，Tirole (2017) の中で AI 導入が，熟練・非熟練労働者間の賃金格差拡大，中間管理職の消滅と企業組織のフラット化，ギグワーカーに代表される個人事業主の増加を引き起こす可能性について指摘している．

謝辞

本研究は，JSPS 科研費基盤研究 (C) No.20K01629 の研究助成を受けている．本論文に有り得べき誤謬は全て筆者に帰する．

参考文献

[1] ASCII.jp (2018) 『ASCII.jp デジタル用語辞典』，ASCII.jp, 朝日新聞社.

[2] Acemoglu, Daron, and Autor, David (2011) Skills, Tasks and Technologies: Implications for Employment and Earnings, In Ashenfelter, Orley, and Card, David (eds), *Handbook of Labor Economics*, Elsevier, Amsterdam, Vol. 4, Ch. 12, 1043–1171.

[3] Acemoglu, Daron, and Restrepo, Pascual (2018) The Race Between Man and Machine: Implications of Technology for Growth, Factor Shares, and Employment, *American Economic Review*, 108(6): 1488–1542.

[4] Aghion, Philippe, Jones, Benjamin F., and Jones, Charles I (2017) Artificial Intelligence and Economic Growth, *National Bureau of Economic Research*, 23928: 1–56.

[5] Autor, David H. (2015) Why Are There Still So Many Jobs? The History and Future of Workplace Automation, *Journal of Economic Perspectives*, 29(3): 3–30.

[6] Gordon, Robert J. (2016) *The Rise and Fall of American Growth: The US Standard of Living since the Civil War*, Princeton University Press, New Jersey.

[7] Jones, Charles I (1995) R&D-based Models of Economic Growth, *Journal of Political Economy*, 103(4): 759–784.

[8] Jones, Charles I (2016) The Facts of Economic Growth, In Taylor, John B, and Uhlig, Harald (eds), *Handbook of Macroeconomics*, Elsevier, Amsterdam, Vol. 2, Ch. 1, 3–69.

[9] Kaldor, Nicholas (1961) Capital Accumulation and Economic Growth, In Hague D. C. (eds), *The Theory of Capital*, Palgrave Macmillan, London, 177–222.

[10] Kurzweil, Ray (2005) *The Singularity Is Near: When Humans Transcend Biology*, Viking Press, New York.（レイ カーツワイル著，井上 健・小野木 明恵・野中 香方子・福田 実訳 (2007) 『ポスト・ヒューマン誕生：コンピュータが人類の知性を超えるとき』，NHK 出版.）

[11] Nordhaus, William D. (2015) Are We Approaching an Economic Singularity? Information Technology and the Future of Economic Growth, *National Bureau of Economic Research*, 21547: 1–49.

[12] Schumpeter, Joseph A. (1942) *Capitalism, Socialism and Democracy*, Harper & Brothers, New York.（ヨーゼフ シュンペーター著，大野 一訳 (2016) 『資本主義・社会主義・民主主義』，日経 BP クラシックス.）

[13] Tirole, Jean (2017) *Economics for the Common Good*, Princeton University Press, New Jersey.（ジャン ティロール著，村井 章子訳 (2018) 『良き社会のための経済学』，日本経済新聞出版.）

[14] Vinge, Vernor (1993) The Coming Technological Singularity: How to Survive in the Post-human Era, *Vision 21: Interdisciplinary Science and Engineering in the Era of Cyberspace*, 11–22.

[15] Zeira, Joseph (1998) Workers, Machines, and Economic Growth, *Quarterly Journal of Economics*, 113(4): 1091–1117.