

# 人工知能が経済成長に及ぼす影響

小 松 香 爾

## 1 はじめに

2045年頃に、技術進歩の速度が無限大に近づく「シンギュラリティ」が生じる説がある<sup>(1)</sup>。また、シンギュラリティの前に、人工知能(Artificial Intelligence、以下AI)が人類の能力を超える「プレ・シンギュラリティ」が発生する説もある。シンギュラリティには様々なバリエーションや解釈が存在するが、発生する根拠は、技術が線形ではなく指数的に進化するというものである。

半導体技術の進歩は目覚ましい。インターネットやディープラーニングのブームの裏には、半導体技術がある。半導体が基礎技術ならば、インターネットやAIやロボットは応用技術である。

シンギュラリティやプレ・シンギュラリティが起きるかどうかは不透明である。しかし、第3次AIブームは本物であり、今後、AIの研究は下火になることはないとされている。過去のブームと違うのは、プロセッサの高速化、並列化の技術の向上、およびインターネットの普及によりデジタルデータが低コストで得られるようになったことである。本論文では、AIが浸透する過程で生じる経済に及ぼす影響を述べる。

## 2 技術進歩による自動化

過去に蓄積された技術が知識的な資本になり、さらに高度な技術を生み出す。技術自体には良い悪いはない。ダイナマイトや核分裂のような危険な技術も生まれ、核爆弾のような人類を滅ぼしかねない技術の応用も実現した。しかし、人間社会は、協調して制度を作り、リスクをコントロールしてきた。

核分裂の技術は有用である。しかし、利用する場所や環境を限定しなければ危険極まりない。クローン技術の有用性は高いが、クローン人間は倫理的な危険が高く、研究は許されていない。技術が応用される際には、社会的な判断が下される。使用目的が特化されたAIは、目的自体に危険性がなければ、リスクはコントロールできる。

SiriはiOSに標準搭載された目的特化型AIであり、スマートフォン操作に役立つ。スマートフォンを操作する際にしか使われないため、使用リスクはほとんどない。一方、生存本能や意識を持った汎用AIが、人間の生活空間に溶け込むのは、様々なリスクがあるといわざるを得ない。ただし、リスクが巨大でもそれ以上の便益があれば、規制された上で技術は実用化される。ほとんどの先進国で、原子力発電所は稼働中である。

現在のAI技術は、規制の少ない分野・状況でのみ使われている。一般道で、一般人を載せ

たAIによる自動運転は、規制が多い分野でのAI使用の先駆けとなる。しかし、強制保険である自動車損害賠償責任保険の範囲は曖昧である。

国土交通省は2018年3月に、自動運転中の車が事故を起こした場合の責任に関する有識者研究会の報告書を公表した。報告書によれば、原則として車の所有者に事故の責任があるが、自動運転システムに明確な欠陥がある場合は、自動車メーカーが製造責任を負うことになっている。しかし、このような取り決めでは、AIの作動継続が怪しくなりかけたときに、運転者に頻繁に引き継ぎするようなシステムを扱うことはできない。

自動運転車の安全基準や道路交通法などの策定には手が付けられていない。これらが定まらない限り、民間の保険会社も、車両保険などの任意保険の作成が困難である。作成できたとしても、マージンを大きくとるため、割高になるはずである。ただし、一般道での完全自動運転は、実証実験がはじまった段階である。

2016年2月に、Googleの自動運転車はバスとの接触事故を起こした。路側帯の障害物を避けようとして車線変更し、後方からゆっくり進んできたバスの進路を塞ぐ形で接触した。Googleの自動運転車の事故は何度も起きているが、相手側の不注意であった。しかし、このケースはAIの判断ミスである。自動運転車が社会に受け入れられるのは、第三者機関による実証試験で、人間の運転より数倍の安全性が担保されることが実証されてからになる可能性が大きい。

医療や介護、育児や教育など人命に深く関わる分野では、安全性が実証されてからでなければ、AIは本格的に導入されない。技術的に可能であることと、社会的に受容されることは別である。

### 3 アメリカ経済の停滞

自動運転技術の実用化はアメリカが主導してきた。自動運転に限らず、これまでIT産業全体をリードしてきたアメリカは、すでに経済的に大停滞に陥っているという説がある<sup>(2)</sup>。原因は3つ上げられているが、最大の原因とされているのがイノベーションの欠如である。Cowenは、近年のイノベーションは漸進的かつ私的財の性質を持つものが多く、ここ20年で公共財の性質を持つイノベーションはインターネットしかなかったとしている。また、インターネットは雇用を生む産業ではなく、2001年と2009年の景気回復は、ジョブレス・リカバリーと見なしている。

インターネット上のビジネスは、情報の生産や流通で、利潤を出すビジネスである。自動車産業などとは異なり工場は必要ない。消費者が生産者となれるため、消費者との競争が起きやすく、コンテンツの希少性は失われつづける<sup>(3)</sup>。Google、Facebook、Appleなどのプラットフォームを持つ企業は、高い収益率を保ちながら売上を伸ばしてきた。しかし、出版や放送業界の衰退というトレードオフがある。しかも、それらの衰退業界ほどの雇用は生み出さない。

Googleは検索結果や契約をむすんだブログのページに、広告を自動的に表示する。Facebookのコンテンツは消費者が作成し、Facebookのタイムライン広告は自動的に表示される。Apple

のアプリストアに登録されたアプリは、売り上げの30%を自動的にAppleに徴収される。プラットフォームは多くのユーザを集められれば集められるほど、付加価値を生み出す。扱うのはモノではなく情報である。在庫を保管しておく倉庫は必要なく、通信コストは消費者が負担する。規模による収穫逡減が生じにくいいため、特定企業だけが規模を拡大させる自然独占や寡占が生じやすい。

IT企業の低コスト体質を支えてきたのは半導体の集積密度である。半導体の集積密度は、これまでは指数的に上がってきた。しかし、電子のあるなしで0と1の情報を表す方式では、限界が見えている。実際、CPU単体での処理速度は頭打ちであり、現在のディープラーニングは並列計算に向けたGPUで行われている。

Cowenは、2011年から数年、あるいはもっと長い間、テクノロジーの進歩は滞り、アメリカでは景気後退が現過去に経験したことがないくらい長引くと予測した。ただし、AIが「容易に収穫できる果実」になることまでは否定していない。「The Great Stagnation」では、「容易に収穫できる果実」が現れれば、インターネットのような汎用的な技術が生活に取り入れられるが、新しい世界と古い世界が同じものとは限らないとされている。AIが「容易に収穫できる果実」になるかどうかは言及されていない。

一方、アメリカ経済の停滞、特に雇用回復の鈍さは、技術革新のスピードに人間の能力がキャッチアップできないことから生じているとする説もある<sup>(4)</sup>。Excelなどの使いやすさに定評があるツールでも、自在に使えるようにならない学生はそう少なくない割合で存在する。プログラムを組めるようにならない学生の割合は遥かに大きい。技術進歩による技術的失業が生じていることは間違いない。「Race Against The Machine」では、中間層の雇用が失われ、高賃金のクリエイティブな仕事と低賃金の肉体労働に2極化されるとしている。ホワイトカラーの定型的な仕事は、人間が覚える前に、AIが先に学習してしまうということが根拠として述べられている。知識の量と処理能力の速さという点では、人間はAIに敵うべくもない。

産業革命以降の技術進歩によって、人間の仕事が徐々に機械に代替されてきた。技術進歩が所得分配に与える影響はMarxが指摘している<sup>(5)</sup>。工場への機械の導入で労働が単純になり、賃金が低下し、工場を所有する資本家と労働者との格差が拡大するというものである。

Marxは、労働者の不満が社会の不安定化を引き起こし、共産主義革命につながると予想した。しかし、現実に誕生したのは、共産主義国家ではなく独裁的な社会主義国家であった。ソビエト連邦や中華人民共和国のように、国家が生産手段を保有したのである。社会主義国家では、共産党が軍隊を保有し、共産党幹部だけが利権を握り私服を肥やした。市場競争がないため、国営企業の生産性は上がらず、国民の生活水準は資本主義国家に劣ることになった。

今後は、AI技術の進歩により、ホワイトカラーの仕事まで代替されることになる。Cowenは、2013年の著書「Average Is Over」で、技術進歩により中間層の所得が失われ、AIと協働する能力が高い上位15%が富裕層になり、低所得層との断絶がある社会になると予測している<sup>(6)</sup>。根拠として、現在、チェスで一番強いのは、人間でもAIでもなく、人間とAIのタッグチームで

あることが挙げられている。

現在のアメリカでは、1%の富裕層の資産総額が、米国国内の資産のほぼ40%を占めている。現在の1%ならば層として薄く断層にはならない。将来的に15%になれば社会的な断層が生じ、下位層の不満が社会の不安定化を誘発することが予想される。イギリス経済が1960年代から1970年代に衰退した理由の1つとして、固定化された階級制度があげられている。

Cowenは格差の固定化は生じないと述べている。機械と協働するスキルを修得できれば富裕層になれるとしており、そのためには教育が鍵を握ると主張している。人間の能力を補完するような弱いAIと協働する技術を身につけられるならば、教育の投資効果は大きい。「Average Is Over」では、人間の労働力の完全な代替となる強いAIの出現は考慮されていない。

アメリカにおける中間層の消滅は、修正資本主義の修正から生じた。1981年からのレーガノミクスである。レーガノミクスでは、社会保障費の削減と減税が同時に実施された。政府の再分配機能が弱体化し、アメリカは先進国の中で最も格差が大きい国になった。

社会民主主義から新自由主義の政策に最初に転換した国家は、アメリカではない。イギリスである。イギリスでは1979年から、国有企業の民営化、福祉の切り捨てを含む財政支出の削減、金融ビッグバンなどの規制緩和、労働組合活動の制限などを行うサッチャリズムが推し進められた。失業率は上昇し、格差も拡大したが、1960年代から1970年代までの長期の経済停滞は克服されたと評価されている。アメリカのレーガン大統領、日本の中曽根首相の社会・経済政策は、サッチャー首相によるサッチャリズムを参考にしたものである。他の先進国でも1980年代以降、不平等さの度合いを測るジニ係数が上昇している。日米英の格差拡大の容認は、他の先進国にも波及したといえる。

先進国における格差拡大の原因は複合的なものである。まず、グローバル化の進展が上げられる。世界中に資本主義が浸透していったことにより、先進国の企業は生産拠点を海外、特に中国に移した。それにより、工場労働者や労働者を管理する中間層の労働賃金が低く抑えられるようになった。賃金が抑えられれば、労働組合がストライキなどを起こす可能性があるが、新自由主義により、労働組合の力が失われていた。労働者同士の利害関係もあり、労働組合なしでは労働者は団結しにくい。

次に、ITを中心とした技術進歩の速さがあげられる。コンピュータを扱えない労働者は、労働市場に参加して、労働力を供給することが困難になった。ソフトウェア製作において、優秀なプログラマーは、優秀ではないプログラマーの10倍の生産性があるとされている<sup>(7)</sup>。研修期間は同じであるにも関わらず、両者の生産性の差は大きい。

新自由主義に基づく税制の変更の影響も大きかった。アメリカはレーガノミクス以降、所得税の累進課税の軽減および相続税の基礎控除の引き上げを続けてきた。日本では、相続税の基礎控除は引き下げられてきたが、所得税の累進性を上げるのではなく、消費税増税を続けている。

格差拡大が経済成長を鈍らせるかどうかに関しては定説がない。Kuznetsのクズネツカー

ブは、農業から工業への主要産業の変化につれて所得格差が広がるが、工業化が進んだ都市に住む低所得者層の政治的な力の増大により民主化が進み、低所得者に配慮した制度などの影響で、所得格差が低下する傾向にあることを表す。<sup>(8)</sup>

近年は、ジニ係数の上昇が各国で確認されるようになり、クズネッツの仮説は否定される傾向にある。Pikettyは、クズネッツカーブは、世界大恐慌、世界大戦後のごく限定された期間でしか成立していなかったと批判した。<sup>(9)</sup>そして、ごく一部の期間を除いて、資本成長率が経済成長率を上回っていたことを長期間のデータから示した。資本は預金の利子や投資の利回りで増殖し、それらは労働所得の伸び率を上回るという主張である。資本の自己増殖による格差の拡大は、資本主義では避けにくい。

トランプ政権はアメリカファーストの方針を打ち出しているが、再分配機能を強化する政策はない。経済成長が格差を縮めるという説は近年否定された。アメリカの格差は今後とも解消されない可能性が大きい。また、格差が解消されないからといって、経済成長率が低下するとはいえない。格差が経済成長率を低くめるという説も仮説にすぎず、格差が経済成長の源泉となるという逆の説もある。格差が固定的ではないならば不確実性が大きくなる。不確実性が大きい環境では、アニマルスピリットが発揮されやすくなる。<sup>(10)</sup>努力次第で富裕層に入れるのであれば、格差の存在がイノベーションを引き起こす。イノベーションは、経済成長の原動力になる。

アメリカは、かつて製鉄や電機などの製造業で、日本やドイツの後塵を拝した。1980年代のレーガノミクスの大きな原因である。1990年代から、IT産業を中心として、経済成長路線に戻ったとされている。しかし、ITバブル崩壊後やリーマンショック後、しばらく時間が経過しても、労働市場の需要回復は鈍かった。実質賃金も横ばい、低下傾向にある。アメリカ資本主義は世界経済を牽引する力を失っている。第二次世界大戦後のアメリカ栄光の時代は終わった可能性が大きい。<sup>(11)</sup>ただし、アメリカの研究開発能力は高く、特に金融業が強い。冷戦時に軍事や宇宙開発に携わっていた研究者が金融業界に移動したからである。

サブプライムローン問題では、アメリカの投資銀行は、アメリカ国内のサブプライム層の住宅ローン債権を、住宅ローン会社から買い取り、RMBS (Residential Mortgage-Backed Security) として商品化した。さらに、他の優良な証券や債券と混ぜてCDO (Collateralized Debt Obligation) とした。アメリカの格付会社はCDOをAAAとして格付けした。世界中の金融機関は、格付けが高い割に利回りが高いCDOを購入した。

日本の金融機関は、BIS (Bank for International Settlements) 規制への抵触を回避するため、CDOをほとんど購入していなかった。平成バブル崩壊後の不良債権処理で自己資本比率が低かったからである。

リーマン・ブラザーズなどのアメリカ投資銀行は、住宅ローン会社からRMBSを仕入れていた。住宅バブルの崩壊によりCDOの値付けができなくなったことにより、投資銀行はRMBSを証券化できなくなった。投資銀行はレバレッジをかけてRMBSを仕入れていたため、借入金が返済できなくなり経営破綻した。CDS (Credit Default Swap) で十分なリスクヘッジをするこ

となく、CDOを大量に購入した銀行、特にドイツ銀行は、経営状況が悪化した。

金融業がなにも生み出さないというのは正しくない。アメリカの金融業は、RMBS、CDOなどの金融商品、CDSという保険、そして世界経済危機を生み出した。現在は、アメリカの大手投資銀行の大半は消滅し、アメリカ政府の規制やBIS規制は厳しいものになった。日本の金融業と同様に、アメリカの金融業もカネ儲けしにくい環境になった。アメリカの優秀な研究者は、これまで以上にIT企業、特にAIを研究開発する企業に流れることが予想される。

#### 4 労働分配率と成長会計

コブ=ダグラス型のマクロ生産関数を仮定すると、GDPは(1)で表すことができる。

$$Y = AK^{\alpha}L^{\beta} \dots \dots \dots (1)$$

Yは付加価値の合計、すなわちGDPである。Kは投入される資本の量、Lは投入される労働の量であり、いずれも生産要素である。AはKとLでは説明できない成長に関する変数であり、技術水準とされる。成長会計では、一般的に、KとLを同時にλ倍にしたとき、Yもλ倍になるという収穫一定の法則が仮定される。収穫一定であるならば、コブ=ダグラス型関数は一次同次関数になり、 $\alpha + \beta = 1$ である。このとき式(1)は以下の式(2)に変形できる。

$$Y = AK^{\alpha}L^{1-\alpha} \dots \dots \dots (2)$$

式(2)をLに関して偏微分すると、以下の式(3)になる。

$$\partial Y / Y = (1 - \alpha) \partial L / L \dots \dots \dots (3)$$

式(3)の $(1 - \alpha)$ は労働分配率である。労働投入量が1%増えると、GDPは $(1 - \alpha)$ %増加する。

日本の労働分配率の低下は顕著である。1977年に日本の労働分配率は76.1%であった。2011年には60.6%である。日本の労働分配率は24年間で15.5%下がった。アメリカの労働分配率は日本と比較すると下がっていない。1977年の労働分配率は68.2%であり、2011年は63.7%である。アメリカの労働分配率の低下は24年間で4.5%である。

OECD諸国では、イギリスを除いて、労働分配率は低下傾向にある。先進国における労働分配率低下の要因は様々なものが挙げられる。

第一にグローバル化の進展である。世界各国に資本主義が浸透したことにより、企業、特に製造業の企業は、新興国の安価な労働力を獲得できるようになった。製造業で不要になった労働力は、サービス業などの労働市場で供給される。つまり、先進国の労働市場における供給が増えるために、製造業だけではなく、すべての産業の賃金は抑えられることになる。

第二に先進国における新自由主義の導入である。労働組合が弱体化したため、賃上げ闘争が下火になり、解雇に対しても抗議しにくくなった。本来、企業に対して労働者の立場は弱い。

第三に、IT機器や産業ロボットの低価格化である。同じコストで労働者を雇うより、機械を導入した方が、生産量が増えるのであれば、企業は労働者を解雇し、機械を購入する。規制により解雇出来ない場合は、労働者の賃金を下げる。

第一の要因と第二の要因は、概ね行き着くところまで行ったといえる。第一の要因では、アフリカの経済発展が資本主義の終着地点とされている<sup>(12)</sup>。しかし、資本主義がアフリカまで浸透する前に、弱いAIという代替労働力が先に浸透する可能性が大きい。今後、人工知能の性能が向上することは確実であり、第三の要因の影響が強くなる。

式(2)のコブ=ダグラス型関数から、成長会計分析を行うことができる。式(2)の両辺の対数をとると式(5)になる。

$$\dot{Y} = \dot{A} + \alpha \dot{K} + (1 - \alpha) \dot{L} \dots\dots\dots(4)$$

式(5)は、技術水準A、資本量K、労働量Lの式の足し算となっているため扱いやすい。式(5)において、Y、A、K、Lが時間に関して微分可能であると仮定する。式(5)を時間に関して全微分すると、式(6)になる。

$$\dot{Y}/Y = \dot{A}/A + \alpha \dot{K}/K + (1 - \alpha) \dot{L}/L \dots\dots\dots(5)$$

$\dot{A}/A$ はTFP (Total Factor Productivity)上昇率である。TFPは、資本と労働では説明できない経済成長の要因を表す。例えば新しい生産方式の導入である。ベルトコンベアによる流れ作業では労働者は1つの作業だけを覚えて繰り返せばよい。ベルトコンベアの導入により、アメリカのフォード社は、1台につきかかる生産時間を13時間から1時間半までに短縮することに成功した。

労働分配率(1 -  $\alpha$ )または資本分配率 $\alpha$ 、資本増加率 $\dot{K}/K$ 、労働増加率 $\dot{L}/L$ 、GDP増加率 $\dot{Y}/Y$ が統計データとして存在すれば、TFP上昇率は、式(7)のように残差として求めることができる。

$$\dot{A}/A = \dot{Y}/Y - \alpha \dot{K}/K - (1 - \alpha) \dot{L}/L \dots\dots\dots(6)$$

バブル崩壊後の10年は失われた10年と呼ばれている。失われた10年の原因は、銀行による不適切な融資、住専問題に代表される不良債権処理の失敗、ゾンビ企業の不適切な延命などが挙げられる。失われた10年では、TFP成長率の低下が計測されている。図1に示されるように、1990年から1999年の日本のTFP成長率は前半が1%、後半が0.5%である。

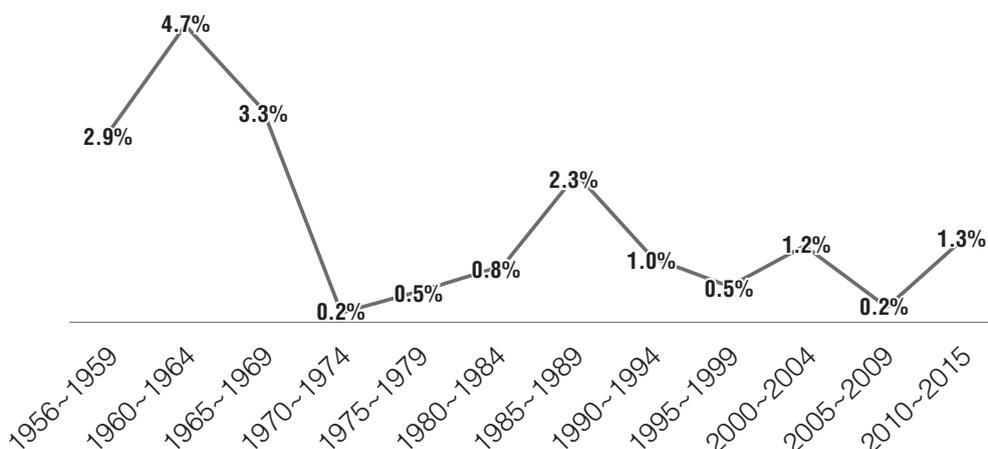


図1 日本のTFP上昇率の推移（公益財団法人日本生産性本部の生産性データベースより著者作成）

TFPの上昇は技術進歩が主要因とされている。しかし、それ以外の要因も含まれる。統計誤差、労働強度、プラスの外部性、独占力、インフラの整備度、教育レベルなどである。

1990年代のIT投資は、日本企業においても行われていた。しかし、ハードウェアやソフトウェアを導入しても、それらを使いこなせる人材が少なければ付加価値は生じない。日本の解雇規制はアメリカより強い。ITを使いこなせる人材の増加は、アメリカと比較すれば鈍かったはずである。

1990年後半から2001年に、先進国でIT革命が起きた。製造工程の革新が起きたならば、IT革命進行中のTFP上昇率は高いはずである。しかし、実際には1990年代後半から2000年代前半のTFP成長率は高くなかったことが判明している。1998年から2002年のTFP上昇率は、日本が0.25%、アメリカが0.69%にすぎなかった<sup>(13)</sup>。

IT革命では、ITは既存産業の効率化という側面が強く、繊維、鉄鋼、自動車のような世界経済をリードする産業になりえなかったことが明らかになった<sup>(14)</sup>。ただし、IT革命による経済的变化は確認されている。SCM（Supply Chain Management）の導入が進んだことにより、在庫循環による景気変動の周期が短くなり、景気変動の波が小さくなった。トレードオフとして、地方の商店街の商店は軒並み閉店することになったが、社会の変化で淘汰される業種や職業が出てくるのは、資本主義では必然である。

人間のような知能を実現するAIが開発された場合はAI革命が起きる。AI革命が起きるとすれば、IT革命とは異質なものになることが予想される。1990年代後半からのIT革命と異なるのは、IT機器を活用するための労働力が、AIによって提供されることである。IT革命では、IT企業が多数生まれ、ある程度の新しい雇用も発生した。しかし、AI革命が起きれば、現在の社会水準を維持するための人間の労働量は激減する可能性が大きい。

## 5 アベノミクスによる経済成長

実質金利は名目金利から期待インフレ率を引いたものである。デフレ下では期待インフレ率はマイナスになり、名目金利よりも実質金利が高くなる。実質金利が高いと、返済の負担が増すので、企業は銀行から積極的に借りなくなる。政策金融機関による信用創造が起きにくくなる。日銀の買いオペで、マネタリーベースを数倍に増やしたとしても、マネーストックの増加率は微々たるものになる。マネーストックが増加しなければ、物価は上がりにくい。ゼロ金利政策の効き目が弱かったのは、名目金利をゼロに近づけることしかできないからである。

物価上昇が確認されるまで金融緩和を続けると日銀が宣言すれば、インフレ期待が生じる。インフレ期待が生じれば期待インフレ率がプラスになる。期待インフレ率がプラスならば、実質金利は名目金利より低くなる。実質金利が低ければ企業の資本コストの負担が減るため、企業は銀行から積極的に借入するようになる。企業が借入すれば、必ずマネーストックが増加する。マネーストックが増加すれば、物価が上昇しやすくなる。

労働賃金には硬直性があるため、物価の上昇に対する反応は鈍い。物価が上昇すれば実質賃金は一時的に下がる。実質賃金が上昇しないことは、アベノミクス批判の一因となっている。しかし、この実質賃金の下落によって、企業側は労働者を雇用しやすくなる。現在の日本の労働分配率60%が今後も保たれることを仮定する。このときGDP成長率 $\dot{Y}/Y$ は、以下の式(8)で表せる。

$$\dot{Y}/Y = \dot{A}/A + 0.4 \dot{K}/K + 0.6 \dot{L}/L \dots\dots\dots(7)$$

アベノミクスの効果で、雇用が増えるため、労働投入の増加率 $\dot{L}/L$ がプラスになる。技術は蓄積されていくものであるため、技術進歩率 $\dot{A}/A$ がマイナスになることは稀である。資本も蓄積されていくものであるため、戦争などによる大幅な減耗がなければ $\dot{K}/K$ がマイナスになることはない。したがって、 $\dot{L}/L$ がプラスであれば、GDP成長率はプラスになる。アベノミクスで経済成長が達成できる可能性は大きい。ただし、AIが本格的に導入されれば、AIによる人間の労働力の代替が生じて $\dot{L}/L$ がマイナスになる可能性がある。

## 6 人工知能による雇用喪失

切符の自動改札は当たり前になった。改札の切符切りの業務は、料金計算による支払いのチェックである。曖昧性はなくプログラムで処理できる。もともと、改札の切符切りの労働の中で、人間が行っていた判断は、ルールを厳密に記述できる。判断のルールを厳密に記述できる仕事は、プログラムを組みやすく、自動化されやすい。自動改札機の普及に伴い、改札の切符切りの労働は完全になくなった。

2015年に野村総合研究所が出したレポートでは「10～20年後に日本の労働人口の約49%が、AIやロボット等で代替可能」と試算されている<sup>(15)</sup>。代替スピードが速ければ、今の小学6年生が

就職する頃までの間に、年間で平均 $\dot{L}/L = -0.049$ という労働人口の減少が生じることになる。その間、技術の進歩率 $\dot{A}/A$ と資本量の増加率 $\dot{K}/K$ を共に0と仮定すると、式(7)よりGDPの増加率 $\dot{Y}/Y$ は $-0.0294$ になり、年間3%平均でGDPが減少することになる。

野村総研のレポートは、FreyとOsborneによる論文<sup>(16)</sup>に基いている。FreyとOsborneは、2013年以降、10年から20年の間に、アメリカの47%の仕事がコンピュータによって自動化されると主張している。人間の脳の機能の一部を担える機械をAIと定義すれば、自動改札機はAIである。そもそも、その定義によれば、コンピュータ自体がAIである。AIを広く定義すればするほど、AIによる労働の代替率は大きくなる。

野村総研のレポートでは、日本の49%の労働人口が「技術的には」代替可能とされているに過ぎない。日本の解雇規制はEUのものよりは緩い。しかしアメリカの解雇規制と比べると厳しい。企業側の事情による人員整理の解雇は整理解雇である。日本の判例で整理解雇が認められたのは、以下の4つの条件が満たされている場合である。

- (1) 人員整理の必要性
- (2) 解雇回避努力義務の履行
- (3) 被解雇者選定の合理性
- (4) 解雇手続の妥当性

上記の1つでも満たされなければ解雇は無効である。特に(1)では、生産性を上げるための整理解雇は認められていない。生産性を上げるために、AIを労働者の代替として導入することは良いが、代替された労働者は解雇できないのである。したがって、代替された労働者は他の部署に転属させられるか、労働時間を短縮させられるはずである。雇用は49%も失われず、労働時間が49%短縮される可能性が大きい。

日本でもアメリカなみの新自由主義政策が導入され、解雇規制が緩和によって失業者が増える可能性はある。しかし、その場合でも、GDPが10年間で30%も減少することはない。企業にAIが導入されればTFP増加率 $\dot{A}/A$ がプラスになる可能性が大きいからである。

日本経済にとって悪いシナリオは、多くの企業がAIを導入したにも関わらず、TFP増加率 $\dot{A}/A$ のプラスが大きくなり、GDPの増加率 $\dot{Y}/Y$ がマイナスになることである。技術水準Aには、教育レベルも含まれる。AIにできない創造的な仕事ができる人材やAIと協働できる人材の供給が少ければ、 $\dot{A}/A$ はマイナスになる可能性がある。

## 7 人工知能の定義

AIの定義は研究者や研究機関によって異なる。1990年代のAIの教科書「Artificial Intelligence: A Modern Approach」<sup>(17)</sup>では、知的にふるまうエージェントとして定義されている。エージェントの定義はMinskyの著書<sup>(18)</sup>が詳しい。

Minskyは、人間の心は、それ自体は考える能力を持たない多数の単純な自律的なエージェントで構成されるとしている。自律エージェントが協調的な動作することで心の働きが生じる。心はエージェントからなる社会とみなせる。

「知的にふるまう」の定義も曖昧であるが、「コンピュータが人間の脳の活動を模倣しているように見える」という程度である。ただし、人間の脳の活動も多岐にわたる。学習機能や環境適応能力がある。記憶ができ、記憶には短期記憶と長期記憶が存在する。帰納的な推論と演繹的な推論ができる。人間の脳波、現実の認識や解釈だけではなく、創造的に夢をみることができる。

これまでのAIは、脳の活動の一部をソフトウェア的に模倣したものである。現在のノイマン型コンピュータは、ハードウェア的に脳を模倣しているわけではない。コンピュータのハードウェア的な動作は、ランダムアクセス機械でモデル化されている。ランダムアクセス機械はチューリングマシンに等価である。

チューリングマシンは、電子計算機が発明される前に発表された仮想機械である<sup>(19)</sup>。状態を保持して左右に動くヘッドと、無限長の読み書き可能なテープから構成される。チューリングマシンの動作は、テープの記号を読み、ヘッドの状態を変え、テープに記号を書き込み、ヘッドの位置を左か右に動かすというものである。チューリングマシンは人間が計算を行う手続きを抽象化した計算モデルである。

定理証明のような論理的かつ演繹的な問題、画像認識や音声認識のような直感的かつ帰納的な問題の解決は、現在のハードウェアで実現できた。しかし、その中間に存在する自然言語理解ができないのは、人間の思考の大部分と、数学的な計算過程が、異質なものであるからである。チューリングマシンの計算能力は、Kleeneの帰納的関数およびChurchの $\lambda$ 計算と等価である。しかし、チューリングマシン、帰納的関数、 $\lambda$ 計算のいずれもが、人間の思考方法とはかけ離れている。

## 8 弱いAI

AIは大きく2つに分類される。強いAI（汎用AI）と弱いAI（特化型AI）である。強いAIは、人間と同等の汎用性がある知能である。強いAIは、これまで実現されていないし、実現される見通しもない。

弱いAIは、特定の目的に特化されたAIである。強いAIとは異なり、弱いAIは60年近く多数開発されてきた。弱いAIには、人間のような汎用性と柔軟性に富む問題解決能力はない。しかし、最低限の自律性が存在し、知的なふるまいをする。エアコンや洗濯機などを制御するプログラムも、弱いAIの一種と見なせる。これまで開発されてきたAIはすべて弱いAIである。

「弱い」は汎用性を持たないという意味である。用途を限定すれば人間より高い能力を発揮する。オセロ、チェス、将棋、囲碁などの2人零和有限確定完全情報ゲームでは、人間を遙かに凌駕する能力を発揮する。チェスは1997年、将棋は2012年、囲碁は2015年にトッププロがAI

に破れている。

チェスと将棋のルールは似ている。チェスの盤面は $8 \times 8$ 、将棋は $9 \times 9$ である。さらに将棋は取った駒を再利用できる。15年の歳月は、チェスと比べた将棋の手の選択肢の多さを反映している。囲碁の盤面は $19 \times 19$ である。盤上の変化手順の総数は、オセロは $10^{60}$ 、チェスは $10^{120}$ 、将棋は $10^{220}$ 、囲碁は $10^{360}$ 乗と概算されている。

これらのゲームは、有限確定完全情報ゲームである。必勝法の存在が保証されている。先手、後手の全ての手順を盤上でシミュレーションすれば、必勝法が見つかる。ただし、あくまで必勝法の存在は理論的なものである。2018年現在、オセロでも完全解析はされていない。現在のコンピュータの能力を持ってしても、全ての局面を探索しきれない。 $6 \times 6$ のオセロに関しては、先手が最善手を選択しても、後手の20対16の勝利で終わることが、1993年に証明済みである。

AppleのSiriなどの音声認識対話システムは、自然言語処理分野におけるAI技術の結晶である。しかし、人間の話者の代替にならないことは、数分間話しかければ判明する。「よくわかりません」や「それは面白い質問ですね」など、実質的な意味のない返答が多発するのである。現在の音声認識対話システムはキーワードの記号処理を行っているだけである。記号の意味を理解して、記号を組み立てて、新しい意味を創出しているわけではない。

音声認識と音声合成の技術進歩は、長足の進歩を遂げてきた。コンピュータの処理能力の指数的な向上があり、定型的な会話に範囲を限定すれば、リアルタイム翻訳は実用的になる精度で可能である。しかし、意味理解という点では、過去50年間、ほとんど進歩していない。1960年代に作られた対話システムELIZAと同様、単語を単なる記号として処理して、会話が成立しているように見せかけるだけである。ELIZAは精神科医の反応を真似たプログラムである。知識ベースの類は、ほとんど組み込まれていない。

人間は、単語を現実世界に紐付けて処理する。「アカガエル」は垢まみれのカエルではなく、赤っぽいカエルである。「ウシガエル」は、ウシの姿をしたカエルではなく、ウシのような鳴き声のカエルである。人間の知能は、常識に基づき、単語を現実世界の概念に関連付けられる。AIはできない。これは、シンボルグラウンディング問題と呼ばれている。

現在のSiriは、ユーザの発言を音声認識して、AppleのSiriサーバーに送って、形態素解析と構文解析をして、キーワードを抜き出し、検索にかける。単語が現実世界で何を表しているかはシステムの動作に関係してこない。Siriサーバーが連係するデータベースで、キーワードがヒットしなければ、Web検索した結果を表示するか、予め用意された意味のない返答をする。

シンボルグラウンディング問題は、現実世界の事物との相互作用で解決できるとされている。その為に、AIに身体性が必要とされているが、現在のAI搭載ロボットでは、現実世界のモノの認識が部分的に可能だけである。事物の意味、すなわち概念は獲得できていない。シンボルグラウンディング問題を処理できないAIは、現実からのフィードバックで新たな概念を修得することができない。そのようなAIは汎用性に欠ける。

Google翻訳もSiriと大差はない。莫大な対訳データベースの中でパターンマッチする翻訳を検索して変換する。文の意味を理解しているわけではない。文脈情報を無視せざるを得ないため、Notが何を否定しているかが、Google翻訳では不明確になる。したがって、肯定文が否定文に、否定文が肯定文に翻訳されたりする。全く逆の文意になりかねないのである。現在の機械翻訳は文脈が読めていない。人間のチェックなしで使用するには危険が大きい。

ディープラーニングも弱いAIである。画像や言語の特徴量を人間が設定するのではなく、莫大な量の学習用データを用いてニューラルネットに学習させる。1980年代はコンピュータの処理能力の限界により、3段のニューラルネットしか実現できなかった。現在は4段以上のニューラルネットが作られるようになった。段数が多いニューラルネットはディープニューラルネットと呼ばれる。ディープニューラルネットをデータで学習させることを、ディープラーニングと呼ぶ。

パーセプトロンやバックプロパゲーションといった古くからある技術が、ディープラーニングによって実用化に耐えるようになった。深くなったのは、ソフトウェア的なネットワークである。ネットワークが深くなったことにより、機械学習の質も向上した。多段にすることによって、細かい特徴は入力層に近い層の、大まかな特徴は出力層に近い層のニューロンに記録できる。また、インターネットの社会への浸透によって、学習用のデータが大量に得られるようになり、ディープラーニングのコストが下がった。

ディープラーニングの特徴は、学習データから自動的に特徴を抽出できることにある。しかし、学習データは目的に応じて人間が用意する必要がある。認識させたいもののデータを人間が用意する。手書き数字を認識させる場合は手書きされた数字を学習データとして用意し、猫を認識させる場合は猫の画像を用意する。弱いAIには生存本能がない。学習意欲もなく、目的に応じて、学習データで学習することもない。

ある目的に対して、その目的に特化した弱いAIを作ることができると仮定する。そのような弱いAIを、環境に応じて選択する弱いAIがあれば、強いAIが実現できる。しかし、そのような弱いAIは存在しない。フレーム問題が生じるからである。

人間は、目的や問題に応じて、フレームと呼ばれる思考の枠を設定している。AIには、フレームが設定できない。起こりうるすべての場合、関連しうるすべての事物を検索、処理しようとして計算時間が発散してしまう。これはフレーム問題と呼ばれる。

フレーム問題は、コンピュータの処理能力の問題ではない。人間もコンピュータと同様に、有限の思考能力しか持たない。数値計算や記憶の正確さではコンピュータには遥かに及ばない。それにも関わらず、人間はフレーム問題を解決して行動している。あるいは解決できたかのように行動している。環境や状況に応じて、常識に基づきフレームを設定して、フレーム外の事物は無視するからである。人間の知的処理の汎用性は、フレーム問題を処理できることから生じる。

汎用性は商品の売上高を大きく左右する。汎用性がある財は公共財に近づくからである。コ

ンピュータやスマートフォンが普及した原因は汎用性にある。ワープロ専用機にはパーソナルコンピュータの汎用性がない。その割に価格が高かったため、パーソナルコンピュータに完全に代替された。電卓にも汎用性はない。しかし、極めて低コストであり、電源を入れて即使用可能になるという利点があるため、完全には代替されていない。現在のAI研究では、シンボルグラウンディング問題とフレーム問題に関しては、解決の見通しが無い。両方の問題を解決できなければ、強いAIを実現できないことは間違いない。しかし、両方の問題が解決できても強いAIが実現されるとは限らない。

## 9 資本主義社会への弱いAIの浸透

現存する弱いAIは生命体ではない。弱いAIは、人間の知的能力の一部をソフトウェア的に実現したものである。生存本能から生じる意志や欲望までは、実現されていない。したがって、弱いAIが自ら行動を起こして、仕事を奪うなどということはない。

経営者が利潤最大化のために、人間の労働力を機械に置き換えることは頻繁にある。利潤最大化は資本主義における企業の習性である。過去に、修正資本主義への道も模索された。しかし、資本主義である限り、民間が生産手段を資産として保有することは修正不可能である。企業の利潤最大化の習性は、資本主義である限り消えない。また消すべきであるともいえない。

これまでの社会でも、技術は雇用を奪い続けてきた。雇用を奪われた人間は、労働市場を通じて違う職業に移動する。ただし、新しい業種が生じ、市場が形成され産業とならなければ、転職は困難である。技術でドライブされてきた社会では、新業種が生み出されつづけてきた。広告宣伝業がその代表である。Googleの売上の約90%とFacebookの売上の約98%が広告収入である。

電波に情報を乗せる技術がない時代から、広告宣伝は存在した。看板や雑誌や新聞の広告である。放送技術の進歩によって、ラジオ局や放送局が出現。巨大な宣伝広告産業が形成された。しかし、広告宣伝は、社会主義や共産主義では必要がない。企業の利潤最大化の為に存在するため、生活必需サービスではない。資本主義下でも、企業間の自由競争が激しくなければ、現在のほどの量は必要がない。

BtoB企業の広告宣伝は、BtoC企業の広告宣伝に比べて少ない。BtoB企業の広告宣伝はブランディングを目的としたものがほとんどだからである。ブランディングも、企業の利潤を最大化するため、代替品や代替サービスを生み出す他業種の企業との競争に勝つために行われる。広告宣伝業界や営業部門で働く労働者は、資本主義の自由競争が激しい環境でのみ、付加価値が付く。

弱いAIが浸透した社会でも、資本主義であるかぎり、企業間の競争は存在する。業界が自然独占され、1つの企業しかなくなったとしても、代替品や代替サービスは存在する。したがって、広告宣伝業界も存在する可能性が高い。広告宣伝は、人間の欲望に訴えることによって、需要が生じ付加価値が生まれる。弱いAIは生命体ではないため生存本能がない。生存本能が

なければ欲望は生じない。食欲、睡眠欲、性欲、排泄欲、集団欲、これらの基本的欲求は、生存本能から生じている。金欲、物欲、権力欲も、社会システムというフィルタを通ることで、基本的欲求が変化したものである。弱いAIに欲望が存在しないならば、弱いAIは人間の欲望を推測することは困難である。表面化した欲求はデータから統計的に推測できたとしても、潜在的欲求を探ることはできない。

## 10 弱いAIによる経済成長

Sollowの経済成長モデル<sup>(30)</sup>を援用し、弱いAIが導入された経済における定常均衡、および定常均衡における経済成長の可能性を示す。

$A$ を技術水準、 $K$ を資本量、 $E$ を労働効率、 $L$ を労働人口とする。このとき効率労働は $EL$ で表される。生産財および消費財は1財を仮定して、以下の式(8)で表されるマクロ生産関数を仮定する。

$$Y = AK^{\alpha}(EL)^{1-\alpha} \dots\dots\dots(8)$$

固定資本減耗率を $\delta$  ( $0 < \delta < 1$ )とすると $t$ 期と $t-1$ 期の資本量の関係は以下の式になる。

$$K_t = (1 - \delta)K_{t-1} \dots\dots\dots(9)$$

強いAIが開発されるまでは、弱いAIが世界各国で導入されていく。労働力のAIによる代替は進み、各国の労働賃金の差は縮小する。輸送費を考慮すれば、消費される国で生産したほうが、有利になるため輸出入のない閉鎖経済を仮定できる。閉鎖経済を仮定すれば、投資は貯蓄と等しくなる。財市場での需給が一致すると仮定すると、総生産 $Y$ は総所得に等しい。貯蓄率を $s$ とおくと、 $t$ 期と $t-1$ 期の資本の関係は、以下の式になる。

$$K_t = (1 - \delta) K_{t-1} + s A_{t-1} K_{t-1}^{\alpha} (E_{t-1} L_{t-1})^{1-\alpha} \dots\dots\dots(10)$$

弱いAIなどの技術進歩が進みきり、強いAIは出現していない経済を仮定すると、以下の式のように技術水準 $A$ を外生変数とすることができる。

$$A_t = A_{t-1} = a \dots\dots\dots(11)$$

式(15)を用いて、式(13)の両辺を $E_{t-1}L_{t-1}$ で除算すると以下の式が得られる。

$$K_t / E_{t-1}L_{t-1} = (1 - \delta) K_{t-1} / E_{t-1}L_{t-1}$$

$$+ s a (K_{t-1} / E_{t-1} L_{t-1})^a \dots \dots \dots (12)$$

労働人口の減少率を  $n$  ( $0 < n < 1$ ) とすると  $t$  期と  $t-1$  期の労働人口の関係は以下の式になる。

$$L_t = (1 - n) L_{t-1} \dots \dots \dots (13)$$

労働効率の上昇率を  $g$  ( $0 < g < 1$ ) とすると  $t$  期と  $t-1$  期の労働効率の関係は以下の式になる。

$$E_t = (1+g) E_{t-1} \dots \dots \dots (14)$$

効率労働あたりの資本量を  $k_t$  ( $=K_{t-1}/E_{t-1}L_{t-1}$ ) とおくと、式(15)と式(16)より、式(14)は以下のように変換できる。

$$k_t = (1 - \delta) k_{t-1} / (1+g) (1-n) + s a k_{t-1}^a / (1+g) (1-n) \dots \dots \dots (15)$$

$k_t$  と  $k_{t-1}$  の差  $\Delta k_t$  は、式(17)より、以下の式(18)で表される。

$$\begin{aligned} \Delta k_t &= k_t - k_{t-1} \\ &= s a k_{t-1}^a / (1+g) (1-n) - (\delta - n + g - g n) k_{t-1} / (1+g) (1-n) \dots \dots \dots (16) \end{aligned}$$

労働分配率を表す  $(1 - a)$  は  $0 < 1 - a < 1$  である。 $a$  も  $0 < a < 1$  であり、 $\Delta k_t = 0$  となる定常均衡が存在する。 $k_t$  がいかなる値だとしても、しばらく時間が経過すれば、ある一定の値で安定する。定常均衡における効率労働あたりの資本量を  $k^*$  とすると、式(16)から、以下の式(17)を導くことができる。

$$k^* = \{ s a / (\delta - n + g - g n) \}^{1/1-a} \dots \dots \dots (17)$$

定常均衡における効率労働あたりの生産量を  $y^*$  とすると、以下の式(18)が成立する。

$$y^* = a \{ s a / (\delta - n + g - g n) \}^{a/1-a} \dots \dots \dots (18)$$

定常均衡における資本生産比率は  $k^*/y^*$  は、以下の式(19)が成立する。

$$k^*/y^* = s / (\delta - n + g - gn) \dots\dots\dots(19)$$

式(19)より定常均衡において資本生産比率は、 $a$ と $a$ の値によらないことがわかる。さらに、式(18)より、定常均衡における効率労働あたりの生産量は一定となるため、以下の式(20)が導ける。

$$Y_t / E_t L_t = Y_{t-1} / E_{t-1} L_{t-1} \dots\dots\dots(20)$$

式(13)、式(14)および式(20)より、以下の式(21)を導くことができる。

$$Y_t = (1+g)(1-n) Y_{t-1} \dots\dots\dots(21)$$

式(21)より、定常均衡における総生産 $Y$ の成長率は $g - n - gn$ であり、労働効率の上昇率を表す $g$ と労働人口の減少率を表す $n$ で総生産の成長率が決まる。例として、 $g$ を0.01、 $n$ を0.01とすると、生産量の成長率はマイナス0.0001である。労働効率と人口減少のパーセンテージが等しい場合は、生産量はマイナス成長になる。 $g$ を0.02、 $n$ を0.01とすると、生産量の成長率はマイナス0.0998である。 $g$ と $n$ が小さいなら $gn$ の値のマイナス分は無視できる。そのとき $g > n$ 、すなわち労働効率の上昇率が労働人口の減少率を上回っているならば、総生産 $Y$ は増加する、すなわち経済成長することになる。平成バブル崩壊後の日本の失われた10年は、労働効率の上昇率 $g$ が低下したことによってもたらされた<sup>(21)</sup>とされている。

効率労働あたりの資本量は、初期状態がどのような状態にあっても、時間が経てば、定常かつ均衡が保たれる状態になる。その定常均衡において、弱いAIによって代替され、労働人口が減ることになっても、弱いAIと協働できる労働効率が高い人材が残れば、経済成長は達成されることになる。

上記の議論では、弱いAIが社会に浸透しているが強いAIは浸透していない経済が想定されていた。強いAIは開発されていないか、開発済みではあるが社会的な受容度の不足により、社会へ浸透はしていない状態である。このような経済の成長への鍵は、AIの労働力と人間の労働力のすり合わせにある。

## 11 おわりに

AIという用語が生まれたのは1956年のダートマス会議である。過去に開発されたAIはすでに、コンピュータと共に社会に溶け込んでいる。社会に溶け込めば、AIとは呼ばれなくなる。汎用AIは現在、実現の見込みがない。しかし、利便性が危険性を上回っていれば、社会に溶け込んでいく。これまでの技術と同様である。

「ロボットは東大に入れるか」プロジェクトで開発された東ロボくんは弱いAIである。2015

年6月に進研模試「総合学力マーク模試」を受験した。結果は偏差値57.8であり、半数以上の人間の受験生より上の成績であった。入試は限られた知識からの演繹推論で解ける問題が多い。AIの、形式的な演繹推論は、人間より正確である。安全性などの社会的受容という条件を無視すれば、限られた知識の範囲内で行われる仕事は、現時点でも弱いAIが代替可能であることを意味する。

人間の変化はゆるやかである。しかし、社会は、革新的な技術によって急激に変化することもある。インターネットの普及前の社会と普及後の社会の間には、断層が存在する。また、半導体の集積密度が指数関数的に上がり、画像認識や音声認識は、長足の進歩を遂げた。半導体の集積密度と同様に、AIの技術進歩のスピードも、指数関数的に速くなる可能性がある。本論文では、強いAIが出現するまでの間の経済の変化を論じた。

## 参考文献

- (1) Kurzweil, R. (2005), *The Singularity Is Near: When Humans Transcend Biology*, Viking.
- (2) Cowen, T. (2011), *The Great Stagnation*, *Dutton Adult*.
- (3) 小松 香爾 (2017), 情報化社会とビジネス, 三恵社.
- (4) Brynjolfsson, E. and McAfee, A. (2012), *Race Against the Machine: How the Digital Revolution is Accelerating Innovation, Driving Productivity, and Irreversibly Transforming Employment and the Economy*, *Digital Frontier Press*.
- (5) Marx, K. (1867), *Capital: Critique of Political Economy*, *Verlag von Otto Meisner*.
- (6) Cowen, T. (2013), *Average is Over: Powering America Beyond the Age of the Great Stagnation*, *Dutton Adult*.
- (7) Brooks, F.P. (1977), *The Mythical Man-Month*, *Addison-Wesley*.
- (8) Kuznets, S. (1955), *Economic Growth and Income Inequality*, *The American Economic Review*, Vol.45, No.1, pp.1-28.
- (9) Piketty, T. (2014), *Capital in the Twenty-First Century*, *The Belknap Press of Harvard University Press*.
- (10) Keynes J.M. (1936), *The General Theory of Employment, Interest and Money*, *Palgrave Macmillan*.
- (11) 小松 聡 (2002), *アメリカ資本主義の光と陰:なぜ平成不況なのか*, 社会評論社.
- (12) 水野 和夫 (2014), *資本主義の終焉と歴史の危機*, 集英社.
- (13) 財団法人社会経済生産性本部 (2004), *全要素生産性の国際比較*.
- (14) 小松 聡 (2006), *世界経済の構造: アメリカ資本主義を中心として*, 世界書院.
- (15) 野村総合研究所 (2015), *日本の労働人口の49%が人工知能やロボット等で代替可能に601種の職業ごとに、コンピューター技術による代替確率を試算*.
- (16) Frey, C. B. and Osborne M. A. (2013), *The future of employment: How susceptible are jobs to computerisation?*, *Oxford University Programme on the Impacts of Future Technology*.
- (17) Russel, S. J. and Norvig, P. (1995), *Artificial Intelligence: A Modern Approach*, *Prentice Hall*.
- (18) Minsky, M. (1986), *The Society of Mind*, *Simon & Schuster*.
- (19) Turing, A. M. (1936), *On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem*, *Proc. of the London Mathematical Society*, Vol. 42, No. 1, 230-265.
- (20) Sollow, R. M. (1957), *Technical Change and the Aggregate Production Function*, *The Review of Econom-*

*ics and Statistics*, Vol.39, No.3, pp. 312-320.

- (21) Hayashi, F. and Prescott, E.C. (2002), The 1990s in Japan: A Lost Decade, *Review of Economic Dynamics*, vol.5, pp. 206-235.

(2018.9.9 受理)