

経済研究所 年報

第 32 号
April 2019

研 究 報 告

人口減少と日本経済……………吉川 洋

社会保障と財政

—医療制度改革を中心に—……………田近 栄治

ヒューマン・インテリジェンスとビッグ

データ型及び脳神経模倣型 AI :

インテリジェンスとは何かを考える

……………中馬 宏之

最新テクノロジーによる社会の変革

……………久世 和資

Japanese SMEs in the context of the
zombie firm hypothesis

……………Yasuo GOTO

Scott WILBUR

成 城 大 学

經 濟 研 究 所
年 報

第 32 号

成 城 大 学

THE INSTITUTE FOR ECONOMIC STUDIES
OF
SEIJO UNIVERSITY
2019

巻 頭 の 辞

本年4月1日に新元号「令和」が発表になり、お祭り騒ぎのような雰囲気
がテレビに映し出された。新元号の号外に飛びつく人々、その号外をネット・
オークションに出品する人々、発表後わずか1時間—なかには数分—で、
令和の文字がプリントされたTシャツ、純米酒、カステラ等々が売り出され、
すぐに売り切れた。瞬時に新商品や広告を打ち出す「リアルタイムマーケティ
ング」という戦略だそうである。

なんとも明るい雰囲気の中で平成が終わろうとしているが、平成とはいった
いどのような時代であったのだろうか。平成が終わることがすでに予定されて
いたこともあってか、平成史を冠する書物が数多く出版されている。「なるほ
ど」と共感させられる数多くの論点が、改めて平成を振り返ることの重要性を
教えてくれる。しかし、私にとって平成とのもの悲しい別れを強く実感させら
れたのは、新元号発表の2日後にリリースされた、「第5世代移動通信システ
ムのサービス開始を巡ってアメリカと韓国の熾烈な争い」というニュースであ
った。このような最先端技術の発表に必ず登場していた日本の名が聞かれなかつ
たのである。隔世の感を禁じ得なかった方も少なくなかったのではなかろう
か。このまま技術大国から転落し続けていくのか、あるいは平成30年間につ
いての深い反省の下に復活を遂げるのか、重大な岐路にあることは間違いなか
ろう。経済研究所は、講演会やミニ・シンポジウム、さらには研究報告その他
の刊行物やプロジェクト研究を通じて、その成果を、重大な岐路に立つ社会に
向けて発信していきたい。

さて、平成30年度の経済研究所は恒例の講演会を開催した。まず6月16
日の講演会では、吉川洋氏（東京大学名誉教授・立正大学経済学部教授）と田近栄
治氏（一橋大学名誉教授・成城大学経済学部特任教授）をお迎えし、それぞれ「人
口減少と日本経済」、「社会保障と財政」という日本経済が直面している喫緊の
課題についてご講演いただいた。また10月13日の講演会では、中馬宏之氏
（成城大学社会イノベーション学部教授）と久世和資氏（日本アイ・ビー・エム株式

会社執行役員最高技術責任者)にご登壇いただき、「ヒューマン・インテリジェンスと脳模倣型及びビッグデータ型 AI: インテリジェンスとは何かを考える」と「最新テクノロジーによる社会の変革」というテーマで最新のインテリジェンスやテクノロジーの可能性を展望していただいた。これら講演会の詳細な内容は本号に掲載された講演者各氏の玉稿を参照していただきたい。さらに去年は9回のミニ・シンポジウムを開催することができた。その成果については、本号に掲載された後藤康雄氏(成城大学社会イノベーション学部教授)の玉稿や経済研究所のホームページにアクセスしていただいて、刊行物-研究報告から漸次ご覧頂ける研究報告をお読みいただければ幸いです。

最後になったが、研究所は今年度から私が研究所長を務めさせていただくことになった。微力ではあるが、新主事の相原章経済学部教授を始め、所員の方々、さらにお二人の研究所スタッフに支えられながら、また講演会やミニ・シンポジウムに積極的に参加して下さる先生方や市民の方々にご後援を頂きながら、研究所の発展に誠心誠意努めていきたいと考えている。一層のご支援とご協力をお願いする次第である。

2019年4月

成城大学経済研究所長

立 川 潔

目 次

巻頭の辞	立 川 潔	1		
研 究 報 告				
人口減少と日本経済	吉 川 洋	5		
社会保障と財政	田 近 栄 治	25		
—医療制度改革を中心に—				
ヒューマン・インテリジェンスとビッグデータ型及び脳神経模倣型 AI： インテリジェンスとは何かを考える	中 馬 宏 之	43		
最新テクノロジーによる社会の変革	久 世 和 資	115		
Japanese SMEs in the context of the zombie firm hypothesis			Yasuo GOTO	135
			Scott WILBUR	
研究所だより		161		
前号目次・編集後記		167		
「経済研究所年報」刊行一覧		168		

人口減少と日本経済

吉 川 洋

ご紹介にあずかりました吉川でございます。今、立川先生からもご紹介いただきましたように『人口と日本経済』と題する中公新書の本を書きまして、幸い多くの人に読んでいただきました。もっともそれで私の老後を支えるというにはほど遠いのですが、しかし多くの読者に迎えられました。

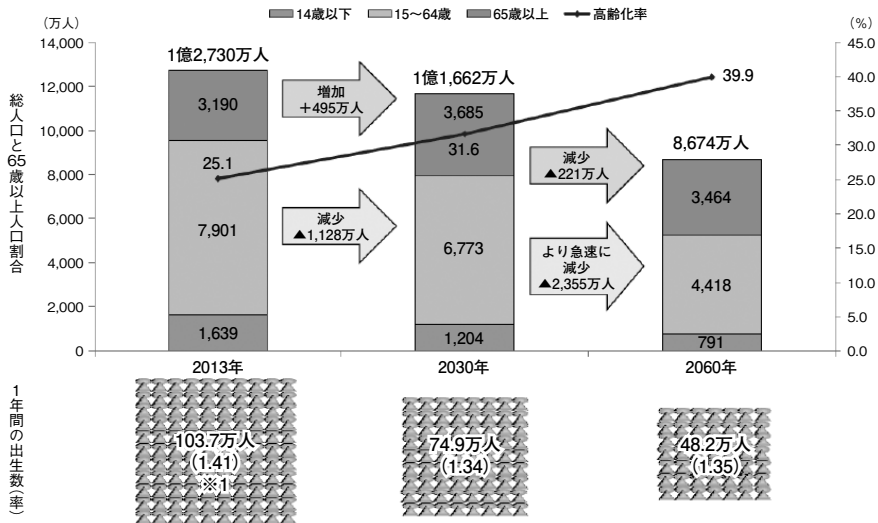
本日こうして機会をいただきましたので、その後考えてみましたこと、本の延長のような話をさせていただければ幸いです。また皆さま方にこれからお話しするテーマ、私の考えはともかくとして、テーマ自体は非常に重いテーマで、いわば全員参加で議論しなければいけないというような問題だと思っています。私の話を聞いていただいた後、先ほどもありましたが質疑の時間がございしますので、有意義な議論ができればと思います。

早速ですが、少子高齢化ということは、これは皆さんよく聞かれていることだろうと思います。初めからおわびしなければいけません、**図表 1**に見ていただいているのは人口統計、日本では国立の社会保障人口問題研究所というところが数字を出しています。5年に1回ずつ将来推計を出して、転がしながらおおむね100年くらい先までの将来人口推計を出してまして、実は直近が去年出たのです、2017年。

おわびというのは、私がこのデータをアップデートすることを怠ってまして、2012年、1つ前の推計数字を出しております。この点はお詫びいたしますが、今の時代、皆さま方ご関心があれば、社人研のホームページで簡単に新しい数字を見ることができます。全体の姿はここで見ていただいたことと大きくは変わっておりません。

昨年2017年に出た推計では2115年までの日本の将来人口が出ています。100年後の人口ということですから、その間の出生率、死亡率をどう想定するかで、数字が変わってまいります。とりわけ出生率については皆さんどこかで

図表 1 少子高齢化の進行



(出所) 総務省「国勢調査」、国立社会保障・人口問題研究所「日本の将来推計人口(平成24年1月推計):出生中位・死亡中位推計」(各年10月1日現在人口)
厚生労働省「人口動態推計」
※1 出典:2012(平成24)年人口動態統計

聞かれていると思います。出生率が高い場合、高位と中位、低位3つの想定を置き、通常は真ん中をとって中位推計で議論される。新聞等で皆さんがご覧になるときの丸括弧のなかに中位推計という言葉がよく注のように書いてあります。

昨年出ました100年後、2115年の中位推計の将来人口推計値は5,050万人です。現在の日本の人口、これは皆さんご存知でしょう、一億二千数百万人。ですから数字を丸めると、1億2,000万人の人口が100年後には7,000万人減って5,000万人になる。

ちなみに現在2018年ですが、100年前というのは1918年、大正7年です。第一次世界大戦が終わった年、ロシア革命の翌年。100年前、大正7年頃の日本の人口はおよそ5,000万人でした。

ですから100年前、大正の頃の日本の人口5,000万人から、100年かけて日本の人口は7,000万人増えて現在1億2,000万人となったのが、これから21世紀100年かけて、元のもというのでも変な表現ですが、5,000万人まで減っていくというわけです。これが日本の人口動態です。

増えた過去100年はともかく、今後100年間、もちろんこの想定の中には大きな戦争、あるいは大変な疫病ということは想定に入っていないから、

いわば平和ななかというのですが、100年で1億2,000万人の人口が5,000万人まで減っていく。これは大変なことです。

今日は前半では大変だという話を致します。大変なのは、特に財政・社会保障です。しかし今日の講演会では、2番目に田近先生が財政・社会保障についての話をされるので、具体的な内容は田近先生が1時間話してくださると思います。私はそこはスキップするような形で、守備範囲を分けられればと思っています。

人口がこれだけ急に減っていくのは確かに大変です。大変なのですが、もう一方で人口も減る、働き手も減るのだから、したがって日本の経済は良くてゼロ成長、素直に考えればマイナス成長ではないか。GDPの成長率が素直に考えればマイナス成長になるのではないか、なにせ働き手が減っていくのだからそれは当たり前だろう。それは物理法則みたいなものではないか。人口が減る、働き手が減るなかで、プラスの成長を口にする経済学者は、よほど無責任だというようなことも私は耳にしました。ただそれは違う。全く違う。このことを今日の後半ではお話してみたいということです。ただだから人口が減っても平気とか、私が人口減少楽観論者だというように思われると、それは誤解です。人口の減少、これほどの大きな人口減少は、やはり日本という国にとって最大の問題とっていいのだらうと思います。

日本の社会保障はヨーロッパと比べると高齢者の方々に手厚い。人口減少が続く中、これをもっと大胆に若い世代、現役世代の応援のほうに回していかなくてはいけないのではないかと私は思います。

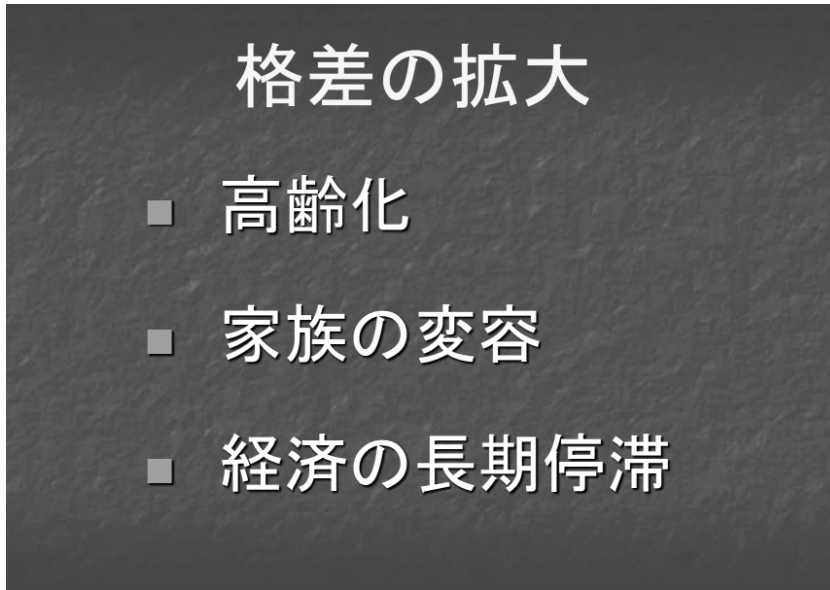
さて人口減少下、社会の中で閉塞感が高まっています。閉塞感の原因はいろいろあると思いますが、1つは格差、とりわけ経済格差の拡大という問題があると思います。

すぐ後でもお話するとおり経済格差は、先進国、すなわち日本、アメリカ、ヨーロッパ、すべてで拡大していますが、原因はさまざまです。国、地域によってそれぞれ異なります。

日本の場合はどうか、図表2で見いただいているのは日本を念頭にして書いていますが、1つは実は高齢化、これが格差拡大の大きな原因になっています。その理屈は非常に分かりやすい。

たとえばここに20代の人100万人集まってもらって、所得、資産、あるい

図表 2



は健康，こういうことを調べますと当然ばらつきがあります。しかし相対的には小さい。一方，70 以上の人たち 100 万人に集まってもらって，同じく所得，資産，健康ということを調べますと，これは皆さんすぐお分かりのように，20 代に比べてはるかにばらつきが大きい。つまり，高齢者はグループ内ではばらつき，別の言い方でいえば格差といってもいいわけですが，ばらつきが大きいわけです。

ところで高齢化というのは，社会全体で高齢者の占める比率が高くなること，それを高齢化というわけですから，したがってばらつきの大きい集団のシェアが高まることで，全体でのばらつきも大きくなります。これほど分かりやすい理屈はないと思います。この分かりやすい理屈が過去 3, 40 年，日本では強力に作動してきた。また今後も，今世紀作動し続けるというわけです。

高齢化は日本では格差拡大の重要な原因になっています。皆さんご存知でしょう，社会保障のなかの生活保護，田近先生のお話のなかにも出てくるかもしれませんが，今 200 万世帯くらいでしょうか。給付の対象者，それから世帯数，どちらでみても増えてきているのですが，半分くらいが高齢者です。

高齢者がすべて弱者だというのは間違いです。今日ここにご参集の方々のなかにも高齢者の方々，すなわち 65 歳以上の方がたくさんいらっしゃると思

ますが、今日ここにご参集の皆さま方は、そもそもここへ出てこられるので健康でいらっしゃると思いますし、恵まれた方々だろうと思います。しかし高齢者のなかには貧困すれすれの人もいます。これももう一方の事実です。高齢化は格差拡大の1つの重要な原因です。

2番目、家族の変容というのは、今言いました高齢者で経済的にも弱い人。昔は長男や長女、末っ子など家族と同居するということでしたが、それがなくなりました。それがなくなったのはかなり昔で、私どもが学生の時代にすでにそういうのは都会ではなくなりつつありました。3世代同居という姿は数十年前にすでに消えつつありました。

ここでいっている家族の変容というのは逆なのです。逆とは何ぞやと言われるかもしれませんが。いつの時代でも、たとえば30代くらいになっても経済力がない、どういうわけか定職に就けない、見た目だけから判断すると働いていてもよさそうという35歳の男性、この人がどうしても定職に就けない、結果経済力もない。こういう人はどこの国、いつの時代でもいる。

昔はそういう人は親と同居して親が面倒をみていた。ところがそういうことが急速になくなってきている、というのが日本の過去20年、25年の姿です。統計的にも非常にはっきりそういう変化が見えています。そういった人たちが経済力がないままに大都会で単身世帯を構えるようになった。これもまた格差の拡大の一因です。

3つ目は経済の長期的な停滞。大きくみれば、バブル崩壊後、日本経済は低成長を続けている。そうしたなかで、さまざまな問題が生まれています。これを象徴するのが、皆さんよくご存知のとおり、いわゆる正規と非正規、非正規労働の拡大です。

バブルの頃、30年くらい前までの日本経済では、非正規の形をとって働いている人の比率は大体6人に1人くらいだったといわれています。パーセンテージに直しますと、16ないし17%でしょうか。それが直近では非正規のシェアが4割近くまで上がってきています。

時間もありますので詳しいことは申し上げませんが、私はオールジャパンでみて、非正規のシェアが高くなりすぎたと考えています。誤解があるといけませんから付け加えますと、非正規が全部悪いというわけではありません。むしろ正規で自分は働きたくない、子育てをしているなど理由は何でもいいのです

が、むしろパート、非正規の形で働くことを望んでいる人たちもたくさんいるわけで、それはそれで結構だ。よくいわれるように多様な働き方、それはそれで正しいと思いますが、問題なのは、本来正規で働きたいにもかかわらず非正規に甘んじている人たちがたくさんいるということです。

現在の 40 代の人たちにはそういう人が非常に多いといわれています。40 代の人たちが「失われた世代」のような形になっているといわれています。この、現在 40 代の人たちは、団塊ジュニアの世代でもあります。団塊世代というのは、1946 年から 49 年までの生まれの人たちですが、その世代は人数が非常に多い。私は団塊の数年下なのですが、東京ですと小学校で 2 部制でやっていたような公立の小学校もあった。午前と午後で 2 回転しないと校舎が足りない。

若い方もたくさんいらっしゃるの、そんな時代があったのかと思うかもしれませんが、戦争が終わった後というのは、まずはいい建物は全部接収されたわけです。話がわき道にそれますが、それもいいでしょう。立派な建物はまずは GHQ に全部接収されたわけです。

今話題の財務省、少し前までの大蔵省ですが、大蔵省は今建っている建物も戦前の建物で、昭和 20 年にはもちろんあったわけですが、真っ先に接収された。では大蔵省はどこへいったかということ、四谷の小学校の校舎が日本国の大蔵省になっていた。そうすると四谷の小学校はドミノで、小学校の建物を大蔵省が使っているわけですから結局小学校の校舎すら足りないというような状況。子どもがあふれていたというのがまさに団塊です。

話を戻しますが、団塊の子どもの世代というのが団塊ジュニアです。親の世代の絶対数が多いわけですから、出生率は落ちたとはいっても団塊ジュニアの絶対数もそれなりに多いわけです。

今日その話から始めた人口減少からすると、この団塊ジュニアが、下がった出生率とはいえそれなりに子どもを生んでくれれば、人口減少には少し歯止めがかかるかもしれない。こう期待されたわけです。それが完全に空振りに終わりました。

なぜかというのはいろいろあるのですが、1 つの原因として挙げられているのは、これがすべてだと申し上げているわけではありませんが、非正規雇用なのです。つまり団塊ジュニアという人たちが高校、大学を出て社会人として就

活をしたときが、労働市場は就職の超氷河期といわれる時代で、彼らの多くは不本意に非正規にとどまった。

ところで正規と非正規別の結婚の比率という統計があるのですが、非正規の人たちの婚姻率、正確には有配偶率といいますが配偶者がいる、つまりは結婚している比率は、正規に比べて有意に低い。

皆さんご存知のように、日本では正規に結婚したペアから生まれてくる子どもが圧倒的です。なぜこんなことをいうか、それは少子化が止まったヨーロッパの先進国、スウェーデン、フランスでは生まれてくる子どもの過半数が婚外子だからです。

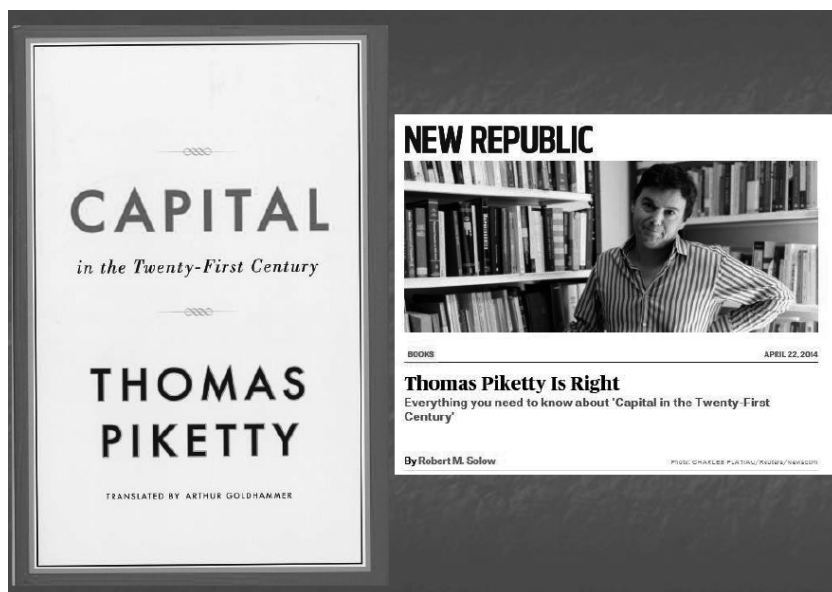
グローバルに地球上全体をみてみますと、人口動態は先進国でおおむね人口減少、これは19世紀の終わりから始まっていますが、ヨーロッパでも戦後加速化しています。繰り返しになりますが、フランス、スウェーデンでは、リーガルな結婚というインスティテューションを超えたところで子どもが生まれてきているという現実があります。

日本でも時々婚外子をめぐる議論はあります。今日はその話には立ち入りませんが、日本の場合には正規の結婚をしたペアから子どもが生まれてきます。そうしますと結婚しない、できないと子どもが生まれてくることがないわけです。団塊ジュニアというのは不本意に非正規にとどまり、そうすると経済的な理由で結婚できません。結婚できないから子どもが生まれないということで、団塊世代の子ども世代として絶対数はそれなりに多い団塊ジュニアから生まれてきた子どもの数というのは、残念ながら期待されたよりはるかに少なかった。

さて先ほども申し上げたとおり、格差拡大は決して日本だけの問題ではありません。世界全体としては、**図表3**で見ていただいているフランスの経済学者、右側の人ですね。まだ若いですが、40になるかというくらいのトマ・ピケティという人。『21世紀の資本』という本を書き、みずす書房から翻訳も出ています。数百ページの大著ですが、この本が大変なベストセラーになり、世界的にも格差の問題にピケティが警鐘を鳴らした。

経済学者の先生方もいらっしゃるので一言付け加えますと、ピケティの研究に対しては、とりわけ理論的な説明については批判もあります。ピケティがいったのは非常に分かりやすく、資本主義というのは格差拡大システムだ。資

図表 3



産所得がどんどんふくらんで、持てるものは働かなくてもその資産、キャピタルをふくらませることにより大金持ちになっていく。一方、労働所得を得ている人は、働けど働けどわが暮らし、これが資本主義というものなのだ。

これがピケティのいったことで、19世紀にマルクス、エンゲルスがいったことに近い。しかし大格差社会であるアメリカでは、よく知られていることですが労働所得の格差が広がってきた。それは資本が雪ダルマ式に増えていくというピケティの説とは違う。

数年前、ピケティが自分のベストセラーのプロモーションで日本にやってきたとき、私もピケティ氏と話をする機会があったのですが、盛んにレンティアと言う。レンティアというのはレントだけで暮らしている人です。つまり全然働かないで、ただ資産を持ってその利子所得だけで暮らしているような人たち、そういう階級はけしからんとピケティは力を込めて言うのですね。日本には残念ながら、幸か不幸かそういう人はいないと言ったのですが。ちなみにフランスには確かにそういう人がいる。しかしながら日本では国債はもちろんありあまるほどあるわけですが、国債をまさに大量に持って、その利子所得で働かなくても暮らしている悠々自適な人はどこにいるかという、もちろんいません。ゼロ金利ということもありますし、そもそも国債をだれが持っているかとい

うと、ゆがんだ形ですが今は日銀が持っています。あるいはそのほかの金融機関が持っています。金融機関が持ってもその裏には預金がある。その預金をだれが持っているかといえばわれわれですね。われわれ、とりわけ高齢の方々がだれかといえば、サラリーマンOBです。

日本のキャピタリスト、つまり資本家は定義によって資産の保有者であるとすれば、それはイコールサラリーマンOBということになるでしょう。それをマルクス、エンゲルスが念頭に置いた「資本家」と同一視することは出来ません。それが日本の実情です。ただしフランスにはいるのですね。フランスにはシャトー、お城を持っているというような人が今でもいる。そこは日本とフランス、あるいはヨーロッパとの違いでしょう。

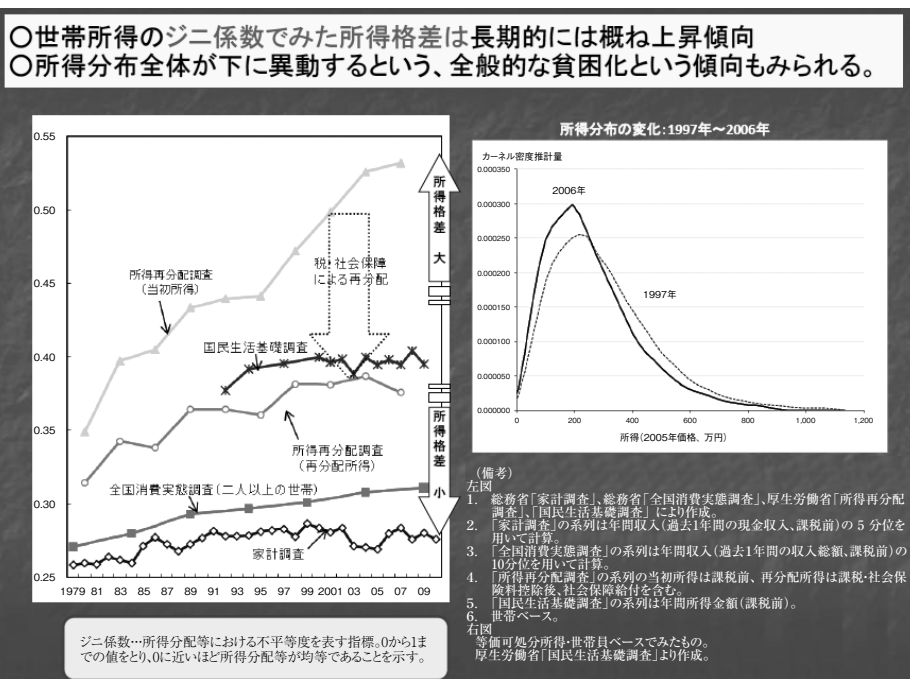
ピケティはアメリカ人の経済学者にも評判が悪い。アメリカ人の経済学者にしてみると、突然フランス人に1本とられてしまったような、そういう感じもあるのかもしれませんが。それで、やれここは違う、ピケティの分析はここが間違っているというようなことを言います。なかには、**Thomas Piketty is no longer an economist but just a rock star!** ピケティはもはや経済学者ではない、彼はロックスターだと。世の中に知られて、大変なロックスター以外の何者でもない、あれはもう学者ではないというようなことを言う人もいるわけですが、私はそうは思いません。

もちろんピケティの分析そのものは、いろいろなところで違っている。それはそのとおりだと思いますが、格差は大変重要な問題だということを非常にインパクトのある形で指摘した功績は認めるべきだと思います。

さて時間がありますので、少しスキップさせていただきます。日本ではどうか、すでにお話ししているとおり、格差が拡大してきた。格差をどうやって計るかの細かいことはスキップですが、ジニ係数というものがあります。何でも計るというからには何かで計らなければいけません。ジニというのはイタリアの経済学者の名前です、Gini、イタリア人でジニ。この人が考え出したジニ係数は、0と1の間の値をとり、非常に不平等、いちばん究極の不平等の場合に1になり、究極の平等の場合に0になるという、非常にきれいな物差しです。したがって、ジニ係数が上がってくるということは不平等になってくるということです。

そのジニ係数、厚労省が計算していますが、上がってきているのですね。た

図表4



だ少し細かいことになりますが注意点があります。厚労省がジニ係数を計算するとき、図表4にある「所得再分配調査」で計算するのですが、まずは高齢者の方々の受け取る年金を所得に算入しないでジニ係数を計算する。そうしますと極端な場合、年金だけで暮らしているようなお年寄りの場合には所得が0になります。当然のことですが、そうすると非常に貧しい世帯というのがたくさん出てくるわけで、ジニ係数が高くなります。

しかし年金というのは老後を支えるためにあるのですし、実際にお金を受け取るのですから、受け取る年金を一応所得に算入してもう一度計算し直してしたらどうだとだれもが考えますね。実際厚労省も、年金を所得に算入した数字も計算して公表しています。それがこのグラフにある、税社会保障による再分配後のジニ係数です。

大きな下向き矢印がありますが、上にある右上がりのものが年金は所得と認めないで最初に計算したジニ係数。それでいきますと、直近でもう0.5を超えます。これはジニ係数の相場観からしますとメキシコに迫るくらいの不平等です。地球上で非常に不平等な国の代表というのは中南米、メキシコやブラジ

ル、アルゼンチンなどですが、それに迫るような水準です。0.5 ということになると中国よりも高い。年金がもしなかったらということを頭のなかで想像すると、こういう状態になってしまうということです。

しかし現実にはもちろん年金があります。そのおかげで、この破線下押し矢印でぐっと押して、0.38 くらい水準まで下がっています。これはフランス、ドイツよりは少し不平等ですが、イギリス並みくらいのジニ係数の水準です。ちなみにスウェーデンやノルウェー、皆さんがよく聞かれている社会保障の充実した国のジニ係数は 0.25 ほどです。

もう 1 つだけ時間のないなかで付け加えますと、よく小泉内閣時代に市場原理主義的なことをいろいろやったために不平等が拡大したという議論があります。しかし不平等との関係では私はちょっと待って、というところがあります。後でよく見ていただくとお分かりになるでしょうが、小泉内閣は 2001 年からなのですが、再分配後のジニ係数で見れば 2000 年代の上昇というのは確かに若干上がっているところはあるのですが、大きくいえばフラットに近くて、それ以前の 0.3~0.38 までの上昇の方が高いといえます。違った見方というのは当然あるかもしれませんが、また小泉内閣の評価というのは今私がここで問題にしたこと以外にもいろいろなことがあるでしょう。それはまさに歴史の判定に委られなければならないと思います。それはそれとして市場原理主義な対策をやったので不平等社会になったというのは、再分配後のジニ係数がほぼフラットということからみても乱暴すぎる議論です。2000 年代に入ってからジニ係数の急上昇は「再分配前」のジニ係数ですから、それは先ほどから言っているとおり、年金をゼロ査定にして上がるということ、それは別の表現でいえば高齢化が原因ということです。

話を進めます。格差は大きな問題だ。ではどうすればいいのかということになります。格差、とりわけ貧困というようなことになれば、それは大きな問題、不幸ですね。ここにいらっしゃっているような方々であれば、『戦争と平和』等を書いたロシアのトルストイという文豪に『アンナ・カレニナ』という小説があることはご存知の方が多いだろうと思います。

また脱線を少しすれば、最近はどここの大学でもトルストイはもうだめですね、知っている学生が少ない。そんなものですよ。ある程度以上のお歳の方からすると、ええ、そうなのかという感じかもしれませんが、夏目漱石は知っている

けれど寺田寅彦になると苦しいという感じですかね。トルストイというと、きょとんという感じ。チェーホフをまず知らない。

某大学で、日本でいい大学と称されるところで先生が日露戦争と言っていたら、ある学生がぱっと手を挙げて、「先生、日本はロシアと戦争をしたことがありましたっけ」という質問が出た。その質問の趣旨は、どうやらロシアというのはソ連崩壊後のロシアを指している。明治 37 年というのはもう頭のなかに全くない。そういう感じですね。

話を戻します。トルストイの『アンナ・カレーニナ』の書き出しは非常に印象的で、「幸福な家庭というのはどこも似通ったものだが、不幸な家庭はすべて違う」。不幸の原因は千差万別である。

さて、社会の問題でも格差をはじめ貧困、それから生み出される不幸というのは千差万別で、それをすべて解決するというのは無理でしょう。それはあまりに多様で、それぞれ個人の状況、不幸の原因はあまりにさまざまである。しかし何とか社会全体で少しでもその問題を緩和することはできないか。それならできる。それこそが社会保障ということになるわけです。

社会保障制度は 19 世紀の終わりから、先進国であるヨーロッパ、具体的にはドイツ、イギリス、スウェーデンといったような国々が先進的に 100 年かけて、19 世紀の終わりから整えてきた制度です。日本では 1961 年に、国民皆年金、皆保険が制度として確立した。もちろんその淵源は戦前にさかのぼることが出来ますが、国民のごく一部しかカバーされていませんでした。

社会保障のサイズは現在 100 兆を超えているのですが、このファイナンスが大変なのです。年金にしても医療にしても介護にしても、保険料だけでは足りない。保険料は現役が払いますが、現役の数は減っていく。一方、お金を使う方は主として高齢者ですが、そちらは増えている。少子高齢化の下で当然苦しくなります。それがそっくりそのまま平行移動で財政赤字になっています。これでは持続可能ではない。ここから先は田近先生のお話を待つということにさせていただきます。

日本経済の直面するさまざまな問題で、財政と並ぶもう 1 つの問題として金融、デフレの問題があるのはご存知のとおりです。

このデフレと金融政策を巡る問題も大問題で、盛んな議論があることはご存知のとおりです。まさに経済学者やエコノミストの間で大きな議論があるので

すが、私は当初からいわゆる異次元の緩和、現在の黒田日銀の政策には反対の立場です。

私は日銀は二重の意味で誤りを犯していると思います、出発点から。まず第一にデフレがいいか悪いか、そこから問題なのです。デフレというのは物価が下がることです。物価が上がるのは困る、インフレは、でも物価が下がるというのは結構ではないか、助かる人もいるのではないか、という議論もあるのですが、それはちょっと単純すぎます。

デフレの下でスーパーの値段も下がるかもしれませんが、お孫さんの初任給も下がる。賃金も含めてすべてが下がっていくのがデフレです。自分が店で買い物をするときの値段が下がって結構じゃないの、そんな議論はもちろんデフレの議論ではありません。年金も含めて収入も下がっていく。

さてデフレは悪というのが経済学者のコンセンサスなわけです。この大コンセンサスはおおむね 20 世紀の、1930 年代のいわゆる大不況の経験に基づいています。このときのデフレは数年でアメリカ等物価が半分以下まで下がるような、激的なデフレでした。

このときのデフレの問題については、アメリカのアーヴィング・フィッシャー、あるいはケインズ、その他の人たちが大問題として同時代的に指摘しました。フィッシャーが指摘したデフレの最大の問題は借金／債務です。デフレのなかでもの値段、所得は全部下がっていくのだから、全部がもし比例して下がれば計算単位が変わるだけではないか、と考えられるかもしれない。しかしそうはいかないのが借金、債務。これは通常は名目で固定されています。1 千万の借金は物価が下がっても 1 千万のまま、どうでしょう。もうお気づきのとおり、1 千万の借金は今の物価水準を所与としての 1 千万の借金なのですが、物価が 1/2 になり、自分の給料もすべて 1/2 になったら今の物価でいう 2 千万の借金をしているのと同じことになってしまいます。何年分の給料で 1 千万が返せるのかと考えていただくと、もし物価／給料が 1/2 になれば借金は 2 倍の重みになります。

フィッシャーは、この debt、債務の実質価値がデフレにより高まって、企業でいえば倒産、個人でいえば自己破産、それで経済がさらに悪くなって物価がさらに悪くなって、という悪循環を指摘したわけです。ケインズは同じようなことを言ったうえで、不良債権が銀行システムに悪い影響を与えることを重

視いたしました。

ここまでお話ししますと、どうでしょうか。実はフィッシャー、ケインズが問題にしたようなデフレの悪循環というのは、日本ではバブル崩壊後の土地、株価の下落、これで実はもう過去に起きたのです。バブル崩壊後の資産価格デフレというのは、まさに 1930 年代のデフレを前にフィッシャー、ケインズが指摘した問題でした。日本経済は 10 年ぐらいそれで大変に足を引っ張られることがありました。

しかし今、2000 年代に入ってから問題にしているデフレというのは、資産価格デフレではなく、普通のモノの価格が下がるデフレです。しかし、これは 1930 年代の 2 年くらいで物価が半分以下に落ちるといようなものではなく、せいぜいマイナス 1% くらいのデフレです。つまりは 100 円のものが 1 年経つと 99 円になっているというデフレです。これで経済がひっくり返るといことはない、というのが私の考えです。

たとえば 19 世紀の前半、ナポレオン戦争が 1815 年に終わりますが、それから 19 世紀の中頃までというのはイギリスがまさに大英帝国としてヴィクトリア女王の下、繁栄を極めた時代です。ところがこの 19 世紀前半の数十年、イギリスではだんだらデフレが続いた時代でもあったのです。毎年数% くらいで、しかし数十年だんだらとデフレが続きました。当時のイギリス人はそれを問題だと考えたか。問題にしていまませんでした。何せイギリス経済は繁栄をきわめて世界の工場といわれ、まさに大英帝国になった時代ですから。デフレは、日本経済の 1 丁目 1 番地の問題ではない。

次にデフレを解消するのに一体どうやってできるのか。今の日銀の考え方は、マネーを増やせばデフレは止まる、こういうことですね。そこは詳しくはお話しできませんが、マネーを増やせばデフレは止まる、という考えも私は誤っていると思います。

では日本のデフレは一体何が問題なのか。私は賃金デフレというのが最大の問題だと考えています。第二次世界大戦後、多くの先進国でデフレを経験しなかったのは、名目賃金が下がらないからです。では名目賃金はなぜ下がらないのか、これは皆さんご想像のとおりです。やはり賃金を下げるといのは、いろいろな意味で副作用があります。賃金を下げるといのは個別の企業が下げるわけですから。

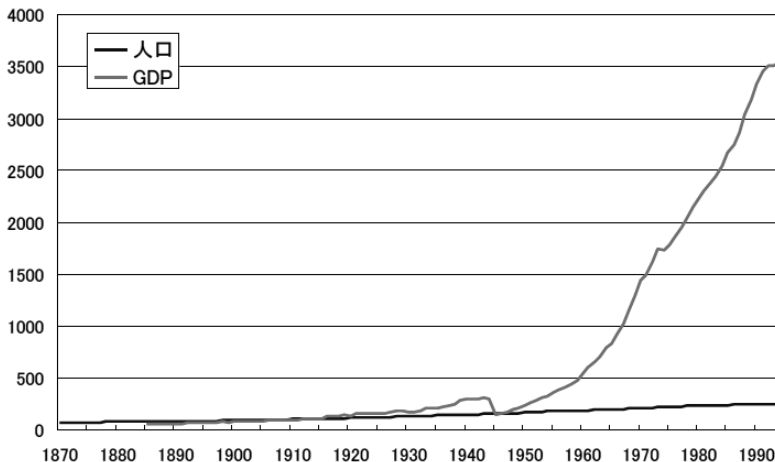
賃金が下がりにくいというのがデフレストッパーだったのが、なんと日本でだけ名目賃金下がりはじめました。1990年代の終わりくらいからです。ヨーロッパ、アメリカでは名目賃金下がるなどということはありません。ところがわが日本でだけこれが下がり始めた。そこに問題があると私は思います。

さて人口減少は問題だ、とりわけ財政、社会保障について問題だ、とお話ししましたが、それはそれとしたうえで、人口が減少して働き手が減るので経済成長はできない、プラス成長など口にするだけ無責任というのは違うということ、残された時間でお話しして終えたいと思います。

まずは論より証拠ということで、明治の初めから20世紀の終わりまでのGDPと日本の人口動態を見ていただきます。やはり戦後の動きが同じ縮尺ですと目立ちますが、半分で切って縮尺を変えれば、戦前についても戦後と似たような印象が得られる図を描くことができます。とりあえず**図表5**でも分かりやすい右側を見ていただければと思います、戦後の経験です。上に伸びているのはGDP、下が人口です。これを見ていただくと、人口と経済というのは別物だと言えるほど両者は乖離している。これが**図表5**から素直に読み取れることではないでしょうか。

数字を挙げますと、日本の高度成長の時代、それはおおむね1955年から70年代初頭の十数年間、日本経済が実質ベースで10%成長したということは皆

図表5 人口と経済成長 1870-1994：日本
日本の人口とGDP(1870-1994, 1913=100)



さんよくご存知ではないでしょうか。ご存知ないかもしれないこと、それは人口動態です。

これは人口そのものをとるか、15~64 の生産年齢人口、すなわち現役世代の人口をとるか、そのなかでも実際に働いている労働力人口をとるか、もちろん少し違います。ですが、どれをとっても人口の成長率はそんなには変わりません。1%くらいです。高度成長期。正確に言えば 1.2%，四捨五入すれば 1%といっても決してアンフェアではないと思います。

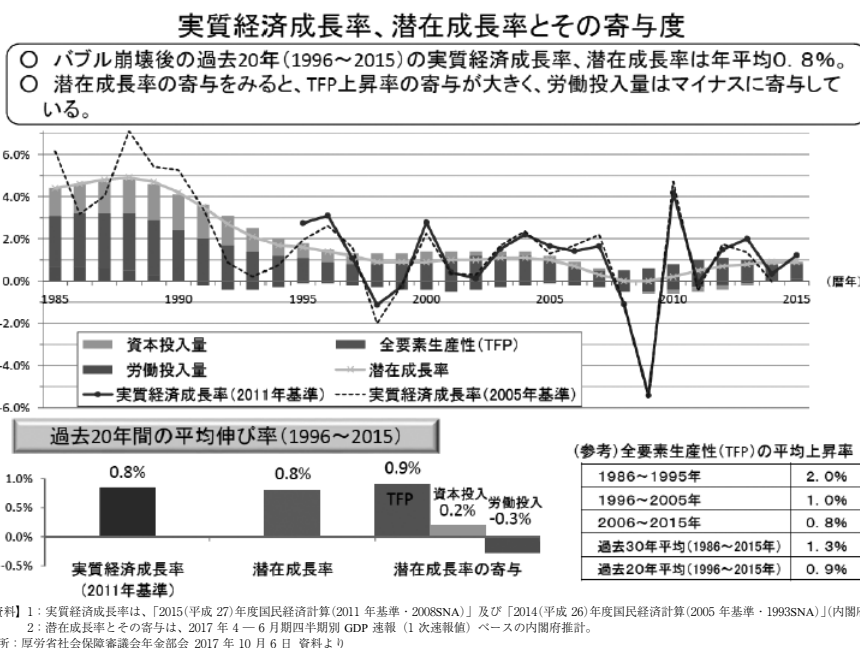
ですから経済は 10%成長したが、人口はどういう指標をとっても 1%ていどの伸び率だった。10-1 の 9 は何かといえば、それは年々 9%ずつ 1 人あたりの所得が伸びていた。これがポイントで、先進国の経済成長というのは頭数ではなく、すなわち人口ではなく「1 人あたりの所得」の上昇で決まるところが大きい。人口減少はたしかにマイナスです。そのことは間違いではありません。しかし定量的、数字のうえでは、頭数で決まるところは比較的小さくて、むしろ 1 人あたりで決まるところのほうが大きい。だから、人口が減ってもプラス成長するということです。

ご紹介いただきました、2 年前に書きました本からこの図はとっています。本にもこの図を載せたのですが、読んでくれた私の悪友のなかに 2 人ほど同じ質問をしてくれた人がいます。なるほどおまえの言いたいことは分かった。でもこの図は微妙に 20 世紀の終わりで切れているよな、この時代はまだ横ばいとはいっても人口は増えていただろう。今後は人口が減り始める、減り始めたときにはどうなのか。こういう質問をしてくれた人がいました。これはなるほどもっともな質問だと私は思いました。

それで皆さんにお見せしたいのが、図表 6 です。少しごちゃごちゃした図ですが、上は見ないで下の棒グラフだけを見ていただくと、過去 20 年くらい、つまり 1996~2015 年までの数字なのですが、平均しますとこの間に金融危機もあり、リーマンショックが 08 年にあり、2011 年の東日本大震災もあり、いろいろなマイナスもありましたが、平均しますとプラス 0.8%日本経済は成長しました。

それを資本や労働の投入、その他 T F P とありますがこれは技術の進歩、最後に私が言いますイノベーションだとお考えいただければいいのですが、それぞれの貢献に分解する。そうしますと人口が減り始めていますから、確かに労

図表 6 過去 30 年の実績



働投入の貢献はすでにマイナス 0.3%で計上されてきています。つまり足を引っ張っています。先ほどからいっているとおり、人口減少そのものは経済成長にとってマイナスだということは間違いではなく、すでに現状でもマイナス 0.3%と計上されています。しかし資本というのは具体的には機械など、それから TFP というのは、先ほどお話ししたとおりこれこそが技術進歩、イノベーションですが、それらがプラスの貢献をしている。イノベーションがプラス 0.9%で、人口減少による労働投入マイナスの貢献にもかかわらず、結果プラス 0.8%の成長をしているということです。

要は人口減少というのはそれ自体としてはマイナスです、そこは間違いではありません。しかし先進国の経済成長というのは、「1人あたりの所得」を高めることです。では1人あたりの所得は何で高まるのかというと、結論的にはここでいう TFP、つまりはイノベーションなのです。広い意味での技術進歩なのです。

1つ目の子算をやりたいと思います。ここではリーマン等もあってプラス 0.8%にとどまっていますが、私は若干強気論者で、プラス 1.5%くらいの経済成長はできると考えています。後でプラス 1.5%が楽観的すぎるというので

あれば、少し数字を動かしてみます。分かりやすくまずはプラス 1.5%とおいてみます、日本の GDP の成長率です。

人口はマイナス 0.6%くらいで減っていきます。したがって実はプラス 1.4%でもいいのですが、とにかく GDP が仮にプラス 1.5%で増えていって人口がマイナス 0.5%で減っていきますと、1 人あたりの所得に直すと、1 人あたりですと人口で割り算するわけで分母のほうにいきますから、人口が減っていくということは 1 人あたりの所得でみればプラス材料となり、分子の GDP がプラス 1.5%、分母の人口がマイナス 0.5%で減っていくので、1 人あたりの所得はプラス 2%で増えていきます。プラス 2%で成長するものは、35 年で倍になります。これは算術です。ということは、今 30 歳の人の生涯所得は、今 65 歳の人の生涯所得の 2 倍になるということです。

私は先ほどプラス 1.5%で成長していく、それはあまりに楽観的ではないかと考える人もいるでしょう。プラス 1.2%ではどうなのか。これ位の数字になると、かなりの経済学者の考え方に近いかもしれません。その場合に、先ほど私が今 30 歳の人といったのを、今 20 歳の人の生涯所得は団塊世代の倍になると言い換えればよいのです。

いずれにしても今の若い人たちは、ややもすると団塊の世代より絶対的に貧しくなるのではないかというイメージを持っている人が多いようですが、私からするとそれはありえない。今の若い人たちの生涯所得は、間違いなく団塊世代の 2 倍にはなると思います。

閉塞感に満ちた日本の社会を考えるうえで、私が今言ったことは非常に重要なポイントです。私も若い学生に接する機会がたくさんあるわけですが、みんな納得した顔をしません。何をこの人は 1 人で楽観的なことを平気でいっているのかという、そういう感じなのですが、でもそれは若い人たちが生涯所得が 2 倍になるメカニズムを理解していないからです。彼らはすでに、今この部屋にも若い人たちがたくさんいますが、その生涯所得の高さの片鱗をすでに経験しています。

ここにいらっしゃる、私あるいは私より少し人生の先輩の方々、若い頃の喫茶店を思い出してください。それと今の若い人たちのスターバックス、その違いですよ。われわれの若い頃は日本ではスパゲッティといえばミートソースとナポリタンの 2 種類しかなかったのです。今の若い人たちはパスタと呼んで、

ありとあらゆるパスタをイタリアンといって食べていて、それを当たり前だと思っている。すでにそこに彼らの生涯所得の高さが出てきています。

もちろん私が語っているのは経済的な豊かさです。「真の豊かさ」や happiness ということになれば、もちろんそれは全く別の話です。お金を手にしてもそれが happiness にどれだけ結びつくか、それは保証の限りではありません。それは若い人たちが考えることだと私は思います。

しかしお金、狭い意味での経済的な価値ということに関して、今の 20 代の人たちの生涯所得が団塊世代の 2 倍にならないということはありません。

もう時間がありませんが、世界で人口が減っている国はたくさんあります。いろいろな国がありますが、注目したいのはドイツです。ご存知の方もいらっしゃるでしょうが、ドイツは日本と並ぶ超人口減少大国です。数年前、私はベルリンの会議に出席する機会があったのですが、ドイツでも人口減少は問題とされています。ただ、だからドイツ経済はだめという役人、経営者、学者、ドイツ人はいませんでした。30 人くらいいましたが、みんなどういう感じかという、みんな上を向いているのですよ。ドイツ経済は強い。なぜ強いのかと聞くと、私からみるときわめてまっとうな答が返ってきました。ドイツでは人口が減っていく、それは確かに問題だが、ドイツ経済を支えるのはイノベーションであり、ドイツのイノベーションの力は世界の先頭にあり、その潜在的な力も衰えていないと自分たちは考えている。これが答えでした。要するに、イノベーションこそが経済の切り札だということです。

どうもご静聴ありがとうございました。

本稿は私立大学研究ブランディング事業「持続可能な相互包摂型社会の実現に向けた世界的グローバル研究拠点の確立と推進」の成果の一部である。

(よしかわ・ひろし 立正大学経済学部教授・東京大学名誉教授)

社会保障と財政

—医療制度改革を中心に—

田 近 栄 治

1. はじめに

公的年金，医療，介護の給付が増大している。これらは，保険料を財源とする社会保険制度であるが，増大する給付に保険料収入が追いつかず，給付額と保険料収入の間を埋めるものとして公費が増大している。公費といってもその財源の裏付けがあるわけではなく，要するに税金や国・地方の借金（公債）のことである。その結果，日本の財政問題は，社会保障に政府がどのように関与するかがきわめて重要な問題の一つとなっている。

この論文はこうした日本の社会保障と厳しい財政状況を前にして，次の二つの課題について考えることを目的としている。まず第1の課題は，増大する社会保障支出が財政運営をどれほど厳しくしているかを示すことである。これを最近の財政資料を使ってできるだけわかりやすく示したい。第2の課題は，社会保障を運営するうえで公費への依存がどのようにして増大しているかを説明した上，医療保険に焦点を当てて，増大する公費負担にどのようにして立ち向かうかを考えることである。

増大する公費への対処方法の一つは，医療給付額を下げることによって，公費負担をコントロールすべきであるというものである。いわば総額抑制である。実際，こうした考え方に基づいて，わが国ではさまざまな医療制度改革が行われている。第2の対処方法は，国民健康保険，協会けんぽや組合健保などからなる医療保険者の機能強化を通じて公費をコントロールしようとするものである。具体的には，国が医療保険者に支払う公費はかかった費用に応じるのではなく予算制にして，それによって保険者が医療機関に対して診療の適正化・

効率化を求めるようにするものである。

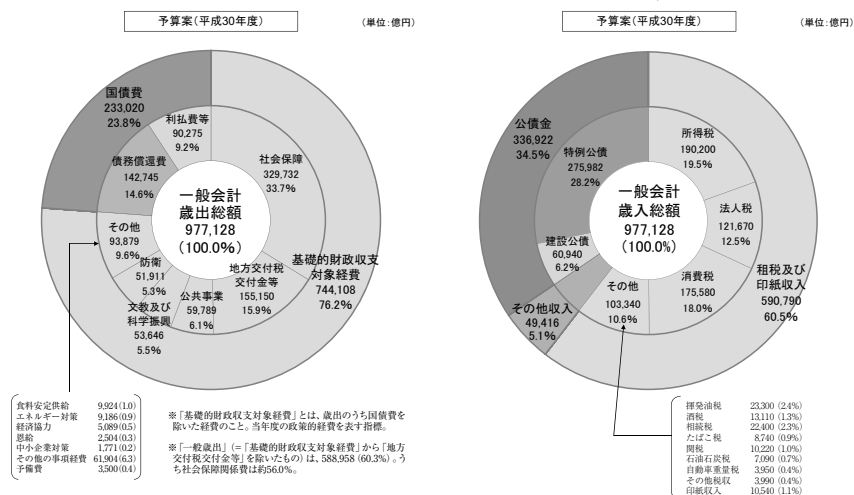
この仕組みでは、公費負担は事後的に決まった医療費ではなく、事前に取り決めた給付費を基に決定されることになり、より適切にコントロールすることが可能となる。もちろん、増大する公費に対する二つの対処方法は補完的であり、矛盾するものではないが、公費をかかった医療給付額をもとにした事後的精算から見積もり額に基づく事前的精算にすることで、医療に対する公費をより透明性のあるものとするができる。これはまた社会保障を源とする日本の厳しい財政をより予測可能なものとする。

以下第2節では、社会保障関係費が日本の財政の最大問題となっていることを示す。第3節では社会保障関係費、すなわち社会保障財源の一部を構成する公費が増大している様子を示し、その理由について考える。第4節と第5節では医療制度を取り上げて、保険制度における公費の仕組みとその適切な管理について考える。

2. 財政運営を困難としている社会保障関係費

ここでは、社会保障が日本の財政運営の最大の問題となっていることを示す。以下では、2018年度の国の予算をもとに社会保障関係費の現状を見ていくことにする。図1は国の一般会計の歳出と歳入を示したものである。

図1 国の一般会計歳出と歳入総額(2018年度)

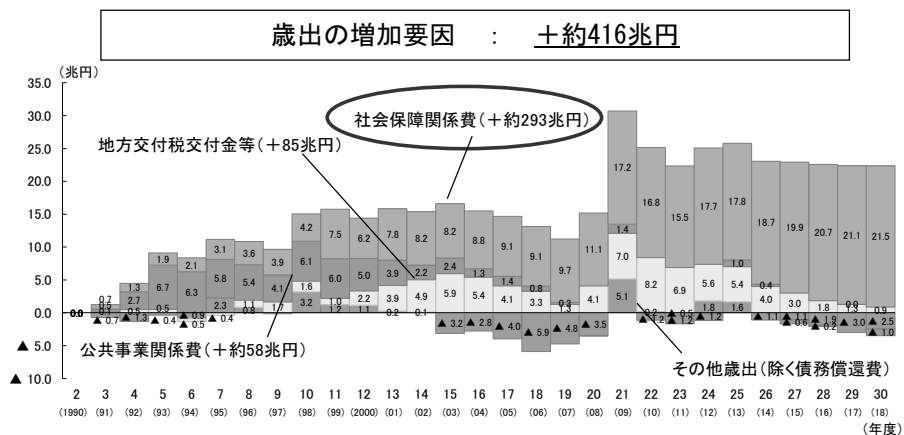


図に示されているように、2018年度の国の歳出と歳入総額は97.7兆円である。国民総生産額(GDP)は概ね530兆円なのでその18%程度となっている。歳出のなかの最も大きな項目は国債の償還や利払いである国債費であるが、これは資金のやり取りであり、国の活動を示すものではないので歳出総額から除くと、国の歳出額は74.4兆円である(基礎的財政収支対象経費)。さらにそのうち、地方交付税交付金等は国から都道府県や市町村への財源移転であるのでこの部分も除くと、国本来の歳出は58.8兆円となる。この歳出額のことを一般歳出と呼んでいる。

堅苦しい財政用語であるが、国の一般歳出とは要するに、国の仕事を反映した歳出額のことである。図1からまず気がつくのは、国の一般歳出の58.8兆円に対して社会保障関係費は32.9兆円、すなわち国の活動総経費の56%となっていることである。社会保障関係費とは公的年金、医療、介護や生活保護などに対する国の負担額であるが、それだけでの経費総額のほぼ60%にもなっている。国はその残りで教育、公共投資、防衛、経済協力、食の安定供給を行わなければならない。将来を見据えた戦略的な財政運営が困難な状況となっていると言ってよいであろう。

それだけではない。社会保障関係費がその他の予算を圧迫している。図2は、1990年度から2018年度にかけての国の歳出の増加要因を示したものである。バブル崩壊後の1990年代では景気浮揚を目的とした公共投資がさかに行われた。その後、公共事業の借金返済の財源として、また地方活性化を目的

図2 1990年度末から2018年度末にかけての歳出の増加要因



とした地方交付税交付金が増大する。しかし、最近になると歳出増加はほぼ全額社会保障関係費となっていることがわかる。1990 年度から現在に至るほぼ 30 年間にわたって、社会保障関係費と一時期の公共事業と地方自治体支援を除いて、その他の歳出に変化はないか、減少となっている。

こうした限られた財源のなかでの予算運用にあたっては、慣例に従った予算ではなく、将来を見据えた機動的な歳出改革が求められる。しかし、すでに指摘したように、増え続ける社会保障関係費が戦略的な財政運営を難しくしていることは否定できない。

以上、国の歳出のなかで、社会保障関係費がいかに大きな規模となっているかをみた。以下では、歳出を支える財源の観点から社会保障が非常に大きな負担となっていることを指摘する。子ども・子育て、医療、介護と年金の社会保障 4 経費の財源として消費税が充てられている。しかし、消費税だけでは必要な費用をまかないきれないこと明らかである。そこで、おおざっぱな計算であるが、2018 年度の予算をもとに国の社会保障関係費を国の基幹税源である所得税・法人税と消費税でまかなうという試算を行う。

所得税、法人税と消費税の収入はそれぞれ 19.2 兆円、12.1 兆円および 17.5 兆円である。その合計額から、地方交付税として定められた地方への配分額である 14.6 兆円を引くと、主要 3 税のうち国に残る額は 34.1 兆円である。これに対して、2018 年度の社会保障関係費は 32.9 兆円である。

したがって、国は所得税、法人税と消費税を全部社会保障関係費に充てても残るのはわずかに 1 兆円程度である。国のその他の税収はほぼ 10 兆円である。そして（借金を除く）税以外の収入 5 兆円を加えても、社会保障関係費以外に使える財源は 16 兆円程度である。

公共事業費、教育・科学振興費と防衛費だけでも 16 兆円を超えていることを考えると、社会保障関係費がいかに日本の財政運営を困難としているかがわかる。

上に述べたように予算の不断の見直しが必要なことは言うまでもない。しかし、活力ある社会、世界をリードする産業や科学技術、経済協力を通じる海外との密接な連携を強化するためには財政には余力が必要である。それに対して、増大した社会保障関係費が日本の機動的・戦略的な財政運営を困難としている現実を認識しておく必要がある。

3. 社会保障関係費はなぜ増大するのか

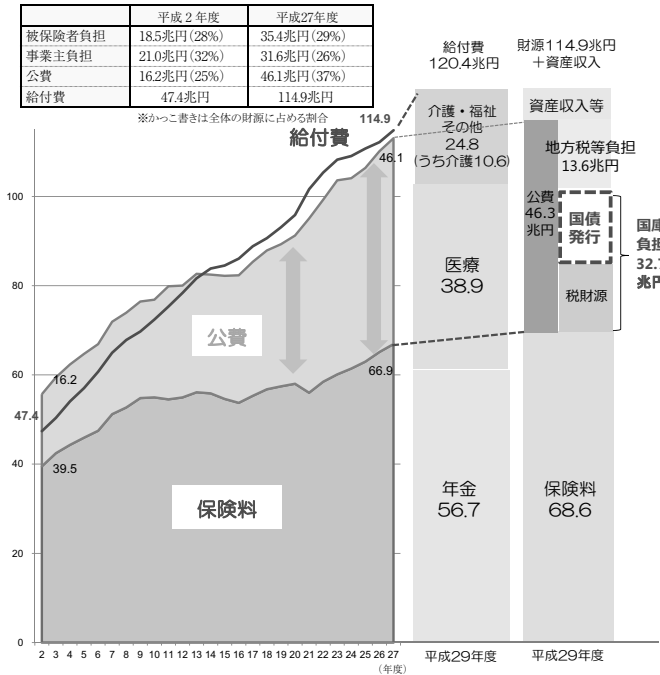
社会保障関係費が国の財政のもっとも大きな支出となっていることをみた。社会保障関係費は、社会保障に係る費用から個人の医療や介護の自己負担額を除いた「社会保障給付費」のなかの国（税金や国債）の負担した部分であり、公費負担とも呼ばれている¹⁾。公費は国と地方の負担からなるが、そのうち国の負担は国庫負担と呼ばれている。以下では、社会保障給付費の構成と推移について述べ、続いてその財源をみる。これによって、公費負担がどのようにして決定されるかみていくこととする。

図3は平成29年度（2017年度）の社会保障給付費の構成と財源、および平成2年度（1990年度）からの推移を示したものである。平成29年度の社会保障給付費の総額は120.4兆円であり、GDPの22%に達している。その構成は、国民年金や厚生年金など年金の給付額が56.7兆円、医療給付額が38.9兆円、介護保険給付額が10.6兆円である。これらは加入の義務付けられた社会保険であり、そのほか生活保護などの社会福祉費は税金によって14.2兆円給付されている。給付に占める割合をみると、年金、医療、介護の3つの社会保険の給付総額は106.2兆円で、全体のほぼ90%となっている。以下では、社会保障と国の財政な関りを主として社会保険を通じて考えていく。

社会保障給付費は平成2年度（1990年度）の47.4兆円から平成27年度（2015年度）の114.9兆円にまで大きく増加している。この間の毎年の伸び率は3.6%となっている。それを財源からみると、増大する給付費に保険料に追いついていない様子が明らかである。その結果社会保障給付費を賄う公費が増大している。図の左上の囲みに給付費に占める保険料（被保険者負担、事業主負担）と公費負担が示されているが、平成2年度から27年度の間、保険料の負担割合（被保険者負担、事業主負担の合計）は60%から55%に下がる一方、公費負担は25%から37%へと大きく増加している。

1) 社会保障給付費を支払いサイドからみれば、医療の場合、国民健康保険、協会けんぽや組合健保などの医療保険者から医療機関などへの支払額となる。これは医療に係った総費用から個人が負担した部分を除いた金額となる。保険者の財源は、保険者の収入である保険料と公費とからなっている。

図 3 社会保障給付費とその財源



(出所) 財務省、「日本の財政関係資料」、16 ページ、2018 年 3 月

これを平成 29 年度の社会保障の財源構成でみると、保険料 68.6 兆円に対して公費負担は 46.3 兆円にも達している。公費負担のうち国の分である、国庫負担は 32.7 兆円となっている。これが図 1 の国の予算に示された社会保障関係費となっているのである。数字の上からは社会保障給付額のうち保険料で足りなかった部分が公費負担となっている。

以上、日本の社会保障給付費の 90% は社会保険による給付（年金、医療や介護給付）となっていること、その額は毎年増加を続けていること、その中で保険料の伸びをはるかに超えて公費が増大していることが分かった。すでに前節で述べたようにこの公費（社会保険関係費）が日本の財政運営を困難にしている最も重要な原因となっている。

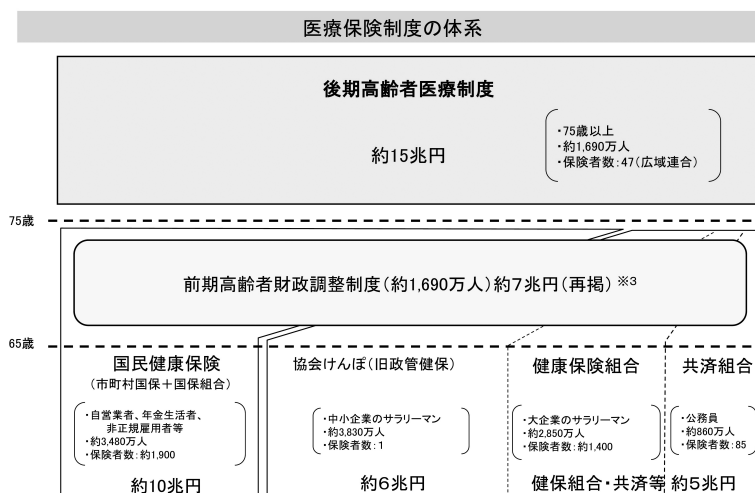
以下では、社会保障と財政の接点となる、社会保険における公費について議論を進める。日本の社会保険は年金、医療と介護などからなるが、論点をできるだけ明確にするために医療保険を中心として議論を進める。その中でも医療保険における公費のあり方を通じて、医療制度改革について論じることとした。

4. 医療保険における公費負担の仕組み

ここでは、まず日本の医療保険制度を概観する。続いて、各保険者が保険給付額をどのようにして支払っているか、すなわち、保険者の財源について述べる。以上を踏まえて、日本の医療保険における公費負担の仕組みと特徴を明らかにする。

図4は日本の医療保険の概要を示したものである。その特徴の一つは国民皆保険となっていて、国民は図に示された保険のいずれかに加入することが義務付けられていることである。保険者は（主として正規雇用からなる）被用者を対象とする協会けんぽ、健康保険組合および共済組合と被用者以外を対象とする国民健康保険とからなっている。日本の医療保険の第2の特徴は、年齢によって輪切りとなっていることである。すなわち、上に述べた保険の加入者の年齢は74歳までであり、75歳以上になると都道府県を単位とする後期高齢者医療制度に加入することになる。なお、多くの人は65歳から74歳の間は退職後の期間となり、国民健康保険に入るが、この間の医療給付額は被用者保険を含むすべての保険が負担することになっている（前期高齢者財政調整制度）。

図4 医療保険制度の概要



※1 加入者数・保険者数、金額は、平成29年度予算ベースのデータ。
 ※2 上記のほか、都道府県として退職者医療対象者約90万人がある。
 ※3 前期高齢者数(約1,690万人)の内訳は、国保約1,300万人、協会けんぽ約220万人、健保組合約90万人、共済組合約10万人。

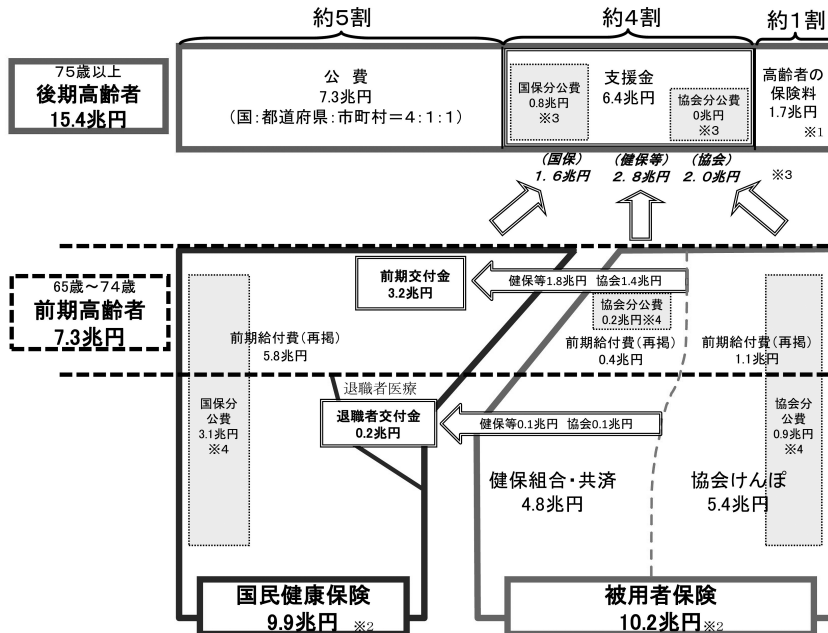
(出所) 厚生労働省、「我が国の医療保険について」、厚生労働省ホームページ。

医療保険の財源は図5に示されている。多くの情報を含んだ複雑な図となっているので、ここでの関心である公費に着目して、給付に占めるその割合について述べる。まず国民健康保険では、給付の50%が公費となっている。その内訳は国負担分が41%、都道府県負担分(調整交付金)が9%となっている。実際はこのほか保険料部分についても、保険者である市町村の負担軽減のためにさまざまな措置がなされている。被用者保険では、協会けんぽの給付額の16.4%に対して国庫負担がなされている。健康保険組合と共済に対しては、国庫負担はない。

なお前節で述べたように医療給付費は保険者から医療機関への支払額であり、かかった医療費ではない。医療費全体の負担としてはこのほか、個人の自己負担分があり、原則として70歳未満まではかかった医療費の3割、70歳から74歳までは2割、75歳以上は1割となっている²⁾。

財源からみてもっとも多くの措置がなされているのが、後期高齢者医療制度

図5 医療保険制度の財源構成(医療給費・平成29年度予算ベース)



※1 後期高齢者の保険料は、低所得者等に係る軽減分を考慮していない(保険料軽減措置や高額医療費の支援等の公費0.5兆円を含む)。
 ※2 国民健康保険(9.9兆円)及び被用者保険(10.2兆円)は、各制度の給付費を示しており、他制度への納付金や支援金を含まない。
 ※3 各医療保険者が負担する後期支援金及び当該支援金に係る公費は、後期支援金に係る前期財政調整を含む。
 ※4 国保分公費は、保険料軽減措置等に係る公費を除き、協会分公費は減額特例措置(▲321億円)を除く。

(出所) 厚生労働省、「我が国の医療保険について」、厚生労働省ホームページ。

2) 70歳以上でも現役並みの所得のある場合には自己負担の割合は30%となっている。

である³⁾。上に述べたように個人負担は原則 1 割であり、医療費から個人負担を除いた給付費が、後期高齢者医療制度から支払われる。その財源構成は図 5 の最上段の「後期高齢者」の行に示されている。給付額の 50% は国、都道府県と市町村からの公費で賄われている。残りの 50% のうち 40% は国民健康保険や被用者保険からの支援金であり、このうち国民健康保険からの支援金の 50%、および協会けんぽからの支援金の 16.4% は公費負担とされている。給付費の 10% は高齢者の保険料でまかなわれることになっているが、負担軽減のために公費が充てられている。

以上が日本の医療制度において国、都道府県や市町村から保険者に支払われる公費である。財政面から重要と思われる特徴をまとめると以下の通りである⁴⁾。

- ・国民健康保険と協会けんぽの給付額のそれぞれ 50% および 16.4% は公費負担である。
- ・後期高齢者医療制度では給付額の 50% は公費負担である。
- ・後期高齢者医療制度への国民健康保険と協会けんぽからの支援金のそれぞれ 50% と 16.4% は公費である。

このように日本の医療制度における公費は、国民健康保険、協会けんぽ、および後期高齢者医療制度の給付額の一定割合となっていることが特徴の一つである。そのほか国民健康保険や後期高齢者医療制度では、低所得者支援として被保険者（加入者）の所得に応じて保険料を軽減する措置があるが、日本の医療制度における公費負担の特徴は、特定の保険者に対して給付費の一定割合を直接支払うことである。

医療制度における公費の第 2 の特徴は、一人当たり医療費の増大する後期高齢者医療制度で手厚くなっていることである。年齢別一人当たり一年間にかかる医療費は、平均 23 万円であるのに対して、65 歳以上では 54 万円、75 歳

3) 後期高齢者医療制度の説明としては、厚生労働省、「後期高齢者医療制度について」がある。
<https://www.mhlw.go.jp/bunya/shakaihoshou/iryouseido01/info02d-35.html>

4) 医療保険の財源である保険料、公費負担の全体像としては、健康保険組合連合会 (2017) の「73 医療保険制度における財政移転」(158 - 159 ページ) が参考になる。

以上では 68 万円である⁵⁾。したがって、公費負担は高齢化によってさらに増大する仕組みとなっている。

第 3 節では増加する社会保険給付費に対して保険料が追い付かず公費が増大していることをみた。しかし、これはたんに保険料で足りない分が公費負担となったのではなく、公費自身が給付費の一定割合となっていて、さらに一人当たり医療費の高い後期高齢者医療制度の公費負担率がより高く設定されていることから生じている。

財務省の資料によれば、2005 年度から 2015 年度の間の国民医療費の推移のうち、公費が 36% (12.1 兆円から 16.5 兆円) 増大しているのに対して、保険料は 27% (16.2 兆円から 20.7 兆円)、個人負担は 9% (4.8 兆円から 5.2 兆円) 増加している⁶⁾。このように医療費が増加するなかで、その財源として公費が保険料や個人負担よりはるかに高い率で増大する仕組みとなっているのである。

以上みてきたように、わが国の医療制度における公費コントロールの難しさが増している。その困難さについて、国の予算などについて審議を行っている財務省、財政制度等審議会 (2018) は次のような指摘を行っている。「公費負担については、通常の国の政策は、施策の必要性、妥当性、費用対効果等を精査して編成された予算により歳出権が与えられ、その範囲内で執行される。しかしながら、医療・介護などの義務的経費は、患者等に実際にサービスが提供されて生じた給付費に応じて国庫負担が決まる。いかなる理由であれ給付費が増加すれば、それに応じて財政負担も自動的に増加する仕組みとなっており、予算の範囲内で執行額をおさめるという意味での財政規律が働く仕組みとはなっていない⁷⁾。」

財費用語が多くてわかりにくい表現となっているが、ここでの主張は、日本の医療を含む社会保障における公費は予算の範囲に収めることができないというものである。それはうえにみてきたように、「給付費に応じて国庫負担が決まる」ため給付費が増加すれば、それに応じて「財政負担も自動的に増加する仕組み」となっているからである。公費の予算を立てようにも、国は給付の一定割合を公費として支払うと約束しているため、そのコントロールはそのほか

5) 健康保険組合連合会 (2017), 年齢区分別 1 人当たり年間医療費, 16 ページ。

6) 財政制度等審議会・財政制度分科会, 「社会保障について」36 ページ, 2018 年 4 月 11 日。

7) 財務省, 財政制度等審議会 (2018), 17 ページ。

の予算と違って困難となるのである。

一方すでに、社会保障が日本の財政の最も重要な問題となっていることを指摘した。それでは医療における公費、すなわち医療に係る社会保障関係費をどのように見直していったらいいのであろうか。以下ではこの点について、取組の現状と改革の進め方について考えていくことにする。

5. 医療制度改革をどう進めるか

医療制度における公費をどのように管理していけばよいのであろうか。以下ではまず、医療給付費総額の圧縮を目指す政府の取組の現状について述べる。こうした取組みは、医療保険を柱の一つとする社会保障の持続可能性を高めるために当面必要な手段であろう。しかし、実際にかかった医療給付額の一定割合を国が負担するという仕組み自身を前提としたものである。また改革をリードするのは国である。これに対して、公費を「予算化」し、保険者が個人の代理人となって、医療機関や製薬会社などと交渉を行うことで、分権的に医療の質を高め、費用をコントロールすることを目指せないだろうか。

以上を念頭に置きつつ、医療に係る公費管理の現状から始める。前節で予算当局にとって、公費は「いかなる理由であれ給付費が増加すれば、それに応じて財政負担も自動的に増加する仕組みとなって」いることを指摘した。給付費の一定割合を公費で負担すると約束している以上、給付と財政負担は連動せざるをえないということである。これを前提として公費負担をコントロールするには、給付費自身を削減するしかない。そのためにはあらゆる手段を動員しなくてはならない。

実際、医療制度改革は現在こうした考え方に沿って進められている。図6は、医療・介護給付費を削減するための3つの視点である。視点1は、「制度の持続可能性を踏まえた保険給付範囲としていく（共助の対象は何か）」。視点2は、「必要な保険給付をできるだけ効率的に提供する（公定価格と提供体制）」。視点3は、「高齢化や人口減少の中でも持続可能な制度としていく（給付と負担のバランス）」である。そして、図7はこれらの視点を踏まえた具体的対応であり、図中◇はすでに政府の改革工程表に掲げられた項目であり、◆は新たな検討項目である。

各視点のねらいとそれを反映した改革項目の概要について述べる。視点 1 は医療保険の適用範囲（保険収載）を定めるべきという考え方で、保険適用にあたっては診療や医薬品の安全性・有効性に加えて、費用対効果も踏まえるべきだとしている。また、少額の外来医療や町の薬局で買えるような薬など、小さなリスクは自助で対応するべきとしている。視点 2 は医師・医療機関、製薬会社や調剤薬局への支払い価格となる診療報酬、薬価および調剤報酬の適正化を求めている。また、「医療提供体制の改革」として、都道府県が地域医療構想に沿って、高度急性期・急性期から回復期や在宅医療等に大幅な医療機能の転換を進めていくべきだとしている⁸⁾。

視点 3 は年齢ではなく、能力に応じた給付と負担のバランスを求めるもので、後期高齢者の自己負担の引上げ、介護保険サービスの利用者負担の引上げなどが具体的項目に掲げられている。また、高齢化と医療の高度化が進むなか、保険からの支払い（保険給付率）が増大し、支え手である現役世代の保険料負担が増している。それを抑えるために、患者自己負担の引上げなどによって、保険給付率を自動的に引き下げること新たな検討事項の一つとして掲げられている。

図 6 医療・介護制度改革の視点

<p>視点 1 制度の持続可能性を踏まえた保険給付範囲としていく（共助の対象は何か）</p> <p>① 「高度・高額な医療技術や医薬品への対応」 新たな医薬品・医療技術について、安全性・有効性に加えて経済性・費用対効果を踏まえて公的保険で対応する仕組みとしていくべき。</p> <p>② 「大きなリスクは共助、小さなリスクは自助」 少額の外来医療、OTC 類似薬の処方など、「小さなリスク」については、従前のように手厚い保険給付の対象とするのではなく、より自助で対応することすべき。</p>
<p>視点 2. 必要な保険給付をできるだけ効率的に提供する（公定価格と提供体制）</p> <p>① 「公定価格の適正化・包括化」 診療報酬本体、薬価など、保険償還の対象となるサービスの価格については、国民負担を考慮して、できる限り効率的に提供するよう、診療報酬・薬価の適正化等を進めるべき。</p> <p>② 「医療提供体制の改革」 これまで以上に限られた財源とマンパワーの中で、必要なサービスを過不足なく効率的に提供していくため、医療提供体制についての都道府県を中心とするコントロールの仕組みを整備・充実していくべき。</p>
<p>視点 3. 高齢化や人口減少の中でも持続可能な制度としていく（給付と負担のバランス）</p> <p>① 「年齢ではなく能力に応じた負担」 団塊の世代が後期高齢者となり始める2022年度までに、世代間の公平の観点も踏まえ、「後期高齢者の窓口負担の引上げ」などの改革を実施すべき。</p> <p>② 「支え手減少下での医療費増加に対しても制度の持続可能性を担保」 負担の先送りを解消していくとともに、支え手の負担能力を踏まえつつ、給付を見直していくことで、医療保険制度を持続可能なものとする道筋をつけるべき。</p>

(出所) 財政制度等審議会・財政制度分科会、「社会保障について②」3 ページ、2018 年 4 月 25 日。

8) 財政制度等審議会・財政制度分科会、「社会保障について」76 - 79 ページ、2018 年 4 月 11 日。

図7 視点を踏まえた具体的対応

視点1 制度の持続可能性を踏まえた保険給付範囲としていく（共助の対象は何か）			
高度・高額な医療技術や医薬品への対応		大きなリスクは共助、小さなリスクは自助	
◆ 保険収載の在り方	①	薬剤自己負担の引き上げ	③
費用対効果評価の活用	②	受診時定額負担の導入	④
		◆ ケアマネジメントの質の向上と利用者負担	⑤
		要支援者へのサービスの介護予防等事業への移行	⑥

視点2. 必要な保険給付をできるだけ効率的に提供する（公定価格と提供体制）			
公定価格の適正化・包括化		医療提供体制の改革	
◇ 急性期病床の適正化（診療報酬改定）	⑦	地域医療構想の推進	⑫
薬価制度の抜本改革	⑧	◆ 外来医療・高額医療機器の配置等へのコントロール	⑬
調剤報酬の改革	⑨	◇ 地域別診療報酬の活用	⑭
◇ 慢性期病床等の転換	⑩	保険者機能強化のためのインセンティブの活用	⑮
在宅と施設の公平性の確保	⑪	頻回のサービス利用へのチェックとサービスの標準化	⑯
		在宅サービスについての保険者等の関与の在り方	⑰
		◆ 介護事業所・施設の経営の効率化	⑱

視点3. 高齢化や人口減少の中でも持続可能な制度としていく（給付と負担のバランス）			
年齢ではなく能力に応じた負担		支え手減少下での医療費増加に対しても制度の持続可能性を担保	
後期高齢者の窓口負担	⑲	◆ 医療保険の給付率を自動的に調整する仕組みの導入	㉓
◆ 介護保険の利用者負担について	㉑		
金融資産等を考慮に入れた負担	㉒		
◆ 現役並み所得の判定方法	㉔		

◇は「経済・財政再生計画 改革工程表2017改定版」に掲げられた改革項目についてさらに検討を進めるもの、◆は新たな検討項目。それ以外は「改革工程表」にすでに記載されているもの。

（出所）財政制度等審議会・財政制度分科会、「社会保障について②」4 ページ、2018 年 4 月 25 日。

以上が、増加を続ける医療制度における公費に対する政府の取組みである。医療給付費の総額を抑制するためのあらゆる手段がここにあると言ってもいいであろう。日本の医療制度、そのなかでも公費の仕組みを前提とすれば、こうした政府主導のややもすれば計画経済的な改革を進めることは、現状においてはやむを得ないであろう。

しかし、日本と同じように医療制度を社会保険方式によって運営しているオランダやドイツでは、日本よりもっと個人の選択の範囲が広く、保険者のより自主的な判断と行動に委ねる仕組みとなっている。オランダを例にすれば、医療保険は国民皆保険であるが、保険者はすべて民間保険会社であり、日本のように個人がどの保険に入るかに関して、職種の制約も年齢による輪切りもない。また、個人は保険者を選択でき、またどの保険者を選択しても、保険者から加入を拒まれることはない。

政府は事後的に決定される各保険者の医療給費の一定割合を受身的に負担するのではなく、各保険者の医療費を事前に推計し、それに基づいて国民全体から集めた医療保険料を原資として、保険者の費用の一定割合を負担する仕組みとなっている。これによって、日本流に表現すれば、「公費」（政府から保険者への支払い）は完全に予算化されている。

各保険者の医療費の事前推計は、それぞれの保険者が抱える加入者の「リスク構造調整」により標準的な医療費を求めることによっているが、実際どのようにそうした調整を行うのか、また保険者が支払う医療費のうちどれだけをリスク調整に基づく事前払いとするのかなど、制度の実際の運用にあっては検討すべきことも多い。しかし、こうした点はすでに概ね合意が形成されているか、あるいは改善が進められ、保険者は医療というマーケットでその機能を発揮している。また、保険者競争とリスク構造調整に基づく、オランダやドイツの医療制度についてはすでに多くの解説もある（バン・クリーフ (2012)、松本 (2012)、田近・菊池 (2012a, b)、小塩・田近・府川 (2014) など）。これらの文献やオランダやドイツの経験を踏まえて、ここで主張したいことは以下のとおりである。

- ・医療機関などから保険者に請求される実際の（すなわち事後的）医療給付費に基づくのではなく、リスク構造調整によって事前に見積もられた給付費に基づいて公費負担を行うことは可能である。これは一朝一夕に実現できるわけではないとしても、公費の予算化を実現することができる。
- ・公費が事前に推計された医療費に基づいて支給されることになれば、各医療保険者は自ら集める保険料と支給される公費の範囲で保険事業を運営できるように経営の効率化を強化するであろう。
- ・一方、個人は保険者の選択をすることができるので、保険者は医療サービスの質に対しても責任を持たざるをえない。
- ・逆に日本のように医療費推計にあたりリスク構造調整がなく、保険者に事後的な給付費に基づいて公費が支給される場合には、保険者の経営の効率化に向けた努力が十分発揮されない可能性がある。その結果、保険者は医療機関などから請求される医療費のたんなる支払い機関となってしまう。換言すれば、保険者機能が失われる。
- ・保険者機能喪失と表裏一体に生じるのは、保険運営の助けとなる国からの補助金への期待の高まりであり、これが公費への依存を一層強めることになる。その結果、公費のコントロールが困難となり、社会保障制度の持続可能性が損なわれる可能性が高まる。
- ・日本の医療の特徴の一つである「出来高払い」も保険者がその経営により敏感であれば、保険者と医療機関との折衝を通じて、「包括払い化」が進むは

ずである。これはまた、医師や医療機関が受け取る診療報酬が国によって集権的に決定されるのではなく、保険者と医療機関の代表の交渉を通じて分権的に決定される可能性が高まることを意味する。

- ・現在日本が進めている、国のリードによる医療費総額の適正化も公費管理の一つの方法である。しかし、その過程で保険者が医療の質を高め、公費に依存しないで自主的に医療費を適正化する努力を促す仕組みを作ることが重要である。これが当面、日本において医療費の総額管理と並行して、保険者機能を強化する道であると思われる。

6. 終わりに

本稿は社会保障と財政をテーマとして二つの課題について論じた。第1の課題は増大する社会保障関係費、すなわち社会保障に対する公費負担が、国の財政運営をいかに困難にしているか、その現状を示すことである。第2の課題は社会保障に係る公費負担が増大を続ける理由を説明した上、増大する公費負担にどのようにして立ち向かうかについて論じることである。第2の課題では医療制度にポイントをおいて議論することによって、その改革の進め方を示した。

第1の課題については、いくつかの指標を通じて、社会保障関係費が国の財政運営を厳しくしていることを示した。その一つは、国の活動を反映した一般歳出の60%近くが社会保障支出に充てられ、その他の予算の機動的・戦略的な運用が難しくなっていることである。第2の指標は、1990年度以来、現在に至る歳出の推移である。一時期、公共投資や地方への財源移転である地方交付税交付金が増大したが、最近では増大したのは社会保障関係費だけあり、他の予算はカットされてきた。ここでも社会保障関係費によるその他の予算へのしわ寄せが、財政運営を困難にしていることを看守できる。

第3の指標は、社会保障関係費を税収の範囲で賄うことができるかである。直観的な指標であるが、国の基幹税源である所得税、法人税と消費税をすべて投じることによって、社会保障関係費がどれほど賄えるかをみた。本年度(2018年度)予算による結果は、基幹3税を社会保障関係費に全額を投入しても、残るのはわずか1兆円程度である。この1兆円とその他税収および税外

収入とで、社会保障関係費以外のすべての歳出をまかなうことは到底不可能であり、国の公債依存を止めることはできない。

第 2 の課題ではまず、社会保障給付費に対する公費負担は、たんに増大する給付費に対して、社会保険料の収入が不足しているため、その穴埋めとして公費負担が増大したのではないということを指摘した。医療制度に基づいてこの点を具体的に検討したが、ここでのポイントは、公費は保険給付費の一定割合となっていること、そして、給付に対する公費の割合は、1 人当たり医療費の高い後期高齢者医療制度でもっとも大きくなっていることある。その結果、高齢化の進行にともない、医療における公費負担は、給付額よりも高い率で増大する。

増大する公費にどう立ち向かうか。公費の仕組みを前提とする限り、医療給付費を削減するしか方法はない。実際、現在進められているわが国の医療制度改革は、医療給付費の総額抑制のためにあらゆる手段を辞さないというものである。すでにみえてきたように、社会保障給付費への国庫負担が、国の財政運営を困難としている最も重要な要因である以上、国主導の医療費総額抑制の道を避けることはできない。

しかし、この改革の問題点は、保険者の自主的な判断を通じて医療費の抑制を図る視点ないしメカニズムが欠けていることである。仕組みの詳細は関連文献などに譲ったが、各保険者の抱えた加入者のリスク調整を行うことによって標準的な医療費、すなわち医療費の事前推計が可能になる。それによって公費を事後的な医療費に基づくのではなく、予算化することが可能となる。またその結果、保険者の医療費効率化に向けた自助努力が促進されることや、そのほかの面でも保険者機能が強化されることを指摘した。改革に向けてこの考え方は、すでにオランダやドイツの医療保険で実施されているものであることも指摘した。

医療制度改革は一朝一夕に実現できるわけではない。当面、日本では医療給付総額を適正化することによって公費を節減し、財政への負荷をできるだけ取り除くことが必要である。しかし、本稿の主張は社会保険に基礎を置く医療制度改革としては、それだけで改革が完結するわけではなく、各保険者の自主的判断を強化すること、すなわち保険者機能をより高めることによって医療の質を高めつつ、効率化を進めるべきであるということである。そのための準備をし

つかりと進めるべきである。

参考文献

- 小塩隆士・田近栄治・府川哲夫 (2014), 「日本の社会保障政策—課題と改革」, 東京大学出版会
- 健康保険組合連合会編集 (2018), 「図表で見る医療保険 平成 29 年度版」, ぎょうせい。
- 財政制度等審議会 (2018), 「新たな財政健全化計画等に関する建議」
- 田近栄治・菊池潤 (2012a), 「医療保障制度における政府と民間保険の役割：理論フレームと各国の事例」, 『フィナンシャル・レビュー』, 第 111 号, 8-28 ページ
- 田近栄治・菊池潤 (2012b), 「日本の公的医療制度の課題と民間医療保険の可能性」, 『フィナンシャル・レビュー』, 第 111 号, 29-47 ページ
- バン・クリーフ (2012), 「オランダの医療制度における管理競争—前提条件と現在までの経験」, 『フィナンシャルレビュー』, 第 111 号, 74-89 ページ。
- 松本勝明 (2012), 「医療保険の公私関係 —ドイツにおける変化と今後の方向—」, 『フィナンシャルレビュー』, 第 111 号, 90-110 ページ。

本稿は私立大学研究ブランディング事業「持続可能な相互包摂型社会の実現に向けた世界的グローバル研究拠点の確立と推進」の成果の一部である。

(たちか・えいじ 成城大学経済学部特任教授, 一橋大学名誉教授)

ヒューマン・インテリジェンスと ビッグデータ型及び脳神経模倣型 AI： インテリジェンスとは何かを考える¹⁾

中 馬 宏 之

目次

1. はじめに
2. BD-AI と NM-AI の違いを検討する：機能特性という視点から
 - 2-1 BD-AI と NM-AI が想定するニューロンの違い：時空間概念の有無
 - 2-2 BD-AI の実用性 vs. NM-AI の低消費電力性
 - 2-3 NM-AI 実用化を阻むもう一つのボトルネック：大容量“連想メモリ”という難題
 - 2-4 長期的には、BD-AI に加えて NM-AI が必須：マクロの視点
3. BD-AI 及び NM-AI の“インテリジェンス”とは？
4. ヒューマン・インテリジェンス (HI) と BD-AI・NM-AI との違いを探る
5. 結びに代えて

1. はじめに

現行の AI (Artificial Intelligence) には、大きく 2 つのタイプがある。実用化に富み今をときめくビッグデータ型 AI (以下 BD-AI と呼ぶ) と明日の AI を担うとされるがなかなか実用化までに至っていない脳神経/ニューロン模倣型 AI (Neuromorphic AI: 以後 NM-AI と呼ぶ) である²⁾。そして、両者のニューロン模倣の程度には大きな差 (後述) があり、アーキテクチャー (設計思想) も根本的に

1) 本論は、成城大学経済研究所年報用論文として、中馬他 (2018) に大幅な加筆・訂正を加えたものである。

2) このような評価は、最近 Intel Labs 所長に就任した Rich Uhlig にも見られる (IEEE Spectrum 誌上における Ackerman (2018) との対談)

異なっている。なお、本論では、AI という言葉の定義上の混乱を避けるために、世界的に著名な AI 研究者／哲学者である Slowman (1995) に習って、広義に下記の“自己変化する情報駆動型制御システム”と見なしたい。

「AI は人間と動物のインテリジェンスを研究範囲としているので、AI というのは誤った名称だ。私は、それを洗練された自己変化する情報駆動型制御システム (sophisticated self-modifying information-driven control systems) に関する一般研究と理解している。そこには、生命体と人工物、実際のもの と可能性のあるもの (進化してきたに違いないものと造られたもの) とを含む。」(筆者訳)

ただし、BD-AI, NM-AI の両者が志すところは、共に脳機能の本質把握に基づく AI/ML (Machine Learning (機械学習)) の実用化であることに変わらない。実際、BD-AI, NM-AI 共に、McClulloch-Pitts 型ニューロンと呼ばれる人工ニューロンで名高い神経生理学者 Warren S. McCulloch (1889-1969) と Computational Neuroscience の先駆者 Walter Pitts (1923-1969)³⁾、神経回路の学習則 (ヘップ則) で名高い神経心理学者 Donald O. Hebb (1904-1985)、Computational Neuroscience の泰斗 David C. Marr (1945-1980) などを始祖としている。さらに、Hassabis 他 (2017) や Marblestone 他 (2106)、Schuman 他 (2017) の包括的な展望によると、時代を席卷している BD-AI でも、最先端分野では、NM-AI と同じく、大脳新皮質・海馬・視床などの基本動作原理に習ったものがまればではない。つまり、一部に両者の収束傾向すら見られる。

なお、上記の機械学習 (ML) とは、BD-AI 分野の標準的教科書 (Goodfellow 他 (2016)) によれば、「AI システムが、生データからパターンを抽出することで、自分自身の知識を獲得する能力」と定義されている。一方、同書には、集合関係“AI ⊃ ML”が図示してはあるが、肝心の AI システムの定義自体は示されていない。ただし、「我々は、機械学習が、複雑な実世界の環境下で動作する AI システムを構築可能にする唯一のアプローチだと考えている」というこ

3) 良く知られているように、そして驚くことに、von Neumann が現行コンピュータの原型である EDVAC を考案した際の基本アイデアは、McClulloch and Pitts (1943) に基づいていた (太田 (2017))。

となので、AI と ML とは、実質的には区別されていないと言える。

したがって、本論でも、インテリジェンスという言葉の多義性の弊害をできるだけ避けるために、AI と ML とをほぼ同義に扱う。また、さらなる定義上の混乱をさけるために、第 3 節でその正当性は詳述するが、標題で含意するインテリジェンスを“インテリジェンス”とカッコ書きにして

「実世界の変化と異常に対応していくために、自他の過去の記憶と現況に立ち向かう自らのアクション（行動）とを活用しながら、様々な活動の“起因の特定 (Credit Assignment)”と予測 (Prediction) を行う能力ならびにその自己変化能」

と、Slowman 流の生命体・人工物の双方に適用可能な定義を採用したい。なお、定義の中にアクションが含まれるのは、エナクティブ・アプローチ (Enactivism)⁴⁾ の考えに従い、インテリジェンスというものは、それ自体として存在意義をもつものではなく、生命体であれ人工物であれ、実世界の中で自らの行動によって生き抜くための手段であることを強調するためである (Noë (2009), Hohwy (2013), Engel 他 (2016))

さらに、起因の特定とは、Minsky (2006 の第 8 章 5 節) にならって、

「特定の出来事において選ばれた色々なアクション（活動）の中から良好・不良な最終結果に繋がったアクションを関連状況（コンテキスト）やそこに至った学習方法と共に記憶して、さらなる変化と異常への対応に備える作業」

と理解する。このような起因の特定作業は、自他の過去の記憶と現況に立ち向

4) 本論の視点からは、「認知能力とは、実世界モデルを作るのではなく、人々の感覚・運動スキルに埋め込まれているようなアクションを援助・促進するものである。」(Engel 他 (2016), 筆者訳) とする考え方をさしている。なお、伝統的な認知科学では、認知能力=実世界モデルを作り上げる能力と見なし、アクションとはそのような脳内に構築された実世界モデルに基づいて生みだされるものとしてきた (Engel 他 (2016))。ところが、そのような脳内モデルは、実世界の動きに受動的に対応するだけではなく、自らのアクションによって積極的に働きかけることによって頻繁に改訂・改良されていくものと思われる。

かう自らのアクション（行動）とによってしか実行できない。そして、起因の特定の抽象度や幅と深さが妥当であればあるほど、変化と異常に直面した際に、学習したことを新しい状況へ適用する転移学習 (Transfer Learning) を多彩かつ迅速にできるようになる⁵⁾。起因の特定能力が、学び方を学ぶ (メタ学習) 能力の基本であることによる。もちろん、そのような基本能力は、より一般的な (統計的) 因果関係の同定にも必須となる (Pearl (2018))⁶⁾。

このように、両タイプの AI は、“自己変化する情報駆動型制御システム”の実用化という基本目的では似通っており、しかも、一部に収束傾向さえも見られる。ただし、第 2 節で詳しく触れるが、脳神経模倣の度合いは両者で大幅に異なっている。例えば、BD-AI では非発火型 (Non-Spiking) 興奮性ニューロンだけにに基づく微分可能な非線形のニューロン間伝達関数 (ノ活動関数) を用いる。他方、NM-AI では実ニューロンにより近い発火型 (Spiking) の興奮性及び抑制性の二つのタイプのニューロンや両ニューロンに働きかけて微調整を行う調整性ニューロンに基づく非連続な非線形伝達関数を用いる⁷⁾。そして、直ちに理解できるように、発火型であるか否かは、前者の並列順次処理 (parallel serial processing) 特性から、時空間構造の表現のしやすさや情報伝達方向の有無 (有向グラフか否か) に本質的に関わってくる。

このような両者の違いは、素人的には一見僅かなように思える。ところが、次節で詳しく説明するように、非線形伝達関数が微分可能 (非発火型) であるかどうかや、興奮性ニューロンに加えて抑制性・調整性ニューロンが組み込まれているかどうか等々は、発揮される“インテリジェンス”の幅と深さにも非常

5) この点に関する次の Minsky (2006) の引用は、極めて示唆的である：「実際、起因の特定の優良さは、人々がインテリジェンスと呼ぶまるでスーツケースの中身のような種々雑多な特性の重要な側面となりうる。問題への解決策を単に記録するだけだと僅かに似た問題を解くことだけにしか助けにならないが、もしそのような解決策を我々がどのようにして見出したかを記録できれば、それによって、(起因の特定の仕方も学べるので) 我々はもっと広い種類の状況に対処できるようになる。」(Minsky (2007), 筆者訳、() 内は筆者追加)

6) なお、AI/ML の現状を知るという意味で興味深い事実であるが、先の標準的教科書 (Goodfellow 他 (2016)) では起因の特定は考慮外である。逆に言えば、実用的な AI/ML は、未だそのレベルに至っていない。

7) この特徴から、NM-AI は、Spiking Neural Network 型 AI (SNN-AI) とも呼ばれる。BD-AI の非発火型ニューロンネットワークは、SNN に対比する場合、Artificial Neural Network 型 AI (ANN-AI) と呼ばれる。

に大きな違いをもたらす。そして、それらの違いを深く知ることは、社会科学や人文科学にとっても、そもそもヒューマン・インテリジェンス (Human Intelligenc: HI) とは何か、HI は現行の BD-AI や NM-AI に組み込まれている“自己変化する情報駆動型制御システム”とどのように類似していたり相違していたりするの、などの現代的な課題を考えるための絶好の学習機会を与えてくれる。

本論の目的は、上記の視点に基づいて、今をときめく BD-AI と中長期的には AI の本丸として登場すると期待されている NM-AI の双方を取り上げ、そもそも BD-AI や NM-AI の“インテリジェンス”特性とはどのようなものであるのかを、HI と両タイプの AI との補完性・代替性に焦点を当てながら検討することである。

より具体的には、スーツケースの中身のような種々雑多な特性を持っているインテリジェンス⁸⁾という言葉を用いた非行動主義 /Neuroscience 的な視点から再整理・細分化することを試みる。そして、そのような試みに基づいて、HI の中核をなす“変化と異常への対応力” (小池他 (2001)) やその自己変化する能力に言及しながら、BD-AI/NM-AI 流の“インテリジェンス”と HI とがどのような包含関係や非包含関係にあるのかについて考察する。考察に際して特に留意するのは、柔軟で高速な視点切り替え装置としての情動 (Ornstein (1986), Franklin (1995), Minsky (2006), Rolls (2018)), 広範囲な協力を生み出すコミュニティ形成装置としての情動 (Minsky (2006), Damasio (2018), Rolls (2018)), 変化と異常に対応するための起因の特定／予測装置としての意識 (Llinas (2001), Friston (2010), Hohwy (2013), Feinberg 他 (2016), Tani (2017)) 等々といった視点である。

2. BD-AI と NM-AI の違いを検討する：機能特性という視点から

前述した人工ニューロン間の非線形伝達関数が微分可能であるかどうかや興奮性・抑制性ニューロン組み込みの有無などの緒特性は、BD-AI と NM-AI の“インテリジェンス”を規定する (何ができて何ができないのかという意味での) 機能特性に非常に大きな違いをもたらしている。この点をより直感的に理解する

8) この表現は、Minsky (2006) に倣っている。

ためには、BD-AI や NM-AI で想定されている人工ニューロンが、実ニューロンとどれほど異なっているかを理解することが早道だと思われる。また、そのことによって、BD-AI 型のみならず NM-AI 型“インテリジェンス”の限界も見えてくる。

2-1 BD-AI と NM-AI が想定するニューロンの違い：時空間概念の有無

下図の中央には、ヒトの場合にニューロン全体の 75% を占めると言われる興奮性錐体ニューロン (excitatory pyramidal cells) の概念図が示されている。この実ニューロンの上部や中央部には、他のニューロンからの刺激・イベント情報をシナプス⁹⁾ / スパイン¹⁰⁾ 経由で受け取る上下に横広がり樹状突起 (dendrite) がある。なお、ヒトの錐体ニューロンには、一つのニューロン当たり 5 千-2 万個の樹状突起がある。また、シナプスの数は、ヒトで 4 万個 / ニューロン、猿で 2 万個 / ニューロン、マウスで 8 千個 / ニューロン、ミツバチでも 1 千個 / ニューロン¹¹⁾ となっている (以上は、Rolls (2017) 参照)。

これらのシナプス / スパイン経由で樹状突起に集められた他のニューロンか

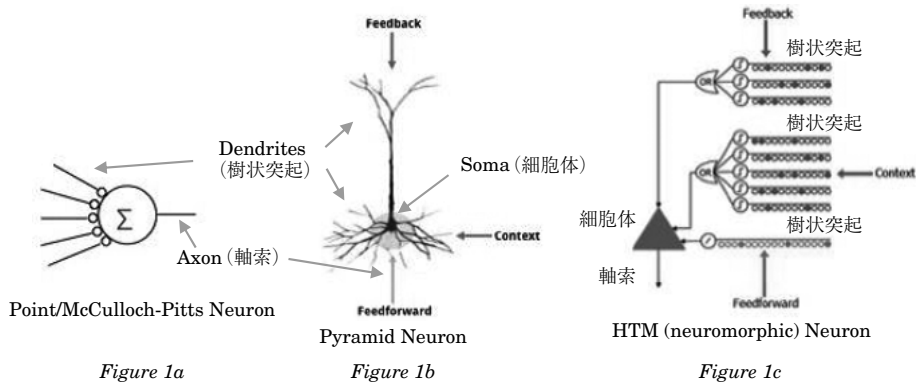


Figure 1a

Figure 1b

Figure 1c

Numenta (2017) より抜粋

9) ニューロンとニューロンとの接合部のこと。電気的な興奮・抑制情報がシナプス前部線維の末端までくると、そこからドーパミン、セロトニン、グルタミン酸、GABA などの各種の化学伝達物質が放出され、それらがシナプス後部膜の膜電位を変化させる。このようにして興奮・抑制情報がニューロンからニューロンに伝えられる。このように、ニューロン間が化学的に繋がって行く方式をシナプス伝達と呼ぶ。

10) 樹状突起には、既存のシナプス以外にもシナプスのな役割をするスパインと呼ばれる棘状の微細な突起が数多く存在する。

11) <https://galton.uchicago.edu/~nbrunel/teaching/fall2016/11-intro.pdf> 参照。

らの刺激・イベント情報は、中央部にある細胞体 (Soma) に集められる。細胞体は、集積された刺激・イベント情報の値がある閾値を超えると、その下方に伸びる軸索に活動電位 (Action Potential) の不連続的な放電・発火 (Discharge/Spiking) を起こす。

なお、実ニューロンには、興奮性錐体ニューロンの他に、シャンデリア細胞 (chandelier cell) とかバスケット細胞 (basket cell) などと呼ばれる抑制性 (inhibitory) ニューロンがある。さらに、両ニューロンを繋ぐ多数の介在ニューロン (Interneuron) や両ニューロンの微調整 (ファインチューニング) のみに関与する少数の調整性ニューロン (modulator neuron) が存在している (Rolls (2017), Luo(2016))。

微に入り細に入りの叙述で申し訳ないが、実ニューロンのネットワークシステムでは、このようなシナプス/スパイン型のコミュニケーションに加えて、ニューロン間・アストログリア¹²⁾間・ニューロン-アストログリア間のギャップ結合 (Gap Junction)¹³⁾と呼ばれるカルシウムイオンの波などを活用した直接接合による非シナプス型のコミュニケーションも積極的な役割を果たしている (Fields (2009), 工藤 (2011), Deutch 他 (2014))。また、細胞外にある局所的な電場・磁場を介した混線現象 (Crosstalk) に基づく直接接合をも包摂した Ephaptic Transmission (表面接触型伝達) と呼ばれる細胞間コミュニケーションの存在が知られている (Kandel 他 (2013: 第 6 版), Deutch 編 (2014))¹⁴⁾。

さらに、軸索の中の細胞骨格を形成している微小管 (Microtubule) を経由して新陳代謝のために必要な各種の細胞内小器官を順送・逆送する軸索輸送 (axonal transmission) といったコミュニケーション手段も存在する (Deutch 他

12) ニューロンとは大きく異なる脳・脊髄内のグリア細胞の一つ。脳・脊髄内のグリア細胞には、大きくは、アストログリア、マイクログリア、オリゴデンドログリアがある。ヒトの場合、脳・脊髄内には、ニューロンの約 6 倍のグリア細胞が存在する。しかも、各々のグリア細胞は、状況に応じて大きく機能や形態を変えていく。また、ミエリン鞘と呼ばれるニューロンを包んで絶縁特性を発揮するオリゴデンドログリアには、脳・脊髄外では同類のシュワン細胞がある。これらのグリア細胞は、最近になればなるほど、対ニューロンという意味でも、その重要性が大きく見直されてきている。以上は、主に Fields (2009), 工藤 (2011) を参照。

13) 例えば、アストログリアの場合、広汎な細胞間ネットワークがカルシウムイオン波を媒介として生成されている。しかも、このようなグリア細胞間ネットワークは、ニューロンネットワークとも密接に同期し合っている (Fields (2009), Kandel 他 (2013: 第 6 版))。

14) ニューロンやグリア細胞等々が渾然一体として存在する網状組織は、neuropil (ニューロピル) とも呼ばれる (Freeman (2001))。

(2014), Luo (2016))。しかも、微小管は、軸索のみならず樹状突起内部にも張り巡らされていて、樹状突起と他のニューロンを繋ぐシナプス／スパインの機能を裏方的に支えている。また、最近では、驚くべきことに、筑波の物質・材料研究機構 (NIMS) の研究グループによって、微小管自体がフラッシュメモリと同じような多ビットのメモリ・スイッチング機能を果たせることも示されている (Sahu 他 (2013))。つまり、ニューロン内の微小管自体が、タンパク質でできた SSD (Solid State Drive) のような役割をも果たすことができるというのである。

このように、実ニューロンのネットワークシステムの効率性や低消費電力性を支える仕組みは、実際には、ニューロン主体の BD-AI や NM-AI の枠組みをも遙かに超えた極めて複雑なものである。したがって、現在開発段階にある NM-AI も、今後の Neuroscience のさらなる発展によって、その設計思想自体が大きく変化していく可能性が高い。

話を BD-AI や NM-AI の伝達 (ノ活動) 関数に戻すと、 j 番目のニューロンの伝達関数とは、他の i 番目のニューロンからこのニューロンの樹状突起を経由して届く刺激・イベント情報の強さ (活動水準) を X_i 、 j 番目と i 番目のニューロン間のシナプス結合の強さを W_{ji} すると、数式的には下記のような非線形関数 F で簡略に表現されている (Rolls (2017) 参照)。

$$Y_j = F(W_{j1} \cdot X_1 + W_{j2} \cdot X_2 + \dots + W_{ji} \cdot X_i + \dots + W_{jn} \cdot X_n)$$

(Y_j は j 番目のニューロンの活動水準、 n は繋がっているニューロンの総数)

そして、BD-AI では、上記の F が、数式的に扱いやすい非発火型の微分可能関数である。他方、実ニューロンや NM-AI では、 F が、活動電位がある閾値を超したときにだけ $Y_j > 0$ となる発火型の非連続な関数となっている¹⁵⁾。

さらに、実ニューロンには、ヒトではニューロン全体の 20% を占めると言われる先の抑制性ニューロンがあり、興奮性ニューロンの暴走 (例えばてんかん症状など) を防ぎながら最適制御に関与している。つまり、実ニューロンシステムは、これらの興奮性・抑制性ニューロンの正負の相互作用、ならびに両者の微調整を司る調整性ニューロンによってシステムの安定性を自動的に高め

15) なお、非発火型のニューロンを採用する場合、少なくとも概念上は、同じく非発火型である前述のグリア細胞の機能の一部と識別が難しくなるようだ。

ている。

そして、その忠実な模倣ぶりにはやや驚きであるが、ほとんどの NM-AI には、実ニューロンと同じく、興奮性と抑制性ならびに調整性のニューロンが組み込まれている。例えば、IBM の TrueNorth, Intel の Loihi, ハイデルベルグ大学の BrainScaleS, マンチェスター大学の SpiNNaker, スタンフォード大学の NeuroGrid, ベンチャー企業 BrainChip Holdings の BrainChip といった代表的な NM-AI がそれに当たる。

ところが、BD-AI には興奮性のニューロンだけしか組み込まれていない。もちろん、当該ニューロンから負値を出力可能にすれば、便宜的ではあるが、抑制ニューロンの振る舞いをさせることはできる。したがって、BD-AI では、NM-AI に比べてニューロンの間が広範囲にわたって極めて密に配線されがちである¹⁶⁾。このような配線構造は、Dense Distributed Representation：“密な分散表現／表象：DDR¹⁷⁾”と呼ばれる。興奮性ニューロンだけしか存在しないと、一つのニューロンがある刺激・イベントに対して反応した場合、その周辺ニューロンの反応性も上昇させ、結果として互いが反応性を次々に高め合って広がっていく暴発型のポジティブフィードバックが産み出されるからである。そして、このことが、BD-AI の高電力消費量の一因ともなっている。

なお、BD-AI では、数式的な扱いやすさを保つために、ニューロンが階層別にグループ化されており、階層グループ間の配線は自由であるが、各グループ内でのニューロン間配線は許されない。しかも、そのニューロンネットワー

16) BD-AI にも、できるだけ過密配線避けようとの試みが少なくない。例えば、日本の LeapMind (<https://leapmind.io/>) や中国の Cambricon (<http://www.cambricon.com>) などのベンチャー企業の試みでは、消費電力量が一桁から二桁下げられるとしている。特に、後者は有名であり、Huawei のスマートフォンにも搭載されている。

17) 分散表現/表象とは、特定の記憶が特定の一つだけのニューロンに任せられるのではなく、刺激・イベントの到着によって同時に活性化し一群のニューロン集団によって記憶される様子をさしている。太田 (2017) は、この分散表現/表象を「複数のニューロン発火で一つの概念を表象するという考え方」、「同期した発火=表象」と明快に表現している。ただし、彼は分散表現/表象を一つの仮説に過ぎないと断言し、次のように続けている。「理論神経科学は、シナプス遅延時間は一定であるという仮定から、同期した発火を表象とみなしてきた。しかしながら、実験的にニューロンのシナプス遅延時間を計測してみると、脳の領域・細胞種によって多様であることがわかって来る。その場合、ある時刻における発火パターンを用いて一様にそれを表象と結び付けることは不適当であるといえる。そこで、空間的な発火パターンではなく、時間的なスケールが多様であることを前提とした発火の連鎖過程についての考察が必要である。」脳機能の奥深さが、垣間見えるようである。

クには実質的に向きがない（無向グラフ）ので、時系列情報を表現できない。このような制限を持つニューロンネットワークは、制限付きボルツマンマシンあるいは多重パーセプトロン (Perceptron) と呼ばれる (Goodfellow 他 (2016))。

他方、脳内ニューロンネットワーク及び NM-AI では、このような過密配線やポジティブフィードバック暴走ができるだけ起こらないようになっている。具体的には、周辺ニューロンの中で最大の出力を誇るニューロン群だけに学習・記憶機会が与えられ、それ以外のニューロンは主に抑制性ニューロンによって発火しないように抑えられる。つまり、多数の周辺ニューロン中の一つ、あるいは、その中のわずかな数のニューロンだけが発火して低消費電力性に貢献するように工夫されている (Luo (2016), Rolls (2017), Anderson (2017))。その結果、対応するニューロン間の配線は、とても疎くなっている。

このような配線構造は、先の“密な分散表現:DDR”に対比して Sparse Distributed Representation：“疎な分散表現:SDR”と呼ばれ、NM-AI の低消費電力性にも大きく貢献している¹⁸⁾。この SDR に関しては、後でも繰り返して触れる。

なお、NM-AI は、多重パーセプトロン型の BD-AI に比べて、ニューロン間の配線の自由度が極めて大きい。例えば、Intel 製 NM-AI である先の Loihi では、BD-AI とは異なり、ニューロン間の配線は、同一階層内でも階層間でも可能であり、さらに（自らの軸索が反回して自らの樹状突起に繋がる形の）自己再帰型の配線をも組み込むことができる (Davies (2018))。階層型にするか否かの決定も可能である。しかも、そのニューロンネットワークには向きがある（有向グラフ）ので、時空間情報の表現力も高い。このような自由度の高い配線構造が可能になると、BD-AI では到底実行できない多彩な連想が可能になる。特に、自己再帰型配線の場合、僅かな初期条件の違いによって異なった連想に

18) この点に関し、先の Intel Labs 所長の Uhlig は、「アルゴリズム的な視点からは、発火型ニューロンは、例えばワン・ショット学習（小サンプル学習）や意志決定を支えている時間軸に沿ったイベント（出来事）処理を行うニューラルネットワークの主要なアプローチである。実装化の視点で見ると、発火現象により、脳神経模倣型設計思想にとって、これらのアルゴリズムによってエネルギー効率上の大きな便益をもたらす高いスパース性（SDR 性）を活用できるようになる。これらの優位性は、製造現場や自動運転車、ロボットのようなエッジデバイス（ユーザーサイドで使用される機器）に大きな価値をもたらす。これらの応用製品では、リアルタイムでの処理や（データなどの）取込が必要なことによる。」(Ackerman (2018), 筆者訳、() 内は筆者追加) と述べていて興味深い。

たどり着けるので、創造性の源泉にもなり得る（甘利 (2008), (2016), Kandel 他 (2013), Rolls (2016))¹⁹⁾。

脳内神経ネットワーク及び NM-AI で SDR を可能にする上記の Winner-Take-All（勝者独り占め）型の巧妙な仕組みは、競合学習 (competitive learning) や側方抑制 (lateral inhibition) と呼ばれている。なお、生命体の脳の低消費電力性の達成には、進化論的にも SDR が必須であった。この点に関する Anderson (2007) の次のコメントは、BD-AI の限界を知る上でも誠に興味深い。

「(神経回路での) 配線は、場所を取るしエネルギーも使うし正確に配線することも難しいので、生物学的にはとても高価なものである。存在している様々な配線はとても高価なものだし、それらの連結パターンはキッチンとしたコントロールの下で行われなければならない。これらの問題は、大規模な脳モデルにとって厳しい制約を課す。したがって、(BD-AI が想定するような) 全てが全てに繋がっていると言うのは間違っている。現実にも、そうっていないからだ。」(筆者訳, () 内は筆者追加)

繰り返しになるが、上図の Figure 1a に示されているように、BD-AI で使用される人工ニューロンは、ポイント・ニューロン (Point Neuron, 別名“McClulloch-Pitts 型ニューロン”) と呼ばれる極めて単純な構造をした興奮性ニューロンであり、ニューロンとしてはこの 1 種類だけしか組み込まれていない。ポイント・ニューロンは、具体的には、細胞体に入力する単純で同一な多数の樹状突起と一本の軸索からなっている。単純という意味は、それが他のニューロンからの刺激・イベント情報を伝えるだけであるからである²⁰⁾。しかも、前述のように、

19) この点に関する以下の甘利 (2016) の指摘は、とても興味深い。「脳は記憶そのものを蓄えるのではない。これを思い出すための仕掛けを蓄え、ヒントから復元すべき情報を作り出す。だからときには間違えるし、思い出せないことも起きる。思い違いだってある。その代わり、脳は柔軟である。間違ったヒントや曖昧なヒントからでも答えが出せる。多数のパターンを重ね合わせてしまうから、全体が茫洋としていてどの記憶事項がどこにあるかはわからない。しかし、並列のダイナミックスで働く分散した記憶が実現できるというわけだ。」

20) Boden (2016) は、BD-AI 型のニューロンを“too neat, too simple, too few, and too dry”と特徴付けている。このなかの neat は数式的扱いやすさの優先, simple は単一ニューロンで全ての複雑な並列分散処理を実現, few はヒトの脳と比べてのニューロンの数の少なさ, dry は時間概念・共時性や樹状突起・神経伝達物質・シナプス電流・イオンの流れの生物物理特性を

数式的に扱いやすい非発火型にするために、非線形の伝達関数には計量経済学で多用される多項ロジット関数²¹⁾のような微分可能な関数が多用される。

このような単純なポイント・ニューロンと対比させるために、図右端の Figure 1c には、Numenta (2017) の HTM (Hierarchical Temporal Memory) と呼ばれる NM-AI ソフトウェア²²⁾に組み込まれている人工ニューロン事例が示されている。この人工ニューロンでは、実ニューロンに習って細胞体の遙か上に先端樹状突起 (Apical Dendrite)、周辺に基底樹状突起 (Basal Dendrite) が組み込まれている。また、実ニューロンでは、樹状突起の細胞体からの距離によって役割が異なってくるので、さらに、近接 (Proximal) か末梢か (Distal) かの区別がなされる。役割が異なる大きな理由は、シナプス結合する抑制性ニューロンや調整性ニューロンの質・量が異なっているからである (Luo (2016))。ただし、Numenta (2017) では、簡略化のために先端樹状突起では近接か末梢かの区別はないが、基底樹状突起には区別がある。

具体的には、Figure 1c の HTM では、樹状突起の中の先端樹状突起には他のニューロンからの刺激・イベント情報が入力するが、その基底樹状突起、特にその末梢部分には、実ニューロンに習って細胞体発火時に既存の学習・記憶結果としての様々なコンテキスト情報が周辺の色々な興奮・抑制・調節性ニューロン群から伝わるようになっていく。その結果、HTM の人工細胞体は、実ニューロンと同じく (図中では Feedforward と追記されている) 近接の基底樹状突起などの制御を主に受けて、発火、発火直前、発火前準備、非発火という 4 つの状態をとることができる (Numenta (2017), Deutch 他 (2014))。2 番目と 3 番目の状態が、既存学習・記憶に基づく先読みによる発火直・前の準備と考えられる。

このような先読みのための既存学習成果のコンテキスト回路化は、どのソースからの情報が重要であるかに関して内生的に示された (無意識ベースの) 価

無視していることを意味する。

21) 多項ロジット関数に関しては、<http://www.ier.hit-u.ac.jp/~kitamura/lecture/Hit/08Statsys8.pdf> などに分かりやすい説明がある。

22) NM-AI では、現行のコンピュータ上で利用可能なプログラミングを駆使した NM-AI ソフトウェアの研究開発グループと新奇な設計思想に基づく脳模倣型ハードウェアの研究開発グループとが分かれて存在している。ソフトウェアグループが、ノイマン/チューリング型コンピュータ用の高度に発展したソフトウェア資産を用いるためだと思われる。

値判断による回路化と見なすことができる。そして、このようなコンテキストの回路化が精密かつ多彩に達成できればできるほど、より多彩な幅と深さを持つ起因の特定が迅速にできるようになる。このことから、樹状突起の質と量が、“インテリジェンス”の高低を大きく規定するということが分かる。事実、Richard 他 (2018) によれば、高度な起因の特定機能の発現に際して、先端末梢部分に位置する樹状突起が、行動・知覚に関する予測誤差をニューロンレベルで局所的に修正する（繋ぎ直す）際に決定的な役割を果たすことができるという。

このように、実ニューロンの先読みの精度には、興奮・抑制・調節性ニューロン群からの情報を処理する樹状突起自体の質・量の豊富さが大きく関わっている (Numenta (2007), Deutch 他 (2014), Luo (2016), Rolls (2017), Richard 他 (2018))。さらに、このような豊富さの有無は、次に詳述するように、“インテリジェンス”特性に決定的な違いをもたらす時空間概念の有無にも大きく関わってくる。

事実、脳内や NM-AI の神経回路では、不連続的な伝達関数に特有の発火という形で、時空間パターンがニューロン間配線の強弱・広狭として刻まれていく。ところが、BD - AI の場合、特に DNN（深層ニューラルネットワーク）や CNN（畳み込みニューラルネットワーク）と呼ばれる代表的なモデルの場合、空間的な拡がりパターン化することはできるが、時間の流れ（時系列）をパターン化することができない。そもそも、BD-AI のニューロンネットワークには、扱いやすさを優先した向きがない（無向グラフ）構造が採用されているからである。さらに、前述のように、その単純な樹状突起特性により、先読み機能などが組み込まれていないことも大きく影響している。

加えて、前述のように BD-AI には抑制性や調整性のニューロンも組み込まれておらず、しかも、扱いやすい微分可能な伝達関数が想定されているので、実ニューロンや NM-AI に備わっている STDP (spike timing-dependent plasticity) と呼ばれるシナプスを起点としたシナプス前ニューロンとシナプス後ニューロンとの時間依存的で巧妙な相互作用を組み込むことができない。繰り返しになるが、STDP 機能は、前述した代表的な NM-AI には例外なく組み込まれている。ちなみに、STDP とは、次のように定義される実ニューロンの仕組みである。

「LTP（長期記憶増強）と LTD（長期記憶抑制）の興味深い時間依存性が次

のような形で観察されている。シナプス前（のニューロンの）発火がシナプス後の（ニューロンの）活性化より数ミリ秒先んじるときには LTP が起き、シナプス前発火がシナプス後活性化の数ミリ秒後に起こるとき LTD が起こる。この現象は、発火タイミング依存的柔軟性、STDP と呼ばれる。」(Rolls (2017), 筆者訳, () 内は筆者追加)

STDP が組み込まれていると、局所的な情報に依存するだけでニューロン間の空間構造に加えて時系列構造の様々なパターンを扱うことができる。しかも、このような時空間パターンが事前に学習・記憶されていれば、同じようなコンテキスト（状況）に出会った時に、前述の先読み制御をより高度なものにすることができる (Rolls (2017), Tavanai 他 (2019))。

実際、ヒト同士の日常会話一つをとってみても、時系列情報の効率的な処理による先読み（含む常識の活用など）が、相互のコミュニケーション効率を上げるために必須の仕組みとなっている (Minsky (2006))²³⁾。統計学的な規則的關係を帰納的に類推するのであれば、計量経済学者がそうしているように、時空間にわたって少なくとも千個あるいは一万個のサンプルが確保できれば、そのような関係を高い確率で同定できるようになるからである。

以上のように、NM-AI では、樹状突起の質と量の豊富さに加えて、発火型ニューロンの STDP 機能などが実現する時空間構造を組み込むことができるので、時系列構造が組み込まれていない BD-AI と比べると、時空間にまたがる起因の特定能力、したがって“インテリジェンス”の高さに大きな違いが生まれる。

ちなみに、BD-AI にも、極めて複雑な入れ子構造の導入が必須ではあるが、自然言語処理用などのモデルとして時間概念を取り入れた RNN (Recursive

23) 時系列情報を効率的に扱えることは、五感情報の中でも特に膨大な視覚情報処理の場合、さらに重要となる。例えば、ヒトの視覚には、驚きであるが、1秒あたり1ギガビットの画像情報が引切り無しに到着する (Olhausen 他 (2017))。これほどの膨大な情報量になると、各時点・時点で到着する空間情報を独立なもののみならず処理しては、前述のエネルギー節約的な“疎な分散表現：SDR”をもってしても、たちまちのうちに処理能力不足に陥ってしまう。したがって、到着する膨大な時空間情報からサンプリング（抽出）するデータ数を激減させる工夫が必須となる。そして、哺乳類のみならず節足動物である昆虫にとってさえ、時空間データの中に繰り返して現れる統計学的な相互依存・因果関係を利用することが極めてエネルギー節約的となる (Jayaraman 他 (2009), Lotto (2009) 参照)。

Neural Network), RNN 内に短期・長期記憶機能を組み込んだ LSTM (Long and Short Term Memory)型 RNN, LSTM に加えて RNN 外にも後述の高速な連想メモリ (Content-Addressable Memory: CAM)を持つ Neural Turing Machine などが考案されている²⁴⁾。ただし、以下で紹介するように、時系列処理用のメモリ総容量がキロビットあるいは高々メガビットと極めて限られているにも関わらず、その消費電力はより大きくなってしまふ。

2-2 BD-AI の実用性 vs. NM-AI の低消費電力性

以上のように、低消費電力性や組み込まれているニューロン諸機能の卓越性という意味では、起因の特定に必須の短期・長期にわたる時系列構造の組み込み易さをも含めて、NM-AI に遥かに大きな利点がある。ところが、実用化に富み今をときめいているのは紛れもなく BD-AI であり、明日の AI を担うとされる NM-AI は現時点では実用化からほど遠い段階にある。なぜだろうか？

その大きな理由の 1 つは、ビッグデータを使いこなして実用に耐える AI/ML 機能を実現するために必要な伝達関数の推定すべきパラメータ数が、関数型の単純さにもかかわらず、あまりに膨大なことによる。そして、NM-AI では、現段階では、最先端のコンピュータを利用しても、このようなビッグデータを、BD-AI のように実用的な時間内で処理できない。

推定すべきパラメータ数の膨大さを示すものとして、例えば、AI 実用化元年とも言われる 2012 年にカナダ・トロント大学の Hinton 教授グループがその卓越した実践性を発揮した AlexNet と呼ばれる BD-AI モデルの場合、伝達関数の推定すべきパラメータ数は実に 6200 万個を超えるものであった。また、SegNet と呼ばれる英国・ケンブリッジ大学の著名な BD-AI モデルでは、自動運転のみならず食肉処理ロボットなどにも応用されつつあるが、BD-AI 本来の DDR (密な分散表現) 特性からする 1 億 3400 万個のパラメータ推定が必要だという²⁵⁾。ただし、このような莫大な数のパラメータ推定は実用的でないた

24) これらの簡単な紹介は、Goodfellow 他 (2016) にある。

25) 各モデルのパラメータ数に関しては、下記を参照。

<https://jeremykarnowski.wordpress.com/2015/07/15/alexnet-visualization/>, <http://mi.eng.cam.ac.uk/projects/segnet/> 及び日経ロボティクス 2018 年 12 月号の「豚の食肉処理ロボットにディープラーニング技術：肉切るナイフの①をセグメンテーションで推定し個体差対応」。

め、様々な工夫によって配線経路が数多く間引かれている。それでも、1470 万個のパラメータ推定が必要だという。

これほどまでに莫大な数のパラメータ推定には、容易に想像できるように、推定の自由度を確保するためのビッグデータと推定処理のための超高速コンピュータの双方の利用が必須となる。しかも、推定の際には、ニューロン間での伝達関数が微分可能でないと、最急降下法 (Steepest Descent Method) や誤差逆伝播法²⁶⁾ (Back-Propagation Algorithm) などの汎用数値計算アルゴリズムが利用できないので、そもそも超高速コンピュータでも実用的な速度での計算ができない。

逆に言えば、BD-AI というイノベーションは、月並みな表現ではあるが、ビッグデータ・高速コンピュータ・(その原型は 1960 年代に開発済みの) 機械学習アルゴリズムの三拍子が揃った現代になって初めて産み出されたものなのである。ただし、Tavanaei 他 (2019), Wu 他 (2018), Severa (2018) によれば、NM-AI でも伝達関数が微分可能でないという弱点を克服するためのイノベーションが実際に産み出されつつある。

なお、BD-AI の分野では、このようなパラメータ推定を行うことを学習／訓練 (training) と呼ぶ。そして、学習／訓練には、高速なコンピュータでも一週間以上を要することは希ではない。一方、BD-AI 応用の山場である学習／訓練過程が終了すれば、一般ユーザーの PC やスマートフォン単体 (Edge: エッジと呼ばれる) でも、推定済み関数の活用 (Inference: 推論と呼ばれる) ができるようになる。その結果、BD-AI は、iPhone や Galaxy などのスマートフォンにみられるように、学習／訓練型 AI と推論型 AI とが分離された形で開発・実装されることが多くなってきている。上記の Tavanaei 他 (2019), Wu 他 (2018), Severa (2018) も、学習／訓練は BD-AI で行い、推論だけを NM-AI に任せる方式の提示が主である²⁷⁾。

26) インプットデータが、多段階の伝達関数で表現される深層神経ネットワーク (Deep Neural Network) を経て生成されるアウトプットデータと可能な限り同一になるように考案されたアルゴリズム。アイデア自体は、日米の研究者によって 1960 年代前半に開発されたと言われる。詳しくは、Goodfellow 他 (2016) を参照されたい。

27) もちろん、グーグル翻訳・音声認識エンジンや iPhone の Siri のような莫大な学習／訓練が必要な自然言語処理用プログラムの場合、推論段階でも依然としてインターネット経由で Google や Apple のサーバにアクセスする必要がある。いずれにせよ、このような状況であるため、我々が思い描く AI の特徴であるリアルタイム (即時) での学習／訓練・推論は、現行の BD-AI に関しても、夢のまた夢なのである。

では、ビッグデータの前では NM-AI の登場余地が全くなくなったのかというと、そうではない。実際、BD-AI に比べて現時点で大きな処理速度上のハンディキャップを持つ NM-AI であるが、多くの研究開発者達が実ニューロンのより忠実な模倣に拘っていることには十分な理由がある。その一つは、現行のノイマン／チューリング型と呼ばれるコンピュータの申し子である BD-AI に拘っていても、中長期的に地球規模での電力供給がとても追いつかなることがほぼ確実であることによる。その様子は、BD-AI 実用化に最大の貢献をしてきたノイマン／チューリング型コンピュータが必要とする莫大な消費電力に着目するとより直感的に理解できる。

例えば、世界の囲碁チャンピオンを次々になぎ倒して引退した Google の AlphaGo を支えているコンピュータ・システムを眺めてみよう。AlphaGo の仕組みを詳細に伝えている Nature 論文 (Silver 他 (2016)) では、そこで使われているノイマン／チューリング型コンピュータに関して下記のような記述がなされている。

「AlphaGo の最終版では、40 の検索スレッドと 48 個の CPU 及び 8 個の GPU を (持つマシン) 使った。また、我々は、40 の検索スレッドと 1202 個の CPU 及び 176 個の GPU で特徴づけられる複数マシンに分散して動作する AlphaGo の分散版も実装した。」(筆者訳)

そして、おそらくこの“1202 CPUs and 176 GPUs”というスペックに基づいたと思われる 2017 年 7 月 27 日の日経新聞記事は、「人間の脳の消費エネルギーは思考時で 21 ワット。一方のアルファ碁の消費電力は 25 万ワットとされてきた。約 1 万 2 千人分だ。」と強調している。実際、1CPU 当たりの最大消費電力を 145 ワット²⁸⁾、1GPU 当たりの最大消費電力を 300 ワット (／毎時)²⁹⁾ とすると、これだけで 23 万ワットなる。したがって、システムメモリ³⁰⁾ や

28) Intel Xeon ES-2600 V4 の値。https://ark.intel.com/ja/products/91755/Intel-Xeon-Processor-E5-2697-v4-45M-Cache-2_30-GHz 参照。

29) Nvidia Tesla P100 の値。<http://images.nvidia.com/content/tesla/pdf/nvidia-tesla-p100-datasheet.pdf> 参照。

30) 「オペレーションシステム (OS) が使用するコンピュータ・システム内の記憶領域。OS の中核部分であるカーネルやデバイス管理情報、管理するウィンドウなどのインターフェース情

HDD/SSD などの周辺機器なども勘案すると 25 万ワットは順当な推定値だと見なせる。

また、全米の人気クイズ番組 Jeopardy で用いられる様々なクイズ形式の難問にも迅速な高正答率を誇った IBM Watson は、同じ BD-AI でも囲碁という用途に特化した AlphaGo とは大きく異なる極めて実用的な仕組みを持っている (Hurwitz (2015), Anderson (2017) など)。中でも Watson をユニークにしているのが、IBM 独自開発の自然言語処理技術が組み込まれた DeepQA : “a massively parallel hypothesis generation and evaluation task” (超並列仮説形成・評価作業) ソフトウェアである³¹⁾。

ただし、Watson の消費電力が、これまたすごい。実際、IBM Research の資料によれば、Jeopardy で使用された 2011 年当時の Watson の中核は、90 台からなる IBM Power 750 サーバ群であり、16 テラバイトの DRAM (Dynamic Random Access Memory), 4 テラバイトのディスク, 2880 個の Power 7 コア (Power-CPU 360 個相当), 80 テラフロップス (1 秒間に 80 兆回の演算可能) を誇るコンピュータであると記されているからである。同資料に Watson の当時の使用電力量は見つけられなかったが、Forbes の記事では 20 万ワットとされているので、上記の AlphaGo とほぼ同じである。

他方、前述した IBM の TrueNorth, Intel の Loihi, ハイデルベルグ大学の BrainScaleS, マンチェスター大学の SpinNaker, スタンフォード大学の NeuroGrid, ベンチャー企業 BrainChip Holdings BrainChip といった代表的な NM-AI の電力消費量は、開発段階にあるものの、いずれもノイマン/チューリング型の少なくとも 1/1000 ほどになっている。この値は、NM-AI の演算速度を実ニューロンに合わせたり、アナログ回路を多用したりすると、さらに 1-2桁下がってくる (堀尾 (2017) など)。例えば、上記の BrainScaleS や NeuroGrid

報などが書き込まれる。」 (<https://kotobank.jp/word/system%20memory-1689353>)

31) NM-AI の世界的な研究者として名高い Anderson (2017) は、Watson を AlphaGo とは大きく異なる Brain-like なものだとして次のような興味深いコメントをしている。「ワトソンのソフトウェアには、数多くの“先端”ソフトウェア、巨大な初期データセット、超並列計算、作業依存的な確率推定、連想学習、信頼推定・相関推定、そして開発者達が” (Know-How 的な) 浅い知識と (連想や推定などが必須の洗練された専門的な) 深い知識との統合“とよぶものが使われている。初期の AI を特徴づける合理的分析は、ほんの僅かな役割しかない。…脳のようなコンピュータからは遥かに遠いものだが、方向はそちらに向いている。」 (筆者訳、() 内は筆者追加)

では、アナログ回路が多用されている。最近では、このアナログ化への試みが、IBM のような大企業³²⁾、Mythic (<https://www.mythic-ai.com/>)、Syntiant (<http://www.syntiant.com>) などのベンチャー企業によっても精力的に行われてきている。

ちなみに、人間の脳は、20 ワット前後で動いていると言われるが、一般的な生命体の脳では、現行コンピュータよりも 10^{-10} 乗程度の低消費電力性を誇るといふ (Rhine (2018))。この点に関しては、アフリカ生まれの鬼才 Kwabena Boahen@Stanford 大学が率いる先の NeuroGrid 研究開発グループ (Benjamin 他 (2014)) の指摘する下記の事実がとても興味深い。

「パーソナルコンピュータは、マウス規模の脳モデル (= 250 万個のニューロン) をシミュレートする際に、4 万倍 (400 ワット対 10 ミリワット) もの大きな電力を必要とするにもかかわらず、実際のマウスの脳よりも 9 千倍遅い。(欧州の) Human Brain プロジェクトのゴールである人間規模の脳モデル (= 200 億個のニューロン) をシミュレートする際には、エクサスケール (1 秒間に 100 京 (京 = 1 万兆) 回の演算能力) のスーパーコンピュータと (それを動かすための) 40 万世帯分に匹敵する電力消費量 (= 5 億ワット) とが必要になると予想されている。そのため、大規模なニューロンモデルの潜在力は、ほとんど利用できていない。」(筆者訳)

では、なぜ BD-AI では消費電力効率が NM-AI に比べて極端に悪いのだろうか？それは、BD-AI を支えているノイマン／チューリング型コンピュータには、良く知られた“フォンノイマン・ボトルネック (VNB)”が大きく立ちはだかっているからである。また、上記の Boahen らが教えてくれているように、VNB が不可避な BD-AI では、前述した非発火型の単純なニューロンに依存せざるを得ない。

現行のコンピュータでは、ソフトウェアプログラムによって命令 (Instruction) ・データがメモリからプロセッサに呼び出されて (= fetch) 演算処理が実行され、その結果が再度メモリに戻されるというパターンが限りなく繰り返される (Stokes (2010))。しかも、実行される命令のひとつ一つは極めて単

32) <https://www.techspot.com/news/77687-ibm-announces-8-bit-analog-chip-projected-phase.html>

純なものなので、プロセッサの速度やプログラムの複雑性が増せば増すほど、プロセッサ・メモリ間のやり取りが極端に増加する。そして、高速化傾向の著しいプロセッサの動作速度に比べて、現行の各種メモリの動作速度は技術的な限界からなかなか上げられない。その結果、高速なプロセッサであればあるほど VNB が深刻になり、消費電力の大部分がプロセッサ・メモリ間のやり取りに消費されてしまう（以上は、Hennessy 他 (2016) 参照）。

他方、NM-AI を支える実ニューロンにより近い発火型の非線形伝達関数を持つ人工ニューロンは、プロセッサとメモリの融合・同居型アーキテクチャを前提としているので、そもそも VNB が発生しない。その理由を、松本他 (2003) は、次のように説明している。

「フォン・ノイマン型デジタル・コンピュータではメモリの 1 番地の内容からプロセスし計算を実行する。従って、ここでのメモリの役割はデータ（プログラムもデータと見做される）の一時格納であり、プロセッサを可変にする為の補助装置である。これに対し、脳はメモリベース・アーキテクチャ（メモリ主体型方式）である。脳は、脳が獲得したアルゴリズムを神経回路の構造やその活動などの変化として学習によって固定化し記憶するので、脳のアルゴリズムは一種のルックアップ・テーブル（計算処理を配列の参照処理で置き換えて効率化を図るために作られた連想配列³³⁾）に貯えられたメモリとして存在する、と考えることができる。脳への入力情報は、このルックアップ・テーブルからどの答えを引きだすかの検索情報として用いられる。脳が答えを引きだす（出力する）と、引きだした答のアルゴリズムは、出力依存性学習によって、自動的に書き変わる。」（松本他 (2003), 230 頁, () 内は筆者追加）

なお、ニューロンはプロセッサとメモリの融合・同居型と表現されると相当に複雑なように感じられるが、計算的には、掛け算と足し算が行われている程度である (Rolls (2017))。より具体的には、ヒトの脳内では、各々のニューロン／ニューロン集団に脳内外から引切り無しに到着する新しい刺激・イベント

33) <https://it-words.jp/w/E383ABE38383E382AFE382A2E38383E38397E38386E383BCE38396E383AB.html>

が、ニューロンひとつ一つを構成要素とする 1 万を遙かに超える高次元ベクトル（先の SDR）の形で次々に刻み込まれていく（分散表現されていく）。しかも、この高次元 SDR では、先の Winner-Take-All 型の仕組みなどによって、成分のほとんどの値が 0 になっている。つまり、先の高次元な疎分散表現（高次元 SDR）となっている。

さらに、新たに到着した高次元 SDR として表現される新情報が記憶されるに足るかどうかは、既に松本の言うルックアップ・テーブルに蓄えられている多くの高次元 SDR とのベクトル内積計算を実行する形で判断される。そして、両者の内積値がほとんど 0 であればほぼ同一、それが大きな値をとれば新奇と判断される。しかも、このような類似性・新奇性判断が、様々なニューロン群内で並列に実行される。そして、新奇なものであればあるほど、海馬³⁴⁾などのルックアップ・テーブルに新たに記憶される部分が多くなる³⁵⁾。ベクトル内積とは、高校数学で登場したベクトルの同じ成分同士を掛け合わせて合計する操作である³⁶⁾。

34) 正確には、海馬内の自己再帰型配線で大局的に繋がっている CA3 という領域に蓄えられている。また、連想は、より広くは、海馬をも含んだ内部側頭葉記憶システムに代表されるように、大脳新皮質（その自己再帰的な記憶領域は、6 層からなる新皮質中の第 2 層と第 3 層）の各所とも繋がっている。以上は、Kandel 他 (2013)、Rolls (2016) を参照。

35) 以上のような高次元 SDR の構造上の特性から、各刺激・イベントに反応した SDR 同士を足しあわせれば、それらの刺激の意味のある和集合も定義できる。例えば、刺激・イベント情報 A, B, C に対応する SDR A, SDR B, SDR C を足しあわせてできた SDR H は、三者を重ね合わせた刺激に対応する SDR になる。甘利 (2008) や (2016) によると、脳内のルックアップ・テーブルでは、情報節約のために、このような重ね合わせ（圧縮）情報/“多重分散記憶”だけが保存・活用される。そして、新たな刺激・イベントが到着して特定ニューロン間の結合ベクトルが形成されると、この新規パターンと上記の情報圧縮された記憶済みパターンとの類似性・新奇性判断が行われる。素人目には、上記のような情報圧縮が行われてしまうと実行される類似性・新奇性判断に混乱が起きそうであるが、そのような混乱を避ける巧妙なエネルギー節約的な仕組みも脳内には備わっている（甘利 (2008) や (2016)）。具体的には、先の高次元 SDR ベクトルの次元が高ければ高いほど、重ね合わせパターンを構成している各々のパターンが互いにはほぼ直交してくることによる（Kanerva (1988)）。確かに、このような直交性があれば、新規の高次元 SDR と情報圧縮された既存の高次元 SDR との内積を取れば、重ね合わされた多くのパターンの中の似通ったパターン以外のパターン・ベクトルとの間の内積値がゼロとなる。その結果、情報圧縮されたパターンと比較した新奇度がすぐに分かるので、類似性・新奇性判断を高速実行できる（甘利 (2008) や (2016)）。進化は、なんというエネルギー節約型の仕組みを生み出したのだろうか。

36) 以上は、Rolls (2007)。

また、五感情報を受容する感覚器とそれらを末梢神経で受けて中枢神経を経由して最終的に脳内のニューロン群に到着した時にどれほどまで高次元 SDR 化されているのか、脳内ニューロン階層間ではどのような高次元 SDR が上下の階層でやり取りされて抽象度が上昇・下落して行くのか、等々については、門外漢のため、現段階では十分に調べ切れていない (Olshausen (2004) などは参照)。特に、ネットワークのネットワーク (networks of networks)、そのまたネットワーク…といった形で各種の刺激・イベントが統合 (トップダウンで下がってくれば分割) されて行く仕組みは、結び付け問題 (binding problems) と呼ばれ、neuroscience 的にも試行錯誤的な形でしか解明が進んでいないという (Anderson (2017), Rolls (2017))。なお、多くの NM-AI には、先の類似性・新奇性判断機構に加えて、程度の差はあるが、上記のような結び付けの仕組みも組み込まれている (Eliasmith (2013), Rinkus 他 (2016) などに例示)。

以上では触れなかったが、現行の NM-AI によって電力消費量が格段に低下するもう一つの大きな理由は、TrueNorth を含む NM-AI の場合、刺激・イベントが到着した場合だけにチップが駆動する形 (Event-Driven / イベント駆動型) であること、そのために半導体回路が非同期回路となっていること、の 2 つである。ヒトを含む生命体は非同期で動いているが、現在主流のノイマン / チューリング型コンピュータは、ほぼ全てが同期回路、つまり、回路全体に同一のクロックを行き渡らせる形で各回路ブロック間の同期を取る形の回路を用いている。このようなことから、同期回路の消費電力は、通常の動作状況では、非同期回路に比べて格段に大きい³⁷⁾。

37) 太田 (2017) によれば、この同期回路方式こそ、von Neumann (1945) が、McCulloch and Pitts (1943) にヒントを得て EDVAC に組み込んだ重要なメカニズムだという。この辺りは極めて深遠なので、ちょっと長くなって申し訳ないが、太田 (2017) からの次のような引用を提示しておきたい。「一つのニューロンにおける論理演算 (加算演算) は、複数のニューロンが同期して発火することによってもたらされる同期したシナプス入力によって行われる。論理演算を終えたニューロンは、再び他のニューロンと同期的に発火して次の回路へと同期したシナプス入力が渡される。この同期的発火の連鎖の成立は、すべてのニューロンの入力においてシナプス遅延時間が一定であるという仮定に依存している。この仮定に注目して、現代のコンピュータの理論的基盤を作り、マカロック・ピッツの業績を世に広めたのがフォン・ノイマンである。フォン・ノイマンは、真空管素子をニューロンに、素子間の二値パルス信号の伝達をシナプス伝達とみなした。マカロック・ピッツに倣って、パルス信号の遅延時間はマイクロ秒オーダーで一定に制御された。これによって複数ラインのビット信号が同期化し、数と命令が表象された。この同期的表象の元で、メモリから読み込まれた命令によって

加えて、現行 NM-AI 自体にも、さらなる低消費電力化を達成するための工夫が導入されつつある。例えば、TrueNorth を含めた前述の多くの NM-AI のニューロンには、高速だが消費電力と設置面積が共に大きな SRAM (Static Random Access Memory) が使われている。SRAM は電気が供給されないとメモリが消えてしまう揮発性メモリ (volatile memory) であるが、不揮発性で SRAM に比肩する速度を誇り設置面積もより小さな ReRAM (抵抗変化型ランダムアクセスメモリ) や MRAM (磁気抵抗メモリ) などが活用できるようになると、消費電力量をさらに下げることができる³⁸⁾。

2-3 NM-AI 実用化を阻むもう一つのボトルネック：大容量“連想メモリ”という難題

NM-AI の BD-AI に対する卓越性は、前節で言及したように、桁違いの低消費電力性だけに留まらない。起因の特定に必須の短期・長期にわたる時系列構造の組み込み易さ、それらを活用したヒト・レベルに近づき超えて行けるほどの“インテリジェンス”実現にも繋がっていく。そして、先の Tavanaei 他 (2019) などに示唆されている発火型の非線形伝達関数に基づいたビッグデータ処理というイノベーションが実現すれば、ヒトをも越える“インテリジェンス”を誇る NM-AI 実用化の時代が間近にやってくるような期待を抱いてしまう。

実際、前節でも、BD-AI に比べて質・量共に豊富な樹状突起を持つ発火型の NM-AI であれば、高い先読み精度などによって BD-AI をはるかに上回る“インテリジェンス”を組み込める可能性について言及した。事実、ヒト並の起因の特定能力が実用的なレベルで獲得できれば、各ニューロンには、頻繁に到着する刺激・イベント情報の関連ニューロンへの伝達機能だけではなく、短期・局所的のみならず長期・大局的な記憶機能と学習プロセス自体を俯瞰しながらの学習 (メタ学習) 機能を組み込むことができる可能性が高まる。もちろ

処理内容を分岐させることが可能な逐次処理システムすなわちコンピュータが実現された。」

38) http://nice.sandia.gov/documents/2015/Marinella_150225%20Nice%202015%20HAANA%20Final.pdf や <https://www.tohoku.ac.jp/japanese/2016/12/press20161214-03.html> などを参照。ちなみに、Samsung は、2019 年前半にギガビット前後の容量を持つ MRAM の市販を開始している。https://www.mram-info.com/samsung-starts-shipping-28nm-embedded-mram-memory?utm_source=feedburner&utm_medium=email&utm_campaign=Feed%3A+mram-info+%28MRAM-Info%3A+MRAM+tech+news+and+resources%29

ん、その際には、先の松本他 (2003) に言及されている海馬などにあるルックアップ・テーブルが必須である。

さらに、NM-AI に上記の多彩な記憶機能とメタ学習機能を組み込めるようになれば、リアルタイムで変化する巨大なルックアップ・テーブルを活用・再生成しながら、松本他 (2003) の“出力依存学習”が実行できるようになる。そして、そのようなことができるようになれば、NM-AI にとって、リアルタイムでの高度なゼロ・ショット学習 (未経験事例への転移学習: Zero-shot Learning) やワン・ショット学習 (小サンプル学習: One-shot Learning) が現実のものとなる。

ところが、ヒト・レベルに近づき超えて行く NM-AI 実用化には、そうは問屋が卸さないもう一つのボトルネックが厳然として存在する。実用化を阻む大きなボトルネックとは、デジタル革命の担い手である現行の半導体デジタルメモリ技術である。というのは、短期・局所的のみならず長期・大局的な記憶機能を組み込んだ巨大なルックアップ・テーブルを作り上げることは、既存の半導体メモリではとても難しいからである。そして、このボトルネックが解消されない限り、ヒトに比肩する上記のゼロ・ショット学習やワン・ショット学習の実用化など、NM-AI にとっても夢のまた夢なのである。

なお、このような海馬などにある巨大なルックアップ・テーブルの組込によってヒト・レベルに近づき超えて行く NM-AI を実現しようとするアプローチは、連想メモリネットワーク (Associative Memory Network) とか高次元計算論 (hyperdimensional computing), ベクトル記号基本設計論 (Vector Symbolic Architecture) などと呼ばれており、NM-AI とは異なる扱いがされているケースも多い。例えば、Boden (2016) では、「この一派は、自らを AI 研究者とも呼ばないので、隠れた AI 研究グループだ」と紹介されている。ただし、連想メモリネットワークの BD-AI に比較した卓越性に関しては、その脳機能上の重要性から、脳神経科学分野の標準的教科書である Kandel 他 (2013) でとても詳しく紹介されている。

また、Intel Lab の下記 URL では、このような高次元 SDR を確率変数ベクトルとして扱う方法論 (Hyperdimensional Computing) を、NM-AI と区別して Probabilistic Computing (確率コンピューティング) と呼んでいるようである。ただし、NM-AI の本質は、決定論的なデジタル性ではなく曖昧さを許すアナログ性にあるとすると、その行き着いた先では、インテルの意味での NM-AI と

確率コンピューティングとが融合していくのだと思われる。敢えて言えば、前者が学習・訓練、後者が推論に相当するからである。

<https://www.intel.com/content/www/us/en/research/neuromorphic-computing.html>

<https://www.intel.co.jp/content/www/jp/ja/research/neuromorphic-computing.html>

半導体デジタルメモリ技術上の大きなボトルネックの存在を理解するには、現行のノイマン／チューリング型コンピュータにおけるメモリの扱い方を理解することが重要だと思われる。この種のコンピュータは、整数値などで指定されるアドレス（番地）とそのアドレスに記憶されているコンテンツ（内容）を明確に分離したアーキテクチャに基づいて長足の進歩を遂げてきたからである。この点を少し例示してみよう。

初期の 8 ビットのノイマン／チューリング型コンピュータの場合、最大で 2 の 8 乗ビット = 256 ビット分のシステムメモリ領域を扱えるが、この 256 ビットには識別のためのアドレスが定められている。例えば、アルファベットの整数 a には十進法の +127 という数値が割り当てられていて、コンピュータが丁度この a の content（したがって、+127）がプログラム実行上必要になったとしよう。その場合、コンピュータのポインタと呼ばれる機能に a のアドレス（特定の番地）が提示されると、127 に対応する (+) 符号あり 8 ビット表現 (01111111) が呼び出される。そして、現行のコンピュータでは、どのような複雑な数値計算であっても、最終的には 1 次元の二進法表現された数値同士の演算に帰着する。

このようにアドレス（番地）とコンテンツ（内容）が分離されている理由は、現行のコンピュータでは、先のフォン・ノイマン・ボトルネック (VNB) の所で触れたように、プロセッサとメモリとが分離されていることに深く関わっている。そして、プログラムに書かれた命令・データを実行する際には、1 次元の 2 進法演算を実行する限り、アドレスを指定してメモリ部分から命令・データというコンテンツをプロセッサに呼び出す方式の方が格段に低コストで効率も良い。微細化によってコンピュータの演算速度が急速に増大する状況では、特にその便益が高まる。

他方、プロセッサ・メモリ融合・同居型のメモリベース・アーキテクチャを

基本とする NM-AI では、先の松本が教えてくれた実際の脳神経システムとほぼ同じようにふるまう。具体的には、到着した感覚・刺激情報は、高次元 SDR 形式の検索情報コンテンツ＝アドレスとして学習・記憶済みのルックアップ・テーブルに提示され、環境適応に必要な類似性・新奇性判断が引き出される。そして、類似性が高ければ転移学習が、新奇性が高ければゼロ・ショット学習やワン・ショット学習が作動し始める。

ところが、類似性・新奇性判断の際にアドレスとコンテンツとが分離されている方式のルックアップ・テーブルを使っているのは、1次元の2進法演算実行ステップ数が莫大になるので、恐ろしく時間がかかってしまう。例えば、先に触れたベンチャー企業 BrainChip Holdings の BrainChip は、筆者の知るかぎり、現在唯一の実用化されている NM-AI であるが、このチップは現行 PC に備わっている PCI-Express スロットに刺して利用される。したがって、BrainChip 側で行われているのは、実ニューロンに近い STDP 機能を備えた発火型の人工ニューロンを使った学習・訓練だけである。そして、このような学習・訓練結果は PCI-Express バスを通じて PC 内の HDD や SSD 等に蓄えられ、様々な推論用途に活用される (Vab Der Made 他 (2017))。また、Intel の NM-AI である先の Loihi も、上記の学習・訓練部分だけが同チップ内の Neuromorphic Processor で行われ、推論は同一チップ内に組み込まれた同社の PC 用 X86 プロセッサ・コア部分で行われる (Davies 他 (2018))。

したがって、両 NM-AI 共に、ルックアップ・テーブル的な機能は、アドレスとコンテンツとが分離されている旧来のフォンノイマン/チューリング型のコンピュータに依存している。そのため、先に引用した Kwabena Boahen @Stanford 大学グループの「パーソナルコンピュータは、マウス規模の脳モデル (=250 万個のニューロン) をシミュレートする際に、4 万倍 (400 ワット対 10 ミリワット) もの大きな電力を必要とするにもかかわらず、実際のマウスの脳よりも 9 千倍遅い。」となってしまうという限界は、十分に解決されているわけではない。

NM-AI の諸機能を高速に実現するために必要になるのが、アドレスとコンテンツが同一の連想メモリ (CAM: Content Addressable Memory)³⁹⁾である。CAM の

39) 文献によっては、連想メモリ (AM: Associative Memory) と CAM とを区別している。例えば、Rusch その他 (2018) では、前者ではアドレスとコンテンツの部分一致が通常であるが、

場合、コンテンツがアドレスそのものになっているので、感覚・刺激入力情報としての高次元 SDR に関連した環境適応に相応しいコンテンツをルックアップ・テーブルから高速に読み出せる。しかも、内容的に近い記憶同士を場所的にも可能な限り隣接する形で配置しておけば、メモリアクセスがさらに高速になる。このような類似記憶の近接性こそ、特定分野の知識・ノウハウを芋づる方式で数多く記憶しているプロが、一を知って十を知るといような素人をあつと言わせる連想力を披露できる理由でもある (Brogliato (2014))。

加えて、関連記憶の近接性便益を活用できる CAM は、現行のノイマン／チューリング型コンピュータでは達成できない耐障害性 (graceful degradation) という極めて有用な特徴をも備えることができる。例えば、現行のスマートフォンや PC などのコンピュータの中では、アルファベットの小文字列 c は、c: 01100011 と表現されている。このとき、後ろから 3 桁目の数値が何らかの原因 (例えばアルファ線などの宇宙線) で 0 から 1 に誤って変わってしまったとしよう。そうすると、g: 01100111 となり、まったく異なった文字 (g) になってしまう。そして、計算プロセスの中で一箇所でもこのような誤りが起きると、計算全体にまったく意味が無くなってしまう。これに対して、先の CAM 活用型の NM-AI では、少い箇所での誤りであれば、扱える高次元 SDR の次元が上がりれば上がるほど、かけ算や足し算が行われているだけでなので、処理結果への影響が無視できるようになる。

このように良い所だらけの CAM であるが、現状の半導体デジタルメモリ技術で CAM を実現しようとする、製造上とても高価になり、消費電力もかな

後者では両者が完全一致したものと規定している。ただし、本論では、Kanerva (1988) や (2014) に従い、CAM と AM とは同一だと見なす。実際にも、0 - 1 の識別に加えて一部分を無視する機能 (Don't Care (ドントケア) と呼ばれる) を持つ TCAM (Ternary CAM) が一般化してきているので、コンテンツ・アドレスとして全部を使うか一部を使うかは選択可能である。NM-AI 用を含めた CAM の現状に関する包括的なサーベイは、Karam 他 (2015) を参照した。なお、Karam 他によれば、この論文執筆時点の CAM の最大容量は 100 メガビット = 12.5 メガバイトと報告されており、フラッシュメモリや DRAM に比べると極端に少ない。ただし、最近では、日本発の Axonerve (<https://axonerve.jp/>) のような大容量・高パフォーマンス・低価格のハードウェア TCAM が登場してきている。開発責任者の大塚寛治教授 @明星大学によると、ソフトウェア CAM を二桁以上上回る 1ms (千分の一秒) の処理速度でのワンショット・ラーニングが可能になるという。この技術は、NM-AI/BD-AI の世界が一変させる可能性を秘めているのではないだろうか。

り大きくなってしまふ。CAM 式ルックアップ・テーブルに格納されているメモリと到着した感覚・刺激情報との比較のたびに、すべての記録済みメモリとの並列同時比較が必要になるので、回路構造がとても複雑になるからである。したがって、メモリ容量をたやすくは増やせない（以上は、Sharma (2003) 参照）。そのため、現状では、CAM は、未だ高速 CPU のキャッシュメモリ⁴⁰⁾とか高速なネットワーク・ルーターなどのごく一部に小容量でしか組み込まれていない⁴¹⁾。

にもかかわらず、ヒト・猿・マウス並の“インテリジェンス”を誇る NM-AI 実用化のためには、少なくとも 1 万次元を越える疎な分散表現 (SDR) で表されるアドレス空間を高次元 CAM で実現することを試みる必要がある (Kanerva (2014))。このことは、ヒトのピラミッド型ニューロンの場合、各ニューロン当たり 5 千-2 万個の樹状突起と 4 万個のシナプスが付随していることから類推できる。ちなみに、この各ニューロン当たりのシナプス数は、猿では 2 万個、マウスでは 8 千個、ミツバチで 1 千個だった。

このような高次元 SDR を CAM で扱うとなると、誰もがそのあまりに高い技術上の壁に立ちすくんでしまふ。事実、1 ビットの 1 万次元だとしても、 2^{10000} ビットという天文学的なアドレス空間内で高次元 SDR のベクトル内積処理等を実施しなければならない。そのようなことは、とても実現できそうもない。事実、現在の iPhone・iPad などの最新 64 ビット OS (iOS) ですらも、 2^{64} ビット (16 エクサバイト=1600 万テラバイト) までのシステムメモリしか扱えない。しかも、現行の実用的なスマートフォンでのシステムメモリの容量は、

40) 「CPU とメインメモリーのデータのやり取りを高速化するために、CPU 内部に設置されたメモリ」 (<https://kotobank.jp/word/キャッシュメモリ-2703>)

41) このような CAM の難しさに関して、松本他 (2003) や Anderson (2017) は、次のように言及している。「脳型コンピュータの能力決定においては、実時間処理可能な人工神経細胞の結合数が 1 つの重要な要素である。例えば、視覚パターンの網膜レベルでの特徴抽出では、1000 万程度の結合数が必要であり、大脳新皮質での視覚パターン認識では、数 10 億から 100 億程度の結合数が必要であろうと思われる。従って、脳型コンピュータの工学実現には、工学実現のイメージ化、その要素技術の工学モデル化のみならず、シリコン半導体技術の革新的開発を伴うことが必要である。後者では、従来のプロセッサ主体型の半導体技術と共に、脳型コンピュータの為にメモリ主体型半導体技術の飛躍的進展が必要とされる。」(松本他 (2003)), 「(NM-AI 実現にとって) 最も技術的に難しい問題はメモリである。数テラバイトのメモリが必要になるはずだし、この量のメモリを (半導体) デバイスに統合するのは難易度が高い。」(Anderson (2017), 筆者訳, カッコ内は筆者追加)

せいぜい 4~8 ギガバイトである。

したがって、NM-AI は、少なくとも、現行の半導体デジタルメモリ技術を前提とする限り、ヒト並みどころかミツバチ並みの“インテリジェンス”さえ、100 年経っても実現できそうにない⁴²⁾。となると、20 ワット前後で動作しているヒトの脳内でどのような仕組みで CAM 風の仕組みが実現されているのか？興味深い問いであるが、現状はほとんど見当がつかない状況のようである (Natarajan (2018))。とすると、いったい全体、高次元 SDR を多用しているヒトを含む生命体の脳では、類似性・新奇性判断などを実行する際に、どのような仕組みで高次元 SDR を駆使した記憶の呼び出し・書き込み処理が実際に行なわれているのだろうか？

ここで登場する一つの有力な現行デジタル技術依存型のアイデアが、Kanerva (1988) の Sparse Distributed Memory (SDM) という小脳からヒントを得たコロンブスの卵的な提案である。もちろん、ミツバチの 2^{1000} ビットは言うに及ばず、 2^{100} ビットの CAM でも、そのままではソフトウェア的にすら実現が難しい。ところが、例えばだが、100 年間を秒に直すと 3.154×10^9 秒 $\div 2^{32}$ 秒であるから、人生の“実際に起きた”出来事を全て記憶する際には、 2^{50} ビット程度でも多過ぎる。そして、Kanerva (1988) が着目するのは、この点である。つまり、NM-AI での CAM メモリ処理では、 2^{1000} ビットや 2^{10000} ビットの巨大メモリ空間を事前に想定する必要があるとしても、事後に記憶場所 (Storage) として使われるのは、人生 100 年間分でも、事前の想定メモリ空間内の無視できるほどわずかな領域に過ぎない、という事実である。

さらに、高次元 SDR ひとつひとつが独立な正規分布をするような確率変数としての扱うことができれば、事後的に生みだされた SDR データのほとんどが、平均値の周りに存在するはずである⁴³⁾。正規分布では平均値の両側 3σ (=標準

42) もちろん、アナログメモリを使うという選択肢もある。ただし、その際には、エラー発生率の抑制やエラー訂正機能などが必須になるので、そのためのメモリ新素材の選択、メモリ回路の難度・大きさ・省電力性などが問題になる。ただし、その場合でも、対応する NM-AI は、デジタル・アナログ混載の半導体チップとなる。実用化の試みに関しては、Demler (2018) や下記の IBM や Mythic の URL を参照されたい。

<https://www.techspot.com/news/77687-ibm-announces-8-bit-analog-chip-projected-phase.html>,

<https://www.mythic-ai.com/technology/>

43) Kanerva (1988) は、現実的な仮定に基づいて、そのような状況が起きることを数学的に証明している。なお、Maren 他 (1990) によれば、このような直交性に関する数学的証明は、遙

偏差) 内に 99.7%の値が入ってしまうからである。

とすると、Kanerva の計算に従えば、1 万ビットの高次元 SDR で表現される刺激・イベント情報を 1000 万個、あるいは 100 億個を事後的に記憶する場所が必要であるとしても、各々 1 万 x1000 万ビット = 125 億 5000 万バイト = 12.5 ギガバイト ($\approx 2^{34}$)、1 万 x100 億ビット = 1.25 テラバイト ($\approx 2^{40}$) 程度の事前準備で十分となる。最近の Windows 10-PC では個人レベルでも 2 テラバイトの SSD が数万円で入手可能であるが、このレベルだと、高次元 SDR の 100 億個分でもゆうゆう収納できるのである。

このように、高次元 CAM 実現のために事前には天文学的なメモリ空間が必要だとしても、事後的にはその僅かなメモリ空間を使用するだけで済む。実際、Kanerva (1988) によれば、 2^{10000} の高次元 SDR を扱うために巨大なメモリ空間が事前に必要だったとしても、事後的には、現行の半導体技術でも取り扱い可能な 2^{33} や 2^{40} のメモリ空間さえ事前に確保できていれば良い。そして、Kanerva (1988) は、そのことを数学的に証明すると共に、その実用化方法も示唆している。

さらに、Numenta (2017) や Brogliato (2014) は、現行のコンピュータ上にミツバチ並みの 1000 次元や 2000 次元の高次元 CAM を Kanerva 流 SDM としてソフトウェア的に実現している⁴⁴⁾。では、開発段階の NM-AI ハードウェアに関しては、どうだろうか? この点に関しては、門外漢のため十分な評価はできないが、日本の長瀬産業 (<https://www.nagase.co.jp/>) が自社開発・販売している Axonerve があり、32 ビットから 1152 ビットまでの長さの検索キーが可能とされている。しかも、このような連想メモリを使った検索が、FPGA (field-programmable gate array)⁴⁵⁾ と呼ばれるハードウェア上に実装された ASIC とテラ

か以前の 1960 年代の後半に、理化学研究所の甘利俊一氏グループによって既に成し遂げられていたという。ただし、その数学的な難解さを理解できた同分野の専門家が乏しかったとされている。正直、小生には、当該論文がほとんどフォローできなかった。

44) より具体的には、Hash 関数 (<https://ja.wikipedia.org/wiki/ハッシュ関数>) と呼ばれるソフトウェアで実現された連想配列関数が用いられている。明星大学の大家寛治先生によれば、この型のハッシュ関数は、Google などの検索エンジンにも多用されているという。また、ソフトウェア的な連想メモリを使って実際にビジネスを行っている Saffron Technology (https://en.wikipedia.org/wiki/Saffron_Technology, Intel が 2015 年に買収) のような会社もある。そして、同社の検索エンジンは、世界の主要 1000 社で活用されているとされている。

45) 製造後にも回路構成をソフトウェアで自在に再設定できる集積回路。大手ベンダーは

バイト級の SSD を使って極めて高速に実行されているという。そして、もし検索キーのビット数をもう一桁増やせるとすると、高度なゼロ・ショット学習やワン・ショット学習ができることを意味するので、その社会への影響は計り知れないのではないだろうか。

なお、Merolla 他 (2014) によれば、IBM の NM-AI チップ：TrueNorth の場合、一つのチップ内には、4096 個の Neurosynaptic Core と呼ばれるものが含まれている。具体的には、最小単位であるこの Core に 256 個のニューロン、256 個の軸索と 256 個の樹状突起、そしてそれらの各々にシナプスが 256 個付随しており、Core 全体では 256×256 個 (6 万 5536 個) のシナプスが利用可能となっている。そして、例えば、各々のコアの 256 個のニューロン群が SDR を構成していると仮定すると、実際の Core あたりに利用可能なシナプス用メモリは 65.536 キロビット (2^{16} ビット) である。CAM として理論上必要なアドレス空間は 2^{256} であるが、Kanerva 的な SDM の仕組みが導入されていれば、素人判断で誠に申し訳ないが、先の Kanerva の計算例 (2^{10000} 対 2^{33} , 2^{40}) から類推すると、もし TrueNorth に CAM を組み込んだ場合、このような容量で済むのかもしれない⁴⁶⁾。

なお、時代を席卷している BD-AI でも、最先端分野では、CAM の活用を必須とするモデルが登場してきている。例えば、先に触れた Graves 他 (2014) や Graves 他 (2016) の“Neural Turing Machine”と呼ばれる BD-AI では、メモリ容量的にはほんの僅か⁴⁷⁾であるが、海馬内の CA3 領域と呼ばれる巨大な連想メモリ (CAM) 貯蔵庫／装置に倣った外部メモリ機構が組み込まれている。このような CAM 形式の外部メモリが備わっていると、新奇性の高い物事に遭遇した場合でも、そこに過去の記憶の断片に類似したものがあれば、ルックアップ・テーブルと比較対照する形で過去のエピソード全体を迅速に復元し、新規

Xilinx や Intel 傘下の Altera である。

46) また、Davies 他 (2018) によれば、インテルの NM-AI チップである Loihi では、一つのチップが 128 個の Core で構成されており、各々の Core に 1024 個のニューロンが含まれている。そして、各ニューロンでは 1000 個のシナプスが利用可能である。したがって、1024 個のニューロンが SDR を構成していると仮定すると、CAM として理論上必要なアドレス空間は 2^{1024} であるが、実際の Core あたりに利用可能なシナプス用メモリは、16 メガバイト = 1.28 ギガビット ($< 2^{27}$) となっている。

47) 多くが高々メガビット前後容量の CAM なので、2 の 20 乗から 25 乗、つまり 20 次元から 25 次元程度。

な事例と過去の事例との間に共通する類似性を見出すことができるようになる。つまり、低消費電力性の発揮は極めて難しいが、起因の特定の幅と深さを掘げられるので、ゼロ・ショット学習やワン・ショット学習が可能になる⁴⁸⁾。もちろん、そのような学習の幅と深さは、CAM 容量次第である。事実、Graves 他 (2016) には、ロンドンの地下鉄ネットワークを事例としたゼロ・ショット学習やワン・ショット学習の様子が示されている。このように、BD-AI の進化も、高次元 CAM の実用化に大きく左右される⁴⁹⁾。

2-4 長期的には、BD-AI に加えて NM-AI が必須：マクロの視点

BD-AI に加えて NM-AI が強く望まれる根本的な理由は、宇宙物理学者である Chaisson (2013) の下図が説得的である。Chaisson は、実データに基づいて宇宙規模での諸活動の長期的な Energy rate density (amount of energy per unit time per unit mass : 単位質量・単位時間当たりのエネルギー不変消費量) を計算している。そして、この図には、縦軸にその Energy rate density が、そして、横軸に現代 (10⁰) から 100 万年前まで遡る形での時代が示されている。

図によれば、我々の社会は、第一次産業革命前後から過去 100 年超にわたって傾きの急な特定のエネルギー効率 (対数) 直線上に沿って進化してきている。もちろん、BD-AI も、このエネルギー効率直線上に乗っている。他方、NM-AI が実用化できれば、このような傾向線からの人類史上 2 回目の下方へのシフトが可能になる。NM-AI の活用により、少なくとも 4~5 桁高いエネルギー効率の達成が可能になるからである。

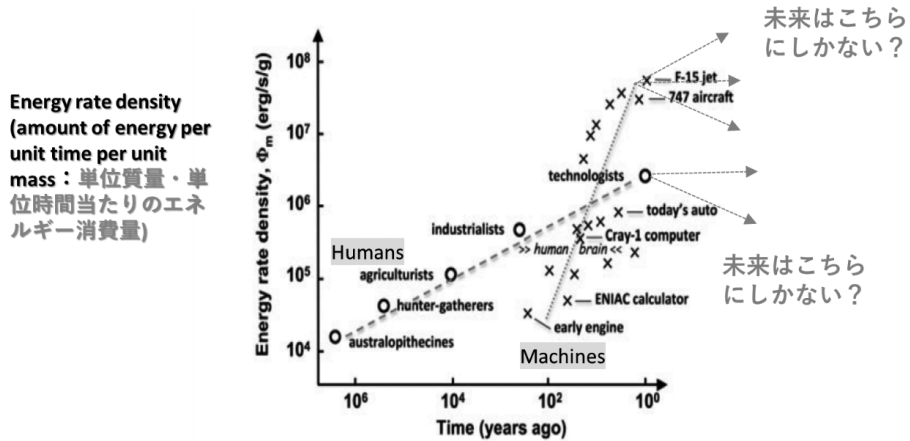
なお、Chaisson は、上記の過去 100 年超の傾向に現れている現象を Technological Singularity (TS) と呼んでいる。今流行りの Kurzweil (2004) 流のシ

48) Ke 他 (2018) は、RNN での起因の特定を行うために、潜在的には数千あるいは数百万ステップの過去に遡ることのできる BPTT (back-propagation through time) と呼ばれるアルゴリズムの改良版 (SAB: Sparse Attentive Backtracking) を提唱している。ただし、そのメカニズムは、筆者には未だ十分に理解ができていない。

49) このことを象徴的に示しているのは、IBM が Watson を駆使して目指している AI Doctor の実用化が现阶段で苦渋の道を辿りつつあるという事実である。その本因は、一言で表現すれば、人間のドクターが得意とする Zero-Shot/One-Short/Few-Shot Learning ができない点に尽きる。詳細は下記を参照されたい。

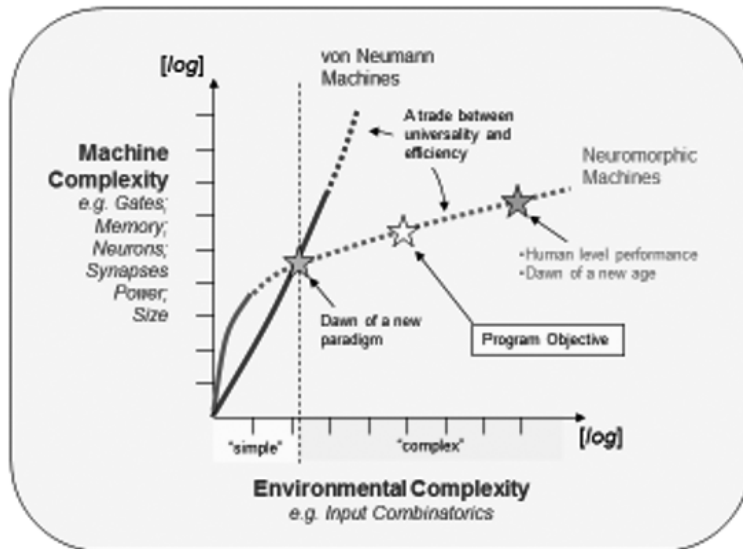
<https://spectrum.ieee.org/biomedical/diagnostics/how-ibm-watson-overpromised-and-underdelivered-on-ai-health-care>

ンギュラリティ（教）には歴史的証拠が乏しいが、TS には十分な根拠があることを強調するためである⁵⁰。



Chaisson (2013) より抜粋, 矢印・日本語書込は筆者

実際、このような現実を前にして、計算機科学の専門家達の多くも、DARPA・SyNAPSE プロジェクトの下図に示されているように、現行のノイマ



(米国 DARPA・SyNAPSE プロジェクト報告書から)
https://www.theregister.co.uk/2011/08/18/ibm_darpa_synapse_project/

50) なお、より一般向けの視点からの Kurzweil 批判に関しては、Zarkadakis (2015) が説得的である。

ン・チューリング型コンピュータでは、そのエネルギー（消費電力）効率の低さから、近未来社会の莫大なコンピューティング需要には到底応えられないと予測している（2015 年の ITRS Emerging Research Device (ERD) Meeting での Srinivasa (2015), Roy (2015), Burr (2015) など参照）。言い換えれば、そのような未来の世界・社会は、現行半導体のエネルギー効率の延長線上では、とても実現できそうもないのである。

このように将来期待の大きい NM-AI であるが、冒頭で述べたように、明日の AI を担うとされるがなかなか実用化までに至っていない。この点に関しては、IBM の Almaden 研究所で NM-AI 実現を模索するグループに属する Burr (2015) の指摘が印象的である。彼は、近未来社会の莫大なコンピューティング需要にどの程度の計算能力で (“What”), どのような方法で (“How”) 対処すべきかという問いかけをしている。彼によれば、前者に対しては、近未来の計算需要は、IBM-Watson を含むノイマン／チューリング型ハードウェアの延長線上ではとても実現できないこと、ところが、現段階ではその先の実現手段が未だ見えていないとする。他方、後者に関しては、“脳機能が十分に解明されていない”現状ではあるが、脳のような格段のエネルギー効率を誇るコンピュータによってしか近未来はやってこないのではないかと主張している。つまり、What, How の両方の視点から考えても、その行き着くところは脳模倣型のコンピュータであろうという見解である。その大きな理由は、前節でも既に指摘したように、脳内での処理が、前述した時空間に広がる非同期・イベント駆動型という特徴に加えて、アダムスミス流の分業・協業の利益を実現するために高度に階層モジュール化されたニューロン／グリア間を電磁氣的・化学的に繋ぐネットワーク処理・決定システムの構築、そのような処理・決定システムの確率過程化、確率過程化された処理・決定システム自体の並列分散処理化、といった低消費電力化に徹した巧妙な特徴を持つことによる。

なお、最近では、開発段階ではあるものの、Intel の Configurable Spatial Accelerator (CSA) や Graphcore の Intelligence Processing Unit (IPU) などに代表される BD-AI と NM-AI の良いとこ取りを狙ったハイブリッドなバルク並列処理型 AI も登場してきている。この方式では、GPU 等と比べて同じ消費電力で 2 - 3 桁の計算能力とエネルギー効率の向上が見込めるといふ⁵¹⁾。なお、バルク並列処理型とは、プロセッサとシステムメモリを近接させた 1 つの

ブロックをバルク (Bulk) と呼び、1000 個を越えるプロセッサを含む各々のバルクで同時並列処理 (Compute Phase と呼ばれる) を行い、バルク間で同期が必要な際には同時並列処理をすべて停止してバルク間での情報交換処理 (Exchange Phase) だけを交互に行う方式のことである。したがって、What ベクトルと How ベクトルの双方を組み合わせているという意味で、上記の Burr 流脳型コンピュータへの進化経路を辿る選択肢の一つだという解釈が可能である。

3. BD-AI 及び NM-AI の“インテリジェンス”とは？

AI 関連の文献には、インテリジェンスの定義を行動主義的な視点から与えようとするものが数多い。例えば、AI がチェスや将棋／囲碁で人間のチャンピオン達を遥かに凌ぐことができる、高速道路のみならず一般道路でも自動運転ができる、通販サイト・融資の窓口、果ては医療の現場でプロフェッショナルからの質問に的確に答えることができる、という風に。実際、大勢の人間中心主義な思考を好む人々は、AI (コンピュータ) にヒト並あるいはヒト以上のことができるか否かを問うことを好む。

そして、そのような問いの正当性を主張するために、人類が生んだ大天才の一人である数学者・コンピュータ科学者 Alan Turing が提示した下記のイミテーションゲーム風の“チューリング・テスト”を引き合いに出すことが常套化している。

<チューリング・テスト> 「もしも、コンターが人間の質問者を欺して自分も人間だと思込ませることができれば、その際は、定義から、コンピュータは知性的でなくてはならない」(引用は Sloman (1995) から、筆者訳)

ところが、世界的に著名な AI 研究者／哲学者である Sloman (1994) が的確に指摘するように、このような人間行動主義的な視点に基づいた問いを発する人々は、生命体・人工物にかかわらず、“インテリジェンス”とはそもそもどの

51) 以上は、Morgan (2018)、Anadiotis (2018) を参照。

ようにして生み出されるものであるかに関する本質的な議論を飛ばしがちである。計算機科学の泰斗 Joseph Weizenbaum 自らが 1960 年代半ばに創ったチャットボット“Eliza”の当初には意図していなかった人々からの大きな反響に当惑してしまったように、彼らに「人間だと思わせる」手段は数多く存在すると分かっているのに、である⁵²⁾。

本論にとっても、人間行動主義的なインテリジェンスの定義に拘ってはいは、AI と HI との補完・代替性という現実的な課題を論じる際に先に進めなくなってしまう。この点を理解するために、上記の Sloman (1995) の的確な指摘を以下に引用してみよう。

「我々が他人の心の状態を判断する際の手がかりとなるのはせいぜい行動だから、人によっては、心の状態や動きに関する事柄が単にシステム全体の行動能力や傾向によって定義可能だと考える。同じく、(Dennett 流の) ‘意図的な態度’は、心の内部の動きを無視している。もしインテリジェンスが行動の生まれ方に依存するとするなら、これは間違いに違いない。(チューリング自身はあまりに賢かったので彼のテストをクリアできるインテリジェンスとか理解力の尺度として提示できなかった。彼は、単にそれ (=チューリング・テスト) を、巨大な‘ルックアップ・テーブル’ (機械的な探索指示表/表引きテーブル) を使わないで実現できる筈だと彼が考えた技術的な挑戦課題として提示したに過ぎない。) (筆者訳, (=) の部分だけ筆者追加)

Sloman の指摘するように、BD-AI であれ NM-AI であれ、両者のインテリジェンスを人間行動主義的な視点から定義することは、動く標的を追い求めるようなものであるから、極めて危険であると再認識できる。さらに、Sloman が上記で述べているように、人間行動主義的な視点に立脚する限り、イルカやシャチ、鯨などの鯨類、ゴリラやチンパンジーなどの霊長類や鳥類、はてはミツバチなどの昆虫類にもヒトに比肩する高度な“インテリジェンス”が備わっていることを扱えない。また、異なった生活圏に適応してヒトとは異なった驚く

52) Weizenbaum の述懐は、Weizenbaum (英訳 2015, 独語オリジナル 2006) の「Eliza Today」の章に詳しく記されている。また、本書に展開される Minsky の AI 賛美論に対するアンチテーゼは傾聴に値する。

べき高度な行動パターンを示すこれらの動物たちに共通する“インテリジェンス”の特性についてさえ言及できない。彼らの思考方法や行動パターンがヒトと大きく異なっていることは事実であるが、彼らがヒトと共通する高度な“インテリジェンス”を保有していることは誰しも認めている。

例えば、McFadden 他 (2014) には、渡り鳥のヨーロッパコマドリが、伏角コンパス (inclination compass) と呼ばれる地表に沿った方位としての「極向き」を決定する量子力学的な仕組みが組み込まれた特殊なコンパスを使って移動することが紹介されている。しかも、このヨーロッパコマドリは、磁場の水平成分を使って北の方角を判定するロブスターやサケなどが持っている極性コンパス (polarity compass) と呼ばれるコンパスと上記の伏角コンパスを状況によって切り替えているらしい⁵³⁾。人間中心主義の浅薄さを実感させられる事実である。

したがって、NM-AI の HI へのインパクトを考えるには、NM-AI が実現しようとしているインテリジェンスとはどのようなものであるかに関して、人間行動主義的な視点からではなく、そもそも NM-AI が実世界で起こる物事や事象をどのように捉えようとしているのかという内側の視点から検討することが必須である (Hawkins (2006))。その理由は、「(世界を) 理解しているか否かは外側から見える行動では測定できない」(Hawkins (2006)) からであり、「我々の心がどのようにして動いており、どのように上手く動かなくなるか、適正に動かなくなるかについて十分に理解するには、設計思想 (アーキテクチャ) ベースの概念が重要である」(Sloman (1994), () 内は筆者追加) からである。

では、NM-AI のインテリジェンスを、具体的にどのようにして外部に現れた行動に頼らず内部のメカニズムとして定義すれば良いのだろうか？ 先の Hawkins (2006) や Hawkins の元共同研究者である George (2008) は、そのような試みを、大脳新皮質の階層構造の意義・意味に着目しながら、次のように明瞭で小気味良い定義を提示していて注目に値する⁵⁴⁾。

その要点は、NM-AI の主目的は大脳新皮質の作動原理に習うことであるか

53) <http://www.natureasia.com/ja-jp/reviews/highlight/10618>。

54) Hawkins は NM-AI のソフトウェア的な実践で世界をリードしている開放型ビジネス形態の Numenta 創設者、Hawkins の共同研究者でもあった George は Google/Facebook/Amazon 等の名だたる投資家から巨大な開発資金を獲得している閉鎖型ビジネス形態の Vicarious 創設者でもある。

ら、NM-AI のインテリジェンスを大脳新皮質が生み出すと考えられるインテリジェンスに限定してはどうかという提案である。限定する大きな理由は、大脳新皮質を持つのは哺乳類だけだからとしている。そのために、彼らは、まず大脳新皮質が進化の結果として階層構造をしている意義・意味に着目する。傾聴に値すると思われるので、ちょっと長くて申し訳ないが、彼らの主張を引用してみたい。ちなみに、彼らが大脳新皮質に限定するもう一つの理由は、意識上・意識下の情動（後述）などの仕組みを解明して実装・実用化することは夢のまた夢と考えているからでもある。

「大脳新皮質には世界に関するモデルが備わっているのだから、あなたは、世界について考え、その中で動き回り、将来について予測したりすることができる。あなたは、生まれながらにして言語や家や音楽のことを知っているのではない。大脳新皮質には賢い学習アルゴリズムが備わっているのだから、どのような階層構造であろうと自然に見いだせるし把握できる。（大脳新皮質の中に）構造がないと、我々は混乱状態、あるいは大混乱状態にさえ陥ってしまう。」（Hawkins (2004), 筆者訳, () 内は筆者追加）

「学習に関する No-Free-Lunch (NFL) 定理によれば、全ての学習問題に関して他を圧倒する生まれながらの秀逸性を誇る学習アルゴリズムは存在しない。もしあるアルゴリズムが特定の問題に優れているとすると、それは、そのアルゴリズムが当該問題に適した仮定を有効に使っているだけのことである。他方、Neuroscience の成果によれば、大脳（新）皮質は、視覚・聴覚・体知覚のような異なった感知に際して同じアルゴリズムを使用しているようである。また、大脳（新）皮質が階層構造をしていることも良く知られている。このような観察結果に関する尤もらしい説明は、異なった領域や感覚種からのデータが、それらの表面上の違いにかかわらず、基本的に同じ統計的な特徴を持つことができるということである。その理由は、世界に関するデータ生成メカニズムが、物理法則や自己組織化の法則にしたがって基本的に階層構造をしている筈だからである。もしそれが本当たるとすると、階層構造に基づいた学習の効率性の背後に潜む極意を、世界の構造を学ぶことによって解き明かすことができることになる。」（George (2016), 筆者訳, () 内は筆者追加）

したがって、Hawkins (2006) や George (2008) を拡大解釈すれば、大脳新皮質が階層構造をしているのは、第一にヒトや他の動物を取り囲む実世界が各種の物理・化学法則に支配された階層構造をしていることの反映である。第二に、そのような実世界の中で発生する物事や事象により効果的に適応しながら生き抜くためには、脳を持つ生命体にとって、実世界の階層構造の主観的な写し絵としての脳内階層モデルを、自他のアクションによって生みだされる体験・経験に基づいて日々改良改善していく必要があるからである。そして、第三に、Engel 他 (2016) を援用して拡大解釈すれば、それらの脳内階層モデルの予測値との対比という形で変化と異常にいち早く気づいて対応し、さらに、そのような気づきや対応の良否判断に基づいて脳内モデルの予測精度をたかめるような階層モデルの改良改善を行う必要があるからである。

その意味で、NM-AI が実装するインテリジェンスとは、短く表現すれば、次のように定義できる。「インテリジェンスとは、人間のような行動によってではなく、(大脳(新)皮質内の)階層メモリ構造の予測能力によって測定される」(Hawkins) 筆者訳, 「インテリジェンスとは、過去との類似性によって将来を予測する脳の潜在的な能力である。」(Hawkins (2006), 筆者訳)。

つまり、NM-AI に実装されるインテリジェンスとは、その完成形においては、Hawkins-George に倣って、冒頭で提示した本論の“インテリジェンス”=「実世界の変化と異常に対応していくために、自他の過去の記憶と現況に立ち向かう自らのアクション(行動)とを活用しながら、様々な活動の“起因の特定(Credit Assignment)”/予測を行う能力ならびにその自己変化能」と定義できるのである。そして、このインテリジェンスの定義は、ヒトであろうとなかろうと、そして、生命体であろうとなかろうと関わりなく使用できるので、Slowman (1995) 流の AI = “自己変化する情報駆動型制御システム”を特徴付けるインテリジェンスとしての意義・意味を持つことができると考えられる。

なお、自己変可能が上記の“インテリジェンス”の定義に不可避免的に付随するのは、個々のニューロン/ニューロン集団内外に張り巡らされた強弱を持つ配線構造パターンにおいて、類似性・新奇性判断が行われるたびにシナプス結合の重みが自動的に変化するからである。そして、そのことによって、新たな世界/社会/環境モデルに基づいた各自の予測能力が生み出されていく。つまり、

自己変可能とは、先の松本 (2006) が教えてくれるように、「脳が答えを引きだす (出力する) と、引きだした答のアルゴリズムは、出力依存性学習によって、自動的に書き変わる」というメタアルゴリズム (アルゴリズムのアルゴリズム) の特性そのものだと言える。

このような出力依存学習に特徴付けられる“自己変化する情報駆動型制御システム”の自己変化能について、Creps (2017) は、20 世紀初頭に活躍した現代の脳神経科学者とも見間違えるほどの見識を誇るフランスの偉大な哲学者アンリ・ベルグソンの発想を紹介しながら、下記のような興味深い事実を指摘している。

「だから、この過程 (詩篇の暗記仮定) が繰り返されるそれぞれの時間は、記憶しようとしているのが一人の人間であるとき、一個人の歴史にだけある瞬間であり、その個人だけの記憶に存在し、そのようなものとして想起できる。例えば“p”という文字でつかえた時のこととか、二行目を忘れた時、等々。文字“p”のところまできて、それを再認すると、今では過去になってしまっている“p”でつかえた、その個人だけの瞬間を思い出す。この詩篇はひとたび暗記されれば、素晴らしい精度で復唱されることができかもしれないが、そのプロセスを担った人間は自分自身が、アルゴリズムが絶対に真似することのできない方法で、変化しているのだ。」 (Creps (2017), 203-204 頁)

「アルゴリズムがそのパターン認識の精度を向上させていくときに、各実行について記録していくためのログファイルは、いわば連続的に存在していて、リアルタイムにアクセスすることができ、コンピュータ・ストレージにおける“今”の中にトークンとして記録される。しかし、アルゴリズムは目の前にあるものと記録されたものを照合することしかできない。これは人間における再認経験と比べればはるかに劣るものである。」 (Creps (2017), 204 頁)

確かに、少なくともヒトの場合、完了型としての暗記事項そのものだけでなく、時間軸にそったその試行錯誤過程も記憶として保持される。Creps (2017) の言うように、前者はコンピュータ上で操作対象となる Storage として

の記憶だが、後者は文脈なども付加された連想するための仕掛けとしての記憶 (Memory) でもあり、起因の特定の際の有力な助っ人にもなる。そして、BD-AI では Storage としての記憶しか扱えないが、ヒトや完成形としての NM-AI では、CAM さえ十分に利用できれば、コンテキスト情報に基づいて上記のログファイルとの照合も可能なので、両タイプの記憶保持が可能となる (Plate (2003))。

なお、Hawkins (2006) や George (2008) が大脳新皮質という時には、海馬と視床とを含めている⁵⁵⁾。ところが、脳内で最も Neuroscience 研究が進んでいるとされる海馬でさえ、NM-AI 実用化に必須の機能解明が十分に進んでいない (Kohara 他 (2014), 利根川進グループ (2017), Hawkins 他 (2018) など参照)。さらに、Sherman 他 (2013) によれば、視床の機能解明は、海馬のみならず大脳新皮質などに比べても、未だほとんど進んでいない。とすると、海馬・視床・大脳新皮質の緊密な結び付け問題 (binding problems) に関わっているヒト並みの大容量 CAM が可能とする連想記憶の NM-AI への実装は、今後、想像以上に困難を極めるのかもしれない。

4. ヒューマン・インテリジェンス (HI) と BD-AI・NM-AI との違いを探る

前節では、本論が冒頭で提示した“インテリジェンス”の定義 (下記に再掲) の妥当性が、Sloman 流の“自己変化する情報駆動型制御システム”としての広義の AI を前提とする場合でも、結構高いことを確認した。したがって、この節では、本論の定義に基づいて、第 2 節の分析結果をふまえながら HI, BD-

55) 大脳新皮質内での類似性・新奇性判断が行われる時に、後者の新奇性判断がなされると、直ちに海馬に情報が転送されるからである。その意味で、海馬は、類似性・新奇性判断という機能上は、大脳新皮質の上位に位置する (Hawkins (2006))。さらに、6 層構造を成す大脳新皮質では、大脳新皮質内の異なった部位間の情報転送・応答のほとんどが視床を経由して行われる。そのため、視床無しでは、大脳新皮質の階層構造のメリットを活かすことができない。しかも、外部からのセンサー情報も嗅覚以外の全てが視床を経由して大脳新皮質の主に第 4 層に伝えられるし、大脳新皮質からのセンサーへのアウトプット情報は多くが視床を経由して末梢神経まで降りていく。したがって、Hawkins (2006) や George (2008) が指摘するように、大脳新皮質の機能を NM-AI として実現するには、海馬と視床が共に必須なのである。以上は、Rolls (2017) と Hawkins (2006) を参照している。

AI, NM-AI の類似点や相違点を明確にしてみたい。

(本論の定義) “インテリジェンス” = 「実世界の変化と異常に対応していくために、自他の過去の記憶と現況に立ち向かう自らのアクション (行動) とを活用しながら、様々な活動の“起因の特定 (Credit Assignment)”と予測を行う能力ならびにその自己変化能」

三者 (HI, BD-AI, NM-AI) に、何ができて何ができないのかという意味での機能特性の程度を探るには、適当な試金石を活用することによって本論“インテリジェンス”の解像度をもう少し高める必要がある。この節では、そのような試金石として、はじめに、下図に示されるような Pearl (2018) の“インテリジェンス”の三分割法 (“LADDER OF CAUSATION”) に習いたい。そして、その次に、その解像度をさらに高めるために、後述する Minsky (2007) の六分割法を援用したい。ちなみに、Pearl は、ベイジアンネットワーク (Bayesian network)⁵⁶⁾ 及びその発展系として反実仮想推論 (思考実験) までをも自動で組み込むことができる統計的因果推論 (Statistical Causal Inference) のパイオニア・泰斗である。

Pearl は、“インテリジェンス”のレベルを、同図の上から下に向かう形で Association (連想) レベル, Intervention (介入) レベル, Counterfactuals (反実仮想) レベルの三つに分けている。1. の Association (連想) レベルとは、ビッグデータを受身的に“観察”する方式で、「～だったら～する」という“If-then ルール”で示される関数/アルゴリズム⁵⁷⁾を、それらの背後にある因果関係には触

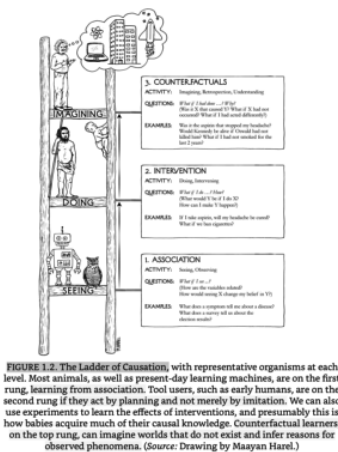
56) 「ベイジアンネットワーク (Bayesian Network) とは、「原因」と「結果」の関係を複数組み合わせることにより、「原因」「結果」がお互いに影響を及ぼしながら発生する現象をネットワーク図と確率という形で可視化したものです。過去に発生した「原因」と「結果」の積み重ねを統計的に処理し、『望む「結果」に繋がる「原因』』や『ある「原因」から発生する「結果』』を、確率をもって予測する推論手法ともいえます。この考え方は人がさまざまな出来事や他人の振る舞いを予測するときの考え方に倣ったものといえます。近年、IT、特にインターネットがより人間的に使いやすくなってきている背景には、ベイジアンネットワークを活用した推測エンジンの活用が盛んになってきたことがあります。』 (<http://www.hitachi-hri.com/keyword/k052.html>) なお、Pearl (2018) が繰り返し強調しているように、ベイジアンネットワークでは、確率分布に裏打ちされた有向グラフを用いるものの「原因」と「結果」がお互いに影響を及ぼす構造になっているため、因果関係を内生的に決定することはできない。

57) 特定の問題を解く手順を、単純な計算や操作の組み合わせとして明確に定義したもの。BD-AI では、莫大な数の“If-then ルール”に基づいて、当てはまりの良さそうなルールの一つ抽

れないままで推定するレベルである。実際、Pearl (2018) が繰り返し警告しているように、既存ビッグデータを観察するだけで“If-then ルール”の背後にある因果関係を導出することは極めて難しい。ビッグデータであっても、因果関係の同定に必要なすべてのデータが揃っている状況を望むことはできないからである。

したがって、このような欠損データの問題を克服して因果関係を導出するためには、2. の Intervention (介入) が必須となる。そうすれば、観察対象をより深く理解するための積極的な現地踏査や操作実験によって、ビッグデータをそのまま受け身的に活用することの限界を克服できる。現地調査／操作実験という自らの積極的なアクションを起こす際には、鶏が先か卵が先かの問題が残っているが、少なくとも観察データが生み出される様々な因果関係に関する素朴な仮説を創造・保持していることが必要となる。仮説のない闇雲な現地調査／操作実験の繰り返しでは、より説明能力の高い仮説になかなか辿り着けないからである⁵⁸⁾。ちなみに、Pearl (2018) は、“自己変化する情報駆動型制御システム”としての AI/ML に因果関係の特定ができるか否かを問うテストを、先の Turing Test の簡易版だとして“Mini Turing Test”と呼んでいる。

Judia Pearl (2018)による“インテリジェンス”試金石



◆ Pearlの主張：「インテリジェンスの本質は、現象に基づいて因果関係を類推/起因の特定できること」

1. **Association (連想) レベル**では、莫大なデータの“観察(seeing)”に基づき複雑な関数/アルゴリズムを、因果関係を理解しないブラックボックス状態のまま推定
2. **Intervention (介入) レベル**では、“観察”だけではなく観察対象に介入して変化させる（実験する/Doing）形で推定
3. **Counterfactuals (反実仮想) レベル**では、観察データを説明する様々な因果関係を内生的にイメージ、確率的に最も当てはまりの良い因果関係を生成/学習

出すことに対応している。

58) そもそもこのような素朴な初期仮説をどのようにして“自己変化する情報駆動型制御システム”に組み込めるのか、という疑問は残る。この点に関しては、Clark (2016) は、幼児が文法を習得していく自己再帰 (Bootstrapping) 的な仕組みの重要性を指摘している。

三つ目の Counterfactuals (反実仮想) レベルでは、AI/ML が、1. と 2. 双方の観察データに基づいて様々な因果関係仮説を自ら複数作成し、各々の妥当性を反実仮想状況下でも検討することができる。加えて、確率的に最も当てはまりの良い因果関係にたどり着くこともできる。ちなみに、反実仮想とは、抗がん剤 A を使用した癌患者さん達の事例ということであれば、「もしこれらの患者さん達が抗がん剤 A を使用しなかった場合にどうなったのか」とか「もしこれらの患者さん達が抗がん剤 B を使用した場合にどうなったのか」といった想定をすることに相当する。「自分/Aさんが~をしなければ、こうならなかったのに」といった後悔や自己/他者批判をできることも、このレベル 3 になって初めて可能となる。

まず、BD-AI を俎上に上げてみよう。単純な樹状突起機能しか持たず、時空間表現にも弱い BD-AI では、既に前節で確認したように、そもそも冒頭の意味での起因の特定ができない。つまり、「特定の出来事において選ばれた色々なアクション (活動) の中から良好・不良な最終結果に繋がったアクションを関連状況 (コンテキスト) やそこに至った学習方法と共に記憶して、さらなる変化と異常への対応に備える作業」ができない。そのため、ビッグデータ内に潜む因果関係を内生的に同定することができない。

実際、BD-AI で起因の特定に利用できるのは、伝達関数の極めて局所的な微分係数情報しかない (Richard 他 (2018))。そして、当該ニューロンネットワークへの入力値と出力値の間の違い (誤差と呼ばれる) の平均二乗誤差を最小にするような微分係数を生成できる伝達関数の数千万個を超えるパラメータが推定される。その結果、利用可能なビッグデータ全体の中でだけで辻褄が合うような一種の相関関係の特定が行われるに過ぎない。ところが、多彩な起因の特定には、短期・局所的のみならず長期・大局的な記憶機能と学習プロセス自体を俯瞰しながらの学習 (メタ学習) 機能が必須である。この点に関する Rolls (2017) の指摘は、極めて深遠である。

「実際、例えば (BigData 型 AI に多用される) 誤差逆伝播法や強化学習などによって特徴付けられる (神経) ネットワークによって達成される非常に複雑な関数関係は、それらが、学習・訓練後に固定化されたルールに従って作動するというものであり、しばしばとても頑迷で融通が利かない。

対照的に、多段階で一回限りの言語に基づいた計画や手続きを修正するためには、推論や計画の際の複数ステップやおそらくそれらに関連したエピソードを思い起こしたりするだけで、エラーにもっとも繋がりがちな連鎖を識別できるようになる。このことが、記憶を明示的に呼び起こすことができる宣言記憶システムと意識との緊密な関係が存在する理由の一つである。」(筆者訳、()内は筆者追加)

したがって、特定の問題に直面した時に BD-AI に高々できることは、莫大な数の“If-then ルール”をビッグデータから抽出し、内生的に抽出された特徴量⁵⁹⁾に基づいて当てはまりの良いルールを一つ抽出することに過ぎない(Darwich (2018))。この意味で、BD-AI では、アルゴリズムが、あるいは関数近似がすべてなのである。たしかに、BD-AI は、Pearl (2018) 流に表現すれば、利用可能なビッグデータを受け身的に活用しているので、レベル 1 には到達している。ところが、初期時点で素朴な仮説を念頭に置き、この仮説の精緻化(含む変更)のために実世界に積極的に働きかけて必要なデータを自ら生み出せるレベル 2 には到達していない。

もちろん、BD-AI がレベル 1 で達成可能な Performance (能力) は、AlphaGO や Watson に例示されるように、おそろしいほどに高度で実用的なものである。しかも、手持ちの If-then ルール数が膨大になればなるほど、次々に特定分野の能力でヒトをも越えるようになる。そして、これまで大勢の人々が極めて複雑だと思い込んでいたヒトの知覚・認知に関わる活動が、実は、因果関係モデルや理論なしに、単に関数(アルゴリズム)の近似でアッと驚くまでに実現できることを明らかにした。

しかしながら、“If-then ルール”だけからは、たとえその選択肢が莫大な数に達しようとも、起因の特定／因果関係の導出ができないので、ゼロ・ショット学習やワン・ショット学習を実行できるようにはならない。そのため、パフォーマンスと“インテリジェンス”を混同して BD-AI に頼り切ってしまうと、BD-AI と HI との代替・補完関係に関する見極めを誤る可能性が高くなる。言い

59) 特徴量とは、BD-AI が内生的に生み出す分析対象を認識する際に使用する定量的な特徴。このような特徴量には、ヒトにも容易に理解できるものからまったく理解できないものまで数多く存在する。

換えれば、起因の特定／因果関係の導出ができる HI とそれが苦手な BD-AI との関係は、本質的に補完的なものであると言える。

では、NM-AI は、どのレベルの“インテリジェンス”に達することができるのだろうか？ 現行の NM-AI は、発火型伝達関数の制約により、そもそもビッグデータ処理ができないので、レベル 1 にも達していない。では、このビッグデータ処理制約が突破され、高容量の CAM が組み込まれた完成形としての NM-AI は、どのようなレベルまで行けるのだろうか？

レベル 1 の突破は、BD-AI を数桁越えるエネルギー効率で可能である。ただし、レベル 2 に達することは、想像以上に困難を極めそうだ。もちろん、このレベルでは積極的なアクションを行使することが必須なので、NM-AI という人工物であろうと、少なくとも介入を行う際のセンサー系や駆動系（アクチュエーター系）を備えたロボットのような構成物を必要とする。言い換えれば、起因の特定／因果関係の同定が可能な NM-AI は、ソフトウェア的な仕組みだけでは実現できない。

したがって、以下では、完成形としての NM-AI には、身体 (Body) が備わっているとして議論を進めていきたい。ただし、実現できる身体の程度は、本論では、Hawkins (2006) が下記で提案する大脳新皮質で実現できる程度のものであると考える。その理由は、後ほど自己意識や意識上・意識下の情動に関して述べる際に詳しく触れたい。

「まず、人間の心は大脳新皮質だけではなく古い脳の情動システムと複雑な人体によっても創られている。人間になるためには、大脳新皮質だけではなく、その全ての生物学的な機構が必要となる。人間のように全ての問題について語り合う（チューリング・テストに合格する）ためには、実際の人間の経験と情動のほとんど及び人間らしく生きることが必要になる。インテリジェンスのある機械 (AI) とは、大脳新皮質と複数の感覚器官相当部分が必要になるだろうが、その他は任意だ。AI が人間のような身体で足を引きずって歩き回るのを見るのは面白い事だろうが、そのことは、我々が AI に人間のような情動システムや人間のような経験を組み込まない限り、ほんのわずかにも人間のような心を持つことはないだろう。そんなこと（試み）は極端に難しいことだし、私には、まったく的外れに思え

る。」(Hawkins (2006) 筆者訳)，

「インテリジェンス，すなわち大脳新皮質のアルゴリズムと，旧脳の感情的な衝動，つまり恐怖，妄想，欲望などが混同されている。インテリジェンスを備えた機械は，このような感情を持っていない。個人的な野望をいざくことがない。財産も，社会的な評価も，肉体的な満足も望まない。欲張ったり，悪癖を身につけたり，機嫌が悪くなったりすることもない。辛抱強く訓練をすれば，人間の感情をまねた反応ができないことはないだろう。だが，インテリジェンスを備えた機械がもっとも効果的に活用される分野は，生身の人間が知性を発揮しにくい領域，すなわち，特殊なセンサーが必要とされる活動や，退屈に感じられるような活動だ。一般的に，これらの活動には感情の入り込む余地がほとんどない。インテリジェンスを備えた機械は単一用途の地味なシステムから，きわめて強力で超人間的な知能システムまで，多岐にわたることだろう。」(Hawkins (2006), 伊藤文英訳)

たしかに，NM-AI は，多彩で豊富な樹状突起や STDP による時空間に拡がるニューロンネットワークを扱えるので，高容量の CAM が利用可能であれば，リアルタイムでの出力依存学習に加えて，ヒト並みのゼロ・ショット学習やワン・ショット学習を実行できる。その結果，幅と深さに溢れる起因の特定能力をも発揮できる。なお，小容量の CAM でも，これらの学習スタイルが実践可能なことに注意してほしい。

ただし，既存のビッグデータが生みだされるメカニズムへの十分な理解無しには，NM-AI にとって，そもそもどのようなレベル 2 の積極的介入が望ましいかが分からない。また，どの方法が望ましい介入方法であるかについては，介入決定を行う際のセンサー系や介入行動を行う駆動系の正確さや多彩さ，介入の際のコンテキストやタイミングだけではなく，介入主体の主観的な判断にも依存する。

さらに，実数体で表現される実世界へのシンボル操作による介入方法は，連続系／アナログ (A) から離散系／デジタル (D) への変換であるから，無限に存在する。しかも，このような AD 変換・DA 変換を担っているのが脳を含む身

体であるという“身体化された心 (Embodied Mind)”的な解釈⁶⁰⁾が妥当だとすると、レベル 2 の難度はさらに上昇する (Craig (2014), Tani (2016), Jasanoff (2018), Damasio (2018))。ちなみに、冒頭の認知科学領域を席卷しているエナクティブ・アプローチは、“インテリジェンス”の生成・発揮には身体が必須だとしている (Noë (2009), Hohwy (2013), Engel 他 (2016))。

なお, Pearl (2018) は, データに基づいて循環型ではない有向ネットワーク図⁶¹⁾が描ければ, その図を構成する基本パターンを用いて自動的に因果関係の自動導出を可能とするアルゴリズムを開発している。その結果, ロボット的な身体を持つ“自己変化する情報駆動型制御システム”が, このようなレベル 2 の操作の自動化によって, 近未来的にもレベル 3 にまで到達できると断言している。もちろん, そのための計算が実用化できるほどの長さの時間やエネルギー効率におさまるかは別問題である。

ところが, そのためには, AI=“自己変化する情報駆動型制御システム”に行为主体性感 (Sense of Agency), 自我意識 (self-awareness), 自己内省 (Self-reflection), 共感力 (empathy), 自由意志 (free will), 意識 (consciousness) などが必要になると強調している。事実, 前述の「自分/Aさんが~をしなければ, こうならなかったのに」といった後悔/批判には, これらの要件が必要になるはずだ。

ただし, これらの高難度の必須要件は, いきなり列挙されており, しかも, 各々の項目の意味があまり明確ではない。その結果, 残念ながら, NM-AI の“インテリジェンス”特性を本論が望むレベルで識別することができない。この難点を克服して有用性を発揮してくれるのが, Minsky (2007) の“インテリジェンス”に関する 6 階層の概念である⁶²⁾。

60) Tani (2016) や Creps (2017) によれば, メルロ=ポンティ (Maurice Merleau-Ponty) は, このような AD・DA 変換器としてのからだと心をつなぐ概念としてキアスム (Chiasme) という造語を編み出している。また, 驚くことに, Bergson (1903) には, AD・DA 変換器としてのからだという解釈が明示されている。さらに, 身体化された心の必要性については, ニューロンレベルの超解像を誇る fMRI 開発で有名な MIT の Jasanoff (2018), 特にその最終稿が圧巻である。

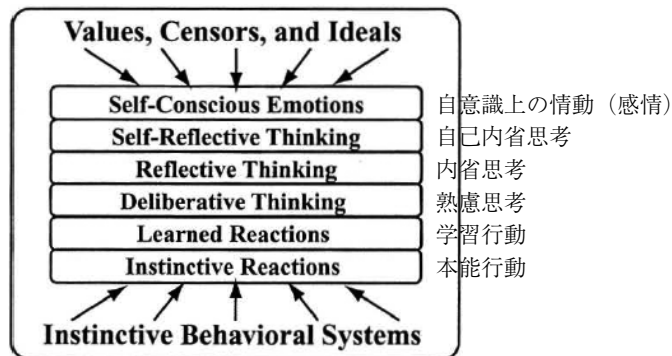
61) 例えば, 下記を参照。

<https://understandingsociety.blogspot.com/2016/02/causal-diagrams-and-causal-mechanisms.html>。

62) なお, Minsky (1985) では, 情動の役割に関しては触れつつも, それが意識上・意識下のものであるかどうかの区別もハッキリしていない。ところが, 「問題はインテリジェントマシン (AI) が情動を持つことができるかではなくて, マシンは情動無しにインテリジェントに

Minsky は、インテリジェンスの要素を、少なくとも下図に示される 6 つに分けて考えることを提案する。具体的には、1) 本能行動 (Instinctive Reactions), 2) 学習行動 (Learned Reactions), 3) 熟慮思考 (Deliberative Thinking), 4) 内省思考 (Reflective Thinking), 5) 自己内省思考 (Self-Reflective Thinking), 6) 自己意識上の情動／内省 (Self-Conscious Emotions/Reflection) の 6 つである。そして、インテリジェンスの高さは、本能行動→学習行動→熟慮的思考→内省思考→自己内省思考→自己意識上の情動という風に上昇していくとする。

図中の本能行動とは、DNA 等に事前に組み込まれている行動パターンであり、直ぐに理解できる。一つ上の学習行動とは、自他の色々な経験を通じて獲得した“If → then rule”をさす。次のレベルの熟慮思考とは、いくつかの採るべき本能・学習行動を思い浮かべ、それらの効果について比較考量する能力だと規定されている。この規定を文字通りに解釈すれば、先の Pearl のレベル 3 と大差がないように思える。ところが、どうも、このレベルでは、意識上ではなく意識下で作動する“インテリジェンス”を想定しているように思える。



Minsky (2006) のインテリジェンスに関する 6 階層

Minsky には申し訳ないが、この熟慮思考レベルに関する彼の叙述は、かなり混乱している。例えば、ある箇所では、「いくつかのとるべきアクションを考慮し、各々の効果を心に思い浮かべ、その後それらの選択肢を比較する」とか、「各々のアクションがもたらすであろう結果を比較するある種の方法が必要である」（いずれも筆者訳）とあるので、意識的な行動が前提とされている

なり得るかである。」(筆者訳) と述べている。そして、ほぼ 10 年後の Minsky (2008) になると、“Machines cannot be intelligent without any emotions” (この文章は Minsky (2008) には無い筆者の文章) という確信に変わっていて大変に興味深い。

ように思える。実際、比較考量のためのシミュレーションは、意識しなければできない筈である (Hohwy (2016))。

ところが、Minsky は、別の箇所では、内省思考レベルに至ってはじめてレベル 3 の熟慮思考の結果を意識的に思い浮かべられると述べている。そして、内省思考が現れるのは、予測が当たらなかつたり、障害に遭遇したり、必要な知識にアクセスできなかつたりしたときだと追記している。ということは、内省思考が必要なレベルとは、変化と異常への対応ができなくなったときということになる。したがって、以下では、熟慮思考レベルは、意識下での“インテリジェンス”だと見なしたい。さらに、Minsky は、敢えてこの意識に“自己”を含めていない。したがって、ここでの意識とは、第三者的なメタの視点という程度のものだと類推できる。

内省思考のワンランク上のレベルが自己内省思考であるが、この二つの区別も、文字通りにはなかなか難しい。ただし、両者の大きな違いは、自己が登場するということに加えて、自己内省思考が、「最近の思考について考慮するだけでなく、そのような思考をした主体についても思考する」(筆者訳) こととか、後者の際に、自己を第三者的な視点からモデル化して(自分の中に複数存在する)自己の動機とか目的とかを巨視的に自己評価できること、などとしている。そのため、Minsky の自己内省思考レベルでは、自分の採った行動が自分の理想とするもの(目的)に値するか否かについて思考することが可能である。したがって、この自己内省思考レベルになってはじめて、先の Pearl の行為主体性感 (Sense of Agency) や自我意識 (self-awareness)、自己内省 (Self-reflection) を必要とする彼のレベル 3 に等しくなると考えて良いようだ。ということは、このレベルに達すると、はじめて Pearl の意味での因果関係を、反実可能状況をも思い浮かべながら導出できるということになる。

Minsky では、この自己内省思考レベルの上に、さらに自意識上の情動レベルをもってくる。彼が説くその大きな理由は、変化と異常に直面した際に、情動に起因する自分の中に複数存在する自己モデル⁶³⁾間の変更や複数自己モデル

63) 人々のパーソナリティは、喜怒哀楽等々の情動モードの種類やそれらの大小によって、平常時のもの(主人格)から大きく乖離する。さらに、そのような情動モードの変化によって人々が“いの一番”に注目する事柄や気になる事柄、それらの事柄へのアクセス速度すらも大きく変化する。Minsky (2007) や Ornstein (1986)、Franklin (1995) は、このような様々な状況

への新メニュー追加を行えるレベルが必要だということにある。自己モデルの変更や追加ができるのは、自分の採った行動に対する良心の呵責、プライド、羞恥心、傲慢な心等々の感情／情動の湧出やそのことによって価値観／目的自体を維持・打破・変革することができるからである。その結果、意識上の情動（感情）は、複数自己間の柔軟で高速な自動切り替え装置としても作動する⁶⁴⁾。

さらに、情動（感情）モードに応じた自己モデルを複数保有・追加できるということは、ほぼ同じ要領で他者モデルを複数保有・追加できるということになる。そして、そのことによって、コミュニティ形成に必須の心の理論（Theory of Mind：他者の心の状態、目的、意図、知識、信念、志向、疑念、推測などを推測する心の機能）を各自が組み込めるようになる。つまり、Minsky 流の柔軟で高速な視点切り替え装置としての情動は、Pearl が先に彼のレベル 3 の要件の一つとして列挙していた共感力（empathy）を媒介に、互いの多様な意図や常識・文化等々の共有によって広範囲な協力を生み出すために必須のコミュニティを生み出すためにもなくてはならないものにもなる⁶⁵⁾。

以上の考察から、Pearl のレベル 3 には、多少の拡張解釈が必要なながら、Minsky のレベル 4, 5, 6 が渾然一体となった形で含まれていると理解できる。

下で発生する情動モードチェンジは、複数自己の考え方との親和性が極めて高いとする。たしかに、我々は、大脳新皮質内に蓄積されている様々なエピソード記憶や意味記憶に意図的にアクセスしようとしても、きっかけがないとなかなかイメージ通りのものにアクセスできない。実際、我々のエピソード記憶は、情動記憶とも呼ばれるように、自らの情動モードによってアクセス速度やアクセス可能な幅と深さが大きく異なってくる。さらに、Rolls (2017) が教えてくれるように、大脳新皮質内に蓄えられている意味記憶には、特定の記憶断片を辿っていくだけでは辿り着けないものが多々存在する。意味記憶のネットワークには、局所的に閉じた部分が存在するからである。ところが、エピソード記憶が蓄えられている海馬内の C3 領域は、全体が大局的に結びついているので、記憶の断片を手がかりに全体復元が可能である。しかも、色々な意味記憶は、Minsky (2007) が意味ネットワーク (Semantic Network) と呼ぶ形で情動記憶と芋づる方式で繋がっている。したがって、情動モードの違いによって、呼び起こされる意味記憶自体も大きく左右される。

64) この点に関する Neuroscience に基づいた説得的な説明は、Rolls (2018) が圧巻である。例えば、Rolls は下記のように述べている：「有限の長さのニューロンネットワーク内においてニューロン発火に起因する確率的な揺らぎによって起こる意思決定プロセスの確率的な振舞いは、同じようなインプットに対してであってさえも、異なった時には異なった決定やメモリ連想が行われるといったことを含む数多くの利点をもっている。」「したがって、脳内には唯一人の意志決定者が存在するのではなく、異なったタイプの意思決定には多彩な意思決定プロセスが存在する。」(Rolls (2018) 第 11 章から、筆者訳)。

65) この点は、Rolls (2018) にも、Neuroscience 的な視点から繰り返し強調されている。

したがって、“インテリジェンス”の解像度を鮮明にするという本論の主要目的にとって、Pearl の 3 段階基準に加えて、Minsky の 6 段階基準を用いることには十分な意義がある。

さらに、Pearl 基準と Minsky 基準の整合性についての理解は、Pearl の三段階基準と冒頭で触れたエナクティブ・アプローチには深い関係があることに気づくことによってより鮮明になる (Hohwy (2016) 参照)。実際、Pearl のレベル 1 では、「利用可能なビッグデータを受動的に受け入れる = 実世界の動きに受動的に対応する」ということが含意されている。そして、レベル 2 では、自らのアクションによって実世界に積極的に働きかけることによって、起因の特定に基づいた因果関係の同定にまで踏み込もうとしている。ただし、自らの積極的なアクションを駆使して起因の特定／因果関係の同定を行うためには、アクションを行う側に行為主体性 (Agency) やそのような主体的行為を行っているという自らの感覚 (行為主体性感: Sense of Agency) が必要になってくる。起因の特定／因果関係の同定には、自らのアクションの是非を内省的に比較考量しなければならないからである。

また、そのような高い自己内省力を伴う行為主体性感があれば、実際に行ったアクションだけではなく、仮想的なアクションをも含めた選択肢の比較考量を事前・事後にできるようになる。例えば、事後的に「あのアクションをとらなければ良かった」と後悔するには、実際のアクションの結果と仮想的なアクションの期待される結果を比較できなければならない。そして、このような反実仮想レベルのインテリジェンス無しには、実世界に適応するための因果関係モデルに基づく予測力を素早く、そして十分に発揮できない。

では、上記の Minsky 流の 6 段階のインテリジェンス基準では、完成形としての NM-AI の“インテリジェンス”をどのように特徴づけることができるだろうか？

Pearl (2018) の試金石に基づいた分析から、すでに Minsky のレベル 1 と 2 はクリアしている。また、Minsky の熟慮思考レベル 3 になると、意識下でいくつかの採るべき本能・学習行動を思い浮かべ、それらの効果について比較考量できる。この点に関して、NM-AI は、経験事例の転移学習のみならずゼロ・ショット学習 (未経験事例への転移学習) やワン・ショット学習 (小サンプル学習) を可能にする起因の特定能力を持つので、このレベル 3 はどうにかク

リアできると考えられる。判断に迷いはじめるのは、内省思考レベル 4 である。その最大の理由は、このレベルが必要になるときは、予測が当たらなかったり、障害に遭遇したり、必要な知識にアクセスできなかつたりしたとき、より広くは、変化と異常が発生したときという規定に関わってくる。しかも、Minsky によれば、このレベル 4 は、意識上で作動する。繰り返しになるが、この時点の意識とは、第三者的なメタの視点という意味だと解釈できる。

では、Minsky の 6 段階のどの辺りまでクリアできれば、変化と異常を発見し、加えてその対応ができるようになるのだろうか？この問いに答えるには、そもそも変化と異常とはどのようなものであるかを短く説得的に提示する必要がある。本論では、それを 1980 年代末当時の AI 研究のトップスターでありながらその限界の前に突如 AI 研究から身を引いた Winograd 他 (1987) が “Breakdown”⁶⁶⁾ と呼ぶ下記のような状況に重ね合わせてみたい。

「(コンピュータプログラムとして組み込まれた) インテリジェンスの本質は、(同プログラムが対処しなければならない) 問題が単純に事前定義されていない形で起きる時や解決策を模索すべき状態空間が定まっていない時に適切に行動できることである。問題空間内での合理的な探索は、そのような空間自体が作りだされるまで可能ではないし、(既存の) 形式構造がそのような (未知の) 状況に事実上どの程度対応しているかでその有用性が決まる。」(Winograd 他 (1987), 筆者訳, () 内は筆者追加)

Winograd 他 “Breakdown” は、AI/ML という視点から考えると、そのプログラム設計者が事前に想定していた対応すべき問題に関する考察の系 (システム化領域: systematic domains⁶⁷⁾) を凌駕する問題が発生した時に起こる。その意味で、“Breakdown” とは、「脳がメモリしているアルゴリズムの先読みでは予測しえないような事柄」(松本他 (2003)) ということになる。

たしかに、このような “Breakdown” = 変化と異常の発見や対応には、前述の

66) Winograd 他 (1987) では、この点を正当化するために、フッサール以降の現象学の泰斗ハイデッガーまでを引き合いに出している。

67) もっと正確には、「システム化領域とは、プログラムが (適切に) 機能する状況との当該プログラマーの解釈を具現化した領域」(Winograd 他 (1987), 筆者訳) とされている。

ゼロ・ショット学習やワン・ショット学習が必要になる。ただし、これらの学習能力は、あくまでも変化と異常への対応ができるための必要条件に過ぎない。

では、変化と異常への対応は、先の Minsky のインテリジェンスに関する 6 段階のどの辺りからできるようになるのだろうか？まず、1) 「本能行動」、2) 「学習行動」までのインテリジェンスでは無理である。このレベルでは、“If → then rule”メニューにない対応はできないので、変化と異常の発見すらできない。また、3) 熟慮思考レベルでは、1 部の発見はできるかもしれないが、限定的なものに留まる。というのは、選んだ行動の妥当性に関する判断ができないからである。このような判断ができるのは、4) 内省思考レベルである。ところが、このレベルには、第三者的なメタの視点という意味での意識の存在が前提とされる。

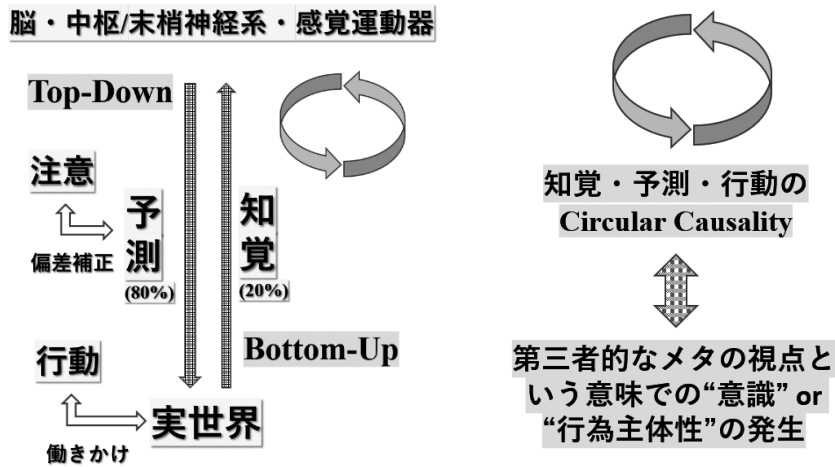
なお、NM-AI にとって、内省思考レベルのインテリジェンスが備わっていれば、選んだ行動の妥当性に関する類似性・新奇性判断が可能なので、変化と異常の発見はできそうである。事実、類似性・新奇性判断によって新奇だと判断した場合には、(人工)海馬システムや(人工)視床システムと連繋してエピソード記憶として蓄えることができる。さらに、自他の過去の記憶と現況に立ち向かう自らのアクション(行動)とを活用し、様々な活動の起因の特定もできる。しかも、ヒトの五感を遥かに越えるセンサー等を組み込むことによって、ヒトを超える変化と異常への発見をもできる可能性が出てくる。

では、そもそも NM-AI に第三者的なメタの視点という意味での意識を近未来において組み込める時代が来るのだろうか？あるいは、現段階において、このレベルでの意識を NM-AI に組み込もうとするどのような試みがあるのだろうか？素人である筆者には、そのような問いに十分に答えることはできないが、認知発達ロボティクス領域⁶⁸⁾におけるロボットに第三者的なメタの視点とい

68) この分野の世界を代表する浅田(2017)によれば、「認知発達ロボティクスは、構成的手法を用いて人間の認知発達過程を理解することを目的とする。核となるアイデアは、物理的埋め込み(身体性)と社会的相互作用で、それらは、他者を含め環境との相互作用を通じて情報を構造化する」としている。構成的(constructive)という意味は、実際にモノとして造ってみせるということである。浅田グループによる赤ちゃんロボット等の構成的な試みについては、<http://www.er.ams.eng.osaka-u.ac.jp/asadalab/>を参照されたい。なお、この場をお借りして、筆者の2回の聞き取り調査に御協力いただいた大阪大学大学院工学研究科知能・機能創成工学専攻の浅田稔先生、ならびに浅田先生への御紹介をいただくと共に一緒に聞き取り調査に御参加いただいた大阪大学大学院情報科学研究科名誉教授(現京都情報大学院大学教授)の

う意味での意識を実際に組み込もうとする Tani (2017) の試みは注目に値する。その基本アイデアは、Tani が“Circular Causality”と呼ぶ Friston (2010) の Free Energy 原理（下記に説明）に類似したものである。その基本アイデアは、下図のような形で表現できる⁶⁹⁾。

この図の左半分には、上部の「脳・中枢／末梢神経系・感覚運動器」と下部の「実世界」との間に上からの矢印と下からの矢印が示されている。上からの矢印は脳から中枢／末梢神経系を通じて感覚運動器に伝達される予測、下からの矢印は実世界を感覚器で捉え末梢／中枢神経系を經由して脳に届く知覚を意味している。そして、実世界に関する予測にしたがって運動器を駆使した行動を起こすことでも知覚が発生する。しかも、この際に、予測が当たらないと、予測誤差も認知される。予測誤差が認知されると、そのような誤差をできるだけ迅速に解消するための選択肢を抽出するための注意が喚起され、その結果、より精度の高い予測が再準備される。そして、ヒトや脳を持つ生命体は、この上下の予測・知覚ループを素早く回すことで、予測誤差が最小になるように行動していると見なすことができる。ちなみに、生命体とは、このような予測誤



(筆者作成)

今井正治先生に心から御礼を申し上げたい。

69) Rolls (2016), 特にその第5章第6節第10項では、NM-AIでも可能な（自らの軸索が反回して自らの樹状突起に繋がる形の）自己再帰型の神経回路を二組以上組み合わせると、自己監視 (Self-Monitoring) 機能をシミュレーションによって示せること、そのことによって起因の特定を行うためのメタ学習が可能になること、このような多段階構造が意識の発生に繋がる可能性が高いこと、などが強調されている。

差最小化行動によって自由エネルギー⁷⁰⁾の最小化を図りながら行動しているとするのが、Friston 流 (Minimum) Free Energy 理論の骨子である。

そして、Tani (2017) によれば、図の右半分に示されているように、第三者的なメタの視点という意味での意識や行為主体性 (Agency) は、このような知覚・予測・行動のループが (Minimum) Free Energy 理論にしたがってグルグル回る (“Circular Causality”) 過程で発生すると説く。Tani の場合、このことを脳の代わりにの BD-AI (時空間構造を組み込んだ各種 RNN) ソフトウェア、感覚・運動器の代わりにのセンサー系とアクチュエータ系を備えたロボットを作成し、このロボットに様々な課題を与えて自律学習させていく⁷¹⁾。もちろん、ロボットの行為主体性はある程度まで確認できるが、第三者的なメタの視点という意味での意識は直接観察できないので、ロボットの事後的な行動パターンやその結果の善し悪しからその存在を推し量るという間接的なアプローチを採用している。

残念ながら、筆者は、Tani (2017) のこのような試みの妥当性を評価できるほどの知識を持ち合わせていない。ただし、Windows OS の“タスクマネージャー”のような同一コンピュータ上で動いている各種プログラムを第三者的なメタの視点から可視化する仕組みは既にあちこちに存在している。したがって、Tani の自律型ロボットで試みられているのは、そういうタスクマネージャー的なメタの機能がどのようにすれば自律的に生みだされるかということだと思われる。その意味では、NM-AI に、メタの視点という意味での意識や行為主体性を近未来に組み込むことは思ったよりも容易なのかもしれない。

なお、Rolls (2017) は、上記のタスクマネージャー的なプログラムと Tani (2017) がめざしている“意識”との決定的な違いについて下記のような興味深い指摘をしている。

「コンピュータプログラムの中には、監視機能を持つものもある。この

70) 簡単には、物質または系のもつ内部エネルギーのうち、仕事に変わりうるエネルギーと定義されている。

71) NM-AI の代わりに時空間構造を表現できる RNN が使用されている理由は、NM-AI 用開発言語の乏しさや NM-AI そのものの利用可能性の低さだと思われる。また、このような存在証明を目的とする段階では、低消費電力性に拘る理由がほとんどない。

ことが、より高次の言語的な思考プロセスだと見なすべきだろうか？私のこの点に関する現時点での意見は、それらのプログラムが記号システム内のシンボルがどのようにして実世界の意味と結びつけられるかという問題（記号接地問題）に関与しない形でシステムの動作を修正するための固定的なルールにしたがって作動しているので、そう見なすべきではない、である。」（筆者訳、（）内は筆者追加）

Tani 流の Circular Causality の具現化によって、たとえそれが原始的なものであっても、第三者的なメタの視点という意味での意識や行為主体性を自律的に生み出すことができたとしたら、人工物としての“自己変化する情報駆動型制御システム”に内省思考という新たなレベルの“インテリジェンス”が付け加わることになる。ところが、Tani (2017) のこのような試みが成功裏に終わろうとも、そして、そのような素朴なレベルの意識に加えて自己意識や行為主体性感をも備えた“自己変化する情報駆動型制御システム”が生みだされようとも、Winograd 他の意味での変化と異常への対応は、なかなか実行できそうもない。なぜだろうか？

その理由を明らかにするために、Minsky の 5) の「自己内省思考」や 6) 「意識上の情動（感情）」と変化と異常への対応力との関係を考察してみよう。たしかに、5) の「自己内省思考」レベルでは、自分の採った行動が自分の理想とするもの（目的）に値するか否かについて思考できる。したがって、特定の倫理観や信念・社会規範にしたがった行動が自己目的という視点から実行できるということになる。数式的な表現では味気ないことになるが、特定の目的関数に沿った最適化が可能であるかどうかという風にも表現できる⁷²⁾。

では、先のメタの視点という意味での意識や行為主体性に加えて自己意識や行為主体性感をも備えた NM-AI は、そのアルゴリズムやその自己変化能であるメタアルゴリズムを駆使して、その目的関数（特定の倫理観や信念・社会規範）

72) その意味では、ヒト対ヒト、ヒト対マシンの過去の対戦記録に依存することなく、“強化学習”によってのみから AlphaGo を上回る能力を発揮できるという AlphaGo Zero の場合も、目的関数自体を自ら設定・変更することはできない (<https://deepmind.com/blog/alphago-zero-learning-scratch/>)。なお、強化学習とは ML の一種で、AI が導出した結果を現実の事象に適用する際に、良い結果になったか悪い結果になったかの情報を AI 自信にフィードバックして与えられた目的関数の値がより高まっていくように学習させていく手法。

自体に合致している否かを判断し変化と異常への対応ができるだろうか？なお、メタアルゴリズムとは、先の松本他 (2003) の「脳が答えを引きだす（出力する）」と、引きだした答のアルゴリズムは、出力依存性学習によって、自動的に書き変わる」というアルゴリズムのことである。

その答は、限定的には Yes である。限定的とせざるを得ない大きな理由は、目的関数自体を設定できるためには、6)の「意識上の情動（感情）」が必須であることによる。これは、BD-AI のみならず NM-AI でも、共に大脳新皮質型インテリジェンスしか組み込まれていないので、たとえロボットのような身体を備えていたとしても不可能である⁷³⁾。限定的となるもう一つの決定的な理由は、目的関数自体を変更せずに特定の視点からアプローチし続ける形では、変化と異常への対応ができない場合が数多く存在するからである。

つまり、Winograd 他 (1987) の言葉を借りれば、視点を自在に切り替えることができないと、いかにメタアルゴリズムを駆使しても、単純に事前定義されていない形の事象が起きる時や解決策を模索すべき状態空間が定まっていない時に適切に行動できない。そして、敢えてそれを駆使し続けてしまうと、過学習状態に陥ってしまう危険性を孕む（甘利 (2008/1989), 甘利他 (1997), Fisher (2016)）。言い換えれば、目的関数自体の設定・変更には、Minsky 流の柔軟で高速な視点切り替え装置としての意識上の情動が必須となるのである。

実際、6)の「意識上の情動（感情）」レベルのインテリジェンスでは、特定の

73) この点に関して、Hohwy (2016) は、意識上・意識下の情動が生みだされるためには、たとえそれがロボットのような人工物であったとしても、センサー系・アクチュエータ系による実世界に関する因果関係の外受容的推測 (exteroceptive inference) のみならず、己の体内に関する好不調の原因に関する内受容的な推測 (interoceptive inference) が可能なメカニズムを導入すれば、体内で前述の Circular Causality が回り出すので、そのような仕組みが意識上の情動をも生みだせるのではないかと、そして、そのような情動が心の理論も可能にするのではないかと、文献を提示しながら述べている。同じようなことが Friston (2016) においても、世界的な脳神経科学者である Anil Seth の一連の試みに言及しながら、「内受容的な推測とその己の情動とおそらく他人の情動を推測するという（未だ）想定上の役割」（筆者訳）と述べている。つまり、両者共に、生命体であれ人工物であれ、自律神経系の組込とそのフィードバック・フィードフォワード機能の活用により情動の発生が可能になることを示唆している。たしかに、Damasio (2018) や Craig (2016) の脳神経科学的な情動研究でも、意識上・意識下の情動と自律神経系、特に後者の外受容と内受容、そして体内深部の骨格や骨格筋などからの固有受容 (proprioceptive) とは密接に連係していることが明らかになってきている。したがって、NM-AI への情動の組み込みも夢物語ではないのかもしれない。

倫理観や信念・社会規範の変更さえも自律的に可能なので、世界／社会／環境状況に応じて一端設定した目的関数自体を変更することができる。6)レベルのインテリジェンスが利用可能であると、自閉的な状況に陥りがちな単一自己ではなく、新視点を新たに組み込んで自己メニューを拡大し、さらに既存の複数自己間の柔軟な切り替えが可能になるからである。

さらに、変化と異常への対応に必要なことは、目的関数の設定・変更だけではない。対応の難度が増せば増すほど、社会を構成する様々な人々が時空をまたいで織りなしてきた社会ネットワーク構造の中に埋め込まれている共有知識をより深くより幅広く総動員する必要性が高まる。そのような社会化された知識は、社会ネットワークとして数多くの HI に埋め込まれている（分散表現されている）ので、それらを速やかに動員するためには、6)の「意識上の情動（感情）」レベルの“インテリジェンス”が必須となる。そのためには、自閉的な自らの殻を破って社会ネットワーク（コミュニティ）内で協力し合って対応策を探索できる“インテリジェンス”が不可欠となるのである。そして、それを可能にするのが、Minsky (2006) が教えてくれる、互いの多様な意図や常識・文化等々の共有によって広範囲な協力を生み出すコミュニティ形成装置でもある意識上の情動なのである。

この点に関する Winograd 他 (1986) からの下記の引用は、変化と異常への対応には社会ネットワーク内での対話による新しい状況の識別に必須な新概念の誕生（記号創発）が必須であることを強調していて、極めて示唆的である。

「以前の諸章でも指摘したが、人間は、同じ類いの盲目性にずっと閉じ込められ続けることはない。我々は、新しくコミットする（責任を持って身を委ねる）ことができる活動領域に移ることで Breakdown（変化と異常）に対処する潜在力を持っている。合意するのは、表現するものと表現されるものとの間の固定的な関係に関してではないのだ。合意するということは、話し手と聞き手とが（互いに）コミットして（そのような固定的な関係に）新たな差異を見つけ出せるように（各々が）思考可能な全ての範囲にわたって対話することなのだ。」（筆者訳、()内は筆者追加）

言い換えれば、Minsky の第 6 層まで具備した“インテリジェンス”では、も

はやそれらが個々の“自己変化する情報駆動型制御システム”内だけに留まるのではなく、社会を構成する様々な“自己変化する情報駆動型制御システム”の間の社会ネットワーク構造の中にも埋め込まれるようになる。個々人の“インテリジェンス”，したがって HI が脳を含む身体ネットワーク上にサブネットワークとして分散表現されていると同じように、HI は社会ネットワークの中で大勢の人々の間にも分散表現されている。そして、そのような社会ネットワークとして HI の威力は、ヒトが 6)の「意識上の情動 (感情)」レベルの“インテリジェンス”を保有することによってはじめて発揮できるのである。その意味で、ALVA NOË (2009) や河野哲也 (2006), 浅田稔 (2017) の言葉を借りると、「(ヒューマン) “インテリジェンス”は、個々人の脳を含む体の外にも広がっている」。

このように拡大解釈すると、変化と異常への対応力を発揮するための“インテリジェンス”には、Minsky の第 6 層までが必須となるのである。そして、Minsky 的な Emotion Machine が夢物語である限り、HI と BD-AI, NM-AI は、本能行動・学習行動・熟慮思考・内省思考では代替関係をさらに強めていくかもしれないが、“インテリジェンス”が自己内省思考、その次の自意識上の情動 (感情) と上昇するにつれて、より顕著な補完性を強めて行くのではないだろうか。

なお、最後になるが、Hohwy (2016) は、意識上・意識下の情動が生みだされるためには、たとえそれがロボットのような人工物であったとしても、センサー系・アクチュエータ系による実世界に関する因果関係の外受容的推測 (exteroceptive inference) のみならず、己の体内状態に関する主に自律神経系経路の内受容的な推測 (interoceptive inference) が第三者的な視点から観察可能なメカニズムを導入できれば、体内でも前述の Circular Causality が回り出すので、そのことが自意識上の情動 (感情) をも生みだせるのではないかと、そして、そのような情動 (感情) が心の理論も可能にするのではないかと、文献を提示しながら述べている。同じように、Friston (2016) も、世界的な脳神経科学者である Anil Seth の一連の試みに言及しながら、「内受容的な推測とその己の情動とおそらく他人の情動を推測するという (未だ) 想定上の役割」(筆者訳) について言及している。つまり、両者共に、生命体であれ人工物であれ、自律神経系の組込とそのフィードバック・フィードフォワード機能の活用により情動 (感

情)の発生が可能になることを示唆している。

たしかに、Damasio (2018) や Craig (2016) の生命体に関する研究でも、自律神経系、特に後者の外受容と内受容、そして体内深部の骨格や骨格筋などからの固有受容 (proprioceptive) の三者は、意識上・意識下の情動と密接に連係していることが明らかになってきている。その意味では、実装方法の解明が進むことにより、情動の NM-AI への組み込みも夢物語ではないのかもしれない。そして、そのようなレベルでは、HI と NM-AI との代替関係が支配的になっていく可能性もあるのかもしれない。ただし、Damasio などの研究成果に関しては、Rolls (2016) のように否定的な見解を強烈に述べている脳神経科学者もいる。

4. 結びに代えて

本論では、今をときめく BD-AI と中長期的には AI の本丸として登場すると期待されている NM-AI の双方を取り上げ、そもそも BD-AI や NM-AI の“インテリジェンス”特性とはどのようなものであるのかを、Human Intelligence (HI) と両タイプの AI との補完性・代替性に焦点を当てながら検討した。今をときめく BD-AI に加えて未だ実用化に至っていない NM-AI を同列に扱ったのは、5-10 年後に後者の実用化が活発化しはじめると、既に社会に大きなインパクトを与えている BD-AI との補完性を高めつつ、中長期的には NM-AI が AI の中核となっていくと予測されるからである。

そして、現行の BD-AI よりも 6 桁以上の消費電力効率を誇る NM-AI が実用化の域に到達するようになると、あらゆる人々が肌身離さず身につけているスマホのような形で人々の生活になくはならないものとなって行くだろう。そうなってくると、HI に有史以来の衝撃的なインパクトを与えはじめることは間違いない。起因の特定／因果関係の同定に秀でた NM-AI が、その高度なリアルタイム学習、ゼロ・ショット学習 (未経験事例への転移学習：Zero-shot Learning) ワン・ショット学習 (小サンプル学習：One-shot Learning) の機能を発揮することにより、人々の日常生活／業務で直面する変化と異常への対応力やその自己変化能を格段に高めてくれるからである。しかも、そのようなインパクトは、広く大衆レベルに及んでいくはずである。

上記のような視点から本論がまず試みたのは、BD-AI と NM-AI の脳神経模倣に関する設計思想の詳しい検討と、そのような設計思想の違いがもたらす“インテリジェンス”特性の違いを明らかにすることであった。分析結果としてやや衝撃的なことは、BD-AI には冒頭の意味での起因の特定ができないため、ビッグデータ内に潜む因果関係を内生的に同定することができない事実の再確認だった。ところが、手持ちの「～だったら～する」という“If-then ルール”の数が膨大になればなるほど、因果関係モデルや理論モデルなしに、これまで大勢の人々が極めて複雑だと思い込んでいたヒトの知覚・認知に関わる活動までが、実は、ヒトがアツと驚くまでのレベルに達することのできることも同じように衝撃的だった。ただし、この衝撃的な BD-AI のパフォーマンス獲得には、現行のフォン・ノイマン／チューリング型コンピュータの泣き所であるフォン・ノイマンボトルネック (VNB) に起因する驚くほどの高消費電力性という対価を支払う必要のあることも確認した。

次に確認したのは、このような限界を持つ BD-AI に比べ、一見ではあるが、NM-AI がいかに魅力的なものであるかであった。具体的には、VNB の桎梏から解放されることによる桁違いの低消費電力性、多彩で豊富な樹状突起や STDP (spike timing-dependent plasticity) が可能にする短期・長期にわたる時空間構造の組み込み、短期・局所的のみならず長期・大局的な記憶機能と学習プロセス自体を俯瞰しながらの学習 (メタ学習) 機能、多彩な起因の特定能力がもたらす高度なゼロ・ショット学習やワン・ショット学習機能、等々の BD-AI が足下にも及ばない魅力の数々である。

ただし、このような NM-AI の潜在力は、発火型のニューロン伝達関数に起因するビッグデータをなかなか上手く扱えないという弱点により、少なくとも現時点においては、NM-AI の魅力が絵に描いた餅のような状況になっていることも確認した。さらに、そのようなビッグデータ制約をどうにか打破できたとしても、アドレス (番地) とコンテンツ (内容) が一体化したメモリである高次元 CAM 無しには、ヒト・レベルに近づき超えて行けるほどの“インテリジェンス”の実現も夢物語に終わる可能性の高いことを確認した。そして、現行の半導体メモリ技術を持ってしても、高次元 CAM の実現可能性がとてつもなく低いことも確認した。なお、分析の中では、このようなビッグデータ制約や CAM 制約などのボトルネック解消のイノベーションが起りつつあること

にも具体的に触れた。

最後に確認したことは、本論の“インテリジェンス”の定義の正当性を議論した後に、今をときめく BD-AI とビッグデータ制約も CAM 制約もクリアした完成形としての NM-AI のインテリジェンスは、HI とどのような補完・代替関係にあるのか、であった。この現代的な課題を明らかにするために、ペイジアンネットワーク及び統計的因果推論のパイオニア・泰斗である Pearl (2018) の“インテリジェンス”に関する 3 段階モデルと AI の父と称される Minsky (2006) の同 6 階層モデルを“インテリジェンス”評価の試金石として援用した。

分析によれば、BD-AI は、Pearl (2018) が教えてくれているように、彼のレベル 1 (Association レベル) にしか達していないことを、主にその人工ニューロン特性を精査する形で再確認した。ちなみに、このレベルでは、ビッグデータを受身的に観察し、「～だったら～する」という“If-then ルール”で示される莫大な数のアルゴリズムを、それらの背後にある因果関係には触れないままで推定するだけである。つまり、起因の特定／因果関係の同定は、少なくともヒトに理解できる形では全く行われていない。

一方、上記の二つのボトルネックを解消した完成形としての NM-AI も、多彩な樹状突起や STDP などの時空間表現力に優れた人工ニューロンが組み込まれているものの、未だ Pearl のレベル 2 (Intervention レベル) を辛うじてクリアできるか否かの状況であることを確認した。このレベルでは、“If-then ルール”の背後にある因果関係を導出するために欠損データを、NM-AI 自らが実世界に介入して収集できなければならないからである。なお、このレベルでは積極的なアクションを行使することが必須なので、NM-AI は、介入を行うために必須のセンサー系や駆動系 (アクチュエーター系) を備えたロボットのような身体化された実体である必要がある。言い換えれば、起因の特定／因果関係の同定が可能な NM-AI は、既存の認知科学のドグマを次々に破壊しつつあるエナクティビズム (enactivism) が教えてくれているように、ソフトウェア的な仕組みだけでは実現できない (Noë (2009), Hohwy (2013), Engel 他 (2016))。

そして、身体化された NM-AI が Pearl のレベル 2 をどこまでクリアできるかを詳細に検討するために先の Minsky 流の試金石を導入し、同時に両試金石の包含関係を明らかにした。具体的には、Pearl のレベル 3 が、Minsky のレベル 4 (内省思考)、5 (自己内省思考)、6 (自意識上の情動 (感情)) の三つに分解可

能なことを示した。

その結果、NM-AI が誇る上記の魅力的な諸特性に加えて、同 AI に第三者的なメタの視点という意味での意識や行為主体性を組み込むことができれば、Minsky のレベル 4 (内省思考) までは、どうにかクリアできることをまず確認した。逆に言えば、この付加条件がなければ、Pearl のレベル 2 も覚束なくなる。なお、本論では、上記の元型的な意識の実現可能性について、主に認知発達ロボティクス分野で有名な Tani (2017) の試みを、今をとときめく Friston (2010) の Free Energy 原理との関連を指摘しながら紹介した。

Minsky によれば、レベル 4 は、予測が当たらなかつたり、障害に遭遇したり、必要な知識にアクセスできなかつたりしたとき、より広くは、変化と異常が発生したときに作動する。そのため、本論では、身体化された NM-AI がさらに Minsky のどのレベルまで到達可能であるかを確認するために、1980 年代末当時の AI 研究のトップスターでありながらその限界の前に突如 AI 研究から身を引いた Winograd 他 (1987) の“Breakdown”概念に習って変化と異常＝「脳がメモリしているアルゴリズムの先読みでは予測しえないような事柄」(松本他 (2003)) と位置づけ、NM-AI に、このような変化と異常の発見や対応がどこまで可能となるかを検討した。そして、身体化された NM-AI が Minsky のレベル 6 まで実現できれば、そのレベルに達することができることを確認した。

ただし、分析結果によれば、大脳新皮質型“インテリジェンス”の申し子である NM-AI では、Tani (2017) 流の意識やそれを遙かに超える自己意識 (Self Awareness) + 行為主体性感 (Sense of Agency) が組み込まれたとしても、Winograd 他 (1987) 流の変化と異常への対応はとてもしようもないこと、従って Minsky のレベル 6 にまでは到底到達できそうもないことを確認した。事実、Breakdown”＝“変化と異常”への対応には、その難度が増せば増すほど、社会を構成する様々な人々が時空をまたいで織りなしてきた社会ネットワーク構造の中に埋め込まれている共有知識をより深くより幅広く総動員する必要性が高まる。しかも、変化と異常への対応には新状況の識別に必須な新概念の誕生 (記号創発) も必要となる。そして、それらを可能にするのが、Minsky (2006) が教えてくれた互いの多様な意図や常識・文化等々の共有によって広範囲な協力を生み出すコミュニティ形成装置でもある情動なのである。

以上のような分析に基づき、変化と異常への対応力を発揮するための“インテリジェンス”には Minsky のレベル 6 が必須だとすると、Minsky 的な Emotion Machine が夢物語である限り、HI と BD-AI, NM-AI の三者は、本能行動・学習行動・熟慮思考・内省思考では代替関係をさらに強めていくかもしれないが、インテリジェンスが自己内省思考、その次の意識上の情動（感情）と上昇するにつれて、より顕著な補完性を強めて行くのではないだろうか、と結論づけた。

参 考 文 献

- ・ Ackerman, Evan (2019), “Intel Labs Director Talks Quantum, Probabilistic, and Neuromorphic Computing,” IEEE Spectrum, https://spectrum.ieee.org/tech-talk/computing/hardware/intel-labs-director-talks-quantum-probabilistic-and-neuromorphic-computing?utm_source=techalert&utm_campaign=techalert-03-07-19&utm_medium=email
- ・ Anderson, James A. (2017), *After Digital: Computation as Done by Brains and Machines*, Oxford University Press
- ・ 甘利俊一 (2016), 『脳・心・人工知能：数理で脳を解き明かす』, 講談社
- ・ 甘利俊一 (2008), 『神経回路網モデルと接続ニズム』, 東京大学出版会 (初版は 1989)
- ・ 甘利俊一・村田昇・Klaus R. Müller (1997), 「学習の数理モデル —汎化能力と過学習—」, 37-53 頁, 外山敬介・杉江昇編『脳と計算論』に所収, 朝倉書店
- ・ Anadiotis, George (2018), “The AI chip unicorn that's about to revolutionize everything has computational Graph at its Core,” <https://www.zdnet.com/article/the-ai-chip-unicorn-that-is-about-to-revolutionize-everything-has-computational-graph-at-its-core/>
- ・ 浅川伸一 (2017), 「リカレントニューラルネットワーク」, 人工知能学会編『人工知能学大辞典』, 共立出版, 519-524 頁
- ・ 浅田稔 (2017), 「認知発達ロボティクス」, 人工知能学会編『人工知能学大辞典』, 共立出版, 1048-1053 頁
- ・ Benjamin, Ben Varkey, Peiran Gao, Emmett McQuinn, Swadesh Choudhary, Anand R. Chandrasekaran, Jean-Marie Bussat, Rodrigo Alvarez-Icaza, John V. Arthur, Paul A. Merolla, and Kwabena Boahen (2014), “Neurogrid: A Mixed-Analog-Digital Multichip System for Large-Scale Neural Simulations,” *Proceedings of the IEEE*, Vol. 102, No. 5, pp. 699-716
- ・ Bergson, Henri (1903), *An Introduction to Metaphysics*, (英訳版), G.P. Putnam's sons.
- ・ Boden, Margaret A. (2016), *Artificial Intelligence: A Very Short Introduction*, Oxford University Press, Oxford
- ・ Brogliato, Marcelo S., Daniel M.Chada1 and Alexandre Linhares (2014), “Sparse distributed memory: understanding the speed and robustness of expert memory,” *Frontiers in Human Neuroscience*, April, Vol. 8, Article 222, pp. 1-11
- ・ Burr, Geoffrey W. (2015), “Non-Volatile Memory as a Neuromorphic Synapse: Effect of imperfections,” in ITRS ERD Presentation, Stanford University, 02/26/15
- ・ Chaisson, Eric J. (2013), “A Singular Universe of Many Singularities: Cultural Evolution in a Cosmic

- Context,” in *Singularity Hypotheses: A Scientific and Philosophical Assessment*, ed. by Eden, H. Amnon, James H Moor, Johnny H. Soraker, and Eric Steinhart, Springer Science & Business Media, Heidelberg, New York, Dordrecht, London
- ・中馬宏之・今井正治・黒川利明 (2017), 「人的資本 /Human Intelligence と脳模倣型人工知能 /Neuromorphic AI: インテリジェンスという視点から」, 経済産業研究所, ディスカッションペーパー, 17-P-031
 - ・Clark, Andy (2016), *Surfing Uncertainty: Prediction, Action, and the Embodied Mind*, Oxford University Press, Oxford, New York, Auckland, Cape Town, Dar es Salaam, Hong Kong, Karachi, Kuala Lumpur, Madrid, Melbourne
 - ・Craig, A.D. Bud (2015), *How Do You Feel? An Interoceptive Moment with your Neurobiological Self*, Princeton University Press, Princeton and Oxford
 - ・Creps, David (2017), 「『物質と記憶』と深層学習」(齋藤俊太訳), 平井靖史・藤田尚志・我孫子信編『ベルクソン『物質と記憶』を診断する: 時間経験の哲学・意識の科学・美学・倫理学への展開』, pp. 196-224 に所収。
 - ・Damasio, Antonio (2018), *The Strange Order of Things: Life, Feeling, and the Making of Cultures*, Pantheon Books, New York
 - ・Darwich, Adnan (2018), “Human-Level Intelligence or Animal-Like Abilities?” *Communications of the ACM*, vol. 61, Number 10, pp. 56-67
 - ・Davies, Mike, Narayan Srinivasa, Tsung-Han Lin, Gautham Chinya, Yongqiang Cao, Sri Harsha Choday, Georgios Dimou, Prasad Joshi, Nabil Imam, Shweta Jain, Yuyun Liao, Chit-Kwan Lin, Andrew Lines, Ruokun Liu, Deepak Mathaikutty, Steve McCoy, Arnab Paul, Jonathan Tse, Guruguhathan Venkataramanan, Yi-Hsin Weng, Andreas Wild, Yoonseok Yang, Hong Wang (2018), “Loihi: a Neuromorphic Manycore Processor with On-Chip Learning,” *IEEE Micro*, Vol. 38, Issue 1, pp. 82-89
 - ・Demler, Mike (2018), “Mythic Multiplies In A Flash: Analog In-Memory Computing Eliminates DRAM Read/Write Cycles,” *The Linley Group · Microprocessor Report*, August 27, <https://www.linleygroup.com/mpr/article.php?id=12023>
 - ・Deutch, Ariel Y. and Robert H. Roth (2014), “Pharmacology and Biochemistry of Synaptic Transmission Classical Transmitters,” in Byrne, John H., Ruth Heiderberger, and M. Neal Waxham ed. *From Molecules to Network: An Introduction to Cellular and Molecular Neuroscience*, Academic Press, Amsterdam, Boston, Heidelberg, London, New York, Paris, San Diego, San Francisco, Singapore, Sydney, Tokyo, @ pp. 207-237.
 - ・Eliasmith, Chris (2013), *How to Build a Brain: A Neural Architecture for Biological Connection*, Oxford University Press
 - ・Engel, K. Andreas, Karl J. Friston, and Danica Kragic (2016), “Introduction: Where’s the Action ?” in Andreas K. Engel, Karl J. Friston and Danica Kragic ed., *The Pragmatic Turn: Toward Action-Oriented View*, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, London, England.
 - ・Feinberg, Todd E. and Jon M. Mallatt (2016), *The Ancient Origins of Consciousness: How the Brain Created Experience* (邦訳名『意識の進化的起源カンブリア爆発で心は生まれた』(2017)), MIT Press, Cambridge, Massachusetts, London.
 - ・Feinberg, Todd E. and Jon M. Mallatt (2018), *Consciousness Demystified*, Cambridge, Massachusetts, London.
 - ・Fields, Douglas R., (2009), *The Other Brain: From Dementia to Schizophrenia, How New Discoveries*

- about the Brain Are Revolutionizing Medicine and Science* (邦訳名『もう一つの脳：ニューロンを支配する陰の主役「グリア細胞」』(2018)), Simon & Schuster, New York, London, Toronto, Sydney
- ・ Fisher, Anna V. (2016), “Mechanisms of Induction Early in Development,” in Marie T. Banich and Donna Caccamise ed. *Generalization of Knowledge: Multidisciplinary Perspectives*, Routledge, pp. 89-112.
 - ・ Franklin, Stan (1995), *Artificial Minds*, MIT Press
 - ・ Freeman, Walter J. (2001), *How Brains Make Up Their Minds*, Columbia University Press, New York
 - ・ Friston, Karl J. (2010), “The free-energy principle: a unified brain theory?” *Nature Reviews Neuroscience* vol. 11, Issue 2 (February), pp. 127-38
 - ・ George, Dileep (2008), *How the Brain Might Work: A Hierarchical and Temporal Model for Learning and Recognition*, Dissertation submitted to the Department of Electrical Engineering and the Committee on Graduate Studies of Stanford University
(http://alpha.tmit.bme.hu/speech/docs/education/02_DileepThesis.pdf)
 - ・ Goodfellow, Ian, Yoshua Bengio, and Aaron Courville (2016), *Deep Learning* (邦訳名『深層学習』(2018)), The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, London, England
 - ・ Graves, Alex, Greg Wayne and Ivo Danihelka (2014), “Neural Turing Machines,” arXiv: 1410.5401v2, pp. 1-26, <https://arxiv.org/pdf/1410.5401.pdf>
 - ・ Graves, Alex, Greg Wayne, Malcolm Reynolds, Tim Harley, Ivo Danihelka, Agnieszka Grabska-Barwińska, Sergio Gómez Colmenarejo, Edward Grefenstette, Tiago Ramalho, John Agapiou, Adrià Puigdomènech Badia, Karl Moritz Hermann, Yori Zwols, Georg Ostrovski, Adam Cain, Helen King, Christopher Summerfield, Phil Blunsom, Koray Kavukcuoglu and Demis Hassabis (2016), “Hybrid computing using a neural network with dynamic external memory,” *Nature* 538, 27 October, pp. 471-476
 - ・ Hassabis, Demis, Dhharshan Kumaran, Christopher Summerfield, and Matthew Botvinick (2017), “Neuroscience-Inspired Artificial Intelligence,” *Neuron*, Volume 95, Issue 2, 19 July 2017, Pages 245-258
 - ・ Hawkins, Jeff with Sandra Blakeslee (2004), *On Intelligence: : How a New Understanding of the Brain Will Lead to the Creation of Truly Intelligent Machines* (邦訳名『考える脳 考えるコンピューター』(2005)), Times Books
 - ・ 堀尾喜彦 (2017), 「ニューラルネットワークのハードウェア化」, 人工知能学会編『人工知能学大辞典』, 共立出版, 546-551 頁
 - ・ Hennessy, John L., David A. Patterson (2017), *Computer Architecture, Sixth Edition: A Quantitative Approach*, Morgan Kaufmann
 - ・ Hohwy, Jakob (2016), “Prediction, Agency, and Body Ownership,” in Andreas K. Engel, Karl J. Friston and Danica Kragid ed., *The Pragmatic Turn: Toward Action-Oriented View*, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, London, England, pp. 109-120 in *Cognitive Science*
 - ・ Hohwy, Jakob (2013), *The Predictive Mind*, Oxford University Press.
 - ・ Hurwits, Marcia Kaufman and Adrian Nowles (2015), *Cognitive Computing and Big Data Analytics*, John Wiley & Sons, Inc.
 - ・ Jasanoff, Alan (2018), *The Biological Mind: How Brain, Body, and Environment Collaborate to Make Us Who We Are*, Basic Books, New York
 - ・ Jayaraman, Vivek and Gilles J. Laurent (2009), “Olfactory System: Circuit Dynamics and Neural Coding

- in the Locust,” in Larry R. Squire ed., *Encyclopedia of Neuroscience*, pp. 187-196
- ・ Kandel 他 (2013: 第 6 版) Eric Kandel, James Schwartz, Thomas Jessell, Steven Siegelbaum, A.J. Hudspeth (2012), *Principles of Neural Science* (邦訳名『カandel 神経科学』(2014)), Fifth Edition, McGraw-Hill Education/Medical
 - ・ Kanerva, Pentti (1988), *Sparse Distributed Memory*, MIT Press
 - ・ Kanerva, Pentti (2014), “Computing with 10,000-Bit Words,” in Proceedings of 52nd Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing
 - ・ Kohara, Keigo, Michele Pignatelli, Alexander J Rivest, Hae-Yoon Jung, Takashi Kitamura, Junghyup Suh, Dominic Frank, Koichiro Kajikawa, Nathan Mise, Yuichi Obata, Ian R Wickersham and Susumu Tonegawa (2014), “Cell type-specific genetic and ontogenetic tools reveal hippocampal CA2 circuits,” *Nature Neuroscience*, Feb; 17(2), 269-79. http://www.riken.jp/pr/press/2013/20131219_2/
 - ・ 小池和男・中馬宏之・太田聡一 (2001), 『もの造りの技能—自動車産業の職場で』, 東洋経済新報社
 - ・ 工藤巖 (2011), 『脳とグリア細胞：見えてきた脳機能の鍵を握る細胞たち』, 技術評論社
 - ・ Kurzweil, Ray (2012), *How to Create a Mind: The Secret of Human Thought Revealed*, Viking (Penguin Group)
 - ・ LeDoux, Joseph (2015), *Anxious: Using the Brain to Understand and Treat Fear and Anxiety*, Viking
 - ・ Llinas, Rodolfo R. (2001), *I of the Vortex: From Neurons to Self*, A Bradford Book, the MIT Press, Cambridge, Massachusetts, London, England
 - ・ Lotto, Baeu R.(2009), “Statistical Analysis of Visual Perception,” in Larry R. Squire ed., *Encyclopedia of Neuroscience*, pp. 381-386
 - ・ Luo, Liquin (2016), *Principles of Neurobiology*, Garland Science, Taylor & Francis Group, New York, London.
 - ・ Marblestone, Adam H., Greg Wayne, and Konrad P. Kording (2016), “Towards an integration of deep learning and neuroscience,” *Frontiers in Computational Neuroscience*, 14 September, pp. 1-64 (<http://www.biorxiv.org/content/early/2016/06/13/058545.full.pdf>)
 - ・ Maren, Alianna J. (1990), “Laterally-Connected Autoassociative Network,” Alianna J. Maren, Craig T. Harston and Robert M. Pap ed., *Handbook of Neural Computing Applications*, Academic Press, San Diego, New York, Boston, London, Sydney, Tokyo, Toronto, pp. 125-140
 - ・ 松本元 (1995), 『愛は脳を活性化する』, 岩波科学ライブラリー, 岩波書店
 - ・ 松本元・辻野広司 (2003), 「情と意が脳を創る」, 松本元・小野武年編『情と意の脳科学—人とは何か—』, 培風館
 - ・ McClulloch, Warren S. and Walter H. Pitts (1943), “A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activities,” *Bulletin of Mathematical Biophysics*, vol. 5, pp. 115-133
 - ・ McFadden, Johnjoie and Jim Al-Khalili (2014), *Life on the Edge: The Coming of Age of Quantum Biology*, Crown Publishers/Penguin.
 - ・ Merolla, Paul A., John V. Arthur, Rodrigo Alvarez-Icaza, Andrew S. Cassidy, un Sawada, Filipp Akopyan, Bryan L. Jackson, Nabil Imam, Chen Guo, Yutaka Nakamura, Bernard Brezzo, Ivan Vo, Steven K. Esser, Rathinakumar Appuswamy, Brian Taba, Arnon Amir, Myron D. Flickner, William P. Risk, Rajit Manohar, and Dharmendra S. Modha (2014), “A million spiking-neuron integrated circuit with a scalable communication network and interface,” *Science*, vol. 345, Issue 6197, 8 August, pp. 668-673.

- ・ Minsky, Marvin (1985), *Society of Mind*, Simon & Schuster, Inc.
- ・ Minsky, Marvin (2006), *The Emotion Machine: Commonsense Thinking, Artificial Intelligence, and the Future of the Human Mind*, Simon & Schuster, New York, London, Toronto, Sydney
- ・ Morgan, Timothy Prickett (2018), “Intel’s Exascale Dataflow Engine Drops X86 and von Neumann,” <https://www.nextplatform.com/2018/08/30/intels-exascale-dataflow-engine-drops-x86-and-von-neumann/>
- ・ Natarajan, Sanjay (2018), “Unsticking Moore’s Law,” <https://semiengineering.com/unsticking-moores-law/>
- ・ Noë, Alva (2009), *Out of Our Heads: Why You Are Not Your Brain, and Other Lessons from the Biology of Consciousness*, Hill and Wang, A DIVISION OF Farrar, Status and Giroux, New York
- ・ Numenta (2017), *Biological and Machine Intelligence (BAMI): A living book that documents Hierarchical Temporal Memory (HTM)*, <http://numenta.com/assets/pdf/biological-and-machine-intelligence/BAMI-Complete.pdf>
- ・ 太田宏之 (2017), 「空間的神経表象から時間的圧縮過程へ」, 平井靖史・藤田尚志・我孫子信編『ペルクソン『物質と記憶』を診断する：時間経験の哲学・意識の科学・美学・倫理学への展開』, pp. 226-248
- ・ Olhausen, Bruno A. and Christopher J. Rozell (2017), “Sparse codes from memristor grids: The adjustable resistive state of memristors makes it possible to implement sparse coding algorithms naturally and efficiently,” *Nature Nanotechnology*, Advance Online Publication, www.nature.com/naturenanotechnology
- ・ Ornstein, Robert Evan (1986), *Nultimind: A New Way of Looking at Human Behavior*, Houghton Mifflin
- ・ Pearl, Judea and Dana Mackenzie (2018), *The Book of Why: The New Science of Cause and Effect*, Allen Lane, New York
- ・ Plate, Tony A. (2003), *Holographic Reduced Representation: Distributed Representation for Cognitive Structures*, CSI Publications
- ・ Richard, Blake A. and Timothy P. Lillicrap (2018), “Dendritic solutions to the credit assignment problem,” *Current Opinion in Neurobiology*, vol. 54, pp. 28-36
- ・ Rinkus, Gerard, Greg Leshner, Jasmin Leveille, and Oliver Layton (2016), *Sparse Distributed Representation & Hierarchy: Keys To Scalable Machine Intelligence*, AFRL (Air Force Research Laboratory) -RY-WP-TR-2016-0030, United States Air Force
- ・ Rolls, Edmund T. (2016), *Cerebral Cortex: Principles of Operation*, Oxford University Press, Oxford, New York
- ・ Rolls, Edmund T. (2018), *The Brain, Emotion, and Depression*, Oxford University Press, Oxford, New York
- ・ Roy, KAUSHIK (2015), “Neuromorphic Computing With Cellular Array Of Magneto-Metallic Neurons & Synapses,” in ITRS ERD Presentation, Stanford University, http://cspin.umn.edu/events/dac_presentations/KaushikRoy.pdf
- ・ Rusch, Miles and Jan M. Rabaey (2018), “The Design of an Analog Associative Memory Circuit for Applications in High-Dimensional Computing,” Technical Report No. UCB/EECS-2018-72, <http://www2.eecs.berkeley.edu/Pubs/TechRpts/2018/EECS-2018-72.html>
- ・ Sahu, Satyajit, Subrata Ghosh, Kazuto Hirata, Daisuke Fujita, Anirban Bandyopadhyaya (2013), “Multi-level memory-switching properties of a single brain microtubule,” *Applied Physics Letters*, vol. 102, issue 12, pp. 102-106

- ・ Schuman, Catherine D., Thomas E. Potok, Robert M. Patton, Douglas Birdwell, Mark E. Dean, Garrett S. Rose, and James S. Plank (2017), “A Survey of Neuromorphic Computing and Neural Networks in Hardware,” arXiv: 1705.06963v1, pp. 1-88
- ・ Severa, William M., Ryan Dellana, Craig M. Vineyard, and James B. Aimone (2018), “Whetstone: An accessible, platform-independent method for training spiking deep neural networks for neuromorphic processors,” <https://www.sysml.cc/doc/71.pdf>
- ・ Sharma, Ashok K. (2003), *Advanced Semiconductor Memories: Architectures, Designs, and Applications*, IEEE Press, Wiley-Interscience
- ・ Sherman, S. Murry and Ray W. Gullery (2013), *Functional Connections of Cortical Area: A New View from the Thalamus*, MIT Press
- ・ Silver, David, Aja Huang, Chris J. Maddison, Arthur Guez, Laurent Sifre, George van den Driessche, Julian Schrittwieser, Ioannis Antonoglou, Veda Panneershelvam, Marc Lanctot, Sander Dieleman, Dominik Grewe, John Nham, Nal Kalchbrenner, Ilya Sutskever, Timothy Lillicrap, Madeleine Leach, Koray Kavukcuoglu, Thore Graepel and Demis Hassabis (2016), “Mastering the game of Go with deep neural networks and tree search,” *Nature*, Vol. 529, 28 January, pp. 484-489
- ・ Sloman, Aaron (1994), “Semantics in an Intelligent Control System,” *Philosophical Transactions: Physical Sciences and Engineering*, Vol. 349, No. 1689, *Artificial Intelligence and the Mind: New Breakthroughs or Dead-Ends?* (Oct. 15, 1994), pp. 43-58
- ・ Srinivasa, Narayan (2015), “Neuromorphic Electronics for Energy Efficient Processing,” ITRS ERD Presentation, Stanford University, 02/26/15
- ・ Stokes, Jon (2006), *Inside the Machine: An Illustrated Introduction to Microprocessors and Computer Architecture*, No Starch Press
- ・ Streat Lennard G., Dhireesha Kudithipudiy, and Kevin Gomez (2016), “Non-volatile Hierarchical Temporal Memory: Hardware for Spatial Pooling,” arXiv: 1611.02792 v1, pp. 1-11 (<https://arxiv.org/pdf/1611.02792.pdf>)
- ・ Tani, Jun (2017), *Exploring Robotic Minds Actions, Symbols, and Consciousness as Self-Organizing Dynamic Phenomena*, Oxford University Press
- ・ 利根川進グループ (2017), 「記憶を思い出すための神経回路を発見 — 海馬の二つの局所回路が記憶の書き込みと想起を分担している —」 (http://www.riken.jp/pr/press/2017/20170818_2/)
- ・ Trappenberg, Thomas P. (2010), *Fundamentals of Computational Neuroscience*, 2nd, Oxford University Press
- ・ Tavanaei Amirhossein, Masoud Ghodratiy, Saeed Reza Kheradpishehz, Timoth Masquelierx and Anthony Maida (2019), “Deep Learning in Spiking Neural Networks,” *Neural Networks*, Volume 111, pp. 47-63, <https://arxiv.org/abs/1804.08150>
- ・ Van Der Made, Peter AJ and Anil Shamrao Mankar (2017), “Neural Processor Based Accelerator System and Method,” United States Patent Application Publication, US 2017/0024644 A1
- ・ Weizenbaum, Joseph with Gunna Wendt (2015), *Islands In Tth Cyberstream Seeking Havens Of Reason In A Programmed Society*, Litwin Books
- ・ Winograd, Terry and Fernando Flores (1987), *Understanding Computers and Cognition: A New Foundation for Design*, Addison-Wesley Publishing Company
- ・ Wu1, Yujie, Lei Deng, Guoqi Li, Jun Zhu and Luping Shi (2018), “Spatio-Temporal Backpropagation for Training High-Performance Spiking Neural Networks,” *Front. Neurosci.*, <https://www.frontiersin.org/>

中馬宏之：ヒューマン・インテリジェンスとビッグデータ型及び脳神経模倣型 AI：インテリジェンスとは何かを考える

articles/10.3389/fnins.2018.00331/full

・ Zarkadakis, George (2015), *In Our Own Image: Savior or Destroyer? The History and Future of Artificial Intelligence*, Pegasus Book, New York, London

(ちゅうま・ひろゆき 成城大学社会イノベーション学部教授)

最新テクノロジーによる社会の変革

久世和資

はじめに

AI やビッグデータ分析などの先進技術が、社会で実際にどのように活用されているかについて紹介します。

IBM の基礎研究所は、世界に 13ヶ所あり、研究員は約 3 千名います。本部はニューヨーク郊外の Watson 研究所で、IBM の創業者の名前が使われています。米国のワトソン研究所、スイスのチューリッヒ、イスラエルのハイファ、日本の東京、米国西海岸のアルマデン、中国の北京、インドのデリー、米国テキサス州のオースティンの 8ヶ所体制が長年続きました。この 8 研究所に加え、2010 年以降、ブラジル、オーストラリア、アイルランド、ケニア、南アフリカの 5ヶ所に研究所を新設しました。

基礎研究所は、過去 70 年以上の歴史がありますが、多くの研究成果を出しています。例えば、1964 年の世界初の汎用コンピュータ System/360、1970 年

図 1 世界に広がる IBM の基礎研究部門



の関係データベース、1980 年の RISC などです。また、6 名の研究者がノーベル賞を受賞しました。これには、1986 年の走査型トンネル顕微鏡や 1987 年の常温超電導などの業績が含まれます。1997 年には、チェスをするコンピュータ Deep Blue が、当時の世界チャンピオン、カスパロフ氏に勝利しました。また、世界最速のスーパーコンピュータも複数、開発しています。研究員の専門分野は、コンピュータサイエンス、物理、化学、材料科学、電子工学に加えて、数理科学、行動科学、認知科学、バイオ科学と多岐にわたり、専門分野を超えた研究が推進されています。

コグニティブ・システム登場の背景

2020 年には世界中のデータのサイズが 44 ゼタバイトになるといわれています。従来の IT システムが処理をする数値データやテキストデータなど構造化データの増加ペースは変わりません。これに対して、自然言語データ、音声データ、画像データ、動画データ、センサーデータなど非構造化データは、飛躍的に増大します。

また、データ量の増大に伴い「企業におけるデータの有効活用」と「複数の企業によるデータ活用連携」も非常に重要になります。例えば、人間一人の一生の健康データのうち、医療機関での臨床データは 0.4 テラバイト、ゲノムデータは 6 テラバイトです。それらに比べて健康状態への影響が大きい外的なデータは、1,100 テラバイトにもなります。これには、飲酒や運動、仕事のストレスなど、日常の生活から取れるデータが含まれます。今後、健康に関するサービスや業務では、病院や医療機関のデータだけでなく、医療とは直接関係ない業界のデータを集めることも大切になります。例えば、自動車の運転状況から取得できるデータや、食品データなどです。

コンピュータの進歩は、第三世代に入ります。第一世代は集計機、第二世代は現在のコンピュータです。コンピュータにさせたい仕事を定義し、ソフトウェアを設計し、プログラムを記述し、データを入力し、実行します。ところが、現在はデータ量も膨大になっていますし、コンピュータにさせたい仕事の種類も増えています。また、要求される開発のスピードも桁外れに上がっています。

このような状況では、人だけがプログラムを作成するのでは限界があります。

図2 データの爆発的増加と新しいアプローチへの要請

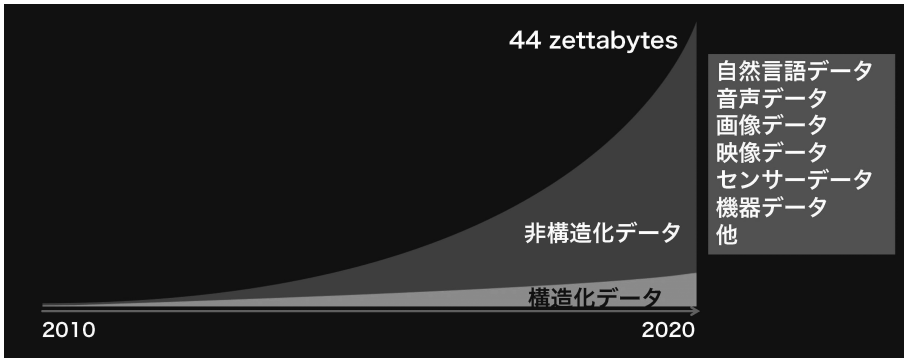
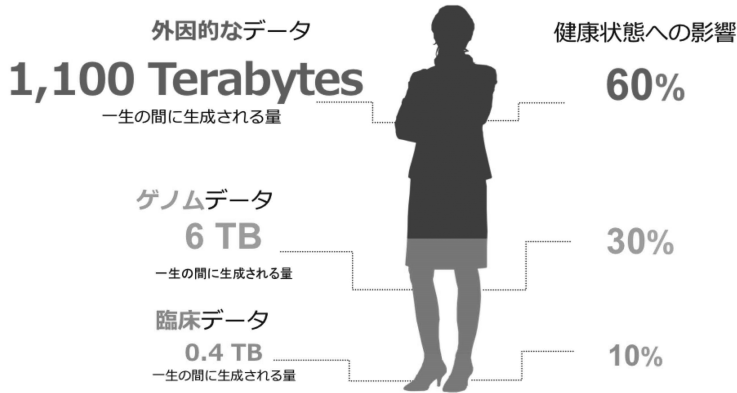


図3 新しいデータ活用のインパクト

例えば医療システムの外側にある大量のデータが健康に大きな影響をもつ



Source: "The Relative Contribution of Multiple Determinants to Health Outcomes", Lauren McGover et al., Health Affairs, 33, no 2 (2014)

図4 新しいコンピューティングの時代に向けて



システムのサポートも大切です。システムが適切なデータを集めたり、プログラムを更新したり、最適化することも必要になります。我々は、このようなシステムをコグニティブ・システムと呼んでいます。「コグニティブ (cognitive)」は、「認知する」という意味があります。コグニティブ・システムの一つに AI があります。我々は、AI を人工知能 (Artificial Intelligence) ではなく、拡張知能 (Augmented Intelligence) と捉えています。拡張知能は、人間の知性の拡張や支援を目的としています。AI は、人に置き換わったり、取って代わるものではなく、人の近くにおいて人を支援することを目指しています。

Watson で『ジョパディ!』に挑戦

2011 年 2 月 16 日、基礎研究所が 5 年がかりで開発したコグニティブ・システムの Watson が、クイズ番組『ジョパディ!』で、歴代チャンピオン二人と対戦しました。『ジョパディ!』はアメリカで 50 年以上も続いている人気のクイズ番組です。毎週月曜日から金曜日の夕方 30 分放映されています。6 種類のジャンル、5 段階のレベル、 $6 \times 5 = 30$ 問を 2 ページ、つまり、60 問を 30 分で対戦することになります。三人で早押しをして、解答権を得たら答えることができ、正解すると賞金がもらえます。ゲームの終了時に、獲得した賞金額が一番大きい人が優勝となります。

Watson が対戦したのは、歴代のチャンピオンの二人で、74 連勝のケン・ジ

図 5 Watson のジョパディへの挑戦



ジェニングス氏と3億円獲得の賞金王のブラッド・ラター氏です。Watsonはもちろん初挑戦です。開発のコアチームは約30名ですが、それ以外にも数百名規模のメンバーが参画し、Watsonを完成させました。Watsonは解答の候補の確信度も計算します。

Watsonは、チャンピオン二人に勝つことができましたが、100%勝てるという自信があったわけではありません。過去の優勝者の解答した割合と正解率を見ると、例えばケン・ジェニングス氏の優勝した対戦の一つは、60問中60パーセントに解答権を得て、36問に答えました。解答時の正答率は、90パーセントでした。Watsonを開発し始めた2006年、できるだけ多くの問題に答えさせても正答率は14%、Watsonが自信を持った問題だけに答えさせても48%といったレベルでした。2007年、2008年、2009年と少しずつ正答率はアップしましたが、実際の対戦の3ヶ月前、2010年11月の時点で、ケン・ジェニングス氏の方が優位でした。Watsonの勝算は半分以下と分が悪い状況でしたが、本番では二人のチャンピオンに勝つことができました。

50年以上続いている番組ですが、二度と同じ問題は出題されないのので、過去問をいくら記憶しておいても答えることはできません。また、全てのジャンルから出題されるので、広範囲の知識や情報が必要になります。対戦中は、Watsonはネットワークにはつながっていません。新聞、百科事典、聖書、音楽の歌詞など、あらゆる分野の約2億ページ分のデータが使われました。コグニティブ・システムの特徴的なことは、まず、莫大なデータが基本になっており、データには構造化データと非構造化データがあることです。それらのデータを理解し、推論し、さらに、学習により計算の精度を高めていきます。

図6 学習するシステム

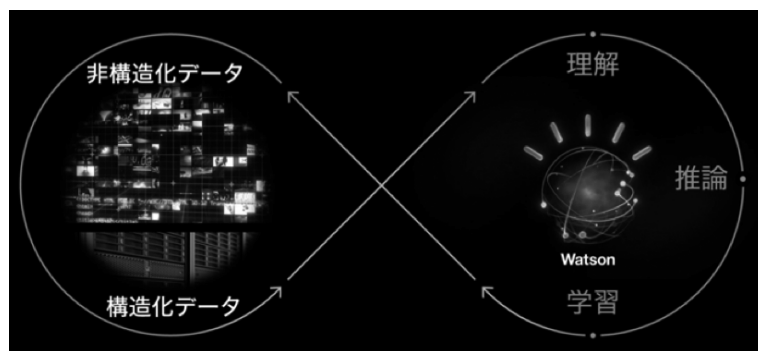


図 7 Watson への取り組み



Watson の場合は、過去問を学習に使いました。

当時の対戦は、全米で生放送されましたが、勝った瞬間、Watson を事業や業務に使いたいといった問い合わせが多数、IBM に寄せられました。複数の企業と事業検証を約 3 年間続け、2014 年 1 月に事業部を発足させました。クイズに遡ること 5 年前、2006 年から研究は始まっており、Watson の実現には、基礎研究所の過去 60 年の多くの研究成果が使われました。

コグニティブ・システムの実社会への応用

AI、ビッグデータ分析および IoT を含むコグニティブ・システムは、あらゆる分野や産業で利活用が進んでいます。そのうちのいくつかを紹介します。

1) 医療における支援

医療では新しい治療法や新薬が急速に増えており、5 年間で文献にして 2 倍になるとされています。ところが現場の医師が、新しい情報を勉強できる時間が月に平均して 5 時間しかありません。経験があり優秀な医師であっても、最新の情報を知っているか知らないかで、診断にしても治療にしても内容が異なってきます。新しいことを勉強する時間がない医師に代わり、Watson が膨大な医療データを学習しておき、医師が診断や治療法を決める支援をしています。米国の Memorial Sloan-Kettering がんセンターでは、当初、150 万のがんの症例と、42 種類あるがんの専門誌から 200 万ページを Watson に取り込みました。更に、がんセンター医師が 3 年間、Watson を教育し、現在、世界中の複

図 8 がんの診断支援など医療支援への活用



数の病院で活用されています。

東京大学医科学研究所は、ニューヨークのゲノム・センターと IBM が共同開発した Watson ゲノム分析を使って、白血病の診断支援の研究をしています。医科学研究所では遺伝子の変異データを Watson に入力し、Watson が読み込んだ 2,500 万件の論文から関係する複数の論文を分析します。その結果、病気の根本的な原因となった遺伝子の重要な変異を特定し、可能性のある白血病の種類と効果のある薬の候補を医師チームに提示します。Watson は、その根拠となる論文やレポートも列挙し、それらを医師チームが精査して、最終判断をします。2,500 万件の論文は、A4 の紙に印刷して積み上げると、4,000m の高さになります。これは、富士山より高く、人間には読み切れない量です。これに対して、コンピュータは、膨大な量であっても網羅的に短時間で分析することができます。

2) 創薬の支援

バイラー医科大学とは創薬支援の共同研究をしました。新しい薬の開発には、多くの人手と時間がかかります。プロテイン 53 (p53) というタンパク質はがん細胞を抑制する効果があります。したがって、p53 を活性化したり抑制する別のタンパク質や酵素が発見できると新しい薬につながります。この分野の研究は活発で、7 万件もの論文が発表されています。7 万件の論文を全部理解してから実験に取り掛かると、無駄な実験を省き、効率的に実験を進めることができます。ただし、1 日に 5 編の論文を読める人でも、全てを読み切るのに、38 年間かかってしまいます。この 7 万件の論文を Watson に入力して、これまで

図 9 創薬支援



に発見されたタンパク質の傾向を分析をしました。その結果を利用し、ベイルー医科大学単独で、数週間のうちに6個も新たに発見することができました。これまで、p53に作用する物質の発見は、世界中で多くても年に1つのスピードでした。このように、創薬のスピードを抜本的に変える可能性が期待されています。この取り組みは、日本が強い素材や材料の分野でも同様に適用できるはずです。

3) 製造現場での支援

AI や IoT は、意思決定の支援にも活用されています。特に日本では、現場のノウハウや専門家の知識をシステム化することに関心が高まっています。オーストラリアで最大の石油採掘会社である Woodside Energy 社の海底油田現場の事例があります。こういった現場では、予期せぬ事態や異常事態が起こることがあります。例えば、ポンプの圧力が急上昇したり、装置が高温になったり、異常音がしたりといった事態です。この現場では、作業が1日停止すると、5千万円の損害規模になります。そこで、できるだけ迅速に異常事態から回復する必要があります。しかし、急いで誤った処理をして、かえって状況が悪くなり、1週間、停止すると3億5千万円の損失になってしまいます。かつては現場に熟練の専門家が複数いて、異常事態の際には、過去の豊富な経験からバルブや機器を操作したり、複数のメーターの数値をチェックして、各種の異常状況に応じて、最善の対処をしていました。しかし、現在は、そのような熟練の専門家が少なくなっています。そこで、この会社では、過去20年間にわたる30万ページの操業レポートや保守レポートの内容を Watson に学習させま

図 10 石油採掘現場における迅速な意思決定の支援



図 11 サイバーセキュリティの対策支援



した。学習した Watson が、現場で作業員のサポートをしています。このシステムでは、AI だけでなく、ビッグデータ分析や IoT が効果的に融合され利用されています。

4) サイバーセキュリティの支援

サイバー攻撃は、大きな社会問題で、頻度も増えていますし、内容も高度化し防御も困難になっています。サイバー攻撃の詳細や、その防御方法については、多くのレポートや文献が世界中で作成されています。その数は、100 万件以上にもなります。これらのレポートを事前に学習、熟知しておけば、実際に同様のサイバー攻撃を受けたときに、現場のセキュリティーチームが迅速かつ的確に対応できます。情報量が多いので、人が全ての情報を熟知しておくことは困難ですが、AI が網羅的に情報を分析、整理しておき、現場のチームをサポートすることができます。

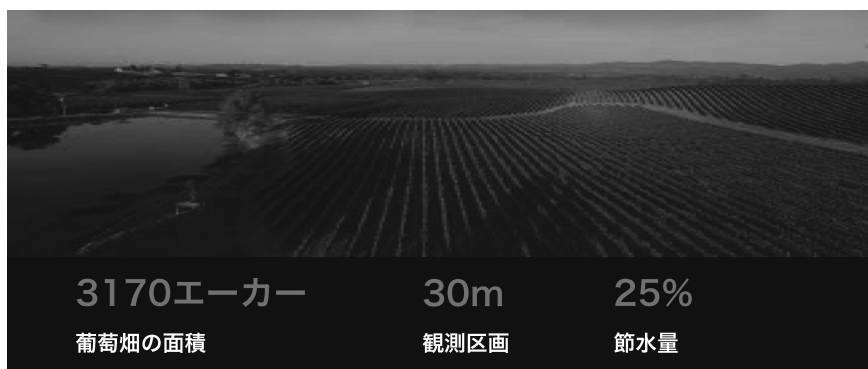
5) 農業の支援

AI や IoT を農業に活用する事例も増えています。例えば、米国カリフォルニア州の E&J ガロのワイナリーには、3,170 エーカーものぶどう畑があります。3,170 エーカーは、東京都の豊島区のサイズより少し大きな広さです。このぶどう畑に対して最適な量の水を最適なタイミングで与える実証実験をしました。広大なぶどう畑に対して、同じように水やりをするのではなく、30 平方メートル区画ごとに、その土地の水分量、傾斜、日当たり、ぶどうの状況などを、人工衛星からの情報に加え、畑のセンサーから収集されるデータや天候の精度の高い予測データなどを総合的に分析し、区画に応じた最適な水やりを実現することができました。その結果、各区画のぶどうの品質は上がり、全体での水の節水も 25%達成することができました。

6) 大気汚染改善の支援

IBM の研究所では、グリーン・ホライゾン・プロジェクトで、大気汚染の解決に取り組んでいます。これにも、AI、IoT、ビッグデータ分析が効果的に活用されています。まず中国で実施されましたが、二酸化炭素や PM 2.5 を減らすためには、実際にそれらの元となる工場や車の稼働を制限をする必要があります。もともと地域とタイミングを一律に決めて、一斉工場停止や車の規制を試行していました。しかし、これらの規制は、実際に大気に対する影響が最も悪くなるタイミングで実施するのが効果的です。工場からの排煙の量が多く、かつ、PM 2.5 の被害が最大になる風向きや風力、湿度が、あらかじめ正確に予想できれば、最悪の事態を避けることができます。精度の高い天候予測に加え、ソーシャルメディア分析などによる工場の排煙量の予測を 2 週間前に行

図 12 ワイナリーのぶどうデータと天候予測で水削減



い、最悪なケースを特定します。工場の操業休止を2週間前に計画することにより、経済的なインパクトは、最小限にし、大気汚染防止の効果を最大限にすることができました。そのために、1日当たり、34エクサバイトのデータを分析しています。2年間で、18%のPM 2.5の削減を達成しました。

7) 健康維持の支援

パーキンソン病は、最も深刻な疾病の一つで、日本でも、その対策が注目されています。パーキンソン病は、発病すると完治しませんが、適切な生活習慣や投薬により、その進行を抑えることができます。また、早期発見も重要です。我々は、製薬会社のファイザーと、パーキンソン病についての共同研究を進めています。家に、各種のセンサーを設置し、生活状況を分析し、病気の進行を防ぐことを目指しています。

図 13 AI + IoT による中国の CO₂ 排出量削減



図 14 パーキンソン病の新治療法への挑戦



ブロックチェーン

次に、ブロックチェーンについて少し説明しておきます。元々は、仮想通貨を実現するための技術として登場しましたが、仮想通貨や金融のサービスだけではなく、物流や資産管理など、より広い産業や分野での活用が始まっています。我々も、ブロックチェーンは主要な研究戦略分野の一つと位置付け、研究開発に力を入れています。

実際のビジネスの現場では、複数の企業が、品物、サービス、対価、資金、情報などをやりとりしています。その際に、参加企業間でのやりとりを台帳に記録しておく必要があります。通常、各企業は個別に、この台帳をコンピュータで管理します。ブロックチェーンでは、全ての参画企業が、分散台帳を使って情報を共有することができます。しかも、改ざんや不正などに対するセキュリティが強固で、管理も簡便です。また、新たな企業の参加にも柔軟に対応できます。

マースクラインは、海上輸送の会社です。例えば、南アフリカから冷凍食品をヨーロッパに輸送する際には、約 30 の会社や組織が関係してきます。以前は、紙の書類が使われていました。そのため、最終の輸送先に到着する前に、1 枚の書類がなくなると、1ヶ月以上も、入港できない場合もありました。ブロックチェーンを導入することにより、作業の効率も格段に上がり、セキュリティのレベルも高まりました。

図 15 ブロックチェーンの応用



図 16 ブロックチェーンを用いたグローバル・ロジスティクス



図 17 ブロックチェーンを用いた食品サプライチェーン



食品の安全性の確保も大変重要な課題の一つです。アメリカで食品に関連する数十の企業が協力して、ブロックチェーンを活用し、食品のトレーサビリティを実現しています。例えば、マンゴ어의場合、収穫をする畑から、輸送会社、倉庫会社、加工会社、包装会社、小売店、消費者まで、一貫して品質を保証することができます。

コグニティブ・システムの課題と展開

AI、ビッグデータ分析、IoTを含むコグニティブ・システムの応用事例を紹介してきました。更なる展開のためには、いくつかの課題を解決する必要があります。

ります。より自然な人とのコミュニケーション、創造的な作業の支援、少量のデータで学習、省電力での実行、人や物の近くで実行などがあります。このうち、いくつかを紹介します。

1) 創造的な作業の支援

料理のレシピ作りを支援するシェフ Watson を開発しました。ニューヨークで最も古い料理学校で、Watson が、自然言語で書かれた 3 万件のレシピを学習しました。レシピに加えて、食材の化学組成や特性、健康への影響、組み合わせ理論なども学習させました。料理には、文化的な要素も重要で、国や地域によって好まれる食材や、記念日に食される料理、例えば感謝祭にはターキーが食べられるといった情報も学習しました。

重要なことは、シェフ Watson が全部レシピを作り出すのではなく、使う人はシェフということです。シェフが主要な食材とスタイルを指定します。例えば、牛肉を主材にして、ポルトガル風+和風でといった具合です。そうすると、シェフ Watson は、材料の組み合わせの候補を多数提示してくれます。材料だけで分量や作り方の提示はしません。これまで考えもしなかった食材の組み合わせが、プロのシェフの創造力を喚起します。

映画の予告編作成も、創造的な作業の一つです。20 世紀フォックス社と共同で、『モーガン』という SF 映画の予告編の作成に挑戦しました。まず、既存の百本の映画と予告編を Watson に学習させました。学習した Watson に、『モーガン』を分析させ、予告編にふさわしい十数シーンの候補を選びました。

図 18 シェフワトソンが新レシピ作りを支援



専門家チームが、それらの候補シーンから、最終的に使用するシーンを選択し、シーンの順番を決定し、音楽を加えて、予告編を完成させました。通常は1ヶ月かかる作業ですが、Watson のサポートにより 24 時間で予告編を完成することができました。

2) 動的ボルツマンマシン

AI は、大量のデータを利用することが一般的ですが、常に大量のデータが用意できるとは限りません。データが少量であっても、学習ができて、精度の高い結果を出すことは、重要な技術課題の一つになっています。我々は、動的ボルツマンマシンという時系列データを学習できるアルゴリズムを新たに作り出しました。この成果は、Nature の Scientific Report にも採択されました。現在、オープンソースとして公開されています。これを使うと、小さな計算機資源でリアルタイムで学習することができます。異常検知、産業用ロボットのトレーニング、株価の暴落予測など、いくつかの応用の実証が進んでいます。

図 19 動的ボルツマンマシンによる時系列データの学習



図 20 動的ボルツマンマシンの応用



3) 脳型コンピュータ

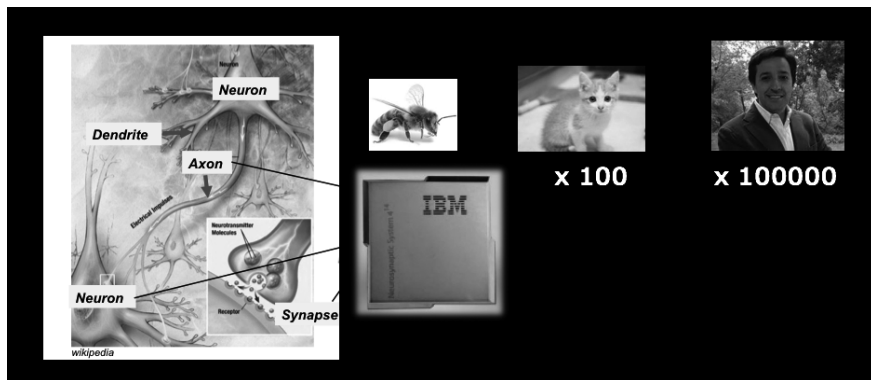
クイズ『ジョパディ!』のチャンピオンに勝った Watson は 5 ギガヘルツで動き、消費電力は 20 万ワットでした。ケン・ジェニングス氏とブラッド・ラター氏の脳は、それぞれ、20 ワットしか使っていません。半導体の集積度を上げてきましたが、微細化の限界にきています。人間の脳は、わずか 10 ヘルツで動き、最新の半導体チップより、格段に優秀です。AI を社会で更に広く活用するには、AI 実行時の高い消費電力の問題を解決する必要があります。

解決法の一つとして、脳の仕組みを利用したニューロモーフィック・コンピュータの研究開発をしています。これは、脳の神経網のニューロンやシナプスの構造を模して電子回路で実装したものです。2014 年に完成した第二世代のチップには、ニューロンが 100 万個、シナプスが 2 億 5600 万個入っています。消費電力は、通常の CPU の 700 分の 1 から 1000 分の 1 で、70 ミリワットです。100 万ニューロンは、生物では、蜂の脳ほどです。猫は、蜂の脳を 100 個、組み合わせる必要があります。人間の脳は、猫の 1,000 個分、蜂の 10 万個分となり、やはり人間の脳と同等のシステムを実現することは、まだまだ難しく、技術的なブレイクスルーが必須です。現在も、この仕組みを利用して、高性能で低消費電力のコンピュータの研究を進めています。

4) 量子コンピュータ

量子コンピュータには、大きく二つの方式があります。量子ゲート方式と量子アニーリング方式です。量子アニーリング方式は、実用化では先行していますが、適応範囲が限られています。これに対して、量子ゲート方式は、多くの

図 21 脳型コンピュータは 1000 倍の省エネ



分野での応用が期待されています。

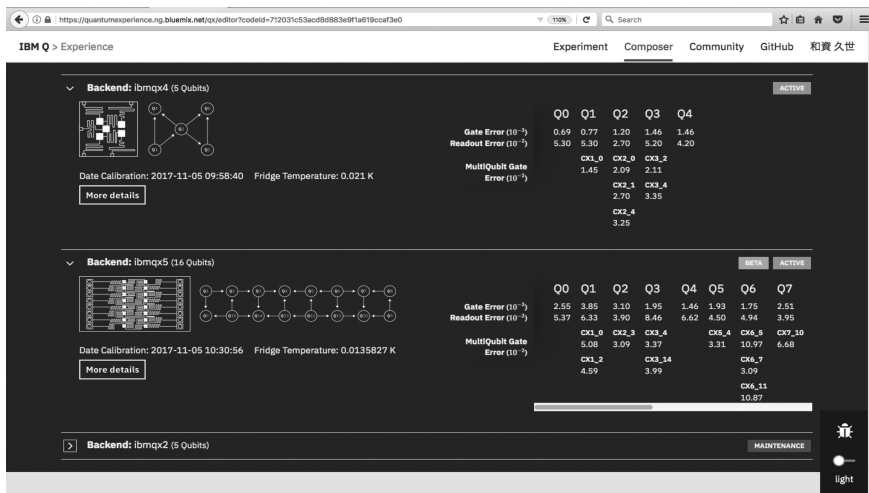
我々は、世界初の量子ゲート方式の量子コンピュータを実装し、2016年5月から、IBM Q Experience というプログラムを発表し、無料でクラウド上で公開しています。現在、世界で9万人以上の方が、このプログラムを使って、Watson 研究所に設置された5量子ビットと16量子ビットの量子コンピュータにアクセスしています。量子コンピュータ用のプログラムが容易に作成できる開発ツールキットやシミュレータも提供されています。ゲート方式の量子コンピュータを、クラウド上で誰もが使えるようにしたことは、画期的です。

2018年には、IBM Q HUB というプログラムを発表し、世界4か所の大学を中心に、新しい応用を検討し実証するコンソーシアムを複数企業と推進してい

図 22 万能量子コンピュータを目指して



図 23 量子コンピュータのモニター画面



ます。日本では、慶應義塾大学がハブとなり、現在、4社が参画しています。問題によっては、通常のコンピュータで100年以上かかる計算が、量子コンピュータでは、数秒で実行することもできます。量子コンピュータの応用が期待されている分野は、新材料の発見や創薬、最適化問題、AIにおける機械学習などです。量子コンピュータの実行には、ほとんど電力を使わないので、前述のAI実行の消費電力問題の解決にもつながります。ただし、絶対零度への冷却にはエネルギーが必要です。

5) 世界最小コンピュータ

AIやビッグデータ分析を、実際にその結果を利用する人や物のできるだけ近くで実行するという要求は高まっています。ネットワークが高性能になっても、ネットワークの遅延をゼロにすることは不可能だからです。我々は、その一つの形態として、世界最小コンピュータの開発を進めています。サイズは、100ミクロン角のレベルです。超小型のセンサーは各種ありますが、これは、単独で動作するコンピュータなので、CPU、メモリー、バッテリー、通信モジュールなどが一体化されています。一個のチップで数円の製造コストを目指すことにより、塗装の中に入れてたり、スプレーで吹き付けたり、畑にばらまいたり、いろいろな利用形態が可能になります。安全な食品を目指したトレーサビリティにも使えます。

図 24 世界最小コンピュータ



まとめ

AI, ビッグデータ, IoT など先進デジタル技術を活用したビジネスや社会の変革は, 世界中で進んでいます。日本でも, すべての人が, これらのデジタル技術を便利な道具として, 当たり前, 手軽に使えるようになることが大切です。先進デジタル技術を活用することにより, 日本の品質力や現場の知恵やノウハウを組み合わせシステム化し, 世界の中でリーダーシップを取ることができます。また, 先進デジタル技術の進展には, ソフトウェアのみならず, 微細化技術, 材料技術, 品質技術など日本が強い分野の応用も必須です。日本の独創性や強みを十分に活用するためにも, 若い世代から先進デジタル技術を正しく理解し, 使えるようになることが重要です。

(くせ・かずし 日本 IBM 株式会社 執行役員 最高技術責任者)

Japanese SMEs in the context of the zombie firm hypothesis*

GOTO Yasuo**, Scott WILBUR***

Abstract

In Japan, the “soft budget problem,” by which banks loosen their lending stances toward long-term client firms despite worsening business conditions, has attracted attention particularly in connection to so-called “zombie firms,” financially weak firms sustained by discounted interest rates and evergreen lending which have become a major research and political interest in recent years. In this paper, we focus on zombie firms among small and medium-sized enterprises (SMEs), a corporate category that has hitherto received less consideration in the discussion about Japan's zombie firms. We find that: (1) many zombie firms exist among SMEs; (2) some zombie firms eventually emerge from zombie status; (3) once a firm becomes a zombie, its probability of exit increases especially among SMEs; and (4) the economic performance of exiting zombie firms is worse than those of exiting non-zombie firms.

Keywords: Zombie firm, Soft-budget problem, Evergreening, Small and medium-sized enterprises (SMEs), Firm size, Financial constraint

JEL classification: P43, L25, M13, G32

* This work was supported by JSPS KAKENHI Grant Number JP26285068, a 2018 Murata Science Foundation research grant, and the Banque de France fellowship program at the EHESS-Fondation France-Japon, and conducted as a part of 2018 fiscal year project research with the Kyoto Institute of Economic Research, Kyoto University (KIER) Joint Usage and Research Center. It utilizes micro data in the form of questionnaire information from the Ministry of Economy, Trade and Industry (METI) Basic Survey of Japanese Business Structure and Activities. The authors are grateful for helpful comments and suggestions by Yoshiaki Shikano (Doshisha Univ.), Nobuyoshi Yamori (Kobe Univ.), Kentaro Imai (Osaka Univ.), discussion paper seminar participants at RIETI, President Makoto Yano, Vice President Masayuki Morikawa, Senior Fellows Yoko Konishi and Yoichi Sekizawa, and comparative politics seminar participants at the University of Southern California.

** Seijo University and Research Institute of Economy, Trade and Industry.

*** Yale University, USA.

I. Introduction

So-called “zombie firms” have been widely discussed as a key factor in Japan’s sluggish economic growth in the past two decades, a period commonly known as the “lost decades.” Zombie firms are generally defined as insolvent businesses that remain in the marketplace instead of pursuing restructuring or bankruptcy. First reported by journalists in the late 1990s and early 2000s (Henry 1997; Chandler 1999; Landers 1999; Fackler 2003), zombie firms were subsequently criticized by economists, who argued that they distorted market competition and hurt healthy firms by depressing profits and discouraging investment, and thereby hindered Japan’s macroeconomic revitalization (Hoshi 2006; Caballero, Hoshi, and Kashyap 2008; Hoshi and Kashyap 2011). Since the global financial crisis, Japan’s encounter with zombie firms has become a cautionary lesson for other recessed economies seeking to avoid long-term stagnation, and policymakers in places as varied as the United States, the United Kingdom, the European Commission and China have expressed a strong desire to stop the spread of zombie firms (Summers 2012; Bank of England 2012; Stothard 2013; Zhongguo xinwen wang 2015).

While the notion of zombie firms has gained international prominence because of Japan’s experience, recent questions about conceptualization have reopened the debate about these firms’ precise role in Japan’s post-bubble economy. Most notably, challengers of the dominant zombie firm argument have asserted that these firms should conceptually include the criteria of profitability and evergreen lending (Fukuda and Nakamura 2011; Nakamura and Fukuda 2013), in addition to the criterion of discounted interest payments used in earlier studies (Caballero, Hoshi, and Kashyap 2008). Measurement with this revised definition suggests that the ratio of zombie firms in fact declined from the early 2000s, meaning that zombie firms did not persist in significant numbers throughout the 2000s, and thus do not explain Japan’s low growth in the latter part of the lost decades.

We are interested in this ongoing debate surrounding zombie firms, not just for its significance to understanding Japan’s lost decades, but also for its relevance to other economies concerned about zombie firms’ allegedly malefic effects and keen to learn

from Japan's experience. However, we believe that the current scholarship on zombie firms in Japan suffers from a key deficiency. Namely, it primarily focuses on stock exchange-listed firms that tend to be large-sized enterprises, and overlooks the presence of zombie firms among small and medium-sized enterprises (SME), the corporate category that actually represents the majority of Japanese businesses.

In this paper, we examine the presence of zombie firms among small firms in Japan during the lost decades. Our contribution is twofold. First, we employ firm-level data from the Ministry of Economy, Trade and Industry's Basic Survey of Japanese Business Structure and Activities (BSJBSA) to assess the existence of zombie firms among Japanese SME. Our use of this database allows us to make a relatively broad inference about the zombie ratio among small firms, which is an improvement over earlier studies that examined the ratio with a limited sample size (Imai 2016). Second, we explore corporate characteristics of these firms, including duration of zombie status, market exit, and employment and sales activity at the time of exit. Our findings about these characteristics add refinement to the debate about zombie firms, since there has hitherto been little attention to important zombie attributes like survival time, with the recent exception of Nakamura (2017). Consequently, they suggest issues for consideration in future research on this topic.

We find that: (1) many zombie firms exist among SME; (2) some zombie SME eventually emerge from zombie status; (3) once a firm becomes a zombie, its probability of exit increases especially among SME; and (4) the economic performance of exiting zombie firms is worse than that of exiting non-zombies. These results carry considerable generalizability for the broader population of Japanese SME, given their origin in BSJBSA micro-data covering a wide range of firm sizes and behaviors.

The paper is structured in the following way. In the "Literature Review" section, we revisit the debate on zombie firms in Japan and elsewhere, to show why SME should be investigated for zombie firms. In the "Theory" section, we offer a hypothesis for why the SME category may exhibit a high ratio of zombie firms, focusing on the role of Japan's credit guarantee system in supporting weak firms' access to financing. In the "Data and Method" section, we describe the merits of the quantitative database from which we draw our sample of SME for analysis, and outline our paper's empirical

strategy. In the “Results” section, we quantitatively assess the level of zombies and their corporate characteristics. In the “Conclusion” section, we summarize our findings and discuss their implications for understanding Japan’s lost decades and the wider study of zombie firms.

II. Survey

Zombie firms have long been associated with Japan’s lost decades. Initially identified in the late 1990s and early 2000s by journalists who labeled prominent overleveraged firms like Yamaichi Securities and Daiei as “zombies” (Henry 1997; Wehrfritz and Takayama 2002), zombie firms became a distinct topic of academic study in the 2000s, when economists noted a wider trend of insolvent businesses that were kept alive by various forms of financial support, instead of being forced to undergo corporate restructuring or liquidation (Katz 2003). Early studies of Japan’s post-bubble economy showed that increased lending to highly indebted firms lowered their profitability (Sekine, Kobayashi, and Saita 2003), and that industries with high concentrations of zombie firms had weak productivity performance (Ahearn and Shinada 2005), suggesting that zombie firms negatively affected Japan’s economic recovery. Studies also demonstrated that Japanese banks’ nonperforming loan problems made it more likely for them to give credit to financially-troubled firms, implying that zombie firms received life support in a perverse process of “unnatural selection” that simultaneously reduced the credit available to normal borrowers (Peek and Rosengren 2005).

Zombie firms’ malefic role in Japan’s stagnation was most explicitly and influentially asserted by Caballero, Hoshi, and Kashyap (2008) (henceforth “CHK”), who measured the prevalence of zombie firms on the Tokyo Stock Exchange between 1981 and 2002 using a clear conceptual criterion of firms that paid discounted interest rates below the hypothetical prime rate. CHK found that nearly one-third of the firms in their sample received this form of financial assistance in late 1990s and early 2000s, which signified strong evidence for their contention that zombie firms caused “congestion” in Japan’s marketplace by failing to exit, and thereby hurt healthy firms and overall economic vitality. CHK tested this hypothesis and discovered that firms identified as

zombies both reduced productivity in sectors where their presence was higher, and lowered their more profitable competitors' investment and employment growth by impeding the reallocation of capital and human resources. These results led CHK to argue that zombie firms created deflationary pressures in the wider economy, and possibly caused some healthy firms to become zombies as well.

The magnitude of CHK's findings gave the notion of zombie firms much greater weight, and shaped the ensuing scholarly and policy debates about Japan's lost decades. Many economists cited CHK's zombie firm argument as a persuasive and at least partial explanation for Japan's long-term stagnation (Griffin and Odaki 2009; Kobayashi 2009, 339; Garside 2012, 90–94), while international organizations like the International Monetary Fund and OECD referenced CHK in calling on Japan to make far-reaching economic policy reforms (Lam and Shin 2012, 3; Arbatli et al. 2016, 8; OECD 2015, 23). Moreover, in the aftermath of the global financial crisis, central banks like the Bank of England mentioned CHK in noting that lessons should be drawn from Japan's extension of credit support to weak firms during the lost decades (Bank of England 2012, 29–31), and leading economic policy voices like former US Treasury Secretary Larry Summers and Liu He, the top economic advisor to Chinese President Xi Jinping, expressed concern about the need to remove zombie firms from their respective economies (Summers 2012, 72; *Zhongguo xinwen wang* 2015). Increased attention by economic policymakers outside Japan suggests that it has become conventional wisdom that zombie firms were a prime reason for Japan's economic malaise after the banking crisis in the 1990s, and a potential threat to other economies trying to recover after the 2008 crisis.

Notwithstanding the widespread influence of CHK's study on the idea of zombie firms, some scholars have questioned the correctness of conceptualizing these troubled firms on the sole basis of discounted interest rates. Most notably, Fukuda and Nakamura (2011; 2013) (henceforth "FN") contended that below-prime rate interest rates are insufficient to indicate zombie firms, because Japan adopted a quantitative easing monetary policy in the 2000s that enabled many firms, including healthy ones, to borrow at very low interest rates, particularly since the policy accelerated competition between banks and put downward pressure on lending rates. To more accurately gauge

the presence of zombie firms, FN proposed the addition of two conceptual criteria, profitability and evergreen lending, to CHK's interest rate criterion. Based on this revised definition, FN estimated that the ratio of zombie firms in their sample from the Tokyo Stock Exchange peaked in 2001 at less than 15 percent of firms — a level that was roughly half of CHK's estimate — and that the ratio subsequently declined and remained below 5 percent of firms throughout the 2000s until the global financial crisis.

Since FN offered their revised conceptualization, it has quickly gained traction among economists investigating zombie firms in Japan and elsewhere (Kwon, Narita, and Narita 2015; Imai 2016; Nie et al. 2016; Tan, Huang, and Woo 2016). This trend suggests that a consensus may be emerging around the relative merits of FN's more strenuous definition, possibly because its additional conceptual criteria help it avoid the Type 1 and Type 2 errors inherent in CHK's definition, and because its estimate of the zombie firm ratio more closely tracks the actual amount of nonperforming loans at major Japanese banks.

FN's enhancement to CHK's original conceptualization has reopened the debate about zombie firms' role in Japan's lost decades, and proposes that scholars view the effects of zombies on Japan's low growth much more conservatively, especially in the period after 2001. Nonetheless, while we appreciate the creative significance of CHK's landmark argument as well as the enhanced conceptual validity and empirical findings of FN's counterargument, we agree with the observation by Imai (2016) that both these arguments place exclusive emphasis the existence of zombie firms among stock exchange-listed firms which are typically large enterprises, whereas most businesses in Japan (and virtually all other economies) are small and medium-sized enterprises (SME) which do not publicly trade their stock. In Japan's case, SME have traditionally constituted more than 99 percent of the total number of firms in the economy, provide roughly 70 percent of total employment (Economist Intelligence Unit 2010, 6), and contribute 50 percent of national GDP (Yoshino and Wignaraja 2015). Therefore, the current debate's inattention to this important corporate category is a significant omission, and should be amended to provide fuller understanding of zombies' place in Japan's recent economic history.

In this paper, we aim to contribute to the debate about zombie firms in Japan by

examining the presence of zombies among SME. We have two goals. First, we seek to identify the ratio of zombie firms among SME in the economy over time using a large database, the BSJBSA. In attempting this first goal, we estimate the ratio of zombie firms in basically the same way as CHK and FN, but with this database that gives us insight into a significant firm category that these previous studies overlook. We are not the first to examine the zombie ratio among SME, but our use of this database managed by the Japanese government affords us a much larger sample size for estimating the ratio compared with earlier research (Imai 2016).

Second, we seek to uncover properties of zombie SME such as survival time in zombie status. While prior scholarship on zombie firms has addressed the overall zombie ratio in listed firms and specific sectors, there has been little work to date on the length of time that zombie firms remain as zombies. One exception is Nakamura (2017, 15), who finds that large zombie enterprises between 1995 to 2008 stayed as zombies for an average of slightly over two years, a much shorter period than commonly assumed. We are interested in performing a similar analysis on small firms, and more generally illuminating the corporate characteristics of zombie SME.

Our pursuit of these goals is especially motivated by our interest in potential disparities for the SME category that may correlate with small firms' utilization of Japan's credit guarantee system. This system, which was originally established in 1937, was expanded in 1998 to enhance small businesses' access to financing from private banks in the wake of a domestic "credit crunch" and the Asian financial crisis. It grew to become the largest credit guarantee system in the world during the 2000s in terms of outstanding obligations (Small and Medium Enterprise Agency 2016a, 3), and was notable in providing high levels of coverage — credit guarantees of 80 and 100 percent — to nearly 4 million SME users.

Given that the system's substantial guarantees significantly reduced banks' potential default risk, the system stimulated private lending to firms whose creditworthiness might otherwise have prevented them from access to finance. It also possibly generated an arrangement conducive to zombie firms, since banks were encouraged to lend to borrowers with greater likelihood of repayment problems. Thus, we are interested to know about the zombie firm situation among SME, which could

indirectly implicate the support function of the credit guarantee system.

III. Data and Method

In our empirical analysis we use the METI Basic Survey of Japanese Business Structure and Activities (BSJBSA). This survey contains data on the conditions of diversification, globalization, and soft economy of Japanese firms, and is generally used by METI to inform and learn from its own economic policymaking. It covers firms with 50 or more employees and whose paid-up capital or investment are higher than ¥30 million in industries including mining, manufacturing, wholesale and retail trade, food services, and other service industries. Though the BSJBSA does not include data from microenterprises, the SME category which contains the most credit guarantee system users, because the survey encompasses all firms that meet these other size criteria, it addresses a large range of firms and provides a strong advantage in the context of our research.

Our basic empirical strategy consists of (i) identifying zombie firms using BSJBSA micro-data, (ii) investigating the characteristics of these zombie firms, and (iii) conducting regression analysis on the relationship among the zombie identifier and other covariates. In step (i), the fundamental task is how to identify zombies. Three measures have been proposed in the literature. First, CHK parsimoniously define zombie firms as companies whose interest payments are lower than the hypothetical risk-free interest payments (Caballero, Hoshi, and Kashyap 2008, 1948). Second, FN add the criteria of profitability and evergreen lending to CHK's definition. Profitability is important, FN argue, because firms with earnings before interest and taxes (EBIT) that exceed the firms' hypothetical risk-free interest payments are generally healthy, and such firms' good financial standing may in fact explain why their interest payments are lower than what the prime rate would stipulate. Evergreening lending is also relevant, since financially troubled businesses may have their loans rolled-over by their banks when they face difficulties with repayment (Fukuda and Nakamura 2011, 1126–27). Third, Imai agrees with the FN definition in principle, but uses a longer period to evaluate firm profitability. This modification helps Imai's definition avoid the problems of

Table 1. Summary Statistics

	(unit)	mean	median	s.d.	total numbers of obs.	annual average of firm numbers	sample period
workers	persons	470.03	147.00	1882.79	180294	30049	
capital	million yen	1510.92	90.00	14492.73	180294	30049	2009FY
sales	million yen	22392.76	4354.50	152341.40	180294	30049	-2014FY
ROA	(yen/yen)	0.0404	0.0326	0.1287	180183	30031	

misidentifying healthy firms as zombie firms if the healthy firms experience temporary profit declines, and misidentifying zombie firms as healthy firms if the zombie firms have temporary profit increases (Imai 2016, 94). The definitions are expressed as follows:

$$I_{i,t}^* = r_t^{short} * B_{i,t-1}^{short} + \left(\frac{1}{5} \sum_{j=0}^4 r_t^{long} \right) * B_{i,t-j}^{long} + \min(r_t^{cb}, \dots, r_t^{cb}) * Bonds_{i,t-1}$$

where $I_{i,t}^*$: minimum required interest, $r_t^{short/long/cb}$: interest rate,

$B_{i,t}^{short/long}$: borrowings from banks,

$Bonds_{i,t-1}$: issued amount of corporate bonds

If $I_{i,t} < I_{i,t}^*$, the firm is regarded as zombie (CHK criterion)

where $I_{i,t}$: actual interest paid

If $I_{i,t}^* > PROF$ and $B_{i,t}^{long} > B_{i,t-1}^{long}$, the firm is regarded as zombie

(FN criterion)

where PROF: profit before interest and taxes

If $\sum_{m=0}^T (PROF_{i,t-m}) < 0$, and $B_{i,t}^{long} > B_{i,t-1}^{long}$ the firm is regarded as zombie

(Imai criterion)

Our analysis compares the zombie characteristics reported by each of these measures. Table 1 provides descriptive summary statistics for our data.

IV. Results

Identification and Comparison of Zombie Firm Ratios by Different Definitions

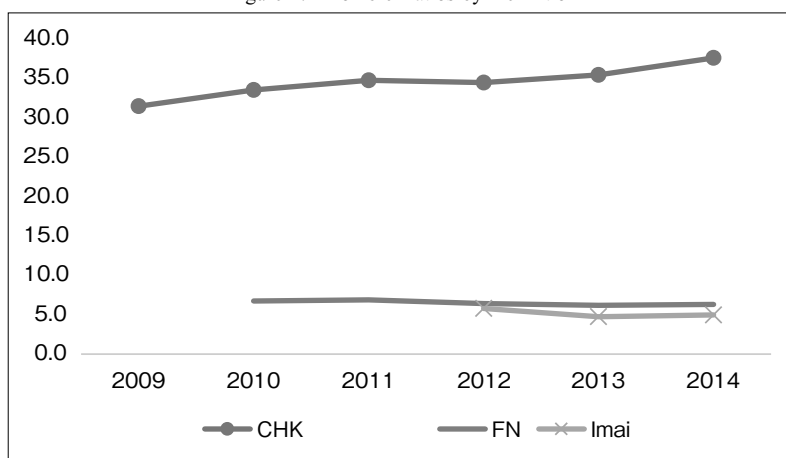
Figure 1 shows the zombie firm ratios according to the respective definitions of CHK, FN and Imai, which are calculated as a percentage of all firms in our sample. The

end year of the sample period is fiscal year 2014, but the start year for each definition's estimate is different: 2009 for CHK, 2010 for FN, and 2012 for Imai. Short-term and long-term bank borrowing and corporate bond issuance amounts are used to identify zombie firms, but the BSJBSA only begins covering this data from 2009. In addition, the start year is delayed for the FN calculation because it considers differences with the borrowing amount in the previous year, and for the Imai calculation which uses multiple year earnings (three years in this paper) to identify zombie firms.

Four points can be observed in Figure 1. First, the CHK definition classifies many more firms as zombies than do the other two definitions. Second, the FN and Imai definitions elicit a comparable zombie ratio, though the Imai definition's ratio is slightly lower. These two points are similar to the findings of Imai (2016). Third, while the zombie ratio continues to decrease in both the FN and Imai definitions, the ratio in the CHK definition continues to rise, suggesting that the respective estimates of the CHK definition and the FN and Imai definitions not only have a level gap, but also move in different directions.

The biggest reason for this divergence is that the CHK definition uses the real payment rate, whereas the FN and Imai definitions use revenue. Since both CHK and FN/Imai compare these different indicators with an "ideal payment rate" based on the prime rate, their definitions elicit starkly dissimilar zombie ratios. On the one hand, real

Figure 1. Zombie Ratios by Definition



Note: Unit is percentage
Source: Authors

payment rates and revenues may be linked. In particular, from the viewpoint of the business cycle, corporate earnings typically worsen during economic recessions, and real payment rates also decrease in response to reductions in policy interest rates. Yet what is decisively different is that in normal bank behavior related to credit risk, firms with low profits should have high interest rates. With the CHK definition, however, zombie firms may not only be weak firms that receive preferential interest rate treatment, but also sound businesses with favorable interest rates based on normal examination criteria. By contrast, the FN and Imai definitions use fundamental corporate earnings, so they more accurately capture underlying corporate strength. Because the Imai definition also takes into account temporal fluctuations caused by special factors, we prefer to use it in this paper.

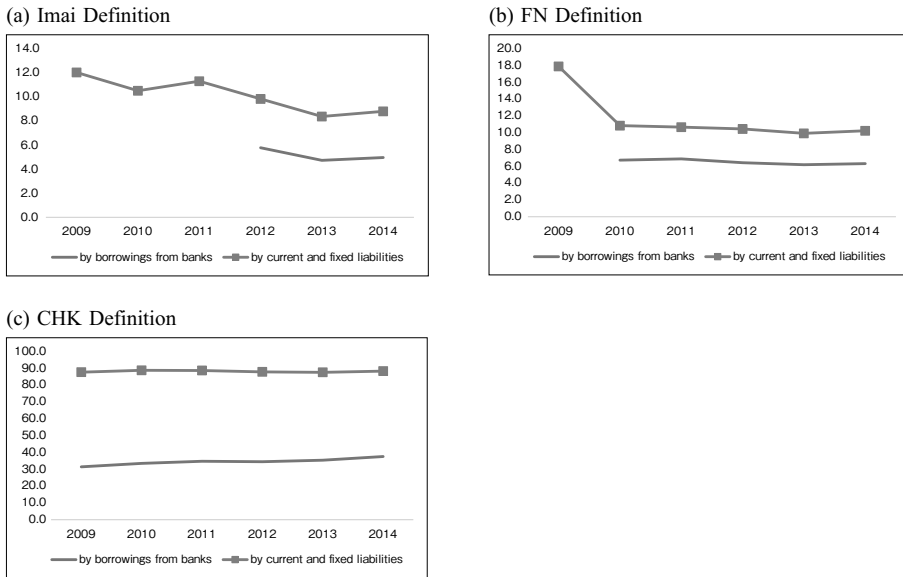
Our study is limited in that it examines data on short-term and long-term bank borrowing which the BSJBSA only started to collect from 2009. However, the BSJBSA also contains earlier data on current and fixed liabilities which are closely related to bank borrowing. Current liabilities consist of short-term bank loans, borrowings from other financial institutions, and inter-company liabilities (accounts payable). Fixed liabilities include long-term bank loans, borrowings from other financial institutions, corporate bonds, and intercompany receivables (accounts receivable). Regardless of firm size, firms' largest liabilities tend to be bank borrowing (Small and Medium Enterprise Agency 2016, 285). Here, we calculate the value corresponding to the zombie firm ratio using current and fixed liabilities as proxy variables of bank borrowing. However, since this is a reference value by proxy variables, it is important to note that it is not the zombie ratio itself.

Figure 2 compares the original value using bank borrowing and the estimated value using current and fixed liabilities for the CHK, FN, and Imai definitions. It shows that the ratio based on the CHK definition is very different, while the gap between the FN and Imai ratios is small and their time series changes are similar. As mentioned earlier, this paper prefers the Imai definition of zombie firms, which it judges to be meaningful in analyzing long-term data based on estimated values for current and fixed liabilities.

Based on this understanding, Figure 3 shows the trend of estimated values based

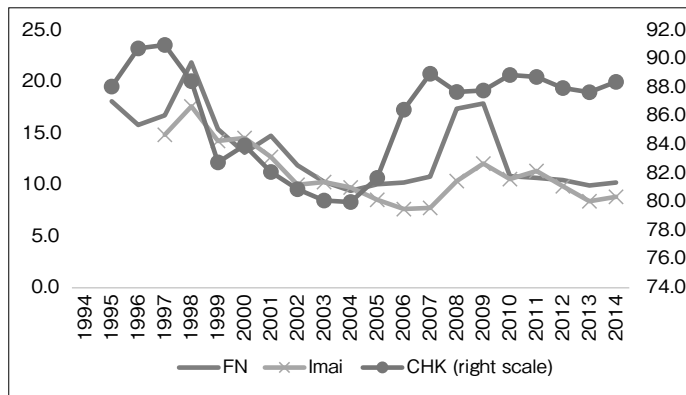
on current and fixed liabilities (hereafter referred to as debt-based values). It is clear that the trend is quite different between the CHK and FN/Imai ratios. First, there is a large disparity between the CHK ratio (shown on right axis), and the FN/Imai ratios as the baseline level. The three ratios initially exhibit parallel movement until the mid-2000s, with the values according to each definition gradually declining from the mid-1990s

Figure 2. Calculated Zombie Ratios by Types of Debt



Note: Unit is percentage
Source: Authors

Figure 3. Debt-Based Zombie Ratios



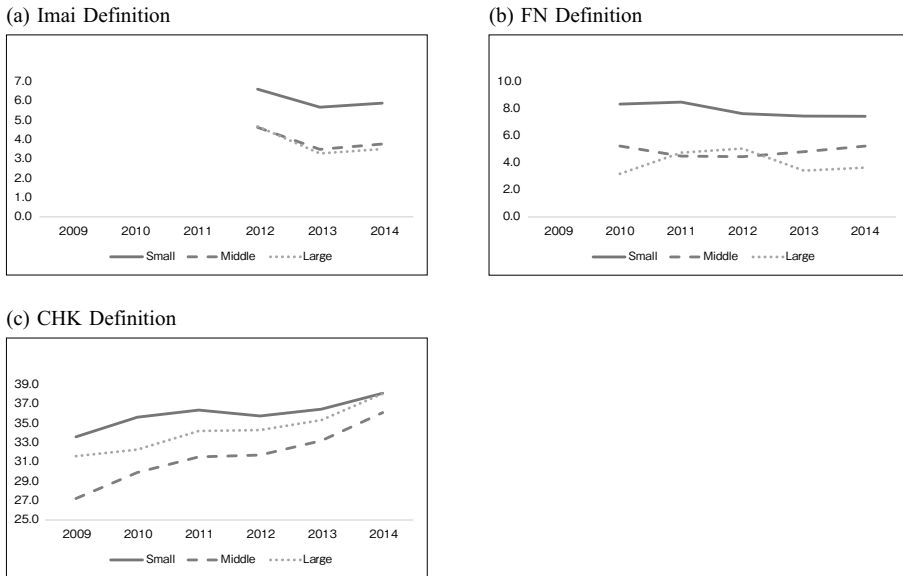
Note: Unit is percentage
Source: Authors

(when the data begins) over the ensuing ten years. From the mid-2000s onward, however, there is a noticeable disparity. The CHK ratio rapidly soars again to a high level, whereas the FN/Imai ratios increase once after 2008 before falling again, and remain close to each other during the mid-2000s.

Characteristics of Zombie Firms

In this section we investigate the relationship between different corporate attributes and the zombie ratio using the Imai definition. First, Figure 4 shows the zombie ratio by firm size according to capitalization. Small SME have less than ¥100 million in equity capital, medium-sized SME have between ¥100 million and ¥1 billion in equity capital, and large firms have more than ¥1 billion in equity capital. The results show that the zombie ratios for the two SME categories are uniformly higher than the ratio for large firms. This finding is consistent with Imai (2016) and corroborates the argument that smaller-sized firms have a greater tendency to be zombie firms, a possibility that was not examined in the original CHK study on zombie firms which looked only at large enterprises.

Figure 4. Zombie Ratio by Firm Size



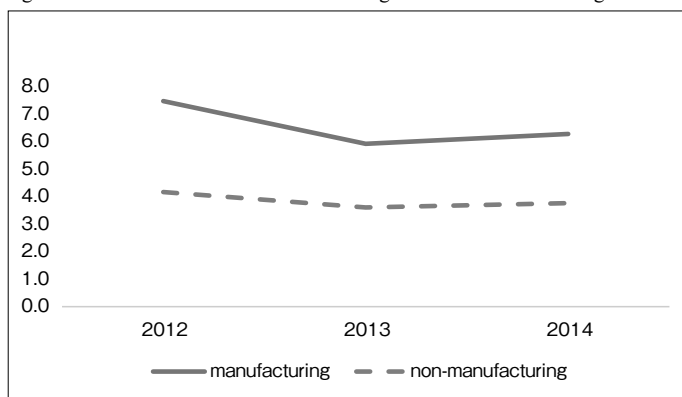
Note: Unit is percentage
 Source: Authors

Next, Figure 5 depicts the situation in Japan’s manufacturing and non-manufacturing industries. It shows that the manufacturing industry contains a higher zombie firm ratio than the non-manufacturing industry. This figure is based on the Imai definition, yet the same outcome is also observed with the CHK and FN definitions. However, care is needed in interpreting these results, since the BSJBSA widely covers the manufacturing industry but is still in the process of expanding its coverage of the non-manufacturing industry. Additionally, it does not include data for microenterprises, many of which are in the non-manufacturing industry, so there is a high possibility of bias. Therefore, while it is possible to point out that many zombie firms exist in the manufacturing industry, one must be cautious about claiming that the ratio is higher for this industry than for the non-manufacturing industry.

Figure 6 shows the zombie ratio by specific industry sector. It includes 22 sectors based on SNA classification. Manufacturers of material and consumer goods are noticeable as two sectors with high zombie ratios. Results for the non-manufacturing industry require careful evaluation for the reasons stated above.

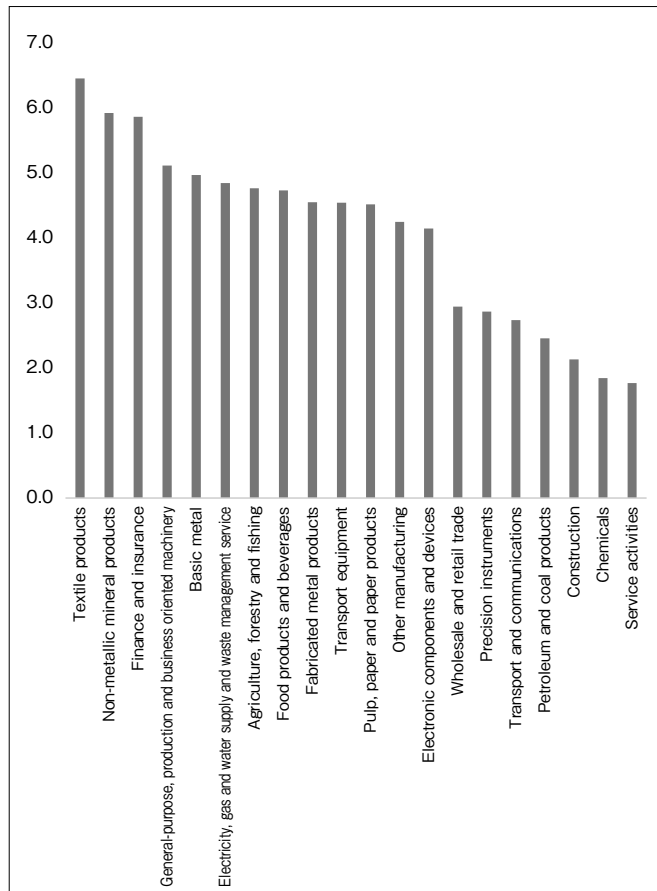
Finally, Figure 7 shows the ratio by firm age. Here, firm age is defined as the elapsed years since the establishment year. In all definitions including the Imai definition, the zombie ratio increases as firm age increases. Table 2 shows this from another angle. When the average age of zombie firms and non-zombie firms are calculated by each definition, zombie firms are found to be older. From Figure 7 and

Figure 5. Zombie Ratios of Manufacturing and Non-Manufacturing Industries



Note: Unit is percentage
Source: Authors

Figure 6. Zombie Ratios by Industry Sector



Note: Unit is percentage

Source: Authors

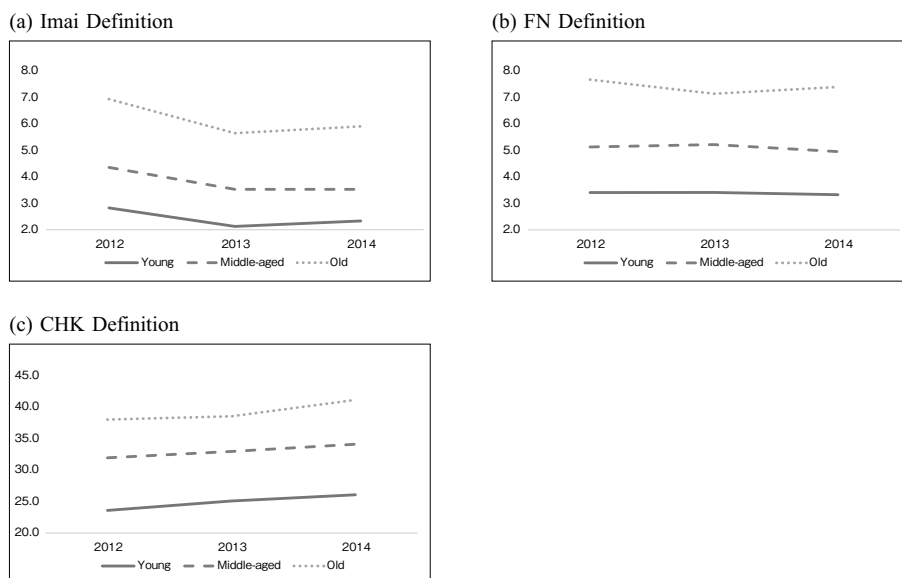
Table 2, we see that there is a positive correlation between zombie formation and age.

Regression Results

Based on the above results, we conduct a regression analysis on zombie firms. First, we estimate the probability of a firm’s identification as a zombie using a panel logit model, with a dummy dependent variable taking the value of “1” if the firm is a zombie and “0” if it is not. Table 3 shows the results of the fixed effect model selected by Hausmann’s test. As expected, the value of the variable representing the business situation (ROA in this case) is predominantly negative. However, both firm size (log of

capital amount) and firm age (elapsed years since establishment year) are not significant.

Figure 7. Zombie Ratios by Firm Age



Note: Unit is percentage
Source: Authors

Table 2. Average Age of Zombie and Non-Zombie Firms

		Imai	FN	CHK
not zombies	average age (years)	45.64	44.23	43.30
	# of firms (firms)	72,275	107,795	76,886
zombies	average age (years)	52.12	49.25	46.85
	# of firms (firms)	2,608	6,623	40,604

Table 3. Regression Result by Fixed-Effect Panel Logit Model

dep. var.:	sample period: 2013-2014					
	(a) without industry dummies			(b) with industry dummies		
	Coef.	S.D.	p-value	Coef.	S.D.	p-value
Imai-zombie dummy						
roa	-6.7166	0.8591	0.0000	-6.9195	0.8715	0.0000
capital (log)	0.0696	0.1988	0.7260	0.0498	0.1974	0.8010
age	-0.0005	0.0185	0.9780	-0.0005	0.0186	0.9770
year dummies	Yes			Yes		
industry dummies	No			Yes		
log likelihood	-1840.3			-1829.9		
p-value, LR chi2	0.000			0.000		
# of obs.	7514			7514		
# of groups	1932			1932		

These results are logical because firms' business conditions largely center on profit, a factor which strongly influences the probability of zombie formation. Furthermore, as firms increase in size, firms with higher profits increase, while as firm age increases, profitability tends to decline. In fact, this tendency is easily confirmed by OLS (Table 4).

Based on these results, it is clear that the probability of zombie formation is not simply determined by a firm being a SME or having high age, but rather by its business conditions. In other words, there is no reason why zombie formation is only possible among large firms.

Initially, academic and policy interest in zombie firms was based on the notion that firms with poor prospects for revival were greatly prolonging their lives. Next, we examine this issue of survival in zombie status. When we look at the parameter of the lagged variable (L1.crit_Imai) indicating that a firm was identified as a zombie in the previous term, we see that it is significantly negative (Table 5). This means that if a firm holds zombie status in one period, its probability of keeping zombie status in the next period decreases. This result is somewhat surprising, given that zombie firms are commonly portrayed as entities with excessive longevity. It suggests that firms that are identified as zombies do not endure in zombie status endlessly, and that many zombie firms return to a healthy situation. While we omit detailed explanation, these regression results based on the Imai definition of zombie firms are similarly established with the FN definition (Table 6).

We should emphasize that the results in Table 5 are only for firms that continue their survival in this term. In fact, there is a possibility that firms that were zombies in

Table 4. OLS Results for ROA on Firm Size and Age

dep. var.:	sample period: 2010-2014		
roa	Coef.	S.D.	p-value
capital (log)	0.0017	0.0002	0.0000
age	-0.0004	0.0000	0.0000
cons.	-0.0486	0.0118	0.0000
year dummies		Yes	
industry dummies		Yes	
F (27,151096)		121.17	
adj. R ²		0.0210	
# of obs.		151124	

the previous term have exited this term. However, these firms drop out as a target of regression analysis. Therefore, it should be noted that bias exists in a positive direction when current term zombie status is used as the dependent variable.

Until now, our results have been strictly based on the same definitions and types of data used in the original studies by CHK (2008), FN (2011), and Imai (2016). However, this stringency limits the period of our analysis, because the BSJBSA only contains data on borrowing from banks after 2009. We therefore use similar data to make proxy variables and extend the sample period, substituting current debt for short-term borrowing from banks and fixed debt for long-term borrowing from banks. These changes allow us to make 1995 the start year for identification with the CHK and FN definitions, and 1997 the start year with the Imai definition. We call this modified approach the “debt-based” definition, and show the results in Tables 7 and 8. It seems

Table 5. FE Panel Logit Model with Lagged Identification Dummy

dep. var.:	sample period: 2010-2014		
Imai-zombie dummy	Coef.	S.D.	p-value
roa	-6.7494	1.1085	0.0000
Imai-zombie dummy (-1)	-2.5112	0.1323	0.0000
capital (log)	-0.0229	0.2163	0.9160
age	0.0026	0.0313	0.9340
year dummies	Yes		
industry dummies	Yes		
log likelihood	-934.9		
p-value, LR chi2	0.000		
# of obs.	4225		
# of groups	1420		

Table 6. FE Panel Logit Model for FN Definition

dep. var.:	sample period: 2010-2014		
FN-zombie dummy	Coef.	S.D.	p-value
roa	-31.4976	0.9390	0.0000
FN-zombie dummy (-1)	-1.3433	0.0547	0.0000
capital (log)	-0.0957	0.1618	0.5540
age	-0.0185	0.0114	0.1060
year dummies	Yes		
industry dummies	Yes		
log likelihood	-4084.6		
p-value, LR chi2	0.000		
# of obs.	14697		
# of groups	3683		

that the major characteristics of the former results hold.

In addition to escaping from zombie status, it also possible that many zombie firms exit the marketplace entirely. Here we investigate this “exit” event itself. Since the BSJBSA does not collect information on market exit by firms, we regard the firms that do not report their data thereafter as having exited. We should note that this identification strategy possibly includes firms that simply quit answering the survey in later years.

Table 9 and 10 are the results of regressions which make exit the dependent variable (represented as dummy variable which takes “1” if a firm exits). Both tables show that if a firm becomes a zombie, the probability of exit significantly increases. Additionally, having a longer duration of zombie status heightens exit probability.

As expected, as the size of firm (log of capital amount) becomes larger, the

Table 7. FE Panel Logit Model for Debt-Based Imai Definition

dep. var.:	sample period: 1997-2014					
	(a) benchmark			(b) with a lag of dep. var.		
	Coef.	S.D.	p-value	Coef.	S.D.	p-value
Imai-zombie dummy	-8.7043	0.1531	0.0000	-9.0122	0.1730	0.0000
roa						
Imai-zombie dummy (-1)				-0.1546	0.0158	0.0000
capital (log)	0.0267	0.0206	0.1940	0.0324	0.0231	0.1610
age	0.0048	0.0012	0.0000	0.0039	0.0014	0.0050
year dummies		Yes			Yes	
industry dummies		Yes			Yes	
log likelihood		-59264.9			-49459.9	
p-value, LR chi2		0.000			0.000	
# of obs.		195964			150140	
# of groups		17513			15343	

Table 8. FE Panel Logit Model for Debt-Based FN Definition

dep. var.:	sample period: 1995-2014					
	(a) benchmark			(b) with a lag of dep. var.		
	Coef.	S.D.	p-value	Coef.	S.D.	p-value
FN-zombie dummy	-8.2200	0.1068	0.0000	-8.2080	0.1169	0.0000
roa						
FN-zombie dummy (-1)				-0.1187	0.0119	0.0000
capital (log)	0.0740	0.0155	0.0000	0.0435	0.0168	0.0100
age	0.0006	0.0009	0.5280	0.0013	0.0010	0.2190
year dummies		Yes			Yes	
industry dummies		Yes			Yes	
log likelihood		-109728.2			-93826.9	
p-value, LR chi2		0.000			0.000	
# of obs.		338920			293629	
# of groups		27617			24990	

probability of exit decreases. This is not surprising considering that smaller firms have higher credit risk. However, regression by segmented size groups shows us quite another aspect. We divide firms into two size groups, SME and large firms. Table 11 shows that becoming a zombie significantly increases the probability of exit in SME, while the parameter is smaller in large firms.

We also compare the business situations of zombies and non-zombies around the timing of exit. Table 12 shows the results of logistic regression in which the dependent variable is a dummy with the value “1” if employees of the firm decrease within the five-year period before a firm’s market exit. We can see that the probability of reducing employees increases if the firm is a zombie among small firms, while there is not such

Table 9. FE Panel Logit Model for Exit and Imai Definition-Zombie

dep. var.: exit (+1)	sample period: 1997-2014					
	(a) using zombie dummy			(b) using zombie years		
	Coef.	S.D.	p-value	Coef.	S.D.	p-value
roa	-0.8449	0.2000	0.0000	-0.9406	0.1883	0.0000
Imai-zombie dummy	0.1589	0.0544	0.0040			
Imai-zombie years				0.0911	0.0290	0.0020
capital (log)	-0.5486	0.0819	0.0000	-0.5904	0.0761	0.0000
age	0.6053	0.0107	0.0000	0.6081	0.0102	0.0000
year dummies		Yes			Yes	
industry dummies		Yes			Yes	
log likelihood		-6952.9			-9175.4	
p-value, LR chi2		0.000			0.000	
# of obs.		81891			96411	
# of groups		13078			14525	

Table 10. FE Panel Logit Model for Exit and FN Definition-Zombie

dep. var.: exit (+1)	sample period: 1995-2014					
	(a) using zombie dummy			(b) using zombie years		
	Coef.	S.D.	p-value	Coef.	S.D.	p-value
roa	-1.1411	0.1635	0.0000	-1.1346	0.1625	0.0000
FN-zombie dummy	0.0727	0.0368	0.0480			
FN-zombie years				0.0635	0.0242	0.0090
capital (log)	-0.3937	0.0560	0.0000	-0.3939	0.0560	0.0000
age	0.5029	0.0078	0.0000	0.5028	0.0078	0.0000
year dummies		Yes			Yes	
industry dummies		Yes			Yes	
log likelihood		-13312.1			-13310.6	
p-value, LR chi2		0.000			0.000	
# of obs.		142669			142669	
# of groups		20214			20214	

tendency among large firms. Table 13 shows a similar result, using sales instead of employees.

Table 11. FE Panel Logit Model for Exit by Firm Size

dep. var.: FN-zombie dummy	sample period: 1997-2012					
	(a) SME			(b) large firms		
	Coef.	S.D.	p-value	Coef.	S.D.	p-value
roa	-0.7451	0.2038	0.0000	-1.1208	0.6654	0.0920
Imai-zombie dummy	0.1604	0.0575	0.0050	0.0992	0.2059	0.6300
capital (log)	-0.3893	0.1134	0.0010	0.0802	0.3100	0.7960
age	0.6393	0.0116	0.0000	0.7059	0.0406	0.0000
year dummies	Yes			Yes		
industry dummies	Yes			Yes		
log likelihood	-6119.0			-586.9		
p-value, LR chi2	0.000			0.000		
# of obs.	73234			7241		
# of groups	11909			1088		

Table 12. Logit Model for Employee Decrease by Firm Size

dep. var.: workers-decrease (in 5yrs) dummy	sample period: 1997-2012, group: firms which will exit in next year					
	(a) SME			(b) large		
	Coef.	S.D.	p-value	Coef.	S.D.	p-value
roa	-3.2518	0.3648	0.0000	-3.0887	0.9372	0.0010
Imai-zombie dummy	0.3079	0.0835	0.0000	0.0195	0.2567	0.9390
age	0.0181	0.0018	0.0000	0.0163	0.0042	0.0000
capital (log)	-0.1670	0.0315	0.0000	-0.0958	0.0769	0.2130
cons.	1.1636	0.2075	0.0000	1.0714	0.7179	0.1360
year dummies	Yes			Yes		
industry dummies	Yes			Yes		
log likelihood	-3902.9			-455.8		
p-value, LR chi2	0.000			0.000		
pseudo R ²	0.072			0.106		
# of obs.	7237			757		

Table 13. Logit Model for Sales Decrease by Firm Size

dep. var.: profit-decrease (in 5yrs) dummy	sample period: 1997-2012, group: firms which will exit in next year					
	(a) SME			(b) large		
	Coef.	S.D.	p-value	Coef.	S.D.	p-value
roa	-7.3623	0.4487	0.0000	-6.4365	1.1156	0.0000
Imai-zombie dummy	0.4064	0.0866	0.0000	-0.1506	0.2533	0.5520
age	0.0136	0.0018	0.0000	0.0128	0.0042	0.0020
capital (log)	-0.2195	0.0316	0.0000	-0.0524	0.0775	0.4990
cons.	1.9976	0.2124	0.0000	1.2051	0.7261	0.0970
year dummies	Yes			Yes		
industry dummies	Yes			Yes		
log likelihood	-3864.5			-447.8		
p-value, LR chi2	0.000			0.000		
pseudo R ²	0.101			0.133		
# of obs.	7237			754		

V. Conclusion

In this paper, we analyze the situation of zombie firms among Japanese SME with data from the BSJBSA. Our analysis covers a much larger sample of SME than previous studies, and addresses multiple characteristics of zombie SME, including firm size, firm age, duration in zombie status, market exit, and corporate activity at the time of exit.

Our findings reveal that though there remains some discrepancy over the zombie firm ratio based on different definitional criteria, according to the preferred Imai definition, Japanese SME contained a non-negligible amount of zombie firms during the lost decades. While chronological limitations in our data prevent us from directly estimating the zombie ratio before 2009, the proxy variable of current and fixed liabilities (what we call the “debt-based” zombie ratio) shows that, throughout the 2000s, a minimum of 10 percent of all firms in our sample were zombie firms. This finding suggests that zombies existed to a significant degree during this period, and at a comparably higher level than large-sized zombie firms estimated in other studies (Nakamura 2017). In other words, our analysis implies that CHK’s original study may have been intuitively correct about zombie firms’ presence in the post-bubble Japanese economy, but that its focus on listed firms was misplaced. To the extent that zombie firms existed in the lost decades, especially in the 2000s, they were a greater problem among SME.

Our paper makes an additional contribution in elucidating multiple corporate characteristics of zombie SME. Our findings in this area include: (1) zombie firms often escape from zombie status through recovery or exit, rather than perpetually keeping zombie status; (2) the probability of exit is higher for zombies that are SME; and (3) exiting zombies’ economic performance is worse than that of exiting non-zombies. Certainly, firms’ exit, economic performance and zombie status are endogenous, but identifying zombies might offer an effective signal in the view of finance and economic policy.

Taken together, our findings carry two general implications for the study of

zombie firms going forward. First, it is important that research on zombie firms considers SME as well as large firms. Recent studies on Europe and South Korea have extended the debate on zombie firms beyond Japan, but some include SME (McGowan, Andrews, and Millot 2017) while others do not (Acharya et al. 2017). Data restrictions may complicate comprehensive analysis, but as this paper shows, SME are a significant corporate class where the possible presence of zombies should not be underappreciated.

Second, comparisons between different corporate categories might indirectly expose the presence of alternative mechanisms behind the generation of zombie firms. While the nature of BSJBSA data prevented this paper from testing the proposition that Japan's credit guarantee system supported zombie firms among Japanese SME, the finding of a high zombie ratio among small firms during the 2000s suggests that these zombies were underpinned by factors that did not similarly affect large firms. Future work should specifically examine the situation of firms using the credit guarantee system to determine whether the system was responsible for generating zombie SME. This could be a key lesson from Japan for scholars and policymakers concerned with zombie firms.

References

- Acharya, Viral V., Tim Eisert, Christian Eufinger, and Christian W. Hirsch. 2017. "Whatever It Takes: The Real Effects of Unconventional Monetary Policy." SAFE Working Paper 152: 1-67.
- Ahearne, Alan, and Naoki Shinada. 2005. "Zombie Firms and Economic Stagnation in Japan." *International Economics and Economic Policy* 2(4): 363-81.
- Arbatli, Elif et al. 2016. "Reflating Japan: Time to Get Unconventional?" IMF Working Paper 16(157): 1-45.
- Bank of England. 2012. Financial Stability Report.
- Caballero, Ricardo J., Takeo Hoshi, and Anil K. Kashyap. 2008. "Zombie Lending and Depressed Restructuring in Japan." *The American Economic Review* 98(5): 1943-77.
- Chandler, Clay. 1999. "In Japan, a Reversal on Reform?: Premier Draws Fire for 'Go Slow' Stance on Economy." *Washington Post*, October 29: E1.
- Economist Intelligence Unit. 2010. SMEs in Japan: A New Growth Driver? *The Economist*.
- Fackler, Martin. 2003. "Japan Targets Bad Bank Debt: Effort to Help Lenders Take Over Corporate Borrowers." *Wall Street Journal*, April 14: C9.
- Fukuda, Shinichi, and Junichi Nakamura. 2011. "Why Did 'Zombie' Firms Recover in Japan?" *The World Economy* 34(7): 1124-37.
- Garside, W. R. 2012. *Japan's Great Stagnation: Forging Ahead, Falling Behind*. Northampton: Edward

- Elgar Publishing, Inc.
- Griffin, Naomi N., and Kazuhiko Odaki. 2009. "Reallocation and Productivity Growth in Japan: Revisiting the Lost Decade of the 1990s." *Journal of Productivity Analysis* 31(2): 125-36.
- Henry, David. 1997. "Japan Forced to Clear Out Deadwood." *USA Today*, November 25: B3.
- Hoshi, Takeo. 2006. "Economics of the Living Dead." *Japanese Economic Review* 57(1): 30-49.
- Hoshi, Takeo, and Anil K. Kashyap. 2011. *Why Did Japan Stop Growing?* Tokyo: National Institute for Research Advancement.
- Imai, Kentaro. 2016. "A Panel Study of Zombie SMEs in Japan: Identification, Borrowing and Investment Behavior." *Journal of the Japanese and International Economies* 39: 91-107.
- Kane, Edward J. 1987. "Dangers of Capital Forbearance: The Case of the FSLIC and 'Zombie' S&Ls." *Contemporary Economic Policy* 5(1): 77-83.
- Katz, Richard. 2003. *Japanese Phoenix: The Long Road to Economic Revival*. Armonk: M.E. Sharpe.
- Kobayashi, Keiichiro. 2009. "Financial Crisis Management: Lessons from Japan's Failure" in *The First Global Financial Crisis of the 21st Century: Part II: June-December, 2008*, eds. Andrew Felton and Carmen M. Reinhart. Centre for Economic Policy Research, 337-41.
- Kwon, Hyeog Ug, Futoshi Narita, and Machiko Narita. 2015. "Resource Reallocation and Zombie Lending in Japan in the 1990s." *Review of Economic Dynamics* 18(4): 709-32.
- Lam, Raphael W., and Jongsoo Shin. 2012. "What Role Can Financial Policies Play in Revitalizing SMEs in Japan?" *IMF Working Paper* 12(291): 1-23.
- Landers, Peter. 1999. "Tokyo Still Needs Plan to Clean Up Bad Loans Stifling Firms' Growth." *Asian Wall Street Journal*, August 23: 1.
- McGowan, Müge Adalet, Dan Andrews, and Valentine Millot. 2017. "The Walking Dead? Zombie Firms and Productivity Performance in OECD Countries." *OECD Economics Department Working Papers* 1372: 1-45.
- Nakamura, Junichi. 2017. *Japanese Firms During the Lost Two Decades: The Recovery of Zombie Firms and the Entrenchment of Reputable Firms*. Tokyo: Springer.
- Nakamura, Junichi, and Shinichi Fukuda. 2013. "What Happened to 'Zombie' Firms in Japan? Reexamination for the Lost Two Decades." *Global Journal of Economics* 2(2): 1-18.
- Nie, Huihua, Ting Jiang, Yuxiao Zhang, and Mingyue Fang. 2016. *Zhongguo jiangshi qiye yanjiu baogao: xianzhuang, yuanyin he duice* [China's Zombie Firms Research Report: Current Situation, Causes and Countermeasures]. Beijing: Renmin University National Academy of Development and Strategy Anti-Corruption and New Political Economy Research Center.
- OECD. 2015. *Economic Surveys: Japan: Overview*. OECD.
www.oecd.org/eco/surveys/Japan-2015-overview.pdf (August 3, 2016).
- Peek, Joe, and Eric S. Rosengren. 2005. "Unnatural Selection: Perverse Incentives and the Misallocation of Credit in Japan." *The American Economic Review* 95(4): 1144-66.
- Sekine, Toshitaka, Keiichiro Kobayashi, and Yumi Saita. 2003. "Forbearance Lending: The Case of Japanese Firms." *Monetary and Economic Studies* 21(2): 69-92.
- Small and Medium Enterprise Agency. 2016a. *Chushokigyo kin'yu shin'yo hokan seido no kokusai hikaku ni tsuite* [International Comparison of SME Finance and Credit Enhancement System]. Tokyo: Ministry of Economy, Trade and Industry.
- . 2016b. *White Paper on Small Enterprises in Japan: Ongoing Business and New Challenges*. Tokyo:

- Ministry of Economy, Trade and Industry.
SME Policy Council Finance Working Group. 2015. Chushokigyo shokibo jigyoisha no hatten ni shisuru jizoku kano na shin'yo hokan seido no kakuritsu ni mukete chukanteki na seiri [Intermediate Summary Concerning the Establishment of a Sustainable Credit Enhancement System that Contributes to the Development of SMEs and Microenterprises]. Tokyo: Small and Medium Enterprise Agency.
<http://www.chusho.meti.go.jp/koukai/shingikai/kihonmondai/2015/download/151216kihonmondai.pdf> (August 2, 2016).
- Stothard, Michael. 2013. "Companies: The Rise of the Zombie." *Financial Times*.
<http://www.ft.com/intl/cms/s/0/7c93d87a-58f1-11e2-99e6-00144feab49a.html#axzz46YJNJe11> (April 22, 2016).
- Summers, Lawrence H. 2012. "U.S. Economic Prospects: Secular Stagnation, Hysteresis, and the Zero Lower Bound." *Business Economics* 49(2): 65-73.
- Tan, Yuyan, Yiping Huang, and Wing Thye Woo. 2016. "Zombie Firms and the Crowding-Out of Private Investment in China." *Asian Economic Papers* 15(3): 32-55.
- Wehrfritz, George, and Hideko Takayama. 2002. "King of the Zombies." *Newsweek*, January 21: 40.
- Yoshino, Naoyuki, and Ganeshan Wignaraja. 2015. "SMEs Internationalization and Finance in Asia." Presented at the IMF-JICA Conference: Frontier and Developing Asia: Supporting Rapid and Inclusive Growth, Tokyo, February 18.
<https://www.imf.org/external/np/seminars/eng/2015/jica2015/pdf/1-B1.pdf> (October 2, 2017).
- Zhongguo xinwen wang. 2015. "Fagaiwei: Jiakuai taotai jiangshi qiye youxiao huajie guosheng channeng [National Development and Reform Commission: Speed Up the Elimination of Zombie Firms to Effectively Resolve Excess Capacity]." *Zhongguo xinwen wang*.
<http://www.chinanews.com/cj/2015/10-12/7564476.shtml> (January 28, 2017).

研究所だより

◆会 議

運営委員会

平成30年度

第1回 平成30年4月26日(木)

第2回 平成30年10月18日(木)

第3回 平成31年2月21日(木)

第4回 持ち回り

(平成31年3月1日)

所員会議

平成30年度

第1回 平成30年4月24日(火)

第2回 平成30年10月16日(火)

第3回 平成31年2月14日(木)

第4回 平成31年2月28日(木)

企画委員会

平成30年度

第1回 平成30年4月19日(木)

第2回 平成30年7月12日(木)

第3回 平成30年10月11日(木)

◆研究報告会

第85回講演会

日 時 平成30年6月16日(土)

<第1部>

講演者 吉川洋氏(東京大学名誉教授 立正大学経済学部教授)

演 題 「人口減少と日本経済」
(本号に掲載)

<第2部>

講演者 田近栄治氏(一橋大学名誉教授 成城大学経済学

部特任教授)

演 題 「社会保障と財政」(本号
に掲載)

第86回講演会

日 時 平成30年10月13日(土)

<第1部>

講演者 中馬宏之氏(成城大学社会イノベーション学部教授)

演 題 「ヒューマン・インテリ
ジェンスと脳模倣型及び
ビッグデータ型 AI:イ
ンテリジェンスとは何か
を考える」(本号に掲載)

<第2部>

講演者 久世和資氏(日本アイ・
ビー・エム株式会社執行
役員 最高技術責任者)

演 題 「最新テクノロジーによ
る社会の変革」(本号に
掲載)

経済研究所共催 日本金融学会中央 銀行部会

日 時 平成31年3月9日(土)

<第1部>

講演者 風戸正行氏(日本銀行)
演 題 「金融政策のトーン分
析:日本銀行の政策説明
とメディア報道」

<第2部>

講演者 木内登英氏(野村総合研
究所)

演題 「実務面からみた日本銀行の金融政策正常化とコミュニケーション戦略」

発表者 弓削雅明氏(合同会社北葉社長)

題目 「日本企業の海外戦略：アジアのポータルとしての台湾に着目して」

◆ミニ・シンポジウム

第1回

日時 平成30年6月12日(火)
発表者 岡部拓氏(ゲアダラハラ大学経済経営学部教授)
題目 「メキシコの労働法制改正と企業活動への影響」

第6回

日時 平成30年10月23日(火)
発表者 柿原智弘氏(ゲアダラハラ大学経済経営学部教授)

題目 「金融自由化とマイクロファイナンスの役割—メキシコのケース—」

第2回

日時 平成30年6月19日(火)
発表者 中田真佐男氏(経済学部教授)
題目 「わが国リテール決済におけるキャッシュレス化の進展に向けた課題」

第7回

日時 平成30年11月13日(火)
発表者 大森弘喜氏(成城大学名誉教授)

題目 「オピタル・ジュネラル—近世フランスにおける貧民救済と抑圧の歴史—」

第3回

日時 平成30年7月11日(水)
発表者 後藤康雄氏(社会イノベーション学部教授)
題目 「わが国の中小企業部門の効率性について—ゾンビ企業仮説の視点から」(本号に掲載)

第8回

日時 平成30年12月11日(火)
発表者 福光寛氏(経済学部教授)

題目 「顧准(グー・ジュン1915-1974)生涯と遺著『理想主義から経験主義へ』—会計学者・革命家・経済学者から民主的政治制度の研究者へ—」

第4回

日時 平成30年7月17日(火)
発表者 竹田泉氏(経済学部教授)
題目 「イギリス産業革命再考」

第5回

日時 平成30年9月21日(金)

第9回

日時 平成31年1月15日(火)

発表者 長谷川清氏 (株地域金融
研究所主席研究員)

題 目 「わが国貸付型クラウド
ファンディング (ソーシ
ヤルレンディング) の現
状と課題」

Center for Economic and
Administrative Science,
University of Guadalajara.)
(経済研究所研究報告 No. 85)

長谷川清 (株地域金融研究所主席研
究員) 著

『ソーシャルレンディング (日
本版 P2P レンディング) の現
状と課題』

(経済研究所研究報告 No. 86)

◆刊行物

長期プロジェクト報告として以下の
書物を刊行した。

小平裕 (経済学部教授) 著

『検証可能な私的情報と開示』
(経済研究所研究報告 No. 84)

『Changing Mexico: Multidimensional
analysis of the current situation of
Mexico』

Taku Okabe

(Professor of the University of
Guadalajara)

Juan Emmanuel Delva Benavides

(Professor of the University of
Guadalajara)

Ana Virginia Solis Stas

(Logistics Planner at VIAVI
Solutions)

Gelacio Juan Ramón Gutiérrez

Ocegueda

(Researcher-professor of the
University of Guadalajara)

Edgar Gutiérrez Aceves

(Federal lawyer of Mexico)

Salvador Carrillo Regalado

(Researcher-professor of the
Department of Regional
Studies-INESER, University

〔組 織〕		(2019年4月1日現在)			
所 主	長 事	立 川	川 原	潔 章	経 済 学 部 教 授 経 済 学 部 教 授
運 営 委 員		立 川	川 原	潔 章	所 主
		小 宮	路 雅	博 鋼	経 済 学 部 長
		村 瀨	本 輝	之 人	文 芸 学 部 長
		山 本	田 真	人 生	法 学 部 長
		内 明	石 茂	治 恭	社会イノベーション学部長
		川 崎			所 員
所 員		相 原	石 茂	章 生	経 済 学 部 教 授
(50音順)		伊 地	知 寛	博 人	経 済 学 部 教 授
		岩 崎	尚 富	之 一	社会イノベーション学部教授
		上 杉	田 晋	真 一	経 済 学 部 教 授
		内 田	津 真	武 治	経 済 学 部 教 授
		大 川	崎 恭	雄 博	法 学 部 教 授
		後 藤	康 雅	博 宏	社会イノベーション学部教授
		小 宮	路 匡	行 泉	経 済 学 部 教 授
		庄 本	田 信	雄 潔	経 済 学 部 教 授
		杉 田	嶋 英	敦 登	経 済 学 部 教 授
		竹 田	川 公	誠 佐	社会イノベーション学部教授
		立 塚	原 真	男 人	経 済 学 部 教 授
		塚 手	井 清	司 一	経 済 学 部 教 授
		塘 中	田 幸	大 創	文 芸 学 部 教 授
		花 林	井 康	寛 子	社会イノベーション学部教授
		林 平	野 圭	志 子	経 済 学 部 准 教 授
		平 福	光 野		経 済 学 部 教 授
		牧 村	野 圭		文 芸 学 部 教 授
		山 重	田 芳		社会イノベーション学部教授
					経 済 学 部 教 授

客員所員 (50音順)	伊 東 昌 子	元常磐大学人間科学部教授	
	岡 部 拓	ハリスコ州立 ゲアダラハラ大学教授	
	柿 原 智 弘	ハリスコ州立 ゲアダラハラ大学教授	
	吉 川 卓 也	中村学園大学流通科学部准教授	
	黄 賀	保育・介護・ビジネス 名古屋専門学校専任教員	
	小久保 雄 介	本学非常勤講師	
	角 田 俊 男	武蔵大学人文学部教授	
	都 留 信 行	産業能率大学経営学部准教授	
研 究 員 (50音順)	福 島 章 雄 行	本学非常勤講師	
	藤 倉 孝 行	独立行政法人 中小企業基盤整備機構	
	峯 岸 信 哉	名古屋経済大学経済学部教授	
	中 村 圭	本学大学院社会イノベーション 研究科博士課程後期修了	
	松 尾 茉 子	本学大学院経済学研究科 博士課程後期単位取得満期退学	
	事 務	峯 岸 直 美 子	大学事務局総務課
		柳 澤 美 奈 子	大学事務局総務課

前 号 目 次

研究報告

「能率」の共同体

—第一次大戦後から高度成長期までの

ミドルクラスとナショナリズム— …………… 新 倉 貴 仁 …… 5

講演会〈成城学園創立100周年・経済研究所創設30周年記念〉…………… 31

「文明と経済—古代・中世の社会経済構造」

中世ローマ帝国の社会経済システム

—再分配国家と市場の役割— …………… 大 月 康 弘 …… 33

「前近代経済における貨幣、信用、国家：

古代メソポタミアから中世ヨーロッパまで」…………… 明 石 茂 生 …… 53

対 談 …………… 87

シンポジウム〈成城学園創立100周年・経済研究所創設30周年記念〉…………… 101

「2050年の世界に向けて日本は何をすべきか」

パネル主旨 …………… 102

問題提起 …………… 岩 田 一 政 …… 103

地域別人口動向から見た今後の日本のあり方 …………… 岡 田 豊 …… 113

IoT でつながる世界経済、日本企業

～業種を超えた競争・協調の時代へ～ …………… 山 本 謙 三 …… 128

財政と金融の中長期課題と戦略 …………… 岩 本 康 志 …… 142

討 論 …………… 156

編 集 後 記

おかげさまで年報32号を発行することができた。これもひとえにお忙しい中ご講演をお引き受けくださり、また本号にご寄稿くださった先生方—吉川洋氏（東京大学名誉教授・立正大学経済学部教授）、田近栄治氏（一橋大学名誉教授・成城大学経済学部特任教授）、中馬宏之氏（成城大学社会イノベーション学部教授）、久世和資氏（日本アイ・ビー・エム株式会社執行役員最高技術責任者）—、さらに講演会にご参加頂いた研究者の方々および多数の市民の方々の暖かいご支援の賜物と、研究所を代表して心よりお礼申し上げます。

さて、6月16日と10月13日のご講演の有益で魅力的な内容に関しては本号掲載論文をお読み頂くこととして、ここでは講演会およびミニ・シンポジウムの趨勢について若干気づいたことを書き留めておきたい。

ミニ・シンポジウムというのは、研究所の3つのプロジェクトがそれぞれのプロジェクト・テーマに沿った講師を招いて、研究所の閲覧室で10数名程の比較的少数の参加者で行なわれており、昨年度は過去最多の年9回の開催となった（なお本号掲載の後藤康雄氏の論文は7月11日開催のミニ・シンポジウムでのご報告内容を元にまとめて頂いたものである）。講演会に多数の市民の方がご参加されるようになってきていることはすでに記したが、最近、このシンポジウムにも常時2、3名の市民の方のご参加を頂いている。一つにはネット配信などを通じて多くの方々に講演会だけではなくミニ・シンポジウムの開催日やテーマなどを知って頂く機会が増えたことがあるのは言うまでもないが、同時に知的好奇心の社会的な高まりがあるように思われる。講演会およびミニ・シンポジウムで、専門家の視点からの質問だけではなく、市民の方から、その専門知が日常生活とどのように結び結ぶのかという専門家の視点からは見落としがちな質問が多くなされるようになり、私たちも大きな刺激を受けている。これからも研究所がいつそ社会に開かれ、様々な視点から互いに刺激を与え与えられる場になるように努めていきたいと改めて決意したことを記して編集後記としたい。

「経済研究所年報」刊行一覧

号数	執筆者	タイトル	発行年月
1	堀家文吉郎 中村 英雄 村本 孜 高垣文庫貴重書目録一追加 No. 1—	ソーントンの周辺 ジョン・ローの「墓碑銘」といわれるものについて 高垣経済学の一端	1988. 3
2	堀家文吉郎 麻島 昭一 片木 進 浅井 良夫	貨幣数量説とデビット・ヒューム 日本の金融制度再編——分業主義のゆくえ—— 決済ネットワーク発展の動向とリスク 占領期の金融制度改革と独占禁止政策	1989. 3
3	津田 内匠 長谷川輝夫 井田 進也 宮崎 洋	フランス革命と産業主義 18世紀フランスにおける民衆と活字本 憲法か革命か——明治前期日本人の見たフランス革命—— 18世紀のフランスにおける旅について	1990. 4
4	島村 高嘉 清水 啓典 金井 雄一 伊東 政吉 座談会	中央銀行の政策思想 情報化社会と日本の金融制度 イギリスにおける金融政策の形成と展開 アメリカにおける金融制度改革 ——金融政策との関連を中心として—— 高垣寅次郎博士を偲ぶ	1991. 4
5	岩武 照彦 松田 博 仁保 義男 シンポジウム インタビュー	『近代中国通貨統一史——十五年戦争における通貨闘争』 について 京都大学経済学部所蔵貴重書——その整理の一こま—— 防衛支出の最適水準についての一考察 (セミナー報告) 金融制度改革 (原司郎・楠本博・高木仁・西條正弘・村本孜) 『世界各国の金融制度』の思い出 (大月 高)	1992. 4
6	江口 英一 伊藤 正直 大田 弘子 両角 和夫 釜江 廣志	金融政策の中立性と中央銀行の独立性 ——中央銀行の役割と在り方—— フロート制移行期のわが国為替政策をめぐって 保険制度改革について ——保険審議会答申をめぐって—— 現代農業金融問題と発生の背景 日本の国債市場と金利の期間構造	1993. 4

号数	執筆者	タイトル	発行年月
6		長期プロジェクト研究報告 世界貿易の進展と構造変化：中間報告 (明石茂生) わが国金融・資本市場の制度改革：中間報告 (花枝英樹) 協同組織金融機関の制度改革の方向 ——東京都の地域信用組合の規模の経済性—— (村本 孜)	1993. 4
		ミニ・シンポジウム TSL の金融市場への影響に関する理論分析 (北川 浩) 政策金融と中小企業の設備投資 (三井 清) 情報の非対称性と資本市場の理論 (展望) (久保俊郎)	
		高垣文庫貴重書目録 ——追加 No. 2——	
7	藪下 史郎 橋本 一夫 石野 典 立脇 和夫 原田 泰	日本の銀行制度の安全性：歴史的展望 『信用金庫40年史』をめぐって ——協同組織金融機関の法制化にみる社会政策的側面—— 金融システムの安定性 ——1980年代後半以降の日本の金融経済との関連で—— 明治政府と英国東洋銀行 ——付「国立銀行条例」をめぐる疑問点—— バブルと金融政策 ——マネーサプライは外生である——	1994. 4
		シンポジウム 保険の制度改革 (花輪俊哉・前川 寛・刀禰俊雄・村本 孜)	
	書 評	峰本暉子著『国際金融システムの変革 1797～1988』 近代文芸社 1993年 (立脇和夫)	
8	花輪 俊哉 高木 仁 福光 寛 刈屋 武昭 村本 孜 小平 裕	銀行の将来 アメリカ銀行業は衰退産業か？ ナローバンク論とコアバンク論 オプション理論の考え方と応用可能性 金融デリバティブと地域金融機関 わが国の公的年金制度の動学的応用一般均衡分析	1995. 4
		ミニ・シンポジウム 金融派生商品の現状 (北島英夫) デリバティブの位相 (阿部重夫) 最近のデリバティブの動向について (中島敬雄) 金融デリバティブについて——金利スワップの プライシング・ヘッジを中心に (高橋豊治)	
		金融学会1994年春季大会記事	
9	黒川 和美	行政改革のシナリオと地方分権	1996. 4

号数	執筆者	タイトル	発行年月
9	伊藤 修	メインバンク制および日本型金融システムの発展と展望	1996. 4
	森田 哲彌	外貨換算と原価主義会計	
	米澤 康博	派生取引の機能と現物市場へ与える効果	
	小谷 融	外貨建取引等会計処理基準の改訂について	
	高橋 一	金利の期間構造決定モデル(Ⅱ)	
	石川 欽也	『金融仲介機能の新たな展開への対応』(1995年5月)について ——デリバティブ取引への対応——	
	浅井 良夫	追悼の辞 中村先生の思い出	
10	大塚 宗春	金融機関のトレーディング勘定への時価評価の導入について	1997. 4
	大西 又裕	企業年金会計の検討課題と方向性について	
	霧見 誠良	アジアの金融制度改革—マレーシアとインド—	
	那須 正彦	実務家ケインズとその経済学—中公新書版『実務家ケインズ』に即して—	
	小平 裕	企業の組織と非効率性	
11	岡田 清	取引費用経済学の系譜	1998. 4
	神田 秀樹	セキュリティタイゼーションの現状と課題	
	篠原三代平	東アジア経済のダイナミズムを考える	
	高野 義樹	住宅金融システムと債権の流動化	
	小山 明宏	ドイツ証券市場の問題と展望	
	シンポジウム	日本経済の構造変化と金融システム改革 問題提起 (寺西重郎)	
		金融システムの国際比較と日本版 ビッグ・バン (黒田晁生)	
		証券市場からみた金融ビッグ・バン (米澤康博)	
		金融技術革新の潮流 —リテール金融との関連で— (村本 孜)	
		情報化と金融システム改革 (池尾和人) 討論	
12	石 弘光	二元的所得税論について —利子・譲渡益をいかに課税すべきか—	1999. 4
	井堀 利宏	財政構造改革のゆくえ	
	林 健久	地方財政と経済政策・景気政策	
	吹春 俊隆	Newton 法による一般均衡解の計算	
	花枝 英樹	資産証券化の経済分析	

号数	執筆者	タイトル	発行年月
12	吉川 卓也	財務データからみたわが国企業の資産調達の特徴 および企業規模別借入金利率の計測	
13	田中 素香	EU 通貨統合と国民経済 ——グローバル化への対応を中心に——	2000. 4
	内田 真人	欧州通貨統合と金融政策 ——統合後1年の課題と展望を中心に——	
	田中 俊郎	EU 統合の現状と展望 ——拡大と深化の視点から——	
	西沢 保	救貧法から福祉国家へ ——世紀転換期の貧困・失業問題と経済学者・官僚——	
	秋元 英一	アーヴィング・フィッシャーとニューディール	
	明石 茂生	ケインズ『一般理論』再読—失いし世界	
14	小川 英治	通貨バスケット制導入の効果と障害	2001. 4
	原田 泰	統合は平和と繁栄をもたらすか ——経済統合とアジア——	
	根本 忠宣	欧州における金融システムの多様性と統合の影響	
	原 洋之介	世界史のなかのアジア経済 ——グローバリズムと地域性の経済学——	
	斎藤 純一	社会国家と統治の変容	
15	後藤 晃	日本のナショナル・イノベーション・システムと その改革	2002. 4
	島野 卓爾	欧州中央銀行 (ECB) のインフレーション・ターゲティング	
	長谷川公敏	日本経済はなぜ回復しないのか	
	宮川 公男	挑戦を受ける21世紀の資本主義文明	
	高月 昭年	日米銀行法制の違いと法律の沈黙	
16	首藤 恵	金融危機後のアジア資本市場の再構築	2003. 4
	堀内 昭義	第二次大戦後の金融システムの機能を評価する ——銀行経営ガバナンスの視点——	
	楠本くに代	「金融商品の販売等に関する法律」(「金融商品販売法」) 施行後の金融消費者保護の実態と取組むべき緊急 の課題——英国「2000金融サービス・市場法」と法施 行後の FSA の取り組みを参考に——	
	田尻 嗣夫	郵便預金・簡易生命保険の資金運用と欧米運用機関の教訓	
	村本 孜	グローバル化と効率・公平 ——展望と金融排除——	

号数	執筆者	タイトル	発行年月
17	藤田 誠一	グローバリゼーションとユーロ登場の意味	2004. 4
	浅沼 信爾	アジアの経済発展とグローバリゼーション	
	斎藤 聖美	ベンチャーで日本を活性化する	
	平尾 光司	アメリカにおけるベンチャーキャピタルの発展過程	
	江夏 由樹	中国東北地域の土地をめぐる中国と日本	
18	小野 有人	アジア域内における「最後の貸し手」の意義と課題 ——国際金融機関による政策競争の観点から——	2005. 4
	石山 嘉英	国際資本移動の増大と為替レート制度の選択	
	駒村 康平	21世紀型の社会保障制度を求めて ——2025年を視野に入れた改革——	
	石 弘光	少子・高齢社会における税・社会保障制度負担のあり方	
	佐藤 宏	現代中国における国家と農民 ——税制改革と所得分配——	
19	日向野幹也	小口金融における実店舗と「動線」の役割 ——日米英独の経験——	2006. 4
	岩田 健治	EU（欧州連合）の新しい金融サービス政策	
	矢野 誠	M&A 市場とその質	
	高橋 伸子	金融経済教育の現状と課題 ——金融消費者、個人投資家は育つか——	
	瀧澤 弘和	比較制度分析：枠組みと最近の展開	
	相原 章	コンピテンシーに基づく HRM の動向	
20	和田 一夫	年産200万台を超えるT型車をフォード社はどのよ うに達成したか？ ——フォード社の生産システム再検討——	2007. 4
	栗原 裕	量的緩和策の評価と課題	
	十川 廣國	企業と市場・社会—CSR の意義を考える—	
	池本 正純	企業家論の視点とコーポレートガバナンス	
	堀内 圭子	浮世絵を生かしたまちづくり ——小布施町の北斎と墨田区の北斎——	
	経済研究所創立20周年記念		
21	伊丹 敬之	世界の中の日本、歴史の中の日本	2008. 4
	岡田 清	わが国における金融経済学の発展 ——高垣寅次郎先生の事績——	
	Ichiro Uesugi	Effectiveness of Credit Guarantees in	
	Koji Sakai	the Japanese Loan Market	
	and Guy M. Yamashiro		

号数	執筆者	タイトル	発行年月
21	大森 弘喜 シンポジウム	「都市空間論」の射程 イノベーション・システムの進化とそのガバナンス 趣旨説明 (伊地知寛博) 知的財産権制度の展開とイノベーション (小田切宏之) イノベーションの質的变化と新たな ガバナンスシステムの模索 (元橋 一之) アジアにおけるグローバル・イノベーション・ ガバナンスの構築にむけて (角南 篤) 討論	
22	寺西 重郎 鹿野 嘉昭 吉田 悦章 内田 真人 南里光一郎 平田 英明	明治大正の投資家社会 2003年以降における中小企業の経営財務面での 動きをめぐって —CRD の分析結果から— イスラム金融—国際金融界の新潮流 グローバルにおける住宅金融の急展開と混乱 スコアリング貸出の課題—新銀行東京を例に	2009. 4
23	原田 泰 井手 英策 水野 和夫 鎮目 雅人 文献解説 中川 和彦	日本国の原則—自由, 民主主義, 経済発展, 戦争, 平和について考える マクロ・バジェットテイングと増税なき財政再建 —高橋財政の歴史的教訓— 21世紀は陸と海のたたかい —アメリカ金融帝国の終焉と資本主義の誕生— 世界恐慌と経済政策 —『開放小国』日本の経験と現代— カルロス, F. R. およびセレスティーノ, R. E 共編 メキシコにおける中小企業: 現状および戦略的挑戦	2010. 4
24	鶴 光太郎 内田 聡 山上 秀文 渡邊 頼純	労働市場制度・雇用システム改革 —労働市場二極化問題を中心に— アメリカの金融システム —ウォールストリートとメインストリート— 経済開発に果たす国際プロジェクトファイナンスの役割 忍び寄る「新保護主義」と国際通商体制 —WTO, FTA/EPA, そして TPP の役割—	2011. 4

号数	執筆者	タイトル	発行年月
24	福井 俊彦	60周年記念特別講演 「厳しい生存競争に立ち向かう」	
25	岩田規久男 斉藤 美彦 権上 康男 倉都 康行 小平 裕	なぜ、日本銀行の金融政策ではデフレから 脱却できないのか 国債累積と金融システム・中央銀行 欧州通貨統合史の神話と実相 —スネイクから EMS へ— 準備(基軸)通貨の来し方・行く末 ネット公売の収入最大化	2012. 4
26	浦田秀次郎 松宮 基夫 西沢 保 矢後 和彦 内田 真人	日本のアジア太平洋経済戦略：TPP への対応 欧州債務問題の現状とグローバル経済への影響 創設期の厚生経済学と福祉国家 —マーシャルにおける経済進歩と福祉を中心に— 国際決済銀行の過去と現在 非伝統的金融政策の効果と限界：デフレ脱却と金融政策	2013. 4
27	田中 信孝 渡瀬 義男 代田 純 池島 正興 村本 孜	検証・日本の財政 —財政赤字の構造分析— アメリカの予算編成過程と財政民主主義 EU の国債とアベノミクス 戦後アメリカの国債管理と国債 日本型モデルとしての中小企業支援・政策システム —中小企業金融を中心した体系化—	2014. 4
28	関 満博 関 志雄 平井 俊顕 出雲 雅志 明石 茂生	中国華南の日系中小企業とローカル企業 —転換期を迎え、新たな方向に向かう— 中国経済の現状と課題—「二つの罌」に挑む習近平政権 グローバル化をどうとらえればいいのか —光と影— 戦前日本のリカードウ研究 —1869-1929年試論— 古代メソポタミアにおける市場、国家、貨幣 —商人的経済再考—	2015. 4
29	加藤 博 長岡 慎介	イスラム経済の基本構造 イスラム金融は何に對峙しようとしているのか —伝統・近代・ポスト資本主義—	2016. 4
	Jesús Arroyo Alejandro	Japanese immigration in Mexico	
	Elizabeth Delgado García		

号数	執筆者	タイトル	発行年月
29	Salvador Carrillo Regalado	The role of FDI in Mexican industrial restructuring and its impact on regional development: The case of Japanese FDI, 2006-2014 シンポジウム〈成城学園創立100周年記念〉 中小企業支援・政策システムの行方 (村本孜・鹿野嘉昭・家森信善・落合寛司・斎藤聖美・西田直樹)	
30	大滝 精一 亀川 雅人 舟橋 學	東日本大震災とソーシャルビジネス 株主重視経営の意義と問題 —イノベーションとコスト競争の相克— ベトナム中小企業 —成長要因と支援政策—	2017. 4
		シンポジウム〈成城学園創立100周年記念〉 アジアにおける中小企業金融の展望 —望まれる金融システムの模索— (小川英治・山上秀文・濱田美紀・福島章雄・藤野次雄)	
31	新倉 貴仁 大月 康弘 明石 茂生	「能率」の共同体 —第一次大戦後から高度成長期までの ミドルクラスとナショナリズム— 中世ローマ帝国の社会経済システム —再分配国家と市場の役割— 前近代経済における貨幣、信用、国家： 古代メソポタミアから中世ヨーロッパまで	2018. 4
		シンポジウム〈成城学園創立100周年・経済研究所創設30周年記念〉 2050年の世界に向けて日本は何をすべきか (岩田一政・岡田豊・山本謙三・岩本康志)	

「研究報告」(グリーン・ペーパー) 刊行一覧

1	花枝 英樹	自己株式取得と企業財務	1994. 1
2	明石 茂生	世界貿易の進展と構造変化：1861—1991	1994. 1
3	村本 孜	協同組織金融機関の健全経営の一考察 —労働金庫の自己資本の充実—	1994. 6
4	村本 孜	生命保険会社の競争力について —銀行業務兼営を考慮した規模・範囲の経済性—	1994. 6

号数	執筆者	タイトル	発行年月
5	吉川 卓也 小平 裕	生命保険需要の特性分析 ——簡易保険と民間生命保険——	1995. 3
6	明石 茂生	国際収支と構造変化：1881—1991	1995. 3
7	花枝 英樹	なぜ企業は財務リスク管理を行うのか	1995. 3
8	村本 孜	協同組織金融機関の合併の一考察 ——労働金庫の規模の経済性の計測——	1996. 3
9	山口 一臣	アメリカ食品企業の環境戦略 ——マクドナルド社, スターキスト社 (ハインツ子会社)の事例を中心として——	1996. 6
10	小平 裕	金融機関のX非効率性の計測	1997. 2
11	浅井 良夫	経済安定本部調査課と大来佐武郎	1997. 3
12	海保 英孝	フィージビリティ・スタディの諸問題	1997. 3
13	手塚 公登	企業の資本構成と取引コストの理論	1997. 3
14	山田 稔	建設業労働者の賃金・賞与・退職金・年金 ——労務管理論的考察——	1997. 1
15	池田 和宏	J. S. ミル国防論に関する一考察 ——1860年におけるアイルランド植民地との関連で——	1998. 1
16	立川 潔	J. S. ミルのリベラリズム批判 ——社会再生における権威の必要性の認識——	1998. 3
17	海保 英孝	業績の悪化と回復の作用機序について ——その論点とインプリケーション——	1998. 3
18	村本 孜	家計貯蓄率の将来推計	1998. 3
19	岩崎 尚人 神田 良	企業間ネットワーク構築による戦略的革新の実現 ——中小トラック企業のケースから——	1998. 3
20	吉川 卓也	日本の個人金融資産需要の特性	1998. 3
21	福光 寛	資産担保証券の財務的意義について	1999. 3
22	角田 俊男	ヒュームの情念論と判断力 ——『人間本性論』をとおして——	1999. 3
23	花枝 英樹 吉川 卓也	資本構成問題の再検討	1999. 6
24	村本 孜	金融システムの国際比較分析 ——市場統合・通貨統合のもたらすもの——	2000. 3
25	浅井 良夫	「新長期経済計画」と高度成長初期の経済・産業政策	2000. 3
26	篠原 光伸	デリバティブとヘッジの会計 ——国際会計基準設定までの推移と今後——	2000. 3
27	塚原 英敦	Empirical Copulas and Some Applications	2000. 1
28	山重 芳子	An'Austrian'Model of Environment and Trade	2001. 1
29	手塚 公登 井上 正	企業特殊的人的投資とアウトプットの最大化	2001. 3
30	立川 潔	若き S. T. コウルリッジの急進主義思想 (上)	2001. 3

号数	執筆者	タイトル	発行年月
30		——1795年プリストル道徳政治講演の啓示宗教的基礎——	
31	福光 寛	公社債投資信託の元本割れをめぐる	2002. 3
32	角田 俊男	周縁にとっての主権と商業 ——ブリテン, ヨーロッパの 公共空間を開くヒューム哲学——	2002. 3
33	福島 章雄	経済・市場統合の展開 ——NAFTA の成立とメキシコの通貨危機——	2002. 3
34	小平 裕	Mathematica によるミクロ経済学	2002. 3
35	Gordon de Brouwer	The IMF and East Asia: A Changing Regional Financial Architecture	2003. 3
36	手塚 公登 浅野 義	年金民営化と「スイッチング」問題	2003. 3
37	福島 章雄 峯岸 信哉 村本 孜	経済統合の類型と金融システム・金融政策	2003. 3
38	明石 茂生	「前近代」世界システム：形成と変容	2004. 3
39	山村 延郎 松田 岳	米独の預金保護制度の比較分析 ——破綻処理と規律付けを中心に——	2004. 3
40	村本 孜	アメリカの地域金融促進政策—CRA の問題—	2004. 3
41	小平 裕 佐々木覚亮	わが国の社会会計行列の作成	2004. 5
42	浅井 良夫	IMF 8 条国移行と貿易・為替自由化（上） ——IMF と日本：1952～64年——	2005. 3
43	大森 弘喜	近代フランスにおける労使関係とディリジスム	2006. 3
44	上田 晋一	二酸化炭素排出枠の公正価値会計： IFRIC 第3号の検討	2006. 3
45	岩崎 尚人 海保 英孝 相原 章 福田 和久 都留 信行	中堅・中小企業の ステイクホルダー・マネジメントの研究	2006. 5
46	浅井 良夫	IMF 8 条国移行と貿易・為替自由化（下） ——IMF と日本1952～64年——	2007. 3
47	福光 寛	証券化の功罪：サブプライム問題を振り返る	2007. 1
48	沼尻 晃伸	戦間期・戦時期日本における方面委員論に関する ——考察——都市社会事業と「公」・「公共」——	2008. 3
49	西久保浩二	福利厚生制度の現状と課題	2008. 3
50	小藤 康夫	大学経営の構造と機能	2009. 2
51	小平 裕	経営者報酬と企業の行動目的	2009. 3
52	大岡 聡	昭和戦前・戦時期の百貨店と消費社会	2009. 4
53	数阪 孝志	地銀決算にみる地域金融の問題点	2010. 4

号数	執筆者	タイトル	発行年月
54	Carlos Fong Reynoso Taku Okabe Akio Fukushima Tomohiro Kakihara	Some Issues of the Medium-and Small-Sized Enterprises in Mexico	2010. 6
55	角田 俊男	都市共和国の伝統を継受する専制帝国 —啓蒙の歴史叙述とピョートルの改革—	2010. 1
56	大隈 宏	EU とミレニアム開発目標 —グローバル・パートナーシップの模索—	2012. 2
57	明石 茂生 柿原 智弘	日系企業のメキシコ進出： ハリスコ州の事例を中心に	2012. 3
58	岩崎 尚人 相原 章 橋本 茉莉	人的資源管理システムの構築に関する研究 —ダイバーシティ・マネジメントへのアプローチ—	2012. 3
59	中田真佐男	消費者による小額決済手段選択の現状： アンケート調査を用いた分析	2012. 9
60	駒形 哲哉	中国の社会主義市場経済と中小企業金融	2012. 9
61	青山 和正	ベトナムの中小企業政策に関する研究 —ベトナムの中小企業振興施策の現状と課題—	2013. 1
62	角田 俊男	越えがたい懸隔と永久の分離 —バークと東インド会社の帝国統治1778—95年—	2013. 2
63	Jesus Arroyo Alejandro David Rodríguez Álvarez Salvador Carrillo Regalado Taku Okabe Tomohiro Kakihara	Regional development in Mexico —socio-economic regional development and foreign direct investment—	2013. 3
64	福光 寛	中国概念股の危機はなぜ生じたのか	2013. 7
65	村本 孜	中小企業憲章の制定とその意義 —中小企業政策のイノベーション—	2013. 7
66	長谷川 清	リレーションシップバンキング行政の成果と課題	2013. 1
67	立川 潔	エドモンド・バークにおける市場と統治 —自然権思想批判としての『穀物不足に関する思索と詳論』—	2014. 3
68	福光 寛	中国のシャドールバンクをどうとらえるか —さまざまな定義の併存 肯定説と中小企業金融への貢献説—	2014. 1
69	福光 寛	中国の銀行理財についての規制	2015. 1
70	岩崎 尚人 黄 賀	中国の経済成長と展望	2015. 2
71	村本 孜	民法改正と個人保証 —議論の整理：中小企業金融との関連において—	2015. 9
72	María Guadalupe Lugo Sánchez	Economic impact of Economic	2016. 1

号数	執筆者	タイトル	発行年月
72	Salvador Carrillo Regalado Rafael González Bravo Leo Guzman Anaya	Partnership Agreement Mexico- Japan -theoretical and empirical aspects-	
73	J. Jesus Arroyo Alejandro Erika Elizabeth Sandoval Magaña Martha Elena Campos Ruíz María Guadalupe Limón Herrera Antonio Mackintosh R. Taku Okabe	Regional development and internationalization of Mexico	2016. 2
74	王 東明	中国株式市場の形成と発展のロジックを考える —「移行経済型市場」の形成を中心に—	2016. 2
75	岩崎 尚人 黄 賀	中国企業の在日法人の経営体制に関する アンケート調査分析	2016. 3
76	陳 玉雄	中国における「民間貸借」の発展とその論理	2017. 3
77	柿原 智弘	産業集積と投資環境の変化 —メキシコ中央高原地域の日系自動車企業のケース—	2017. 3
78	中村 圭	「中国企業」VS「流動人材」 —親族構造と「包」の概念から見る現代中国企業組織—	2017. 3
79	村本 孜	条件変更債権をめぐる諸問題	2018. 1
80	小平 裕	金融市場における誘因と情報の問題	2018. 2
81	Taku Okabe Karla Liliana Meza Gómez	Legal framework for industrial property protection and its importance for regional development in Mexico : Challenges and perspectives	2018. 2
82	Martha Elena Campos Ruíz Leo Guzman-Anaya Maria Guadalupe Lugo-Sanchez	Impact of Japanese direct investment in Mexico : the case of Japanese immigration and automotive industry in Bajío region	2018. 3
83	林 幸司	日中戦争下の銀行業 —抗戦首都重慶における経済制度変容の視点から	2018. 3
84	小平 裕	検証可能な私的情報と開示	2019. 2
85	岡部 拓 Juan Emmanuel Delva Benavides Ana Virginia Solis Stas Gelacio Juan Ramón Gutiérrez Ocegueda Edgar Gutiérrez Aceves Salvador Carrillo Regalado	Changing Mexico: Multidimensional analysis of the current situation of Mexico	2019. 3
86	長谷川 清	ソーシャルレンディング（日本版 P2P レンディング） の現状と課題	2019. 3

「ディスカッションペーパー」刊行一覧

号数	執筆者	タイトル	発行年月
1	丸山 一彦	満足概念と満足・不満足経験後行動の一考察	2003. 3
2	小松啓一郎	環太平洋地域における1997年地域通貨危機に 関する一考察 (英国政府内から見た視点を中心に) —新たなビジネス機会を求めて—	2004. 3
3	福島 章雄	地域通貨と IT	2006. 3
4	小松啓一郎	英国通商産業省内から見た日本経済像とその 対日貿易・投資促進策を巡る一考察 (1997年アジア 地域通貨危機前後) —新たなビジネス機会を求めて—	2005. 6

「モノグラフ」刊行一覧

1	村本 孜	制度改革とリテール金融 (平成6年 中小企業研究奨励賞を受賞) (平成9年 生活経済学会賞を受賞)	1994. 3
2	白鳥庄之助 村本 孜 花枝 英樹 明石 茂生 (共著)	金融デリバティブの研究 —スワップを中心に—	1996. 3
3	村本 孜 (編著)	グローバリゼーションと地域経済統合	2004. 3
4	村本 孜	中小企業支援・政策システム —金融を中心とした体系化—	2015. 6

* バックナンバーをご希望の方は、当研究所までご連絡下さい。

問い合わせ先：成城大学経済研究所

〒157-8511 東京都世田谷区成城 6-1-20

TEL：03-3482-9185, 9187

FAX：03-3482-7851

e-mail：keiken@seiyo.ac.jp

成城大学 経済研究所年報 第32号

平成31年 4月19日 印 刷

平成31年 4月25日 発 行

非売品

発 行
責任者

立 川 潔

発 行

成城大学経済研究所

〒157-8511 東京都世田谷区成城 6-1-20

電 話 03 (3482) 9187 番

印刷所

株 式 会 社 博 文 社

THE ANNUAL BULLETIN

of

The Institute for Economic Studies

No. 32

April 2019

CONTENTS

Preface 1

Articles

Declining Population and the Japanese Economy
..... Hiroshi YOSHIKAWA..... 5

Japan's Social-Welfare System and Its Finance:
an Inquiry Toward the Reform of Medical Services.....Eiji TAJIKA..... 25

Human Intelligence vs. BigData-Driven and Neuromorphic Artificial
Intelligence: What is the Intelligence in the First Place?
..... Hiroyuki CHUMA..... 43

Transformation of Society by Advanced Technologies
..... Kazushi KUSE, Ph. D.....115

Japanese SMEs in the context of the zombie firm hypothesis
.....Yasuo GOTO.....135
Scott WILBUR