



RIETI Policy Discussion Paper Series 17-P-015

AI/IoT時代における人的資本理論再考： 社会ネットワークとしての人的資本が必須に

中馬 宏之
経済産業研究所



Research Institute of Economy, Trade & Industry, IAA

独立行政法人経済産業研究所

<http://www.rieti.go.jp/jp/>

AI/IoT 時代における人的資本理論再考：社会ネットワークとしての人的資本が必須に*†

中馬 宏之

(成城大学/経済産業研究所)

要 旨

日本のサイエンス型産業の競争力低下パターンを敢えて一言で表現すれば、あらゆる事柄の記号化（デジタル化）・自動化・一目瞭然化によって製品・サービスやそれらを中核として内包するシステムの複雑性が不連続的に上昇し、既存の競争領域よりワンランク・ツーランク上の競争領域で迅速かつ頻繁に起こりはじめた競争（Systems of Systems 競争）に対応できなくなって世界に劣後して行くというパターンに尽きる。加速してきたシステム複雑化に伴う急速な考察の系の拡大に歩調を合わせられなくなり、Systems of Systems 領域での競争(多段階競争と呼ぶ)に劣後していくというパターンである。本 DP では、このような状況が企業・組織の事業戦略や人事戦略上の失敗にのみ帰着するのではなく、産業を支えてきた大勢の人々に体化している企業・組織特殊な人的資本自体の AI/IoT/ICT に起因する想定外の変貌・弱化傾向が、企業・組織の事業戦略や人事戦略の自由度を狭めてきている可能性も少なくないと主張する。そして、短期間に相変化が繰り返される AI/IoT 時代には革新性と保守性とを兼ね備えた自己変化能の高い人的資本が必須であるとして、そのような人的資本やその形成システムのモジュール特性、人的資本が社会ネットワークの中で企業・組織特殊化／一般化する原因、特定レイヤーの人的資本が特殊性から一般性に向かう動態特性とその原因などを、現象分類的なベッカー流の人的資本理論の限界を超えて解明しようと試みている。

キーワード：人工知能（AI）、情報通信技術（ICT）、人的資本、自己変化能、アーキテクチャ、モジュール化、自動化、一目瞭然化

JEL classification : J24

RIETI ポリシー・ディスカッション・ペーパーは、RIETI の研究に関連して作成され、政策をめぐる議論にタイムリーに貢献することを目的としています。論文に述べられている見解は執筆者個人の責任で発表するものであり、所属する組織及び（独）経済産業研究所としての見解を示すものではありません。

* 本稿は、独立行政法人経済産業研究所におけるプロジェクト「人工知能が社会に与えるインパクトの考察：文理連繋の視点から」の成果の一部である。また、本研究は科学研究費（基盤（B）26285082）の助成を受けたものです。なお、本 DP 作成に際しては、安藤晴彦氏（経済産業省）、黒川利明氏（フリーランサー）、大橋弘教授（東京大学）に数々の貴重なコメントをいただいた。この場をお借りして心から御礼申し上げたい。もちろん、本論に誤りがあるとしたら、全ての責任は、筆者に帰するものである。

† 本稿タイトルの AI、IoT は、各々 AI: Artificial Intelligence（人工知能）、IoT: Internet of everyThing（すべてのもののインターネット）または Internet of Things（もののインターネット）の略である。なお、AI も IoT も、その根底では ICT（Information and Communication Technology: ICT）に支えられているので、本来は AI/IoT ではなく AI/IoT/ICT と明示すべきところだが、本論では簡略化して AI/IoT とする。ちなみに IoT とは、ヒトとヒトとの間だけではなく、電子機器やソフトウェア、センサー、モーター等の駆動装置ならびにデータ収集・交換のためのネットワーク接続媒体などが組み込まれた物理的なデバイス、自動車などの移動体、建物などを含めたあらゆるもの（everything）をインターネットで繋ぐ ICT 全般をさす（英語版 Wiki 参照）。

I はじめに

半導体、バイオテクノロジー、製薬などの産業に代表される日本のサイエンス型産業の多くが、ある顕著なパターンでその競争力を低下させてきている。それらを短く表現すれば、次のようなパターンが言い尽くしている。(1) 製品・サービス及びそれらを中核として内包しているシステムの複雑性が、ICTが可能にしたあらゆる事柄のデジタル化・自動化・一目瞭然化によって不連続的に上昇してきた。(2) 情報の転送・応答速度の飛躍的な増大によって、新たな競争領域での競争(すなわち、systems of systems競争)の変化スピードが製品・サービス・システムの複雑性上昇と共に加速してきた。(3) 多くの産業が、そのような変化スピードの加速に対応できなくなって世界に劣後してきた。製品・サービス・システムの複雑性上昇スピードの加速による事業戦略上の考察の系の急拡大にもかかわらず、産業自身がそのようなスピードと歩調を合わせることができなくなり、systems of systems競争(多段階競争)に劣後していくというパターンである。このような多段階競争下の劣後パターンは、上昇する複雑性対処策としての抽象度の上昇パターンが直接観察できる設計領域のみならず、生産システム、製品・生産技術、研究開発(R&D)、購買、マーケティング等に関連した全ての領域で発生している(中馬(2006),(2015)、山本他(2015)、林(2015)参照)。

では、上記のサイエンス型産業の競争力弱体化は、企業・組織が短期間に頻発してきた多段階競争に自らの事業戦略や人事戦略を対応させられなくなってきたことだけが原因なのだろうか?その回答は、経済学の教科書的な次のような静学視点に立脚する限りYesであろう。「労働需要は派生需要であり、その特性は、特定の経済環境下における企業・組織の最適化行動によって大きく規定される。」ところが、多段階競争が頻発する動学的な世界においては、このような教科書的なロジックとは逆のロジックが作用している可能性も高い。つまり、鶏が先か卵が先かの議論は避けるべきであるが、各種産業を支えてきた人々に体化した人的資本自体がICTに起因する想定外の変貌・弱体化をきたしてきたために、企業・組織にとって採用可能な事業戦略や人事戦略の自由度が狭まってきている可能性である。

もちろん、本論は、このような指摘によって人的資本の変貌・弱体化要因を個々人に帰因させる“心理主義”(河野(2006))に陥ろうとしているのではない。むしろ、本論は、「既存の社会制度としての人的資本形成システムが、人々を取り巻くAI/IoT起因の大きな社会変化に対して機能不全を起こしはじめている」と主張する。

相変化を頻繁に繰り返す多段階競争の時代には、日本勢が得意としてきた“変化と異常”¹への対応力だけでなく、そのワンランクまたはツーランク上位の抽象度を持つ変化と異常への対応力、つまり、変化と異常への対応力自体の自己変化能をも形成できる人的資本形成システムが必須となる。しかも、自己変化能に富んだ人的資本は、企業・組織・産業・国家(含む言語)の境界を越えた互換性・再利用性・拡張性・相互運用性²という特徴を有する。そのため、誠にアイロニカルな状況であるが、自己変化能は、特定の企業・組織によって提供される人的資本形成のための学習機会に頼るだけでは、もはやなかなか形成されなくなってきた。それらは、企業・組織の境界を越えた社会ネットワーク内で形成されていく

それとは逆に、小さい自己変化能と大きな埋没固定費用³で特徴づけられる企業・組織特殊な人的

¹ “変化と異常”の極めて妙を得た表現は、小池和男氏による。詳しくは、小池他(2001)参照。

² 複数の異なる人的資本が組み合わせて活用される際に、全体としてきちんとした相互協力が想定通りに迅速に達成されること。ちなみに、これらの諸特性は、ソフトウェア/ハードウェア資産(IP: Intellectual Properties)に要請される特性に極めて似通っている。

³ 転用によって目減りしてしまう資産の固定費用。民間旅客機等は、中古市場が発達しているので埋没部分が小さい。

資本、つまり、Zuboff他（2002）の呼ぶ“剥製型キャリア(Career Taxidermy)”に投資が行われてしまうと、個人、そして企業・組織・産業・国家も、たちまち急速な陳腐化の連鎖に巻き込まれてしまう。多段階競争が頻発する時代においては、特定の抽象度に比較優位のある人的資本だけに投資しては、それらの賞味期限が格段に短くなってきたので、人的資本投資の危険性があまりにも高くなってきた。

さらに、多段階競争の時代においては、その systems of systems 競争という特性によってイノベーション実現のために必要な考察の系が急速に拡大する。なお、イノベーションを、「社会に大きな変革をもたらす創造的な発見・発明・改良」と定義する。そのため、企業・組織・産業・国家（含む言語）の境界を頻繁に越えるより広範囲な対話と協調（Communication & Collaboration：C&C）が必須となる。ところが、このような C&C は「言うは易く行うは難し」であり、その難しさは、特に、社会ネットワーク内での人的資本の特性に大きく依存する。

実際に、人的資本の企業・組織特殊性がベッカーの意味で高くなっていくと⁴、企業・組織間で C&C を効率的に行うための標準インタフェースがなくなっていくため、そもそも C&C がなかなか上手く実行されない。その意味では、企業・組織、そして、国家の自前主義は、AI/IoT の時代においては、企業・組織レベルのみならず個人レベルでも、スタンドアロン型（孤立型）人的資本の大きな泣き所になる。また、たとえベッカーの意味での人的資本の一般性が高い場合でも、社会ネットワーク内における人的資本間インタフェースの標準化度や人々の間で伝達可能な情報粒度（granularity）の違いによって、人的資本の互換性・再利用性・拡張性・相互運用性が大きく異なってくる。

さらに、様々な種類の人的資本間の代替・補完関係に関するメタ認知情報（社会システム内における人的資本間の関係に関する鳥瞰情報）がオープンに利用できなければ、企業・組織・産業・国家の境界を越えた貴重で豊富な相補的 C&C 機会に人々が気づくこともできない。加えて、頻繁に多段階競争が起きる AI/IoT 時代においては、人的資本が実行していた既存の様々な作業が、短い期間で次々にアルゴリズム⁵として再現されていく。さらに、アルゴリズムそのものを産み出すメタアルゴリズム⁶が多段階的に次々と生成されるようになってくる。このような短期間に頻発する多段階スパイラル（渦巻）現象⁷とも呼べるアルゴリズムやメタアルゴリズムの高度化・複雑化に対応するには、人的資本の自己変化能の保持・促進が以前にも増して必須となる。

したがって、自己変化能を持つ人的資本やその形成システムの特性を明らかにするためには、特定の時代に支配的な人的資本の特徴をベッカーのように現象的に企業・組織特殊な人的資本と一般的な人的資本とに分類するだけでは不十分なのである。そもそも人的資本が社会ネットワークの中で企業・組織特殊化したり一般化したりする原因、特定の人的資本が特殊性から一般性に向かう動態特性とその原

⁴ 人的資本がベッカー的な意味で企業・組織特殊とは、特定企業・組織における人的資本の有用性が、他企業においては相当に目減りしてしまうという特性を持っていること。人的資本の有用性が企業間で目減りしない場合には、一般的と呼ばれる。

⁵ 特定問題解決のための特定計算手順のこと。

⁶ メタアルゴリズムとは、特定問題解決のための特定計算手順としてのアルゴリズムではなく、そのようなアルゴリズムをも自ら生成するアルゴリズムであり、それ自身が自己学習能や自己変化能を持つ。Bostrom（2016）は、メタアルゴリズムに関して「At its later stages, however, a seed AI should be able to understand its own workings sufficiently to engineer new algorithms and computational structures to bootstrap its cognitive performance.」（“Seed AI<自らのアーキテクチャをも改善できる最初の AI>は、その最終段階になると、自らの振る舞いを十分に理解することができ、その認知能力を自力で改善するための新しいアルゴリズムと計算構造を作り上げるだろう；筆者訳）と述べている。

⁷ 多段階スパイラル現象：既存作業のアルゴリズム化、そのようなアルゴリズムのさらなる組合せによるより複雑な作業のアルゴリズム化、といったループが抽象度を上げながら渦巻状に次々に繰り返されていく現象。

因、systems of systems 競争の結果一般化した人的資本がさらに組み合わせられて新しい形で企業・組織特殊化していくスパイラル現象(“特殊化・一般化の多段階スパイラル現象”⁸と呼ぶ)等々の説明が急務なのである。

では、AI/IoT の時代を迎えて頻発して来た多段階スパイラル現象の中でも高い自己変化能を備えた人的資本とは、どのようなものなのだろうか？そもそも、どのようにすれば自己変化能という視点を経済分析の俎上に載せることができるだろうか？人的資本の自己変化能を高めるには企業・組織・国家、そして個人は何をすれば良いのだろうか？本論の目的は、このような問題意識に基づいて、経済学における標準理論として長らく支持を集めている現象分類的なベッカー流人的資本理論 (Becker(1993)) を社会ネットワークとしての人的資本 (human capital as a social network) という視点から再検討することである。そして、AI/IoT の時代に相応しい人的資本理論を再構成するための手がかりを模索・検討したい。さらに、このような試みが、「日本の持続的な成長を支えるために相応しい経済社会制度を創る」といった政策課題にも深く関わっているということを力説したい。

II. AI/IoT の時代になぜ社会ネットワークとしての人的資本なのか？

ICTの本質的な特徴とはなんだろうか？それは、突き詰めれば、「あらゆる事柄」を記号化 (digitize)、自動化/アルゴリズム化 (automate)、一目瞭然化する(informate)というZuboff(1984)の総括に尽きる。この三つに現代のAI/IoTを象徴するリアルタイム(瞬時)性が加われば、「あらゆる事柄」がアルゴリズムとして次々にデジタル化・自動化されることによって“階層内の情報の正確な抽象化と階層間情報の明瞭・迅速な遡及” (D’Souza and Wills (1999)) ⁹が可能になり、それらの実行結果のみならず実行過程を含む全てが大勢の人々に瞬時に一目瞭然化されていく。

ただし、1990年代までの「あらゆる事柄」とは、ほとんどが想定内/既知の「あらゆる事柄」に留まっていた。そして、想定外/未知の「あらゆる事柄」への対応に対しては、製品やシステムの複雑性が増大すればするほど、実製品/実システム/実地でのLearning-by-Using (Rosenberg (1983),(1994)) によって人々に体化していく熟練知識・ノウハウこそが圧倒的に重要な役割を果たすと大勢の人々に疑いなく信じられてきた。誤解を恐れずに敢えて短く表現すれば、“現地・現物”のみを至宝とする考え方である。そして、Rosenbergは、このような形で蓄積されてきた研究開発 (特に開発) や製品・生産技術分野での豊富な熟練知識・ノウハウこそ1980年代や1990年代前半における日本勢躍進の主要な要因と看破した。なお、そのような現地・現物主義型の熟練知識・ノウハウとは、その孤立性によって、ベッカーの意味での企業・組織特殊的特性を帯びる人的資本となりがちである。

ところが、本格的な AI/IoT 時代の到来と共に、日本勢が得意としてきた現地・現物主義型 Learn-by-using に全面依存する形での想定外/未知のあらゆる事柄への対応も、AI/IoT 化がもたしたデジタル化・自動化・一目瞭然化の便益を有効活用すれば、さらにスマートに実践できるようになってきた。想定内/既知のあらゆる事柄がアルゴリズム化/自動化されていくとともに、自己学習能や自己変化能を有する優れ

⁸ 特殊化・一般化の多段階スパイラル現象:既存企業・特殊的人的資本の一般的人的資本化、そのような一般的人的資本のさらなるユニークな組み合わせによる企業・組織特殊化、といったループが抽象度を上げながら渦巻状に次々に繰り返されていく現象。

⁹ 本文 precise abstraction and unambiguous traceability の筆者訳

て実用的なメタアルゴリズムの登場も夢物語ではなくなってきたことによる。¹⁰冒頭で述べた“特殊性・一般性の多段階スパイラル現象”のさらなる高度化やその一現象形態としての“Learning-by-Using 過程自体の多段階スパイラル化”¹¹が頻発してきたのである。

例えば、適用範囲は未だ限定的であるが、1999年5月17-21日に行われたNASAの宇宙実験 (Remote Agent Experiment: RAX) では、各種のAI技術を駆使して地球から6000万マイル (9650万km) も離れた宇宙空間上の人工衛星を想定内のみならず想定外の状況に2日間 (実質6時間) にわたって自律的 (地球からの管制無) に対応させる画期的な試みが、一部ソフトウェア上のトラブルが起きたものの、予定通りに実施された (Nayak 他(1999))。

また、高度に自動化された製造実行システム (MES¹²) を誇る半導体生産システムでは、2000年頃に境に人に頼るだけでは到底不可能な多数の前後工程にまたがるフィードバック (feedback)/フィードフォワード (feedforward) 機能を駆使した APC/AEC¹³の導入が必須になっている。そして、最近の APC/AEC では、VM (Virtual Metrology) を駆使して AI/MI¹⁴の典型的な手法である Bayesian Network¹⁵に基づく良品獲得の為の自己学習・自動分類システムが利用開始されつつある。ちなみに、VMとは、「加工時の脈絡や後工程での測定情報などの補助データを含む様々な装置稼働や加工の際のパラメーター情報を収集して生産加工時のウェーハ/デバイスの物性及び電気特性上の質を事前予測するためのコンセプト」(ITRS 2.0、筆者訳) である。¹⁶

さらに、中長期的に大きな変革を社会にもたらすと考えられている非ノイマン型 (non-von Neumann type)¹⁷に分類される脳模倣型の AI (いわゆる脳型 AI) の時代が訪れると、帰納力が格段に上昇すると共

¹⁰ 卑近な例では、ウイルスメール (SPAM) をより分けたりクレジットカードの不正使用を監視したりする際に AI 的な自動学習技術が使われているが、もはやそれらは AI とは呼ばれていない。また、Google が 2015 年に導入開始した自動 (オフライン) 学習型検索ツール RankBrain は、最先端の AI に基づいていると言われるが、未知の単語や表現に出会っても類似性を見いだして検索結果の提示が可能である。さらに、検索サイトの信頼性を判断しそれらのランク付けを行っている (<http://www.seojapan.com/blog/faq-all-about-the-new-google-rankbrain-algorithm> 参照)

¹¹ Learning-by-using 過程自体の多段階スパイラル化: Learning-by-using によって変化/異常作業のアルゴリズム化がなされ、そのようなアルゴリズムの組合せによってさらに複雑な作業方法を Learning-by-using によって学んでアルゴリズム化する、といったループが抽象度を上げながら渦巻状に次々に繰り返されていくこと。

¹² Manufacturing Execution System (製造実行システム) の略。工場の状態をリアルタイムに追尾するシステム。MES があれば、Google Earth のように、工場全体から工場内の特定装置に至るまで、ズームイン・ズームアウトの視点切り替えが簡単にできる。最近では、PDF Solutions の Exensio (<https://www.pdf.com/exensio>) に象徴されるように、同一企業の工場間のみならず異なった企業間でもデータベースの共有をほぼリアルタイムで可能とする統合型製造システムが登場している。

¹³ Advanced Process Control/Advanced Equipment Control の略。工程/装置間にまたがる作業を、前後工程/装置への Feedback/Feedforward を自在に行ってほぼリアルタイムに最適化する自動生産処理システム。

¹⁴ Machine Intelligence の略

¹⁵ 「複数の確率変数の間の定性的な依存関係を (有向) グラフ構造によって表し、個々の変数の間の定量的な関係を条件付確率で表した確率モデル」、「確率モデルとしては、確率変数、その間の依存関係を表すグラフ構造、条件付確率の集合によって定義される。これを用いた確率計算によって不確実性を含む事象の予測やシステムの制御、障害診断などの知的情報処理に利用することができる」 (www.vision.cs.chubu.ac.jp/CV-R/jpdf/YoichiAI2000.pdf 参照)。

¹⁶ 『INTERNATIONAL TECHNOLOGY ROADMAP FOR SEMICONDUCTORS (ITRS) 2.0』(2015 EDITION) によれば、VM とは、「a concept to predict post process physical and electrical quality parameters of wafers and/or devices from information collected from the manufacturing tools, e.g., equipment or process parameters, including support from other available sources, e.g., production context information or up-stream metrology」と定義されている。

¹⁷ 現行半導体には、良く知られた“フォンノイマン・ボトルネック”が立ちはだかっているからである。同型コンピュータの性能上のボトルネックは、メモリと PE (Processing Element) あるいは Processors/Cores の間のコミュニケーション構造に規定される転送・応答速度の隘路に起因する。そのため、Intel Processor に代表されるような Many Cores メモリ共有型になればなるほど、上記ボトルネックが支配的となり、消費電力のより多くがメモリアクセスで消費されてしまう。この種の限界を突破できる可能性が高い PE・メモリ融合型アーキテクチャを持つ Neuromorphic Chip/Device や脳型

にパース (Peirce) 流アブダクション (abduction: 仮説発見・創造) すら行えるようになると期待される。そうなると、格段の自動化や IoT の進展とともに冒頭で述べた社会ネットワークのさらなる稠密化が加速するはずである。¹⁸ 実際、計算機科学の専門家達の多くは、現行のノイマン型半導体では、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だろうと予測している (IRDS(2016)の各種報告書や Srinivasa(2015)の ITRS 2015 での報告など参照)。例えば、IRDS 2016 は、目の前の 2024 年に現行の CMOS¹⁹半導体の限界が大きく立ちはだかると予測している。

そのような特徴を持つ近未来が予測される中で既存の競争領域に留まり旧来の抽象レベルの人的資本形成スタイルに固執してしまっていると、日本の諸産業を支えてきた科学者・エンジニア・熟練工・一般労働者達の変化と異常への対応力の次の抽象度段階での育成が遅れがちとなり、特殊性・一般性の多段階スパイラル現象の中で彼らの人的資本の価値創造力や付加価値力が急速に低下していくと思われる。そのような状況に未然に対応するためには、前述のように、既存の変化と異常への対応力よりワンランク・ツーランク上位の抽象レベルの変化と異常への対応力、変化と異常への対応力自体の自己変化能をも培える人的資本形成システムを新たに社会に構築することが必須となる。

もちろん、変化と異常への対応能力をフル装備した自己変可能を持つ脳型 AI は、Kurzweil (2004)の超楽観主義に反して容易には実現できないと思われる。実現には、人工知能の父 (故) Marvin Minsky (2007) が的確に指摘しているように、情動や自意識の組込が必須であることによる。より具体的には、Minsky (2007)的な意味での 6 階層(本能、学習、熟慮<学習成果の状況に応じた選択>、内省<熟慮行動の評価>、自己内省<内省行動自体の自己評価>、(意識が上がってくる)情動<自己内省自体に対する快・不快や喜怒哀楽>)を持つ Emotion Machine (EM) の脳型 AI への組込が要請される。意識上・意識下の情動とは、Minsky が教えてくれているように、既知・未知の難問への対応に不可欠な高速な視点切り替え装置であり、互いの多様な意図や常識・文化等々の共有による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ことによる。

なお、この点で、一世を風靡している上記 Kurzweil (2004)のシンギュラリティ(singularity)仮説への宇宙物理学者 Chaisson (2012)による警鐘は一考に値する。シンギュラリティ仮説では 2045 年(最近では 2030 年)頃から脳型 AI が人類をあらゆる側面で超え始めるとするが、Chaisson は宇宙規模での諸活動の 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消費量)を実際に計算し、シンギュラリティ=「コンピュータの能力が、あらゆる側面で人間を上回る現象」と定義することの唐突さを批判している。宇宙論的には Technological Singularity (人類が、それ以前の時代とは異なり、過去 100 年以上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ということ)を指摘できるだけではないかとの主張である。²⁰

AI への期待が高まってきている理由である (IRDS 2016 Edition SYSTEM AND ARCHITECTURE WHITE PAPER 参照)。以上は、本プロジェクト共同研究者の今井正治・大阪大学 (名誉) 教授の御示唆に基づいている。

¹⁸ 変化と異常への対応には、小サンプルでも威力を発揮するこの種の帰納力(パース流アブダクション能力)のアップが不可欠と思われる。

¹⁹ Complementary Metal Oxide Semiconductor. 相補型金属半導体酸化半導体。現在主流の半導体デバイス形態

²⁰ Singularity 仮説に関しては、THM (Temporal Hierarchical Memory) 理論と称される脳型ソフトウェア開発で有名な Hawkins (2004)による批判も興味深い。Hawkins によれば、彼が開発対象にしている大脳新皮質型の BMI (Biological & Machine Intelligence : 脳に限りなく忠実な MI) が実現すれば、現状では実現されていないが、その場 (リアルタイム) で自己学習しながらも過去・現在のデータに基づいていくつかの点では人間を遥かに凌駕した将来を予測できるようになる

Rosenberg (1983)、(1994)の時代に比べると、AI/IoT 時代の進展につれて先の現地・現物主義型の Learning by Using によって人々に体化してきた熟練知識・ノウハウの威力が既にかなり相対化されてきている。その背景には、当時の Rosenberg が事実上不可能と見なしていたソフトウェア主体の Simulation やソフトウェア・ハードウェア複合体型の Emulation の重要性と可用性 (availability: システムの継続稼働できる能力) が飛躍的に進化してきている状況がある。実際、Learning-by-Using 過程自体の多段階スパイラル化が急速に進展し、Simulation/Emulation 結果をも自在に駆使できるワンランク・ツーランク上位の抽象度を持つ変化と異常への対応能力に対する需要が急増してきている。²¹

Simulation/Emulation 技術の高度化により Learning-by-Using 過程自体が多段階スパイラル化してきている様子は、半導体デバイスのソフトウェア・ハードウェア同時開発に不可欠となっている FPGA Prototyping (試作) 技術²²に端的にうかがえる。この技術では、事前・事後に半導体の回路をソフトウェアで自在に書き換え可能なFPGA (Field Programmable Gate Array) と呼ばれる半導体デバイスが使われる。より具体的には、試作段階の半導体設計回路情報を(複数の)FPGA にマッピングすることによって実デバイスに比肩する動作速度のハードウェアデバイスを仮想的に実現し、その上で実デバイス用組込ソフトウェアと実デバイス自体の同時開発を以前に比べて4-5桁以上も短い期間で行える (Nenni and Dingee (2016))。

しかも、Synopsys 社 2016 年 9 月発表の“Virtualizer Studio”²³に象徴されるように、最終製品を生み出すシステムメーカーとそれらに中核部品として組み込まれる半導体等のサプライヤーが互いの FPGA Prototyping 済みのモデルやデータ等を持ち寄り (互いに共通の API²⁴を介して) 垂直知識を統合すれば、高解像な上位システム (Systems of Systems) を仮想的に簡単に構築できる。その結果、組織の境界をまたぐ形で新製品/素材のスペック決定・市場投入の妥当性に包括的な探りをいち早く入れることができるようになる。さらに、このような協調行動によって、将来の不確実性に対処するための意思決定の選択権や自由度として定義されるリアルオプション (Real Options) ²⁵の幅と深さが、関係企業・組織にとって大きく向上する。もちろん、その際には、利益相反問題をどう解決するかが重要になるが、そこでも (第三節第3項で後述するように) ICT がもたらした実行過程・結果の一目瞭然化がその解決に大いに役立つ。

さらに、このような企業間にまたがる階層内の情報の正確な抽象化と階層間情報の明瞭・迅速な遡及

という (Numenta (2017))。そして、大脳新皮質型 AI は、このリアルタイム性でビッグデータ型 AI の学習効率を大きく凌駕する可能性を持つが、Hawkins によれば、扁桃体や海馬、大脳辺縁系、中脳・橋・延髄等々が絡む報酬/情動/感情のソフトウェア/ハードウェアによる具現化などは夢のまた夢の先の話である。したがって、大脳新皮質型 AI は極めて強力ではあるが、それが完成しても依然として人間の Tool として使えるに過ぎないと断言している。なお、Kurtzweil (2012)は、この Hawkins (2004)に触発されて書かれたと類推できるが、Hawkins 自身の評価を避けて同氏が見いだした共同研究者 (現 Vicarious 社の Dileep George 氏) を評価したり、議論の中心に据えている島皮質 (Insular Cortex) に関する脳神経科学者 Craig (2015) の成果を説明する際にその解剖学上の位置が全く異なっていたりなど、やや急ごしらえの感がする。

²¹ もちろん、このような形の知識・ノウハウの抽象度のスパイラル的な上昇は、新しい作業を生み出すものの、それらが必ずしも高度化 (希少性が増大) するわけではない。場合によっては、LINE を親指で駆使する老若男女に典型的に見られるように、AI/ICT によって各自の Superman/Superwoman 度が上がるので、多くの人々が、以前には高難度であった作業を抽象度の上昇という恩恵を受けて簡単に熟 (こな) せるようになる。

²² 安価で高性能な FPGA Prototyping 技術が利用可能になったのは、高集積度を誇る FPGA が利用可能になってきた 2000 年以降である。それ以前は、インテルのような、莫大な研究開発費を要する極一部のみに利用可能な技術であった。ちなみに、FPGA 専門家によれば、現在でも最先端の FPGA は、1 個 400 万円位するという。詳細は、Nenni and Dingee (2016) を参照されたい。

²³ <https://www.synopsys.com/Japan/press-releases/Pages/20160907.aspx>

²⁴ Application Program Interface の略語で、プログラミングの際に使用できる命令や規約、関数等の集合。

²⁵ リアルオプション理論の嚆矢としては、Dixit 他(1994)が良く知られている。

が実現できるということは、言い換えれば、ほんの最近まで全くの別物だと考えられていた下記に定義される Max Weber 流の事前概念である形式合理性 (Formal Rationality) と事後概念である実質合理性 (Substantial Rationality) とを同時かつ事前に検討できる時代が訪れつつあることを意味する。つまり、AI/IoT 時代の到来と共に、本質的にマイクロ現象である製品/素材設計スペックの検証作業 (Verification) のみならず、本質的にマクロ現象である製品/素材設計スペックの市場妥当性 (Validation) にまで詳細な探りを入れることを可能とする仕組みが出現しつつある。²⁶

その結果、企業・グループ内の局所情報しか利用可能でないため製品やシステムの妥当性は先ずは市場に出してみてもしか分からないという素朴な新製品開発方式の時代が終わり迎えつつある。代わって、実製品・実システムの市場投入前に、市場の川上から川下に至る高解像な垂直知識を活用してそれらの上市妥当性を最後の最後の段階まで仮想的に追求できるワンランク上のコラボレーション (協調) ツール/リアルオプションツールが出現してきているのである。そして、まさに、このような協調の場でこそ、企業・組織にまたがる社会ネットワークとしての人的資本の真価が発揮される。なお、形式合理性と実質合理性は、下記のように定義できる (Ritzer (2001))。²⁷

形式合理性 (Formal Rationality) ⇔ ミクロ的 (個人的) 及びマクロ的 (集団的) 的に示された規則・法則・規制などに合致しているか否かが形式論理によって誰にでも形式的に確認できる (Verification) という意味での合理性

実質合理性 (Substantial Rationality) ⇔ 知性的に考える能力に基づいて、集団内外で観察された行為や事象/現象がマクロ (集団) レベルでの支配的な価値/要請に合致しているか否かを判断できる (Validation) という意味での合理性

この種の Simulation/Emulation 技術を介した仮想的な垂直連鎖ネットワークの幅と深さは、当然のことながら、製造業内のみならず製造業とサービス業・農業・鉱業などとの間に瞬く間に水平的にも拡大していくと予想される。そして、より上位の抽象度での多段階競争 (Systems of Systems 競争) へと急速に深化し、それに伴って抽象度の上がった社会ネットワークとしての人的資本の需要を次々に増大させていく。さらに、AI/IoT は、あらゆる事柄のデジタル化・自動化・一目瞭然化を実現しながら世界のあらゆる事柄を高速に複雑化・ネットワーク化していく。そして、市場・テクノロジーの変化速度が大幅に加速し、製品・サービスの複雑化 (complexification) やそれらを実現するための (制御) 機能の抽象度が急速に高まっていく。その結果、上記の相変化現象としての多段階競争が同一期間内により頻繁に発生することになる。

このように、AI/IoT 技術の飛躍的發展と共に、変化と異常への対応に必要な知識・ノウハウの幅と深さが、その抽象レベルを上げながら企業・組織・産業・国家の境界を頻繁に超えるようになってきた。そして、複雑化・ネットワーク化に向けた社会環境の相変化に迅速に対応するためには、各種の境界を越えた頻繁な対話と連携 (Communication & Collaboration : C&C)、その現象形態としての国家規模・地球規模での社会学習 (Economy of Social Learning) ・社会実験 (Economy of Social Experiments)、あるいはそ

²⁶ Chuma (2006)では、半導体露光装置産業での ASML 躍進とニコン・キヤノンの衰退という 2000 年以降の状況が実質合理性への探りを入れる R&D システムの彼我の違いにあるとして、“interim modularity” という概念を用いて説明している。

²⁷ 正直なところ、Ritzer (1997)を読んでも上記引用にある形式合理性、実質合理性の定義は、このように実際にはスッキリした形で提示されているわけではない。

れらを実践するための各種プラットフォーム形成（投資）やその運営活動への積極的な参加が不可欠となってきた。AI/IoT を特徴付けるデジタル化・自動化・一目瞭然化が、個別企業・組織内で実施された実験・学習の社会的有用性の Findability（発見確率）と高め、それらを他企業・組織で相互に運用するための interoperability（相互運用性）を格段に向上させるからである。²⁸ その意味で、複雑化・ネットワーク化とは、人工物か生命体かに関わらず、参加主体の共存共栄のための協調行動（cooperation）そのものだと言える（Pross (2012)）。その結果、人的資本の企業・組織の境界を越えた社会ネットワーク性が、当然ながら急増していく。

上記のような個別実験・学習の成果がより広汎な社会ネットワークの中でいち早く普遍化されていく現象は、安易な類推は慎むべきかもしれないが、進化発生生物学という発生モジュール（Developmental Module）²⁹が、支配的な環境条件下で比較優位を有する進化モジュール（Evolutionary Module）として様々な種/亜種に伝播して組み込まれていく動態特性と極めて酷似している（Callebaut (2005)、Lacquaniti(2013)など）。そして、後述するように、そのような普遍化の速度と選択肢（リアルオプション）とを飛躍的に高めるために、生命体/人工物の構成モジュールが独立性の高い形でさらに分離・独立化（Unbundling化）されていく。つまり、“Power of Modularity”(Baldwin他 (2000)³⁰が、さらに大きな力を発揮するようになる。

しかも、参加主体の共存共栄のための協調行動を目指してそれらのモジュール間のインタフェース（界面）がユニバーサルに標準化されていけばいくほど、組合せ複雑性の自由度/モジュール間の配線自由度が飛躍的/爆発的に増大するので、それらのモジュールの汎用性や再利用性が大幅に拡大すると共に、生命体/人工物自身の現状を保ちながらの（後述する）イノベーション能（Innovability）が高まる（Wagner (2014)）。このような階層モジュール化した構造への動態プロセスは、企業・組織特殊の人的資本から一般的・汎用的人的資本への動態プロセスをも根本で特徴付けている本質的な流れだと考えられる。

さらに、モジュール化とモジュール間インタフェースのユニバーサルな標準化が進むほど、イノベーションがより最前線の最終市場で数多く起こりやすくなる。あらゆる主体が稠密に結びつくことによって、あらゆる箇所での相互依存性の大局化、つまり、個々人の変化の幅と深さが身近な情報にアクセスするだけでも格段に向上できるようになるからである（Wagner (2014)）。そのため、イノベーションが、あらゆる人によってあらゆる場からあらゆる時に並行して起きやすくなるという現行のIoT（Internet of everyThing）時代の特徴、つまり、“イノベーションの大衆化”現象が限りなく起きやすくなる。その結果、人的資本の自己変可能の重要性もさらに増大する。そして、社会ネットワークのこのような稠密な化現象も、人的資本を社会ネットワークという視点から再検討することの必要性を高めている。

上述の階層モジュール化とモジュール間インタフェースのユニバーサルな標準化、それらを支える個々の実験・学習の社会化がイノベーションプロセスにいかにか大きなインパクトをもたらさうかは、現代のソフトウェア開発現場の有り様に既に顕著に観察される。事実、同現場では、様々なスキルを有する世界中のソフトウェア開発者が企業・組織・産業・国家の境界などお構いなしに寄って集ってソフトウェアを作り上げるためのオープンな開発プラットフォームであるGitHub（<https://github.com/>）が定番化し

²⁸ 筆者自身は Noah Harari (2016)の（特に第11章に示されている）“思想”には共鳴できないが、このような汎化傾向の行き着くところは「And value lies not in having experiences, but in turning these experiences in to free-flowing data. 我々にとっての価値は、経験することにあるのではなく、それらの経験をタダで利用可能なデータに変換することにある（筆者訳）」(Noah Harari (2016))という方向に進んでいることはほぼ間違いないと思われる。

²⁹ 発生モジュールとは、特定の個体種が生み出した器官モジュールのこと。

ている。³⁰ 異質で多様な大勢の人々の協調を容易にする人的資本間インタフェース標準化の重要性を垣間見させてくれる事例である。なお、遅ればせながら日本でも近年GitHub利用が加速してきている様子であるが、専門家によれば実験・学習の社会化に関する彼我の違いは未だ相当に大きいようである。

このGitHubの事例が端的に示しているように、社会実験・社会学習の機会が十分に提供されないまま旧来の抽象レベルでの開発領域やスタイルに踏み留まってしまうと、まるで竹槍で機関銃に挑んでいるような状況になってしまう。誠に残念ながら、実はそのような竹槍対機関銃といった構図は、繰り返しになるが、1990年代半ば以降に本格的なICTの時代が訪れるにつれて、日本の半導体やバイオ・医薬品に代表されるサイエンス型産業において現実のものとなっている（中馬 (2006), (2015)、山本他(2015)、林 (2015)）。

III. 社会ネットワークとしての人的資本：“システムアーキテクチャ”という視点から

1. “人的資本アーキテクチャ”とその内部・外部インタフェース(界面)を定義する

社会ネットワークとしての人的資本の自己変化能という視点を深掘りするために、本論では人的資本をアーキテクチャ（基本設計思想）という観点から再考してみたい。アーキテクチャという概念の中核には、様々な構成要素を組み合わせるといった視点が据えられているからである。そのために、まず、アーキテクチャの定義に遡ってみよう。本論では、ソフトウェア集約的な製品に関する下記の国際電気電子工学会(IEEE)の定義が極めて重要だと考える。

「Architecture is the fundamental organization of a system embodied in its components, their relationships to each other, and to the environment, and the principles guiding its design and evolution.」
[IEEE Standard 1471:2000 - Recommended Practice for Architecture Descriptions of Software-Intensive Systems]³¹、

「アーキテクチャとは、様々な部品、部品間の繋ぎ方、部品の（使用）環境との関係に組み込まれている（製品）システムの基本構造と、そのような基本構造に関する設計・進化（方向）に関する指針である。」（筆者訳、()内は筆者追加）

この IEEE 定義の前半は、使用環境に配慮しながらも製品を構成している部品の繋ぎ方/組合せ方としてのアーキテクチャを記述しているので、常識的な意味での“製品アーキテクチャ”とほぼ同義である（例えば、藤本 (2001) 参照）。他方、IEEE 定義の後半は、前半に定義された製品アーキテクチャの設計

³⁰ ここでの記述は、本プロジェクトの共同研究者であり Computer Science の専門家でもある黒川利明氏に御教示いただいた。自らもプログラムを書いておられる黒川氏によれば、「GitHub の他にもスタック・オーバーフロー (<http://ja.stackoverflow.com/>) という Q&A のセッションがあって、これらを使いながら、疑問点を潰して作業を進めていく感じなのです。このエコシステムには、フリーランサーだけでなく、Google や Microsoft などの企業の技術者、大学や国立研究所の技術者も入っていて、彼らは、職場を移りながらも、自分の専門的な貢献はこのようなところで続けていくというやり方をしています。」「GitHub では、markdown という html の変形が使われています。そして、プログラム作成の際には、コードスニペット (Code Snippet: コードに簡単に挿入できるようにあらかじめ用意されたコードの断片) と呼ぶコードが整形済みで表示されます。さらに、マイクロソフトの Visual Studio などの開発ツールは、AI 技法を使って構文エラーを見つけたり、次の構文入力はこのものじゃないかといった予測や推論をしたりします。しかも、この手の技術者仲間での基本的なツールは、コミュニケーション (ツール) と一緒になっています。」などの特徴が見られるという。

³¹ http://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_1471IEEE

指針や進化方向（進化可能性）にまで言及している。本論では、このような進化可能性/自己変化能をも含む拡張された製品アーキテクチャを、“システムアーキテクチャ”と呼ぶこととする。³²

システムアーキテクチャは、多段階競争が頻繁に起きる時代において特に重要性が増す。進化の方向性/可能性、したがって自己変化能の豊かなシステムアーキテクチャでないと、それらに基づいた製品・サービスの寿命も短くなるから、決め打ちの将来リスクが高まってリアルオプション性が低下してしまい投資効率が悪化する。しかも、投資効率の低下は、製品が複雑になればなるほど必要な製品化投資規模とその埋没固定費用部分を大きくさせるので、製品アーキテクチャとしての存在意義を低下させる。そして、埋没固定費用の巨大化に対処するには、自己変化能の多彩さに加えて、将来の不確実性に対処するために最後の最後まで決定を遅らせて自由度を確保しながら決定後はできるだけ速やかに実行に移すリアルオプション戦略の採用が不可避となる。

ちなみに、ソフトウェアエンジニアリング分野で名高い Poppendieck 夫妻（2004）が看破しているように、このようなリアルオプション戦略は、トヨタ生産システム（TPS）の本質でもある。³³ より具体的には、彼らは、（1）ムダを排除する、（2）学習効果を高める、（3）決定をできるだけ遅らせる、（4）できるだけ速く提供する、（5）チームに権限を与える、（6）全体を見る、の6点を TPS の本質としている。リアルオプション戦略に直接相当するのは、この中の（3）と（4）である。各々は、決定をできるだけ遅らせて最後の最後まで待つのが「後工程引き取り」（プル型生産方式）、決まったらできるだけ早く提供するのが「タクトタイム（工程内処理時間）の短縮」というトヨタ用語にも相当する。

しかも、このようなシステムアーキテクチャを巡っての多段階競争の時代になると、特定のアーキテクチャ内での改善・改良競争ではなく、自己変化能の高いシステムアーキテクチャを探索しながら、同時に新しいシステムアーキテクチャに基づく新製品開発を行っていくという形の抽象レベルがワンランク上の Systems of Systems 競争（システムアーキテクチャ競争）が支配的になってくる。さらに、新製品開発には、企業・組織・産業・国家（含む言語）の境界を頻繁に越えた形でのビジネス・アーキテクチャ（「テクノロジーのポテンシャルを経済的な価値に変換する仕組み」³⁴）探索を実践していかなければならない。つまり、製品アーキテクチャのシステムアーキテクチャのためのビジネスアーキテクチャの探索といった高難度な多段階競争の試練が押し寄せる。その結果、自己変化能に溢れたシステムアーキテクチャの重要性がさらに急増していく。

では、以上の説明を踏まえて自己変化能に溢れた人的資本のシステムアーキテクチャとは、どのようなものだと考えれば良いだろうか？まず、特定の人的資本が各種の構成要素モジュール（コンテンツモジュール）の組合せによって実現されていると考えれば、上記の製品アーキテクチャに対応した人的資本アーキテクチャを定義できる。例えば、素朴ではあるが、人的資本を“読み書きそろばん”という3つの構成要素モジュールに分けることは昔から日常的に行われている。そして、製品を構成する部品にも企業・組織特殊なもの一般的なものとがあるように、人的資本の構成要素モジュールにも企業・組織特殊なもの一般的なものとがある。

さらに、社会ネットワーク性を持つ人的資本のアーキテクチャ特性を把握するには、人的資本そのも

³² なお、このような慧眼は、生命体のアーキテクチャを扱う進化発生生物学分野におけるモジュール・システムアーキテクチャの重要性を論じる文献にも見いだすことができる。例えば、Eble（2005）、上記の製品アーキテクチャに相当する部分を“Organizational Modularity”（モジュールである状態）、後者の自己変化能/進化可能性（evolvability）をも含んだ製品アーキテクチャ部分を“Variational Modularity”（モジュール形式で変化する状態）と呼んでいる。

³³ Poppendieck 夫妻（2004）は、本プロジェクトの共同研究者である林晋教授（京都大学）に御紹介いただいた。

³⁴ Chesbrough（2003）の“ビジネスモデル”の定義。

のアーキテクチャ（**人的資本内アーキテクチャ**）だけではなく、様々な形で人々に分有されている**人的資本**を束ねる**人的資本間アーキテクチャ**にも配慮する必要がある。そうすると、人的資本には、人的資本内でそのコンテンツ（内容）としての構成要素モジュールをつなぐインタフェース（“**内部インタフェース**”）と個々の人的資本を繋ぐ/組み合わせるインタフェース（“**外部インタフェース**”）の二つが存在する。そして、人的資本内・資本間アーキテクチャのみならず、内部・外部インタフェースの特殊性/特異性や組み合わせ上の独自性/創造性も、人的資本自体の企業・組織・産業・国家（または言語）の特殊性をもたらすことは言うまでもない。

加えて、AI/IoT がもたらす階層内情報の正確な抽象化と階層間情報の明瞭&迅速な遡及能力は、そのことがもたらす一目瞭然化便益が大勢の人々に開放されればされるほど、企業・組織間において人的資本の外部インタフェースの標準化を推進させる強力なツールともなる。各自の保有する人的資本間の代替・補完関係に関するメタ認知情報（社会システム内における部分と全体の関係の鳥瞰情報）が利用可能となるからである。また、このような外部インタフェースの標準化や同インタフェースを通じてやりとりされる複雑な情報が簡略化（圧縮化）されればされるほど、人的資本の互換性・再利用性・拡張性・相互運用性がより一層高まっていく。

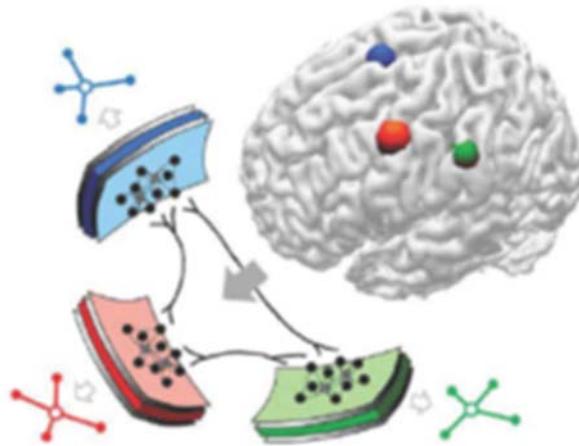
また、AI/IoT は人々間の情報転送速度や応答速度をどんどん高速化していくので、それに応じて人的資本内構成要素モジュールが個人内で精緻化する速度（学習速度）や個人間で類似化する速度も高速化していく。加えて、このような形で人的資本内構成要素モジュールの精緻度と類似度が高まるに従い、以下で詳述する外から内へのフィードバック効果によって“内部インタフェース”のデファクト(事実上の)標準化が進んでいく可能性も高い。したがって、上記の IEEE のシステムアーキテクチャに関する定義は人的資本にもそのまま拡張可能である。

もちろん、個々人が論理的・直感的に連想できる知識・ノウハウの幅と深さには生得的なものや習得的なものがある。そのため、人的資本は、人々の多様性・異質性を反映して、人工物に比べて個人特殊的なものの比率がかなり高いと考えられる。ただし、共通の言語や学習機会の獲得は、習得される語彙やそれらの意味（*semantics*）とその活用体系（*syntax*）やそれらの文脈に依存した意識・無意識の連想パターン（*pragmatics*）に少なからざる共通性を与える（Sperber 他（1999））。言い換えれば、共通言語の習得過程や学習機会の獲得過程の共通化は、人的資本のコンテンツ（構成要素）のみならず人的資本内インタフェースが標準化し、そのような標準インタフェースを通じて各自の人的資本コンテンツ自体がさらに類似化していく過程でもある。そもそも、そのような莫大な数の共有知識（*Common Knowledge*）がなければ、密度の濃いコミュニケーションはなかなか迅速に成立しないからである（Minsky（2007））。

上記の人的資本アーキテクチャや人的資本の内部インタフェースの共通化・標準化傾向に関する指摘の妥当性は、*Computational Neuroscience* という分野で著名な Rolls（2016、第 17 章 *Syntax and Language*）の仮説が、脳神経生理学的に側面支援してくれている。Rolls によれば、大脳皮質内には名詞・形容詞・副詞等が一括りに集められた互いに粗な一塊の数ミリ程度の（名詞であれば 1 万個程度の単語を記憶可能な 6 層の）柱状モジュール(*cortical column*)が互いの独立性を保つために疎（*sparse*）な形で数多く存在しており、そのような柱状モジュールの一つ一つに、各々のモジュール特性を記したメタコード（*place code*）³⁵が付随している。

³⁵ Place Code は、次のように定義されている。「In most cortical systems, information is encoded by which neurons

図 1 : Potts Attractor Network のイメージ図



(Russo, Pirmoradian and Treves (2012) , 32 頁を参照)

本図の使用許可は Treves 博士より直接いただいた。

柱状モジュール内には、反回側枝（主要な脳神経細胞である錐体神経細胞の軸索が枝分かれして反回してきた部分）誘導型の稠密な自己再帰型ネットワーク（Associative Attractor Networks と呼ばれる）が張り巡らされている。ただし、柱状モジュール間のネットワークは、相互干渉を防いでメモリ量を増やすためにかなり疎（sparse）になっている。人々は、共通言語や共通学習機会に接することによって、これらの柱状モジュール間に先の Place Codes を利用しながら類似の連結パターン(上図の Potts Attractor Networks と呼ばれる)を無意識に刻み込んでいく。この点に関する Rolls (2016) の仮説は、具体的には、下記のような形で提示されている。

「Clearly the full details of the system would be more complicated, but the general hypothesis is that adjectives and adjectival phrases that are related to the subject of a sentence will have strong connections to the subject module or modules; that adverbs and adverbial phrases that are related to the verbs of sentence will have strong connections to the verb module or modules; and that adjectives and adjectival phrases that are related to the object of a sentence will have strong connections to the object module or modules.」 (Rolls (2016), p.346)、

「明らかに、(脳内言語) システムの詳細はもっと複雑であるが、一般的な仮説では下記のよ

are firing, and how fast they are firing. This is called place coding, for each neuron has its place in the cerebral cortex.」(多くの大脳システムにおいて、情報はどのニューロンがどれほど速く発火しているかによってコード化されている。このことを Place Coding と呼ぶ。その理由は、各々のニューロンが大脳皮質の特定場所を占めているからである)。「the place code present in the cerebral cortex is one with a sparse distributed representation, in which a small portion of the neurons is active, each tuned to a set of stimuli in a different ways, with the profile of firing rates across a population of neurons conveying the information.」(大脳皮質の Place Code はまばらに分散表象されており、そのような表象内では、小さな一部分のニューロンが、一連の刺激に対して異なった方法で、そして、特定情報を伝える一群のニューロンにまたがった (一定時間内の) 発火率特性を示しながら、活発に活動している。)いずれも、筆者訳。

うになる。つまり、文章の主語に関係づけられる形容詞や形容詞を形作る語句は、主語（柱状）モジュールに（神経回路的に）強く連結される。文章の動詞に関係づけられる副詞や副詞を形作る副詞は、動詞（柱状）モジュールに強く連結される。さらに、文章の目的語に関係づけられる形容詞や形容詞を形作る語句は、目的語（柱状）モジュールに強く連結される。」（筆者訳、
（）内は筆者追加）

このように、言語を操る人々の脳内ではアナログ情報のデジタル化を実現する仕組みがメタで少なくとも二段階に構築されており、それによって人々の間で言語/記号によるコミュニケーションが可能になっていると考えられる。そして、このような脳内の柱状(語彙)モジュールに張られる共通の連結パターン（人的資本の内部インタフェース）の一つが **grammar**（文法）である。そして、人々の間の円滑なコミュニケーションは、各自が共有するこのような標準化された **grammar** に代表される内部インタフェースに従う連想パターンの類似性/同一性によって効率的に成立するようになる。³⁶

実際、個々人の思考プロセスでは、ふと思いつかぶ/思い当たるキーワードに芋づる式に繋がっている一連の語彙（Minsky（2007）流の“Knowledge-tree”）が、情動依存的な形で意識・無意識に連想記憶の形で引っ張りだされてくる。³⁷ そのため、個々人は、身体外的/内的刺激に触発されて自らに浮かんできた Knowledge-tree（連想記憶時に結びついてくる単語連結ツリー）やその浮かび方を極めて自分独自のものかと思いがちである。ところが、最近の安価な音声認識市販ソフトの 90%を越える認識率が示すように、実は、独自の Knowledge-Tree やその浮かび上がるメカニズム（機構）は、実際には標準化された人的資本の内部インタフェースのおかげで、多くの人々にかなり共通したものになっている。³⁸ その様子は、極端な言い方をすると、同一の用語/意味検索には同一の検索結果が伴う Google Chrome 等を使った Web 検索を行っているかのようでもある。さらに、人々が文脈を深く共有できるようなコミュニケーションでは、“心の理論”（Theory of Mind）³⁹が作用するので、このような連想パターンの共通性がさらに増強される。したがって、人的資本の内部インタフェースは、言葉を等しくする個人間でかなり類似していると言える。

さらに、人的資本内アーキテクチャ自体も、それが組み込まれている脳内構造のモジュール性が極めて高いことから類推すると、人類並びに脳を持つ生命体の間でかなり類似したシステムアーキテクチャを共有していると考えられる。実際、人類を含む生命体の脳内各部位を繋ぐネットワークシステムは典

³⁶ Rolls（2016）は、その傍証として下記のような習得された言語毎に各自の Potts Attractor Network が異なっているという興味深い事実を紹介している。「Separate neuronal implementation of different languages is consistent with neurological evidence that after brain damage one language but not another may be impaired.」（異なった言語は各々が疎な形で組み込まれているということは、脳の損傷によって一つの言語能力が阻害されても、もう一方はそうでないという神経学上の証拠と整合的である：筆者訳）

³⁷ 内的・外的な刺激に触発されて各自の意識に何が思い浮かぶかを規定しているのは、大脳皮質の構成部位である前部・島皮質を中心とした意識下の顕著ネットワーク（Saliency Network）回路であることは良く知られている（例えば、Uddin（2014））。

³⁸ 個人でも手の届くドラゴンスピーチなどの高い認識率を誇る市販の音声認識ソフトには、AI の一種とされる階層的隠れマルコフモデルと呼ばれるビッグデータ活用型の深層学習（AI 型）アルゴリズムが用いられている。詳しくは、Kurzweil（2012）を参照されたい。

³⁹ 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。

型的な階層モジュール構造をしており、スモールワールド性⁴⁰やスケールフリー性⁴¹などの優れたネットワーク特性を備えていることが知られている（Sporn (2012)、Goekoop 他(2012)）。しかも、そのようなネットワークには、人類を含む各種の生命体間で驚くほどのモジュール・システムアーキテクチャ上の類似性がある（Rolls (2016)）。さらに、興味深いことに、生命体が人類に近くなればなるほど、各種の構成要素モジュールの分離化・独立化・精緻化が実現されていく。その点は、例えば、Damasio (2010)に示されている下記の実事が一目瞭然化してくれている。

「In the elaborate brains of complex creatures, however, networks of neurons eventually come to mimic the structure of parts of the body to which they belong. They end up representing the state of the body, literally mapping the body for which they work and constituting a sort of virtual surrogate of it, a neural double. Importantly, they remain connected to the body they mimic throughout life. As we shall see, mimicking the body and remaining connected to it serve the managing function quite well.」（Damasio (2010), p.38）

「だが複雑な生物の精巧な脳では、神経網が、やがて自分も属している身体の各部分の構造を擬態するようになる。そして、最終的には、神経網が、(各) 身体の状態を代理し、文字通り自らが働きかける身体の地図を作りあげ、一つの仮想的な身体の代替物、つまり、身体の神経的代役を生み出す。重要なことだが、神経網が身体を擬態し、それらの代替物/代役に神経的に連結されていることで、神経網の管理機能がかなりうまく働くのである。」（筆者訳）

さらに、大脳皮質と視床とを繋ぐ前者のインタフェース的な位置を占める島皮質は意識上・意識下の情動を生み出す主要部位とされるが、島皮質内のモジュール化と機能分担の精緻化は、多彩な情動表現に長けた人類で最も発達している（Damasio (2010)、Craig (2015)、Rolls(2017)など）。

このような事柄を勘案すると、人的資本内のアーキテクチャ自体も、その内部インタフェースと同様に、かなりな程度までモジュール・システムアーキテクチャとして標準化されていると考えられる。

誠に興味深い現象であるが、Damasio が教えてくれる脳・神経回路を持つ生命体に関する上記の仮想化・モジュール化への進化経路特性は、人工物である半導体デバイス（回路）の複雑化に見られる進化経路特性とも酷似してきている。例えば、モジュール・システムアーキテクチャという視点から半導体デバイスを眺めてみると、1990年代前後に富士通やNECが世界をリードしていたASIC（Application Specific Integrated Circuit）の時代においては、実際にデバイス内部で計算を実行するData-pathと呼ばれる部分と同じ内部でそれらの制御を司るControl-Pathと呼ばれる部分（計算状況をメタで眺めているFSM（Finite State Machine）部分がある）とが分かちがたく結びついていたため、そのフルカスタム特性とも相まって企業・組織特殊性が高かった。

ところが、半導体の集積度が増してASIC自体の構造や制御が複雑になってくると、Data-pathよりもControl-Pathでの設計エラーがより頻繁になっていった。しかも、両者が渾然一体となったままだと、

⁴⁰ 生命体の場合、階層モジュール性で特徴付けられるネットワークを構成する数多くの部位（ノードと呼ばれる）の中でハブと呼ばれる主要ノード近傍での配線密度はとても高いが、その他のノードでは配線密度がとても低い。そして、このようなネットワークでは、特定のノードから別の任意に選択されたノードに至る配線ステップ数はとても短い。このような特性をスモールワールド性という。

⁴¹ 生命体の場合、フラクタルと呼ばれる同じような形状をしたネットワーク構造が、あらゆる階層内・階層間で成立しているという特性。

それまでの設計資産 (IP : Intellectual Property) モジュールの再利用効率を企業間どころか自社内ですら高めることがどんどん難しくなってきた (Schlibusch, Meyr, and Leupers (2007))。そこで登場したのが、Data-path と Control-Path の間に Instruction Decoder と呼ばれる Control-path からの命令 (Instruction) を解読して Data-path での実行を準備・仲介する部分である。上記の Damasio の事例に沿えば、素人判断で誠に申し訳ないが、Instruction Decoder は大まかには“神経的代役”が作動している間脳(特に視床)・中脳・橋・延髄部分に相当するとも言えるのではないだろうか。

このような半導体デバイス構造の階層モジュール化の一層の進展とともに、フルカスタム型の ASIC 時代は終わり、ソフトバンクによる買収で一躍知られるようになった ARM 等の特定の命令セットアーキテクチャ (Instruction Set Architecture (ISA)) に基づいたセミカスタム型の SoC(System-on-Chip)やセミカスタム度をかなり高めた ASSP (Application Specific Standard Product) と呼ばれる SoC の時代 (2000 年前後) へと移り代わっていった。なお、ISA とは、コンピュータのソフトウェアとハードウェアとの仲介インタフェースであり、それによって各々の分離独立(unbundling)開発を可能とするモジュール化のためのソフトウェア的な仕組みである。より具体的には、ISA には、計算を実行する際の基本命令セットの定義が組み込まれている。ちなみに、ISA 方式によってハードウェアとソフトウェアの分離独立開発を最初に可能とした記念碑的なコンピュータとは、1960 年代半ばに華々しく登場したあの IBM System/360 である。⁴²

そして、現状では、Instruction Decoder の ISA をも柔軟に改変可能な ASIP(Application Specific Instruction Set Processor) - ISA 可変型 SoC - の時代へと進化しつつある。その直近の象徴が、Google の誇る人工知能チップ Tensor Processor Unit (TPU)であることはよく知られている。⁴³ 従来の ISA 事前固定型 SoC は、汎用 (One-Size-Fits-All) 型であるために目標のパフォーマンスを達成するにはどうしても消費電力やチップサイズが大きくなりがちである。他方、ISA 可変型 SoC では、アプリケーション (応用製品) に応じて ISA 自体を変更 (増減/調整) できるので、既存の ISA 事前固定型 SoC の限界を比較的簡単に超えることができる。逆に言えば、IoT の時代を迎えて多種多様な半導体デバイスの要求に汎用 (One-Size-Fits-All) 型で対応し続けることの限界が垣間見えだしている。

ASIP 設計では、上記の多種多様なデバイス要求に迅速に対応するため、したがって自己変可能を高めるためにターゲットとなる応用製品に応じて ISA 自体を生成・変更するための ADL (Architecture Description Language) が開発されてきている。さらに、ASIP を生成する際には、ESL (Electronic System Level) と呼ばれる極めて抽象度の高い(自然言語に近い)レベルでの設計開発ツールが用意されており、この種のツールを利用すれば、ASIP デバイスの論理設計と同時に当該 ASIP 自体を応用製品として使いこなすためのコンパイラやデバッガと呼ばれる専用のソフトウェア開発ツールなども短時間で同時生成されるようになっている。⁴⁴ さらに、このような形で産み出された回路設計情報は、先述の事前・事後の高い柔軟性を誇る FPGA にもマッピングして作動させることができる。言い換えれば、ASIP とは、そ

⁴² http://researcher.watson.ibm.com/researcher/view_page.php?id=6885 ISA の平易かつ直感的な説明は、Stokes (2010) が圧巻である。

⁴³ <https://riscv.org/wp-content/uploads/2016/12/Tue1100-RISC-V-Workshop-RoHC-ASIP-Accelerator-Cox-Synopsys.pdf> 参照。

⁴⁴ 以上、Schlibusch, Meyr, and Leupers (2007) 参照。なお、本 AI プロジェクトの共同研究者である今井正治大阪大学名誉教授のグループによって開発された ASIP Meister も、そのような ASIP 開発ツールとして世界的に知られている (<http://www.bloomberg.com/research/stocks/private/snapshot.asp?privcapId=79277277>)。ASIP に関しては、今井先生への数回にわたる聞き取り調査によって深く学ばせていただいた。この場をお借りして深くお礼を申し上げたい。

の高いハードウェア柔軟性とソフトウェア柔軟性により、多方面への自己変可能/進化可能性を誇る。

このように、半導体デバイス設計分野でも生命体と同様にモジュール・システムアーキテクチャに基づいた階層モジュール化の進展が顕著であり、そのような流れを背景として ASIP に象徴されるように IoT 時代を迎えた新たな抽象度での多段階競争が開始されている。このような意味で、人工物である半導体デバイスでも、生命体と同様の進化経路に沿って、ハードウェア・ソフトウェアと共に、チップ内インタフェースの標準化度を高める形で、さらなる階層モジュール化を極める進化経路へと向かう動きが進行していると断言できよう。

2. 自己変化能を産み出すモジュール・システムアーキテクチャ: その本質に迫る

人的資本の企業・組織特殊性の程度は、何度も強調して申し訳ないが、人的資本内アーキテクチャと人的資本間アーキテクチャ並びにそれらの内部・外部インタフェースによって大きく規定される。各自や各企業・組織の保有する知識・ノウハウの独自性、それらの括り方や活かし方には、人々によって発揮される多彩な創造性に典型的に象徴されるように、独自の組合せが様々に、そして無限に存在するからである。さらに、先の人的資本用に応用した IEEE 流のシステムアーキテクチャについての定義にしたがえば、人的資本の自己変化能を大きく左右するのも、これらの人的資本内と人的資本間のシステムアーキテクチャと対応する内部・外部インタフェースである。

では、上記の意味での変化能が最も高いと判断される人的資本のシステムアーキテクチャとはどのようなものだろうか？それは、既に前節でも示唆されているように、人工物・生命体にかかわらず、(階層構造を持つ)モジュール・システムアーキテクチャということになる (Simon (2005), Wagner 他 (2007) 等参照)。ではなぜ人的資本のシステムアーキテクチャも、あらゆる人工物・生命体と同じように、モジュール・システムアーキテクチャに収斂していき、対応する内部・外部のインタフェースも標準化されていくのだろうか？以下では、これらの点について考察してみよう。

なお、モジュール・システムアーキテクチャの基本的な特徴は、個々の構成モジュールの独立性が高い、構成モジュール間の相互依存性が少ない、構成モジュール間のインタフェースが標準化されている、と要約できる。

前述したように、人的資本インタフェースには、システムアーキテクチャの階層構造に対応して、人的資本内部の構成要素モジュール間のインタフェース (“内部インタフェース”) と人的資本間を繋ぐインタフェース (“外部インタフェース”) がある。そして、繰り返しになるが、個人、企業・組織、社会で繰り返し発生する学習機会の類似性が高ければ高いほど文脈 (context) の共有化が進むので、人的資本の内部インタフェースや外部インタフェースが広い範囲で共通化してくる。インタフェースの共通化が、コミュニケーション効率の上昇に必須なためである。

ただし、人と人とのコミュニケーションに直接関わってくる外部インタフェースでは、内部インタフェースに比べて自然言語化、したがってデジタル記号化されている比率が格段に高い。そして、外部インタフェースを介してやり取りされる情報が自然言語化/デジタル化されていればいるほど、そして、外部インタフェースの仕様とその標準化度が高ければ高いほど、社会ネットワーク内での人的資本の局所・大局にまたがる相互依存性を考慮した多彩で複雑な組合せ (協調) を正確に実現できる。

たしかに、外部インタフェースでやりとりされる情報の自然言語化比率は、定義はもちろんのこと、性別、文化、文脈などによって異なる。ただし、西田(2005)、Dean (1996)、Burgoon (2011) などによれ

ば、その比率は 35~40%とされている。また、実際に顔をつきあわせて (Face-to-Face) のやりとりになると、この比率が 10%にまで低下すると主張する研究者もいる。このように、人間の日常的なコミュニケーションでは、圧倒的に非言語処理に長ける右脳が優位だと考えられている (Shore (2010))。その意味では、コネクショニズム⁴⁵ が主張するように、人間の情報処理は、コンピュータとは異なり、「心の中でシンボル (言語) 操作をする」という形だけで行われてはいない。

とは言え、人的資本の自己変化能は、自然言語化/デジタル化によって大きく加速され、高い変化能を誇るシステムアーキテクチャの改良・改善を格段に効率的に行えるようになってきている。事実、アナログ情報に基づくインタフェースに頼るだけでは、鍵と鍵穴 (Lock & Key) に象徴されるように、なかなか局所的に限定された組合せ複雑性しか実現できない。つまり、3次元構造依存的な曖昧さを多く含むアナログ情報では、達成可能な複雑性の幅と深さに限りがある。⁴⁶ そして、AI/IoT とは、外部インタフェース仕様 (スペック) の自由度を大きく高める形で自然言語/デジタル記号による転送・応答効率を飛躍的に上昇させるデジタルイノベーションでもある。

実際、AI/IoT の時代になると、人と人との間の情報転送速度 (バンド幅 : Band-Width) が大幅に加速され、応答遅延速度 (レイテンシ : Latency) が格段に低減されてきた。その結果、“規模の経済”や“範囲の経済”といった経済概念が一般的であった時代には想定すらされていなかった国家規模・地球規模の社会ネットワーク内での“社会実験の経済”や“社会学習の経済”が素早く生みだされるようになってきた。そのことを反映し、集合知 (collective intelligence) が生みだされる幅と深さが格段に、そして迅速に拡大してきた。

もちろん、集合知の生成には、人々間のコミュニケーション構造、したがって個々の人的資本を繋ぐ外部インタフェースの善し悪しが決定的に影響する。この点は、人々の間でも半導体チップ内でも基本的には同じようだ。例えば、Extensa という素早く事前に再構成可能 (reconfigurable) なプロセッサ (先の ASIP) で世界的に有名な Tensilica 社 (現 Cadence 社) 創業者の Rowen (2004) は、下記のように述べている。

「The communication structure depends entirely on the pattern of communication among the tasks and between tasks and I/O interfaces. The designer's goal is discovery of the least expensive communication structure that satisfies the bandwidth and latency requirements of the tasks, including changes in the task load that may occur as the SOC's use evolves over time or across a variety of target systems.」

「(SoC : System on Chip 内の) コミュニケーション構造は、全てが各種の処理(モジュール)間ならびに処理(モジュール)とインタフェース間のコミュニケーションパターンに依存している。設計者のゴールは、各種の処理(モジュール)が要求するバンド幅とレイテンシを満たす最も安価なコミュニケーション構造(システムアーキテクチャ)を探索することである。その際

⁴⁵ 「多数の基本要素 (ニューロンであろうとなかろうと) の結合による相互作用で情報処理が (並列に) 進んでいくという側面を重視しこれによってどのような情報原理が実現できるのかを問う立場」(甘利 (2008)、5 頁)。実際、我々が保有する様々な知識はニューロン同士の結合の強さなどによって表現され、脳内の様々な場所に分散して保存されている。コネクショニズムでは、そのことを“分散表象(distributed representation)”と呼ぶ。そして、Numenta (2017)は、この分散表象こそ、コンピュータには発揮できない柔軟性・頑健性を脳(特に大脳新皮質)が保有する本質的な要因だとしている。

⁴⁶ Mattick (2011) によれば、カンブリア紀 (約 5 億年前) における爆発的な生物多様性の出現は、アナログ・デジタル (AD) 及びデジタル・アナログ (DA) 変換装置としての RNA 酵素の登場に象徴されるデジタル革命によってもたらされた。

には、SoC の使用が時間と共に進化していく時の負荷変動や、様々な目的システム間の負荷変動を含む。」(筆者訳、()内は筆者追加)

半導体が複雑になればなるほどコミュニケーション構造の設計、したがってシステムアーキテクチャとその進化可能性/自己変可能が重要になるというのは、現代社会の特徴をも暗示しているようで、極めて興味深い。生命体も人工物も、行き着くシステムアーキテクチャがモジュール・システムアーキテクチャとして同一化してくるといふ本質的な理由だと考えられる。

では、そもそもなぜ人的資本のシステムアーキテクチャも、AI/IoT の時代が本格化すればするほど、(階層)モジュール型になっていくと予測されるのだろうか？たしかに、モジュール・システムアーキテクチャは一見するところ万能ではない。このアーキテクチャには、変化能を抑制する(保守)効果と促進する(革新)効果があるからである。

実際、可能な限りムダ・ムラ・ムリを取り去る形で人的資本のモジュール化を徹底していけば、人的資本には、ちょっとやそっとの環境変化にはビクともしない保守的な意味での頑健性(Robustness)が生み出される。その結果、ある程度までの大きさの攪乱には既存の人的資本の改良・改善で対処できるので、抽象度の上昇といった新たな相変化の必要性に気づけないまま現状にロックインされてしまう傾向が増大する。ムリ・ムダ・ムラが削ぎ落とされた機能美さえ漂わせる企業・組織特殊的な人的資本が、自己変化を拒む強固な保守性を伴いがちな理由でもある。

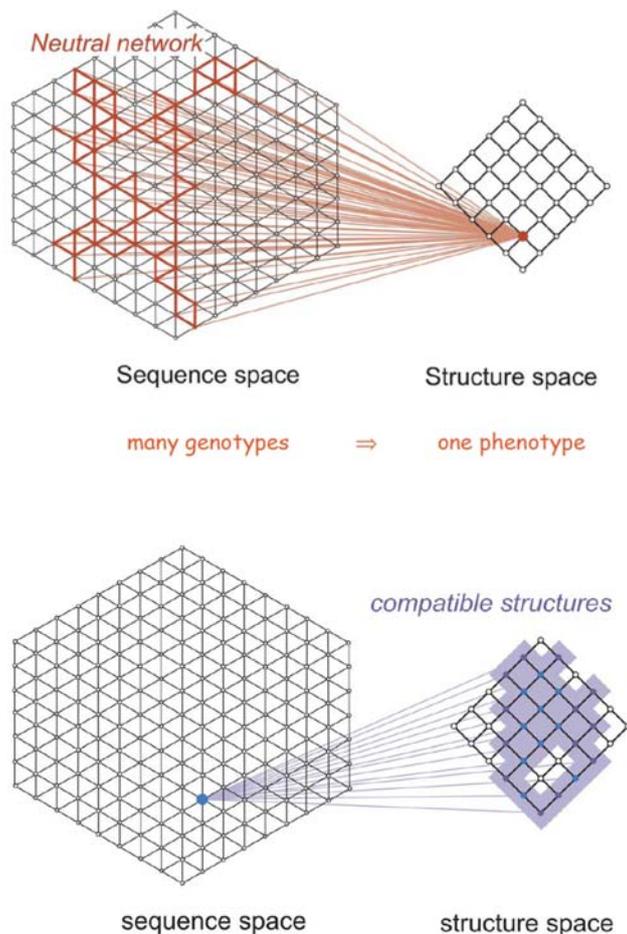
では、相変化が頻発してきた時代にこのような保守性の弊害を可能な限り避けるためには、どのような追加の仕組みが人的資本に組み込まれるべきなのか？ここで登場するのが著名なシステム生物学者達である Wagner (2014)/北野(2007)/Schuster (2005), (2011)の意味での頑健性、つまり、革新的であり同時に保守的(“progressive and conservative at the same time”)な自己変化能/進化可能性を保持することのできるモジュール・システムアーキテクチャということになる。以下では、このロジックの妥当性についてやや詳しく触れてみよう。

人的資本が Wagner/北野/Schuster の意味での頑健性を獲得するためには、まず、イノベーション(社会/自然に変革をもたらす創造的な発見・発明・改良)を生み出す保守性と革新性を兼備した前述のイノベーション能(Innovability)を高める必要がある。そのための最も効率的で安価な方法は、それまでに社会/自然の中に蓄積されてきた発見・発明・改良の結果としての多彩なモジュールを有効活用する能力を高めること、つまり、組合せ複雑性を可能な限り追求しやすくすることである(Arthur (2009))。しかも、人的資本内の構成要素モジュールが独立性の高い状態で細分化されて数多く存在していればいるほど、そして、内部及び外部インタフェースがユニバーサルに標準化されていければいるほど、人的資本内・資本間で互換性・再利用性・拡張性・相互運用性が高まるので、組合せ爆発の巨大な潜在力を活用した豊富なリアルオプション(将来の不確実性に対処するための意思決定の選択権や自由度)を準備できる。⁴⁷

⁴⁷ 生命体の場合、ウイルス・バクテリアから人類に至るまで DNA を構成する A, C, G, T 中の三つ組み(コドン(codon)と呼ばれる)によってアミノ酸を生成する遺伝言語(ウイルス方言あり)がユニバーサル標準であるし、アミノ酸からタンパク質ができる際の結合では、例外なくペプチド結合(アミノ酸分子のアミノ基-NH₂と、他のアミノ酸のカルボキシル基-COOH とから、水 1 分子が取れて縮合してできる形-CONH-の結合)がユニバーサル標準である(Wagner (2014))。さらに、筆者にとって極めて驚きであった以下のようなユニバーサル化の例が Pross (2012)で紹介されている。すべての生きとし生けるものの活動は、熱力学の第二法則が支配する世界において化学平衡反応に抗いながら replicative chemistry (複製化学) 反応を推進力として行われている。その結果、熱力学の第二法則だけが支配する世界であれば、大数の(確率)法則が支配するので、鏡像異性体(キラル(chiral)分子と呼ばれる)では右手系と左手系とが同じ比率で存在するはずであ

豊富なリアルオプションの存在は、生命体の視点からすれば、当面の自然選択圧から免れることのできる中立的 (Neutral) な選択肢を豊富に準備できることを意味しており、ダーウィン流の素朴な進化仮説の洗練化に大きなインパクトをもたらした木村資生 (もとお) の中立進化仮説(neutral theory of molecular evolution)の源泉でもある (Kimura (1983), Wagner (2014))。

図 2 : Schuster(2005), (2011)の概念図 : 多対 1 対応及び 1 対多対応の様子



(本図の使用許可は Schuster 博士より直接いただいた。)

Schuster (2005), (2011)は、以上のような構成要素のモジュール化がもたらす豊富なリアルオプションが果たす役割を、本質を突いた上記の図 2 で見事に表現している。この図には二種類の絵が描かれているが、図中の sequence space とは遺伝子配列空間(genotype)をさし、structure space とは遺伝子配列により生み出される表現型 (phenotype) 構造空間を示している。そして、Schuster がこの図で示そうとしているのは、遺伝子配列空間と表現型構造空間とは共に超高次の多次元空間であるため、特定の一つの表現型

る。ところが、replicative chemistry がより支配的な場合、組合せ爆発が起こる自己触媒反応時に瞬時に右手系か左手系への選択圧が作用するので、右手系か左手系のどちらかがユニバーサル標準として生きとし生けるものに共通に使用されるようになる。なお、現在では、ノーベル賞受賞者の野依良治博士@理化学研究所や碓合 (そあい) 憲三博士@東京理科大学による世界に先駆けた不斉合成研究成果により、特定の触媒反応によって右手系か左手系かを人為的に制御できるようになってきた。その結果、サリドマイド禍のような悲劇が避けられるようになってきている。

を実現可能な遺伝子配列が数多く存在し（多対1対応）特定の一つの遺伝子配列によって実現可能な各種の表現型構造も数多く存在している（1対多対応）という関係が爆発的な数の組合せを産み出せるという点である。なお、上部の図中の Neutral Network で示されている赤色の部分は、自然選択圧から免れることができる上述の木村流中立な遺伝子ネットワークを指している。

そして、Wagner (2014)は、この Schuster の直感の正しさを、独自のコンピュータ・シミュレーション実験によって、生命体を形作ってきている代謝経路・タンパク質・遺伝子制御回路や人工物としての半導体回路の“イノベーション”（ここでは新規性）の誕生という形で示している。より具体的には、既存の代謝経路・タンパク質・遺伝子制御回路・半導体回路の構成要素が変化する自由度を数千・数万に及ぶ多次元なものとして設定すると、既存の代謝経路・タンパク質・遺伝子回路・半導体回路の一箇所の変更だけでも斬新な“イノベーション”が生まれることを実証している。しかも、その際に、それらの構造物の局所で生み出される多彩な“イノベーション”が、既存生命体/半導体の自然/社会環境への適応度を低下させない確率が極めて高いことが示されている。つまり、モジュール・システムアーキテクチャに導かれて多様で異質な構成要素モジュールがおびただしい数存在する状況では、組み合わせ爆発によって進化の方向性があらゆる方向に解放されるので、革新的であり同時に保守的な自己変化能/進化可能性が数多く産み出されてくるのである。

さらに、このような進化経路が超高次の多次元方向に開かれている世界では、3次元空間からの直感的な類推に基づいて進化の適応度(fitness)が山あり谷ありの lagged landscape(凸凹地形)をしており、ある山頂から別の山頂へと一っ飛びに進化経路を辿ることは容易なことではないとしてきた従来の考え方が誤りであることが明らかになってきた(例えば、Pigliucci 他(2006)の展望参照⁴⁸)。この点に関して、気鋭の数理生物学者 Gavrillets (2004)がコロブスの卵的な形で示したように、そして Wagner (2014)の simulation 実験がそのことを裏打ちしているように、進化経路の適応度地形 (fitness landscape) ⁴⁹は、どの地点でも超高次の多次元空間内のどこまでも全方向にフラットな超平面になっており、所々に絶滅へと誘う奈落への穴が空いている Holey Adaptive Landscapes⁵⁰(穴ぼこだらけの超平面地形)になっている可能性が限りなく高い。

飽くなきモジュール化とその結果によって利用可能となった多種多様な数多くの構成要素モジュールの存在、それらのモジュール間インタフェースのユニバーサルな標準化が確保されていれば、それらのモジュール間に張り巡らされた稠密な超高次の多次元進化経路ネットワークの存在によって保守性と頑健性とを同時に備えた自己変化能/進化可能性が生み出される。その結果、生命体か人工物かにかかわらず、それらの活動場と置かれた時代環境の中で運・不運に出会いながらも自己変可能を駆使して様々な進化の適応経路を辿りうるのである。なんという驚くべき発見であろうか。Pross (2012) は、以上の点を、下記のように的確に表現している。つまり、個性化/モジュール化現象は、社会/自然が発見した方法

⁴⁸ ただし、Pigliucci 他(2006)も、この時点では、モジュール・システムアーキテクチャが超高次の多次元進化経路を辿りうる世界の中ではWagner/北野/Schuster 的な頑健性をも産み出すということに気づいていないと判断される。

⁴⁹ S. Wright によって提案された生物の適応進化を理解するための概念。一次元もしくは二次元空間にある生物種が持つ可能な遺伝子の空間（似た遺伝子同士が近くに並んだ空間）とみなし、各場所に対応する遺伝情報を持つ個体のある環境条件における適応度をもう一つの軸として描いたグラフを適応度地形と呼ぶ。生物、もしくは、生物集団は地形上の一点もしくは領域で表され、その適応進化は地形上の近傍の高い方へ登っていく過程として捉えることができる。実世界では様々な要因によって適応度地形の形は変化しうる。（https://www.jsps.go.jp/j-bilat/fos_jf/data/jishi_04/key_01.pdf）。

⁵⁰ Holey adaptive landscape のイメージについては、下記を参照されたい。

<http://evolvingthoughts.net/2012/12/evopsychopathy4-adaptive-scenarios/>

論としてのモジュール・システムアーキテクチャが生み出した結果であって原因ではないという慧眼である。

「So-called individuality is just a technique that evolution has discovered, amongst many others, to enhance replicative ability and robustness.」、

「いわゆる個体識別性（個性/モジュール性）というのは、進化が、複製力と頑健性を高めるために多くの選択肢の中から見つけ出した技法なのである。」（筆者訳、()内は筆者追加）

実際、このような進化経路の柔軟な全方向化への動きは、先の GitHub の事例にも現れているように、既にソフトウェア開発の世界では急速に日常化しはじめている。例えば、この点に関する Grossman (2017) の以下の指摘は、企業・組織・産業・国家（含む言語）の境界を頻繁に越える対話と協調が始まっていることを伝えており、極めて印象的である。

「Modern applications now are comprised of pre-fab code snippets representing atomized functions delivered as microservices packaged within containers. These containers are deployed across "serverless" clusters using orchestration platforms that automate the capacity, scaling, patching, and administration of the infrastructure. Combined with a distributed computing architecture, this represents a massive paradigm shift in IT practice and infrastructure that has occurred in only the last several years in both application development and operations.」

「現代の（ソフトウェア）アプリケーションは、今やコンテナ（と呼ばれる仮想的なユーザー空間/画面）⁵¹内でパッケージ化された小さなコンポーネント（部品）として提供される細分化された諸機能を示す事前準備済みの（コード）スニペット（切り貼り用断片）の組み合わせでできあがる。これらのコンテナ（仮想ユーザー空間/画面）は、（プログラム開発）インフラの収容能力調整・スケール調整・応急修正・管理を自動的に行う（クラウド型）オーケストレーション⁵²・プラットフォームを活用し、（中央集権的な）サーバー無しの複数コンピュータ群にまたがって展開されている。このような流れは、分散処理型のコンピュータ（モジュール・システム）アーキテクチャと組み合わせられており、アプリケーション開発と運用のためにほんのここ数年で起きてきた IT 慣行・IT インフラにおける大規模なパラダイムシフトを代表している。」（筆者訳、()内は筆者追加）

世界中のソフトウェア開発者の Learning-by-Using の結果がコードスニペットとして（おそらく自己学習型の AI 的な力も借りて）素早くアルゴリズム化されて、世界中の GitHub を利用する開発者のコンテナ画面に現れる抽象レベルがワンランク上位の Learning-by-Using 用部品となっていく。そして、同じような叡智結集方式を持つプラットフォームは、既に技術計算処理ソフトウェア MATLAB/Simulink (<https://jp.mathworks.com/>)、汎用工学シミュレーションソフトウェア COMSOL (<https://www.comsol.jp>)、

⁵¹ <http://cn.teldevice.co.jp/column/detail/id/102> 参照。ユーザー空間とは、ユーザーがアプリケーションを実行するための、ひと揃いのリソースが提供される空間。Docker コンテナの重要性に関しては、共同研究者の黒川利明氏に御教示いただいた。

⁵² [https://en.wikipedia.org/wiki/Orchestration_\(computing\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Orchestration_(computing)) 参照。

数値処理ソフトウェア Mathematica (<http://www.wolfram.com/>)、計測/制御ソフトウェア LabView (<http://www.ni.com/labview/ja/>)、BIM (Building Information Modeling 建築施工管理) ソフトウェア Revit (<http://www.autodesk.co.jp/products/revit-1t/>) 等々と、GitHub 程はシステム化されていないようであるが、既に数多く存在している。しかも、これらのツールは、互いに API を公開しあって特定のツールの Learn-by-Using によって蓄積されてきたユーザーのノウハウを再利用できるようにしているケースがほとんどである。おそらく、このようなソフトウェア/ハードウェア開発者達の人的資本に起こっているのと全く同じ構図が、大勢の人々の人的資本にも今後急速に広まっていく筈である。⁵³

このように、ユニバーサルなインタフェースを具備するモジュール・システムアーキテクチャが一般的な社会/自然環境では、第二節で述べたように、あらゆる主体が稠密に結びつくことによって、あらゆる箇所で相互依存性の大局化が起こる。そのことは、人間社会に敷衍すれば、イノベーションが、あらゆる人によってあらゆる場からあらゆる時に並行して起きやすくなるという意味での“イノベーションの大衆化”現象が起きやすくなることを意味する。⁵⁴ 加えて、人類の場合、闇雲な局所的探索だけではなく計画的な大局的探索をもより効率的にできるので、そのようなイノベーションの大衆化現象が、より速くより広汎に起きてくる。これらの広範囲にわたる稠密な社会ネットワーク化現象こそが、人的資本を社会ネットワークと見なすことの重要性を急増させている要因でもある。⁵⁵

上記の Wager/北野/Schuster の意味での頑健性生成要因としてのモジュール・システムアーキテクチャのインプリケーションをもう少し敷衍してみよう。たしかに、モジュール・システムアーキテクチャでは、モジュール間の相互依存性を極力避けようとするので、モジュール間のすり合わせが不十分になりがちである。つまり、特定の環境に対する最適な対応という意味では、最適化のための自由度が制限されるので、目一杯すり合わせを実施した場合に比べると、どうしても冗長な部分（遊びの部分）が残ってしまう。ただし、このような冗長性は、多段階競争が短期間に頻繁に起きる不確実性に溢れた AI/IoT 時代においては、弱点どころか、むしろ、人的資本の自己変化能を高める貴重な特徴となる。冗長な部分が、豊富なりアルオプシオンの源泉となり、想定内だけではなく想定外の不確実性にも対応できる潜在力（Gould 流“外適応力”⁵⁶ : Power of Exaptation）を高めてくれるからである（Baldwin 他（2000））。そして、

⁵³ この辺りの叙述は、黒川利明氏と大橋弘教授（東京大学）からのコメントに触発された。心から御礼申し上げたい。なお、これらのプラットフォームに依存しながら叡智を結集していくという構図は、半導体設計分野の EDA (Electronic Design Automation) ツール業界にも見られる。具体的には、EDA ツールの統合 (Integration) 化が、Synopsys や Cadence、Mentor 等によって 2010 年前後から本格してきた。専門家への聞き取り調査で精査の必要があるが、このような流れも上記の Learning-by-Using に基づく知識・ノウハウの再利用性を高めて世界中の半導体設計者がより上位の抽象度でワンランク上の視点から設計を行う環境が進化しつつある様子だと解釈できる。実際、それまでは、半導体設計ソフトの統合化は、半導体メーカーが様々な EDA メーカーから自社に相応しいと判断した部品ツール (Point Tools) を購入して統合するスタイルであった。ところが、このような方法では、Systems of Systems 競争の急速な展開についていけなくなった。その象徴が、Intel がそれまで自社独自の設計言語 (iHDL: Intel Hardware Description Language) までも使用していた自前の EDA ツール使用を断念し、2000 年前半頃から SystemVerilog と呼ばれる Synopsys 発の高位の業界標準言語に変更すると共に Synopsys をはじめとした EDA ツールメーカーとの協調を開始したという事実である (Colwell (2005) など参照)。

⁵⁴ この点に関して、Watts (2003, p. 269) は、“Flexible Specialization (柔軟な特化)” 能力だけではクロックスピードの加速した社会の動きに順応できなくなるとのかなり悲観的な見方をしている。モジュール・システムアーキテクチャが超高次の多次元進化経路を辿りうる世界の中では Wagner/北野/Schuster 的な頑健性をも産み出さうという視点に気づいていなかったのではないだろうか。

⁵⁵ ウイルス・バクテリアから人類に至るまで、これまで突然変異とされてきた多くの現象が、実は遺伝言語(コドン)を含むユニバーサル標準化が可能にした非ランダムな特定のルールにしたがった変異現象であることが解き明かされつつある (Villarreal (2009), Shapiro (2011), Witzany (2012) など参照)。モジュール・システムアーキテクチャは、そのようなユニバーサルなルールすらもメタで生み出すということだろうか。

⁵⁶ Arthur (2011) を参照。

環境変化が目まぐるしくなればなるほど、そして、多段階競争が同一の期間内で頻発してくればくるほど、イノベーションを生み出す原動力である自己変化能/進化可能性の希少性が増してくる。

また、モジュール・システムアーキテクチャでは、人的資本を構成するモジュール間の繋がりが可能な限り少なくなるように工夫されている。モグラ叩きの状況を生み出しがちな多数のモジュール間の相互依存性(いわゆる多体問題の発生)をできるだけ排除するためである。そのため、既存の人的資本に相変化が必要なときに、特定の構成要素モジュールの変更がもたらす負の効果を局所化できる。しかも、大勢の人達が独立して並列的に必要な構成要素モジュールの変更を模索できるし、構成モジュール自体の細分化された専門化 (microexpertise) によって彼らが新たな変更を思いつきやすくなるので、グループ全体あるいは社会全体としての進化速度が増大する (Nielsen (2012))。これらの社会実験の並列化・局所化は、先に述べた保守性と革新性とを兼ね備えるモジュール・システムアーキテクチャの大きな利点である。

ただし、そのような並列学習や局所実験がもたらす社会的な便益は、外部インタフェースの標準化の程度に大きく依存する。標準化されていればいるほど、水平伝播の幅と深さや情報の転送/応答速度が増すからである。しかも、そのような幅と深さや転送/応答速度が増せば増すほど、社会システム内における部分と全体の補完・代替関係についてのメタ情報が高解像度で素早く獲得できるので、外部インタフェース標準化の速度自体も増大する。したがって、自己変化能の高いコミュニケーション構造、そのための外部インタフェース設計は、この点でも極めて重要になる。このような視点からしても、人的資本の外部インタフェースも、生命体・人工物共通に支配的な進化経路にしたがってユニバーサルに標準化していく流れが必然だと言える。

では、そもそも高い進化可能性/自己変化能を有するシステムアーキテクチャとは、どのように探索するのが効率的なのだろうか？そのヒントは、Aspect-Oriented Programming (AOP) と呼ばれる複雑な組込ソフトウェア開発のための方法論事例の本質に隠されていると考えられる。したがって、やや迂遠な話になるが、本論で強調するシステムアーキテクチャの自己変化能に関する理解をより深めるために、AOP の特性について少し触れてみたい。

複雑な(組込)ソフトウェアの開発には、上記の Wagner (2014)/北野(2007)/Schuster (2005),(2011)の意味での頑健性 (Robustness)、つまり、革新的であり同時に保守的な自己変化能/進化可能性を保持するために、企業・組織の境界を越えたソフトウェアモジュールの互換性・再利用性・拡張性・相互運用性の確保とそれらを可能にする標準化されたインタフェースに裏打ちされたモジュール・システムアーキテクチャの導入が必須である。従来、そのために Object-Oriented Programming という方法論が導入されてきた。ところが、開発されるソフトウェアの複雑性が或閾値を超えてくると、そもそも全体をどのような Object (≡モジュール) に切り分けたアーキテクチャが妥当かを事前に知ることがかなり難しくなってきた。そこで脚光を浴び始めた方法論が、Aspect-Oriented Programming⁵⁷である。

となると、なぜ Object ではなく Aspect なのか？Aspect (アスペクト) とは、開発される階層モジュール構造を持ったソフトウェアの随所に設けられた“のぞき窓”を意味する。そして、この“のぞき窓”から見えるソフトウェア全体の振る舞いをリアルタイムで精査し、各モジュールの局所的な動作がシステム全体の大局的動作にできるだけ波及しないようなモジュール切り分け方法 (≡システムアーキテクチャ)

⁵⁷ 参考: Sommerville (2011), Software Engineering Ninth Edition 及び Engelen and Voeten 編 (2007) 「Ideals: evolvability of software-intensive high-tech systems: A collaborative research project on maintaining complex embedded systems」

を探索できるようになっている。自己変化能の高いソフトウェアシステムにするため、パフォーマンスに大きな外部効果をもたらす想定外の非線形現象ができる限り発生しないようにしたいからである。

Aspects を各所に設けてソフトウェア階層内情報の正確な抽象化と階層間情報の明瞭&迅速な遡及を可能とする一目瞭然化が実現できれば、結果のみならず、プロセスの見える化がより高解像で可能になる。そして、プロセスの様子が高解像度で大勢の人々に見えるようになればなるほど、自己変化能の高いシステムアーキテクチャをより迅速・的確に探索できるようになる。つまり、Aspect-Oriented Programming 言語とは、ネットワークのボトルネックを一目瞭然化することにより自己進化能にあふれたモジュール・システムアーキテクチャを探索するためのツールでもある。

上記の AOP の事例は、高い進化可能性/自己変化能を有するシステムアーキテクチャの探索・改良・改変には、人々に備わっている他の生命体に比べて並外れたメタ認知能力の活用が極めて重要であることを示唆している。AI/IoT は、先に触れたように、階層内の情報の正確な抽象化と階層間情報の明瞭・迅速な遡及によって格段に高解像な一目瞭然化便益をもたらす。したがって、社会システム内で各種の人的資本が絡み合う様子を第三者的な視点でより容易に鳥瞰できる環境が与えられれば与えられるほど、局所で盲目的な探索を行わざるを得ない多くの生命体に比べて、メタ認知能力に依存したより大局的な最適化ができるようになる。しかも、その他の条件を一定とすると、モジュール・システムアーキテクチャが中心に据えられている場合、脚注 34 で言及した“Variational Modularity”（モジュール形式で変化する状態）という特性の分かりやすさから、より大勢の人々がより正確に変化の方向性を見極めることができるようになる。

なお、反面教師的な話であるが、AOP に関しては、日本勢にとって苦い経験がある。それは、2000 年初頭までニコン・キヤノンの独壇場であった“歴史上最も精巧な装置”/“半導体製造装置の王様”としての半導体露光装置の市場に関する事例である。この市場では、2000 年前半以降、オランダ ASML が、それまでのニコンに代わって、現在に至るまで圧倒的な覇者であり続けている。その大きな要因の一つは、最先端の露光装置の組込ソフトウェアの複雑性急増への対応策にある。事実、露光装置の組込ソフトウェアの複雑性は、そのハードウェアの複雑性に勝るとも劣らないものとなっている。ASML は、このような複雑性急増の脅威に対処すべく、オランダ産学官の叡智を結集して AOP を活用した ASML 露光装置用組込ソフトウェア開発（含む AOP 方法論開発）を Ideals Project として行うことができた。⁵⁸ 組込ソフトウェアの複雑性がある閾値を超え始めた状況を踏まえ、システムアーキテクチャに進化可能性を持たせるための難度と進化可能性が低いことによる埋没固定費用が急増したことに対して全オランダ連合で対処したのである。⁵⁹

なお、このプロジェクト連合の中核を成す Delft 工科大学、Eindhoven 工科大学、Twente 大学に代表されるオランダの大学は、世界で一位・二位を争う組込ソフトウェアの研究開発拠点であることが良く知られている。露光装置の基幹モジュール構成要素である投影レンズ、ステージ、計測器等々の世界のスーパースターからなる複合企業/軍団としての ASML を、世界最強を誇るオール・オランダの組込ソフトウェア R&D グループが支えてきている。この世界のスーパースター集団と全オランダ連合に迫られてい

⁵⁸ <http://www.esi.nl/publications/idealsBook.pdf> 及び http://redesign.esi.nl/publications/darwin/ICSM_Evolvability_workshop_2007.pdf 参照。ニコン・キヤノン・ASML 間の熾烈な闘いの様子に関しては、Chuma (2006) を参照されたい。

⁵⁹ 同じ産学官の試みは、Darwin Project の名前で Philips 製 fMRI 装置に関しても行われた (van de Laar 他 (2007))。詳しくは、http://redesign.esi.nl/publications/darwin/ICSM_Evolvability_workshop_2007.pdf を参照されたい。

る構図は、孤軍奮闘型のニコン・キヤノンにとっては堪らない。

3. 企業・組織特殊性から一般性への動態特性：自己再帰的な一目瞭然化ループの威力

AI/IoT に裏打ちされたモジュール・システムアーキテクチャは、「あらゆる事柄を一目瞭然化する」という極めて貴重な便益をもたらす。この意味で、モジュール化の威力（Power of Modularity）は、デジタル化の威力（Power of Digitization）そのものだとも言える。一目瞭然化便益の創出に直接関わるのが、クラウドコンピューティング（Cloud Computing：クラウド）⁶⁰的な企業・組織の内外にまたがるデータベース共有の仕組みである。この仕組みを利用すれば、クラウドに繋がっているマイクロ主体としての個人が、マクロ/セミマクロの場で大勢の人々と絡み合う状況とその結果を、社会反射鏡としてのクラウドに跳ね返ってきたミラーイメージ（鏡像）として第三者的にリアルタイムで眺める（メタ認知する）ことができるようになる。その様子は、まるで劇場で演じている自他を含む様々な人々の振る舞いを観察しているかのようでもある。

しかも、システムの良く整理された階層モジュール構造をもつミラーイメージは、階層内情報の正確な抽象化と階層間情報の明瞭・迅速な遡及が可能になっているので、GoogleEarth 的に簡単にズームイン・ズームアウトができる。そのため、より大勢の人々が、よりの確なメタ情報をより簡単により素早く獲得できるようになる。なお、多くの経済学者の間では、社会反射鏡＝市場という考えが優勢である（例えば、古くは Hayek (1945) 参照）。ただし、今後の本格的な AI/IoT の時代においては、市場とは、数多くの集合知形成メカニズムの一つとして相対化されていく筈である。

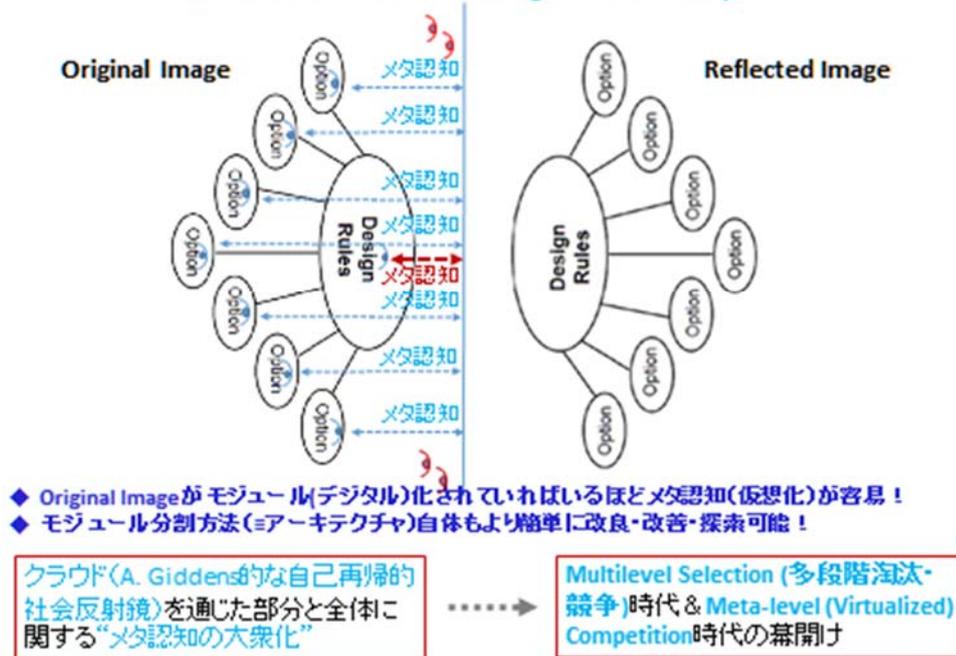
実空間での自らの振る舞いとそれらのセミマクロ・マクロのレベルで示される部分と全体の関係の中での有り様がより高解像度でより迅速により簡単に大勢の人々にメタ認知できるようになると、まるでジャズの即興演奏をするかのようになり、よりの確を射た C&C（Communication & Collaboration）を実行できるようになる。そういう便益をもたらす様子を図示してみたのが図 3 である。

この図には、左側に実空間でのオリジナルイメージ（Baldwin 他(2000)参照）、右側にそのミラーイメージが描かれている。そして、左側の楕円形の“option”欄には、トヨタの人がよく使う内部関係者の目の印が示されている。⁶¹ 内部関係者に自分たちのセミマクロ・マクロレベルでの活動がミラーイメージを通して見えている様子を、両側に矢印のある点線で示された青色のメタ認知という言葉で示している。大きな design rule と記された楕円に居る上位階層に所属する人々の赤色で示されたメタ認知も、小さい楕円に示されたより下層の仕事階層の人々のメタ認知も、この図では同じものだとしている。つまり、両者には、同じものが見えている。さらに、左側の上下に二つずつ赤い色で目の印が入れてある。これらの赤い目の印はシステム外にいる第三者的な人達を示しており、彼らにも同じミラーイメージを通して同じようなメタ認知が同じ解像度で可能なことを示している。システムイメージがクラウド的な仕組みを介してデジタル化されたイメージである場合、内部・外部の人達に同じ解像度のメタ認知が可能なことを強調するためである。

⁶⁰ クラウドコンピューティングの本質的な特徴に関しては黒川(2014)を参照。

⁶¹ トヨタの現場を調査させてもらうと、現場の職長さんなどが使われる人員配置図には、ヒトの代わりにこのような目が描いてある。それを借用させていただいた。

図 3： モジュール設計思想がもたらす部分と全体の（補完・代替）関係の一目瞭然化
(Precise Abstraction & Unambiguous Traceability)



このように AI/IoT が可能にするデジタル化された環境では、モジュール・システムアーキテクチャがもたらす一目瞭然化便益が、既存の境界を容易に飛び越えて外部にも波及していく。その結果、企業・組織内に社会実験の経済や社会学習の経済の便益を容易に組み込むことが可能になる。加えて、階層内の情報の正確な抽象化と階層間情報の明瞭・迅速な遡及が十分な解像度でモデル化できるようになってきているので、前述の FPGA プロトタイピング技術事例に関して触れたように、個々の主体が各種の仮想的な実験 (simulation/emulation) もできるようになってきている。

したがって、モジュール・システムアーキテクチャに基づくクラウド型の事業・組織経営システム、そこで生まれるメタ認知の大衆化、社会実験・社会学習の経済便益の大幅増大、そういうプラスのフィードバック効果が組み込まれている社会や企業・組織、そういうことがなかなかできにくい社会や企業・組織、両者が戦うとすると戦いにすらならない。

繰り返しになるが、社会ネットワークの中で人々が相互に補完・代替しあう状況をミラーイメーজ情報として獲得できるのは、クラウド型データベースを共有する特定グループ内の人々に限られるわけではない。AI/IoT がもたらしたマイクロ・マクロ再帰ループ形成の大幅なコスト低下や超高速化に伴い、潜在的には誰もがこの再帰ループにリアルタイムでアクセスできるようになってきたからである。

実際、AI/IoT の時代には、Giddens (1990)が近代の特徴とする自己再帰性 (Self-Reflexivity) が、ほぼリアルタイムで実現するようになってきた。リアルタイム (瞬時) での情報伝達、ジャストインタイム (必要なものを、必要なときに、必要なだけ) での情報利用、ズームイン・ズームアウト (拡大・縮小) が自在な分析視点の切り替え、あらゆる境界を頻繁に越える C&C、という風に。

そのため、企業・組織間の利益相反問題が解決できており、標準化された外部インタフェースに基づく高解像な情報交換が可能であれば、グループ外の人々も、特定グループ内の部分と全体の関係に関するメタ情報を Google Earth 的な操作で簡単に素早く獲得できる。さらに、データベースがグループ間で相

互にアクセス可能になっていけば、一目瞭然化便益の幅と深さが企業・組織、産業、そして国の境界を越えて広がっていき、巨大な規模の社会実験の経済や社会学習の経済が生みだされる。

その結果、部分と全体の関係に関するメタ認知情報をより大勢の人々が、さらに簡単に素早く獲得可能になる。そして、「組織の構成員自らが、研究対象とすべき現象内の参加者となり、同時にまたその観察者ともなる (viewing the organization's members as both participants and observers of the phenomenon)」

(Johnson 他 (2001)) という Johnson がトヨタ生産方式の本質的な特徴として描いた状況があらゆる所に出現してくる。つまり、“メタ認知能力の大衆化”現象が起きてくる。

このようなメタ認知情報がより広範囲に利用可能となる現象は、実生活のあらゆる所に出現してきている。例えば、ぶっそうな話で申し訳ないが、Network-Centric Wars と呼ばれる戦争方式がアメリカ軍によって歴史上はじめて大規模に実践された 2003 年 3 月勃発のイラク戦争では、これからイラク側の陣地に突っ込もうとしているこちら側の米兵とあちら側のイラク兵とのセミマクロ・マクロ的な状況を衛星画像で確認しながら、あるいはメタ認知しながらの戦闘が開始された (西口 (2007))。アメリカ軍のみであるが、その一兵卒が、突入後に自分が死ぬかもしれないことを部分と全体の関係をリアルタイムで眺めながら突っ込んでいくという構図が出現したのである。可哀想なイラク兵士たち……。この事例が赤裸々に示しているように、デジタル化によってあらゆる事柄が一目瞭然化されるようになると、「メタ認知力の大衆化」現象が戦場ですらも生み出される。まして、社会においておや、である。

メタ認知能力の大衆化現象のより卑近な例としては、米国メジャーリーグベースボール(MLB)を舞台とした映画『Moneyball』(2011)で一躍有名になった金融オプション理論を応用したビッグデータ野球 (MLB への最初の導入は 2000 年頃) が示唆的である。より具体的には、MLBAM (Major League Baseball Advanced Media) は、2014 年に Statcast (Trackman (デンマーク) と ChyronHego (米国・スウェーデン合弁) とのコラボによって実現) と呼ばれる野手/投手の攻撃・守備/ピッチングや付随する打球/投球のカメラ・レーダー併用の追尾・ベンチマーク比較システムを導入した。Statcast は 2014 年には 3 球場に装備されたただけだったが、2015 年 8 月からは、MLB 傘下の 30 球場全てに装備されている。

興味深いのは、MLBAM が、これらのデータを MLB 所属球団のみならず球場内外の観客/TV 局にもネットワークや TV 等を介して大規模公開している点である。その結果、視聴者の楽しみ方や投手・野手・監督に関する評価視点の玄人化、プロ解説者と視聴者の分析レベルの差異の縮小などが起きつつある。その結果、MLB の進化速度自体も加速していく可能性が高い。⁶²

さらに、個々人にとっては、自他の作業プロセスとその結果が丸見えになってくると、メタ認知力の高まりと相まって自らを高めたいとする自己変化欲も発現しやすくなる。社会心理学者である先の Zuboff (1984) は、このような人間が本来的に保有している自己変化欲を“丸見え化の心理” (Psychology of Panopticon) と呼び、その組織経営上の重要性を力説している。具体的には、各種の職場への聞き取り調査に基づいて、関係者全員にクラウド型データベースへのより透明で平等主義的なアクセスを可能なかぎり担保することが最重要と説いている。このような丸見え化の心理を活かすことは、高度に自動化・一目瞭然化されている半導体工場などの生産現場でも、“マクドナルド化 (McDonaldization)” (詳細は下述) するはずだとの一般的な常識に反して、生産性向上に大きな役割を果たしていることは実に興味深い (中馬 (2007))。

⁶²<http://chyronhego.com/press-release/chyronhego-and-trackman-team-up-to-provide-winning-baseball-player-and-ball> や <http://m.mlb.com/news/article/119234412/statcast-primer-baseball-will-never-be-the-same> 参照

他方、AI/IoT時代の到来は、メタ認知能力の大衆化をもたらすのではなく、高い自己変化能を誇る人的資本を体化したエリート層と自己変化能とは縁遠い人的資本を有するその他の人々との二極化傾向が生まれると主張する人々も少なくない。AIの将来雇用に関する社会的インパクトを否定的に捉えがちな人々にも、そのような傾向が強い。

実際、社会学者 Ritzer (1997)は、このような傾向を McDonaldization とよび、AI/IoT化の進展により世界の多くの職場がマクドナルド・ショップ化していくと下記のように指摘している。

「McDonaldization involves an increase in functional rationality at the expense of a decline in substantial rationality. It is this decline, the deterioration of the ability of people in most, especially lower-ranking, positions to think rationally, that is the fundamental irrationality of McDonaldized system. There is little room for, or interest in, self-rationalization and self-observation in McDonaldized systems, except in higher-level positions.」

「マクドナルド化は、(Weber流の)実質合理性の減少という犠牲を払って形式合理性を増加させたものである。マクドナルド化した社会システムの根本的に非合理的な部分は、最下層に属している人々が合理的に考える能力を低下させているという点である。マクドナルド化した社会においては、高いポジションにいる人々を例外として、自己合理性(自らの理性にしたがう行動)とか自己観察(自らの行動をメタの視点から眺める行動)といった概念が入り込む余地や興味がほとんど存在しない。」(筆者訳、()内は筆者追加。)

彼の指摘は、上記の Zuboff のものとは極めて対照的な主張であり、しかも、今後どちらの傾向が優勢となっていくかは、大きな政策インプリケーション上の違いをもたらすと考えられるので、もう少し深掘りしてみたい。

上記の引用部分で主張されていることは、マクドナルド化した社会においては、大衆が知性的に考える能力を失ってしまう、ということになる。つまり、AI/IoTの時代が本格的に訪れると、次々に押し寄せる情報洪水に直面するので、大衆がよりたやすくメタ認知できるようになる社会は夢のまた夢との主張である。ちなみに、Ritzer (2001)では、“メタ認知”に相当する言葉として Mannheim (1935)の次のような self-observation (自己観察)の定義に言及している。

「Self-observation aims primarily at inner *self-transformation*. Man reflects about himself and his actions mostly for the sake of remolding or transforming himself more radically.」

「自己観察とは、主に心の中での自己変革をめざしている。人間とは、自分自身ならびに自分の行動について、ほとんどが自分自身の再生や変革のために、内省するものである。」

(筆者訳)

さらに、Ritzer (2001)自身、次のような普通の日本人だったらかなり仰天する主張をしている。逆に言えば、メタ認知の大衆化現象を有効活用できる社会は、ややひいき目に言うと、世界の先進国の中で日本において最も実現しやすいということかもしれない。

「As with self-rationalization, self-observation applies much more to managers and franchisees than it does to the vast majority of employees of McDonalidized enterprises. In Mannheimian terms, there is no need for McDonalidized organizations to seek to have the vast majority of their employees transform themselves.」

「自己実現と同じように、自己観察とは、マクドナル化した企業の大多数の従業員達に対してよりも、経営層やフランチャイズ主宰者に相応しいものである。マンハイム用語では、マクドナル化した組織にとって、大多数の従業員達の自己変革を求める必要性は何もない。」(筆者訳)

それにしても、なんというエリート主義だろうか・・・。

もちろん、メタ認知の大衆化が起きるためには、AI/IoTがもたらすリアルタイムでの情報伝達、ジャストインタイムでの情報利用、ズームイン・ズームアウトが自在な分析視点の切り替え等々の一目瞭然化便益が、エリート層のみならず大衆にも一様に及んでいく社会的な便益が存在する必要がある。言い換えれば、そのような社会的便益を生み出す仕組みの有無によって、人間疎外と人間尊重とが紙一重という状況が出現しうる。では、そのような仕組みは、実際に生まれつつあるのだろうか？答えは、Yesである。

企業・組織サイドにとっても、“メタ認知能力の大衆化”やその原動力としての広範囲にわたる一目瞭然化は、事業／組織経営上大きな便益をもたらす。高速で相変化する AI/IoT の時代における多段階競争下では、必要な統合的知識・ノウハウの幅と深さが特定の専門家・専門集団の情報処理能力の限界を大幅に、そして頻繁に超えるようになってきたからである。そのため、それらがエリート集団によってスタンダードアロンで保有・活用される形態ではなく、大勢の人々の間に分有されながらも必要に応じて迅速かつ自律的に結合・活用される形態の比較優位性が高まる。異質で多様な大勢の人々の協調を容易にする人的資本の外部インタフェース標準化の必要性が格段に高まっていく大きな理由でもある。

実際、Amazon 等の事業経営スタイルに典型的に見られるように、データベースへのアクセスを自企業・組織内の専門集団だけに許すのではなく、API(アプリケーション・インタフェース)を公開して様々なアクセス権を付与する形で企業・組織内外の専門集団にも開放することの便益が格段に増大してきている。一目瞭然化のためのマイクロ・マクロ再帰ループ形成のコスト低下やスピード上昇に伴い、異質で多様な大勢の専門家集団にデータベースを開放することで生じる共有化便益(“集合知便益”)が、特定の専門集団だけにデータベース利用を限定して情報を温存する形の専有化便益(“専門知便益”)を大幅に上回りだしたからである。⁶³ そして、専門知便益を大きく上回る集合知便益を恒常的に生み出すことができれば、後者が提供する豊富で多彩なリアルオプションの活用によって、将来のページがめくられる最後の最後まで意思決定を引き延ばせるようになる。実際、前節では、GitHub を活用したソフトウェア開発現場で集合知便益を世界規模で実現する仕組みが世界を大きく変えつつあることも紹介した。

この種の事例には尽きるところがない。全米一の売上を誇る液晶 TV のファブレス企業 VISIO と台湾 OEM 企業 Amtran Technology (瑞軒科技) 等との関係に典型的に見られるように、SAP、Oracle 等の

⁶³ Nielsen (2012) は、Linux 等のソフトウェアのオープンソース化や細分化された専門性 (microexpertise) に溢れる市民科学者 (citizen scientists) 参加型の “Genbank” (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/genbank/>) や “Galaxy ZOO” (<http://www.galaxyzoo.org/>) などに象徴されるボトムアップ型のオンライン協調活動 (Mass-On-Line Collaboration) をそのような事例だとしている。

ERP（統合業務パッケージソフト）や PTC、Dassault 等の PLM（製品ライフサイクル管理ソフト）の導入が可能にするリアルタイムでの一目瞭然化環境が整えば、様々なデータアクセス権の設定によって企業・組織間に発生する数多くの利益相反問題をより効率的に解決できる。その結果、従来の囲い込み型では到底実現できなかった世界規模での“息の長い状態依存的な関係”(Sustained Contingent Collaboration)を導入することもできる (Herrigel (2010))。例えば、状態依存的な売上・利益・原価・投資の分担契約などである。

もちろん、多様性・異質性の追求は斬新なアイデアを生み出すために不可欠ではあるが、他方で多様性・異質性のスペクトラムが広がれば広がるほど関係者間のコミュニケーションが難しくなる (Ashraf 他 (2013))。実際、ICT 活用が一般的となる以前は、非凡な組織経営を誇るトヨタのような企業・組織だけが、集合知の威力にいち早く気づき、末端に至るまでの異質で多様な大勢の人々の気づきや洞察に基づいて集合知便益を生み出すコミュニケーション構造（トヨタ生産方式 (TPS)）を導入・実践できていた。ただし、自動化・一目瞭然化が低コストで素早く実行できる AI/IoT の時代になると、数多くの国内外の“通常の企業”も、経営層がその意義・意味に十分に気づきさえすれば、TPS 的な集合知経営を ERP や PLM、MES などのパッケージソフトウェアを導入することによりかなりなレベルで実践できるようになってきた。

なお、TPS の導入が 1990 年前後と早かった米国の優良企業に比べ、日本の電機・電子産業を代表する諸企業の TPS 導入は 10 年遅れの 2000 年前後であった。しかも、ERP や PLM、MES などのパッケージソフトウェアの導入は、少なくとも 2000 年頃まではなかなか進まなかった。現状でも、大きな企業や組織になればなるほど、それらのソフトウェアツール導入が部門別に独立になされているケースが少なくない。さらに、個人的な印象で誠に申し訳ないが、大規模組織で最も一目瞭然化便益の享受が遅れているのが、中央の官公庁や地方公共団体だと思われる。その結果、誠にアイロニカルであるが、1980 年代に強みを発揮した多くの日本企業の小集団活動は、その局所最適性ゆえに、相変化速度が増してきた多段階競争の時代になると、またたく間に世界の中で比較優位を失っていった (徳丸 (1999))。

以上のことから、ミクロ・マクロ再帰ループがもたらす広範囲な一目瞭然化便益とメタ認知能力の大衆化は、企業・組織特殊的人的資本から一般的人的資本への変化方向を規定する決定的な要因の一つとなってきたことが分かる。加えて、特殊的人的資本から一般的人的資本への変化の幅と深さならびにスピードは、人的資本内及び人的資本間のモジュール化の進展速度の遅速、メタ情報としてのミラーイメージのモジュール階層構造の分かりやすさと迅速な遡及性、Psychology of Panopticon の組織経営上の重視度、クラウド型データベースの企業・組織外へのオープン化の度合いやリアルタイム性、同データベースの共有化便益（集合知便益）の大きさ、などによって大きく影響される。繰り返し発生する共通の学習機会に直面しながら共通言語を用いて文脈を高解像で記述するための関連語彙を習得していけば、各自の意識・無意識の認知・連想パターンに少なからざる共通性が素早く生みだされていくからである。その結果、外部インタフェースにも自律的な共通化傾向が現れ、事後標準としてのデファクト (de facto) スタンダードが生まれる。

このように、一目瞭然化とメタ認知能力の大衆化は、“相互認知環境”の解像度（発生した事象を同様に詳細識別できる程度）を格段に向上させる (Sperber 他 (1999))。64 もちろん、事象の発生原因や解決

64 相互認知環境 (cognitive environment) とは、個々人が感知あるいは類推できる全ての明らかな事象 (“manifest”

策・予防策等々は、各自が保有する知識・ノウハウやメタ認知力の違いによって異なる。その意味で、相互認知環境とは、個々人の異質性や多様性を侵害するものではなく、むしろ際立たせるものである。

さらに、そのような共通部分を意図的にシステム化して標準インタフェースの水準にまで高められれば、つまり、デジュール (de jure) スタンダードとして事前設計できるようになれば、コミュニケーション効率がさらに上昇してくる。そして、そのような外部インタフェースの善し悪し自体が、人的資本の互換性・再利用性・拡張性・相互運用性を大きく規定すると共に、メタ情報の解像度や既存の人的資本を基礎にしたより抽象度の高い人的資本の生成速度にも大きな影響を与える。

IV まとめとインプリケーション

本論では、AI/IoT の時代に相応しい社会ネットワークとしての人的資本理論を再構築するための手掛かりを模索した。そのために、まず、なぜ人的資本を社会ネットワークとして捉える必要があるのかについてやや詳しく述べた。その際の中核を成したのは、AI/IoT 技術の本質であるデジタル化された「あらゆる事柄」がアルゴリズム/メタアルゴリズムにより次々に自動化されることによって階層内の情報の正確な抽象化と階層間情報の明瞭・迅速な遡及が可能になり、それらの実行結果のみならず実行過程を含む全てが大勢の人々に一目瞭然化されていく、という特徴である。

このような AI/IoT を特徴付けるデジタル化・自動化・一目瞭然化は、個別企業・組織内で実施された実験・学習の社会的有用性の発見確率を高め、それらを他企業・組織で相互に運用するための人的資本の互換性・再利用性・拡張性・相互運用性を格段に向上させる。本論では、その様子を、いくつかの典型事例を示しながら経済学/経営学、システム生物学、脳神経科学などの成果に言及する形で描写した。そして、生命体であるか人工物であるかにかかわらず、モジュール・システムアーキテクチャにしたがって特殊から一般に向かう大きな進化経路特性こそ、企業・組織特殊的人的資本から一般的・汎用的人的資本への動態プロセスを特徴付けている本質だと類推した。

加えて、AI/IoT が可能にした歴史上希に見る情報の転送/応答速度の加速によって、各自の保有する人的資本間の代替・補完関係に関するメタ情報/一目瞭然化情報（社会システム内における部分と全体の関係の鳥瞰情報）が多くの人々に高解像度で素早く獲得できるようになり、その結果、国家規模・地球規模での社会学習・社会実験が大きな威力を発揮しつつあること、さらには、相変化を伴う多段階競争 (Systems of Systems 競争) が短期間に頻発することにより人的資本の陳腐化速度が加速していること、そのために個々の人的資本の自己変可能を高めることが社会にとって緊急の課題になりつつあること、等々に関して諸事例を紹介しながら確認した。

そのような一目瞭然化情報による社会ネットワークの精緻化は、これまで日本勢が得意としてきた「変化と異常への対応力」自体の自己変化能、ワンランク・ツーランク上位の抽象レベルを持つ「変化と異常への対応力」需要への急激な高まりと呼応するものであり、社会ネットワークとしての人的資本のより高い自己変化能を要請する極めて重要な要因ともなっている。ただし、そのような自己変化能は、特定企業・組織によって提供される人的資本形成のための学習機会に頼るだけではなく、企業・組織の境界

events) の集合である。そして、人々間の相互認知環境 (mutual cognitive environment) とは、個々人のそのような認知環境の共通集合として定義される。なお、Sperber 他(1999)によれば、“Manifest” レベルの認知は、“Known” や “Assumed” レベルの認知よりも、認知レベルが弱いとしている。ちなみに、Oxford English Dictionary によれば、次のような定義がなされている： Manifest=Clearly revealed to the eye, mind, or judgement; Known=Become an object of knowledge; apprehended mentally, learned; Assumed=Taken for granted, adopted as a basis of reasoning.

を越えた社会ネットワーク内で培われていく特徴を持つ。そのため、長らく日本の企業・組織、そして、国家を特徴付けてきた自前偏重主義が、企業・組織レベルのみならず個人レベルでも大きな泣き所になりつつある。言い換えれば、自前偏重主義は、今やミクロの問題ではなくマクロの社会問題とさえなってきた。

社会ネットワークとしての人的資本の必要性を論じた後、上述の多段階 (Systems of Systems) 競争に対峙するために必須の人的資本の自己変化能/進化可能性について、高い自己変化能/進化可能性を誇るモジュール・システムアーキテクチャという視点を導入しながら検討した。より具体的には、人的資本とこれまで一言で呼ばれていた部分を、1) 各自に体化している人的資本と 2) その構成要素間を繋ぐ内部インタフェース、3) 人々に体化した人的資本の組合せとしてのより高次の人的資本、4) それらの組合せを実現するための人々を繋ぐ外部インタフェース、という四つの要素に分解した。そして、1) の人的資本を特徴付ける人的資本内アーキテクチャと 3) の人的資本を特徴付ける人的資本間アーキテクチャに関して、それらの自己変化能が産み出される構造的な特徴を主に経済学/経営学、システム生物学、脳神経科学の知見に習いつつ展望した。そして、これらの各分野の諸知見や半導体回路設計に関するモジュール化事例をも援用しながら、生命体の進化経路であるか人工物の進化経路であるかにかかわらず、自己変化能を具備したシステムアーキテクチャとしてモジュール・システムアーキテクチャが歴史を超えて支配的であることを強調した。

さらに、人的資本の個人・企業・組織特殊性や一般性 (互換性・再利用性・拡張性・相互運用性) は、主に 2) や 3) の内部インタフェースや外部インタフェースの標準化の程度によっても大きく規定されていることを確認した。また、それらの内部・外部インタフェースが標準化されていく要因には、人的資本内アーキテクチャと人的資本間アーキテクチャの双方が影響することも確認した。特に、両人的資本がモジュール・システムアーキテクチャにしたがってモジュール化されていけば行くほど、内部・外部インタフェースが標準化されやすくなること、その結果 (既存) 人的資本のベッカーの意味での一般化傾向が高まること、AI/IoT によってインタフェースの中でも外部インタフェースの標準化速度が加速するために社会ネットワークとしての人的資本の重要性が増すこと、等々に関しても言及した。

本論の中核を成すのは、AI/IoT の時代を迎えて頻発して来た多段階スパイラル現象の中でも自己変化能の高い人的資本とはそもそもどのようなものなのだろうか? といた問いかけへの正面突破を狙った試みである。そして、人的資本の自己変化能とは人的資本が革新性と保守性とを同時に兼備したものだと思わせること、両者の同時獲得のためには人的資本内・資本間アーキテクチャがモジュール・システムアーキテクチャに沿うことが必須あること、しかも、人的資本の内部・外部インタフェースがよりユニバーサルに標準化されていくことが不可避であることを、主に著名な数理システム生物学者達である Wagner (2014)/北野 (2007) /Schuster(2005)、(2011)の生命体に関する革新性と保守性とを兼備した頑健性概念を援用しながら明らかにした。

その基本的なアイデアは、飽くなきモジュール化とその結果によって産み出された多様で異質な数多くのモジュールとそれらのモジュール間インタフェースのユニバーサルな標準化が存在していれば、モジュール間に張り巡らされた稠密な超高次の多次元進化経路ネットワークの存在によって保守性と頑健性とを同時に備えた自己変化能/進化可能性が生み出されるため、生命体か人工物かにかかわらず、それらの活動場と置かれた時代環境の中で運・不運に出会いながらも環境変化に応じた様々な進化の適応経路をほぼ全方向に辿りうる、ということにある。

また、そのような飽くことなきモジュール化の帰結として、ユニバーサルなインタフェースを具備するモジュール・システムアーキテクチャが支配的な社会/自然環境では、あらゆる主体が稠密に結びつくことによってあらゆる箇所で相互依存性の大局化が起こり、イノベーションが、あらゆる人(あるいは生命体)によってあらゆる場からあらゆる時に並行して起きやすくなるという意味での IoT 時代を特徴付ける“イノベーションの大衆化”現象が起きやすくなることも指摘した。あらゆる主体が社会/自然ネットワーク内で稠密に結びつくことによって、あらゆる箇所で相互依存性の大局化が起こるからである。さらに、人類の場合、闇雲な局所的探索だけではなく計画的な大局的探索をもより効率的にできるので、そのようなイノベーションの大衆化現象が、より迅速により広汎に起きてくる。そして、そのような環境下での社会ネットワークのさらなる稠密化が、人的資本を社会ネットワークと見なすことの重要性を急速に増大させていると総括した。

さらに、イノベーションの大衆化便益を社会として享受するためには、コミュニケーション構造(その中核を成す外部インタフェース)の仕様、特にそのオープン性と拡張性が、極めて重要になることも繰り返し確認した。実際、人的資本の外部インタフェースがユニバーサルに標準化され、インタフェースを通じて個人間でやりとりされる情報粒度の疎密を状況に応じて自由に変更できるようになればなるほど、人的資本の互換性・再利用性・拡張性・相互運用性がより一層高まっていく。しかも、社会発展、特に社会にヒトを合わせるのではなくヒトに社会を合わせられるような自由度を誇る社会の実現(河野(2006))にとっては、そのような状況が生み出す一目瞭然化便益が、エリート層のみならず大衆にも一樣に及んでいく社会的な仕組みが必須となる。逆に言えば、そのような仕組みが存在するか否かに応じて、本格的な AI/IoT 時代を迎えた社会が、紙一重で人間疎外がちとなるか人間尊重がちとなるかが決まってくる。

本論の最後の節では、AI/IoT 時代の到来と共に、日本の雇用慣行を特徴付けるとされてきた企業・組織特殊的人的資本の役割が大きな変貌を遂げつつある動態とその背景要因を、前節までの議論に基づきながら、特に一目瞭然化便益の大きなインパクトに注目しながら数多くの事例を提示しつつ検討した。

繰り返しで申し訳ないが、ゴーイングコンサーン(継続企業)としての企業・組織が提供する特定抽象レベルでの企業・組織特殊的人的資本の賞味期限が格段に短くなってきた。そのため、人々が一生をかけて特定企業・組織内キャリアを追求することの危険性が急増してきている。そのため、個人、企業・組織に関係なく、人的資本の自己変化能、具体的には、企業・組織の境界を越えた互換性・再利用性・拡張性・相互運用性を重視した人的資本投資への必要性が急増してきた。そのことは、文中で紹介した GitHub の地球規模のソフトウェア開発スタイルに代表されるクラウド型データベースが可能にするマイクロ・マクロ再帰ループ形成のコスト低下やスピード上昇に伴い、異質で多様な大勢の企業・組織内外の専門家集団にデータベースを開放することで生じる共有化便益(“集合知便益”)が、特定の専門集団だけにデータベース利用を限定して温存する形の専有化便益(“専門知便益”)を大幅に上回りだしていることから確認した。

さらに、短期間に高頻度で起きる多段階競争の時代においては、既存の人的資本とそれらを基礎にワンランク/ツーランク上位の抽象度を持つ新たな人的資本が次々に必要となってきた。そのため、必要な再教育訓練投資の頻度と投資費用(含む時間費用)が急増してきた。しかも、多段階競争が高頻度で起きる場合、将来の不確実性がさらに大きくなるので、教育訓練投資の効率化を図ると共にそれらの費用の脱埋没固定費用化策が社会制度として必須となることも強調した。短期間に相変化を繰り返す多

段階競争の時代には、人々が人的資本の変化能を高め、独自性と汎用性に富んだ自己変可能型人的資本に自ら投資する以外に方法はない。実際、変化能が高まれば再投資費用も少なくて済むし、投資費用自体の埋没固定費用化も避けられる。ただし、脱埋没固定費用化とは、人的資本を企業や組織といった活用基盤（プラットフォーム）から独立に保つことでもある。つまり、ベッカー的な意味での企業・組織特殊的な人的資本の存在意義が限りなく小さくなっていくのである。

したがって、今求められているのは、企業・組織をまたぐ人的資本形成プラットフォームを社会的な仕組みとして意図的に構築していくことだと思われる。しかも、企業・組織の境界をまたぐ形での自己変化能に富んだ人的資本の形成は、企業・組織主体による上から目線の局所最適化では実現が難しくなってきたおり、今後は、個々人の自由な意志決定を最大限に尊重したスタイルが主流となっていくだろう。そして、AI/IoT 技術のさらなる発展によって労働者/生活者/消費者の個別特性に社会を合わせられるような自由度を誇る社会の実現も、近い将来において夢物語ではなくなってくると思われる。

その結果、企業・組織にとっては、自社にとって望ましい人材を確保するためには、生涯にわたる良好な雇用機会の提供で競うのではなく、豊かな自己変化能をもたらす良好なオン・ザ・ジョブ(on-the-job)教育訓練機会の提供で競うことになっていくだろう。しかも、その際には、既に高度に個別化した最終消費財に関して起こっているように、労働者/生活者/消費者の日常活動を支えるパーソナルネットワーク関係価値（“Relationship Value”⁶⁵）そのものに企業・組織サイドが御用聞きスタイルで分け入る形が支配的となるのではないだろうか。個々人が自己実現のために望む人的資本コンテンツやその組み合わせは極めて多様なので、彼ら固有の価値観やその変化方向に利するメタ認知情報をも企業・組織サイドから恒常的に提供してもらうためである。それらは、良好なオン・ザ・ジョブ教育訓練機会の顕著な特性となる筈である。

加えて、今後、社会的な仕組みとしての人的資本システム形成でさらに重要性を増す政策サイドにとっては、労働者/生活者/消費者に自己変化能を発揮する方向性を見定める手掛かりを数多く提供するために、前述したマイクロ・マクロ再帰ループがもたらす AI/IoT 誘発型の一目瞭然化によって各種人的資本間の代替・補完関係に関する豊かなメタ認知情報を提供し、“メタ認知能力の大衆化”を加速させるための側面支援が求められる。その際には、MOOC（Massive Open Online Course）等の Web ベースでの各種学習機会⁶⁶や PubMed (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/>)や MedScape (<http://www.medscape.com/>) に代表されるような専門家検証済みの専門知識データベース提供を様々な領域で安価に(可能であれば日本語で)促すような政策誘導も極めて貴重なものとなるだろう。

また、systems of systems 競争という意味では、大学・大学院や専門学校などの高等教育機関が、社会人をも含むより広範囲な人々に対して、多様なカリキュラムに基づく再教育や多彩で自由な共同研究開発などの場を通じて社会/自然システムに関する様々な鳥瞰情報を自由に創造・提供していけるような高等教育制度の大改革(特に規制緩和・撤廃、省庁間再構成・連携など)が求められている。

さらに、今後より大規模な形で沸き起こってくるイノベーションの大衆化現象は、自営業（Self-

⁶⁵ Zuboff 他（2002）第1章参照。

⁶⁶ MOOC では、Stanford 大学や Michigan 大学などの 5 大学が提供するコースエラ (<https://www.coursera.org>) や MIT, Harvard 大学などの 50 主要大学のメンバーが提供するエディックス (<https://www.edx.org>) が、各々既に全世界から各々 2400 万人、3300 万人の登録者数を誇るという。なお、数字は各々 Wiki 及び当該サイト調べのもの。ちなみに、現時点(2017 年 4 月 7 日)では、日本版 MOOC (JMOOC: <https://www.jmooc.jp>) の登録者数は 50 万人程度(当該サイト調べ)だということ。彼我の差は、如何ともし難いものようである。

Employment) 67的な職業に従事する人々を格段に増加させる。そのため、彼らの自己変可能に基づく試行錯誤的な人的資本投資行動を下支えするソーシャルミニマム(social minimum)としての雇用保険制度のより広範囲な職業形態への拡充が必須となる。また、彼らの something new なアイデアに基づくイノベーション活動を様々な進化方向から積極的に側面支援するという意味では、現行の日本版 LLC⁶⁸の限定された進化方向を解き放つための法的な改良・改善、特に、イノベーターの起業リスクを軽減する無形資産形式(含む人的資本)での出資やパススルー課税⁶⁹等の税制優遇措置を認めることなどが必須だと考えられる(中馬(2011))。

加えて、本論の多段階競争という視点からは、kickstarter (<https://www.kickstarter.com>)や Amazon Mechanical Turk (<https://aws.amazon.com/jp/mturk/>) に代表されるクラウドファンディングやクラウドソーシング等のベンチャーファイナンスのための systems of systems 的な仕組み(含む“fund of funds”⁷⁰など)がさらに重要性を増すと予想される。⁷¹ ベンチャーファイナンス分野こそ、文中でも言及した上市妥当性を最後の最後の段階まで仮想的に追求できるワンランク上のコラボレーションツールやリアルオプションツールが最も威力を発揮する分野だと考えられるからである。

また、このような形でベンチャー企業が社会の中に数多く産み出されてくる状況は、既存企業・グループのさらなる発展にとっても必須である。Google Capital や Intel Capital に代表される CVC (Corporate Venture Capital)⁷²を通じた A&D (Acquisition & Development:買収型開発活動)活発化に象徴されるように、R&D 活動の幅と深さの迅速な拡大、したがって多段階競争の時代に不可欠な R&D 抽象度の迅速な上昇やそれらのリアルオプション化を社会として素早く実行できるようになるためである。⁷³

そして、以上のような自己変化能を誇る人的資本形成システムが最終的に行き着くところは、労働者/生活者/消費者の個別特性に社会を合わせられるような社会であり、諏訪(1999), (2017)や Zuboff 他(2002)が主張する個人への“キャリア権”⁷⁴の付与されている社会ではなかろうか。そのための第一歩は、企業・組織にとって解雇がしやすくなる社会的な仕組みの実現ではなく、労働者/生活者/消費者にとって離職がしやすくなる社会的な仕組みであり、その一つとしての彼(女)らやその家族にフレンドリーな

⁶⁷ Zuboff 他(2002)は、self-determined employment という興味深い表現を用いている。

⁶⁸ 日本版 LLC の特徴や米国 LLC との違いに関する平易な説明は、<http://cp.zei.ac>、<http://cp.zei.ac/what/tigai.html>、<http://cp.zei.ac/oubei/ame.html> などを参照されたい。また、より本質的な説明は、齋藤ほか(2007)が圧巻である。

⁶⁹ パススルー課税とは、事業体の出資者である構成員(個人または法人)に配分される利益にのみ課税される課税方式である。しかも構成員は、「Flow Through Taxation」(発生したすべての利益・損失・諸費用を構成員に受け渡す)便益を受けることができる。そのため、構成員は損失などが発生した場合、所得から全額控除できる。

⁷⁰ https://en.wikipedia.org/wiki/Fund_of_funds 参照。

⁷¹ この辺り叙述は、安藤晴彦氏@METI との意見交換を大いに参考にさせて頂いた。同氏に心から御礼申し上げたい。

⁷² 事業会社が自の資金・判断で自ら投資活動を行う組織。投資判断の際には、自社の R&D 部門も積極的に関与するケースが多い。その結果、自社の R&D 活動の外延を素早く拡げて自他技術の systems of systems 内での評価鑑を磨くことができるようになる。CVC は、1990 年代半ば頃から活発化してきた。その草分け的存在であり現リーダーでもある Intel Capital の歴史に関しては、Chesbrough(2003)が詳しい。

⁷³ CVC を用いた R&D 活動へのプラスのインパクトとして Volans 社(<http://volans.com/>)は、下記の報告書で「From Narrower to Wider Scope (狭量から広量へ)、From Shallower to Deeper Analysis (浅薄な分析から深遠な分析へ)、From Lower to Higher Ambition (低級や野心から高級な野心へ)、From Shorter to Longer Timescale (短期志向から長期志向へ)、From Incremental to Systemic Change (漸進的変化からシステム的変化へ)」と極めてコンサイスに特徴付けている。http://archive.volans.com/wp-content/uploads/2014/06/Investing_in_breakthrough.pdf 参照。

⁷⁴ 「人は誰でも自ら望む職業キャリアを主体的に開発・形成する権利をもち、企業や社会は個人々のキャリア形成を保障・支援すべきであるという法概念、およびそうした労働者の権利自体を、企業組織が有する人事権に対して「キャリア権」と呼びます。キャリア権の議論は、職業経験による能力の蓄積やキャリアを個人の財産として法的に位置づけようとする試みであり、今後の雇用政策や職業能力開発政策の展開を支える新しいコンセプトとして注目されています。」(<https://jinjibu.jp/keyword/det1/443/>)

職場だと言える。

参考文献

- ・ 甘利俊一(2008)、『神経回路網モデルとコネクショニズム』、東京大学出版会
- ・ Authur, Brain (2009), *The Nature of Technology: What It is and How It Evolves*, Free Press, New York, London, Toronto, Sydney (有賀裕二・日暮雅道 監・翻訳『テクノロジーとイノベーション——進化／生成の理論』、2011、みすず書房)
- ・ Arthur, Wallace (2011), *Evolution: A Developmental Approach*, Wiley-Blackwell, Sussex
- ・ Ashraf, Quamrul and Oded Galor (2013), “The “Out of Africa” Hypothesis, Human Genetic Diversity, and Comparative Economic Development,” *American Economic Review*, 103(1): 1–46
- ・ Baldwin, Carlis Y. and Kim B. Clark (2000), *The Design Rules: The Power of Modularity Vol. 1* (安藤晴彦訳『デザイン・ルール:モジュール化パワー』、東洋経済新報社), The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, London, England
- ・ Becker, S. Gary (1993), *Human Capital: A Theoretical and Empirical Analysis, with Special Reference to Education*, 3rd, 1993, University of Chicago Press, Chicago and London
- ・ Nick Bostrom and Eliezer Yudkowsky (2014), "The Ethics of Artificial Intelligence" in Chapter 15 in *The Cambridge Handbook of Artificial Intelligence*, ed. by Keith Frankish and William M. Ramsey, Cambridge University Press, pp.316-332
- ・ Burgoon, Judee K., Laura K. Guerrero, & Valerie Manusov (2011), “Nonverbal Signals,” chapter 8 in *The SAGE Handbook of Interpersonal Communication* 4th, ed. by Mark L. Cknapp and John A. Daly, Sage Publication, pp.239-280
- ・ Callebaut, Werner (2005), “The Ubiquity of Modularity,” Chapter 1 in Werner Callebaut and Diego Rasskin-Gutman ed., *Modularity: Understanding the Development and Evolution of Natural Complex Systems*, the MIT Press, 2005, pp. 2-28
- ・ 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
- ・ Chesbrough, W. Henry (2003), *Open Innovation: The New Imperative for Creating and Profiting from Technology*, Harvard Business School Press, Boston, Massachusetts
- ・ Chuma, Hiroyuki (2006), "Increasing complexity and limits of organization in the microlithography industry: implications for science-based industries," *Research Policy*, vol. 35, pp.394–411
- ・ 中馬宏之 (2007)、「日本の半導体生産システムの競争力弱化要因を探る：Papert’s Principle の視点から」、*認知科学*、Vol.14, No.1, pp.39-59
- ・ 中馬宏之 (2011)、「旧来の「株式会社」形態からはリスクを取る事業がなかなか生まれない」、JBPress (<http://jbpress.ismedia.jp/articles/-/15833>)
- ・ 中馬宏之 (2015)、「半導体産業における日本勢の盛衰要因を探る：システムアーキテクチャの視点から」、山口栄一編『イノベーション政策の科学』第8章に所収、pp. 173-209

- Colwell, Robert P. (2005), *The Pentium Chronicles: The People, Passion, and Politics Behind Intel's Landmark Chips*, Wiley-IEEE Computer Society Press, Hoboken, New Jersey
- Craig, A.D. Bud (2015), *How Do You Feel?: An Interoceptive Moment with your Neurobiological Self*, Princeton University Press, Princeton and Oxford
- Damazio, Antonio (2010), *Self Comes to Mind: Constructing the Conscious Brain*, Pantheon Books, New York (山形浩生訳『自己が心にやってくる:意識ある脳の構築』、2013、早川書房)⁷⁵
- Dean, Peter, Julee K. Brooke, and Linda B. Shields (1996), "Examining the Components of Speaking for Shared Meaning," *Performance & Instruction*, Vol. 35, Iss. 6, pages 4-9
- Dixit, Avinash K. and Robert S. Pindyck, *Investment under Uncertainty*, Princeton University Press, Princeton, New Jersey.
- Engelen, van Remco and Joroen Voeten eds. (2007), *Ideals: evolvability of software-intensive high-tech systems: A collaborative research project on maintaining complex embedded systems* (www.esi.nl/publications/idealsBook.pdf)
- Goekoop, Rutger and Jasper Looijestijn (2012), "A Network Model of Hallucinations," in *Hallucinations: Research and Practices* ed. by Jan Dirk Blom and Irsi E.C. Sommer, Springer, New York Dordrecht Heidelberg London, pp. 33-54
- Eble, J. Gunther (2005), "Morphological Modularity and Macroevolution: Conceptual and Empirical Aspects," in Werner Callebaut and Diego Rasskin-Gutman ed., *Modularity: Understanding the Development and Evolution of Natural Complex Systems*, the MIT Press, 2005, pp.221-238
- 藤本隆宏・武石彰・青島矢一編 (2001)、『ビジネス・アーキテクチャ：製品・組織・プロセスの戦略的設計』、有斐閣
- Gavrillets, Sergey (2004), *Fitness Landscapes and the Origin of Species*, PRINCETON UNIVERSITY PRESS, Princeton and Oxford
- Giddens, Anthony (1990), *The Consequences of Modernity*, Stanford University Press (松尾精文・小幡正敏訳『近代とはいかなる時代か?—モダニティの帰結』、而立書房、1993)
- Grossman, Gary (2017), "Welcome to the Age of Continuous Innovation," *EETimes Web 版* (http://www.eetimes.com/author.asp?section_id=36&doc_id=1331529)
- Hawkins, Jeff with Sandra Blakeslee (2004), *On Intelligence*, Times Books (伊藤文英訳『考える脳 考えるコンピュータ』、2005、ランダムハウス講談社))
- 林晋 (2015)、「情報産業：日本の IT はなぜ弱いのか」、山口栄一編『イノベーション政策の科学』第9章に所収、pp. 211-232
- Hayek, A. Friedrich (1945), "The Use of Knowledge in Society," *American Economic Review*, Vol. 35, No. 4, pp. 519-530.
- Herrigel, Gary (2010), *Manufacturing Possibilities: Creative Action and Industrial Recomposition in the United States, Germany, and Japan*, Oxford University Press,
- IRDS (International Roadmap for Devices and Systems) 2016, *IDRS Reports 2016* (<http://irds.ieee.org/events>)
- ITRS (International Technology Roadmap for Semiconductor) 2015, ITRS 2.0 PUBLICATION

⁷⁵ 残念ながら、邦語訳はお勧めできない。

(<https://www.dropbox.com/sh/3jfh5fq634b5yqu/AADYT8V2Nj5bX6C5q764kUg4a?dl=0>)

- Jonson, H. Thomas and Anders Broms (2001), *Profit Beyond Measure: Extraordinary Results through Attention to Work and People* (河田信訳『トヨタはなぜ強いのか—自然生命システム経営の真髄』、日本経済新聞社)、Free Press
- 河野哲也 (2006)、『<心>はからだの外にある：「エコロジカルな私」の哲学』、NHK ブックス、日本放送出版会
- Kimura, Motoo (1983), *The Neutral Theory of Molecular Evolution*, Cambridge University Press, Cambridge (木村 資生・向井 輝美・日下部 真一 (1986)、『分子進化の中立説』、紀伊国屋書店)
- 北野宏明 (2007)、『したたかな生命：進化生存のカギを握るロバストネスとは何か』、ダイヤモンド社
- 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
- 黒川利明 (2012)、『クラウド技術とクラウドインフラ —黎明期から今後の発展へ—』、共立出版
- Kurzweil, Ray (2005), *The Singularity is Near : When Humans Transcend Biology*, Viking Adult (井上 健・小野木 明恵・野中香方子・福田 実訳、『ポスト・ヒューマン誕生：人類が生命を超越するとき』、2007、NHK 出版)、2007)
- Kurzweil, Ray (2012), *How to Create a Mind: The Secret of Human Thought Revealed*, Viking (Penguin Group)
- Lacquaniti Francesco, Yuri P. Ivanenko, Andrea d'Avella, Karl E. Zelik and Myrka Zago (2013), “Evolutionary and developmental modules,” *Frontiers in Computational Neuroscience*, May 2013 | Vol. 7, Article 61, pp.1-6
- Langlois, N. Richard (2013), “Organizing the Electronic Century,” Chapter 4 in *The Third Industrial Revolution in Global Business*, ed. by Giovanni Dosi and Louis Galambos, Cambridge University Press, pp.119-167
- Mannheim, Karl (1936), *Man and Society in an Age of Reconstruction Collected Work Volume II*, The Society of Karl Mannheim (translated by Edward Shils)
- Mattick, S. John (2011), “The central role of RNA in human development and cognition,” *FEBS Letters* 585, Iss. 11, pp. 1600–1616
- Minsky, Marvin (2007), *The Emotion Machine: Commonsense Thinking, Artificial Intelligence, and the Future of the Human Mind*, Simon & Schuster, New York, London, Toronto, Sydney(竹林洋一訳『ミンスキー博士の脳の探検 —常識・感情・自己とは』、共立出版、2009))
- Nayak, P. Pandurang, Douglas E. Bernard, Gregory Doraisz, Edward B. Gamble Jr, Bob Kanefsky, James Kurienk, William Millarz, Nicola Muscettolax Kanna, Rajanz Nicolas Rouquette, Benjamin D. Smith, William Taylorx, Yu-wen Tung (1999), “Validating the DS1 Remote Agent Experiment, ”www-aig.jpl.nasa.gov/public/papers/rax-results-isairas99.ps
- Nenni, Daniel and Don Dingee (2016), *The Emergence of FPGA-based Prototyping for SoC Design*, SemiWiki LLC, Danville, CA
- Nielsen, Michael (2012), *Reinventing Discovery: The New Era of Networked Science*, Princeton University Press, Princeton and Oxford(高橋洋訳『オープンサイエンス革命』、紀伊国屋書店、2013)
- 西口敏宏 (2007)、『遠距離交際と近所づきあい 成功する組織ネットワーク戦略』、NTT 出版
- 西田豊明 (2005)、『インタラクションの理解とデザイン』、岩波書店

- Noah Harai, Yuval (2016), *Homo Deus: A Brief History of Tomorrow*, Harwill Secker, London
- 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>
- Pigliucci, Massimo and Jonathan Kaplan (2006), *Making Sense of Evolution: The Conceptual Foundations of Evolutionary Biology*, University of Chicago press, Chicago, London
- Pross, Addy (2012), *What is Life? How Chemistry Becomes Biology*, Oxford University Press
- Ritzer, George (1997), *The McDonaldization Thesis: Explorations and Extensions*, Sage Publications, London, Thousand Oaks, New Delhi
- Ritzer, George (2001), *Explorations in Social Theory: From Metatheorizing to Rationalization*, SAGE Publications, London, Thousand Oaks, New Delhi
- Rolls, Edmund T. (2016), *Cerebral Cortex: Principles of Operation*, Oxford University Press, Oxford, New York
- Rosenberg, Nathan (1983), *Inside the Black Box: Technology and Economics*, Cambridge University Press
- Rosenberg, Nathan (1994), *Exploring the Black Box: Technology, Economics, and History*, Cambridge University Press
- Rowen, Chris (2004), *Engineering the Complex SoC: Fast, Flexible Design with Configurable Processors*, Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ, 2004
- Russo, Eleonora, Pirmoradian, Sahar and Alessandro Treves (2013), “Encoding Words into a Potts Attractor Network,” in J. Mayor and P. Gomez (eds.), *Computational Models of Cognitive Processes: Proceedings of the 13th Neural Computation and Psychology Workshop (NCPW13)*, World Scientific Press, Singapore, pp. 29-42. (http://people.sissa.it/~ale/Pirm_Bilbao)
- 齋藤旬・久武昌人(2007)、「イノベーションに不可欠な制度 パートナーシップのための会計・税制」、一橋大学ビジネスレビュー Spring、100-117 頁。
- Schuster, Peter (2005), “Evolution in Simple Systems and the Emergence of Complexity,” (<https://wi-consortium.org/wicweb/pdf/peter-compiegne-wi05.pdf>)
- Schuster, Peter (2011), “Physical Principles of Evolution,” in Hildegard Meyer-Ortmanns and Stefan Thuner (eds.) *Principles of Evolution: From the Planck Epoch to Complex Multicellular Life*, pp. 45-80, Springer, Heidelberg
- Shapiro, James (2011), *Evolution: A View From 21st Century*, FT Press, Upper Saddle River
- Shore, N. Allan (2010), “The right brain implicit self: A central mechanism of the psychotherapy change process,” in Chapter 12 in *Knowing, not-knowing and sort of knowing: Psychoanalysis and the experience of uncertainty* ed. by J. Petrucelli, London, Karnac, pp. 177-202
- Simon, A. Herbert (2005), "Forward: The Structure of Complexity in an Evolving World: The Role of Near Decomposability," in *Modularity: Understanding the Development and Evolution of Natural Complex Systems*, ed. by Werner Callebaut and Diego Rasskin-Gutman, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, London, England, pp. IX-XIII
- Sommerville, Ian (2016), *Software Engineering (9th Edition)*, Addison-Wesley, Boston, Columbus Indianapolis,

- New York, San Francisco, Upper Saddle River, Amsterdam, Cape Town Dubai, London, Madrid, Milan, Munich, Paris, Montreal, Toronto, Delhi, Mexico City, São Paulo, Sydney, Hong Kong, Seoul, Singapore, Taipei, Tokyo
- Sperber, Dan. and Deirdre Wilson (1999). *Relevance : communication and cognition 2nd* (内田聖二・宋南先・中達俊明・田中圭子訳『関係性理論：伝達と認知（第2版）』、研究社), Blackwell Publishing
 - Sporn, Olaf (2012), *Discovering the Human Connectome*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, London
 - Srinivasa, Narayan (2015), “Neuromorphic Electronics for Energy Efficient,” ITRS ERD Presentation, Stanford University
 - Stokes, Jon (2006), *Inside the Machine: An Illustrated Introduction to Microprocessors and Computer Architecture*, No Starch Press (Kindle 版)
 - 諏訪康雄(1999)、「キャリア権の構想をめぐる一試論」、『日本労働研究雑誌』No.468, pp.54-64
 - 諏訪康雄(2017)、『雇用政策とキャリア権-キャリア法学への模索』、弘文堂
 - 徳丸壮也(1999)、『日本的経営の興亡：TQC はわれわれに何をもたらしたのか』、ダイヤモンド社
 - Van de Laar, Pierre, Pierre America and Joland Ruggers (2007), *The Darwin Project: Evolvability of Software-Intensive Systems* (http://redesign.esi.nl/publications/darwin/ICSM_Evolvability_workshop_2007.pdf)
 - Villarreal, Luis (2009), *Origin of Group Identity: Viruses, Addiction and Cooperation*, Springer, New York
 - Wagner, Andreas (2014), *Arrival of the Fittest: How Nature Innovates*, Penguin Group, New York (垂水雄二翻訳、『進化の謎を数学で解く』、文藝春秋社、2015)
 - Wagner, P. Gunter, Mihaela Pavlicev and James M. Cheverud (2007), “The Road to Modularity,” *Nature Review Genetics*, Vol 8, December, pp.921-931
 - Watts, J. Duncan (2003), *Six Degrees: The Science of A Connected Age*, W.W. Norton & Company, New York London. (辻竜平・友知政樹訳、『スモールワールド・ネットワークー世界を知るための新科学的思考法』、CCC メディアハウス、2004)
 - Witzany, Gunter ed. (2012), *Viruses: Essential Agents of Life*, Springer, New York, London
 - Uddin, Q. Lucina (2014), “Salience processing and insular cortical function and dysfunction,” *Nature Reviews Neuroscience*, AOP (Advance Online Publication), published online 19 November, pp. 1-7
 - 山本晋也・山口栄一 (2015)「医薬品産業-日本はなぜ凋落したか：イノベーション政策の最適解」、山口栄一編『イノベーション政策の科学』第9章に所収、pp.137-172
 - Zuboff, Shoshana (1984), *In the Age of the Smart Machine: The Future of Work and Power*, Basic Books.
 - Zuboff, Shoshana and James Maxmin (2002), *The Support Economy: Why Corporations are Failing Individuals and the Next Episode of Capitalism*, Penguin Books, New York, London, Camberwell, Toronto, New Delhi, Auckland, Johannesburg