

目次

1. 著者が執筆前に編集委員に提出したコンセプトペーパー P.03
2. 編集委員によるコンセプトペーパーに対するコメント P.06
3. コメントを受けて著者が再考した後に提出された論考初稿 P.11
4. 『といとうとい』 Vol.0に掲載された論考 P.15
5. 『といとうとい』 Vol.0に掲載された編集委員との対話 P.21
6. 『といとうとい』 Vol.0に掲載された編集委員による解題 P.23

目次内のページ番号は、本PDFにおけるページ番号をさす

学問としてのロボット研究

國吉康夫（東京大学情報理工学系研究科教授・次世代知能科学研究センター長）

世間一般的には、コロナ対策用消毒作業ロボット、身体障害者用遠隔アバターロボット、手術ロボット、Pepper等利用した受付ロボットなどに代表されるように実用や活用に目を向けられがちなロボット研究だが、それは一側面でしかない。また、メディアには得てして人間や犬などの生物に模倣したロボットが取り上げられがちだが、単に生物を人間の手によって物質と電子で創り直すことが、その生物を「理解する（した）」ということではない。

では、ロボットの研究、あるいはロボットを使った研究（以降、それをロボティック・サイエンスと呼ぶ）は、何を対象に何を目的として何をしているのか。そして、それはどう「学問」なのか。

・目的と対象

ロボティック・サイエンスは、人間や生命の謎に挑む総合科学であり、生物学、脳科学、心理学、社会学、言語学、複雑系科学、創発システム論など、人間と生命に関わるあらゆる学に構成論的科学（後述にて詳しく述べる）の方法論による新たな理解のあり方を提供するものである。

ここで、「人間」とは極めて広い意味で用いている。生物としての「ヒト」から、社会と文化を担う「人間」まで、身体の構造・機能・運動、脳神経系の構造・機能・振る舞い、知能と情動、行動、病理、社会や経済、哲学、芸術、文化、歴史までが視野に入る。また「生命」とは、進化、創発、適応、自発性、ホメオスタシスや自己保存、自己増殖といった生命の原理から、人間以外さらには既存の生物以外の生命的存在の在り方なども含む。

こうしてみると、対象領域である「人間と生命」という表現は、極めて広い領域を表しており無意味な定義になってはいないかと危惧する一方、生物以外を対象を排除し狭くなりすぎてはいないかという両極端な心配も生じる。だが、ロボティック・サイエンスを他の学術分野と比較して明確に特徴づけるのはその方法論であり対象ではない。

・方法論

上の「目的と対象」の段落にて、「人間と生命に関わるあらゆる学に構成論的科学の方法論による新たな理解のあり方」と書いたが、この構成論的科学の方法こそが、ロボティック・サイエンスが拓く新たな学問の戸口と言える。

科学的手法といえば、伝統的な要素還元主義を根とする分析的方法があるが、その限界についても古くから指摘されてきた。生命や脳機能といった各要素が強く相互作用し、その結果現れる全体的な振る舞いが各要素の働きを変える、といったいわゆる「強連結系」あるいは「適応創発系」は、部分に分解した瞬間にシステム全体も部分も振る舞いが変化するため、分析的方法では正しく理解できないのである。また、適応的システムは外部から観測のための相互作用をかけた瞬間に変化してしまう。このような場合、まったく異なる理解の仕方が必要であり、それが構成論的方法である。

構成論的方法とは（ここでは進化的構成論について述べるに留める）、ロボットインテリジェンスの最も基本となる最小単位を見極め（分析的方法論とアブダクションによる）、それに基づくロボットを構成し環境に投入する（創発的構成論）。それがどの程度の知的振る舞いを示すかを観測し、何ができないかを明らかにする（結果的振る舞いの評価）。そして不足した能力を補う必要最小限の構成素を付加（あるいは自律的に獲得）させ（ここで再び創発的構成論）、次のレベルのロボットを構成。これを繰り返し徐々に高度な知的ロボットを構成していくものである。

伝統的科学の方法は“存在”を対象（もしくは前提）とし再現性を基盤とする一方、構成論的方法は“生成”を対象とし事象の一回性を受け入れる。この点において、構成論的方法は単なる方便ではなく科学の根幹にかかわることがわくろう。科学哲学者カール・ポパーが提唱した科学の基本条件とする反証可能性は、いうまでもなく再現可能が前提となっている。だが考えてみれば、一方向にしか流れない時間軸において全く完全に同じ条件、同じ環境というものは極論ではなく原理として不可能であり、（伝統的）科学の根幹は極めて軟弱な仮説を土台としていると言える。そして、構成論的方法はこれに迫っている。事実、ロボティック・サイエンスにおいて構成論的方法が一定の成果を出しその基盤が築かれつつあることを考えると、当該分野は学問のあり方の更新に資すると言っても過言ではない。

加えて、知見の共有という科学の根本に考えを進めるとさらにラディカルな予想が現れる。再現性ではなく一回性を受け入れる構成論的方法の世界、すなわち“生成”の理解においては変化のロジックこそが対象であり、それ自体観測によって変化するものである。統計では肝心のロジックがノイズに埋もれるので観測者と観測試行ごとに異なる一回ずつの観測と変化の過程の説明によらねばならない。これは、法則や理論を得ることで現象を説明する分析的科学手法と相対しており、いわば個人体験を共有することになるのではないか。これは従来の科学では許容されないが、広く学問をみれば、文化人類学におけるエスノグラフィという手法や、文学における一小説家の探求から普遍を見通す営みと類似する。評論家小林秀雄が鋭くも指摘したように、近代科学は言わば計測科学。測定できないものは扱わないことで発展を遂げ遂げには月まで人類が歩を進めることになったのが、それは伝統や価値や精神といったものを扱わないからこそその歪な進展なのであった（生きる人間、人生にとって測れるものなど大したことではないのだから）。しかし、ロボティック・サイエンスは科学として一回性および個別性を扱っているため（構成論的手法）、従来の科学の定義を一步進めてい

る、と言えるのだ。これがロボティック・サイエンスならではの人間と生命の謎に挑む様々な分野の横断の仕方、切り口の本質なのである。

ロボットの研究、あるいはロボットを使った研究は、どう「学問」なのか。または、どう「学問でなければならない」か、という一文から論を起こしたが、それはこの伝統的な科学のあり方の根源に対する新たな示唆なのであった。

なお、本論考はちょうど10年前に掲載した論文「ロボティック・サイエンスとは何か」（日本ロボット学会誌Vol. 28, no.4, pp370-374, 2010）をもとに、現在の状況を踏まえて改変したものである。当時と比較し、Nature Roboticsという雑誌が創刊されるなど、昨今のAI勃興と相まってロボット学は確固たる一分野を築いたと言える。が、それは他の学術分野と同列になったことであり、上記で論じたような科学ひいては学問のあり方を更新する、すなわち科学として万人に受け入れられるようになるにはまだ当該分野の研究者らによるたぬ努力と研鑽が必要であろう（2842字）

1. 東原紘道

2021年1月24日 6:34:24

@研究の進展とともに生じる

discretization状況を融合によって革新することは分野横断的な関心事だと思う。

開放的な領域思考をめざす一方で、既存路線の単なる延長や新たな知見・体験の欠欠を除外理由にするのは凄い。それで存続できるのはもっと凄い。

活力ある分野ということだろう。アートと科学の絡み合い、そしてその発展見込みはあると思う。J.

Deweyの思考に近いと感じる。新奇体験への取り組みも期待できると思う。

2. Rusudan KEVKHISHVILI

2021年1月26日 4:13:26

ロボティックサイエンスは既に存在しているものを模倣することだと思っていましたので、新たな理解のあり方の提供という観点は興味深いです。

3. Rusudan KEVKHISHVILI

2021年1月26日 3:56:29

これは具体的にどのような存在でしょうか。一つ例を挙げると良いと思います。

4. 東原紘道

2021年1月24日 6:38:21

@壮大な構想である。進展の可能性はあると思う。

強連結系と適応創発系の捉え方は、ロボティックスと異なる分野でもありうると思う。例えば人間の神経系。いろいろな分野で情報を流通できるといいと思う。

「再現性もカッコに入れてみる」のは、abductionに近いと感じる。興味あるテストだと思う。今は、手段を大胆に広げ、対象物から知見を引き出す野蛮さが求められているのではないか。例えば Heidegger（好きでないが）、その胡散臭い手口なども参考になると思う。

5. Rusudan KEVKHISHVILI

2021年1月26日 4:16:28

この方法の背景について簡単に述べると良いと思います。ロボティックサイエンス以外の分野でも使われていますか。

学問としてのロボット研究

國吉康夫（東京大学情報理工学系研究科教授・次世代知能科学研究センター長）

1

世間一般的には、コロナ対策用消毒作業ロボット、身体障害者用遠隔アバターロボット、手術ロボット、Pepper等利用した受付ロボットなどに代表されるように実用や活用に目を向けられがちなロボット研究だが、それは一側面でしかない。また、メディアには得てして人間や犬などの生物に模倣したロボットが取り上げられがちだが、単に生物を人間の手によって物質と電子で創り直すことが、その生物を「理解する（した）」ということではない。

では、ロボットの研究、あるいはロボットを使った研究（以降、それをロボティック・サイエンスと呼ぶ）は、何を対象に何を目的として何をしているのか。そして、それはどう「学問」なのか。

・目的と対象

2

ロボティック・サイエンスは、人間や生命の謎に挑む総合科学であり、生物学、脳科学、心理学、社会学、言語学、複雑系科学、創発システム論など、人間と生命に関わるあらゆる学に構成論的科学（後述にて詳しく述べる）の方法論による新たな理解のあり方を提供するものである。

3

ここで、「人間」とは極めて広い意味で用いている。生物としての「ヒト」から、社会と文化を担う「人間」まで、身体の構造・機能・運動、脳神経系の構造・機能・振る舞い、知能と情動、行動、病理、社会や経済、哲学、芸術、文化、歴史までが視野に入る。また「生命」とは、進化、創発、適応、自発性、ホメオスタシスや自己保存、自己増殖といった生命的原理から、人間以外さらには既存の生物以外の生命的存在の在り方なども含む。

4

こうしてみると、対象領域である「人間と生命」という表現は、極めて広い領域を表しており無意味な定義になってはいないかと危惧する一方、生物以外を対象を排除し狭くなりすぎてはいないかという両極端な心配も生じる。だが、ロボティック・サイエンスを他の学術分野と比較して明確に特徴づけるのはその方法論であり対象ではない。

・方法論

5

上の「目的と対象」の段落にて、「人間と生命に関わるあらゆる学に構成論的科学の方法論による新たな理解のあり方」と書いたが、この構成論的科学の方法こそが、ロボティック・サイエンスが拓く新たな学問の戸口と言える。

6. SHINTARO FURUYA

2021年1月27日 15:30:08

指摘の具体例を挙げると、学問の広がり・奥行を読者に伝えることができますと思います。

複雑適応系の科学が盛り上がり、「伝統的科学」の限界がはっきりと意識されたのは、マレー・ゲルマンやスチュアート・カウフマンらが活躍した時期ですが、それ以前にはイリヤ・プリゴジンの散逸構造が別ルート（非平衡統計物理学）で、プリゴジンにつながる研究としては、統計力学におけるエルゴード仮説についての取り扱いにまで遡ることができると思っています。

そこまで遡ると大著になってしまうので、マレー・ゲルマンらの伝統的科学批判を挙げておくのと良いのではと思います。

7. Rusudan KEVKHISHVILI

2021年1月26日 4:19:53

新たな理解のあり方を提供することにどのように繋がっていますか。この繋がりについてコメントすると良いと思います。

8. SHINTARO FURUYA

2021年1月27日 15:16:17

伝統的科学＝要素還元主義で、どのような現象も一つの法則で説明できることに主眼が置かれていたとすると、新しい科学（ここでは構成論的方法論に基づく科学）＝複雑適応系で、一つの法則（実際はメタ法則）がどのように複雑な（一回性を持ち得る）現象を生成するかに主眼が置かれている、という整頓の方が、ポパーの反証可能性よりもわかりやすいのではと思いますが、いかがでしょうか。

9. Rusudan KEVKHISHVILI

2021年1月26日 4:01:34

事象の一回性はここでどのような意味をもっていますか。このことについてもう少し説明するとよりわかりやすいと思います。

10. SHINTARO FURUYA

2021年1月27日 15:18:20

「構成論的方法に基づくロボティクスは、複雑適応系科学の工学的な展開と言って良く、科学の新しいパラダイムを拓くものだと考える。」くらい言いきっても良いのではと思います。

11. Rusudan KEVKHISHVILI

2021年1月26日 4:22:41

構成論的方法が他の分野で使われるようになった場合、どのような効果が期待されますか。

12. SHINTARO FURUYA

2021年1月27日 15:23:16

ここは、わかる人にはわかると思

科学的手法といえば、伝統的な要素還元主義を根とする分析的方法があるが、その限界についても古くから指摘されてきた。生命や脳機能といった各要素が強く相互作用し、その結果現れる全体的な振る舞いが各要素の働きを変える、といったいわゆる「強連結系」あるいは「適応創発系」は、部分に分解した瞬間にシステム全体も部分も振る舞いが変化するため、分析的方法では正しく理解できないのである。また、適応的システムは外部から観測のための相互作用をかけた瞬間に変化してしまう。このような場合、まったく異なる理解の仕方が必要であり、それが構成論的方法である。

構成論的方法とは（ここでは進化的構成論について述べるに留める）、ロボットインテリジェンスの最も基本となる最小単位を見極め（分析的方法論とアブダクションによる）、それに基づくロボットを構成し環境に投入する（創発的構成論）。それがどの程度の知的振る舞いを示すかを観測し、何ができないかを明らかにする（結果的振る舞いの評価）。そして不足した能力を補う必要最小限の構成素を付加（あるいは自律的に獲得）させ（ここで再び創発的構成論）、次のレベルのロボットを構成。これを繰り返し徐々に高度な知的ロボットを構成していくものである。

伝統的科学の方法は“存在”を対象（もしくは前提）とし再現性を基盤とする一方、構成論的方法は“生成”を対象とし事象の一回性を受け入れる。この点において、構成論的方法は単なる方便ではなく科学の根幹にかかわることがわかっていく。科学哲学者カール・ポパーが提唱した科学の基本条件とする反証可能性は、いうまでもなく再現可能が前提となっている。だが考えてみれば、一方向にしか流れない時間軸において全く完全に同じ条件、同じ環境というものは極論ではなく原理として不可能であり、（伝統的）科学の根幹は極めて軟弱な仮説を土台としていると言える。そして、構成論的方法はこれに迫っている。事実、ロボティック・サイエンスにおいて構成論的方法が一定の成果を出しその基盤が築かれつつあることを考えると、当該分野は学問のあり方の更新に資すると言っても過言ではない。

加えて、知見の共有という科学の根本に考えを進めるとさらにラディカルな予想が現れる。再現性ではなく一回性を受け入れる構成論的方法の世界、すなわち“生成”の理解においては変化のロジックこそが対象であり、それ自体観測によって変化するものである。統計では肝心のロジックがノイズに埋もれるので観測者と観測試行ごとに異なる一回ずつの観測と変化の過程の説明によらねばならない。これは、法則や理論を得ることで現象を説明する分析的な科学手法と相対しており、いわば個人体験を共有することになるのではないかと。これは従来の科学では許容されないが、広く学問をみれば、文化人類学におけるエスノグラフィという手法や、文学における一小説家の探求から普遍を見出す営みと類似する。評論家小林秀雄が鋭くも指摘したように、近代科学は言わば計測科学。測定できないものは扱わないことで発展を遂げ遂には月まで人類が歩を進めることになったのが、それは伝統や価値や精神といったものを扱わないからこそその歪な進展なのであった（生きる人間、人生にとって測れるものなど大したことではないのだから）。しかし、ロボティック・サイエンスは科学として一回性および個性を扱っているため（構成論的手法）、従来の科学の定義を一步進めてい

と思いますが、より多くの読者に学問の広がりを伝えるためにも、ラプラスの魔およびシラード・エンジンの話を引き合いに出すなどして、丁寧に解説をすると良いのではと思います。

13. SHINTARO FURUYA

2021年1月27日 15:46:08

誠に残念ですが、その通りだと思います。が、一応指摘しておきますと、1800年までは、近代科学はまだ精神を取り扱うことができませんでした（もちろん、ガリレイによる自然の理想化およびベーコンによる科学の道具化によって、精神性の脱落はすでにずいぶん進んでいましたが）。具体的には、エコール・ポリテクニークに始まる「理工系」が成立するまでは、です（ちなみにエコール・ポリテクニークによる「理工系」の成立は、直上に書いたラプラスの魔にも関わる話ですが、実際には「啓蒙主義思想」云々は後付けの話です）。

さて、過去がどうであったにせよ、新しい構成論的科学が、とくに生成をメタレベルで見たときに、文化や精神性も射程範囲に収めることができる可能性は十分あると思います。たとえば、私はプリゴジンの考古学の話は、ここで書かれている内容に相当するのではと考えています。

14. 東原紘道

2021年1月24日 6:44:43

@「強連結系」あるいは「適応創発系」、再現可能制約の取り外しなど厄介そうだが、いずれも他分野でも役立つものであり、今後、注目したい。

15. SHINTARO FURUYA

2021年1月27日 15:58:39

そろそろ期は熟して来たと思いますが、今後の「研究者」たちが、なかなか理解されない時期にしっかりと考えてきた「学者」たちの構えを引き継げるよう、ぜひ発信をお願いしたいです。

る、と言えるのだ。これがロボティック・サイエンスならではの人間と生命の謎に挑む様々な分野の横断の仕方、切り口の本質なのである。

ロボットの研究、あるいはロボットを使った研究は、どう「学問」なのか。または、どう「学問でなければならない」か、という一文から論を起こしたが、それはこの伝統的な科学のあり方の根源に対する新たな示唆なのであった。

なお、本論考はちょうど10年前に掲載した論文「ロボティック・サイエンスとは何か」（日本ロボット学会誌Vol. 28, no.4, pp370-374, 2010）をもとに、現在の状況を踏まえて改変したものである。当時と比較し、Nature Roboticsという雑誌が創刊されるなど、昨今のAI勃興と相まってロボット学は確固たる一分野を築いたと言える。が、それは他の学術分野と同列になったことであり、上記で論じたような科学ひいては学問のあり方を更新する、**すなわち科学として万人に受け入れられるようになるにはまだ当該分野の研究者らによるため努力と研鑽が必要であろう**（2842字）

・ コンセプトペーパー全体に対するコメント

野原佳代子（東京工業大学 環境・社会理工学院 教授）

・ 議論としてとても魅力的。要素技術を集めたこれまでの科学という科学があって、それと違って構成論的な科学を提唱していて、現在から未来に向けた生成、それと構成論的な科学を結びつけようとしている。

・ とりあえず、環境にロボットを入れて何かやってみてそこから考える、となるとありとあらゆるものが介入する余地がうまれて、文字通り融合になるだろう。そこがおもしろいそこを膨らませて強調したいのかな。

・ あるいは、伝統的科学と新しい科学を対決させて論じていくのかな。

・ いずれにせよ、この論考は我々の科学に非常に深くかかわるし、非常に意味がある。

・ 今後のロボットとの共生のなかで、自分たちのロボットあるいはロボット研究がどう位置づけられるのか・・・それを語る人は少なく、その稀有な一人である。

文字起こし・『といとうとい』編集委員

松浦健二(京都大学大学院 農学研究科 教授)

・ ここでいう一回性ってなんなのか。人間の個性性につなげて論じているが、ロボットの個性性ってなんなのかな。

- ・ロボットでアルゴリズム組めば、同じことがなんどもできる。
- ・ロボティックの一回性について説明がほしい。一般的にロボットってのは量産できるイメージが在るから、一回性ときくと違和感がある。
- ・環境の異質性の議論かな？ それはたしかにそうだけど、
- ・もうちょっと学問として学問研究だったら、ロボットであること、人間であること
- ・ロボットをつかった研究はどう学問でなければならないか、って別に学問じゃなくてもいい。
- ・ロボットに何を問うのか、これを突き詰めれば学問になるけど、ロボットの研究をいかに学問んたらしめるか。ロボットを研究していると、結局、ここに行き当たるんだってのをかけばいい。

文字起こし・『といとうとい』編集委員

学問としてのロボティック・サイエンス

國吉康夫（東京大学情報理工学系研究科教授・次世代知能科学研究センター長）

世間一般的には、コロナ対策用消毒作業ロボット、身体障害者用遠隔アバターロボット、手術ロボット、Pepper等利用した受付ロボットなどに代表されるように実用や活用に目を向けられがちなロボット研究だが、それは一側面でしかない。また、メディアには得てして人間や犬などの生物に模倣したロボットが取り上げられがちだが、単に生物を人間の手によって物質と電子で創り直すことが、その生物を「理解する（した）」ということにはならない。

では、ロボットの研究、あるいはロボットを使った研究（以降、それをロボティック・サイエンスと呼ぶ）は、何を対象に何を目的として何をしているのか。そして、大学でそれを実施するからには、応用や開発はもとより、そもそもロボット研究はどう「学問」なのか。

・目的と対象

ロボティック・サイエンスは、人間や生命の謎に挑む総合科学であり、生物学、脳科学、心理学、社会学、言語学、複雑系科学、創発システム論など、人間と生命に関わるあらゆる学に構成論的科学（後述にて詳しく述べる）の方法論による新たな理解のあり方を提供するものである。

ここで、「人間」とは極めて広い意味で用いている。生物としての「ヒト」から、社会と文化を担う「人間」まで、身体の構造・機能・運動、脳神経系の構造・機能・振る舞い、知能と情動、行動、病理、社会や経済、哲学、芸術、文化、歴史までが視野に入る。また「生命」とは、進化、創発、適応、自発性、ホメオスタシスや自己保存、自己増殖といった生命的原理から、人間以外さらには既存の生物以外の生命的存在（例えば、生命的な振る舞いをするアルゴリズム、人工生命）の在り方なども含む。

重要なのは、機械固有でなく生物の振る舞いにも適用可能な問題設定、および理解の在り方が、ロボティック・サイエンスに含む必要条件と思われることである。おそらく、生物を対象とすることは必須ではないかもしれない。しかし、恣意的かつ固定的に閉鎖系として定義してしまえる機械のみに通用する理解や手法は、当専門以外への有用な知見の提供を果たし得ず、また、有限固定の知見しか産出しない。複雑性多様性を内包する生物を対象に含めることで、そのような枠内に止まらないことを担保できるのではないか。そもそもロボットとは実世界の中で（ある程度自律的に）活動する機械なのだから、本質的には生物と同根で

ある。そして、前述のとおり、新たな知見を産出し続けるためには両者にまたがる理解を追求することが有効だろう。その意味でも「人間と生命」は適切な対象領域と言える。

しかし、こうしてみると、対象領域である「人間と生命」という表現は、極めて広い領域を表しており無意味な定義になってはいないかと危惧される一方、生物以外の対象（例えば、建築物や貨幣）を排除し狭くなりすぎてはいないかという両極端な心配も生じる。だが、ロボティック・サイエンスを他の学術分野と比較して明確に特徴づけるのは、その方法論であり対象ではない。

・方法論

上の「目的と対象」の段落にて、「人間と生命に関わるあらゆる学に構成論的科学の方法論による新たな理解のあり方」と書いたが、この構成論的科学の方法こそが、ロボティック・サイエンスが拓く新たな学問の戸口と言える。

科学的手法といえば、伝統的な要素還元主義を根とする分析的方法があるが、その限界についても多く指摘されてきた。例えば、イリヤ・プリゴジンは、熱力学の観点から古典科学で例外として扱われる不可逆性、乱雑性にこそこの世界を理解する本質があるとし、マレイ・ゲルマンは、複雑系科学の観点から従来の知の行き止まりの打開をはかろうとした。他にも、生命や脳機能といった各要素が強く相互作用し、その結果現れる全体的な振る舞いが各要素の働きを変える、といったいわゆる「強連結系」あるいは「適応創発系」においては、部分に分解した瞬間にシステム全体も部分も振る舞いに変化するため、分析的方法では正しく理解できないのである。また、適応的システムは外部から観測のための相互作用をかけた瞬間に変化してしまう。このような場合、まったく異なる理解の仕方が必要であり、それが構成論的方法である¹²。分析的方法とこの構成論的方法は、異なる理解の在り方を提示するものであり、一方が他方より劣るものではない。さらに言えば、以下で簡単に解説するように、構成論的方法は分析的方法を内包し、さらにシステム全体としての視点を加えるものとも言える。

筆者らによる構成論的方法の定義を以下に示す³。まず、進化的構成論の方法については、ロボットインテリジェンスの最も基本となる最小単位を見極め（分析的方法論とアブダクションによる）、それに基づくロボットを構成し環境に投入する（創発的構成論）。そ

¹ 津田:“脳科学から見たロボティック・サイエンスの意義と問題点”, 日本ロボット学会誌, vol.28, no.4, pp.380-382, 2010.

² 橋本, 稲邑, 柴田, 瀬名:“社会的知能発生学における構成論的シミュレーションの役割と SIGVerse の開発”, 日本ロボット学会誌, vol.28, no.4, pp.407-412, 2010.

³ 浅田稔, 國吉康夫:ロボットインテリジェンス(岩波講座 ロボット学, 第4巻).岩波書店, 2006.

れがどの程度の知的振る舞いを示すかを観測し、何ができないかを明らかにする（結果的振る舞いの評価）。そして不足した能力を補う必要最小限の構成素を付加（あるいは自律的に獲得）させ（ここで再び創発的構成論）、次のレベルのロボットを構成。これを繰り返し徐々に高度な知的ロボットを構成していくものである。次に、発達論的構成論の方法については、進化的構成論における創発過程に経時的発達を含め、また、比較評価対象を発達過程全体とするものである。

伝統的科学の方法は“存在”を対象（もしくは前提）とし再現性を基盤とする一方、構成論的方法は“生成”を対象とし事象の一回性を受け入れる。この点において、構成論的方法は単なる方便ではなく科学の根幹にかかわることがわかる。数理物理学者小嶋泉⁴は、自然の成り立ちにおいて“生成”こそが先であり、その結果として“存在”（例えばある時刻の系の状態）があるにも関わらず、通常人間は“存在”（例えば位置）をまず記述し、それを使って“生成”（位置の変化）を定義することしかできない。つまり、“生成”をまず直接記述することに認識論的困難があり、従来の科学がこれに囚われていること、そして、現代物理学の最先端においてそこから脱却の要請と試みがあることを指摘している。また、科学哲学者カール・ポパーが提唱した科学の基本条件とする反証可能性は、いうまでもなく再現可能が前提となっている。だが考えてみれば、一方向にしか流れない時間軸において全く完全に同じ条件、同じ環境というものは極論ではなく原理として不可能であり、（伝統的）科学の根幹は極めて軟弱な仮説を土台としているとも言える。

そして、構成論的方法は、これら“生成”の記述困難性と“再現”の困難性に迫っている。つまり、伝統的科学（＝要素還元主義）は再現性を前提とし、どのような現象も一つの法則で説明できることに主眼が置かれているとすると、構成論的方法論に基づく科学は、むしろ再現性（という極論すればありえない現象）を回避し、一つの法則（この場合はロボット）がどのように複雑な（一回性の）現象を生成するか主眼が置かれているのだ。事実、ロボティクス・サイエンスにおいて構成論的方法が一定の成果を出しその基盤が築かれつつあることを考えると、構成論的方法に基づくロボティクスは、複雑適応系科学の工学的な展開と言って良く、科学の新しいパラダイムを拓くものだと言っても過言ではない。

加えて、知見の共有という科学の根本に考えを進めるとさらにラディカルな予想が現れる。再現性ではなく一回性を受け入れる構成論的方法の世界、すなわち“生成”の理解においては変化のロジックこそが対象であり、観測によってそれ自体が変化するものである。（何回試し、そのうち何回が成功したといった）統計では肝心のロジックがノイズに埋もれるので観測者と観測試行ごとに異なる一回ずつの観測と変化の過程の説明によらねばならない。これは、法則や理論を得ることで現象を説明する分析的科学手法と相対しており、いわば個人体験を共有することになるのではないか。これは従来の科学では許容されないが、広く学

⁴“自然の歴史と時間”，別冊数理科学「時間論の諸パラダイム」， pp.166-175, 2004.

問をみれば、文化人類学におけるエスノグラフィという手法や、文学における一小説家の探求から普遍を見通す営みと類似するものである。

そもそも事物事象の言語化という困難性は絶えず付きまとう命題であり、もはや知見の共有のためには相手にも体験してもらうしかない、ということになるのかもしれない。となると、1970年代以降一般化した、絵画・彫刻・映像・写真などと並ぶ現代美術における表現手法といわれる「インスタレーション」が、科学（ひいては学問）の方法論になる可能性が論理的帰結として示唆される。もはや論文や学会という形式を置き去り、参加型のインスタレーションとして、参加者もまた知見の生成にコミットしながら共有されることになるのだろう。

評論家小林秀雄が鋭くも指摘したように、近代科学は言わば計測科学。測定できないものは扱わないことで発展を遂げ、遂には月まで人類が歩を進めることになったのだが、それは伝統や価値や精神といったものを扱わないからこそそのいびつな進展なのであった（思えば、これら科学が扱わなかった事物は、生きる人間、人生というものにおいて基盤的かつ本質的に重要なものであった）。しかし、ロボティック・サイエンスは科学として一回性および個別性を扱っているため（構成論的手法）、従来の科学の定義を一步進めている、と言えるのだ。ナラティブを内包する科学。これがロボティック・サイエンスならではの人間と生命の謎に挑む様々な分野の横断の仕方、切り口の本質なのである。

ロボットの研究、あるいはロボットを使った研究は、どう「学問」なのか、という一文から論を起したが、それはこの伝統的な科学のあり方の根源に対する新たな示唆なのであった。なお、本論考はちょうど10年前に掲載した論文「ロボティック・サイエンスとは何か」⁵をもとに、現在の状況を踏まえて改変したものである。当時と比較し、Nature Roboticsという雑誌が創刊されるなど、昨今のAI勃興と相まってロボット学は確固たる一分野を築いたと言える。が、それは他の学術分野と同列になったことであり、上記で論じたような科学ひいては学問のあり方を更新する、すなわち新しい科学として万人に受け入れられるようになるには、まだ当該分野の研究者らによるたゆむ努力と研鑽が必要であろう。

（構成：編集部）

⁵ 國吉康夫「ロボティック・サイエンスとは何か」日本ロボット学会誌Vol. 28, no.4, pp. 370-374, 2010

問⑧

ロボティック・サイエンス論： 科学における再現性と一回性

國吉康夫

問⑧

「ロボット」的存在が、日常のなかに当たり前になりつつある。
フィクションでしか見たことがなかった機械が目の前にあるとき、
ヒトはなぜ、そこに知性そして生命を見いだすことができるのか？
そして、それをつくる行為はいかにして「科学」となりうるのか？
知能を探求した結果、「身体性」にたどり着いたロボット研究者が
「工学」をゼロから学問として解体・再構築する。

國吉康夫（東京大学 情報理工学系研究科 教授・次世代知能科学研究センター長）

1962年生まれ。東京大学工学部卒業、同大学院工学系研究科博士課程修了。工学博士。電子技術総合研究所研究員を経て、東京大学助教授、同大教授。身体性に基づく認知の創発と発達、動的実世界知能、人間型AI等の研究に従事。国際人工知能学会（IJCAI）最優秀論文賞（1993）、ゴールドメダル「東京テクノ・フォーラム21賞」等受賞。主な編著書に『ロボットインテリジェンス』（共著、岩波書店、2006）など。

世間一般的には、コロナ対策用消毒作業ロボット、身体障害者用遠隔アバターロボット、手術ロボット、Pepperを利用した受付ロボットなどに代表されるように実用や活用に目を向けられがちなロボット研究だが、それは一側面でしかない。また、メディアには得てして人間や犬などの生物に模倣したロボットが取り上げられがちだが、単に生物を人間の手によって物質と電子で創り直すことが、その生物を「理解する（した）」ということにはならない。

では、ロボットの研究、あるいはロボットを使った研究（以降、それをロボティック・サイエンスと呼ぶ）は、何を対象に何を目的として何をしているのか。そして、大学でそれを実施するからには、応用や開発はもとより、そもそもロボット研究はどう「学問」なのか。

ロボティック・サイエンスとは？

ロボティック・サイエンスは、人間や生命の謎に挑む総合科学であり、生物学、脳科学、心理学、社会学、言語学、複雑系科学、創発システム論など、人間と生命に関わるあらゆる学に構成論的科学（後述にて詳しく述べる）の方法論による新たな理解のあり方を提供するものである。

ここで、「人間」とは極めて広い意味で用い

ている。生物としての「ヒト」から、社会と文化を担う「人間」まで、身体の構造・機能・運動、脳神経系の構造・機能・振る舞い、知能と情動、行動、病理、社会や経済、哲学、芸術、文化、歴史までが視野に入る。また「生命」とは、進化、創発、適応、自発性、ホメオスタシスや自己保存、自己増殖といった生命的原理から、人間以外さらには既存の生物以外の生命的存在（例えば、生命的な振る舞いをするアルゴリズム、人工生命）の在り方なども含む。

重要なのは、機械固有でなく生物の振る舞いにも適用可能な問題設定、および理解の在り方が、ロボティック・サイエンスに含む必要条件と思われることである。おそらく、生物を対象とすることは必須ではないかもしれない。しかし、恣意的かつ固定的に閉鎖系として定義してしまえる機械のみに通用する理解や手法は、当専門以外への有用な知見の提供を果たし得ず、また、有限固定の知見しか産出しない。複雑性多様性を内包する生物を対象に含めることで、そのような枠内に止まらないことを担保できるのではないか。そもそもロボットとは実世界の中で（ある程度自律的に）活動する機械なのだから、本質的には生物と同根である。そして、前述のとおり、新たな知見を産出し続けるためには両者にまたがる理解を追求することが有効だろう。その意味でも「人間と生命」は適切な対象領域

Q.8

と言える。

しかし、こうしてみると、対象領域である「人間と生命」という表現は、極めて広い領域を表しており無意味な定義になってはいないかと危惧される一方、生物以外の対象（例えば、建築物や貨幣）を排除し狭くなりすぎてはいないかという両極端な心配も生じる。だが、ロボティック・サイエンスを他の学術分野と比較して明確に特徴づけるのは、その方法論であり対象ではない。

構成論的方法という最大の特徴

上の「ロボティック・サイエンスとは？」の段落にて、「人間と生命に関わるあらゆる学に構成論的科学の方法論による新たな理解のあり方」と書いたが、この構成論的科学の方法こそが、ロボティック・サイエンスが拓く新たな学問の戸口と言える。

科学的手法といえば、伝統的な要素還元主義を根とする分析的方法があるが、その限界についても多く指摘されてきた。例えば、イリヤ・プリゴジン¹は、熱力学の観点から古典科学で例外として扱われる不可逆性、乱雑性にこそこの世界を理解する本質があるとし、マレイ・ゲルマン²は、複雑系科学の観点から従来の知の行きつまりの打開をはかろうとした。他にも、生命や脳機能といった各要素が強く

相互作用し、その結果現れる全体的な振る舞いが各要素の働きを変える、といったいわゆる「強連結系」あるいは「適応創発系」においては、部分に分解した瞬間にシステム全体も部分も振る舞いが変化するため、分析的方法では正しく理解できないのである。

また、適応的システムは外部から観測のための相互作用をかけた瞬間に変化してしまう。このような場合、まったく異なる理解の仕方が必要であり、それが構成論的方法である。分析的方法とこの構成論的方法^{3,4,5}は、異なる理解の在り方を提示するものであり、一方が他方より劣るものではない。さらに言えば、以下で簡単に解説するように、構成論的方法は分析的方法を内包し、さらにシステム全体としての視点を加えるものとも言える。

筆者らによる構成論的方法の定義を以下に示す。まず、進化的構成論の方法については、ロボットインテリジェンスの最も基本となる最小単位を見極め（分析的方法論とアブダクションによる）、それに基づくロボットを構成し環境に投入する（創発的構成論）。それがどの程度の知的振る舞いを示すかを観測し、何ができないかを明らかにする（結果的振る舞いの評価）。そして不足した能力を補う必要最小限の構成素を付加（あるいは自律的に獲得）させ（ここで再び創発的構成論）、次のレベルのロボットを構成。これを繰り返し

問⑧

1. Ilya Prigogine, Isabelle Stengers, "Order Out of Chaos: Man's New Dialogue with Nature", 1993.

2. MURRAY GELL-MANN, "QUARK AND THE JAGUAR", 1995.

3. 津田:「脳科学から見たロボティック・サイエンスの意義と問題点」,『日本ロボット学会誌』,vol.28, no.4, 2010, p.380-382.

4. 橋本, 稲田, 柴田, 瀬名:「社会的知能発生学における構成論的シミュレーションの役割と SIGVerseの開発」,『日本ロボット学会誌』vol.28, no.4, 2010, p.407-412.

5. 國吉:「知的行動の発生原理」,『人工知能学会誌』vol.23, no.2, 2008, p.283-293.

徐々に高度な知的ロボットを構成していくものである。次に、発達論的構成論の方法については、進化的構成論における創発過程に経時的発達を含め、また、比較評価対象を発達過程全体とするものである。

再現性に対する一回性とは

伝統的科学の方法は“存在”を対象（もしくは前提）とし再現性を基盤とする一方、構成論的方法は“生成”を対象とし事象の一回性を受け入れる。この点において、構成論的方法は単なる方便ではなく科学の根幹にかかわることがわくろう。数理物理学者・小嶋泉は、自然の成り立ちにおいて“生成”こそが先であり、その結果として“存在”（例えばある時刻の系の状態）があるにもかかわらず、通常人間は“存在”（例えば位置）をまず記述し、それを使って“生成”（位置の変化）を定義することしかできない。つまり、“生成”をまず直接記述することに認識論的困難があり、従来の科学がこれに囚われていること、そして、現代物理学の最先端においてそこから脱却の要請と試みがあることを指摘している⁶。

また、科学哲学者のカール・ポパーが提唱した科学の基本条件とする反証可能性は、いうまでもなく再現可能が前提となっている。だが考えてみれば、一方向にしか流れない時間軸においてまったく完全に同じ条件、同じ環

境というものは極論ではなく原理として不可能であり、（伝統的）科学の根幹は極めて軟弱な仮説を土台としているとも言える。

そして、構成論的方法は、これら“生成”の記述困難性と“再現”の困難性に迫っている。つまり、伝統的科学（＝要素還元主義）は再現性を前提とし、どのような現象も一つの法則で説明できることに主眼が置かれているとすると、構成論的方法論に基づく科学は、むしろ再現性（という極論すればありえない現象）を回避し、一つの法則（この場合はロボット）がどのように複雑な（一回性の）現象を生成するか主眼が置かれているのだ。事実、ロボティック・サイエンスにおいて構成論的方法が一定の成果を出しその基盤が築かれつつあることを考えると、構成論的方法に基づくロボティクスは、複雑適応系科学の工学的な展開と言って良く、科学の新しいパラダイムを拓くものだと言っても過言ではない。

研究の新たな共有の仕方

加えて、知見の共有という科学の根本に考えを進めるとさらにラディカルな予想が現れる。再現性ではなく一回性を受け入れる構成論的方法の世界、すなわち“生成”の理解においては変化のロジックこそが対象であり、観測によってそれ自体が変化するものである。（何回試し、そのうち何回が成功したといった）

Q.8

6. 小嶋：「自然の歴史と時間」，『別冊数理科学「時間論の諸パラダイム」』，2004，p.166-175.

統計では肝心のロジックがノイズに埋もれるので観測者と観測試行ごとに異なる一回ずつの観測と変化の過程の説明によらねばならない。これは、法則や理論を得ることで現象を説明する分析的科学手法と相対しており、いわば個人体験を共有することになるのではないか。これは従来の科学では許容されないが、広く学問をみれば、文化人類学におけるエスノグラフィという手法や、文学における一小説家の探求から普遍を見通す営みと類似するものである。

そもそも事物事象の言語化という困難性は絶えず付きまとう命題であり、もはや知見の共有のためには相手にも体験してもらうしかない、ということになるのかもしれない。となると、1970年代以降一般化した、絵画・彫刻・映像・写真などと並ぶ現代美術における表現手法といわれる「インスタレーション」が、科学（ひいては学問）の方法論になる可能性が論理的帰結として示唆される。もはや論文や学会という形式を置き去り、参加型のインスタレーションとして、参加者もまた知見の生成にコミットしながら共有されることになるのだろう。

ロボティック・サイエンスが拓く学問の扉

評論家・小林秀雄が鋭くも指摘したように、近代科学は言わば計測科学。測定できないも

のは扱わないことで発展を遂げ、遂には月まで人類が歩を進めることになったのだが、それは伝統や価値や精神といったものを扱わないからこそそのいびつな進展なのであった（例えば、これら科学が扱わなかった事物は、生きる人間、人生というものにおいて基盤的かつ本質的に重要なものであった）。しかし、ロボティック・サイエンスは科学として一回性および個別性を扱っているため（構成論的手法）、従来の科学の定義を一步進めている、と言えるのだ。ナラティブを内包する科学。これがロボティック・サイエンスならではの人間と生命の謎に挑む様々な分野の横断の仕方、切り口の本質なのである。

ロボットの研究、あるいはロボットを使った研究は、どう「学問」なのか、という一文から論を起したが、それはこの伝統的な科学のあり方の根源に対する新たな示唆なのであった。なお、本論考はちょうど10年前に掲載した論文「ロボティック・サイエンスとは何か」をもとに、現在の状況を踏まえて宮野公樹先生の多大なるご助力のもと改変したものである⁷。

当時と比較し、“Nature Machine Intelligence”や“Science Robotics”という雑誌が創刊されるなど、昨今のAI勃興と相まってロボット学は確固たる一分野を築いたと言える。が、それは他の学術分野と同列になったことであ

7. 國吉康夫, 「ロボティック・サイエンスとは何か」, 『日本ロボット学会誌』 vol. 28, no.4, 2010, p. 370-374.

り、上記で論じたような科学ひいては学問のあり方を更新する、すなわち新しい科学として万人に受け入れられるようになるには、まだ当該分野の研究者らによるたゆまぬ努力と研鑽が必要であろう。

構成・宮野公樹（『といとうとい』編集委員）

Q.8



ヒトの筋骨格系が跳躍・走行といったダイナミック運動に果たす役割の解明と、その動作の工学的実現を目指して製作された脚ロボット。
(提供：新山龍馬・西川鋭・國吉康夫 [東京大学 知能システム情報学研究室])

粕谷昌宏

株式会社メルティン MMI 代表取締役

定性的には、現代のロボットにほばない自己増殖、進化、治癒能力などの能力は、生命に必須であるという感覚もある。たとえば自己（ロボット）の存在価値を認める他者（人間）によって手入れされることも、治癒能力の1つとみなすべきなのだろうか？ その「治療する主体」を自己に内包しているかが分かれ道と考えることもできるかもしれない。たとえば、生物における血小板は、体と機械的に結合されず体内を自由移動しているので、ある種「他者」と呼ぶこともできるが、体によって血小板は生成され、体と一緒に運ばれているため、内包しているともいえるかもしれない。

粕谷昌宏

1988年生まれ。早稲田大学理工学部、同大学院を経て、電気通信大学大学院 情報理工学専攻 知能機械工学専攻にて2016年にロボット工学と人工知能工学で博士(工学)を取得。在学中からパワードスーツや義手、BMI、ロボットなどの開発を行いながら、13年にサイボーグ技術の実用化を目指すべく MELTIN を設立。同社で、アバターロボットの実用化と医療機器の実用化に取り組む。2018年には、Forbes 誌による「30 Under 30」にも選出。

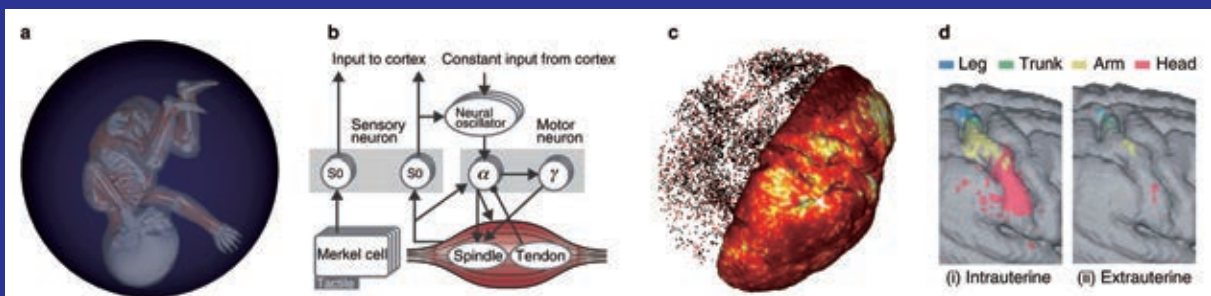
生きること、自らを治癒すること



脊椎動物のダイナミックな跳躍・着地を実現する身体機能の解明を目指した2脚の跳躍ロボット。人工筋骨格系を組み込み垂直跳びや椅子への跳び乗りを実現した。(提供：新山龍馬・國吉康夫 [東京大学 知能システム情報学研究室]、長久保晶彦 [産業技術総合研究所])

國吉康夫

2020年、シンガポールの南洋理工大学ロヒット・アブラハム・ジョンらは、圧力から生じる「痛み」を処理して反応するAIを埋め込んだセンサーノードを用い、自己修復性のあるイオンゲル材料と組み合わせて修復機能を有するロボットを開発している。ただ自らを意識的に治療するロボットは「治療する」のではなく「自動的に修理される」という方が正しい。予測できない事態に直面したとき（に備えて）レジリエンスを担保できるかが、生命の条件といえるのではないかと思う。

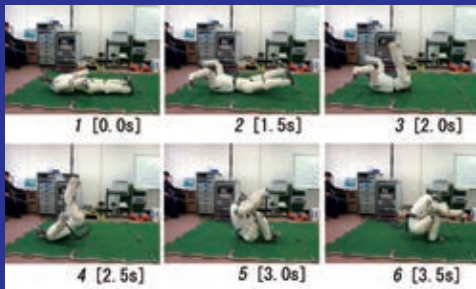


ヒト胎児の自発運動を通じた環境経験とそれに基づく脳の発達を、筋骨格系身体と中枢神経系および子宮壁と羊水をモデル化して計算機内に統合再現した「胎児シミュレーター」。
(出典：Yamada Y. et al, An Embodied Brain Model of the Human Foetus, Sci. Rep. 6, 27893., 2016, <https://doi.org/10.1038/srep27893>, CC BY 4.0.)

「構成論的科学」の射程

國吉康夫

文化や精神、それらの土台にある（である）歴史は、言うまでもなく一回性。ゆえに、どのような対象であれ、構成論的科学はすべてに通じすべてを内包するものである。具体はどうであれ、もはや思想に近い。



ヒューマノイドロボットによる「跳ね起き」。動作の成否がある特定の瞬間（両足着地時）の姿勢に大きく左右されることを発見し「ツボ」と名付けた。（提供：國吉康夫・大村吉幸・寺田耕史 [東京大学 知能システム情報学研究室]、長久保晶彦 [産業技術総合研究所]）

古谷紳太郎

東京工業大学 リベラルアーツ研究教育院 特別研究員

エコール・ポリテクニックに始まる「理工系」が成立する1800年代までは、近代科学はまだ精神を取り扱うことができました。過去がどうであったにせよ、新しい構成論的科学が、特に生成をメタレベルで見たときに、文化や精神性も射程範囲に収めることができる可能性は十分あると思う。たとえば、物理学者だったイリヤ・ブリゴジンが考古学へ向かったのも、同じ理由かもしれない。



コンピュータによる自動設計に適し、柔らかく安全で安価なロボットシステムの試作や大量生産を可能にする「パウチモータ」。（提供：新山龍馬 [東京大学 知能システム情報学研究室]）

仮説的推論の有効性

國吉康夫

道具主義的に「（あれこれ試した結果）ただ単にうまくいっているだけ」では、科学とは呼べない。本論でも述べたように、伝統的科学の方法は“存在”を対象（もしくは前提）とし再現性を基盤とする一方、構成論的方法是“生成”を対象とし事象の一回性を受け入れる。これは、文化人類学や歴史・文学といったいわゆる人文系の学術とも通ずる思想であり、既存の科学から脱する勇気をもって踏み込みたい世界である。

東原紘道

東京大学 地震研究所 名誉教授

「再現性もカッコに入れてみる」のは、仮説的推論といい。強連結系と適応創発系の捉え方は、例えば人間の神経系などロボティクスではない分野でも適用可能だと思う。手段を大胆に広げ、対象物から知見を引き出す野蛮さが求められているのではないか。例えばハイデガーの論法なども参考になるのではないか。

本テキストに関するレビューおよび対話の過程は下記のレボジトリに公開されています。



「ロボット」は揺れる

「ロボット」という単語を目にしなくなって久しい（気がする）。もはや、カクカクした動きで、ガチガチした金属音を発するロボット像は消えたに等しい。そのザラッとした感覚を伴う「ロボット」という単語に置き換わったのは、「新しい生命体」とも言いたくなるような、人間を凌ぐ頭脳や滑らかに動く手足を持った何かだ。高性能計算機や高速度通信の進展に伴い、そのような生命体の動画やCGがWEB上に溢れ、我々はいまさら驚きもしない。

そういう世の中において國吉が「問う」のは、ロボットそれ自体ではなくロボットの「研究・開発」についてのパラダイムシフト。20世紀に論理実証主義の根源的な不確実性を説いたクワインはきっと、この物語を紡ぐような研究手法に刮目することだろう、この手があったか！と。しかも、その「方法」から導かれる研究知見の共有の仕方また、従来科学のそれをサラリと飛び越え、文化人類学や文学のそれに近くなろうという提案はいっそ清々しい。

問⑧

考えてみれば、科学ができてまだ数百年程度。その科学の「形式」は別に絶対的でもなければ、守るべきものでもないのだった。そして、今、あらゆる組織、業界、コミュニティにおいて、物的でないもの、計測的でないもの、操作的でないものの価値が再確認されている。例えば、ビジネス界におけるアート思考の重要性であったり、psychological safety（心理的安全性）といった人間関係における信頼感の価値見直しであったり、ナラティブやコトづくりを重視する傾向が該当するだろう。

この論考は脱科学への流れ、いや、正しく言うなら新しい科学の在り方への提案なのかもしれない。ただ、その実践は外圧ではなく研究者自らの動機、つまり真理への途上にいる自覚、挑戦への枯渇感から生まれるのだ。

文・『といとうとい』編集委員