

モノとコトのダイナミズム

横幹連合副会長 本多 敏*



2016年1月に閣議決定された第5期科学技術基本計画では、世界に先駆けた「超スマート社会の実現」が掲げられ、英語名として Society5.0 と謳われています。サイバー空間とフィジカル空間が高度に結合し、サービスや事業のシステム化、システムの高度化、複数のシステムの連携協調による、いわゆる CPS(Cyber Physical Systems) により、あらゆる人が、必要な時に、必要な質の高いサービスを受けられ、生き活きと快適に暮らすことのできる超スマート社会をめざしています。本号では、このテーマに向けた横幹連合とその会員学会での取り組みが紹介されています。

横幹連合では、横断型基幹科学技術としてシステム科学を提唱し、様々な活動を行ってきましたが、中心的に活動してこられた歴代の会長・副会長の先生方はじめ多くの関係者の努力が実って、国の基本計画の中に「システム」という言葉・概念が取り込まれたことは、大きな意味を持っていますし、常に実践を求められてきた、横幹連合にとっても正念場であると考えています。

ここでは、計測工学の研究者として主に人材育成に関連して横幹の活動に関わってきた経験をふまえ、歴史的背景やどう取り組んでいきたいかについて述べたいと思います。

超スマート社会の定義にある「必要なもの・サービスを、必要な人に、必要な時に、必要なだけ提供し」という概念は、M. Weiser (ゼロックス・パロアルト研究所) が 1988 年に提唱したユビキタスコンピューティングにあると考えられます。メインフレーム、パーソナルコンピュータに続く第3世代として、日常のあらゆる物に埋め込まれた見えないコンピュータ技術を “the calm technology, that

recedes into the background of our lives” と提唱しました。ネットワーク技術の発展を背景に、さらなる発展形として、K. Ashton (MIT) が 1999 年に Internet of Things (IoT) “Sensors and actuators embedded in physical objects and linked through wired and wireless networks often using IP” と IoT という言葉を発信しました [1]。日本の坂村健が、1980 年代に提唱した超機能分散システム (Highly Functionally Distributed System: HDFS) も同じ趣旨の構想といえます。このように、サービスの提供が、3 any (any-time, anywhere, anyone) のユビキタスから 3 only (only now, only here, only you) へと進化し、基本計画の定義につながっています。一方、第4次産業革命を標榜してドイツが提唱している Industrie4.0 [2] では、CPS を基礎に位置付けています。CPS は、E. A. Lee (UC Berkley) が 2006 年に NSF (アメリカ国立科学財団) ワークショップにて、“Cyber-Physical Systems are integrations of computation and physical processes. Embedded computers and networks **monitor and control** the physical processes, usually with **feedback loops** where physical processes affect computations and vice versa. (太字強調は筆者)” [3] と定義して以後世に広まったものです。情報分野では、“embedded systems” [4] として組み込みシステムの発展形ととらえているようです。国内では 2000 年から 5 年間、産総研の中島らによるサイバーアシストプロジェクト [5] が、ユビキタスコンピューティングやサービス工学の先駆けとして、人間中心の情報システムの実現と実空間でのサービス提供を目指したことを銘記したいと思います。このような人間を中心にする視点が、ドイツの Industrie 4.0 や US の Industrial Internet などの先行する産業中心の取り組みに対し、後発の日本での、人間・社会の視点を加えた Society5.0 へとつながっていると思い

*慶応義塾大学理工学部 神奈川県横浜市港北区日吉 3-14-1

ます。

さて、システムという言葉が含まれたと書きましたが、そこでは基盤技術として「IoTシステム構築技術」「ビッグデータ解析技術」「AI技術」が強化対象として特定されています。いずれも情報系の技術です。CPSには上で強調しましたように制御や計測といった現実世界とのインタラクションを扱う技術が含まれていますし、横幹連合で提唱してきた「システム科学」は情報技術とは一線を画しています。もちろん敵対するのではなく、車の両輪として協調して進めなければなりません。今では情報と同意語のように使われている“cyber”ですが、この言葉を初めて使ったN. Wienerは1948年の記念碑的名著“Cybernetics”で、“… On the other hand, we were seriously hampered by the lack of unity of the literature concerning these problems, and by the absence of any common terminology, or even of a single name for the field… We have decided to call the entire field of control and communication theory, whether in the machine or in the animal, by the name Cybernetics, which we form from the Greek … or steersman,”と命名のいわれを説明し、動物系と機械系とを通信と制御の観点から統一的に論じました。Wienerの業績についてはとても書ききれませんが、Society5.0として社会まで含めて組上に載せようとしていることにつながります。また、横断型基幹科学技術を標榜する横幹連合の源流の一つがこのCyberneticsにあると思います。

Society5.0への横幹連合の取り組みとして、本号で西村がJST未来創造事業でのプロジェクトについて紹介していますが、チーム内での意思疎通のための共通言語として、Model-Based Systems Engineeringで使われるSysML(System Modeling Language)を採用しています。SysMLは、オブジェクト指向分析や設計のために記法の統一が図られたUML(Unified Modeling Language)を基にシステムエンジニアリング向けのモデリング言語として開発されたものです。現在では大半の情報システムはオブジェクト指向パラダイムで開発されますので、情報系との連携・協調にあたってのハードルは低いと期待しています。

もともとは、手続きを記述するというプログラ

ム、いわば「コト」を記述するプログラムから、オブジェクト指向プログラムという、「モノ」を主体にしてモノとモノのインタラクションで記述するプログラムに発展してきました。ご存じの通り横幹連合では、コトづくり長野宣言を皮切りに従来のモノづくり偏重に対してコトづくりの重要性を訴えてきました。

横幹〈知の統合〉シリーズ第一巻[6]で木村英紀元会長が、「コトづくり」の由来について、日常的に使われている代名詞の「こと」ではなく、「もの」に対応する「こと」であることを強調するために「コト」としたと説明されています。長谷川[7]は、日本語の「もの」と「こと」について、古代の日本人が中国から伝来した漢字の「物」「事・言」をあてたことをふまえて分析をすすめて、哲学の問題に対峙したときの日本語の底力について提示しています。横幹連合では、「モノづくり」の「モノ」に対する、「コトづくり」として、限定して使っています。こう限定することにより、「機能」とその機能を「創造するプロセス」を体系化するという、「コトづくり」の定義が可能となりました。長谷川は、日本語の「もの」と「こと」に対して、荒木[8]などをふまえて、「『こと』が時の到来し出現する、その『つぎつぎになりゆく』側面に目を向けているのに対して、『もの』は出で来たものが過ぎ去ってゆく、…その『いづくにか』のかなたを見やっている、…二つの語をもつことによって、この世界を、事物と事象という二つのジャンルに分けて眺めることができるのと同時に、この世界の生成と消滅との両側面を二つながらに凝視することができるのである。」と述べています。また、「こと」が自らを「あらわにする」はたらきをもち、「もの」は「個々のうちに働きつつ、個々のものをその根源にひく」はたらきをさしているとも述べています。「コトづくり」の定義で、機能とその機能を想像するプロセスとして、階層的に表現できたというのは、この日本語本来の「こと」のあらわにするはたらきによっていたのだと納得できます。

長野宣言では、「知の統合」も謳われていますが、木村元会長は前掲書の中で、知の統合が必要になるのはシステムを構築するためであり、「ものづくり」と「コトづくり」の統合としての「システム統

合」により良いシステムが構築されると述べています。そして、知の統合のもっとも強力な武器は数学であると述べています。横幹連合発足の1年前、2002年11月29日～12月2日にJST異分野研究者交流フォーラム「横断型基幹科学技術－新技術の新しい基礎を求めて－」が大磯プリンスホテルで開催されました。私は人材育成について話題提供させていただきましたが、その際に、講師として参加している諸先生方に、大学時代に勉強した科目で、現在横型の学問をすすめるのに一番役立ったのは何かとお尋ねしたところ、皆さんも「そりゃやっぱり数学だね」とのことでした。学術会議、科学者コミュニティと知の統合委員会による知の統合の定義[9]、「異なる研究分野の間に共通する概念、手法、構造を抽出することによってそれぞれの分野の間での知の互換性を確立し、それを通してより普遍的な知の体系を作り上げること」を実践するには数学ないしは数学的思考が不可欠なことを共有しているということだと理解できます。

この、数学がもっとも強力な武器になることについて、もう少し考えてみたいと思います。コトづくりが階層的に表現できると評価しましたが、数学ではこれを当たり前のこととして学問が発展してきました。実数から実数への写像として関数という機能が導入されました。実数という個々の「モノ」をひとまとめにした「モノ」としての集合という概念を抽象化し、それらの間を対応づける機能すなわち関数という「コト」を定義します。さらには、その関数を「モノ」としてとらえることで、それらの集まりとして様々な関数空間が定義され、関数を別の関数に対応づけるより高次の機能（「コト」）として作用素が定義されることなどがあげられます。幾何学ではユークリッド空間を抽象化したさまざまな多様体が定義されますが、各点ごとに対応する接空間（ユークリッド空間）が構築されますが、そこでの基底ベクトルは微分演算子といういわば空間の曲がり方を測る機能（「コト」）で表現されることとなります。これはほんの一例にすぎませんが、数学にはこのような状況を記述する枠組みが用意されていることをご存知でしょうか。圏論という理論がこれにあたります。教科書・参考書は数多くあり[10][11]その記号表現もさまざまです

が、すぐ確認できるという意味で、以下 Wikipedia の記述を参考にして紹介します。圏論（けんろん、category theory）は、数学的構造とその間の関係を抽象的に扱う数学理論の1つで、考えている種類の「構造」を持った対象 (objects) とその構造を反映するような対象間の射 (arrows/morphisms) の集まりからなる圏が基本的な考察の対象です。その研究は、関連する様々なクラスの数学的構造に共通する性質を見出そうとする試みと見ることができます。圏論を1940年代に創始したアイレンベルグとマクレーンは、ホモロジー代数(代数的位相幾何学)を公理的に展開する過程で、異なる数学的体系の間の自然変換を理解するために関手 (functors) の定義が必要となりそのために圏を定義することになりました。ここで、圏 \mathcal{C} とはその対象と射の集まりの組で、

- (i) 各射 f に対して、 $f: \text{dom}(f) \rightarrow \text{cod}(f)$ となる対象の組
- (ii) 二つの射 f, g に対する合成射 $g \circ f$
- (iii) 合成の結合律
- (iv) 各対象 a に対して合成に対する単位元となる恒等射 $\text{id}: a \rightarrow a$

が定義されたものです。現代の数学は集合論を基礎に公理的に展開されますが、この圏を基本として数学を記述し展開することも可能です。数学のさまざまな分野から圏をつくりだして、異なった理論の間に平行して存在する手続きを統一的に理解することができるようになります。さらにそうして構成された圏同士の構造を保存する対応関係を定義することができ、関手 (functors) と呼ばれます。関手によりそれぞれの圏の対象と射を対応づけることとなります。そうすると、圏の圏を考えることができ、そこでは圏が対象で関手が射ということになります。さらには、2つの圏の間の関手を対象として、関手の間の自然変換を射とする関手圏を定義することができます。マクレーンとアイレンベルグはこの自然変換を定義するために圏論という枠組みを創出したわけですが、本稿の表題の「モノとコトのダイナミズム」([3]の副題)というにふさわしい、圏論の大定理、米田の補題 (Yoneda lemma) が1954年に数学者・計算機学者の米田信夫により

見出されました。記号 $\text{Hom } C(a, b)$ で圏 C の対象 a, b 間の射の集合を示します。 C の双対圏 C^{op} に対して、関手 $\text{Hom } C(-, a) : C^{op} \rightarrow \mathbf{Set}$ (C 上の前層とよばれます) が定義されますが、この関手から任意の関手 $F : C^{op} \rightarrow \mathbf{Set}$ への自然変換と、集合である対象 $F(a)$ (集合の圏 \mathbf{Set} の対象) との間に対応が存在するという定理です。すなわち自然変換というコトと、集合というモノが同型になるというわけです。松尾 [12] が強調している、日本人ならではの発想の一例になるのではないかと思います。

圏論は数学者の専有物ではなく、情報科学やあまり知られていませんが制御・システム論での適用例などが存在します [13-15]。また、横幹連合の関係では、2016 年度木村賞受賞論文 [16]、サービス工学会での提案 [17] などの事例もあり、SoS のようなさらに複雑になるシステムを記述するのに有効な言葉を提供してくれると考えて模索しています。

最後に筆者の専門である計測分野でのモノとコトのダイナミズムを紹介して筆を置きたいと思います。Society5.0 では、情報系の3つの基盤技術が強化対象ですが、基礎となるデータの収集、すなわちセンシング技術の重要性についても言及されています。IoT のセンサ版である、1兆個のセンサによる社会変革を謳う Trillion Sensors Universe [18] などの活動がありますが、センサ情報の品質をいかに保つかが問題になります。公式には、計量計測トレーサビリティを確立することになります。すなわち、「個々の校正が測定不確かさに寄与する、文書化された切れ目のない校正の連鎖を通じて、測定結果を計量参照に関連付けることができる測定結果の性質」というトレーサビリティを確立することにより、センサ情報の品質を保証することになります。その背景には SI 単位系とその標準の体系がメートル条約 (1875 年) に基づき、加盟各国の国家標準の間の相互比較により、SI トレーサブルな体系が維持されていることがあります。現在はすべての物理標準がメートル条約の対象になっていますが、1875 年の締結時には長さと質量の標準として、メートル原器、キログラム原器が制定されました。その後、ご存知の通り長さの標準は光

の速度という物理定数に基づいた定義に変更されメートル原器は廃止されています。現在では質量のみが国際キログラム原器という人工物に依存していますが、今年の国際度量衡総会でプランク定数にもとづいた質量の定義採択が審議される予定です [19,20]。同時に4つの SI 基本単位、キログラム (kg)、アンペア (A)、ケルビン (K)、モル (mol) は物理定数、すなわち、プランク定数 (h)、電荷素量 (e)、ボルツマン定数 (k)、そしてアボガドロ定数 (N_A) の確定値にもとづいて再定義されることとなります。これらの物理定数を充分小さな不確かさで値付けをするための複雑な測定システムを構築し運用する技術が確立されたことから、新定義の採択となります。定義は物理定数に基づくこととなりますが、それを示すモノの役割は不変です。100年以上の歴史を持つ計量標準の世界でもモノからモノを包含したコト (測定システム) へという流れになっているわけです。

本号のミニ特集・特集のテーマはいずれも「新しい価値の創造」ということとなります。本稿では、横幹連合での設立時からのかかわりを振り返り、コトづくりによる価値創造には、コトの抽象化とモノへの具象化とのダイナミズムが重要であることを再確認しました。はじめに述べましたが、実践をもとめられてきた横幹の出番です。横幹の活動への参加・協力をよろしくお願いいたします。

参考文献

- [1] K. Ashton, That 'The Internet of Things' Thing, RFID Jour. <http://www.rfidjournal.com/articles/pdf?4986>
- [2] http://www.acatech.de/fileadmin/user_upload/Baumstruktur_nach_Website/Acatech/root/de/Material_fuer_Sonderseiten/Industrie_4.0/Final_report__Industrie_4.0_accessible.pdf
- [3] E. A. Lee, Cyber-Physical Systems - Are Computing Foundations Adequate?, NSF Workshop On Cyber-Physical Systems, 2006.
- [4] E. A. Lee and S. A. Seshia, Introduction to Embedded Systems, A Cyber-Physical Systems Approach, <http://LeeSeshia.org>, ISBN 978-0-557-70857-4, 2011.
- [5] 中島, 橋田, サービス工学としてのサイバーアシスト, Synthesiology, vol.3, No.2, 96-111, 2010.
- [6] 横幹〈知の統合〉シリーズ編集委員会編, 〈知の統合〉は何を解決するのか, 横幹〈知の統合〉シリーズ第一巻, 東京電機大学出版局, 2016年4月.

- [7] 長谷川三千子, 日本語の哲学へ, ちくま新書, 2010年9月.
- [8] 荒木博之, やまとことばの人類学, 朝日選書, 1985年12月.
- [9] 日本学術会議 科学者コミュニティと知の統合委員会, 提言: 知の統合 - 社会のための科学に向けて -, 2007年3月.
- [10] T. レンスター, ベーシック圏論, 丸善出版, 2017.
- [11] http://alg-d.com/math/kan_extension/
- [12] 松尾義之, 日本語の科学が世界を変える, 筑摩選書, 筑摩選書, 2015年1月.
- [13] M. A. Arbib & E. G. Manes, Time-Varying Systems, SIAM Jour. Control, Vol.13.No.6, 1252-1270, 1975
- [14] A. D. Ames, A Categorical Theory of Hybrid Systems, Technical Report No. UCB/EECS-2006-165, 2006. <http://www.eecs.berkeley.edu/Pubs/TechRpts/2006/EECS-2006-165.html>
- [15] A. C. Ehresmann & J. P. Vanbreemersch, Memory evolutive systems; hierarchy, emergence, cognition, Amsterdam, Elsevier Science, May 2007.
- [16] 成瀬誠, フォトン・インテリジェンス, 第7回横幹連合コンファレンス, 2016.
- [17] 鈴木雅彦, 既存の様々なサービスを記述可能な新しいサービスモデルの提案, サービス学会第5回全国大会, 2017.
- [18] 日本政策投資銀行, 一兆個のセンサによる社会変革トリリオン・センサ・サミット 2015 報告 - 今月のトピックス, No.247-1, 2016年1月.
- [19] 藤井賢一, 基礎物理定数による SI 単位の再定義, J.Vac.Soc.Jpn., Vol.51, No.10, 668-674, 2008.
- [20] Bureau International des Poids et Mesures, DRAFT 9-th edition of the SI Brochure.