

6 脳科学と未来 ICT

～脳に倣う ICT 実現への期待～



加納敏行 | 日本電気 (株)

ICT の現状と課題

半導体の進化とともに、ICT における情報処理・通信性能は格段に向上してきた。さらに仮想化技術などの資源利用技術との相乗効果により、膨大な計算機資源を投入することで容易に計算性能を獲得することが可能となってきた。これらの ICT の進化は情報処理という観点で見ると「量」の進化であったと捉えられる。半導体は単位面積当たりの集積「量」、計算機は時間当たりの計算「量」、通信は時間当たりの伝送「量」という形で「量」の増大により現在の ICT は進化してきたといえる。しかしながら現在、その限界が見えてきている。集積度の限界、速度の限界、電力の限界、さらには ICT インフラ運用の限界である。

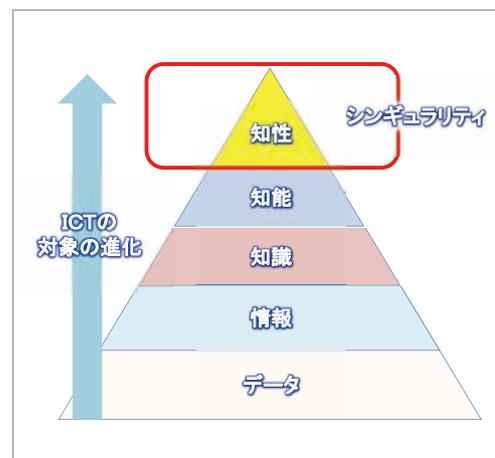
この限界を超えるために ICT としてパラダイムシフトが求められる。本稿では、ICT のパラダイムシフト実現に向け、脳科学の知見、つまり脳の振舞い、脳の構造に倣う ICT 研究開発の取り組みについてその現状と将来について述べる。

ICT のパラダイムシフト

今まで ICT が扱ってきた情報処理の対象に進化が起こりつつある。ICT は高性能な科学技術計算、会計計算とその共有を目的として誕生した。ICT が扱う対象は「数値」データに始まり、その後、画像、音声、テキストなど多様な非数値のデータ（マルチメディア）が集まることで「情報」へと進化し、その後、大量の情報を収集することで大量な情報が

ら抽出された意味、つまり「知識」が対象となるように進化してきた。現在、この「知識」を大量に集合させることで「知能」が形成されつつある。これがいわゆる人工知能（AI：Artificial Intelligence）である。ICT の限界は半導体など ICT 利用に付随するものの限界だけでなく、このように扱う対象の進化によってもたらされているともいえる。今後、さらに高度化された「知能」が大量に集合することで、ICT は「知性」を扱うことになるだろう。ICT が「知性」を扱い、「知性」を処理する時代、これがシンギュラリティ時代といえる。ICT がシンギュラリティに耐える進化を実現すること、これが ICT のパラダイムシフトであると考え（図-1）。

今後、ICT が扱う対象の高度化（進化）に伴い、今まで ICT の進化軸となっていた「量」に代わって「質」が進化（価値）軸となるだろう。これがまさに前述した次の時代に ICT に求められるパラダイムシフトといえるのではないだろうか（図-2）。



■図-1 ICT が扱う対象の進化

この「質」の本質，すなわちヒト（社会）が求める ICT の「質」実現のヒントを「脳」の情報処理メカニズム，脳の構造の理解により得るという取り組みが脳科学研究の進展に伴い本格化するだろう。ただし，これらの取り組みを，人工知能の高度化，高性能化の1つとして捉えるのではなく，未来 ICT 実現への一歩として捉えるべきではないだろうか。

脳に倣う／脳を模する ICT 研究 ～2つのアプローチ

脳の探求とその人工的实现に関しては古くから取り組まれてきた。現在，過去からの取り組みを含めて2つのアプローチが存在するといえる。

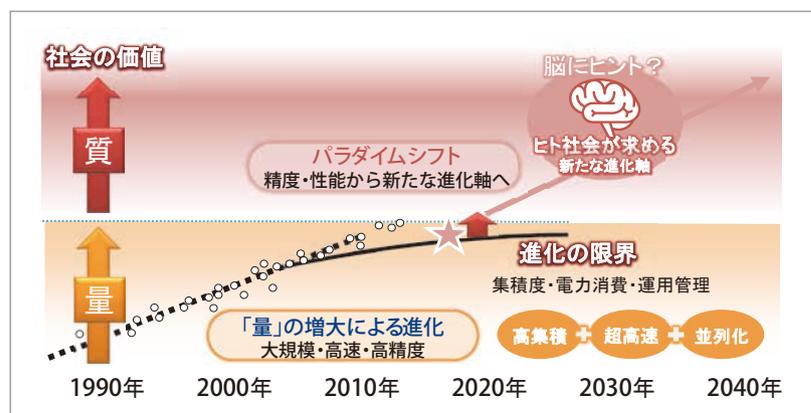
1つはボトムアップアプローチである。これは1943年，Warren McCulloch と Walter Pitts による人工神経の発明に始まり，1958年，Frank Rosenblatt によりパーセプトロンとして進化，1979年，福島邦彦によるネオコグニトロンを経て2006年 Geoffrey E. Hinton らによる Deep Learning に至る技術開発が神経回路単位でモデル化し，それらを統合することで人工脳を実現するアプローチである。当然，これらの人工神経回路をそのまま半導体で再現するという取り組みも行われている。一方，もう1つはトップダウンアプローチである。これは fMRI (Functional Magnetic Resonance Imaging) や MEG (Magnetoencephalography) に代表される脳活動測定技術を用い外部刺激に基づく生体脳の振舞いを観測，解析結果から脳活動の数理モデルを抽出，実現¹⁾し，ICT に応用するというアプローチである。このアプローチは近年の脳活動計測技術やその解析技術の進化により急速に発展してきている。特に脳活動計測結果である大

量のデータが蓄積されてきたと同時に ICT の高速化大規模化によりそれらのデータをビッグデータとして機械学習に代表される人工知能技術を用いて分析，モデル化することが可能となりつつあり，脳活動モデルの設計，ICT での応用が今後さらに加速すると考えられる。

脳科学と ICT ～ ICT が脳に学ぶもの

生体脳活動を計測する技術は近年著しい進化を遂げてきている。たとえば脳内の血流を測定することで外部刺激に対応した脳の活動部位を特定することのできる fMRI 技術の進化は高精度な部位特定を可能とし，神経回路の微小電流が発生する脳磁界を測定することで活動をリアルタイムに観測できる MEG 技術の進化は，空間分解能に加え時間分解能の高い計測を可能とする。一方，脳波計 (EEG : Electroencephalogram) の小型軽量化も進み，日常生活の中でリアルタイムに脳活動を計測することも可能となってきた。この結果，さまざまな環境，さまざまな刺激に対応する高精度な脳活動データの取得が可能となり，脳活動データによるビッグデータが充実しつつある。

これらの技術を活用した脳情報科学の研究により，脳は高効率かつ高速，低消費エネルギーな情報処理メカニズムを有することが判明してきた。たとえば，



■図-2 ICTの進化軸のパラダイムシフト～量から質へ



表情認知における2つの認知経路の存在²⁾や、バイオロジカルモーション認知³⁾など、状況(目的)に応じた効率的なリソースと伝達経路を選択するメカニズムが搭載されていることが分かってきている。また、運動の学習などにおける連続データの学習や処理においては、連続量をそのまま扱うのではなく、離散データとして再構成する可能性⁴⁾や、新たな外部デバイスを拡張身体部位として操作する技能を獲得する過程において、拡張部位に対応する体性感覚領野が現れる脳の可塑性⁵⁾も指摘されている。さらに、処理そのものにあいまい性(ゆらぎ)を持たせることで、処理に必要な精度を低減しつつ、実用精度を有する処理結果を出力するということがすでに明らかとなっており⁶⁾、ICTへの応用も始まっている。またこれらの脳の高効率な処理システムが高度な処理を実行しながらも、わずか約1.5kgのリソースと約20w程度の消費エネルギーで動作させていることも判明している。

このような情報処理メカニズムはICTにおいて「処理量低減(データ・処理の取捨選択)」「処理時間短縮(低レイテンシ化)」、「必要資源の削減(利用効率化)」、「低精度組合せによる高精度化(ダイナミックな適精度化)」という観点で活用することができるだろう。

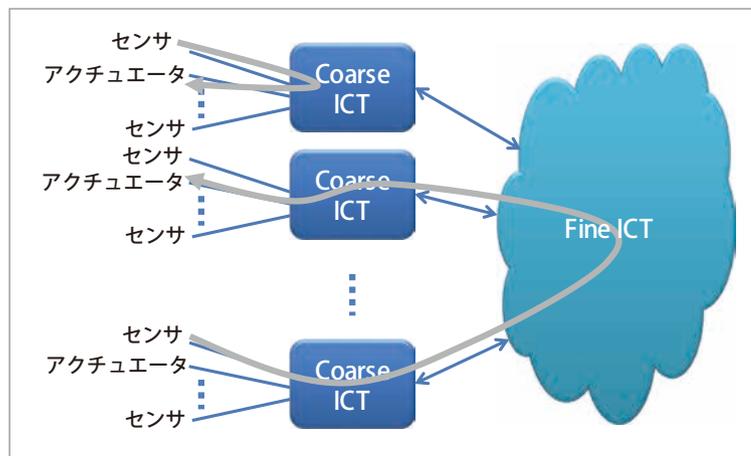
たとえば、脳が環境や発達のレベルに応じて機能分担を変化させたり、新規機能の割り当てを動的に変化させたりする可塑性や表情認知における複数経路の解明研究の知見は緊急性を要する処理の識別と優先的な資源、経路割り当てのメカニズムとして利用できる。これらの研究の進化により、従来実現できなかった処理の実行中に負荷や処理量、優先度を動的かつ自律的に把握、推定し、リソース割り当てや処理の高速化を行うシステムの実現につながる。

また、脳のみならず生体全体が有する

「ゆらぎ」のメカニズムは複雑なシステムの最適化問題で陥りやすい局所最適化を回避し、計算量を低減する技術としてすでに用いられているほか、情報処理の過程であえて「ゆらぎ」(ノイズ)を付加すること(していることを前提とすること)で処理ビット長の削減や複雑な処理の簡素化を実現し、迅速かつ低消費エネルギーで処理結果を得る処理システムの実現を目指す取り組みも行われている^{☆1}。

これらのシステムは現在用いられているICTのすべてを置き換えることはできないが、既存ICTでは代替できないヒトの作業(ビッグデータからの概念抽出や前処理など)を代替することを期待することができる。今後は2つのICT、つまり既存システムの延長線上の進化系である高精度超高速ICTと脳に倣う適精度ICTが連携し、シンギュラリティ時代の社会を支えるものとする。筆者はこれら2つのICTのうち、前者をFine ICT、後者をCoarse ICTと名付ける。図-3に後述するIoT(Internet of Things)におけるFine ICTとCoarse ICTの関係と情報処理の流れを示す。入力されたセンサ情報はまずCoarse ICTで処理、概念抽出、意味抽出を行う。この結果緊急性を要する場合はCoarse ICTが直接アクチュエータに対して結果を

☆1 <http://www.yuragi.osaka-u.ac.jp/>



■図-3 IoTにおけるFine ICT / Coarse ICTと処理経路

出力、一方、広域または高精度な処理を必要とするものについては Coarse ICT の処理結果とともに必要データをクラウドコンピューティングによって構成される Fine ICT に転送、処理されたのち、再び Coarse ICT を経由して実世界に出力される。このように IoT は将来、すべて共通化した ICT ではなく、脳に倣う機能配備とそのための資源配備が重要となってくるだろう。

脳に倣う ICT の実現と3つの要件

IoT、これは1999年に米国MITのAuto-IDセンサー、Kevin Ashtonにより提唱された概念である。このとき、IoTはRFIDを具備した大量のThingsがインターネットを介して相互接続される概念として発表された。現在、IoTはビッグデータや人工知能と連携（統合）し、それらを用いた産業革命が急速に進展してきており、この概念は大きく進化し、物理世界（Physical）とICT（Cyber）を統合するシステム概念として定義されている。これらのシステムは「物理世界のセンシング→デジタル化→分析・認識・意思決定→物理世界アクチュエーション」という情報処理プロセスを有する（図-4）。

これは、「感覚器→脳（符号化・認知・意思決定）→筋肉」という動物（ヒト）脳を核とした生体情報処理システムとほとんど変わらない（図-5）。

また、ヒト脳においては、多様な脳の領野がそれぞれの機能を分担していることも分かってきており、図-4、5を相互に参照することで、脳の構造（アーキテクチャ）をICT

システムの機能構成として表すことが可能となる。厳密に脳を再現することはできないが、脳における機能分担を、ICTシステムの機能分担として表現したものが図-6となる。

図-6のイメージにおいて、脳の情報処理プロセスと機能分担に着目し、この情報処理メカニズムをICTプラットフォームに活用してみる。当然、脳を厳密に再現するものではないが、脳科学研究の成果となるモデル（計算可能なモデル）とアーキテクチャをタイムリに実装していくことのできるプラットフォームとして実現することで、脳科学の知見に倣う進化型のICTシステムとして実現することができる（図-7）。

ICTのパラダイムシフト実現の第一歩としてまず、脳のモジュール構造、アーキテクチャに倣い、



■図-4 IoTの情報処理プロセス



■図-5 動物（ヒト）の情報処理プロセス



■図-6 機能配備～脳構造とICT



今後進展が加速する脳科学の知見を逐次導入し、進化（発達）させることのできる脳に倣う ICT 進化のプラットフォーム実現を提案したい。

ただし、これらの実現にあたり、3つの重要な要件を満たす必要がある。それはそのシステムにおける情報処理プロセスに対して「オブザーバビリティ（可観測性）」、処理結果に対して「エキスプレイナビリティ（可説明性）」、そして外部からの（つまりヒトによる）「コントローラビリティ（可制御性）」が保証されることである。これら2つの特性の保証は ICT がヒト社会において活用されるためには必要不可欠な条件となる。

脳科学と脳に倣う ICT の進化への期待～相乗効果をもたらすポジティブサイクル

前述した脳型 ICT プラットフォームは脳科学の知見（つまり脳科学によって解明された脳の情報処理メカニズムを計算可能なモデルとして実現したもの）をタイムリに ICT に取り込むことを可能とする。脳科学と脳型 ICT、さらに既存の人工知能技術は相互の利活用によって進化のポジティブサイクルを生む。このポジティブサイクルが脳科学と脳に倣う ICT の急速なる研究の進展を生む。

最後に今後、脳に倣う（模する）ICT の実現に対しては、省電力化、小型軽量化といった物理量の改善や、性能向上という従来の ICT 進化に加え、ICT 進化軸の「量」から「質」の転換（パラダイムシフト）を起こすことに期待したい。この進化実現にあたり、本稿で紹介したアプローチに加え、脳に倣う多様なアプローチの登場に期待したい。

参考文献

- 1) Nishimoto, S., Vu, An T., Naselaris, T., Benjamini, Y., Yu, B. and Gallant, J. L. : Reconstructing Visual Experiences from Brain Activity Evoked by Natural Movies, Current Biology (2011).
- 2) 稲垣未来男, 藤田一郎: 顔反応性細胞の表情に対する選択性の潜時: 側頭葉視覚皮質と扁桃体の比較, 信学技報 NC2010-174, pp.277-282 (2011.3).
- 3) Giese, MA and Poggio, T: Neural Mechanisms for the Recognition of Biological Motion, Nat Rev Neuroscience 4, pp.179-192 (2003).
- 4) 前田太郎: ヒトの行動意図の推定と誘導, 人工知能学会誌 Vol27, No.4, pp.411-417 (2012).
- 5) Schaefer, M., Heinze, H. J. and Rotte, M. : My Third Arm : Shifts in Topography of the Somatosensory Arm, Human Brain Mapping 30, pp1413-1420, (2009)
- 6) 川口淳一郎, 柳田敏雄, 他: 『『ゆらぎ』の力 はやぶさの帰還宇宙の始まり 高次な生命機能』 ISBN-10: 4759803904 (2011). (2017年10月5日受付)

加納敏行 t-kanoh@ay.jp.nec.com

1981年 NEC 入社, 通信用システム LSI 開発, 光通信システム開発を経て, 2006年システムプラットフォーム研究所所長, 2011年中央研究所主席技術主幹, 2016年大阪大学 NEC プレインインスパイアードコンピューティング協働研究所副所長, 現在に至る。



■ 図-7 脳型情報処理プラットフォーム概念図