

第2章 超スマート社会の実現に向けた我が国の取組（Society 5.0）の方向性

第5期基本計画に基づき、「超スマート社会」を世界に先駆けて実現していくためには、どのような取組が必要なのであろうか。本章では、「超スマート社会」の実現に向けて、研究開発、環境整備、人材育成の3つの視点から、我が国の取るべき今後の取組の方向性を考察する。

第1節 超スマート社会を支える研究開発及びシステム化の推進

I C Tの急速な発展に伴い、サイバー空間が急速に現実空間と融合している。本節では、こうした状況をもたらした技術の歴史や現状、我が国の強みと弱み、研究開発及びシステム化に関する我が国の取組と今後取るべき方向性を明らかにする。

1 超スマート社会に向けてコアとなる技術の歴史と現状

現在、我々が置かれている状況をもたらした科学技術は何だったのであろうか。そこには数多くの科学技術が存在し、それぞれが相互に作用しながら発展し、今日の状況があることは言うまでもないが、中でも大きな役割を果たしている技術に関し、その発達の歴史を振り返り、現状を俯瞰^{かん}してみたい。

（1）コンピュータ技術の発展の歴史

（ハードウェアの観点から）

コンピュータは、オフィスワークや娯楽をはじめ、今や私たちの生活になくてはならない存在になっている。コンピュータは、「計算機」を意味しており、その起源をたどると、ギリシャ文明期の計算盤に始まるなど、人類が数を扱ってきた歴史にほかならないだろう。計算機は、20世紀初頭までにリレー回路などを用いた機械式・電気機械式の計算機に進化してきた。こうした計算機は、電気的現象や機械的現象による物理量を利用して表現を行うアナログコンピュータと位置付けられる。

1930年代後半から1940年代頃には、演算に真空管を用いる電子式計算機が登場した。この頃の真空管を用いた計算機は第1世代のコンピュータと呼ばれている。このような電子式計算機はデジタルコンピュータと位置付けられ、論理回路を組み合わせてつくられており、取り扱う数値は0ないし1だけの2進数で表現される。一方で、アナログコンピュータは、演算内容に応じて回路を変更する必要や得られる精度にも限界があったことなどから、電子式計算機の登場と高度化に伴いその役割を終えていった。

その後、ダイオード¹、トランジスタ²といった半導体デバイスの発明により、回路の小型化・高速化が図られていった。1950年代末～1960年代初頭にかけたのトランジスタを用いた電子計算機は、第2世代のコンピュータと呼ばれ、プログラム言語の開発が盛んに行われた。

さらに、米国において配線や電子素子を半導体に組み込んだ集積回路（I C³）が1961年に実

1 電流をある特定方向にのみ流す性質（整流作用）をもつ電子素子

2 電流の増幅作用をもつ電子素子

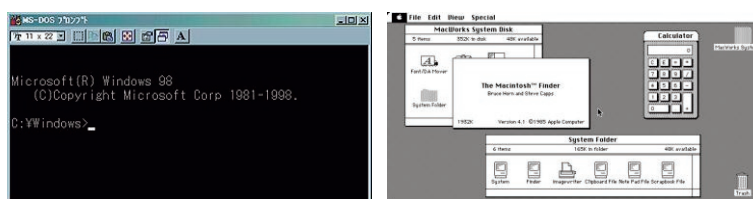
3 Integrated Circuit。1961年に実用化

用化された後は、回路の集中化や小型化・高度化により大規模集積回路（LSI¹）や超大規模集積回路（VLSI²）の実現へとつながっていく。1960年代中頃～1970年代中頃の集積回路を用いたコンピュータは第3世代と呼ばれており、処理速度の高速化が図られている³。

なお、今日に至るマイクロプロセッサを基盤としたコンピュータは、第4世代と理解されている。なお、第1～第4世代まで今日に至るまでのコンピュータは、プログラムを計算機の記憶装置内にあらかじめ内蔵しておき、これを順次読み込みながらデータを処理するというプログラム内蔵方式を採っており、ノイマン型コンピュータと呼ばれる。こうした構造は、今日のコンピュータやスマートフォン、タブレット端末に至るまで変化はない。

（ソフトウェアとインタラクションの観点から）

第1世代、第2世代のコンピュータは、直観的に操作ができるようなものではなかった。そのため、ヒューマンインターフェースの改良が進められ、



1960年代には米国でマウスが MS-DOSのインターフェース（左）とMac OSのGUI（右）
資料：IPAウェブサイトより文部科学省作成

さらに、コンピュータの処理速度の高速化やつながれる機器の多様化に伴い、オペレーティングシステム（OS）の重要性が増していった。OSは、様々な機器が接続されたコンピュータの管理運営を行い、円滑な情報処理を実現するための基本的な制御プログラムであり、古くは第3世代コンピュータの時代に当たる1964年に、米国アイ・ビー・エム社によって開発された。1970年代には米国アイ・ビー・エム社が自社のマイクロコンピュータに搭載するOSの開発を米国マイクロソフト社に委託したことを背景に、コマンドラインインターフェース⁴を持つMS-DOS⁵が開発された。

1972年には、米国の計算科学者であるアラン・ケイ氏により、パーソナルコンピュータの概念が発表され、1973年にはGUI⁶を持ち、現在のパーソナルコンピュータの原型となる試作機「アルト」が登場。さらに、1984年にはGUIをもつOSを搭載したパーソナルコンピュータ「マッキントッシュ」が米国アップル社から発売された。GUIの登場によって、一般のユーザーにもコンピュータを扱いやすい環境が整い、機器の低価格化とも相まって、パーソナルコンピュータの爆発的な普及が進んだ。

なお、マッキントッシュの登場の1年前（1983年）に我が国で誕生した「ファミリーコンピュータ」は、グラフィカルな画像デザイン、サウンドの利用の仕方についても、当時のパーソナルコンピュータをはるかに凌駕するインターフェースを実現していたという評価もある。こうしたテレビゲーム分野でもインターフェースが発達し、タッチペンを使った「任天堂DS」（2004年）、

1 Large Scale Integrated Circuit

2 Very Large Scale Integrated Circuit

3 第1世代ではミリ（ 10^{-3} ）秒、第2世代ではマイクロ（ 10^{-6} ）秒、第3世代ではナノ（ 10^{-9} ）秒単位と、世代を重ねるごとに1,000倍のスピードを実現してきた。今日のコンピュータは第4世代のコンピュータであると理解されており、ピコ（ 10^{-12} ）秒をはるかに超える速度となっている。

4 キャラクタユーザインターフェースとも言う。キーボードなどで入力を行い、ディスプレイ上に文字を表示することを出力とする方式。マウスなどのポインティングデバイスを使用しない。

5 Micro Soft Disk Operating System Program

6 Graphical User Interface。グラフィックとマウスやタッチパッドなどのポインティングデバイスを用いて、直感的な操作を可能にする操作方法

加速度センサを搭載したリモコンで操作する「Wii」（2006年）などが登場した。さらに、2008年に登場した米国アップル社のiPhoneでは、タッチパネルを指で操作するタッチインターフェースが採用されており、私たちの生活に浸透している。

さらに、コンピュータが扱うメディアも増え、数値からテキスト、音声、静止画、動画像へと広がっていった。もはやコンピュータはそろばんのような「数値データを計算するための機械」という枠を超え、日常生活の様々な場面で広く利用される存在となっている。

（今日のコンピュータ）

今日のコンピュータは、小型化・高速化が進んだだけではなく、使用スタイルや場面が変化し、ビジネスユースだけではなく、様々な生活の場面において、いつでもどこでも使用可能になってきている。さらに、スマートフォンのように、電話機やオーディオ製品など、これまで特定の機能を提供してきた機器をひとつのコンピュータ上に集約できるようになったり、特定の機器にコンピュータが組み込まれる・組み込まれていたコンピュータが高度化することで機能の向上が図られている。

さらに、こうした機器では、そのコンポーネントやハードウェアはそのままに、ソフトウェアを追加・高度化していくことで、機能を拡張・充実していくといった設計思想が主流になりつつあり、従来、買い替えが必要であったものでも、ソフトウェアの追加・高度化のみで最新の機能を利用できる状況にある。

また、これらの機器の多くが通信機能を備えるようになってきており、データ連携によって必要な情報を提供したり、複数機器の連係動作（例えばスマートフォンを通じて出先から照明やエアコン、ペットを見守るウェブカメラを操作するなど）を実現したり、単一の機器だけでは提供できない新たな価値・機能を提供している。

さらに、ユーザーインターフェースも高度化している。コンピュータやスマートフォンなどに文字を入力する際に音声で入力できる音声認識技術のほか、ユーザーの視線を検知して、ユーザーが見たいものを先回りして表示する視線検知技術などが登場し、実用化されている。加えて、脳信号をコンピュータで解読し、念じた通りに外部機器を操作するブレイン・マシン・インターフェース（BMI：Brain Machine Interface）といった技術も研究されており、医療福祉分野などにおける応用が期待されている。このように、音声、視線、ジェス



脳波で車いすをリアルタイム制御するBMI
提供：理化学研究所



国立博物館におけるプロジェクションマッピング
提供：3Dプロジェクションマッピング「KARAKURI」
（東京国立博物館／重要文化財「洛中洛外図屏風舟木本」
©NAKED／NTV）

チャー、脳波など、人の発する様々な信号を組み合わせるコンピュータに伝えるマルチモーダルな手法も注目されている。

また、コンピュータの扱うメディアは現実空間に進出してきている。3Dプリンタの登場によって、文字、音声、映像といったメディアに続き、モノを出力することが可能となったほか、近年では、建築物等の立体物や凹凸のある面などに映像を投影し、実物と映像をシンクロさせるプロジェクションマッピングが新たな映像表現の手法として注目されており、国内外のイベントやコンサート等で活用されている。さらに、バーチャルリアリティ（VR¹）や拡張現実（AR²）等の技術も進展しており、新たなサービスや製品の創出が期待されている。

（2）ネットワーク技術の発展の歴史

（電信電話の時代と通信自由化、携帯電話の普及）

1854年、2度目のペリー来訪時に、我が国に初めて電信機が導入された。さらに、1876年に米国で電話機が発明された僅か14年後の1890年には、我が国において電話交換業務が開始された。電話交換業務は、戦前までは官営で提供されたが、第二次世界大戦後の電信電話事業は、日本電信電話公社が郵政省の監督下でサービスを提供する体制で進められていった。

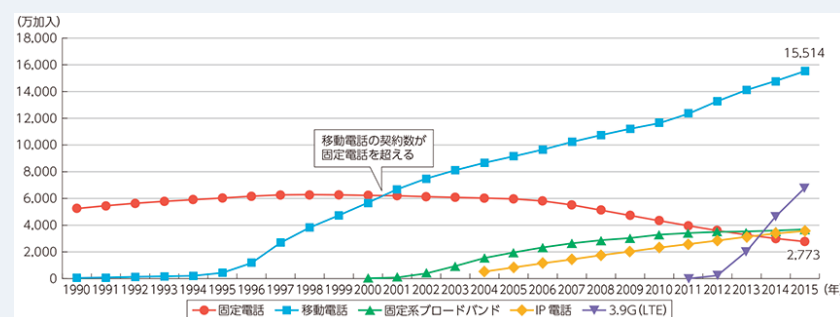
その後、光ファイバーや通信衛星等の新技術の実用化を受けて、通信自由化が求められるようになった状況を踏まえ、1985年（昭和60年）に通信自由化が実現した。通信自由化について、平成27年版情報通信白書では、自由化による競争導入以降の10年で、通信市場に多数の事業者が新たに参入し、事業者間の競争により料金の低廉化やサービスの多様化が生じたと総括している。

現在では、携帯電話が固定電話に代わり音声による通信サービスの主役となっている。1995年にPHSがサービスを開始したことに伴い、携帯電話の利用者数が急激に増加し、2000年には固定電話サービスの契約者数を逆転した（第1-2-1図）³。

1999年には、携帯電話からのインターネット接続

が可能となり、2005年末には携帯電話等の移動端末によるインターネット利用者数が、パーソナルコンピュータによるインターネット利用者数を上回った⁴。さらに、2000年には、位置情報サービスやカメラ機能が搭載された携帯電話端末が登場し、単なる電話機を超えた役割を果たし始めた。さらに、スマートフォンやタブレット端末の登場とも相まって2001年に世界に先駆けてサービスを開始した3G回線、2010年にサービスを開始した3.9G（LTE⁵）回線が普及している。

■ 第1-2-1図／通信サービス加入契約者数の推移



資料：「平成27年版情報通信白書」（総務省）
第1章図表1-1-2-4（14ページ）

1 Virtual Reality
2 Augmented Reality
3 平成27年版情報通信白書
4 平成27年版情報通信白書

5 Long Term Evolution：携帯電話回線でブロードバンド通信並みの通信速度を可能とする。

（インターネットの登場）

1958年、米国において、先端軍事研究を担う高等研究計画局（ARPA¹）が国防省の監督の下設置された。ARPAにおいては、米国内に散らばるコンピュータのネットワーク化に関する研究も行われており、1968年には、ARPANET構築計画が開始された。ARPANETには、国防省のコンピュータに加え、カリフォルニア大学ロサンゼルス校（UCLA）及びサンタバーバラ校（UCSB）、スタンフォード大学、ユタ大学といった4つの大学のコンピュータも接続され、年を経るごとに接続されるコンピュータの数も増えていき、その規模を拡大させていった。

1981年には、ARPANETとの相互乗り入れを目指し、全米科学財団（NSF²）によって学術研究用ネットワークCSNET³の運用が開始された。さらに、1985年には全米5か所に置かれたスーパーコンピュータを高速回線で接続するNSFNETが構築された。このとき、世界各国で独自のネットワークが構築されつつあり、我が国においても、1984年に、東京大学、東京工業大学、慶應義塾大学間で研究ネットワークJUNET⁴が構築されていた。NSFNETは、こうした個々のネットワークをつなぐネットワーク（バックボーン）としての役目を担った。これにより、全世界を覆うネットワークが構築されていった。

さらに、1990年には、World Wide Web（WWW）が発明され、これによりWebページやマルチメディア・データの送受信や閲覧が可能となっており、現在の情報社会の基盤となっている。加えて、1992年には、米国連邦議会において可決された「科学及び先進技術法」等によって、それまで禁止されていたNSFNETの商用利用が許可されることとなり、インターネットプロバイダ（ISP）が台頭し、一般市民のインターネットへの接続が促進された⁵。このように、1990年代から2000年代にかけて、世界規模のネットワークが構築されて、今日のインターネットに至っている。

我が国におけるインターネットについては、当初、一般利用者は電話回線を利用して接続するダイヤルアップ接続によってアクセスしていたが、1999年のDSL⁶、2001年に世界に先駆け光ファイバーを用いたFTTH⁷サービスの導入などのブロードバンドサービスの普及により、我が国のインターネット利用環境は急速に高度化していった。

他方、近年では、インターネット接続機器の増加に伴い、2011年2月にはネットワーク上のIPアドレスが枯渇している状況にある⁸。こうした状況に対応するため、IPv6⁹への移行が進められている。

（インターネットの広がりとIoTが生み出すビッグデータ）

インターネット利用者のすそ野の拡大に伴い、ブログやSNS¹⁰などの利用者参加型のメディアと、サービス提供者が自ら保有する情報を広く公開するオープン指向の2点を特色¹¹とする

1 Advanced Research Projects Agency

2 National Science Foundation

3 Computer Science NETwork

4 Japan University NETwork

5 我が国においては、1993年に初めて商用利用が開始された。

6 デジタル加入者回線：Digital Subscriber Line

7 Fiber To The Home

8 「IPv4アドレス世界共通在庫枯渇への対応」（平成23年2月 総務省プレスリリース）

9 現在のインターネットのIPアドレスのバージョンはIPv4であるが、IPv6では、IPv4で識別可能なIPアドレス数（4,294,967,296）の4乗という天文学的規模に拡大すること等が可能である。

10 Social Networking Service

11 平成18年版情報通信白書

Web2.0の概念¹が2000年代中盤から台頭してきた。これ以降、HTML²などの知識がない人でも、手軽にネットワーク上に情報を発信できるようになり、ブログやSNS上の個人の日記や写真、音声、映像、Twitter上のつぶやきなど、様々な情報がネットワーク上に蓄積されるようになった。さらに、あらゆるモノがインターネットを通じてつながるIoTの登場により、ネットワーク上のデータの量は、これまでになく膨大なものとなっており、ビッグデータとして利用可能となっている。ここで発生してくるデータは、メールやインターネット検索など、パソコン・スマートフォンや携帯電話によってインターネット上に発信される情報だけでなく、GPS端末による位置情報、交通系ICカードによる乗車履歴、各種センサから採取される温度や圧力などの物理量、会員カード等による購買履歴など、あらゆる事象がデータ化³されたものである。

ビッグデータを用いることで、様々な価値の創出や新たな知見の獲得が可能となる。例えば、我が国においては、カルチュア・コンビニエンス・クラブが運営する「Tポイント」では、131社・約45万店舗の提携先から、5,556万人の会員の所在地や利用ポイントの状況やリピート率、購入単価の4つのビッグデータを提携企業に提供している。こうしたビッグデータは、提携企業における



宮城県名取市～岩沼市にかけての避難／救援行動
青：避難した人、緑：地震後浸水域に入った人、
赤：浸水域にとどまった人
写真提供：NHK

販売戦略に活用されている。さらに、日本放送協会（NHK）では、「震災ビッグデータ」プロジェクトの中で、東日本大震災における浸水域の人口と人々の移動の状況を、携帯電話の位置情報と地図データや時間情報から分析した結果、震災発生後、人々が津波浸水域にある自宅に、家族を助けに戻る「ピックアップ行動」を取る傾向にあったことが明らかになるなど、新たな知見が得られており、こうした知見が自治体における今後の防災計画の策定や施策の企画立案等に活用されている。

ビッグデータ時代の実現には、コンピュータの高速化、メモリの大容量化、ソフトウェアの高度化等が貢献しているが、分散コンピューティング（あるいはグリッドコンピューティング）がキー技術の一つと言える⁴。ビッグデータのように膨大な量のデータを処理するためには、巨大な計算資源が必要となる。分散コンピューティングでは、ネットワーク上に存在する、基本的に一つ一つは汎用の無数のコンピュータを巨大な計算資源として利用することにより、ビッグデータ等の解析を可能とするものである。さらに、これら分散コンピューティングの仕組みが洗練されるなどに伴い、これらのリソースが外部向けサービスとしても提供されるようになってきており、結果としてユーザーが自前でサーバ環境などを用意・構築することなく、必要な計算資源を、必要なときに、必要なだけ、利用すること（クラウドコンピューティング）も可能となっている。

¹ 2005年頃に、テクノロジー関連のマニュアルや書籍の出版社である米国のオライリー・メディア社のCEO、ティム・オライリー氏が提唱した概念

² Hyper Text Markup Language

³ データ化とは、現象を数値化された形式に変換し、集計・分析が可能な状態にすることと言える。

⁴ 坂内正夫監修「ビッグデータを開拓せよ」（2015年9月）角川学芸出版、城田真琴「ビッグデータの衝撃」（2012年7月）東洋経済新報社

（3）ロボット技術の発展の歴史

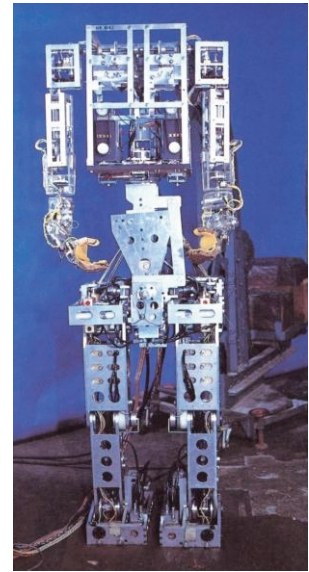
ロボットの歴史は、主に18世紀から19世紀にかけてヨーロッパで作られたオートマタや江戸時代に盛んに作られたからくり人形がルーツになる。20世紀に入ると、1954年に、米国でもものをつかんだり置いたりするロボットの特許が取得され、産業用ロボットの概念の登場となった。第二次世界大戦時には、フィードバック制御¹をはじめとする制御技術が発達し、より正確な動作が可能となった。

1973年には早稲田大学において世界で初めてヒューマノイド型ロボット「WABOT-1」が開発されたほか、1969年に川崎重工業株式会社が我が国初となる産業用ロボット「川崎ユニメート2000型」を発売し、1980年代に普及が進んだ。また、産業用ロボットの普及と並んで、日常生活や災害現場などにおける人では担いにくい作業の代行や義足や義手など人の失われた機能の代行といった分野においても、実用化が進んだ。

1999年には、ペット型ロボット「AIBO」がソニー株式会社から発売された。AIBOは、あらかじめ組み込まれたプログラムによって、経験やユーザーの教育から学習する機械学習機能を搭載しており、ユーザーに癒やしを与えるだけでなく、ロボットに「心」を感じさせるものとなった。2000年には、滑らかに二足歩行できるロボット「ASIMO」が本田技研工業株式会社から発表された。ASIMOは、次の動きをリアルタイムに予測してあらかじめ重心を移動させる予測運動制御技術の導入により、ゼロモーメントポイント²を制御することで滑らかに動作できる。ASIMOは2004年には走ることができるようになり、2007年には複数台がネットワークを介して効率よく連携できるようになった。

近年では、急速な高齢化の進展により介護サービスのニーズが増加していることを踏まえ、山海嘉之・筑波大学教授によって開発された、医療・福祉現場において、ヒトの身体機能の改善・補助・拡張に資する「ロボットスーツHAL³」の社会実装が進められている。また、東京電力福島第一原子力発電所事故においては、高放射線量やがれきにより人間による作業が困難であることから、原子炉建屋内部の状況把握、がれき撤去などにロボットが活用され始めている。

また、産業用ロボットに関しては、人との共同作業が可能な人間協調型のロボットが実用化されてきている。例えば、2015年に登場したファナック株式会社の協働ロボット「CR-35iA」やライフロボティクス株式会社による「コ・ロボット CORO」は、安全柵なしで人と共同作業が可能である。さらに、2011年に登場したカワダロボティクスによる「NEXTAGE」は、人間を



WABOT-1

提供：早稲田大学ヒューマノイド研究所



ASIMO

提供：本田技研工業

1 自らの出力の結果を次の出力のための計算に組み込む制御方式
2 二足歩行の際に重力と慣性力を加えた合力が路面と交わる点。ZMPと略式標記される。
3 平成27年版科学技術白書において詳述している。

模した上半身の構造を持っており、従来は人が行っていた作業をそのまま代替することができる。

さらに、私たちの日々の生活にもロボットの活用が浸透してきている。例えば、全自動洗濯機や食洗機、駅の自動改札やゆりかもめなども、広義のロボットと言える。2010年からは、米国iRobot社から掃除ロボット「ルンバ」が我が国でも販売され、我が国のメーカーからも掃除ロボットが相次いで発売された。さらに、2015年には、ソフトバンク株式会社から、感情認識パーソナルロボット「Pepper」が登場した。

また、ロボットと人との関係についての研究も進められている。大阪大学大学院の石黒浩教授は、人とのインターフェースとしてのロボットをより人間らしく近づけていくに当たり、「不気味の谷」を克服するための研究を実施している。既に外見に関しては、人間と呼ばれるに値する状況まで来ていると評価されるが、はにかむ、苦笑いするといった微妙な表情を再現するのは今でも難しいという。こうしたアンドロイドは、テレビ番組や広告等のメディアにも使われ始めており、ロボットの新たな活用方法が模索されている。

日本工業規格による産業用ロボットの定義等からすると、従来、ロボットとは、センサ、知能・制御系、駆動系の3要素を備えた機械であるとされる。しかしながら、平成27年2月に取りまとめられた「ロボット新戦略」では、今後ロボットが革新的な進化を遂げる可能性があるため、従来の定義のみでは、実態を捉えきれなくなる可能性がある」と指摘されている。



ヒト型産業用ロボットNEXTAGE
提供：グローリー株式会社



石黒教授と教授のアンドロイド、ジェミノイドH1-4
提供：大阪大学

(4) 人工知能技術の発展の歴史

人工知能技術は、これまでに2度のブームと冬の時代を迎え、現在、3度目のブームを迎えていると言われている。2011年には、米国アイ・ビー・エム社による人工知能「Watson」が米国のクイズ番組で歴代のチャンピオンに勝利したことや、2012年には将棋、2016年には囲碁において、人工知能がプロ棋士を破るなど、人間を凌駕する能力を見せている。さらに、我が国においても、2011年から国立情報学研究所が中心となり「ロボットは東大に入れるかプロジェクト」が実施されており、論旨要約、深い言語理解、人・ロボット協働など統合的人工知能の突破口となる要素技術の研究開発を産学官連携で推進しており、2021年度に東京大学入試を突破することを目標としている。

人工知能という言葉が生まれたのは、1956年に開催された、「ダートマス会議」であった。第1次人工知能ブームは、1956年～1960年代とされており、この頃の人工知能は、患者との対話を行うプログラムを通じた自然言語処理や、数学の定理証明に代表される推論・探索などの成果を創出した。

1980年代に到来した第2次人工知能ブームでは、人工知能に対してたくさんのデータを知識源として与えておくことで、現実の問題に対して適切な解決方法を導けるような、エキスパートシ

システムの開発が進められた。我が国においても、1982年に、世界に先駆けて「第5世代コンピュータ計画」が実施され、我が国における人工知能研究の基盤の強化に貢献した。

こうした人工知能は、人間があらかじめコンピュータに教えたルール（プログラム）の中では正しく動作するものの、突発的事項など現実には起こり得る問題に対応できなかった。さらに、例えば「リンゴは果物である」といったように、現実にある森羅万象の定義を機械が理解することは困難であり、人間が常に定義をコンピュータに対して与えなければならないなどの課題があった。

その後、インターネットの発達に伴い、ネットワーク上に膨大な量のビッグデータが生み出されたことや、スーパーコンピュータをはじめコンピュータの計算能力が飛躍的に向上した背景もあり、大量のデータの中から、最も確率の高い解を探し出すという考え方に基づく統計・確率的な考え方が導入され、人工知能の飛躍的な高度化が実現した。こうした人工知能の高度化に大きく貢献したのが機械学習技術の発展である。

機械学習技術は、人が経験によって学習するのと同様、人工知能が大量のデータを処理する中から、ルールや知識を学習するというものである。例えば、スパムメールの分類の際、人工知能にはどのメールがスパムか、という例を与え、人工知能自身にどのように判断するかを学習させるというものである。なお、機械学習は、正解を導く精度は高いが、確率的に解を導いている以上、100%正しいという絶対的に正しい知識には到達することはできないことでも知られている。

そして、2012年、この機械学習の適用可能性を飛躍的に向上させるディープラーニング（深層学習）が登場した。ディープラーニングは、人間の脳を模した人工ニューラルネットワーク¹を大規模化したもので、ニューロンでの情報処理を経るたびに更に高次の概念を獲得していくという学習手法である。この技術によって、例えば、画像認識に適用すると、コンピュータが対象物の画像的な概念を獲得することが可能となりつつある。2012年に米国グーグル社とスタンフォード大学が実施した実験では、コンピュータにインターネット上の大量の画像をランダムに読み込ませた結果、コンピュータ上に構築されたニューラルネットワークが、画像における猫の概念を獲得したと報告されている。

ディープラーニングの登場により、これまで実現できなかったことが実現できるようになっている。これまでの機械は、産業用ロボットに代表されるように、工場内のような、変化のない・少ない現場において、あらかじめ決められた作業を担ってきたが、ディープラーニングにより、これまでの人工知能によっては実現できなかった、現実空間において自然物を対象とした様々な作業が可能となると考えられている。さらに、人工知能が現実空間に対して作用するに当たっては、人工知能が環境の状態を観測して行動し、試行錯誤で成功したら正の報酬、失敗したら負の報酬を与える、といったプロセスを繰り返すことによって、最良の行動連鎖を学習していく「強化学習」(Reinforcement Learning) が有効であり、ディープラーニングと組み合わせることによって、人工知能の搭載されたロボット等の動作を飛躍的に向上させる可能性を秘めている。

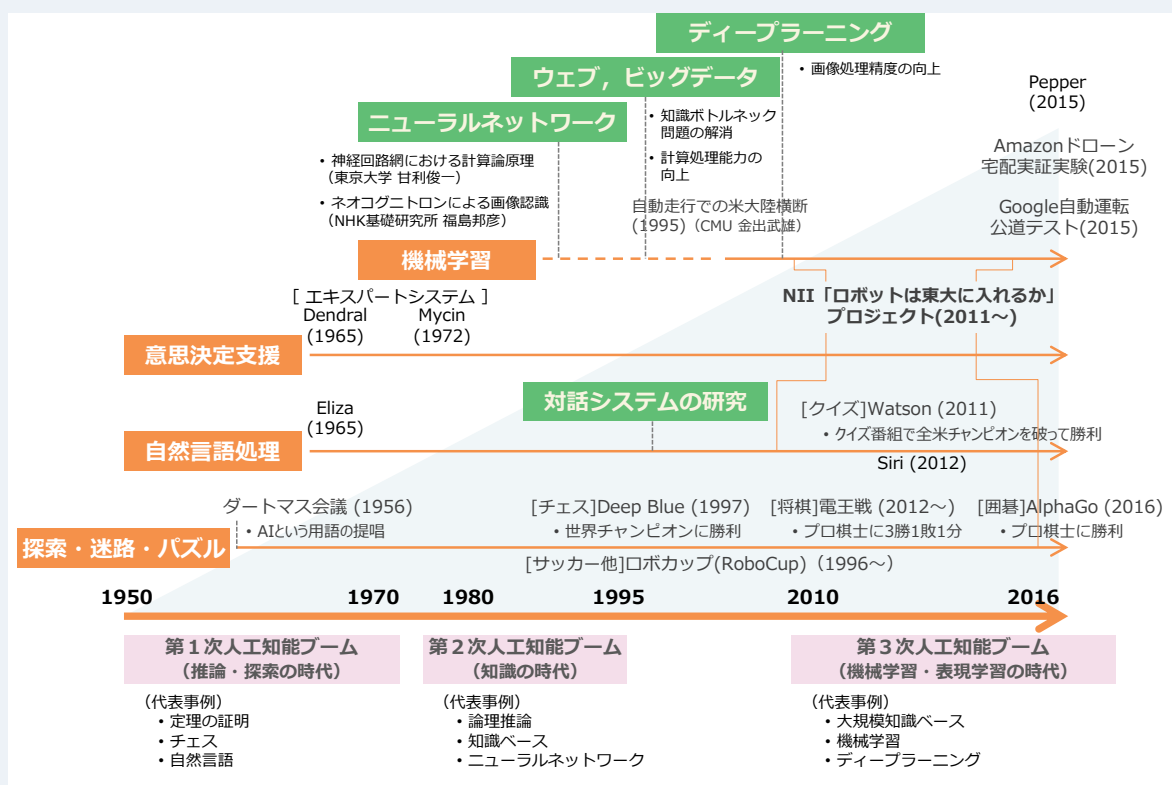
現在のディープラーニングは、甘利俊一氏²らの研究グループによる確率的勾配法や、福島邦彦³氏らの研究グループによるニューラルネットが源流となっており、人工知能分野における基礎研究には、我が国の研究者が貢献している（第1-2-2図）。

1 脳をモデル化することで新しい情報処理モデルを構築しようという枠組み。人間の脳は膨大な数の神経細胞（ニューロン）と接続部位（シナプス）等から構成されているが、それらが、情報を吸収し学習していくメカニズムを、人工的にコンピュータ上で再現する試みである。

2 理化学研究所脳科学総合研究センター特別顧問・公立はこだて未来大学客員教授、東京大学名誉教授

3 ファジシステム研究所・特別研究員

第1-2-2図／人工知能技術の歴史



資料：松尾豊東京大学准教授資料、科学技術・学術政策研究所（NISTEP）の資料を参考に文部科学省作成

コラム 1-3

ディープラーニングとは何か

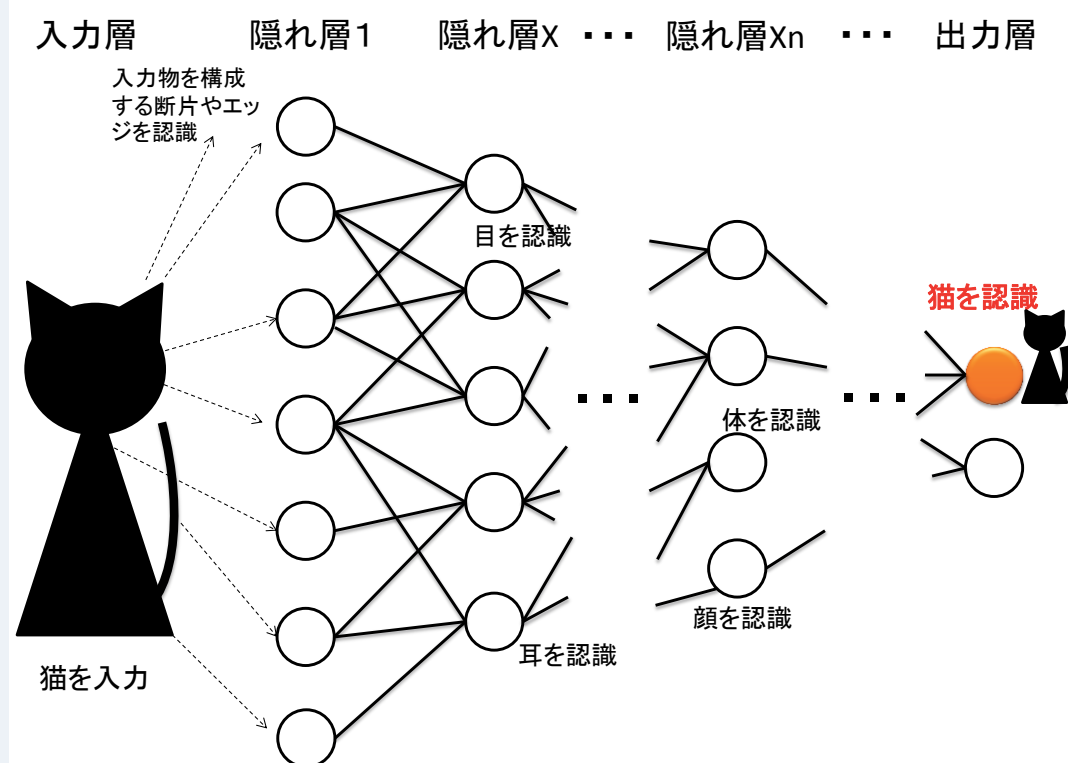
最近、ディープラーニングという言葉を目にする機会が増えてきてはいないだろうか。ディープラーニングは、人工知能研究における50年来のブレイクスルーと言われており、人工知能の可能性を飛躍的に向上させるものである。

ディープラーニングは、カナダのトロント大学のヒントン教授らによって生み出された、神経科学研究の成果（「ニューラルネットワーク」）を人工知能研究に応用して誕生した技術である。ディープラーニングは、2006年に同教授により提唱され、2012年に開催された世界的な画像認識のコンペティションで、ディープラーニング技術を用いたトロント大学が、初登場ながら圧倒的な成績を残し優勝したことにより脚光を浴びた。ニューラルネットワークとは、脳機能に見られる幾つかの特性を計算機上のシミュレーションによって表現することを目指した数学モデルである。

ディープラーニングにおけるニューラルネットワークは、入力層、隠れ層、出力層の3層からなり、従来のニューラルネットワークの入力層、隠れ層、出力層のうち、隠れ層を多層化させたものである。入力層に入力された対象物の情報は抽象化され、まずは、入力層に近い隠れ層において、それらを構成する断片的な情報を認識していくこととなる。断片的な情報とは、例えば、画像を認識する場合、斜めの線や曲線など、単純なストラクチャに関する概念である。このように認識された低次の概念は、次の層に行くと、そのほかの隠れ層で認識された概念と組み合わせられ、より高度な概念を認識できるようになる。例えば、猫の耳を構成する直線や曲線のエッジなどを認識し、それらの認識を合わせて猫の耳を認識できるようになる、同様に耳や目、口などを認識し、次に猫の顔を認識する、といった具合である。

ディープラーニングは、多数のデータによる学習を繰り返すことで、特定の特徴量を抽出し、画像識別、音声認識、制御等を行うことにより、一部の分野で人間に匹敵する高度な成果が得られている機械学習の手法である。

■ 第1-2-3図／ディープラーニングによる画像認識のイメージ



資料：松尾豊「人工知能は人間を超えるか ディープラーニングの先にあるもの」を参考に文部科学省作成

2 我が国の強みと弱み

人工知能、ビッグデータ、IoTの発展に伴い、我が国の経済社会に大きな変化がもたらされつつある中で、我が国の強みと弱みを分析し、今後の取組の方向性について考察する。

① 我が国の持つ強み

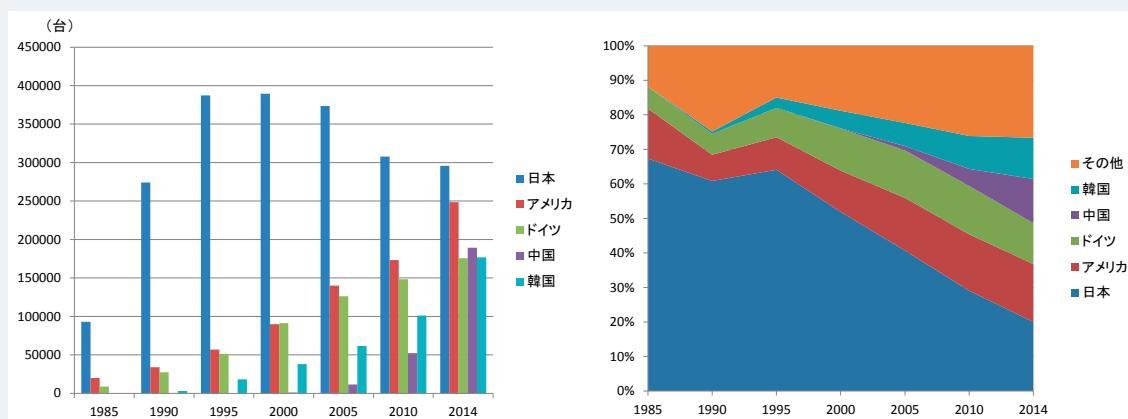
我が国は、戦後、欧米諸国の産業にキャッチアップすることを目指し、先行する国々の技術を基礎として、生産効率を高め、洗練された製品を生み出す製造技術、応用技術を発展させ高度成長を遂げた。こうした戦後の発展の歴史もあり、我が国はものづくり分野において競争力を有していると言える。

（ロボット分野）

産業用ロボットについて、出荷額は約 3,400 億円、世界シェアの約5割を占めている¹。さらに、稼働台数（ストックベース）についても、2014年末時点において約30万台、世界シェアの約20%を占めており、世界第1位の実績となっている（第1-2-4図）。

¹ ロボット新戦略（平成27年2月 日本経済再生本部）

■第1-2-4図／世界における産業用ロボットの稼働台数とシェア

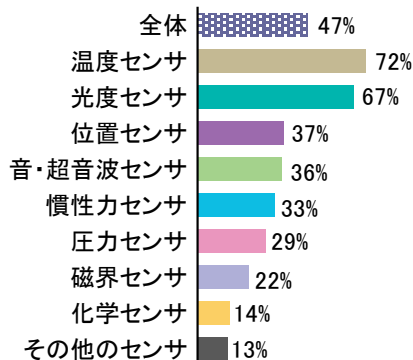


資料：一般社団法人日本ロボット工業会資料（出所：国際ロボット連盟（IFR）World Robotics 2015 Industrial Robots）より文部科学省作成

（センサデバイス）

センサデバイスに関しては、世界全体の約半分のシェアを我が国が確保しているほか、特に光度・温度センサに強みを有しており、世界シェアの約7割を日系企業で占めている（第1-2-5図）。

■第1-2-5図／世界のセンサ種類別日系企業のシェア（2014年、金額ベース）



（出典）電子情報技術産業協会「電子情報産業の世界生産見通し」（2015年12月）を基に日本政策投資銀行作成
資料：「1兆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～」（2016年1月 日本政策投資銀行）

（ネットワークインフラ）

また、我が国のインターネット・ブロードバンド普及率は世界的に見ても高い¹だけでなく、伝送容量や大容量マルチコアファイバー製造・要素技術、100Gbpsデジタル信号処理回路の実用化など光通信技術は世界最高レベルにある²。

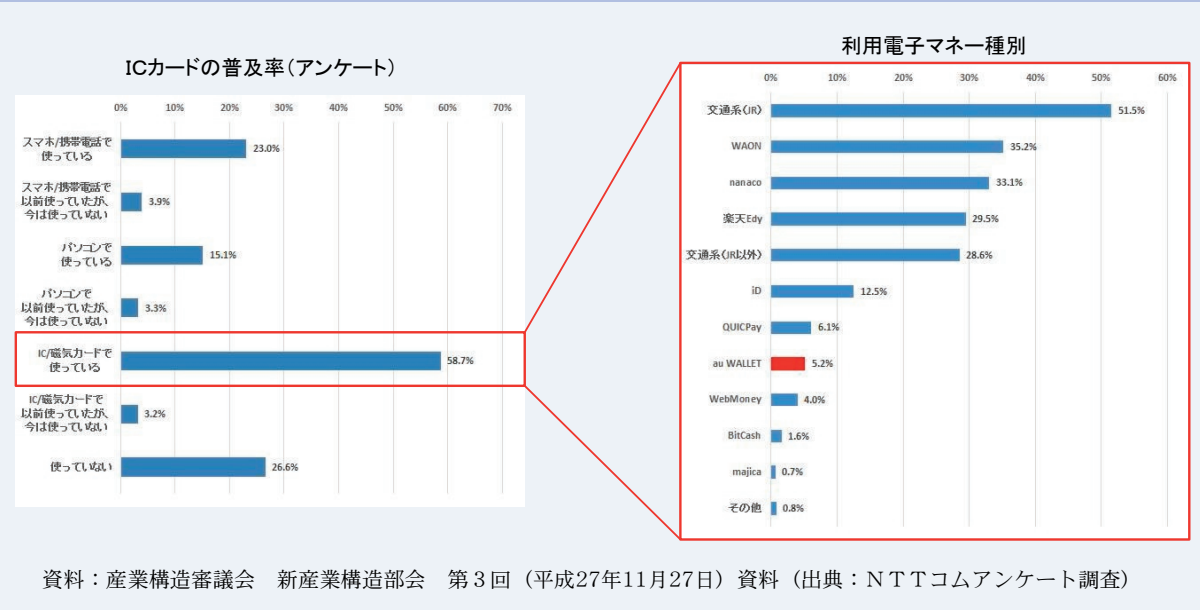
¹ 産業構造審議会 新産業構造部会 第3回（平成27年11月27日）資料（出典：ITU Web、Akamai Technologies「インターネットの現状（2012年第1四半期版）」）

² 「新たな情報通信戦略の在り方 中間答申」（平成27年7月28日 情報通信審議会）

（リアルデータ）

こうした状況の中で、我が国におけるＩＣカードの普及率は58.7%と広がっており、電子マネーの種別は交通系（ＪＲ）が最多で半数以上が利用していることから、個別のＩＣカードによって蓄積されたデータ数は相当数になると考えられる（第1-2-6図）。さらに、世界のセンサの4分の1は我が国において使われているとされている¹こととも相まって、現場におけるビッグデータ（リアルデータ）の保有については我が国の強みと言える。

■ 第1-2-6図／電子マネー普及率と交通系電子マネーの広がり



（コンピュータの開発能力）

加えて、こうしたビッグデータを解析するには欠かせないコンピュータの開発能力も高く、特に、スーパーコンピュータに関して計算能力・計算効率ともに我が国のスーパーコンピュータ「京^{けい}」が世界1位²になっていることも、我が国の強みである。

② 我が国の弱み

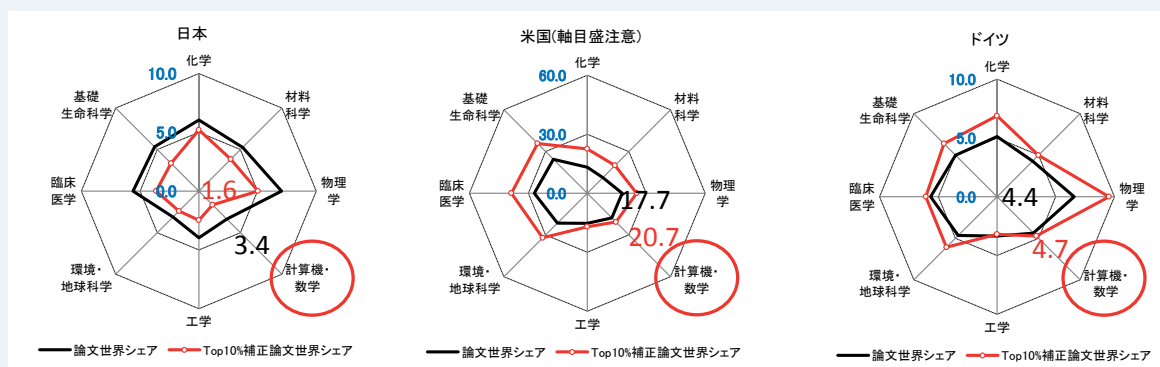
（情報科学技術分野の論文シェアと人材の規模）

我が国の情報科学技術分野についてみると、計算機科学、数学の論文総数の世界シェアは、米国17.7%、ドイツ4.4%に比較して、我が国は3.4%と小さいほか、質の高い論文を示す指標の一つであるTop10%補正論文の世界シェアについても、米国20.7%、ドイツ4.7%に比較して、我が国は1.6%と小さいことがわかる。（第1-2-7図）。

1 「新たな情報通信戦略の在り方 中間答申」（平成27年7月28日 情報通信審議会）

2 「2期連続でスーパーコンピュータ「京^{けい}」がGraph500で世界第1位を獲得ービッグデータの処理で重要となるグラフ解析でも最高レベルの評価ー」（平成27年11月18日 理化学研究所）（出典：Graph500（日本時間11月18日発表））

■第1-2-7図／主要国の分野ごとの論文シェアとTop10%補正論文シェアの比較



(単位：％、2011-2013年（P Y）、分数カウント法）

注：article, reviewを分析対象とし、分数カウント法により分析。年の集計は出版年（Publication year, P Y）を用いた。被引用数は、2014年末の値を用いている。

物理学：物理学、宇宙科学

計算機・数学：計算機科学、数学

環境・地球科学：環境/生態学、地球科学

臨床医学：臨床医学、精神医学/心理学

基礎生命科学：農業科学、生物学・生科学、免疫学、微生物学、分子生物学・遺伝学、神経科学・行動学、薬理学・毒性学、植物・動物学

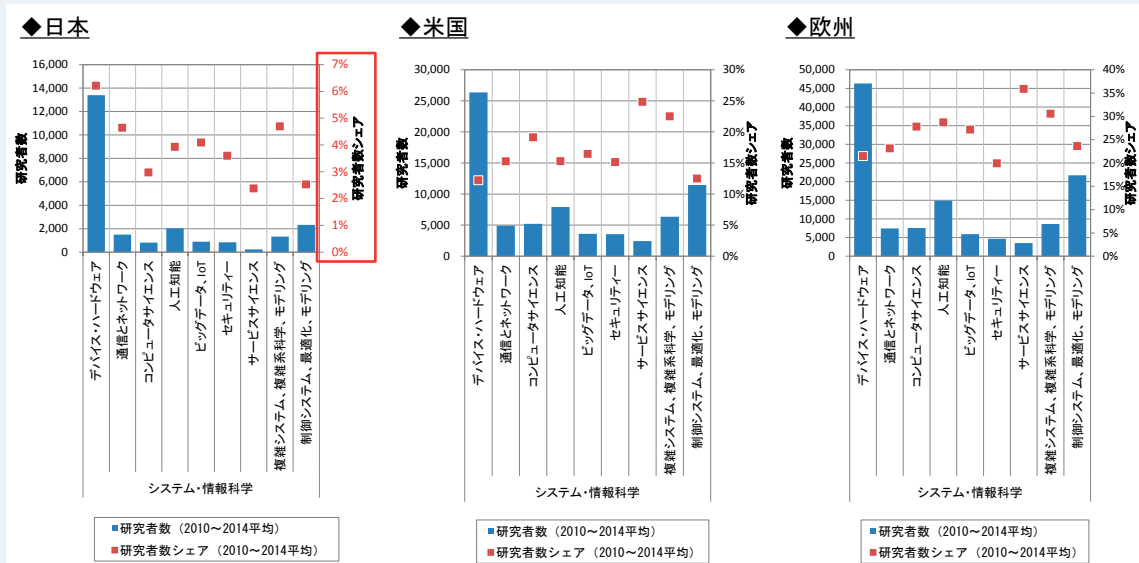
(出典) トムソン・ロイター Web of Science XML (S C I E, 2014年末バージョン) を基に、科学技術・学術政策研究所が集計。

資料：「科学技術指標2015」調査資料-238 (平成27年8月 科学技術・学術政策研究所)

人材については、我が国において最も規模の大きいデバイス・ハードウェア分野においても1万3,397人となっているものの、同分野における米国2万6,350人、欧州4万6,316人に比較しても小さいことがわかる¹。特に、インターネットを用いたビジネスモデル特許分野を対象とする「サービスサイエンス」領域においては、我が国の研究者は233人であるのに対し、米国は5,216人、欧州は7,575人となっており、我が国の研究者の量的規模は小さい（第1-2-8図）。

¹ ただし、欧州は国同士の比較となっていないことに留意が必要である。例えば、ドイツにおいては、デバイス・ハードウェア分野は7,525人、サービスサイエンス分野は471人となっている。

第1-2-8図／情報科学技術分野の人材分布の国際比較

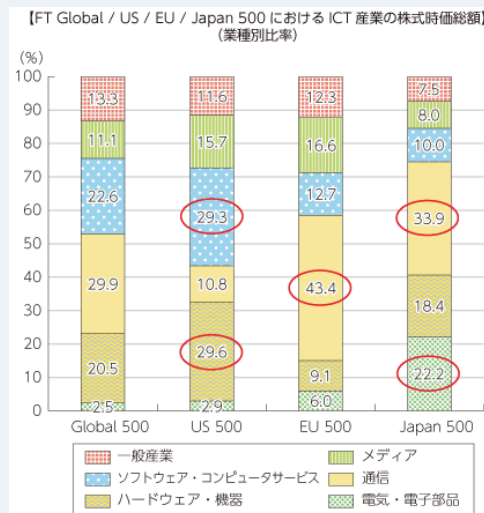


注1：ここでの研究者数とは論文の著者（著者ID）の数であり、各年の論文著者数を2010～2014年分で平均したもの。
 注2：研究者シェアとは、当該研究領域における全世界の研究者のうち、当該国籍の研究者の割合を示す。
 出所：論文データベースScopus
 提供：科学技術振興機構研究開発戦略センター

世界においては、IoT、ビッグデータ、人工知能をいち早くビジネスに生かそうとする動きが活発化している。第1章第2節で紹介した欧米企業の取組はその一部であり、新たなビジネスモデルをいち早く構築した者が、国際競争を制する時代であると言える。

このような状況の中で、我が国の情報通信産業の構成比率を見ると、米国はソフトウェア・コンピュータサービス及びハードウェア・機器がそれぞれ3割程度を占めるのに対して、我が国は通信が3割強、電気・電子部品が2割強であり、ソフトウェア・コンピュータサービスの割合が他国と比較しても低い状況にある（第1-2-9図）。

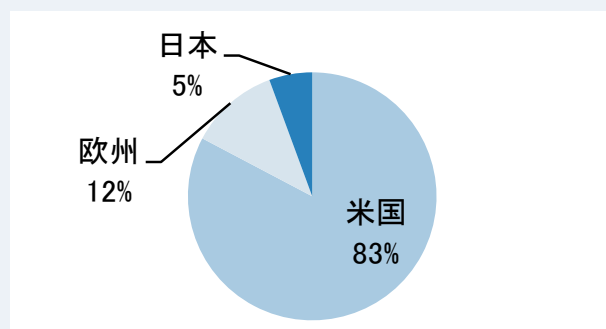
第1-2-9図／ICT分野の構成比率の国・地域別比較



資料：「平成26年版情報通信白書」（総務省）第2章図表2-2-1-4（41ページ）

さらに、ビジネスモデルの構築や新たなコンテンツの創造に当たっては、欧米が圧倒的に強く、我が国は出後れていると言わざるを得ない。例えば、ビジネスインテリジェンスやビジネスアナリティクスに関する特許の保有件数シェアは、米国企業が83%、欧州企業が12%、日本が5%となっており、米国企業が圧倒的である（第1-2-10図）。

■第1-2-10図／ビジネスインテリジェンスとビジネスアナリティクスの米国特許保有件数シェア



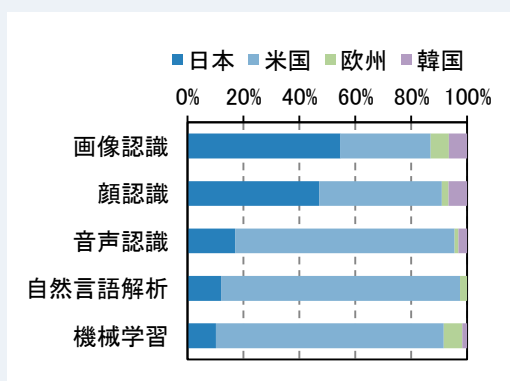
注：ビジネスインテリジェンスとビジネスアナリティクスの特許として、経営戦略策定、パフォーマンス分析、経営資源配分、ワークフロー分析、リスク管理、市場分析、予測分析、データウェアハウス、オンライン分析処理、抽出・変換・ロード処理などに関する特許を対象とした。

（出典）（株）三菱総合研究所（旧知財情報サービス）（株）提供データ（2012年12月末時点、件数上位20社の国籍シェア）を基に日本政策投資銀行作成

資料：「1兆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～」（2016年1月 日本政策投資銀行）

加えて、人工知能の中核を成す自然言語解析や機械学習技術といったデータ分析技術に係る特許の保有件数シェアについても、米国企業がそれぞれ圧倒的である（第1-2-11図）。

■第1-2-11図／データ分析技術の国籍別特許保有件数シェア



（出典）（株）三菱総合研究所（旧知財情報サービス）（株）提供データ（2014年12月末時点）を基に日本政策投資銀行作成

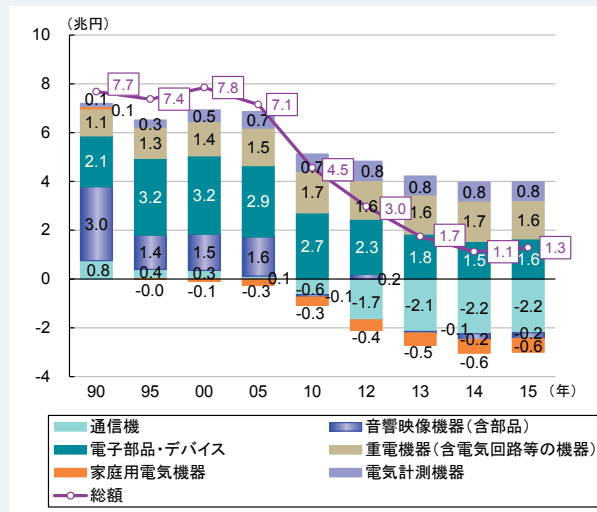
資料：「1兆個のセンサによる社会変革 ～トリリオン・センサ・サミット2015報告～」（2016年1月 日本政策投資銀行）

さらに、我が国の強みが、弱みになってしまうといった懸念もある。ものづくり分野において、コモディティ化が進むことでアジア各国の優位性が増し、最終的には我が国の弱みになってしまうという懸念も存在する。

日本政策投資銀行の分析では、我が国の貿易黒字は、90年代以降、音響映像機器などの完成品

の輸出が減少する一方で、電子部品・デバイスや電気回路への輸出ヘシフトした。2000年代半ばを境に、薄型テレビや録画機器等の輸入が増加し、音響映像機器の貿易黒字がほぼなくなっている。さらに、2010年から2012年にかけては、スマートフォンの輸入が急増して通信機で大幅な貿易赤字を計上するようになり、さらに、電子部品・デバイスでも貿易黒字を稼ぐ力が弱まっている状況にある（第1-2-12図）。

■ 第1-2-12図／電気機器の貿易収支における主要部門別内訳



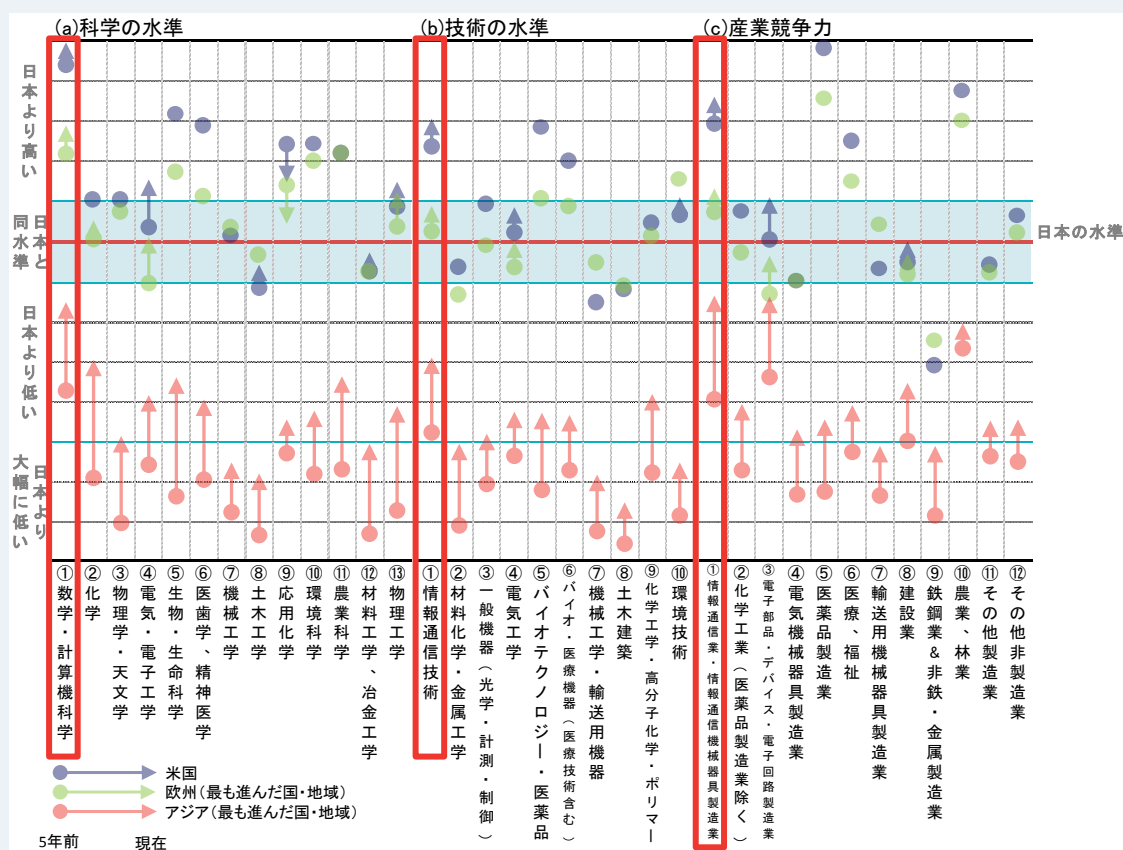
（出典）財務省「貿易統計」を基に日本政策投資銀行作成

資料：「日本の電子部品産業の強みと競争力強化に向けた方策」（2014年9月 日本政策投資銀行）

こうしたことから、これまで我が国が強みとしていた分野の科学技術水準や産業競争力がアジアを中心とする新興国にキャッチアップされつつあることもあり（第1-2-13図）、機器のコモディティ化が進んでいることが示唆される。超スマート社会の実現を支える基盤となる電子部品・デバイス分野では、まだ我が国においては貿易黒字を稼いでいるものの、今後、新興国等からの輸入が増えるに従い、貿易黒字を稼ぐ力が弱まっていく懸念があり、このままでは我が国の強み、稼ぐ力としていた分野では稼げなくなっていることを示唆している。

さらに、③で述べるように、製造業を含む我が国企業においては、IoTの活用等を通じたシステム化が進んでいない一方で、欧米においてこういった取組が進むことで、我が国の競争力の低下が免れない状況にある。

■第1-2-13図／科学技術の水準と産業競争力



資料：「科学技術の状況に係る総合的意識調査（NISTEP 定点調査2015）」NISTEP REPORT No.166（平成28年3月 科学技術・学術政策研究所）

③ 今後の取組の方向性

米国、英国、ドイツ、フランス、インド、南アフリカ、中国の企業経営幹部250名を対象とした米国ゼネラル・エレクトリック社及び米国アクセンチュア社の行った調査「Industrial Internet Insights for 2015」によれば、経営幹部の66%は、Industrial Internet戦略を推進するに当たり、「ビッグデータを活用しなかった場合、今後1年から3年以内に現在の市場ポジションを失うことになる」と考えているとされている。さらに、同調査においては、88%の回答者は「ビッグデータ活用が自社にとっての最優先事項である」と回答したとされている。

さらに、世界では、インダストリアル・インターネットを主導する米国ゼネラル・エレクトリック社をはじめとする欧米企業を中心に多数のアライアンスが立ち上がっており、I o Tの規格化に向けた活動が活発化しているが、その中で我が国の企業は主体的な役割を果たしているとは言えない状況にある（第1-2-14図）。

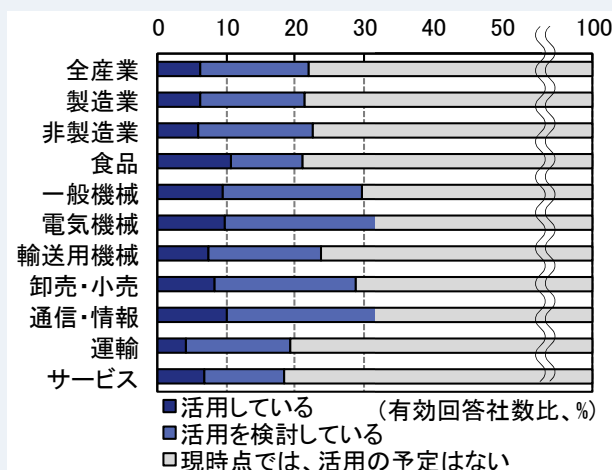
■ 第1-2-14図／世界で進むIoT規格化の状況

1	Industrial Internet Consortium	Allseen Alliance	Open Interconnect Consortium	IP500 Alliance	Thread Group
活動概要	業界横断的な利用標準規格の検討(エネルギー、医療、製造、公共、交通の5分野)	IoTフレームワーク「Alljoyn」の開発・普及	IoTフレームワーク「IoTivity」の開発・普及	メッシュネットワーク規格「IP500」の普及促進	メッシュネットワーク規格「Thread」の普及促進
設立年月	2014年3月	2013年12月	2014年7月	2007年(日本拠点を2015年2月に開設)	2014年7月
設立主要メンバー	AT&T、Cisco Systems、GE、IBM、Intel	Haier、LG Electronics、Qualcomm、Silicon Image、TP-LINK、パナソニック、シャープ	Atmel、Broadcom、Dell、Intel、Samsung、Wind River	Assa Abloy、Bosch、GEZE、Honeywell、Siemens	Samsung、ARM、Big Ass Fans、Freescale、Silicon Laboratories、Yale Security、Nest
主な会員企業	Accenture、Black Berry、Bosch、DELL、EMC、HP、Microsoft、Samsung、SAP、Symantec、Tata、トヨタ自動車、富士電機、富士ゼロックス、富士通、三菱電機、NEC、日立製作所など	Microsoft、Cisco、Lenovo、Symantec、Trend Micro、HTC、Bosch、ソニーなど	Cisco、GE Software、MEDIATEK、HP、Siemens、ADT、Honeywell、EyeBall Networks、Acer、Lenovo、McAfee、Realtek、Wind Riverなど	ABI、Belimo、DATA LINC、DORMA、Gisinger、Gunnebo、Hekatron、JBO、LINK、Regent、Orange、SimonsVoss、STG-Beikirch、Tyco、UTC Fire&Security、Wago、Xtrails、オムロン、豊田通商など	Somfy、Tyco、Analog Devices、Atmel、Philips、HTC、Huawei、村田製作所、ダイキンなど

資料：産業構造審議会 新産業構造部会 第3回（平成27年11月27日）資料（出典：ITPro記事）

その一方で、我が国企業における人工知能、ビッグデータ、IoTの活用状況は、どの業種においても「活用している」及び「活用を検討している」という回答は合わせて、おおむね20～30%と低調である（第1-2-15図）。

■ 第1-2-15図／IoT／ビッグデータの活用状況

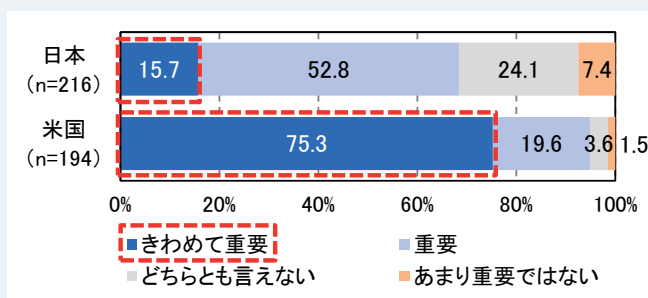


(出典) 日本政策投資銀行「企業行動に関する意識調査2015」回答数は資本金10億円以上の製造業520社、非製造業668社、食品38社、一般機械74社、電気機械62社、輸送用機械55社、卸売・小売135社、通信・放送89社、運輸144社、サービス60社

資料：「電気機械の設備投資動向～得意分野で成長投資に踏み出す～」(2015年9月 日本政策投資銀行)

さらに、我が国の企業における情報システムへの投資の重要性に対する認識も、「極めて重要」と回答した企業は、米国では全体の75.3%に及ぶ一方で、我が国では15.7%となっており、米国に比べて低い状況である（第1-2-16図）。

■第1-2-16図／情報システム投資の重要性



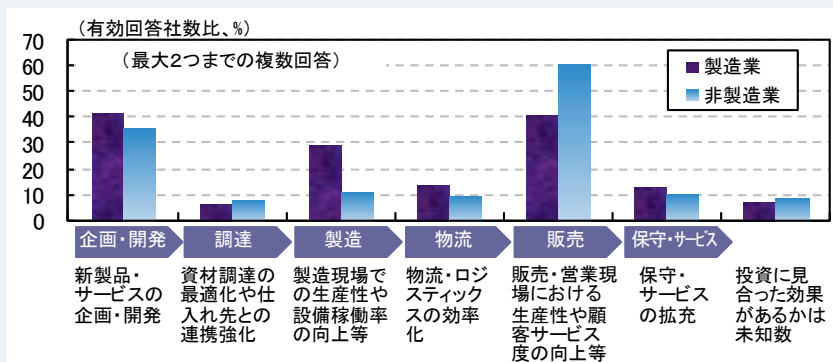
（注）調査対象：日米民間の経営者及びIT部門以外（事業部、営業、マーケティング、経営企画）のマネージャー職以上

（出典）「ITを活用した経営に対する日米企業の相違分析」（2013年10月 J E I T A及びIDCジャパン）により日本政策投資銀行作成

資料：「Internet of Things（IoT）で機器をつなげて新市場の創出へ」（2014年2月 日本政策投資銀行）

さらに、日本政策投資銀行の分析によれば、現時点においてIoT／ビッグデータの活用している又は活用を検討している企業では、企画・開発及び販売といった面において効果的であると認識されており、調達、物流といった自社グループ内だけで完結しない領域では比較的低くなっている（第1-2-17図）。しかしながら、第1章第2節の海外動向に示すとおり、物流や調達といった領域においてもIoT／ビッグデータを用いた産業構造の変革が起きつつあることから、我が国においても、川上から川下まで、バリューチェーンをシステム化していくことに課題が存在していることが示唆されている。

■第1-2-17図／IoT／ビッグデータの取組で効果がある／期待される分野



（出典）日本政策投資銀行「企業行動に関する意識調査2015」

回答数は製造業109社、非製造業149社。IoT／ビッグデータを活用している、又は、活用を検討している企業による回答

資料：「IoTによる製造業の変革 ドイツで進むIndustrie 4.0の取り組み」（2015年8月 日本政策投資銀行）

これまで述べてきた、我が国の強みと弱みに関してまとめると、（第1-2-18図）のようになると言える。これらを総括すれば、我が国の強みであるものづくりを^い活かし、医療や交通といった幅広い分野において既に蓄積されているリアルデータを解析し、さらに人工知能と現実空間をつなぐロボット技術を組み合わせ、現実空間の様々な課題の解決を図るとともに、情報科学技術分野における研究開発や人材育成を強化していくことが重要である。

特に、近年急激に発展しつつある技術を取り入れつつ、これまでの強みであるものづくりを^い活

海外企業の動向等も踏まえれば、今こそ手を打っていく必要がある。第5期基本計画を踏まえ、様々な分野における人工知能／ビッグデータ／IoTの積極的な活用と、バリューチェーンのシステム化といった取組を進め、新たな価値やサービスの創出に向け、我が国における産業構造の転換等を図っていくべきである。

強 み	弱 み
○産業用ロボットの出荷額、世界シェアは世界1位。稼働台数は約30万台、世界シェアの約20%をと世界第1位(2014年末時点)。	○情報分野の論文の世界シェアや人材の量的規模は欧米と比較して小さい。
○センサデバイスの世界全体の約半分のシェアを日系企業が確保。特に光度・温度センサは世界シェアの約7割。	○ビジネスモデルの構築や新たなコンテンツの創造にあたっては、欧米が圧倒的。
○インターネット・ブロードバンド普及率は世界的に見て高い。光通信技術は世界最高レベル。	○データ分析技術は米国が圧倒的。
○交通系ICカードの普及等によりリアルデータを保有。	○これまで我が国の強みであった電子部品・デバイス等の分野で稼ぐ力が弱まってきている。
○計算能力・計算効率ともに我が国のスーパーコンピュータ「京」が世界1位であり、開発能力は高い。	○科学技術水準や産業競争力が新興国にキャッチアップされつつある。
	○我が国におけるIoT、ビッグデータの活用状況や活用に向けた意識は低調。また、システム化の重要性に対する認識は低い。

3 超スマート社会の実現に向けた取組

[illegible]

IoT時代では、あらゆるものがネットワークに接続し、あらゆるものから検出されたセンサデータやログがネットワーク上に大量に生み出され、あらゆるものを連携させるという制御

101

が可能となっている。これによって、複数のシステムを連携させることが可能となり、新たな価値やサービスの創出が可能となっている。新たな価値の創出に当たっては、個別に開発したシステムを連携させる「システム化」の取組が重要であり、第5期基本計画では、I o Tを有効活用した共通のプラットフォーム（「超スマート社会サービスプラットフォーム」）の構築を図ることとしている。平成28年4月に内閣府において取りまとめられた「エネルギー・環境イノベーション戦略」においても、エネルギーの徹底的な有効利用や世界全体のエネルギー消費量・C O 2排出量の最小化のため、エネルギー関連の装置や設備をネットワーク化し、システム全体として最適化を図ることとしている。

I o Tの本格化に当たっては、複数システム間のデータ利活用を促進するインターフェースやデータフォーマット等を整備していくことが求められる。

また、3次元地図・測位データや気象データのような「準天頂衛星システム」、「データ統合・解析システム (D I A S : Data Integration and Analysis System)」及び「公的認証基盤」等の我が国の共通の基盤システムから提供される情報を、システム間で広く活用できるようにする仕組みの整備及び関連技術開発を進める。

さらに、ハードウェアとソフトウェアのコンポーネント化や、I o Tの高度化に必要となる現場システムでのリアルタイム処理の高速化や多様化を実現するエッジコンピューティングも重要である。



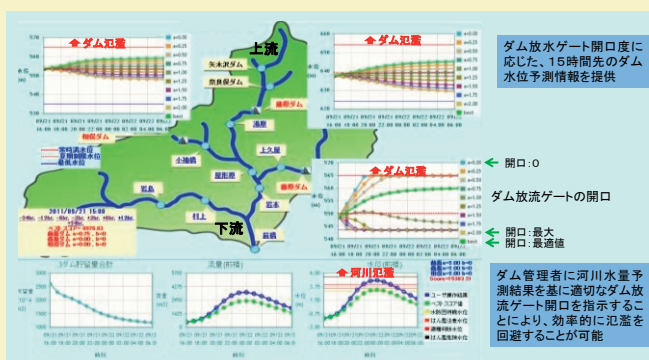
データ統合・解析システム
(D I A S : Data Integration and Analysis System)
提供：東京大学

コラム 1-4

地球環境ビッグデータを用いた先駆的システム：データ統合・解析システム (D I A S)

データ統合・解析システム (D I A S : Data Integration and Analysis System) は、衛星観測、海洋観測等によって得られる地球観測データや気候変動予測データなどを効果的・効率的に組み合わせて新たに有用な情報を創出するため、我が国が世界に先駆けて開発してきた情報基盤であり、地球環境ビッグデータを利活用する先駆的なシステムである。

D I A Sは、大容量データの保存とそれを組み合わせた解析を迅速に行うためのシステム構成を採用し、気象衛星「ひまわり8号」、陸域観測技術衛星「だいち」、水循環変動観測衛星「しずく」等の衛星観測データ、船舶やアルゴフロートによる海洋観測データ、XバンドMPLレーダネットワーク (Xレーン) の雨量データ、過去の気候を再現した高精度な気候データ、地球規模の気候変動予測データなど約700種のデータを格納しており、これらを組み合わせて解析することにより、水分野をはじめとして様々な研究成果が生み出されている。



リアルタイム河川・ダム管理システムの例

資料：東京大学の資料を基に文部科学省作成

例えば、D I A Sを用いてチュニジア国メジェルダ川における大洪水の発生頻度の分析と将来の気候変動の影響による洪水被害の分析を行い、チュニジア国政府への円借款である「メジェルダ川洪水対策事業」（供与限度額約104億円）の事業形成に貢献した。また、国内では、D I A Sに格納された気象観測データやダム管理データ、河川流量などのデータを基にリアルタイムの統合解析を行うことにより、15時間先のダム水位や河川流量に基づいたダム管理の実証実験が行われている。これにより、ダムの事前放流や容量再配分による洪水・渇水被害の軽減、将来的な気候変動による河川流量や降水量の変化に対応したダム管理の実現が期待される。さらには、ダムの自動運転までも実現されるかもしれない。

D I A Sは2003年のG8エビアンサミットで提唱された国際的な枠組みである全球地球観測システム（GEOSS）のデータ基盤に接続することにより、日本の地球観測データを提供しており、これによって日本もGEOSSを通じて諸外国の地球観測データが利用できるようになっている。

今後、D I A Sは第5期基本計画における11のシステムの一つである「地球環境情報プラットフォーム」の中核として、研究者のみならず民間も含めてユーザーを拡大する予定である。気候変動の緩和や適応はもとより、様々な社会課題の解決やビジネスツールとして活用されることが期待される（D I A Sホームページ：<http://www.diasjp.net/>）。

（2）「超スマート社会」における基盤技術の戦略的強化

（サイバーセキュリティ技術）

超スマート社会を目指すに当たって、サイバーセキュリティの確保は大前提となる。そのため、システム全体の企画・設計段階からセキュリティの確保を盛り込むセキュリティ・バイ・デザインの考え方にに基づき推進することが必須となってくる（本章2節で詳述する）。

（I o Tシステム構築技術）

ハードウェアとソフトウェアのコンポーネント化や大規模システムの構築・運用等を実現するには、I o Tシステム構築技術の強化が重要である。総務省においては、膨大な数の機器を迅速かつ効率的に接続する技術や異なる無線規格の機器や複数のサービスをまとめて効率的かつ安全にネットワークに接続・収容する技術等の共通基盤技術を確立するとともに、国際標準化に向けた取組を強化している。さらに、様々な事業者が最適なI o Tシステムの開発・検証を行うことができる環境（I o Tテストベット）を整備し、先進的なI o Tサービスの開発・社会実証を推進している。

（ビッグデータ解析技術）

非構造データを含む多種多様な大規模データから知識・価値を導出するビッグデータ解析技術の強化は重要である。データはアセット¹であるとの考えの下、既に我が国において蓄積され利用可能なデータを積極的に活用するとともに、我が国が強みをもつデータの更なる整備と活用を推進していくことが必要である。

（人工知能技術）

人工知能技術は、I o Tやビッグデータ解析、高度なコミュニケーション等を支えることが可能である。

総務省では、人工知能技術に関しては、情報通信研究機構ユニバーサルコミュニケーション研究所において、ビッグデータ解析による自然言語処理技術を用いた多言語音声翻訳や情報分析システム等の研究開発に取り組んでおり、また、情報通信研究機構脳情報通信融合研究センターに

¹ 資産、財産など

において、脳機能を解明することにより、脳活動から知覚・印象等を推定する技術や脳に学ぶ情報ネットワーク技術等の研究開発に取り組んでいる。

さらに、このうち多言語音声翻訳システムについては、翻訳精度の更なる高度化のための研究開発及び社会実証を進めており、高精度に翻訳可能な言語を、従来の4言語（日本語、英語、中国語、韓国語）から10言語に拡大し、2020年の東京オリンピック・パラリンピック競技大会までに病院、商業施設、観光地等へ社会実装することを目指して取り組んでいる。また、人工知能技術等を活用した電動自動車や電動車いす等の早期の社会実装、普及を目指して、「自律型モビリティシステム（自動走行技術、自動制御技術等）の開発・実証」を実施している。

経済産業省は、平成27年5月、産業技術総合研究所に「人工知能研究センター」を整備した。同センターでは、優れた研究者・技術を結集し、アカデミアと産業界のハブとして基礎研究の成果を社会実装につなげていく好循環を生むエコシステムの形成に取り組んでいる。具体的には、脳型人工知能やデータ・知識融合型人工知能の先端研究や、研究成果の早期橋渡しを可能とする人工知能フレームワーク・先進中核モジュールのツール開発や、人工知能技術の有効性や信頼性を定量的に評価するための標準的評価手法等の開発等に取り組んでいる。また、新エネルギー・産業技術総合開発機構では、「次世代人工知能・ロボット中核技術開発」事業を立ち上げ、人工知能技術や難識別物を認識できるカメラシステム等センシング技術、人工筋肉等のアクチュエータ技術等の研究開発を実施している。

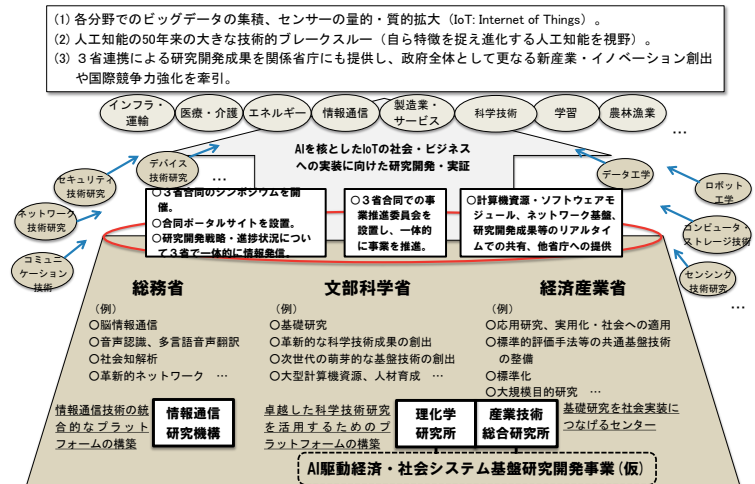
さらに、産業界との研究開発とは別に、基礎研究に立ち戻った新たな研究開発も求められる。10～15年後に世界をリードすべく、新たな人工知能・ビッグデータ解析の基盤技術を生み出すことは重要である。

文部科学省では、「人工知能／ビッグデータ／I o T／サイバーセキュリティ統合プロジェクト（A I P¹）」を実施しており、理化学研究所に研究開発拠点（A I Pセンター）を設置し、革新的な人工知能の研究開発、人工知能とビッグデータの複数分野における対応、I o Tを用いた新たな価値の社会実装の推進、サイバーセキュリティ人材の育成等を一体的に推進することとしている。

同プロジェクトにおいては、これまで我が国において蓄積された脳科学や認知科学及び数理学等における成果を活用し、ディープラーニングをはるかに凌駕^{りょうが}する、人間の知的活動の原理に学んだ新たな革新的人工知能の基盤技術を開発することとしている。具体的には、各種のディープラーニング技術や確率推論等の原理を組み合わせた、人間の「ひらめき」を再現する技術や、言語処理や大規模な映像・画像解析等を通じて現実世界から知識を獲得する「自動学習」技術、脳や神経回路の計算モデルから学んだ全く新たな人工知能アルゴリズムの研究開発を実施することとしている。

1 Advanced Integrated Intelligence Platform Project

このように、人工知能の研究開発については、総務省、文部科学省、経済産業省においてそれぞれの役割分担の上で進められているが、「人工知能技術戦略会議」を設置し一体的に事業を推進しているほか、3省連携による研究開発成果を関係府省にも提供し、政府全体で更なる新産業・イノベーション創出や国際競争力強化の牽引を図っている。



次世代の人工知能技術の研究開発における3省連携体制

資料：文部科学省、総務省、経済産業省作成

コラム
1-5

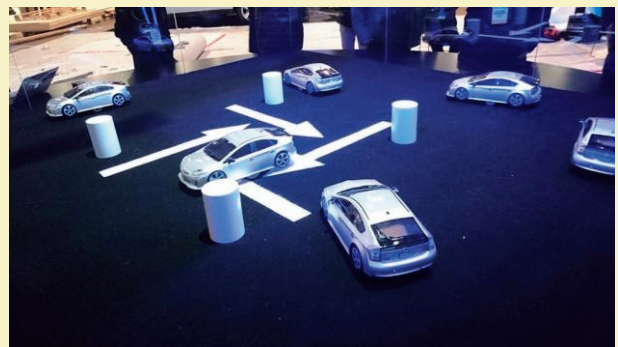
我が国が国際競争力を有する分野×ディープラーニングで世界に挑む

我が国が国際競争力を有する分野と言われてます思いつくのが自動車産業であろう。2015年の世界販売台数は、トヨタ自動車株式会社が1,015万台で首位を飾った。また、平成27年2月に日本経済再生本部が決定した「ロボット新戦略」で述べられているように、産業用ロボットの分野で、我が国は、出荷台数、稼働台数共に世界第1位の地位を維持しており、「ロボット大国」としての地位を維持している。さらに、平成24年にノーベル賞を受賞した山中伸弥教授の研究であるiPS細胞による再生医療も、平成26年9月に世界で初めてiPS細胞から作製した網膜細胞のシートを目の病気の患者に移植する手術を実施するなど、世界の耳目を集めている。

このコラムでは、日本が国際競争力を有する3分野に、第5期基本計画において人間の生活のみならず人間の在り方そのものにも大きな影響を与える新たな科学技術の一つとして挙げられている人工知能を掛け合わせて世界に挑もうとしている東京大学を発祥としたベンチャー企業、株式会社Preferred Networksを紹介する。

株式会社Preferred Networksは、「IoT時代に向けた新しいコンピュータを創造する」「あらゆるものに知能をもたせ、分散知能を実現する」をミッションに掲げ、我が国が強みを有する分野である、自動車、ロボット、バイオの領域における人工知能技術の活用に取り組んでいる。同社の特徴は「分散知能」にある。ICTの進展に伴い、ものに付随するデータが急激に増加しており、これらのデータをクラウド上にアップロードすると、データ量が膨大で迅速に処理できない。よって、従来のクラウドの中央集権型の処理から、エッジ（縁）側で協調処理をするディープラーニングのフレームワーク「Chainer」を開発し、オープンソース化した。

このディープラーニングを活用し、自動車分野について、同社は、今年の1月に米国のラスベガスで開催された家電の見本市「コンシューマー・エレクトロニクス・ショー（CES）」でトヨタ自動車株式会社、日本電信電話株式会社と共に「ぶつからないクルマ」を展示した。ぶつからないことを学習する車の研究開発はトヨタ自動車株式会社と共同で行っており、この車は、他の走行している車との位置関係をセンサで把握して自律的に走る。走り始めは他の車と衝突するが、衝突した場合にはペナルティが与えられ、強化学習（Reinforcement Learning）が行われる。学習はすべてシミュレータ上で行われる。時間が経過するとディープラーニングの効果によりスムーズに走れるようになる。車一台一台に学習する機能があり、お互いが学習したことを共有することができるため、この技術を活用すれば、そのときの最適な運転方法が自動的に選択されるようになるかもしれない。



CESにおける展示風景

提供：トヨタ自動車株式会社

次に、産業用ロボットについては、ファナック株式会社と共同研究を行い、1台のロボットが故障しても他のロボットでその分を補い、「止まらない工場」をつくることを目指している。ロボットの故障は人が直さないといけないため、一度ロボットが故障すると直すまで生産ラインが停止し、作業が遅れ大きな影響が出る。しかし、ディープラーニングにより壊れる前に故障を予兆することができれば、事前に対処することで、ダウンタイムを回避することが可能となる。また、複数ロボット同士の協調動作にもディープラーニングを適用し、ロボット同士が協調の仕方を自動的に最適化することで作業時間の短縮を図る。

最後に、バイオ領域におけるディープラーニングの活用について紹介する。同社は京都大学 iPS細胞研究所と共同研究を行い、高い精度で薬の設計ができないか模索している。化合物の薬理活性の評価について、ディープラーニングを用いることで、従来の手法を上回るデータ解析が可能になった。また、同手法により iPS細胞から精密な分化誘導が行われたかどうか判定できることが明らかになっている。こうした手法を用いて、多数の疾患特異的 iPS細胞に、数十万の化合物を投与することで、薬理活性を判断するデータ解析に活用する方向で検討をしている。平成27年9月に科学技術・学術政策研究所により公表された「第10回科学技術予測調査 分野別科学技術予測」においても、iPS細胞などの幹細胞由来分化細胞を用いた薬剤反応性のハイスループット・スクリーニング¹技術は国際競争力の高い技術の一つとして挙げられており、我が国のバイオ分野における国際競争力強化のためにも更なる推進が期待される。

(デバイス技術)

デバイス技術は大規模データの高速・リアルタイム処理を低消費電力で実現する。デバイスの超低消費電力化に当たっては、素材・ナノテクノロジーや光・量子技術の強化が併せて重要である。

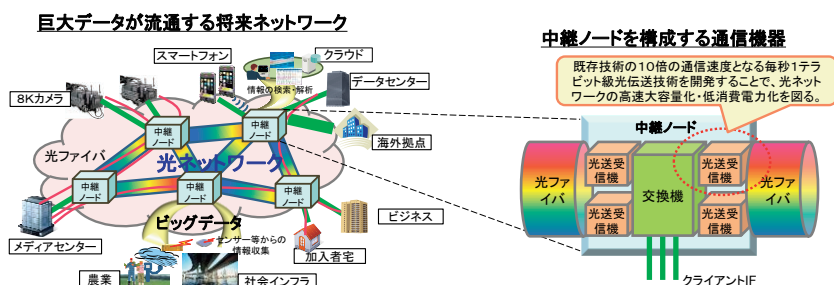
また、情報伝送需要の急増や電波利用の拡大により、既存の周波数帯における伝送容量が逼迫することが予想されることから、新たな電波資源を開拓し、ネットワークを高度化することは喫緊の課題となっている。そのため、総務省においては、現在使用されていないテラヘルツ波(300GHz帯)を使用可能とするため、平成23～30年度の8か年において「テラヘルツ波デバイス基盤技術の研究開発」を実施している。

(ネットワーク技術)

大規模化するデータを大容量・高速で流通させるためには、ネットワーク技術の高度化も重要である。

総務省においては、移动通信システムに関し、現在の1,000倍の通信容量、100倍の接続機器数を目指し、2020年頃を目指して第

5世代移动通信システム(5G)の実現に向けて産学官連携による研究開発や国際標準化活動を推進している。また、多様なIoTサービス創出のため、多様な接続ニーズに迅速かつ柔軟に対応可能なネットワーク基盤を構築するネットワーク仮想化技術の研究開発に取り組んでいる。加えて、現在普及しつつある毎秒100ギガビット級の光伝送技術よりも更に低消費電力化・長距離化を実現しつつ、10倍の高速大容量化した毎秒1テラビット級の次世代の光ネットワーク技術の研究開発を推進しており、2020年までの技術の確立を目指している。



次世代光ネットワーク技術の研究開発の推進

提供：総務省

¹ ハイスループット・スクリーニングとは、無数の化合物で構成される化合物ライブラリーの中から、自動化されたロボットなどを用いて、有用な生理活性をもつ化合物を選別する技術

またIoTシステムにおいても、各種IoT機器からの情報の種類、緊急度によって許容される遅延時間を自動的に判断し、ネットワーク内の最適な箇所まで通信を折り返して最適な制御を行うエッジコンピューティング技術等の研究開発を推進しており、様々なIoT機器が相互接続するネットワークの全体において、最適な通信処理が可能となる基盤技術の構築を目指している。

また、自動走行技術を実装した自律型モビリティシステム（電気自動車、電動車いす等）の早期の社会実装、普及を目指して、高精度、高信頼なネットワーク技術等の研究開発を実施している。

（次世代スーパーコンピュータ）

文部科学省においては、スーパーコンピュータ「京」の後継機（ポスト「京」）の開発のため、「フラッグシップ2020プロジェクト」を実施している。2020年のポスト「京」運用開始時において世界の他のスーパーコンピュータに先駆けて研究成果を創出するため、ハードウェア（システム）とソフトウェア（アプリケーション）を一体的・協調的に設計・開発（コデザイン）しており、「最大で『京』の100倍のアプリケーション実効性能」及び「消費電力について30～40MWを実現」を開発目標としている。

フラッグシップ2020プロジェクトにおいては、ポスト「京」により、10～20年程度先の社会や学術を見据えた先駆的・挑戦的な研究を行い、科学的ブレークスルーや産業・経済の将来の可能性を切り開く、革新的で世界最先端の成果を創出するなど、2020年代のシステムによってのみ解決し得る社会的・科学的課題について戦略的に取り組むことで、我が国の成長に寄与し世界を先導する成果の創出が期待されている。そのシステムの特色は、①消費電力性能、②計算能力、③ユーザーの利便・使い勝手の良さ、④画期的な成果の創出をそれぞれ世界最高水準で備えた2020年頃において世界の他のシステムに対して総合力で卓抜するものである。

（センサ技術）

ビッグデータ、IoT時代には、リアルデータの活用が重要になってくる。このため、人やあらゆるものから情報を収集するセンサ技術の高度化も重要である。例えば、総務省においては、透視により物と形の判別が可能なテラヘルツ波を用いたカメラの研究開発を、経済産業省においては、環境変化に影響されない視覚・聴覚等のセンシング技術の研究開発を実施している。

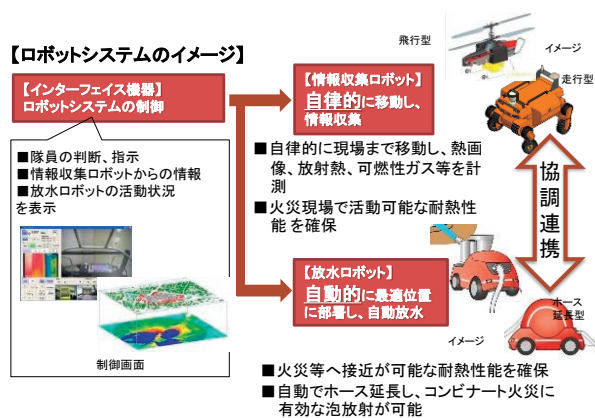
（ロボット、アクチュエータ、ヒューマンインターフェース技術）

サイバー空間における情報処理・分析の結果を現実世界に作用させるための機構・駆動・制御に関するアクチュエータ技術やコミュニケーション、福祉・作業支援、ものづくり等様々な分野での活用が期待できるロボット技術、拡張現実や感性工学、脳科学等を活用したヒューマンインターフェース技術の研究開発を実施していくことが重要である。

総務省では、様々なロボットがネットワークを介して情報を共有し、リアルタイムに自動で動作するための基盤技術、視覚・聴覚や脳情報等を用いた人の心に寄り添うコミュニケーションを実現する技術等の確立を目指して、平成27年度からスマートネットワークロボットの研究開発を実施している。

総務省消防庁では、平成26年度から「エネルギー・産業基盤災害対応のための消防ロボットの研究開発」を実施している。我が国有数のエネルギー・産業基盤が集積している地域においては、南海トラフ巨大地震・首都直下地震が想定され、大きなリスクとなっている。さらに、こうした石油コンビナートにおける特殊災害では、災害現場に近づくことが困難であることを踏まえ、情

報収集から放水活動までを複数のロボットが協調連携し、自動・自律的に行える消防ロボットシステムの開発を実施している。同事業では、情報収集ロボット（飛行型、走行型）と放水ロボット、ホース延長ロボット、消防隊員等のインターフェースの5つの研究開発を実施しており、火災現場では、情報収集ロボットが自律的に熱画像、放射熱、可燃性ガス等を計測し、その情報をもとに、放水ロボットが放水に当たっての最適位置を自動判断した上で、安全な領域へホースを延長し、放水するシステムとなっている。同システムは平成31年以降に現場に配備・高度化されることとなっている。



エネルギー・産業基盤災害対応のための
消防ロボットの研究開発
提供：総務省

（光・量子技術）

原子や分子の観測ツール等として発展を遂げた光の利用技術は、情報通信や医療等の現場でも欠かせない横断的技術として活用されてきたが、近年は更なる光の精密制御技術や高感度計測技術の進展を背景に広範な社会インフラを形成している。文部科学省では、こうした光技術の更なる深化に向け、メタマテリアル等に代表される新しい光機能物質の人工生成や革新的な光通信技術の開発・活用、先端数理科学等との融合による新たな複合光基盤技術・システムの創出等を目指している。

また、身近な電子デバイスに使用される半導体技術から加速器施設等における量子ビーム技術に至るまで広範に利活用され知識・技術社会の飛躍的な進展に貢献してきた量子技術についても、新たな産業や技術基盤の創出の核となる次世代のコア量子技術を世界に先駆けて生み出していくことで超スマート社会の実現に貢献していくことを目指している。

こうした光・量子技術の利活用・制御を通じて、情報・医療・環境・エネルギー等の広範な分野を横断的に支え、精度・感度・容量・消費電力等の様々な点で社会的要請に応える高次な社会・産業インフラの形成に向けた取組を進めていく。

（数理科学）

超スマート社会の実現に向けた基盤的な技術を支える横断的な科学技術として、数理科学が挙げられる。数理科学は、大量かつ複雑なデータがもつ意味を理解することや、物事の抽象化に資するものである。しかしながら、数理科学分野においては、分野を担う人材の不足や、諸科学・産業からの認知度の不足等の課題が存在する。そのため、大学等において数理モデリングやデータ科学等を学ぶ機会の提供、分野のたこつば化防止のため産業等との交流の機会の確保、キャリアパスの開拓等に向けた取組を推進していく必要がある。さらに、数理科学と諸科学・産業の協働等のため、数学イノベーション拠点を形成していくといった取組が求められている。

コラム 1-6

人間の心を知る～認知科学とは～

超スマート社会の実現に向けては、人々の認知、考え方を理解した上で様々な技術の社会適用を進めていくことが求められる。このための科学的なアプローチとして、人工知能やビッグデータ等の革新が欠かせないが、それと同時に、人の思考、学習、発見等「認知科学」をベースにした研究の重要性が示唆される。

本コラムでは、人間をはじめ、脳をもつ動物の心の働きを、内側から解明する認知科学と呼ばれる領域を紹介する。

認知科学（Cognitive Science）とは、心理実験、脳計測、コンピュータシミュレーション、統計解析等を用い、人間、動物、機械、社会における「知」の構造、機能、発生を扱う研究領域である。

認知科学は1950年代後半に米国における認知革命をその起点とする。当初は、人工知能と双子の学問として生まれ、人間の知性の基盤となる構造、知識の表現と利用に関わる研究を、主に認知（知覚、記憶、言語、思考等）領域において行ってきた。この過程において、ニューラルネットワーク、認知神経科学、進化心理学、ロボティクスを通じ、研究領域を拡大した。また、コンピュータービジョンや翻訳を含む自然言語処理、経済活動における意思決定、学校教育プログラム、ユーザーインターフェース分析、改善等にも大きな影響を与えてきた。以下に、近年の学術動向の中で、実社会での応用の可能性を含むものとして4つ取り上げるとともに、注目される研究動向を紹介する¹。

1. 感情・情動的知性

神経科学や脳機能計測を含む生体計測が用いられるようになったことで、認知科学の一部として研究がなされている。例えば、戦略創造事業として展開された岡ノ谷情動情報プロジェクトでは、乳児の人見知り行動が伝達する情動情報、謝罪が相手の攻撃や不快感に与える影響等について生理指標を用いた検討を行ったことが挙げられる。

2. 知の社会性

乳幼児発達研究者、人の近縁種を用いた比較認知科学研究者、進化心理学等の研究者と、認知科学者との協働により、ヒトの知性及びそれを支える脳の進化が、人間の社会性に由来するという見解の下研究が行われている。こうした分野、特に比較認知研究は、京都大学霊長類研究所、東京大学進化認知科学研究センターなど世界有数の研究機関を有する我が国が国際的にも先導集団の一角を占めている。

3. 知の身体性

身体は脳や中央制御系からの命令を受けて受動的に働く器官と、従来は考えられていた。しかし、脳や中央制御系は、身体の動き等を前提にコントロールを行う折衷的機能を果たしているにすぎないという見解が、現在では主流である。こうした見解の下生体心理学やロボティクス等の領域との共同研究が主に行われており、例えば、ロボットに様々な経験をさせ、人間の発達過程を探る研究等が実施されている。

4. 知の創造と創発：

科学的な発見、工学的な発明、芸術、スポーツ等に見られるように、知性は蓄えた知識を利用するだけでなく、与えられた環境の制約の中で、新たな知を絶えず作り出している。こうした見解の下、例えば、音楽、美術、伝統芸能における「息」、「間」といった暗黙知に対する科学的アプローチが採られ始められている。

¹ 研究開発戦略センター 研究開発の俯瞰報告書 情報科学技術分野（2015年）（科学技術振興機構）

＜事例紹介＞

- 「共感性の進化・神経基盤」（東京大学・大学院総合文化研究科 教授 長谷川 寿一）

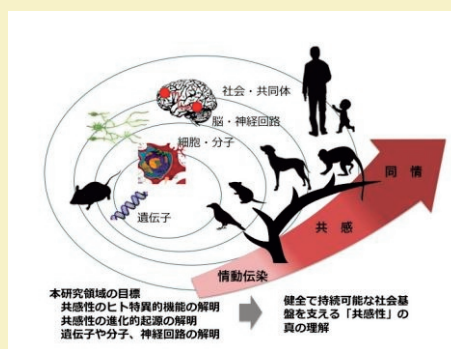
「共感性」は、自己と他者との協力及び協調、相互理解を成立させる上で重要で、社会の秩序や公平性、助けあい、暴動やデモなどの集団行動の基盤となる心的機能である。共感性に関わる行動はヒト乳幼児にも認められ、霊長類など他の動物でも共感性の起源と考えられる行動が報告されつつある。これらの事実は、共感性の起源が動物から存在し、共感性は進化的に見て適応的機能であることを示している。

本研究では、共感性の起源をヒト以外の動物にも見だし、進化過程におけるヒト特有の高次な共感性の成立機構を明らかにするため、①ヒト社会における共感性の成り立ちを調べ、②共感性の系統発生的並びに個体発生的な獲得過程を明らかにし、③共感性を神経回路、ニューロン、分子、遺伝子レベルで解明することを目的としている。

- 「認知的インタラクションデザイン学：意思疎通のモデル論的理解と人工物設計への応用」（東京大学・大学院総合文化研究科 教授 植田一博）

人と人がコミュニケーションする際、対話相手がどのような状況下だと、どのように発言・行動するはずだという対話相手の行動を理解・予測するための心的モデル（他者モデルと呼ぶ）が重要な役目を果たしている。初対面同士の会話であれば、お互いに対話相手に対する他者モデルを持っていないため、会話が噛み合わないことがあり得る。こうした現象は、人同士のコミュニケーションのみならず、人と伴侶動物、あるいは人と人工物との間のインタラクションにも見られる。

本研究では、他者の行動を理解・予測するために必要な状況に応じて変化する他者モデルを、認知科学的に検討する。それを、人に対して、自然かつ持続的に適応できる人工物の設計と構築に应用することで、認知的インタラクションデザイン学の構築を目指している。また、人対人、人対動物、人対人工物に共通する認知プロセスを解明し、他者モデルをアルゴリズムレベルで実現することを目指している。



共感性の進化・神経基盤

提供：東京大学



認知的インタラクションデザイン学

提供：東京大学

こうした認知科学の基礎研究は我が国の強みの一つであり、認知科学がこれまでに蓄積した知見は産業、医療・介護、教育、文化・芸術等様々な分野の発展に重要な役割を果たす可能性がある。そのためにも、認知科学内部だけで完結するのではなく、関連分野との連携・協力が不可欠である。