

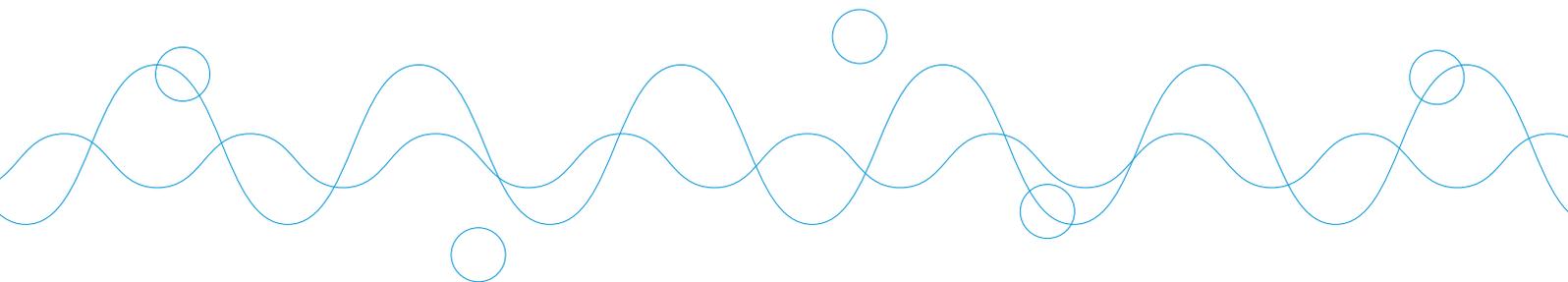
CRDS-FY2016-FR-01

ATTAAT A AAGA C CTA ACT CTCAGACC  
AAT A TCTATAAGA CTCTAACT  
CTCGCC AATTAATA  
TTAATC A AAGA C CTA ACT CTCAGACC  
AAT A TCTATAAGA CTCTAAC  
TGA C CTA ACT CTCAGACC

研究開発の俯瞰報告書

# 研究開発の新しい動向（2016年）

0101 000111 0101 00001  
001101 0001 0000110  
0101 11  
0101 000111 0101 00001  
001101 0001 0000110  
0101 11  
00110 11111100 00010101 011



国立研究開発法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター  
Center for Research and Development Strategy, Japan Science and Technology Agency

## はじめに

研究開発戦略センター（CRDS）は、国内外の社会、科学技術イノベーションの動向およびそれらに関する政策動向を把握・俯瞰・分析し、これに基づき、課題を抽出し科学技術イノベーション政策や研究開発戦略の提言およびその実現に向けた取組を行っている。

「研究開発の俯瞰報告書」（以下、俯瞰報告書）は、CRDS の重要な活動の一つである俯瞰活動の成果をとりまとめたものである。CRDS は 2003 年の設立以来、科学技術分野を広く俯瞰し、重要な研究開発戦略を立案する能力を高めるべく、その土台となる分野俯瞰の活動に取り組んできた。俯瞰報告書では、さまざまなステークホルダーとの継続的な対話や各種データの把握・分析等を通じて、最新の研究開発状況や重要課題、今後の研究開発の方向性や社会へのインパクトなどを CRDS 独自の視点でまとめている。俯瞰報告書は主に研究開発戦略立案の基礎資料・根拠資料として、国および関係機関において活用されている。

俯瞰報告書は 2 年ごとを目途に改訂して発行している。このたび発行する「研究開発の俯瞰報告書 研究開発の新しい動向（2016 年）」は、2015 年俯瞰報告書を必要に応じて補うとともに、2015 年 4 月発行以降、新たに注目される研究開発のトレンド、トピックなどについて取り上げ、テーマ毎に研究開発動向等をまとめたものである。取り上げた事項は、各分野で今後重要な課題になると考えられるものであり、来年発行する予定の 2017 年俯瞰報告書において再度各分野の全体像の中で位置づけを論ずることとなるものである。

2016 年 4 月  
国立研究開発法人科学技術振興機構  
研究開発戦略センター



## 目次

はじめに

1. ライフサイエンス・臨床医学分野.....	1
1. 1 ライフサイエンス・臨床医学分野の概要.....	1
1. 2 <i>in vitro</i> 実験技術.....	3
1. 3 触覚応用デバイス.....	9
1. 4 土壌・環境マイクロバイオームの評価・制御基盤技術.....	13
補足：これからのライフサイエンス・臨床医学分野の研究開発の方向性等.....	18
2. ナノテクノロジー・材料分野.....	20
2. 1 ナノテクノロジー・材料分野の概要.....	20
2. 2 超高压下における硫化水素の超伝導状態（転移温度 203K）の発現.....	22
2. 3 ナノバイオ・ナノメディシン領域におけるナノワイヤ応用研究.....	26
2. 4 量子コンピュータで大幅に演算を高速化できることを実証.....	31
2. 5 米国家ナノテクノロジー・イニシアティブの動向.....	35
3. 環境・エネルギー分野.....	40
3. 1 環境・エネルギー分野の概要.....	40
3. 2 水素社会の実現に向けた水素の製造、輸送・貯蔵、利用.....	43
3. 3 シェールガス革命と化学プロセス（メタン利用のための触媒）.....	50
3. 4 電力自由化と再生可能エネルギー大量導入時代のエネルギーネットワーク.....	55
4. 情報科学技術分野.....	62
4. 1 情報科学技術分野の概要.....	62
4. 2 Reality 2.0（CPS/IoT）.....	64
4. 2. 1 ソフトウェア定義技術.....	66
4. 3 知のコンピューティング.....	72
4. 3. 1 知の集積・増幅・探索.....	73
4. 3. 2 予測と発見の促進.....	79
4. 3. 3 知のアクチュエーションとプラットフォーム.....	86
4. 3. 4 知の倫理的・法的・社会的課題（ELSI）と社会適用.....	99



## 1. ライフサイエンス・臨床医学分野

### 1. 1 ライフサイエンス・臨床医学分野の概要

ライフサイエンス・臨床医学分野は、健康・医療をはじめ、食料、環境など広範な社会基盤の形成に寄与する研究開発領域である。当該分野の戦略的な推進はわが国の健康・医療政策や農林水産政策などの国家戦略などにも影響を及ぼすため、国内外の研究開発動向のみならず政策動向までを含めたライフサイエンス・臨床医学分野の全体像を把握することは、当該分野の研究開発戦略の立案において肝要である。その基盤となる情報を収集するため、CRDS ライフサイエンス・臨床医学ユニットでは、ライフサイエンス・臨床医学分野の基礎から応用、社会実装も含めた一貫性、網羅性の高い俯瞰を実施し、2015年4月に「研究開発の俯瞰報告書 ライフサイエンス・臨床医学分野（2015年）」を発行した。その後、2017年版俯瞰報告書の作成に向け、有識者との意見交換、文献調査、学会等への参加を通じ本分野の最新動向の把握を進めているところである。

2015年版の俯瞰報告書では、生命・疾患の理解や医療技術・食料関連技術の創出などに関連する様々な研究領域を取り上げたが、研究を進める上で必要となる実験系、計測・解析技術についての記載は限定的であった。対象となりうる技術は多岐にわたるが、近年大きな進展が見られ、アカデミアや企業の期待感が高まっている技術領域として、今回、次の3つを取り上げることにした。その概要は次の通りである。

#### トピック①：in vitro 実験技術

生命科学、疾患科学、創薬などの分野では、長年にわたってモデル動物（マウスなど）を用いた研究が続けられてきた。しかし、それらを通じて見出された成果は必ずしもヒトに適用できないことも明らかになっており、モデル動物とヒトの実験結果の違いを埋める技術が強く求められている。本報告書では、近年特に大きな動きが見られる *in vitro* 系の実験技術として、ヒト由来培養細胞（疾患 iPS 細胞、臓器チップ）を用いた技術、およびオルガノイド技術を紹介する。現状、これら技術は発展途上の段階にあるが、今後のさらなる改良、検証によって飛躍的な展開が見られる可能性がある。

#### トピック②：触覚応用デバイス

医療機器を目指した生体に関連した計測分析技術については、伝統的なものづくり技術を背景として、わが国が強い分野と言われてきた。しかし、ICT 技術の発展に伴い、こうしたものづくり技術から得られた成果だけでは、国際的な市場で競争力をもつ商品を作ることが難しくなっている。生体を対象とした計測技術のうち、現在、機器による計測が難しい分野が、官能評価を主軸としている感覚計測の分野である。中でも触覚については、数値による定量化が難しい反面、心理学的な効果や精神的な安堵感との関係もあり、近年着目されている。こうした状況を踏まえて、触覚そのものを計測・解析する技術、触覚を再現する技術などを紹介する。

#### トピック③：土壌・環境マイクロバイオームの評価・制御基盤技術

微生物叢（マイクロバイオーム）は、動物（ヒト含む）、植物、環境（土壌、水圏、大気など）などあらゆる場所に存在し、様々な生物等と複雑に相互作用しているものと考えられる。ヒトの微生

物叢に着目した健康・医療技術の研究開発戦略については、俯瞰報告書（2015版）および2016年3月に刊行した戦略プロポーザル「微生物叢（マイクロバイーム）研究の統合的推進～生命・健康・医療の新展開～」にて取りまとめた。一方、ヒトのみならず、植物の生育などにも微生物叢は大きな影響を与えていることが示唆されており、今後大きく注目すべきテーマであると考えられる。本報告書では、様々な人工的環境と自然環境において、植物と共生する微生物叢の関係を捉え直し、これらの相互作用に関する研究、そして研究を進める上で必要となる技術群がどのような状況にあるのかを紹介する。

## 1. 2 *in vitro* 実験技術

### (1) テーマ名

*in vitro* 実験技術

### (2) 概要

動物モデル（マウス、ブタ、サルなど）とヒトの実験結果の違いを埋める技術が強く求められる中、*in vitro* のヒト由来培養細胞（疾患 iPS 細胞、臓器チップ）およびオルガノイドを用いた実験技術が注目されている。現状では、これら技術は発展途上であるが、今後のさらなる改良・検証によって生命・疾患科学および創薬において大きなインパクトが期待される技術領域である。

### (3) 国内外における研究開発の動向

様々な生命現象、疾患の発症・重症化メカニズムなどの生命動態を解き明かす中で、生物種による違いが次々と明らかとなってきた。例えば、主な実験動物であるマウスと、研究の主な出口であるヒトとの違いは、外観だけではなく、保持する遺伝子や免疫反応系、物質の代謝・吸収・排泄・適応の速度、活動時間などの多くが異なっておりヒトとの相関性は低い<sup>1)</sup>。倫理面、コスト面、実験のやり易さなどの観点から、マウスを用いた研究は今後も実施されると考えられるが、ヒト *in vivo* と近い結果が得られる実験技術確立への期待は大きく高まっているといえる。さらに、これまで各臓器や各反応系に集中した研究が主であったが、近年は恒常性維持機構などのような細胞間、臓器間のネットワークを見る必要性が増している。

創薬においても、実験室での結果とヒト臨床データとの差を無くすための技術が近年強く求められている。医薬品の候補化合物は非臨床試験の後に実施される臨床試験においても多くが脱落する<sup>2)</sup>。主な原因としては、非臨床試験はマウス（げっ歯類）などを用いたものであり、ヒトにおける反応を精確に予想するものではないためである。しかしながら、ヒト試験を基礎研究で行うことは不可能であるため、臨床予測性が高い代替技術が強く求められている。そのためには、*in vitro* 実験系の更なる改良が求められ、さらには *in vitro*/*in vivo* の相関を数理科学的に解析、数式化することで、例えば *in vitro* 実験系を用いた医薬品の毒性試験、最適な投与量の検討などへの活用も早期検討段階から可能となる。

以上のように、ヒト *in vivo* の結果と相関性の高いヒト *in vitro* 実験技術の確立は、基礎研究から創薬に至る幅広い分野へと展開し、今後の研究開発の方法論を大きく変える可能性がある。現状でのヒト *in vitro* 実験技術として重要な研究動向としては以下が挙げられる。

#### 1. 疾患 iPS 細胞

iPS 細胞は多くの遺伝子型を網羅的に作製し、比較することが可能である。ヒト正常 iPS 細胞は安全性評価でまず実用化され、ヒト正常 iPS 由来の心筋細胞、神経細胞、肝細胞などは商業的に販売され<sup>3)</sup>、既に毒性試験に用いられている。ヒト疾患特異的 iPS 細胞は各研究機関で作製・保持され、創薬ターゲットの探索・検証や化合物スクリーニングなどに使用されている。さらに、基礎研究から臨床への橋渡しにおいても、薬効および安全性の評価、それに加え、副作用を示した場合には原因遺伝子などを抽出することも可能である。これにより、臨床試験での副作用の危険性を下げることや、副作用の原因解明の精度を上げることもできる<sup>4)</sup>。

iPS 細胞は、皮膚や血液など低侵襲性のサンプルから作製可能であるため、患者から疾患を有するヒト分化細胞を入手できる。これにより、難病治療薬の開発へ着手し易くなり、新しい知見が得られ始めている。例えば、アルツハイマー病では、複数の患者から入手した iPS 細胞を神経細胞へと分化させ比較したところ、アミロイドβの蓄積パターンが3タイプ以上あることが明らかになった。さらに、各タイプによって医薬品の有効性などに差が出る可能性が示唆されたため、今後のアルツハイマー病の診断・治療技術開発に影響を与えるものと予想される<sup>5)</sup>。このように、疾患を詳細にタイプ分けすることで、各タイプでの適切な医薬品の投与ができ、より安全で有効性の高い医療が提供可能となる。また、臨床試験では、一部の患者に高い有効性があっても、効果が見られない患者の割合が多ければ治療薬として認められないが、有効性の高い対象群の絞り込みが可能となることで、臨床開発の成功率向上にも貢献すると考えられる。将来的には、タイプ毎のバイオマーカーの同定が期待される。

患者由来の iPS 細胞を用いて疾患を再現した細胞を分化させた場合、大量の細胞を入手できるため、大規模な創薬スクリーニングへの利用が可能となる。例えば、軟骨無形成症患者の皮膚から iPS 細胞を作り、軟骨に分化させスクリーニングを行った結果、高コレステロール血症治療薬であるスタチンが軟骨無形成症の治療に有効であることが示唆された<sup>6)</sup>。このように、疾患 iPS 細胞はドラッグリポジショニングを行なう際の有効なツールになり得るものと期待される。

関連する iPS 細胞研究上の課題としては、機能が安定した純度の高い細胞の大量供給、疾患 iPS 細胞の作製効率の向上、iPS 作製技術を有する研究者の育成などが挙げられる。

## 2. 臓器チップ<sup>7)</sup>

臓器チップ (Organ-on-a-Chip) は、USB フラッシュメモリ程度の大きさのポリマー製マイクロチップ盤上で、ヒト由来培養細胞を用いて、人体内の臓器機能を正確に再現することを目指している。また、複数の分化細胞を各臓器に見立て、マイクロチップ盤上でつなげることで *in vivo* 臓器間ネットワークの再現を目指した「Body-on-a-Chip」も研究が進んでいる。

本研究分野の中心研究者はハーバード大学 Wyss 研究所の Donald Ingber 所長らである。同氏は2010年に「肺チップ」を作製し、肺細胞側に細菌を入れて疑似感染させたところ、毛細血管側に入れた白血球細胞が肺細胞側へ移動して細菌に接触することを証明した<sup>8)</sup>。本分野に対し米国では DARPA、FDA、NIH などが研究開発投資を実施しており、心臓、腎臓、肝臓、消化器、神経系、血液脳関門、血管、脂肪組織、腫瘍(転移モデル)、生殖系などのヒト臓器チップが開発されている。今後は、生体での反応をより正確に再現する系へ近づけるための改良が進められるものと考えられる。また、幾つかの臓器由来細胞を組み合わせることで特定の組織系(心血管系、心肺系、筋肉と血管系の組み合わせなど)の機能を模倣できるシステムの構築も進められている。また、iPS 細胞を用いたヒト臓器チップの開発も見られる。同時に、モデル動物の臓器チップと *in vivo* の比較結果が、ヒト臓器チップとヒト *in vivo* の相関関係を調べる際の基礎データとして必要不可欠な研究であるため、動物版の Organ-on-a-Chip、Body-on-a-Chip についても並行して作製し、検証する必要がある。これについて、Wyss 研究所と AstraZeneca 社では共同研究を進めており、ベンチャー企業 emulate の設立も見られる<sup>9)</sup>。欧州でも2012年~2015年で140万ユーロ、2013年~2018年で230万ユーロのプロジェクトが生まれ、ベンチャー企業としてスイスの insphero<sup>10)</sup>、ドイツの Tissuse<sup>11)</sup>が立ち上がっている。わが国においても、酒井康行教授(東京大学)、金森敏幸氏(産業

技術総合研究所)<sup>12)</sup>を中心に研究が進められている。

臓器チップ技術自体の開発に加え、シミュレーションモデルの構築も重要な取り組みとなる。具体的には、臓器チップで得られた様々な実験データをもとに、生体反応を予測するシミュレーションモデルを構築することで、例えば医薬品候補化合物を臓器チップ上に投与した際の反応から、生体における有効性、安全性などの予測が可能になると期待される。将来的にはスパコンや人工知能(AI)との組み合わせが必要である。

現時点で臓器チップの技術水準は発展途上にあり、信頼性を実証するには至っていない。しかし、本技術のコンセプトとしては、マウスなどの実験動物を用いた研究と比べコストが安く、Body-on-a-Chip 技術はヒト *in vivo* では実施が難しい臓器間ネットワーク研究を *in vitro* ではあるがヒトをベースに実施可能とするものであり、更なる技術開発によるハイスループット化も期待される。従って、いずれは実験動物を一部代替する技術となる可能性もあり、生命・疾患科学研究および創薬研究など幅広い分野での活用が期待される。

### 3. オルガノイド<sup>18),19)</sup>

オルガノイド培養技術とは、幹細胞を含む培養液中に必要な増殖因子を入れ、たった 1 つの幹細胞から生体内の組織に似た構造を培養皿の中で作り出す技術であり、作り出された組織様構造をオルガノイドと呼ぶ。近年本分野の報告が急増している背景としては、2009 年に佐藤俊朗特任准教授(慶應義塾大)、Hans Clevers 教授(オランダ Hubrecht 研究所)、Eduard Battle 教授(スペイン IRB)らの共同研究チームが、世界で初めてマウス腸管上皮幹細胞から腸管オルガノイド培養法(幹細胞を含む)の作製に成功したことがきっかけとなっている<sup>13)</sup>。その後、胃上皮、大腸上皮、膵管上皮、肝内胆管上皮細胞などの様々な組織のマウス幹細胞から各組織のオルガノイド培養が可能となり、2012 年にはヒトの腸管上皮細胞培養も作製可能となり、世界中から注目された。さらに、2014 年には大腸がんが頻度が高い 4 つの遺伝子変異を CRISPR/Cas9 技術で培養ヒト腸幹細胞に導入し、浸潤がんの特徴を有する腫瘍の増殖を確認し、がんと遺伝子変異の関連性を立証した。体外での大腸がんの再現が可能となったことで、発症メカニズム解明の加速が期待されている<sup>14)</sup>。このように、体外で生体内の組織を模倣できれば、生体反応や発症メカニズムの解明、薬物動態・安全性・有効性の評価など、幅広い分野での利用方法が考えられている。

iPS 細胞を用いたオルガノイド作製事例も報告されている。例えば、高里実博士(オーストラリア Murdoch Children's Research Institute)は、ヒト iPS 細胞から腎臓オルガノイドを作製した。これは、腎臓のすべての組織を持ち、ヒトの腎臓の発生を模倣しながら妊娠 3 ヶ月目の胎児の腎臓に非常に近い状態まで培養が可能であった。将来的には、*in vitro* の腎臓に対する毒性評価、病態モデル確立、細胞治療などへの応用が期待されている<sup>15)</sup>。その他にも、光を感知する極小の網膜、生体内と非常に近い構造の人工胸腺などが報告されている。

さらに、脳オルガノイドについては Science 誌の 2013 年 10 大ニュースに選ばれるなど、注目を集めている。脳オルガノイドの世界初の報告は、Jürgen Knoblich 博士(オーストリア科学アカデミー分子バイオテクノロジー研究所)の発表した「mini-Brain」である。iPS 細胞から作製したもので、ヒトの 9 週目の胎児脳に類似するものだが、形状、細胞の空間配置などが実際の脳と一致せず、また直径 4 mm に達すると循環システムの欠如から成長がストップするなど課題は多い<sup>17)</sup>。しかし、培養細胞よりも器官に近い実験系としての研究が可能になるものと期待され、脳関連の基礎研

究、疾患研究へ展開する動きが見られる。また、Rene Anand 博士（米オハイオ州立大学）は 2015 年 8 月 18 日に米フロリダ（Florida）州で開催された軍の保健関連イベントにおいて、ヒト皮膚細胞から 5 週目の胎児脳に類似する脳オルガノイドの作製に成功したと発表している（脳培養システムの製品化を進めているため、学術誌での論文発表は現状では見受けられない）。脳は非常に複雑な器官であり、特にヒトにおける実験手段が大きく限定されることから、脳機能の多くが未だブラックボックスとなっている。ヒトの脳オルガノイドは発生段階からの観察が可能であり、今後の脳研究に多くの示唆を与えるものと期待される。

オルガノイド培養技術は今後ますます進展し、将来的には各組織における最適な培養条件が確立されるものと予想される。一方で、各組織の細胞塊内に血管のように酸素や必要な物質を循環させる技術は報告されておらず、生体中の組織・臓器の機能の再現や、長期（2 ヶ月以上）の培養継続は未だ大きな技術的課題となっている。

#### (4) 科学技術的・政策的課題

- ・オルガノイド培養技術は将来的に生体外でのヒト組織（臓器）作製へとつながりうるものであり、例えば脳のオルガノイドについては「意識」の有無など、倫理面での議論が必要になる可能性がある。
- ・本項で紹介したいずれの *in vitro* 技術においても、実験のハイスループット化が進み、膨大なデータが産み出される。得られたデータを解析し、意味のある結果を見出すためのインフォマティクス技術が必須であるが、わが国には人材が大きく不足しており、その確保、育成が急務である。

#### (5) 注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

- ・iPS 研究に関して、わが国では複数の大型研究開発プロジェクトが存在しており、例えば「再生医療実現拠点ネットワークプログラム」において、10 年間で約 1,100 億円の支援が行なわれており、他にも JST（CREST／さきがけ、平成 20 年度発足「幹細胞 ホメオスタシス」）、NEDO（「再生医療評価研究開発事業」など）などの取り組みが見られる。
- ・米国の幹細胞研究への支援は、NIH から約 13.9 億ドル（2015 年）、約 14 億ドル（2016 年）、約 14.4 億ドル（2017 年）。さらに、国立科学財団（NSF）、国防高等研究計画局（DARPA）から再生医療研究に多額の研究投資が行なわれている。州単位の取り組みでも、CIRM は 10 年間で約 30 億ドルの支援が行なわれている。
- ・EU では 2015 年に開始された Horizon 2020 においても幹細胞研究が重点化されている。また、英国では、政府が 2013 年に約 7,700 万ポンド規模の支援実施、再生医療戦略（A Strategy for UK Regenerative Medicine）による 5 年間で合計 7,500 万ポンドの投資を行うと発表している。
- ・臓器チップに関して、米国では DARPA で「Body-on-a-chip」に年 3,700 万ドル（2012 年 7 月～2017 年）、FDA は「Organ-on-a-chip」を用いた放射線の毒性評価システムの開発検討に 3 年間で 500 万ドル（2013 年 9 月～）、NIH は Organ-on-a-chip に 5 年間で 1,700 万ドル程度（2012 年～）を配分すると発表している。
- ・「Brain Organoids」は 2013 年の Science 誌 10 大ニュース、2015 年の MIT Technology Review 10 Breakthrough Technologies の 8 位に選定された。

## (6) キーワード

疾患 iPS 細胞、臓器チップ、Organ-on-a-Chip、Body-on-a-Chip、オルガノイド

## (7) 参考資料

- 1) EDITORIAL Of men, not mice. Nature Medicine Vol.19, pp.379 (2013)
- 2) 日本製薬工業協会「DATA BOOK2015」
- 3) REPROCELL <https://www.reprocell.com/>
- 4) Inoue H, Nagata N, Kurokawa H, Yamanaka S. iPS cells: a game changer for future medicine. The EMBO Journal Vol.33(5), pp.409-417 (2014)
- 5) Kondo T, Asai M, Tsukita K, Kutoku Y, Ohsawa Y, Sunada Y, Imamura K, Egawa N, Yahata N, Okita K, Takahashi K, Asaka I, Aoi T, Watanabe A, Watanabe K, Kadoya C, Nakano R, Watanabe D, Maruyama K, Hori O et al., Modeling Alzheimer's disease with iPSCs reveals stress phenotypes associated with intracellular A $\beta$  and differential drug responsiveness. Cell Stem Cell Vol.12, pp.487-496 (2013)
- 6) Akihiro Yamashita, Miho Morioka, Hiromi Kishi, Takeshi Kimura, Yasuhito Yahara, Minoru Okada, Kaori Fujita, Hideaki Sawai, Shiro Ikegawa, Noriyuki Tsumaki. Statin treatment rescues FGFR3 skeletal dysplasia phenotypes. Nature Vol.513, pp.507-511(2014)
- 7) Sangeeta N Bhatia, Donald E Ingber. Microfluidic organs-on-chips. Nature biotechnology Vol.32, pp.760-772 (2014)
- 8) Dongeun Huh, Benjamin D. Matthews, Akiko Mammoto, Martín Montoya-Zavala, Hong Yuan Hsin, Donald E. Ingber. Reconstituting Organ-Level Lung Functions on a Chip. Science Vol. 328, Issue 5986, pp. 1662-1668 (2010)
- 9) emulate <https://emulatebio.com/>
- 10) insphero <http://www.insphero.com/>
- 11) TissUse GmbH <http://www.tissuse.com/>
- 12) 金森敏幸, 杉浦慎治、創薬のための細胞アッセイデバイス、(2014) 生物工学 第92巻 171 - 175
- 13) 知的財産、国際特許、Sato T, Clevers JC, Huch M CULTURE MEDIUM FOR EPITHELIAL STEM CELLS AND ORGANOID COMPRISING SAID STEM CELLS. WIPO Patent Application WO/2010/090513
- 14) 佐藤俊朗 (2013) 腸管上皮幹細胞. 生化学 第85巻 第9号. 743-748
- 15) Minoru Takasato, Pei X. Er, Han S. Chiu, Barbara Maier, Gregory J. Baillie, Charles Ferguson, Robert G. Parton, Ernst J. Wolvetang, Matthias S. Roost, Susana M. Chuva de Sousa Lopes, Melissa H. Little Kidney organoids from human iPS cells contain multiple lineages and model human nephrogenesis. Nature, Vol.526, pp.564-568(2015)
- 16) Xia Wang, Yusuke Yamamoto, Lane H. Wilson, Ting Zhang, Brooke E. Howitt, Melissa A. Farrow, Florian Kern, Gang Ning, Yue Hong, Chiea Chuen Khor, Benoit Chevalier, Denis Bertrand, Lingyan Wu, Niranjana Nagarajan, Francisco A. Sylvester, Jeffrey S. Hyams, Thomas Devers, Roderick Bronson, D. Borden Lacy, Khek Yu Ho, Christopher P. Crum,

Frank McKeon, Wa Xian Cloning and variation of ground state intestinal stem cells. Nature Vol.522, pp.173-178 (2015)

- 17) Madeline A. Lancaster, Magdalena Renner, Carol-Anne Martin, Daniel Wenzel, Louise S. Bicknell, Matthew E. Hurles, Tessa Homfray, Josef M. Penninger, Andrew P. Jackson, Juergen A. Knoblich. Cerebral organoids model human brain development and microcephaly. Nature Vol.501, pp.373-379 (2013)
- 18) Cassandra Willyard. The boom in mini stomachs, brains, breasts, kidneys and more. Nature Vol.523, pp.520-522 (2015)
- 19) Yin X, Mead BE, Safaee H, Langer R, Karp JM, Levy O. Engineering Stem Cell Organoids. Cell Stem Cell Vol.7:18(1), pp.25-38 (2016)

## 1. 3 触覚応用デバイス

### (1) テーマ名

触覚応用デバイス

### (2) 概要

生物が固体あるいは液体を「触った」と知覚するメカニズムを研究・解明し、これを利活用してロボットを始めとする機械・器具、痛覚の制御などを通じたリハビリテーション、ケガや病気の治療に役立つ器具を開発する技術領域である。

### (3) 国内外における研究開発の動向

触覚を始めとする五感は、通常試験者による官能評価により定性的に評価される。官能評価は、「食品や食品素材が視覚、嗅覚、味覚、触覚、聴覚などにより感知される時、これらに対する反応を惹起し、測定・分析するために用いられる」として定義<sup>1)</sup>されている。そのため、評価結果は、再現性と科学的な妥当性が保証される必要があるが、感覚は試験者固有のものであり、個人差に依拠する部分が大きく、定量的でかつ信頼に足る評価結果とすることは難しい。

このうち、触覚は、身体と対象となるモノの接触を知覚し、さらには、「撫でる」「押しつける」といった動作を欲しい情報に応じて無意識のうちに選択し、実行することで、対象物の質感（手触り感）などの感性量を知覚することができる。こうした「質感」の定量化は産業の分野でも、医療における触診などでも実現が求められている。

産業用の計測装置としては、主に摩擦力に着目した計測機器<sup>2)</sup>が開発されているが、その精度等はまだまだ十分ではない。また、現在の機器は対象を固体としている場合が多く、液体を対象とした機器については十分な成果が得られていない。

触覚を知覚する生理学的な機構については、通常、「手触り」によって評価することが多いことから、手指に備わっているセンサーとしての皮膚から神経を通じて情報を伝達し、脳に対して信号を送るというメカニズム<sup>3)</sup>が解明されている。こうしたセンサーのメカニズムを参考に固体の手触り感を定量的に評価する機器<sup>4)</sup>の開発が進められている。

また、触覚の重要性は対象が液体の場合でも変わらない。日本の化粧品は、近年、国際市場においても存在感を増しているが、評価を高めるポイントは、安全性以外に、化粧水などが「肌にしみこむ感じがする」「しっとり感がある」という液体の触覚が大きく評価されていると言われる。そのため、化粧品メーカー、シャンプーやボディソープなどを扱うメーカーにおいては、製品の設計にあたり、「ヒトが心地よいと感じる製品の物理的パラメータの解明」にも着目し、研究を進めている。

本分野の2000年代に入ってから研究論文の発表動向を見ると、全体として論文数は着実に増加しており、2015年では2000年の3倍程度にまで増加している。分野別に見た場合、感覚を直接扱う研究分野としての神経科学領域がおおよそ25%程度を占め、これを計測する機器・センサーの開発を行う工学分野が12%程度、他には、触覚が与える心理的効果（手触りによる質感の評価など）を扱う心理学分野が6%、同じくバーチャルな操作機器に対して、現実的な触感を与えるための研究として、コンピューター科学分野が6%程度を占めている。このうち、近年は、人間に対してバーチャルな感覚を付与する目的での情報科学技術面での研究開発が非常に多い。中でもヘッドマウントディスプレイのような、擬似的に3次元の視覚を与える機器、これを発展させた操作デバイス

が多い。国別の論文動向<sup>4)</sup>を見ると、米国がおよそ 33%、英国とドイツがそれぞれ 9%、イタリアが 4%、日本が約 8%、中国がおよそ 4%となっている。この分野においても、他の多くの分野と同様、米国がリードし、欧州各国、日本、中国が続いている状況となっている。

直接の活用事例としては、例えばビデオゲーム用の振動コントローラーのようなものが多いが、触覚を視覚と連動することで、脳の知覚メカニズムを“錯覚”させ、リハビリテーションなどへ応用することが可能なデバイスの開発も進められている。産業技術総合研究所発のベンチャー企業である（株）ミライセンス<sup>5)</sup>では、指先に一定の振動を与え、これを視覚と連動させることで、あたかも重い岩を持ち上げたかのような感覚を与える機器の開発に成功している。また、篠田ら<sup>6)</sup>は、超音波振動子をアレイ化し、手の動きと連動させて、実際に触れられたわけではないのに、手を「触られた」感覚を与えるデバイスの開発に成功している。単に触覚を再現するだけでは、ゲームのようなバーチャルな感覚の体現に過ぎないが、触られるということには、安心感を与えるといったような、心理学的な効果も付加される。例えば ADHD（注意欠陥・多動性障害）を有する児童は、単独では落ち着きなく動き回るものの、身近な存在に「抱きしめられる」と、落ち着きを取り戻すことが知られており、触覚を与えるセンサーを内蔵した上着を着せ、異常行動を示した場合に「抱きしめた」感覚を与えることできるウェアラブルデバイス<sup>7)</sup>の開発も進められている。

精神障害だけではなく、治療に応用される例も報告され始めている。首の筋肉が異常に緊張してしまい、まっすぐの状態を保つことができず、前後左右のいずれかに曲げてしまう「痙性斜頸」という疾患がある。この疾患の治療には、神経の緊張を緩和させるために、ボツリヌス菌から抽出した毒素（ボツリヌストキシン）を含有した薬剤を注射するという対症療法<sup>8)</sup>が取られていたが、梶本ら<sup>9)</sup>が発見した“ハンガー反射”を応用することで、頭部の定点に力学的な刺激を与えて、首を曲げようとする行動を相殺する器具<sup>10)</sup>が開発され、臨床試験を経て、医療器具として製品化されている。

これらは、触るという行為そのものを代替するためのデバイスであるが、もう一方では、ヒトに触れる場合の、できるだけ現実感を伴った素材、これを用いた訓練用の用具の開発も進められている。日本においては、化粧品を販売するにあたり、実際に顧客を対象の製品を塗り、その感覚を体感させた上で購入する仕組み（対面販売）が取られている。そのため、化粧品メーカーは、製品を実際に販売する人員を用具（マネキン）を用いて訓練している。ヒトの皮膚は年代や環境によって大きく異なっていることから、このマネキンも可能な限り、実情を反映したものを複数種類用意する必要がある。こうした用具を開発していたレジーナ社<sup>11)</sup>は、近年、同社が従来開発していたマネキンの素材を応用して、医学教育用の練習用模型の開発を進めている。これは内部に血管を模したビニールチューブをもち、ヒトの腕型の半透明の模型で、医学生や看護学生の注射の練習などに利用可能なものを目指している。

このように医学にせよ、化粧品にせよ、人間の「ふれ合い」が必要ではあるが、容易に実験ができない場合に、これらを仮想現実的に「体感」できる装置、機器・器具は今後さらに重要性を増してくると思われる。

#### (4) 科学技術的・政策的課題

・ 触覚はヒトの感覚であり、これを定量的に評価することが重要であるが、現在のところ、評価方法の主流は個人差などが大きい「官能評価」に依存している。官能評価は被験者がいれば、比較

的に低コストで実施できるが、定量性に欠け、機器による評価はコスト面に加え、対象が非常に限定されており、この間をつなぐ、あるいは埋めるような技術・手法が待望されている。

- ・ 医薬品の評価では、EUにおいて、動物実験に対する規制が強化される傾向<sup>12)</sup>にある。主に動物愛護の観点から、薬効の評価などに動物を使用せず、可能な限りシミュレーション等で代替する方向へと転換することを企図している。化粧品も医薬品の一種であることから、例えば肌への影響などはこれまで動物実験で評価されてきたが、今後は評価方法の転換を迫られると推察される。そのためにも、液体やエマルジョン成分から構成される化粧品を高精度かつ迅速に評価できる機器に対するニーズは高まっていくと考えられる。

- ・ 前述のように、触覚はヒトの感覚であり、医学や生理学といったライフサイエンス分野の研究内容であるが、現在、デバイスや機器として実装されているのは主に情報通信分野、これらを応用したロボットなどの機械分野が中心となっており、主要な研究者層も情報通信など、工学系の分野が中心となっている。リハビリへの応用、疾患の治療など、医学への応用を企図した場合、そのデバイス開発には医工連携、産学連携の仕組みが不可欠であり、これらを組み合わせた試作品の開発、製品開発といった「研究開発プラットフォーム」のような取り組みで進めていくことが望ましい。

#### (5) 注目動向(新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など)

- ・ Institute of Food Technologist (IFT)

1939年にアメリカで設立され、現在では世界95の国と地域に会員をもつ食品に関係した研究者と技術者で構成されている民間の団体。安全で持続的な食料供給に関する科学・技術・イノベーションについて研究開発の振興を行うことを目的としている。その活動の一環として、食品生産に関する触覚に関して具体的な定義<sup>1)</sup> (“Sensory evaluation is a scientific discipline used to evoke, measure, analyze and interpret reactions to those characteristics of foods and materials as they are perceived by the senses of sight, smell, taste, touch and hearing”) を与えている。

- ・ 計測自動制御学会 触覚部会<sup>13)</sup>

(公社)計測自動制御学会 システムインテグレーション部門の部会として2008年に設置。医療・福祉、ロボティクス、バーチャリリアリティ等の分野で重要性が増大している触覚について、ヒトの感覚としての触覚の理解、触覚センサー、触覚ディスプレイの開発などを統一的に議論する場として活動中。

- ・ JST ACCEL「触原色に立脚した身体性メディア技術の基盤構築と応用展開」<sup>14)、15)</sup>プロジェクト

ヒトの触覚を視覚の3原色と同様に、「圧力」「振動」「温度」など、複数の感覚要素が統合されたものと捉え、触覚を計測・伝送・提示することを目的とし、触覚と3D画像が融合した、実際に手で触ることが可能な画像を空中に提示する「3次元視覚情報提示装置」、ヒトの分身として遠隔地にあるロボットをヒトの身体運動と同期させるとともに、ロボットが得た感覚をヒトに伝えることができる「テレグレジスタンスロボット」の実証システムを開発し、その実用化や国際標準化を目指すプロジェクト。

## (6) キーワード

触覚、触覚応用デバイス、しっとり感、化粧品開発、医薬品開発、マネキン、リハビリテーション

## (7) 参考資料

- 1) アメリカの食品研究者・技術者の組織である Institute of Food Technologist による定義。詳細は Food Technol. Vol.35(11), pp.50 (1981)
- 2) 前野隆司、小林一三、山崎信寿、ヒト指腹部構造と触覚受容器位置の力学的関係、日本機械学会論文集 C 編、Vol.63、N0.607、pp.881-888 (1997)
- 3) 例えば、指における触覚受容器での応答周波数領域については、前野隆司、ヒト指腹部と触覚受容器の構造と機能、日本ロボット学会誌、Vol.18、No.6、pp.722-775 (2000)
- 4) JST CRDS における Web of Science 検索結果。
- 5) ミライセンス社ホームページ <http://www.miraisens.com/ja/technology.html>
- 6) IEEE Transactions on Haptics, Vo.3, No.3, pp.155-165, July-September (2010)
- 7) シンガポールのベンチャー企業である T.Ware 社の製品である T.Jacket は、ジャケットの中に空気圧で作動するエアポケットが装備されており、スマートフォンなどで遠隔操作ができる。ADHD の他、PTSD（心的外傷後ストレス障害）などの症状改善への対処の 1 つとして活用が始まっている。<http://www.mytjacket.com/the-science-behind-it.html> を参照。
- 8) ボツリヌス菌から産生されるボツリヌス毒素は食中毒の原因となる反面、筋弛緩効果をもっていることから、顔面や不随意運動、筋肉の緊張を緩和する治療法として活用されている。例えば、<http://www.lab.toho-u.ac.jp/med/ohashi/neurology/patient/botox/index.html> を参照。
- 9) 電気通信大学 梶本研究室のホームページ に詳細あり。  
<http://kaji-lab.jp/ja/index.php?rsearch%2Fhanger>
- 10) 研究成果を「ラクビ」として（株）TSS から販売。一般医療機器 非能動型簡易型牽引装置（35519001）ラクビ [http://www.geocities.jp/dystonia2005/img/rakubi\\_151123.pdf](http://www.geocities.jp/dystonia2005/img/rakubi_151123.pdf)
- 11) 株式会社レジーナ Web サイト <http://www.bioskin.jp/chusha/index.html>
- 12) EPAA（European Partnership for Alternative Approaches to Animal Testing）（2005年11月7日）においては、「3Rs 宣言」として、動物愛護を含め、適切な資金・資源の提供を通して、動物実験を代替する評価法の開発等を加速し、得られた方法の迅速な承認を目指すことが含まれている。J Am Assoc Lab Anim Sci. 54(2) 209-213, 2015 Mar. を参照。
- 13) 触覚部会ホームページ <https://sites.google.com/site/sicehaptics/>
- 14) JST ACCEL「触原色に立脚した身体性メディア技術の基盤構築と応用展開」ホームページ [http://www.jst.go.jp/kisoken/accel/research\\_project/ongoing/h26\\_05.html](http://www.jst.go.jp/kisoken/accel/research_project/ongoing/h26_05.html)
- 15) 身体性メディア技術で触覚をリアルに伝える JST News 2015年8月号 [http://www.jst.go.jp/pr/jst-news/pdf/2015/2015\\_08\\_p10.pdf](http://www.jst.go.jp/pr/jst-news/pdf/2015/2015_08_p10.pdf)

## 1. 4 土壌・環境マイクロバイオームの評価・制御基盤技術

### (1) テーマ名

土壌・環境マイクロバイオームの評価・制御基盤技術

### (2) 概要

土壌や環境のマイクロバイオーム（微生物叢）には難培養性の微生物が多く存在しており、そこから如何に有用なもの（微生物、微生物がつくる有用化合物、有用化合物の遺伝子クラスターなど）を認識・抽出するかが注目されつつある。土壌や環境のマイクロバイオーム（微生物叢）の統合的かつ網羅的な解析と動態の評価、および、それらの制御に向けて必要となる技術領域・基盤技術群が今後大きく発展する可能性がある。

### (3) 国内外における研究開発の動向

次世代シーケンサーの技術革新は、一塩基あたりの解析コストをこの10年で10万分の1にまで押し下げた。このコストの劇的な低下により、ゲノム解析を適用できる生物種が爆発的に拡大し、ゲノムサイズの小さい生物であれば、全ゲノム解析であっても個々の研究室単位で行えるようになりつつある。また、様々な環境中に存在する細菌、菌類といったマイクロバイオームの、16S r RNAあるいは18S r RNAの配列情報を検出し、それを系統学的指標とすることで、その構成種を網羅的に評価する解析手法、メタゲノム解析が確立した。メタゲノム解析によって、実に環境中の約99%以上の微生物が、現在の一般的な培養技術では純粋培養できないことが明らかとなった。大多数の微生物が培養困難な理由としては、「複数の微生物が生育や増殖に必須な物質的な因子を介して相互作用している」、「それらの微生物は培養可能な微生物に比べて分裂・増殖が極めて遅い」、「宿主となる植物と絶対共生関係にある」といったことが考えられる。また、一般的な培養条件の検討では大気中つまり酸素濃度の高い好気的条件下で行われるが、難培養性微生物には嫌気的条件下でないと増殖しないものも多数あることも一因である<sup>1)</sup>。

こうした微生物集団を取り扱う研究開発として、最も先行し大きな研究投資がなされたのが、ヒトのマイクロバイオーム研究である。世界的には2008年頃より、米国、欧州が先導する形で公的資金の助成を受けて推進された。これまでに、ヒト健常者の全身の上皮（口腔、呼吸器、消化管、皮膚、生殖器など）におけるマイクロバイオームのゲノム情報のカタログ作成や、疾患ごとのマイクロバイオームの構成プロファイルが得られている。現在も継続して、個々の疾患や健康状態との相関解析、新規治療法の開発、創薬シーズの探索などを目的に、研究が展開されている<sup>2)</sup>。

ヒト以外の微生物集団を取り扱う研究開発の動向について、*Nature Microbiology* の創刊号に掲載された **Consensus Statement** によれば、2012～2014年の間に行われた米国のマイクロバイオーム関連の研究のうち、実に全体の3分の2がヒトあるいは実験動物関連であった<sup>3)</sup>。一方、農業、陸上、水圏といった、土壌・環境マイクロバイオーム研究については、全体の8%、14%、8%に過ぎない。植物や土壌のマイクロバイオーム研究は特に、人口増に伴う食糧増産への対応および温暖化ガスの排出緩和に対し、大きな貢献ができる可能性を秘めており、今後の研究推進が期待されている。

現在では実に様々な物や環境を対象にメタゲノム解析が行われるようになり、環境マイクロバイオーム研究は新しい展開を見せている。2015年に報告された顕著な例を以下に示す。JAMSTEC

の地球深部探査船「ちきゅう」によって得られた、海底下 2500m、2000 万年前には森林だった地層のサンプルから、新規の微生物群が発見された<sup>4)</sup>。都市スケールでのメタゲノム解析がニューヨーク市の地下鉄、運河、公園からのサンプルで行われた<sup>5)</sup>。また、コーヒーサーバー<sup>6)</sup>やチーズ<sup>7)</sup>など、食品関連を対象にメタゲノム解析を行った例も出てきた。植物に共生する真菌類については、その複雑な「相互作用ネットワーク」の解析から、「中心核 (仲良し菌)」となる種が存在することが発見された<sup>8)</sup>。メルロー種のぶどう畑の土壌マイクロバイオーム解析から、ワインの個性 (テロワール ; *terroir*) の形成にはマイクロバイオームが大きく関わるのではないかと、言った興味深い事例も報告された<sup>9)</sup>。今後も、多様な環境 (都市、農地、住居など建築物などの人工的環境および、森林、水圏、永久凍土などの自然環境の両方で) や物 (食品、家畜、ペットなど) を対象に、微生物多様性の包括的な記載と理解が進むと考えられる。また、複合微生物系の相互作用の研究が展開され、マルチオミクス解析やシステムバイオロジー的手法により、環境や物の品質の制御方法の開発などが導出されると考えられる。特に土壌マイクロバイオーム研究は、微生物の多様性が高く、「最後のフロンティア」、「*Microbial dark matter*」<sup>1)</sup>と例えられ、持続的な食料増産、生物資源の確保、土壌などからの温暖化ガスの排出削減などに対して、大きな貢献がなされる可能性があるものとして期待されている。また土壌マイクロバイオームへのもう一つの期待は、新規抗生物質のシーズ探索である。ストレプトマイシンや 2015 年ノーベル医学・生理学賞の受賞理由となった大村智特別栄誉教授のエバーメクチンなど、多くの抗生物質・抗寄生虫薬が土壌細菌 (放線菌 *Streptomyces* 属) から発見されていることが大きな理由である。

非常に重要な技術的課題は、難培養性の膨大な数の微生物群から、いかに有用な微生物を、あるいは有用な遺伝子を発見してくるかという点である。これを乗り越えるための方策はいくつかある<sup>1)</sup>。一つは、膨大な組み合わせの培養条件をしらみつぶしに試し、とにかく培養を成功させるというやり方である。多穴のマイクロプレートなどを用いて、培地に添加する物質の組み合わせや酸素条件など、多数のパラメーターを変えてひたすら試す。二つ目は、マイクロフルイディクスを用いて、手のひらサイズに数千ものナノリットルサイズの培養ウェルを集積するやり方である。一つのウェルにだいたい 1 つの微生物細胞が入るように制御するが、2 種あるいは 3 種の微生物細胞が入ることで相互作用により増殖が可能になる場合もある。三つ目は、多穴の各ウェルに培地と一つの微生物細胞が入るようにし、半透膜で覆ったデバイス (iChip) を用いる方法である。このデバイスを土壌にそのまま土壌に挿すと、個々の細胞は隔離されているが、土壌との間で物質のやり取りは起こるので、ウェルの中で細胞増殖が起こる場合がある。この方法で土壌の細菌の約 50% について培養に成功した例もある。ウェルの中で細胞増殖が確認されたら、増殖を抑制したい菌 (多剤耐性菌など) を一様に広げたシートを被せる。もし、菌の増殖の阻害が起こっているものがあれば、その微生物細胞は有望な新規抗生物質生産菌候補となる<sup>10)</sup>。四つ目は、シングルセルアナリシス、すなわち一細胞レベルで新規生理活性物質を持つ候補の細胞を光学的にスクリーニングし、次いでゲノムあるいはトランスクリプトーム解析を行い、生理活性物質合成に関わる遺伝子を単離する方法である。五つ目は、細菌のゲノムのデータから、抗生物質のような有望な物質生産をする遺伝子の鍵となるパターンを、機械学習によるアルゴリズムで抽出する方法である。

これまでの分子生物学においては、研究対象は純粋培養された単一のモデル生物種であった。今後は、計算機科学やメタボローム解析技術の発展や高度化に支えられて、多数の生物間相互作用を扱えるようになると予想される。また、次世代シーケンサーによる核酸解析コストの著しい低下に

よって、モデル生物を集中的に解析する従来のスタイルから脱却し、あらゆる生物種を分子生物学的な解析の俎上に乗せることが可能な時代が来ると期待されている。このような未開拓の微生物群の、複数の生物種間の相互作用と、環境における機能の解明と制御が今後の大きなテーマとなると考えられている。

#### (4) 科学技術的・政策的課題

（科学技術的課題）

- ・ マイクロバイーム解析技術に関するツール、技術、データベースなどの共通基盤の構築が重要である。
- ・ ゲノムやメタゲノムデータだけでなく、マルチオミクス解析のための、トランスクリプトーム、プロテオーム、リピドーム、メタボロームなどのデータ収集も必須である。
- ・ データサイエンスやバイオインフォマティクスを行うためのインフラストラクチャーや人材の育成と確保が重要である。
- ・ データ収集に伴い、サンプル収集や処理法といった解析手法の標準化が必要である。土壤に関しても、国際的な標準化の必要性が謳われている<sup>11)</sup>。
- ・ サンプル処理のための解析パイプラインの整備、すなわち解析装置のハイスループット化や自動化が求められている。
- ・ 難培養性の微生物を培養可能にする技術群の創出と、用途に応じた適用（マイクロフルイデイクス、iChip、シングルセルアナリシス、マイクロドロップレット、鍵となる反応経路の機械学習アルゴリズムによる抽出、など）が求められる。

（政策的課題）

- ・ 技術基盤としては共通要素が多いが、成果を社会に還元する際には実に様々な切り口があるため、学際的な研究開発、あるいは省庁横断的な取り組みを行い、研究設備やインフラへの重複投資を避けるとともに、相乗効果を生むような集約した共通研究基盤を持つのが望ましい。
- ・ 産業界との情報共有および連携するシステムが必要である。
- ・ 海外の自然環境を対象にした研究については、遺伝資源へのアクセスと利益配分（ABS）の遵守に向けた国内措置、および海外現地の研究組織との連携が必要である。

#### (5) 注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

- ・ Phytobiome initiative<sup>12)</sup> （米国）

「作物の改良に向けた新しいパラダイムをデザインする」というタイトルで、2015年6月30日～7月2日にかけて、200人以上の参加者（アカデミア、企業、ファンディングエージェンシーから）をワシントンDCに集めてPhytobiome Initiativeの最初のミーティングが開催された。植物をとりまく、微生物叢、昆虫や線虫などを、全体的な視野からシステムとして把握し、農業生産性の向上を目指すプロジェクトを立ち上げようとしている。“Phytobiome”という単語は、2013年にコロラド州立大学のDr. Jan Leachによってつくられた。Phytobiomeの概念はひろく、植物をとりまく微生物叢、昆虫、線虫などが含まれ、さらに全てに影響を与え

る非生物的環境要因、気温、水分、光なども包含する。ミーティングでは、植物の生育を助ける微生物群を操作する方法や、土壌の水分や肥料の量をセンサーで精密にモニターしながら必要などころにだけ供給する「精密農法 (Precision Agriculture)」なども紹介され、企業や産業界からの参加者にアピールした。参加者の大部分は米国所属だが、ブラジル、オーストラリア、ドイツ (参加者は日本人)、フィリピンからも少数の参加者があった。

・ International Soil Metagenome Sequencing Consortium “TerraGenome” (インターナショナル)

土壌のメタゲノム解析に関する科学者の国際的なグループ。2008年頃から、国際的なパブリックコンソーシアムの設立をめざして議論が進められ、ワークショップの開催や Nature Reviews of Microbiology (Editorial) への寄稿などを行い<sup>13)</sup>、2011年より、NSF Research Coordination Network からファンディングを受けて公式に発足した。戦略立案や情報共有のための定期的なミーティングの開催、シーケンス/バイオインフォマティクス解析の調整、ワークショップや大学院生および研究者の教育、ウェブサイトを通じたデータの共有、などを行っている。また、メタデータ収集にあたり、標準化のための指針を示している。解析のための資金は、プロジェクトごと、国ごとに別々に得ている (カナダ NSERC、フランス ANR、米国 DOE、NSF など)。

・ Earth Microbiome Project (インターナショナル)

発足時は米国 DOE にサポートされていたが、2010年より、Templeton & Keck Foundation によりサポートされている。研究機関と産業界のパートナーシップにより、地球上の微生物叢マップを作成している。

・ EC Marine Microbial Biodiversity, Bioinformatics, and Biotechnology Program (インターナショナル)

2012年に開始した、地球規模での海洋マイクロバイオームのカタログ化を行う、国際的なコンソーシアム。Ocean Sampling Day (OSD) という大規模実験を企画し取りまとめている。OSD は、世界中の研究者が参加し、特定の日、海洋のサンプルからメタゲノム解析をするものである。2014年6月21日(夏至)に、世界ではじめて OSD が行われ、155もの16S/18S rRNA アンプリコンデータセット、150のメタゲノムが集められた<sup>14)</sup>。夏至の日、世界で一斉に多点でのサンプリングを長期的行うことによって、海洋の微生物多様性を決める重要なファクター (物理化学的な、あるいは生物学的な) は何か、OSD の各サンプリングサイトにおける、重金属、抗生物質、糞便と関連した微生物機能は何か、という問題に取り組むとされる。ヨーロッパや北米からのサンプルがほとんどで、アジアからはわずか4か所(中国からの参加なし)であった。日本からは京都大学だけが参加した。

## (6) キーワード

ゲノム、メタゲノム、トランスクリプトーム、プロテオーム、リポドーム、メタボローム、マルチオミクス解析、マイクロフルイディクス、iChip、機械学習による代謝パスウェイ解析、シング

ルセルアナリシス

### (7) 参考資料

- 1) Lok, Mining the microbial dark matter. *Nature* Vol. 522, pp270-273 (2015)  
doi:10.1038/522270a
- 2) 戦略プロポーザル 「微生物叢 (マイクロバイオーム) 研究の統合的推進 ～生命、健康・医療の新展開」 CRDS-FY2015-SP-05
- 3) Stulberg, et al., An assessment of US microbiome research. *Nature Microbiology* Vol.1, pp1-7 (2016)
- 4) Inagaki, et al., Exploring deep microbial life in coal-bearing sediments down to ~2.5km below the ocean floor. *Science* Vol. 349, pp420-424 (2015)
- 5) Afshinnikoo et al., Geospatial resolution of human and bacterial diversity with city-scale metagenomics. *Cell Systems* Vol.1, pp72-87 (2015)
- 6) Vilanova et al. The coffee-machine bacteriome: biodiversity and colonization of the wasted coffee tray leach. *Scientific Reports* Vol.5, Article number: 17163(2015), doi:10/1038/srep17163
- 7) Wolfe et al., Cheese Rind Communities Provide Tractable Systems for In Situ and In Vitro Studies of Microbial Diversity. *Cell* Vol.158, pp422-433(2014)
- 8) Toju et al., Network modules and hubs in plant-root fungal biomes. *Journal of the Royal Society* (2015) doi: 10.1098/rsif.2015.1097
- 9) Zarraindia, et al., The soil microbiome influences grapevine-associated microbiota. *mBio* Vol.6, e02527-14 (2015) doi:10.1128/mBio.02527-14
- 10) Ling et al., A new antibiotic kills pathogens without detectable resistance. *Nature* Vol.517, pp455-459 (2015)
- 11) Ramirez et al., Toward a global platform for linking soil biodiversity data. *Front. Ecol. Evol.* (2015) <http://journal.frontiersin.org/article/10.3389/fevo.2015.00091/full>
- 12) Ledford, Plant dwellers take the limelight. *Nature* Vol. 523, pp137-138 (2015)
- 13) Vogel et al., TerraGenome: a consortium for the sequencing of a soil metagenome. *Nature Reviews Microbiology* Vol.7, pp252 (2009)
- 14) Kopf, et al., The ocean sampling day consortium. *GigaScience* Vol.4 pp27-21 (2015)

## 補足：これからのライフサイエンス・臨床医学分野の研究開発の方向性等

ライフサイエンス・臨床医学ユニットでは、平成 28 年度末の取りまとめに向け、俯瞰調査活動を実施している。本項では、これからのライフサイエンス・臨床医学の研究開発のあり方として重要と考えられる方向性について、概要を紹介する。

ライフサイエンス・臨床医学分野では、解析技術の飛躍的な進展や様々なデータベースの整備などによってビッグデータを活用した研究が可能となりつつある。そして、下図に示すように、ビッグデータを最大限活用することによって、今後の研究開発は大きく加速するものと考えられる。

例えば創薬を例に挙げると、生命や疾患の理解を目指す基礎研究段階から、得られた知見を医薬品、医療機器などにつなげるための応用研究（橋渡し研究）、法規制などに則った小規模な検証（臨床試験、治験）を踏まえて、最終的には社会全体へ波及するような形態（例えば製品としての医薬品の販売）とし、さらに社会で使用された結果の調査・解析（市販後調査）で得られた知見に基づき、新たな研究開発（メカニズム研究など）を推進する。これら一連のサイクルの中でビッグデータが生まれ、それらを活用することで、成果創出は大きく加速しうる。そのために必要な要素研究・要素技術を強化すると同時に、それらを統合化し一連のサイクル全体の最適化を進めていくことが、今後、本分野において重要になると考えられる。

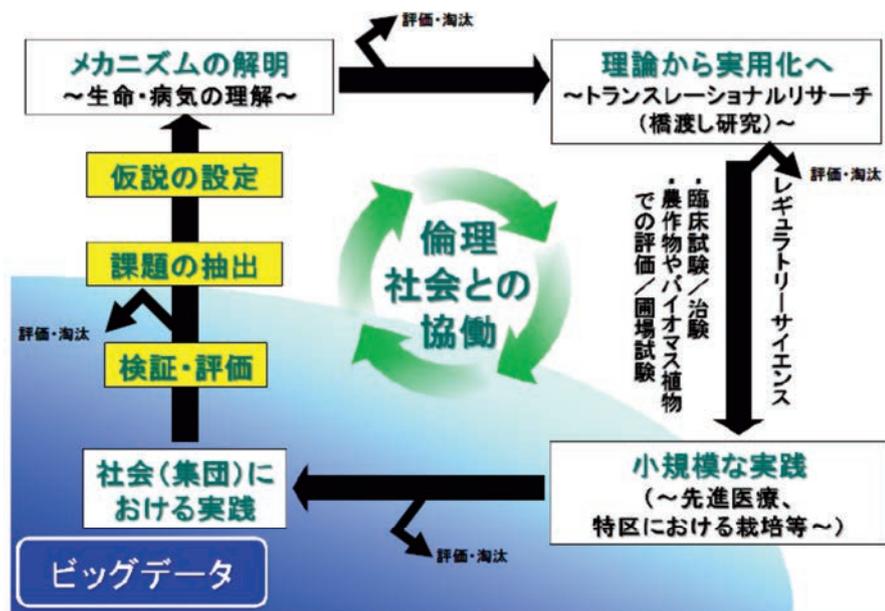


図 ライフサイエンス・臨床医学分野の研究開発の方向性

### (参考) わが国の関連動向

本分野においては、人間の健康維持、疾患からの回復、食事などの日常生活に密着した成果が求められ、研究開発についても非常に期待が大きい状態にある。特に医療制度については国民皆保険制度という制度で運用されている。アメリカの医療のように完全資本主義でもなければ、欧州諸国に見られるような社会主義的な体制でもなく、” Publicly Paid, Privately Provided ”（対価は公共で賄い、医療は民間が提供する）という状況である。そのため、一定の効果が認められ、この制度

下で維持可能な研究成果であれば、市場原理に淘汰されることなく、社会実装が行われがちで、評価サイクルが上手く機能していないとも言われる。この体制下では、安全かつ安価な医療を国民に遍く提供できる反面、その維持コストは大きくなる傾向があり、超高齢化社会に突入したわが国では、このシステムを支えるための医療費（国民医療費）総額は40兆円を超えており、国家負担分に限っても2016年度予算で11兆円を超えると推計されている。医療費によるコストは今後も国家財政を圧迫していく可能性が高く、より効率的な医療の提供が必要となるが、これを支えるためのデータの共有化、システム化については、地域での取り組みが始まったばかりで、上手に活用していく段階には至っていないのが現状である。様々な研究成果がデータとして得られ、これを集積したビッグデータとして解析できる現代では、この傾向は医療だけではなく、食料生産など、他の分野でも同様である。そのため、今後、本分野の研究開発を考えていくに当たり、(1) データを最大限活用した研究開発体制の構築、(2) 基礎研究から応用研究、橋渡し研究を経て社会実装に至る各プロセスでの厳密な評価と淘汰によって、効率の高い研究開発を推進していく必要があると考えられる。

#### （参考）注目すべき米国の動向

最後に、これからの医療研究開発の方向性を示唆する、特に注目すべき海外の大きな動きとして、2015年1月、オバマ大統領が一般教書演説において発表した“Precision Medicine Initiative”を挙げる。

従来型医療の多くは平均的な患者向けにデザインされたものだが、Precision Medicineは、遺伝要因、環境要因（ライフスタイルなど）の違いをもとに、患者やハイリスクな人々をある程度の規模でグループ分け（subpopulation）し、グループごとに適切な治療法や発症予防法を開発するという方針である。これはビッグデータを活用した新たな医療提供体制、医療技術開発の動きへとつながるものと考えられる。このイニシアティブが目指す5つの目標のうち1つに、ボランティアによる全米規模での研究コホート（100万人またはそれ以上）が掲げられており、同コホート研究などを基盤とした様々な医療技術が今後生み出されていくものと予想される。

なお、平均的 patient 向けにデザインされた従来型医療から脱却するコンセプトとして、一時期、個人個人に最適な医療を開発・提供しようとする“Personalized Medicine”がうたわれ、様々な医療技術が生み出されたが、個人を対象とした医療技術の高コスト化が深刻な問題となっていた。そのような状況を踏まえ、安全性・有効性に加えて経済的な妥当性の高い、ある程度の規模のグループ毎に最適な医療を開発・提供しようとする“Precision Medicine Initiative”へと軌道修正されたものと見受けられる。同様の方向性は英国においても呼応する動きが見られ、これからの世界の医療研究開発の大きな方向性へとようになっていくことが予想される。わが国においても、先述したわが国特有の状況も踏まえた上で、適切な研究開発戦略を立案、推進していく必要がある。

## 2. ナノテクノロジー・材料分野

### 2. 1 ナノテクノロジー・材料分野の概要

ナノテクノロジー・材料分野は物理学、化学、生物学を横断し、原子分子レベルでの観測や構造形成・機能発現などを通して、物質科学や材料技術、デバイス技術などを進展させ、さらには異分野の融合を促進しつつ進化する技術分野である。このため、新しい科学技術や新たな産業の創出のみならず、グローバルな課題の解決あるいは社会的期待に迅速に応える課題解決型研究を支える科学技術基盤の一つとして位置づけられる。CRDS では、ナノテクノロジー・材料分野における世界各国の国家計画、投資戦略、研究ポテンシャル、技術進化、企業化動向、重要な研究開発領域を含む当該分野全体の俯瞰の結果を記載した「研究開発の俯瞰報告書 ナノテクノロジー・材料分野（2015年）」（以下では、俯瞰報告書 2015 とする）を 2015 年 4 月に発行した<sup>1)</sup>。

現在、CRDS ナノテクノロジー・材料ユニットは、2016 年度末に発行予定の俯瞰報告書 2017 作成に当たり、俯瞰報告書 2015 発行以降の国内外の研究動向・政策動向の進捗や状況を踏まえた当該分野の俯瞰を充実させているところである。特に、AI 技術に代表される ICT 分野の進展は著しく、多くの産業的な応用への期待が高まっている。これをハードウェアとして支えているナノテクノロジー・材料がどのような可能性を提示できるのかは注目に値する。また、新たな科学技術や産業を創出するナノテクノロジー・材料の科学技術基盤の強化、ナノテクノロジー・材料分野が産み出す社会・経済的価値の顕在化といった視点でも、当該分野の俯瞰を強化している。

本報告書では、俯瞰報告書 2015 では詳述していないものの、最近 1~2 年間での国内外の研究開発上の大きな進展や変化、または政策上の動向として CRDS が注目した下記 4 テーマについて記載したものである。

- ① 超高压下における硫化水素の超伝導状態（転移温度 203K）の発現
- ② ナノバイオ・ナノメディシン領域におけるナノワイヤ応用研究
- ③ 量子コンピュータで大幅に演算を高速化できることを実証
- ④ 米国家ナノテクノロジー・イニシアティブの動向

①~③は、俯瞰報告書 2015 における俯瞰区分「社会インフラ」「健康・医療」「情報通信・エレクトロニクス」に関連するテーマであり、欧米を中心に近年急速に研究開発競争が激化している領域である。また④に関しては、これまでナノテクノロジーを牽引してきた米国における政策上の重要な動きである。

以下、本報告書において取り上げた 4 つのテーマの概略を示す。

- ① 超高压下における硫化水素の超伝導状態（転移温度 203K）の発現

ドイツのマックスプランク化学研究所のグループにより、硫化水素が 150GPa という超高压下で転移温度 203K の超伝導状態を発現することが報告された（2015 年）。このことは、極限条件下とはいえ、量子効果の制御による、室温超伝導の実現可能性を示唆する報告であ

る。銅酸化物超伝導、鉄系超伝導に続く第3の超伝導ブームに通じる可能性があり、ナノテクノロジー・材料分野における重大な発見であることから、本報告書に記載する研究開発上のトピックスとして取り上げた。

#### ② ナノバイオ・ナノメディシン領域におけるナノワイヤ応用研究

2000年以降、化合物半導体ナノワイヤを用いたバイオセンシングに関する研究開発が進展したが、最近、細胞や生体分子と適合性の高い酸化物ナノワイヤや、*kinked* ナノワイヤと呼ばれる枝分かれした3次元ナノワイヤなどの新しいナノワイヤ構造が開発されている。特に、がん細胞の分離、DNA、RNA、タンパク質の高速解析、細胞内イメージングなどへの応用研究が進展している。ナノテクノロジーとライフサイエンスを繋ぐナノバイオ分野における研究開発上の重要な動向であるため、研究開発上のトピックスとして取り上げた。

#### ③ 量子コンピュータで大幅に演算を高速化できることを実証

カナダ D-wave 社が世界初の市販量子コンピュータを開発して以降、欧米を中心に量子コンピュータの研究開発競争が激化している。量子コンピュータは、従来のコンピュータでは有意の時間に解けない組合せ最適化問題などを瞬時に計算でき、機械学習やディープラーニングの超高速化、新薬・新物質開発、ロボティクスなどへの応用が期待されている。本分野の動向は、安全保障の観点でも世界的に注目される重要事項でもあるため、研究開発上のトピックスとして取り上げた。

#### ④ 米国家ナノテクノロジー・イニシアティブの動向

クリントン政権下の2001年から15年間にわたり実行されてきた国家ナノテクノロジー・イニシアティブ（National Nanotechnology Initiative: NNI）に関し、PCAST（大統領科学技術諮問会議）において総括報告がおこなわれた（2015年）。NNIのもと実施された研究開発成果を商業化していくために、NNIを取り巻く環境を再び活気あるものにすることが課題であるとしている。また、NNIにおける主要プログラムの一つ、ナノテクノロジー研究インフラ共用ネットワーク（NNIN）が終了し、後継プロジェクトとして National Nanotechnology Coordinated Infrastructure（NNCI）が開始された（2015年）。世界におけるナノテクノロジー政策の重要な動向の一つとして取り上げた。

#### 参考資料

- 1) 国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）研究開発戦略センター（CRDS）、「研究開発の俯瞰報告書 ナノテクノロジー・材料分野（2015年）」（CRDS-FY2015-FR-05）、2015年4月、<http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2015/FR/CRDS-FY2015-FR-05.pdf>

## 2. 2 超高压下における硫化水素の超伝導状態（転移温度 203K）の発現

### (1) テーマ名

超高压下における硫化水素の超伝導状態（転移温度 203K）の発現

### (2) 概要

ドイツのマックスプランク化学研究所の A. P. Drozdov, M. I. Erements らは、約 150GPa（約 150 万気圧）の超高压下で硫化水素が転移温度 203K（ $-70^{\circ}\text{C}$ ）の超伝導状態になることを発見し、Nature 誌 2015 年 9 月 3 日号で報告した<sup>1)</sup>。これは過去最高の超伝導転移温度であり、超伝導発現機構が BCS 理論で解釈可能なことから、クーパー対の更なる理解や室温超伝導体を含む新しい高温超伝導体の発見につながる可能性を持つ、画期的な発見である。

### (3) 国内外における研究開発の動向

[背景とこれまでの取組]

1911年に H. K. Onnes が水銀 (Hg) における超伝導状態を発見<sup>2)</sup>して以降、この100年の間に次々と超伝導物質が見つかり、その転移温度も上昇している。1957年の J. Bardeen, L. N. Cooper, J. R. Schrieffer による BCS 理論<sup>3)</sup>は、2つの伝導電子が電子格子相互作用によってペア（クーパーペア）を形成し秩序化するというモデルで超伝導の本質を見事に説明することに成功した。しかし、BCS 理論の枠組みでは転移温度は 40K（ $-233^{\circ}\text{C}$ ）を超えないという予測（BCS の壁）もなされた。そのような中、1986年の J. G. Bednorz, K. A. Müller によって発見された銅酸化物高温超伝導体は当時のどの超伝導体よりも高い転移温度（30K）を示した<sup>4)</sup>。数ヵ月後には同じ銅酸化物である  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  で BCS の壁を越える転移温度 90K が観測され、世界中で銅酸化物高温超伝導フィーバーが巻き起こった。現在の銅酸化物高温超伝導体でもっとも高い転移温度を示すものは、産業技術総合研究所の竹下らによって観測された  $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8+\delta}$  の 153K とされている<sup>5)</sup>。

一般に超伝導状態は強い磁場によって壊されるため、鉄やニッケルなどの磁性を持った元素を含む化合物では超伝導は示さないことが常識となっていた。ところが、2008年に東京工業大学の神原、細野らが発見した転移温度 26K の鉄系超伝導体 ( $\text{La}[\text{O}_{1-x}\text{F}_x]\text{FeAs}$ ) によってその常識は覆された<sup>6)</sup>。その3ヵ月後には銅酸化物以外で初めて転移温度が 50K を越える鉄系超伝導体が発見されるなど、2度目の超伝導フィーバーが巻き起こり、鉄系で現在もっとも高い転移温度は C. Wang らにより発見された  $\text{Gd}_{1-x}\text{Th}_x\text{FeAsO}$  が示す 56K とされている<sup>7)</sup>。

銅酸化物高温超伝導、鉄系超伝導ともその超伝導発現機構は BCS 理論で説明することができない非従来型の超伝導体であり、室温超伝導体の実現を期待するものであったが、現時点では転移温度は室温（300K）にはほど遠い状況である。

より高い転移温度を持つ高温超伝導の実現に向けては、永らく金属水素がその有力候補であることが N. W. Ashcroft によって理論予測されていたが<sup>8)</sup>、それには 400GPa の超高压力が必要であったため実現は不可能であると考えられていた。その後、より低い圧力で水素を多く含む水素化合物が超伝導を示すことも理論予測された<sup>9)</sup>。理論計算においては 200K を超える転移温度を持つ水素化合物の超伝導体の提案がなされたものの<sup>10)</sup>、実験においては圧力下の  $\text{SiH}_4$  が示す

17Kに留まっていた<sup>11)</sup>。また、極限環境という観点では、ロシア科学アカデミーのE. A. Ekimov, V. A. Sidorovらが2004年に高压高温下（約10万気圧、2500～2800K）で超伝導ダイヤモンドの合成に成功しているが、転移温度は4Kであった<sup>12)</sup>。

このような背景の中、ドイツのマックスプランク化学研究所のM. I. Eremetsらは160GPaの圧力下で転移温度80Kの超伝導状態を示すと理論予測されていた硫化水素に注目し実験を行ったところ、150GPaの高压下において転移温度203Kの超伝導状態が発現することを発見し、Nature誌に報告した<sup>1)</sup>。報告後、この超伝導体の構造探索に関する理論的研究が行われ、硫化水素が圧力印加によって $3\text{H}_2\text{S} \rightarrow 2\text{H}_3\text{S} + \text{S}$ の分子解離を起こし、硫黄原子がbcc構造を形成することで200K程度の超伝導転移温度を持つことがわかった<sup>13),14),15)</sup>。また、大阪大学の榮永、清水らによって、硫化水素( $\text{H}_2\text{S}$ )が高压下においてはbcc構造の $\text{H}_3\text{S}$ と $\beta\text{-Po}$ 構造の単体硫黄との混合物であることが実験的にも確認されている<sup>16)</sup>。

#### [意義]

N. W. Ashcroftによって理論予測された金属水素または水素化物の超伝導状態を実現するためには、水素の1s軌道電子が伝導を担うことが重要である。しかし、通常、水素は他の原子と結びつくときには電子を失ってプロトン( $\text{H}^+$ )になるか、電子を供与されてヒドリド( $\text{H}^-$ )になるかのいずれかであり、水素の1s軌道電子が伝導を担うことはそう簡単なことではない。今回の硫化水素においては、水素の1s軌道とエネルギー的に近い硫黄の3d軌道が超高压技術によって共有結合を形成したことで、水素の1s軌道電子が伝導を担い、超伝導が発現したのではないかと考えられている<sup>17)</sup>。さらに興味深い点として、超高压下の硫化水素の状態密度を見てみると、フェルミ準位に水素の1s軌道電子だけではなく、硫黄の3d軌道電子の寄与があり<sup>18)</sup>、水素の1s軌道電子に加えて、硫黄の3d軌道電子が活性化されたことが高い転移温度で超伝導を発現したことに関係しているのではないかと考えられている。

#### [今後必要となる取組み]

硫化水素における超伝導発現は、他の水素化合物においても圧力下で高い転移温度を持つ超伝導体が存在する可能性を示唆している。実際に、ごく最近M. I. Eremetsらのグループでは、リン化水素( $\text{PH}_3$ )が約200GPaで100K級の超伝導状態を示すことが発見されている<sup>19)</sup>。今後は硫化水素以外の水素リッチな化合物における超伝導探索を活発化させ、高压下で硫化水素を超える転移温度を持つ超伝導体の発見や、そのメカニズムの解明によって、常圧下における室温超伝導体の設計指針の構築を進めていくことが期待される。

### (4) 科学技術的・政策的課題

硫化水素の超伝導発現は、極限条件下とはいえ、量子効果をうまく制御すれば室温超伝導の実現が夢ではなくなっていることを予見するものである。この超伝導の発現機構は今後更に解明されていくと考えられるが、上述のように、従来は伝導に寄与していなかった水素1s軌道電子および硫黄3d軌道電子が伝導を担っている点の特徴である。つまり、他の物質においてもこれまで伝導に寄与していないと考えられてきた電子や軌道を活性化させることができれば室温超伝導の可能性がより高まると考えられる。そのためには、超高压科学だけで

なく、計測技術や第一原理計算などの理論計算・シミュレーション技術の更なる進化が必要である。

本分野における日本の強みの一つは、100GPa を超える超高压下でも結晶構造解析が可能な大型放射光設備 Spring-8 が存在する点である。また、大阪大学では温度・圧力・磁場を制御した複合極限条件を生み出すための装置を所有し、それらを複数組み合わせることによって複合的な極限条件下における物性測定が可能である点も強みである。一方、100GPa 級の超高压を扱える物理の研究者層が薄い点は弱みである。超高压科学は、既に地球科学分野でかなり発達してきたが、その中に物性物理や合成化学の研究者が積極的に参入し、高压科学に関する新しい研究領域を生み出すことや、その知見をもとに、常圧で実現する新物質の設計へとつなげることが重要である。

#### (5) 注目動向(新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など)

JSPS 科学研究費助成事業（特別推進研究）「超高压力下の新物質科学：メガバールケミストリーの開拓」（研究代表者：清水克哉、H26～H30）では、超高压科学における究極の目標である固体金属水素と超伝導状態の実現を目指している。硫化水素の超伝導発見以降、新たに硫化水素を出発物質とした水素化合物の超伝導探索が研究項目として追加されている。

#### (6) キーワード

硫化水素、超伝導、BCS 理論、超高压科学、第一原理計算

#### (7) 参考資料

- 1) A. P. Drozdov, et al., “Conventional superconductivity at 203 kelvin at high pressures in the sulfur hydride system”, *Nature* 525, (2015): 73.
- 2) H. K. Onnes, “Experiments on the possible influence of contact with an ordinary conductor upon the superconductivity of mercury”, *Akad. Van Wetenschappen (Amsterdam)* 14, (1911): 113.
- 3) J. Bardeen, L. N. Cooper and J. R. Schrieffer, “Theory of superconductivity”, *Phys. Rev.* 108, (1957): 1175.
- 4) J. G. Bednortz and K. A. Müller, “Possible high  $T_c$  superconductivity in the Ba-La-Cu-O system”, *Z. Physik B* 64, (1986): 189.
- 5) N. Takeshita, et al., “Zero Resistivity above 150K in  $\text{HBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8+\delta}$  at High Pressure”, *J. Phys. Soc. Jpn.* 82, (2013): 023711.
- 6) Y. Kamihara, et al., “Iron-Based Layered Superconductor  $\text{La}[\text{O}_{1-x}\text{F}_x]\text{FeAs}$  ( $x=0.05-0.12$ ) with  $T_c=26\text{K}$ ”, *J. Am. Chem. Soc.* 130, (2008): 3296.
- 7) C. Wang, et al., “Thorium-doping-induced superconductivity up to 56K in  $\text{Gd}_{1-x}\text{Th}_x\text{FeAsO}$ ”, *Europhys. Lett.* 83, (2008): 67006.
- 8) N. W. Ashcroft, “Metallic Hydrogen: A High-Temperature Superconductor?”, *Phys. Rev. Lett.* 21, (1968): 1748.
- 9) Y. Wang and Y. Ma, “Perspective: Crystal structure prediction at high pressure”, *J.*

- Chem. Phys.* 140, (2014): 040901.
- 10) M. I. Erements, et al., “Superconductivity in Hydrogen Dominant Materials: Silane”, *Science* 319, (2008): 1506.
  - 11) N. W. Ashcroft, “Hydrogen Dominant Metallic Alloys: High-Temperature Superconductors?”, *Phys. Rev. Lett.* 92, (2014): 187002.
  - 12) E. A. Ekimov, et al., “Superconductivity in diamond”, *Nature* 428, (2004): 542.
  - 13) D. Duan, et al., “Pressure-induced decomposition of solid hydrogen sulfide”, *Phys. Rev. B* 91, (2015): 180502.
  - 14) I. Errea, et al., “High-Pressure Hydrogen Sulfide from First Principles: A Strongly-Anharmonic Phonon-Mediated Superconductor”, *Phys. Rev. Lett.* 114, (2015): 157004.
  - 15) R. Akashi, M. Kawamura and S. Tsuneyuki, “First-principles study of the pressure and crystal-structure dependences of the superconducting transition temperature in compressed sulfur hydrides”, *Phys. Rev. B* 91, (2015): 224513.
  - 16) M. Einaga, et al., “Crystal Structure of 200 K-Superconducting Phase of Sulfur Hydride System”, Preprint: <http://arxiv.org/abs/1509.03156> (2016年3月16日アクセス)
  - 17) 国立研究開発法人科学技術振興機構研究開発戦略センター,  
“俯瞰ワークショップ報告書「ナノテクノロジー・材料分野 領域別分科会「材料設計・制御 ～物質科学の未来戦略（物性物理の観点から）～」”,  
<http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2015/WR/CRDS-FY2015-WR-11.pdf> (2016年3月31日アクセス)
  - 18) D. A. Papaconstantopoulos, et al., “Cubic around 200 GPa: An atomic hydrogen superconductor stabilized by sulfur”, *Phys. Rev. B* 91, (2015): 184511.
  - 19) P. A. Drozdov, M. I. Erements and I. A. Troyan, “Superconductivity above 100K in PH<sub>3</sub> at high pressures”, Preprint: <http://arxiv.org/abs/1508.06224> (2016年3月16日アクセス)

## 2. 3 ナノバイオ・ナノメディシン領域におけるナノワイヤ応用研究

### (1) テーマ名

ナノバイオ・ナノメディシン領域におけるナノワイヤ応用研究

### (2) 概要

ナノワイヤをバイオセンシングに応用する研究は、2000年以降、主として化合物半導体ナノワイヤを用いて進められてきた。最近、細胞や生体分子と適合性の高い酸化物ナノワイヤが開発されたこと、また、kinked ナノワイヤと呼ばれる折れ曲がったナノワイヤや、枝分かれ構造を有する3次元ナノワイヤなど新たな構造をもつナノワイヤの作成が可能になったことによって、バイオや医療領域への応用研究が進展している。特に、従来のバイオセンシングのみならず、がん細胞の分離や、DNA、RNA、タンパク質の高速解析、細胞内のイメージング等の分野への応用研究が活発化している。

### (3) 国内外における研究開発の動向

[背景と意義]

低次元ナノ構造のうち、ナノ粒子や量子ドットなどの0次元ナノ構造やグラフェンなどの2次元ナノ構造については、構造に起因する量子効果などを利用した特異的機能を有する新規ナノ材料が開発されている。量子ドットによるがん組織や幹細胞のイメージングをはじめとして、低次元ナノ構造のバイオ・医療分野への応用が進んでいる。コーネル大学のWiesnerらはMemorial Sloan Kettering Cancer Centerと共同で、シリカナノ粒子による皮膚がんのイメージングについて、米国FDAのInvestigational New Drug (IND: 新薬臨床試験開始届) 承認に基づいて、臨床研究 (first-in-human) を進めている<sup>1),2),3)</sup>。また、名古屋大学の馬場らは、カドミウムフリーの低毒性量子ドットを開発し、京都大学iPS細胞研究所・再生医科学研究所等と共同で、低毒性量子ドットによるiPS細胞等の幹細胞およびiPS細胞から分化した治療用の細胞の生体内イメージングについて、AMED再生医療実現拠点ネットワークプログラムで研究開発を進めており、前臨床研究段階に入っている<sup>4),5)</sup>。

これに対して、1次元ナノ構造であるナノワイヤは、0次元・2次元ナノ構造に比べて構造制御の自由度が低いことから、バイオ応用はこれまで生体分子のセンシング領域に限られていた。また、ナノワイヤの材料としてよく使われているIII-V族の化合物半導体ナノワイヤは、表面酸化物の制御が困難であり、水溶液中での取り扱いが必須なバイオ・医療領域における応用が困難であった。また、化合物半導体ナノワイヤの材料の一部は、細胞毒性等があるために、バイオ・医療領域への応用を妨げていた。しかし最近、生体適合性が高く、水溶液中においても安定な酸化物ナノワイヤが開発されたことや、複雑な構造のナノワイヤの作成が可能になったことにより、バイオ・医療領域において、より広い分野への応用展開が進展している。今後、さらに、新たな1次元ナノ構造の開発により、バイオ・医療分野における応用範囲の拡大と実用化を目指した研究開発が進展するものと期待される。

[これまでの取り組み]

従来、ナノワイヤの研究において主流であった化合物半導体ナノワイヤは生体適合性が高くないため、バイオ・医療領域における応用には限界があった。しかし最近、生体適合性の飛躍的に高い酸化物ナノワイヤが開発されたことによって、ナノワイヤのバイオ・医療応用研究が進んでいる<sup>6)</sup>。さらに、直線状のナノワイヤのみならず、複雑な構造をもつナノワイヤの作成が可能になったことで、応用展開の幅が広がりつつある。たとえばハーバード大学の C. M. Lieber らは、kinked ナノワイヤと呼ばれる折れ曲がったナノワイヤを開発し、これに FET(Field effect transistor)を埋め込んだプローブによって、細胞内外の電位計測が可能であることを示した。最近では、このナノワイヤプローブを組み込んだフレキシブルデバイスをラットの脳内に埋め込んで、シグナル検出を行っている。また、名古屋大学の馬場らはナノワイヤに枝分かれ構造を導入した 3 次元ナノワイヤを開発し、3 次元ナノワイヤのネットワーク内に存在する数 nm 程度の空間・空隙を精密制御して、これを組み込んだマイクロ流路による電気泳動法により、DNA の高速分離に基づく DNA のサイズ解析を実現した。本研究においては、生体適合性の高い酸化物ナノワイヤ(ZnO, SnO<sub>2</sub> など)により 3 次元ナノワイヤを形成したこと、および、溶液の pH のコントロールによりナノワイヤ表面を負に帯電させることにより、負電荷を有する DNA 等の生体分子の吸着等を防ぐことが可能になり、DNA の高速分離・サイズ解析を実現している。さらに、従来のナノ構造では、解析困難であった RNA やタンパク質などの分子の高速分離に基づくサイズ解析も達成している。3 次元ナノワイヤ構造を有するマイクロ流路と 1 分子 DNA シークエンサとして研究が進んでいるナノポア技術<sup>7)</sup>を融合することにより、生体分子の分離解析と配列解析を一体化したデバイスの開発が可能になり、多数種の DNA の分離と配列解析を高性能化することでヒト・ゲノム解析の超高速化が達成されるものと期待される。

米国におけるナノワイヤ研究はバイオセンシング応用が中心であるが、最近はさらに、がん細胞の検出、細胞内イメージングなどの新たな応用展開が進められている。がん細胞検出においては、ナノワイヤにがん細胞を認識する抗体を結合した温度応答性高分子を修飾することで、血液中を循環しているがん細胞を効率的に捕捉・検出する技術が開発されている。本技術において、37°Cでは温度応答性高分子が伸展し、がん細胞を認識する抗体と血液中のがん細胞との接触面積が広がり、がん細胞を捕捉することができる。さらに、温度を 4°Cに下げることにより、温度応答性高分子が縮むことにより、捕捉されていたがん細胞と抗体との相互作用が弱まることで、がん細胞のみを取り出し検出することができる。ナノワイヤの非常に大きな比表面積のために、捕捉効率が、ナノワイヤを用いない場合の 50%程度に対して 90%と向上した。また、細胞内イメージングにおいては、生体適合性の高い酸化物ナノワイヤ(SnO<sub>2</sub>)を光ファイバーの先端に結合させることにより、ナノワイヤを細胞内に挿入し、細胞内の限られた領域をイメージングできるナノワイヤ単一細胞内視鏡イメージング技術が開発されている。このナノワイヤは、極めて細く高アスペクト比であるために、細胞に挿入した場合のダメージが最小限にとどまるとともに、ピコリットルスケールの部分しか光励起しないために、光による細胞へのダメージも極めて低いという特徴を有する。さらに、ナノワイヤの先端に光解離性分子を有する量子ドットを結合させることにより、細胞内に挿入したナノワイヤの先から、量子ドットを細胞内の特定の部位に短時間で移動させることにより、より空間分解能の高い細胞イメージングを実現している。

ヨーロッパでは依然として、ナノワイヤの研究はバイオセンシングが主として行われている。中国・韓国においては、グラフェンを用いたバイオセンシングの研究が進められているが、ナノワイヤのバイオ・医療応用は、これからである。日本では、ナノワイヤのバイオ・医療応用の研究例は限られているものの、3次元ナノワイヤの開発により、DNA、RNA、タンパク質の解析への応用展開が始まっている。

#### [今後必要となる取り組み]

ナノワイヤの高機能化とバイオ・医療分野への応用がさらに発展するためには、下記の取り組みが必要と考えられる。

- 1) ナノワイヤの生体適合性をさらに高めるとともに、超低毒性のナノワイヤの開発
- 2) ナノワイヤ表面の電荷・材料等の精密制御とナノワイヤ表面への抗体等の固定化によるナノワイヤの高機能化
- 3) 新規ナノワイヤ構造の開発と、ナノワイヤと他の材料（量子ドット等）のハイブリッド技術開発
- 4) ナノワイヤへの超低電圧印加によるナノワイヤ温度制御と、細胞、生体分子の捕捉・分離
- 5) ナノワイヤの量子効果を活用した新規バイオ・医療応用分野の開拓
- 6) 細胞や生体分子のみならず細胞外小胞、細菌、ウイルス、バイオエアロゾル等へのナノワイヤの応用

#### (4) 科学技術的・政策的課題

日本のナノワイヤ研究は、エレクトロニクス・ナノ材料分野の研究者を中心に太陽電池、オプトエレクトロニクス素子、光デバイス、メモリー等への応用研究が展開されている。しかし、バイオ・医療応用については、研究者はまだごく限られている。米国は、ナノワイヤのバイオ・医療応用で先行しているが、バイオセンシング以外の研究は、まだ端緒についたばかりである。また、ヨーロッパ、中国、韓国の研究もバイオセンシングに限られている。

今後、日本において、異分野融合の研究開発を進め、他国で実現されていない新規ナノワイヤ材料の開発を行うことができれば、細胞・生体分子等の解析・イメージング・センシングの応用にとどまらず、細胞外小胞、細菌、ウイルス、バイオエアロゾル等のセンシング等に応用範囲を拡大させることが可能になり、バイオ・医療応用のみならず、環境分野、食品、農業等への大きな応用展開が進展するものと期待される。

#### (5) 注目動向(新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など)

ナノワイヤのバイオ・医療応用における最近のトピックスとして、ナノワイヤ nanoelectronic scaffold (nanoES)による神経細胞の人工組織構築と神経細胞間反応のセンシング<sup>8)</sup>、細胞内のナノワイヤ内視鏡イメージング<sup>9)</sup>、ナノワイヤと温度応答性高分子による血中循環がん細胞の捕捉・検出と遺伝子解析によるがん転移診断<sup>10)</sup>と臨床研究、新規ナノワイヤ FETによる細胞内外のシグナルの同時計測<sup>11)</sup>、3次元ナノワイヤによるナノ構造精密制御に基づく DNA, RNA, タンパク質の高速解析<sup>12),13)</sup>、ナノワイヤによるバクテリア配列<sup>14)</sup>、ナノワイヤ・バイオ分子のハイブリッド光電変換デバイス<sup>15)</sup>、ナノワイヤデバイスによる脳内シグナル検出<sup>16)</sup>、生体中にイ

ンジェクダブルなナノワイヤ素子<sup>17)</sup> (C&EN が 2015 年の most-innovative 研究に選出) などが挙げられる。

## (6) キーワード

ナノワイヤ、細胞、DNA、タンパク質、がん診断、イメージング、センシング

## (7) 参考資料

- 1) A. Burns, et al., "Fluorescent Silica Nanoparticles with Efficient Urinary Excretion for Nanomedicine", *Nano Lett.* 9, (2009): 442.
- 2) M. Benezra, et al., "Multimodal silica nanoparticles are effective cancer-targeted probes in a model of human melanoma", *The Journal of Clinical Investigation* 121, (2011): 2768.
- 3) Wiesner Group, [http://wiesner.mse.cornell.edu/res\\_bioimaging.htm](http://wiesner.mse.cornell.edu/res_bioimaging.htm) (2016年3月18日アクセス)
- 4) H. Yukawa, et al, "Fluorescence imaging using quantum dots reveals increased accumulation of transplanted adipose tissue-derived stem cells in the liver when combined with heparin", *Biomaterials* 33, (2012): 2177-2186.
- 5) T. Kameyama, et al, "Crystal Phase-Controlled Synthesis of Rod-Shaped AgInTe<sub>2</sub> Nanocrystals for in vivo Imaging in the Near-Infrared Wavelength Region", *Nanoscale* 8, (2016): 5435.
- 6) S. Rahong, et al, "Recent developments in nanowires for bio-applications from molecular to cellular levels", *Lab on a Chip* 16, (2016), in press., DOI: 10.1039/c5lc01306b.
- 7) M. Di Ventra, and M. Taniguchi, "Decoding DNA, RNA and peptides with quantum tunneling", *Nature Nanotechnology* 11, (2016): 117.
- 8) B. Z. Tian, et al., "Macroporous nanowire nanoelectronic scaffolds for synthetic tissues", *Nat. Mater.* 11, (2012): 986.
- 9) R. X. Yan, et al., "Nanowire-based single-cell endoscopy", *Nat. Nanotech.* 7, (2012): 191.
- 10) Z. F. Ke, et al., "Programming Thermoresponsiveness of NanoVelcro Substrates Enables Effective Purification of Circulating Tumor Cells in Lung Cancer Patients", *ACS Nano*, 9, (2015): 62.
- 11) Q. Qing, et al., "Free-standing kinked nanowire transistor probes for targeted intracellular recording in three dimensions", *Nat. Nanotech.* 9, (2014): 142.
- 12) S. Rahong, et al., "Ultrafast and Wide Range Analysis of DNA Molecules Using Rigid Network Structure of Solid Nanowires", *Sci. Rep.* 4, (2014): 5252.
- 13) S. Rahong, et al., "Three-dimensional Nanowire Structures for Ultra-Fast Separation of DNA, Protein and RNA Molecules", *Sci. Rep.* 5, (2015): 10584
- 14) K. K. Sakimoto, C. Liu, J. Lim and P. Yang, "Salt-Induced Self-Assembly of Bacteria on Nanowire Arrays", *Nano. Lett.* 14, (2014): 5471
- 15) K. K. Sakimoto, A. B. Wong and P. Yang, "Self-photosensitization of nonphotosynthetic

- bacteria for solar-to-chemical production”, *Science* 351, (2016): 74
- 16) C. Xie, et al., “Three-dimensional macroporous nanoelectronic networks as minimally invasive brain probes”, *Nat. Mater.* 14 (2015), 1286.
- 17) J. Liu, et al., “Syringe-injectable electronics”, *Nat. Nanotechnol.* 10, (2015): 629.

## 2. 4 量子コンピュータで大幅に演算を高速化できることを実証

### (1) テーマ名

量子コンピュータで大幅に演算を高速化できることを実証

### (2) 概要

カナダ D-Wave Systems 社による世界初の市販量子コンピュータの開発をきっかけに、世界中で量子コンピュータに関連する研究開発競争が激化している。そのような中、2015年12月、米国 NASA、Google 社、USRA (Universities Space Research Association) が記者会見を開き、D-Wave Systems 社の量子コンピュータ「D-Wave 2X」によって、特定の組合せ最適化問題を既存のコンピュータと比べて1億倍高速に解いたことを発表した<sup>1), 2)</sup>。

### (3) 国内外における研究開発の動向

[背景とこれまでの取組み]

量子コンピュータに関する研究開発の経緯を示す。

1980~1990年

米欧で量子コンピュータの概念提唱

P. Benioff (CNRS), R. P. Feynman (CALTECH), David Deutsch (Oxford University) 他

1994年

P. W. Shor (MIT) により素因数分解を超高速で行うアルゴリズム開発<sup>3), 4)</sup>

このアルゴリズムを用いた量子コンピュータが実現されると、現在の RSA 暗号が一瞬にして解読される可能性があり、学会、産業界からの量子コンピュータへの注目が一気に高まる。

1998年

西森秀稔教授と門脇正史氏（東工大）が量子アニーリング理論を提唱<sup>5)</sup>

1999年

中村泰信、蔡兆申、Y. Pashkin (NEC) が超伝導回路で量子ゲート (1qbit) を実現<sup>6)</sup>

固体素子で量子ゲートが実現できることを実証、集積化の可能性を提示する。

2000年以降

量子コンピュータの基礎研究が継続（量子コヒーレンス時間が劇的に増大）

2011年

D-Wave Systems 社（カナダ）が量子アニーリングに基づく量子コンピュータを開発

2013年

D-Wave Systems社が2号機をGoogle+NASA (Quantum AI Lab.)、ロッキードマーチンに納入、ロスアラモス国立研究所には2016年に納入予定とされる。

Google、NASA、USRAはNASAのAmes Research Center内に量子人工知能研究所 (Quantum Artificial Intelligence Laboratory) を2013年に設立、人工知能に必要な機械学習

の飛躍的な演算速度向上を目指して量子コンピュータの可能性を追求してきた。2015年9月には超伝導回路で実現される量子ビットを1000個程度搭載した「D-Wave 2X」マシンを導入し、その性能テストを行った。シリコン基板上に1000個程度集積化された超伝導回路は、希釈冷凍機内に挿入され、絶対零度近くに冷却された環境下で動作する。東京工業大学の西森秀稔教授と門脇正史氏（現筑波大学教授）の考案した量子アニーリング理論<sup>6)</sup>に基づき、組合せ最適化問題が解かれる。この理論は組合せ最適化問題を、組合せの数だけ量子スピンを用意し、その量子スピン系全体のエネルギーの最小状態を見つける問題に置き換えることで解を求める。個々のスピンは量子ビットに対応し、超伝導回路で具現化されている。スピン間の相互作用は超伝導回路から成るプログラマブル磁気メモリで構成され、組合せ最適化問題に応じて相互作用の大きさを設定し、問題を解いていく。Google社のDirector of Engineeringを務めるHartmut Neven氏によると、945個の2値変数から成る組合せ最適化問題をD-Wave 2Xマシンで解いたところ、プロセッサコア1個の通常のコンピュータで同じ問題を解く場合に比べ、最大1億倍高速であることを実証することに成功したとしている<sup>7)</sup>。通常のコンピュータではSimulatedアニーリングや量子モンテカルロ法を用いて組合せ問題を解いている。

#### [意義]

量子コンピュータとは、量子力学的な状態の重ね合わせを用いて並列性を実現し、演算を実行するコンピュータである。従来のコンピュータの論理ゲートに代えて、量子ゲートを用いて量子コンピューティングを行う量子ゲート・タイプと、量子状態間に起きるトンネル現象を積極的に利用して組合せ最適化問題を高速に解く量子アニーリング・タイプの2種類に大別される。いずれも現在のスーパーコンピュータでは有意な時間では解く事が困難な問題を、瞬時に計算でき、超スマート社会を牽引する人工知能の開発に欠かせない機械学習やディープラーニングを超高速化するとともに、他分野でも新薬や新物質の開発、複雑な組合せ問題の最適化、ロボティクスなどへの応用が期待されている。量子ゲート・タイプは様々な計算に対応可能な万能型とされるが、実現にはまだ技術的なハードルが高く距離がある。これに対し量子アニーリング・タイプは、特定の組合せ最適化問題に限られるが、すでに上述のD-Wave 2Xマシンのように市販機が登場している。しかし、量子アニーリング・タイプであっても、計算の安定性の問題などまだ多数の乗り越えなければならない課題があるとされる。

#### [今後必要となる取組み]

D-Wave 2Xマシンが上記のような高速性を示すのは限られた問題に対してのみであり、常に通常のコンピュータの能力を超えるというわけではない。多数の量子スピンからなる系全体のエネルギーは、個々の量子スピンの状態の組合せに対して複雑に変化するが、エネルギー最小値に達する前に、行く手をポテンシャル障壁によって妨げられ、局所的なエネルギー最小状態（系全体の最低エネルギー状態ではない状態）に落ち込むという懸念がある。量子アニーリング理論では、そのポテンシャル障壁をトンネル効果によって乗り越えるが、このポテンシャル障壁が特に狭く、値が高い時に、量子コンピュータは通常のコンピュータに対し優位性を発揮できる。Google Research Blog<sup>7)</sup>によると、現状は量子ビットを構成する超伝導回路同士の相互接続の密度が粗く、どのような最適化問題に対しても量子コンピュータが持つ高速性が発

揮できる状況ではないとしている。D-Wave社の次世代機で量子ビット間の接続問題を解決し、より複雑な問題にも対応可能になる事が期待されている。

#### (4) 注目動向(新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など)

[日本]

内閣府革新的研究開発推進プログラム (ImPACT) において「量子人工脳を量子ネットワークでつなぐ高度知識社会基盤の構築」(山本喜久PM、H26-30) が推進されている。脳における情報処理を司る巨大な神経ネットワークを、系全体に広がった量子的波動関数で構成し、現代コンピュータでは処理できない大規模な組合せ最適化問題を高速で解くことを目標としている。

[米国]

Office of the Director of National Intelligence の下で活動する IARPA (The Intelligence Advanced Research Projects Activity) で下記 2 つのプロジェクトが進行中である。

・ QEO (Quantum Enhanced Optimization)

2015 年開始の 5 年間のプロジェクトであり、従来型のコンピュータでは実質的に計算困難な組合せ最適化問題を、量子アニーリング法で解くことを目標とする。3 次元的に接続された 100 個の超伝導量子ビット、アーキテクチャ、演算操作で構成されるテストベッドの開発により、従来コンピュータに対して 10000 倍の高速演算優位性の実証を目指している。

・ LogiQ (Logic Qubits)

量子ゲート回路方式による量子コンピュータの実現を目指している。

[英国]

2014 年 12 月より EPSRC (Engineering and Physical Sciences Research Council) が National Quantum Technologies Programme を開始した。4 つの拠点 (バーミンガム大学、グラスゴー大学、オックスフォード大学、ヨーク大学) からなり、バーミンガム大学では量子計測標準技術、グラスゴー大学では量子センシング・イメージング技術、オックスフォード大学では量子コンピュータとシミュレーション技術、ヨーク大学では量子通信技術の研究開発を推進している。ハブ整備のために、総額 270M ポンドの中から 5 年間で 120M ポンドの資金を投入する。この投資によって英国は量子技術分野で主導的地位を確実にし、通信、医療、安全保障など数兆円規模の世界市場の形成に向けた取組みを先導することを目指している。

[オランダ]

2015 年 1 月、オランダ量子技術研究機関 QuTech を National Icon に指定した。QuTech は 2013 年にオランダ科学研究機構 (NWO)、オランダ物質基礎研究所 (FOM)、オランダ技術財団 (STW) の支援を得て、デルフト工科大とオランダ応用科学研究機構 (TNO) の共同機関としてスタートした。この投資により、QuTech の先導的立場を強化し、オランダの企業や研究者が量子技術の利益をより早い段階で享受することを目指している。

以上のように、カナダの D-Wave Systems 社による量子コンピュータの商用化に刺激を受け、近年、欧米を中心に量子コンピュータ研究の国家プロジェクトが次々と立ち始めている。これらの研究開発においては、日本で最初に動作実証がなされた超伝導量子ビット技術、また同じく日本で提唱された量子アニーリング理論が中心となっている。特に米国では Google、マイクロソフト、IBM、ロッキードマーチンなどのグローバル企業が研究開発を進めており、また MIT、UCSB（カリフォルニア大学サンタバーバラ校）、USC（南カリフォルニア大学）などを中心に基礎的な研究がなされ、特に MIT ではデバイス試作の高度化が着々となされている。日本では上記のパイオニア的な仕事の後、それをフォローする研究体制が十分ではない。日本としての国際的な観点に立った研究開発の戦略構築が急務であろう。

#### (5) キーワード

量子コンピュータ、量子アニーリング、量子ビット、量子ゲート、量子スピン系、組合せ最適化問題

#### (6) 参考資料

- 1) V. S. Denchev, S. Boixo, S. V. Isakov, N. Ding, R. Babbush, V. Smelyanskiy, J. Martinis and H. Neven, “What is the Computational Value of Finite Range Tunneling?”, Preprint: <http://arxiv.org/abs/1512.02206v4> (2016年3月16日アクセス)
- 2) ITpro by日経コンピュータ “D-Waveの量子コンピュータは「1億倍高速」、NASAやGoogleが会見”、<http://itpro.nikkeibp.co.jp/atcl/news/15/120904017/?ST=system> (2016年3月16日アクセス)
- 3) P.W.Shor, “Algorithms for quantum computation: Discrete log and factoring”, Proceedings of the 35th Annual IEEE Symp on Foundations of Computer Science, (1994): 124.
- 4) P.W.Shor, “Polynomial-time algorithms for prime factorization and discrete logarithms on a quantum computer”, *SIAM Journal on Computing* 26, (1997): 1484.
- 5) T. Kadowaki and H. Nishimori, “Quantum annealing in the transverse Ising model”, *Phys. Rev. E* 58, (1998): 5355.
- 6) Y. Nakamura, Y. A. Pashkin, J. S. Tsai, “Coherent control of macroscopic quantum states in a single-Cooper-pair box”, *Nature* 398, (1999): 786.
- 7) Google Research Blog “When can Quantum Annealing win?”, <http://googleresearch.blogspot.jp/2015/12/when-can-quantum-annealing-win.html> (2016年3月16日アクセス)

## 2. 5 米国家ナノテクノロジー・イニシアティブの動向

### (1) テーマ名

米国家ナノテクノロジー・イニシアティブの動向

### (2) 概要

米クリントン政権下の2001年に始まって以来、15年間にわたり実行されてきた国家ナノテクノロジー・イニシアティブ（National Nanotechnology Initiative :NNI）について、OSTP（大統領府科学技術政策局）のLloyd Whitman博士がPCAST（大統領科学技術諮問会議）において総括報告を行った（2015年11月）。そこでは、研究開発によって生み出した知見や技術を商業化していくために、NNIを取り巻く環境を再び活気あるものにすることが課題であるとした。そのためにあらゆる分野の団結が必要であり、米国民への周知と参画、教育、研究開発、環境問題、ナノ関連物質が使用された商品の健康や安全に対するリスク、倫理的、法的、社会的課題を広く知らせ、商業化を促進し、それにより米国民が経済的な恩恵を得ることができるとした。

また、2015年前半には、NNIにおける主要プログラムの一つであるNSFのナノテクノロジー研究インフラ共用ネットワーク（NNIN）が終了し、後継プログラムとして、National Nanotechnology Coordinated Infrastructure（NNCI）が開始された。以下ではこれらの諸動向について概説する。

### (3) 国内外における研究開発の動向

[NNIで投じられた予算]

NNIには連邦政府の20省庁と関連機関が参画している。2015年度予算は約\$1.5Bであり、2001年以来の総額は\$22Bに上る。過去4年間は概ね安定して毎年\$1.5Bの規模で推移している。NNI予算の省庁別内訳は、保健福祉省（HHS、大部分がNIH）が31%で最大で、次に全米科学財団（NSF）とエネルギー省（DOE）が続く。この3機関で全体の80%を占めている。残りが国防総省（DOD）、米国標準技術研究所（NIST）と続き、これら5つの省庁・機関で全体の96%を占めている。予算配分は、2015年以降は5つのプログラム・コンポーネント・エリア（PCA）毎にマネジメントされるようになり（2014年以前のPCAは8領域であった）、2016年のPCA別の予算配分は以下のように計画されている。

- Foundational Research (34%)
- Applications, Devices, and Systems (26%)
- Signature Initiatives (17%)
- Infrastructure & Instrument (16%)
- EHS: Environment, Health and Safety (7%)

2011年から開始した省庁横断的に取り組む重点化領域“Signature Initiatives”の5領域（以下）、

- Nanotechnology for Solar Energy Collection and Conversion

- ・ Nanoelectronics for 2020 and Beyond
- ・ Sustainable Nanomanufacturing
- ・ Nanotechnology Knowledge Infrastructure
- ・ Nanotechnology for Sensors and Sensors for Nanotechnology

に関して、1つ目の太陽エネルギーについては目標を達成したものとみなしており、これに替わる新しい分野として“Water Sustainability Through Nanotechnology”が掲げられた（2016年）。

#### [経済効果]

Lux Research社の調査によると、ナノテクノロジーに関する商業分野での世界的収益は2010年の \$339B から2012年は \$731B まで成長し、2018年までには \$4.4T に達すると予測されている。これまでの商品化成功例としてナノ粒子添加剤コーティングなどが挙げられ、NNIの研究から商品化に成功している企業例としては、NanoMeck社、QDVision社、Titan Spine社などがあるとしている。Whitman博士は、ナノテクノロジーが広範な分野で様々なかたちで使用されており、政策立案者はナノテクノロジーの多様性を十分に考慮する必要があると言及した。

#### (4) 科学技術的・政策的課題

NNIに基づく研究開発によって生み出された知識・技術を商業化していくために、NNIを取り巻く環境を再び活気あるものにしていくことが課題であると指摘している。特に、米国民への周知と参画、教育、研究開発、環境問題、ナノ関連物質が使用された商品の健康や安全に対するリスク、倫理的、法的、社会的課題を広く知らせることが重視されている。米国はこれまでもNNIのもとで教育やアウトリーチに積極的な施策展開を図ってきており、これをさらに重視するよう指摘している。省庁を横断するNNI政策全体を取りまとめる組織として、大統領府にNational Nanotechnology Coordinating Office (NNCO)があるが、NNCOにおける以下の活動について、PCASTの総括報告では言及されている。

- ・ 各種テーマに関するワークショップ開催や報告書の発行：Carbon Nanotubes, Sensors, Exposure science, US-EU Coordination
- ・ インターネットセミナーの開催：例； NNCO's Public Webinars
- ・ アウトリーチ活動：Contests and Challenges, NSF nanotech videos, NSF Generation Nano, Small Science, Superheroes Contest
- ・ 経済協力開発機構（OECD）、米国特許商標局（USPTO）と共にNNIの影響評価の基準を作成中。
- ・ Industry Roundtable の開催（2015年）。
- ・ 実用化・商品開発が遅れていることに関する現状や、ナノ素材使用商品の製造を阻害している要因を特定し、どのようなプログラムによってそれらを乗り越えられるのかについての議論。
- ・ ホワイト・ハウス・フォーラムの開催（2015年）。
- ・ 中小企業のナノテクノロジー商業化促進に関するフォーラムを国家経済会議（NEC）と

共催。

- ・ 商業化を加速させるための可能性を調査し、I-Corps, Venture for America といった民間部門との協力の有効性を強調。

また、"Nanotechnology-Inspired Grand Challenge for Next Decade"のドラフトを作成し、各国の専門家から意見を公募した。Grand Challenge として掲げられている例として、以下がある。

- ・ 最も治療が困難なガン患者の5年生存率を50%向上させる。
- ・ 米粒よりも小さなコンピュータデバイスを、配線・メンテナンス無しで10年稼働できるようにし、IoTに革命を与える。
- ・ 低消費電力で100倍高速のコンピュータを実現する。
- ・ 原子レベルの精度で材料を製造し、アルミニウムの50倍の強度と、半分の軽量化を、従来と同じコストで実現する。
- ・ 海水淡水化のコストを4分の1にする。
- ・ ナノ物質の環境影響、健康影響、安全性評価を判定可能にする。

コンピュータに関しては、National Strategic Computing Initiative (NSCI) やBRAIN Initiativeとも連携し、データから学習し、学習によって不慣れな問題も解き、人間の脳と同等のエネルギー効率で作動する新しいタイプのコンピュータを創造するために、ナノスケールのシステム・コンピュータ構造の飛躍的な進歩が必要であるとしている。

## (5) 注目動向

NSFのナノテクノロジー研究インフラ共用ネットワークプログラム (NNIN) が2015年に終了し、後継プログラムとしてNational Nanotechnology Coordinated Infrastructure (NNCI) が開始された。今後5年間で81Mドル以上の予算が計画されている（年間約16Mドル）。15州にまたがる27機関から成る16拠点（内、9拠点にはパートナーとして1つ以上の地方大学が参画する形態）で構成される。日本の文部科学省ナノテクノロジープラットフォーム事業（H24-33）に相当するプログラムであり、規模的にも概ね同程度と考えられる。欧米並ともに、このようなナノテクノロジーに関する先端研究共用インフラの整備・発展は、研究開発成果の創出に際し、投資効率を最大化させるものとして共通認識となっているが、なかでも歴史的にみて米国の研究開発エコシステムが一步リードしていると考えられる。NNCIに採択された拠点は、産官学の研究者に対し微細加工や解析・計測装置などのナノテク最先端研究設備をオープンな共用施設として提供する。また、専門技術スタッフにより装置利用や技術習得、専門知見の面でのサービスを充実させる。前進のNNINで培ったフレームワークを活かして、科学技術上の新発見やイノベーション創出、教育、商業化・社会的利益に貢献するものである。NSFではこれまでおよそ40年間の長期にわたりナノテク研究インフラ・サービスの充実に投資を続けてきたが、次世代へ向けてNNCIではこれをさらに拡張・促進させるとしている。これらの特徴は、日本のナノテクノロジープラットフォームにおいても、同等かそれ以上の強力な仕組みとして発展しつつあることは見逃せないポイントである。

NNCIの各拠点は、エレクトロニクス、フォトニクス、マイクロ機械、マイクロ流体、など、それぞれに特徴・専門性を有する。なかには地球科学やライフサイエンスに専門性を有する拠点も含まれており、新分野を促進させることも重視している。NNCIの設備群は、学生・専門家を問わずアクセスが可能であり、国内だけでなく世界中にオープンであるとしている。NNCIの各拠点名と参画機関、PI は下表のとおりである。

表1 NNCIの各拠点名と参画機関、PI

Site	University and Partner	PI
Mid-Atlantic Nanotechnology Hub for Research, Education and Innovation	University of Pennsylvania with partner Community College of Philadelphia	Mark Allen
Texas Nanofabrication Facility	University of Texas at Austin	Sanjay Banerjee
Northwest Nanotechnology Infrastructure	University of Washington with partner Oregon State University	Karl Bohringer
Southeastern Nanotechnology Infrastructure Corridor	Georgia Institute of Technology with partners North Carolina A&T State University and University of North Carolina-Greensboro	Oliver Brand
Midwest Nano Infrastructure Corridor	University of Minnesota Twin Cities with partner North Dakota State University	Stephen Campbell
Montana Nanotechnology Facility	Montana State University with partner Carlton College	David Dickensheets
Soft and Hybrid Nanotechnology Experimental Resource	Northwestern University with partner University of Chicago	Vinayak Dravid
The Virginia Tech National Center for Earth and Environmental Nanotechnology Infrastructure	Virginia Polytechnic Institute and State University	Michael Hochella
North Carolina Research Triangle Nanotechnology Network	North Carolina State University with partners Duke University and University of North Carolina-Chapel Hill	Jacob Jones
San Diego Nanotechnology Infrastructure	University of California, San Diego	Yu-Hwa Lo
Stanford Site	Stanford University	Kathryn Moler
Cornell Nanoscale Science and Technology Facility	Cornell University	Daniel Ralph
Nebraska Nanoscale Facility	University of Nebraska-Lincoln	David Sellmyer
Nanotechnology Collaborative Infrastructure Southwest	Arizona State University with partners Maricopa County Community College District and Science Foundation Arizona	Trevor Thornton
The Kentucky Multi-scale Manufacturing and Nano Integration Node	University of Louisville with partner University of Kentucky	Kevin Walsh
The Center for Nanoscale Systems at Harvard University	Harvard University	Robert Westervelt

## (6) 参考資料

- 1) PCAST Past Meetings,  
<https://www.whitehouse.gov/administration/eop/ostp/pcast/meetings/past> (2016年3月16日アクセス)
- 2) Nanotechnology: Anniversary of PCAST Report, and A Grand Challenge is Born  
[https://www.whitehouse.gov/sites/default/files/microsites/ostp/PCAST/Whitman\\_PCAST\\_NI\\_151120.pdf](https://www.whitehouse.gov/sites/default/files/microsites/ostp/PCAST/Whitman_PCAST_NI_151120.pdf) (2016年3月16日アクセス)
- 3) NNI News Releases, <http://www.nano.gov/node/1502> (2016年3月16日アクセス)
- 4) Water Sustainability Through Nanotechnology , <http://www.nano.gov/node/1577> (2016年3月16日アクセス)
- 5) National Nanotechnology Coordinated Infrastructure, <http://www.nnci.net/> (2016年3月16日アクセス)

### 3. 環境・エネルギー分野

#### 3. 1 環境・エネルギー分野の概要

現状の我が国のエネルギー需給構造を把握するために、エネルギー・フロー (図 1) を見ると、電力部門では、約 9 EJ/年の一次エネルギー源から 3.3 EJ/年の電力を得るに留まっており、発電や送配電における損失が大きい。電力への転換効率の改善が課題である。石油を燃料に転換する過程での損失も大きく、約 1 割が排熱となっている。一方、運輸部門ではとりわけ自動車における熱としてのエネルギー損失が大きい。暖房や給湯として使われる低位熱需要に対して多くの電力が使われている現状も改善の余地がある。そして、再生可能エネルギーは一次エネルギー源としては、いまだに 4%と小さな割合を占めるに過ぎず、2012 年 7 月に FIT が開始されて以降、太陽光発電を中心に飛躍的に拡大しているが、FIT 賦課金による国民負担の抑制も検討が求められている。この図から社会的課題から見る研究開発の方向性として図 2 の 8 点にフォーカスできる。

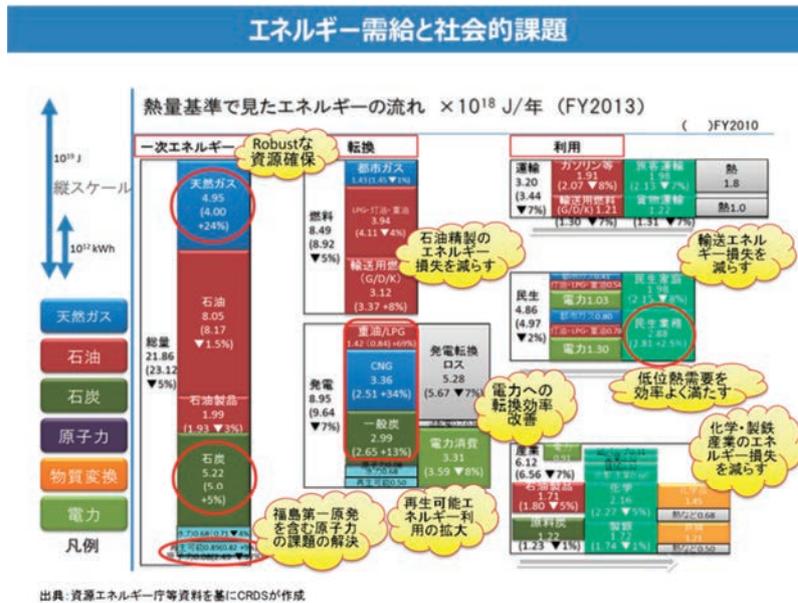


図 1

一方で、我が国は化石資源に乏しく、ほとんどのエネルギー源を海外からの輸入に依存している。一次エネルギー源の調達においては原油の中東依存度が約 90% に及び、エネルギー供給体制には根本的な脆弱性を抱えている。地政学的リスクを踏まえ、ロバストな資源確保のための対策強化が必要である。また、2013 年は約 28 兆円もの国富を費やして輸入したエネルギー資源 (約 22 EJ/年) が最終消費されるまでには、さまざまなエネルギー損失が生じ、有効に使用される割合は 4 割程度と見積られる。

以上のことから、「経済効率性の向上 (Economic Efficiency)」による低コストでのエネルギー供給のみならず、「安全性 (Safety)」を前提として、「エネルギーの安定供給 (Energy Security)」

を実現し、同時に「環境への適合（Environment）」を図る、いわゆる「3E+S」を同時に克服するための取り組みを進めることが重要であることは言うまでもない。

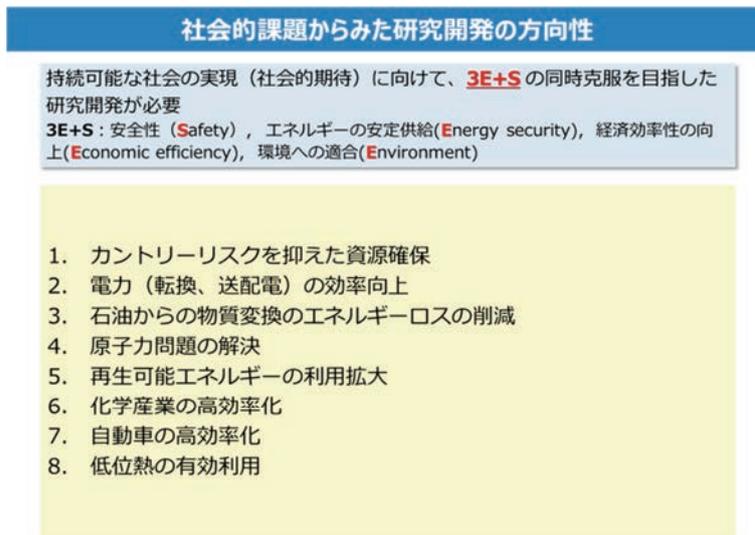


図 2

これらの研究開発の方向性に資する研究開発領域として、次の俯瞰報告書に向けたユニットの俯瞰活動では約 30 の領域を抽出しているが、それらの中から、昨今特に社会的に大きく注目され（動きがあり）、またはこれから問題が顕在化するであろう主要なものとして、下記の 3 つの研究開発領域に焦点を当て、現在のトレンドとトピックスを概説したい。テーマ①は、課題 1 や 5 に対応するものである。②は課題 6 に対応し、③は課題 5 をはじめ、電力自由化（発送電分離）や IoT の進展を見据えた将来への対応に向け新たな課題として取り上げた。

これらは COP21 パリ協定を受けて策定されている、抜本的な温室効果ガス排出削減のイノベーションに向けた「エネルギー・環境イノベーション戦略（案）」の 9 つの柱のうち、「水素等製造・貯蔵・利用」、「革新的生産プロセス」、「エネルギーシステム統合技術」にも対応し、将来の低炭素社会を実現するために必要な研究という意味でも取り上げた。

- ① 水素社会の実現に向けた水素の製造・輸送・貯蔵・利用
- ② シェールガス革命時代の化学プロセス（メタン利用のための触媒）
- ③ 電力自由化と再生可能エネルギー大量導入時代のエネルギーネットワーク

なお、以下に「研究開発の俯瞰報告書（2015 年）環境・エネルギー分野」における 3 章の各研究開発領域との関係について述べる。適宜あわせてこれらの内容も参照されたい。

テーマ①は「水素エネルギーの利用浸透」、「次世代自動車の利用拡大と高効率化」、「高効率固体酸化物形燃料電池」、「中温作動の固体電解質による新規プロセス」が関係する。ここではこれらに跨る研究開発を「水素社会」という大きな視点で捉え直し、トレンドとトピックスの抽出を試みた。

テーマ②は「新規石油化学製品製造ルート」と関連する。その中でもシェールガス革命以降に注目される C1、C2 ケミストリーについての科学技術の動向を記載した。

テーマ③は「分散電源と再生可能エネルギーとの融合システム」、「エネルギーネットワーク技術」、「エネルギー消費実態の把握」、「ネットワークとビッグデータの活用」、「需要側資源を活用したエネルギー需給マネジメントシステム」、「消費者行動に着目したエネルギー利用の高効率化」が関連する。これらに細分化して記載された要素を大きく「エネルギーネットワーク」という形で捉え直し、IT や IoT による新たな価値の創造に着目した「超スマート社会」の観点から現状と今後の展望について記載した。

### 3. 2 水素社会の実現に向けた水素の製造、輸送・貯蔵、利用

#### (1) テーマ名

水素社会の実現に向けた水素の製造、輸送・貯蔵、利用

#### (2) 概要

低炭素社会を実現する上で重要な再生可能エネルギーは、現時点ではまだ量的インパクトが小さく、さらなる利用拡大のための技術開発が望まれている。再生可能エネルギーは、エネルギーを生み出す場所と使う場所との時間・空間的なズレが大きく、そのシフトのために、一旦貯めて運んで使う技術が望まれている。その際には、電力のままに貯める二次電池などの方法と、水素などの化学品を介して運ぶ方法が提案されており、とりわけ長期間・長距離の輸送のための技術として、水素を何かの形の化合物に変換して（蓄えて）運ぶ技術が注目されており、我が国ではこれをエネルギーキャリアと呼んで、国による重点的な研究開発が進められている。

エネルギー自給率の低い我が国にとって、多層化・多様化した柔軟なエネルギー需給構造の構築は極めて重要であり、水素はその実現に向けた重要なエネルギー源である。エネルギー基本計画においても「水素社会」の実現に向けた取り組みの加速が明記されている。

利用の代表例である燃料電池は、燃料電池自動車、家庭用などの分散型高効率電源として、さらには複合サイクル発電などと組み合わせた発電の高効率化への応用も期待されている。水素の普及にあたっては利用側の技術開発をいっそう推進し、水素の大量利用を実現することが重要である。

世界的な水素の需要としては、現在アンモニア合成が 50%、石油精製が 35%、メタノール合成が 9%となっている。わが国では、これら工業用水素に加えて、水素利用技術としてエネファーム（家庭用燃料電池）ならびに FCV（燃料電池自動車）を中心に燃料電池の市場化が進められ、水素の製造・利用について注目が集まっている。

水素を作る方法として、炭化水素の水蒸気改質による水素製造、石炭ガス化からの水素製造、再生可能エネルギー由来電気による水素製造、太陽光を活用した光触媒・光電極触媒による水素製造、などが知られる。現在、世界中で天然ガス（メタン）改質が全水素製造の 48%、ナフサの水蒸気改質（含む石化脱水素）が同 30%を占める（残りは石炭ガス化・コークス炉ガスが 18%、電解が 4%である）。ナフサ水蒸気改質、ソーダ電解副生水素はいずれも 20 円程度/Nm<sup>3</sup>と比較的安価である。コークス炉ガスからの水素は濃度が低い（6 割弱）が、価格は 20 円弱/Nm<sup>3</sup>とやはり安価である。天然ガス水蒸気改質はこれを上回り 30 円程度/Nm<sup>3</sup>である。

一方で、低炭素社会の実現（化石資源からの脱却、再生可能エネルギー利用）という視点からは、再生可能電力による水分解や、光触媒による水分解、バイオマス資源からの水素製造などが期待されているが、現時点ではこれらによる水素は非常に高価なものとなっており、普及の足かせとなっている。

前述のエネファームは政府目標として 2030 年までに 530 万台、FCV は 2025 年までに 200 万台といった数字が挙げられている<sup>1)</sup>。これらが導入された場合、エネファーム 530 万台は国内全エネルギー消費を 0.6%程度削減、FCV200 万台は国内全エネルギー消費を 1.4%程度削減する量に相当する。よって、全エネルギー消費の半分近い電力（発電）分野に、海外からの再生可能エネルギー由来水素が入ってこない限り、大きなインパクトとなりえないことは留意が必要である<sup>2)</sup>。

以下では、水素に関する研究開発を各チェーン（製造、輸送・貯蔵、利用）で概説する。

### (3) 国内外における研究開発の動向

#### (3-1) 水素製造技術の国内外における研究開発動向

前述のとおり、現時点ではほとんどの工業的な水素製造は炭化水素の水蒸気改質などによるものであり、化石資源の消費（＝二酸化炭素の放出）を伴う。ここでは、今後も研究開発要素の大きい再生可能エネルギーの利用の観点から現在の水素製造技術の動向を整理し、今後の展望をまとめる。

##### ① 再生可能エネルギー由来電力からの水素製造

再生可能エネルギーとしては、風力発電、太陽光発電、植物生育を介したバイオマス利用などが提案されている。風力の適地は、地上 80 m での平均風速が 9 m/s 以上の地域が南米パタゴニア、グリーンランド、欧州北部、アフリカ東端などにあり、また太陽光は適地が砂漠地域を中心に広く分布している。これらによって得られた再生可能エネルギーによる電力で、水を電気分解して水素を得ることが考えられている。再生可能エネルギー由来の水の電気分解の方法としては、アルカリ水電解、固体高分子形水電解、固体酸化物形水電解（SOEC）などを始め、電気化学的触媒反応などが展開されており、今後の展開が期待される。

現在は固体電解質の開発に注目が集まっており、水を表面に有する構造によるプロトンキャリア型材料、格子内の欠陥を利用した酸素イオン伝導型材料がそれぞれ精力的に検討され、固体電解質の温度空白域であった 300～500 °C のレンジを埋めつつある。この領域にて作動可能なイオン伝導材料が発見された時には、水素を絡めた多くの反応が実現可能になり、今後の研究の進展が期待される<sup>3)</sup>。

再生可能エネルギー由来の水素活用に関する海外の事例としては、ドイツにおける SolarFuel プロジェクト（私企業によるもの）や、米国 DOE の ARPA-E における Electrofuel プロジェクト（2010～2013、13 機関、約 45 億円）などが知られる<sup>4)</sup>。前者は、余剰となる再生可能エネルギー由来の電力と、工場などから回収した二酸化炭素から、化学反応によりメタンを生産し、従来からある都市ガスパイプラインに流す（Power to Gas と呼ばれる）ものである。2009 年 11 月に 25 kW の試作機を作り、再生可能電力と水と空気中の CO<sub>2</sub> から、メタンを 40% の効率で作ることに成功した。現在 20 MW クラスを目指してプロジェクトが進められている。後者は工場などで排出される二酸化炭素を回収した上で、再生可能エネルギー由来の電力から水を電気分解して得られた水素などを用いて、バクテリアと電極触媒を活かしてブタノールや C<sub>8</sub> 炭化水素（ガソリン類似化合物）を作る研究プロジェクトである。これが実現すると、従来の光合成に比べ、暗所で作動可能であり、土地・日照・人件費の制約が無いこと、施肥が不要であること、バイオハザードを閉鎖系で管理可能なこと、などがメリットとなり、光合成に比べ 10 倍程度の効率を狙うことが可能と言われている。またドイツでは Hybrid Power Plant プロジェクトが進められており、石油・ガス・電力などがリンクして、クリーンな電力・熱・水素の同時供給を検討している。

##### ② 光触媒・光電極触媒による水素製造

自然界では植物による光合成が進んでいるが、人工的には、本多-藤嶋効果<sup>5)</sup>に端を発する光触

媒による水分解、ならびにそれに関連して CO 生成反応、ギ酸生成反応がすでに実証されている<sup>6)</sup>。これら一連の反応を分解して考えると、本質的に重要な反応は光による水の分解反応である。水の分解には 1.23 eV 以上の光エネルギーが必要であり、波長から考えると 1000 nm 以下、すなわち紫外から近赤外の範囲が必要となる。更には、反応速度から考えると紫外と可視光の利用がメインとなろう。紫外光を用いた光触媒としては、 $d^0$  型光触媒 ( $Ti^{4+}$ ,  $Zr^{4+}$ ,  $Nb^{5+}$ ,  $Ta^{5+}$ ,  $W^{6+}$ ) 並びに  $d^{10}$  型 ( $Ga^{3+}$ ,  $In^{3+}$ ,  $Ge^{4+}$ ,  $Sn^{4+}$ ,  $Sb^{5+}$ ) が知られる。可視光を用いた光触媒としては Rh ドープ  $SrTiO_3$  やオキシナイトライドが日本の研究者によって発見され有名になっている<sup>7, 8)</sup>。Z スキーム法という方法は、1 つの電子または正孔を 2 つの光子で 2 回に亘り励起し、1 分子の水素生成に 4 電子を用いるが、材料の選択範囲は広く、近赤外の利用も可能である。最近では光電極触媒についても精力的に研究されており、国内民間企業を中心に精力的な研究が進められている。人工光合成分野は我が国が世界トップグループを形成しており、今後の展開が大いに期待される場所である。

### (3-2) エネルギーキャリア(水素変換・輸送技術)の国内外における研究開発動向

水素は気体であり密度が低いため、効率よく貯めて運ぶためのキャリア（エネルギーキャリア）候補として、水素を冷やして液体にした液体水素、水素と窒素から作ることができるアンモニア、石油留分の一つである芳香環に水素を付加して運ぶ有機ヒドライド、の 3 つがある。

アンモニアは世界中で肥料などのために年間 1 億 6000 万 t が生産されている。エネルギーキャリアとして考えた場合、利点として、脱水素して用いることも直接燃焼して用いることもできる点、使用後に窒素になるため水素化する工場へ戻す必要がない（大気を介して循環できる）点が、欠点として毒性、強烈な匂い、燃えにくさ、が挙げられる。燃えにくさについては、今後の研究開発により、アンモニア直接燃焼が高効率に進められることが期待される。ハーバー・ボッシュ法が確立しており、高温高压であるという制約があるものの、エネルギー効率は高い。現在のハーバー・ボッシュ法においては、消費エネルギーのほとんどは水素製造の過程で必要となっている。ハーバー・ボッシュ法によるエネルギー消費は、世界の全エネルギー消費の 1~2 % 程度を占めると言われ、化石資源の改質による水素製造から、水と空気と再生可能電力による電解合成へとシフトできれば大きな意義がある。今後も新規なアンモニア電解合成などの展開が期待される。

有機ヒドライドに関しては、近年、民間企業によるメチルシクロヘキサンという化合物を水素キャリアとして用いる方法が注目されている。これはガソリンにも含まれるトルエンという物質を水素化することによって得られる。内閣府が進めている SIP エネルギーキャリアプロジェクトにおいても、2020 年東京オリンピック・パラリンピックにおける水素インフラ整備をにらみ、メチルシクロヘキサンをキャリアとする水素ステーションの実証化を進めている。メチルシクロヘキサンは備蓄に適した物性を有し（常温で液体で安定）、エネルギーのほぼすべてを輸入に頼る我が国として、リスク回避の観点での現在の石油備蓄に代わる再生可能エネルギー備蓄材料として好適であると考えられる。今後の研究としては、脱水素に要する熱が、得られる水素の燃焼熱の 1/4 近いことから、吸熱反応の熱マネジメントによるエクセルギー回生と、そのための低温作動可能な高性能触媒開発、それも白金など貴金属を用いない触媒の開発が望まれる。

前述のとおり、現時点での我が国のエネルギーキャリア開発は液体水素、アンモニア、有機ヒドライドの 3 つに集約されているが、それ以外にも、ジメチルエーテル、メタノール、メタン、水加ヒドラジン、FT 合成燃料、ギ酸、シュウ酸、金属水素化物、金属酸化物などが知られ、それぞ

れ研究開発が進められている。

### (3-3)水素利用技術の国内外における研究開発動向

燃料電池は、電解質膜やその中を通過するイオンの種類によってリン酸形（PAFC：Phosphoric Acid Fuel Cell）、熔融炭酸塩形（MCFC：Molten Carbonate Fuel Cell）、固体高分子形（PEFC：Polymer Electrolyte Fuel Cell）、固体酸化物形（SOFC：Solid Oxide Fuel Cell）の大きく4種類に分類される。

PEFCは高出力密度化や小型化が可能であり、室温付近で動作することから自動車や家庭用定置電源などにおいて有望な電池である。特に、2014年末にはトヨタ自動車から世界初の本格的な量産車「ミライ」が発売され、今後各社からも発売が予定されており、そのための量産技術開発や水素インフラ整備が加速されている。700～900℃付近の高温で作動するSOFCは、家庭向けのみならず、業務用・産業用や既存の複合サイクル発電と組み合わせて70%を超える超高効率発電の技術としても期待されている。天然ガスや石炭ガス化ガスなどの多様な燃料にも対応が可能であり、小型分散型から大規模火力代替システムまで広い適用性をもつことから実用化の期待が大きい。

経済産業省の「水素・燃料電池戦略ロードマップ」（2014年6月）<sup>10</sup>では、2030年までの水素社会の構築の工程表を提示し、家庭用燃料電池や燃料電池自動車に加えて、クリーンな水素による発電を想定することで、より一層の低炭素高効率社会の実現を目指している。この中でPEFCは、さらに低コスト化と耐久性向上のための研究開発を実施し、乗用車のみならず商用車や鉄道・船舶・航空機などへ利用先を拡大することが期待されている。現在、家庭用燃料電池（通称「エネファーム」）の主流はPEFCであるが、より効率の高いSOFC型エネファームの商用化が2011年に始まり、業務産業用も2017年からの市販開始がロードマップに明記されている。

今後、本格普及のためには低コスト化と耐久性の両立が最大の課題となっている。一方、数kWから数100kWの中容量システムならびにそれ以上の大容量システムの開発も実施されているが、これらはまだ技術開発の途上にある。

家庭用燃料電池では、PEFCで総合効率が94～95%レベル（発電効率は40%程度）まで向上し、SOFCにおいては発電効率が45～46.5%での一般販売が開始されている。PEFCでは、定価200万円を切る普及機の販売が本格化するなど、低コスト化が着実に進んでいる。SOFCでも4万時間の耐久性を見通すことができるようになり、年間数千台規模の本格的な家庭用システムの市販が始まっている。両タイプを合わせた累積販売台数は10万台に到達しつつある。

燃料電池関連で大学を中心に実施されている代表的な研究開発課題としては下記のようなものが挙げられる。

- 1)電極触媒、電解質の原子・分子・ナノ構造制御およびその界面制御を行い、反応機構や劣化メカニズムを理解することで、低温作動用の高活性・高耐久性電極触媒層開発に向けた材料設計指針を構築
- 2)低コスト化を実現する非白金、低白金触媒の開発
- 3)中温（100～600℃）作動化や多様な燃料対応を可能にする高活性電極材料および機動性やコン

パクト化でメリットが出せる中温無加湿運転が可能な電解質の開発。

#### 4)超高効率発電を実現し、高温作動における長時間安定性を有する、燃料電池のセル・スタック・システムの開発・実証

水素エネルギー利用技術の発展、例えば、白金フリー燃料電池の開発などにつながるものとして、九州大学を中心とする研究グループでは、自然界の水素活性化酵素であるニッケル-鉄ヒドロゲナーゼをモデルとして、新たなニッケル-鉄触媒の開発と、常温常圧で水素からの電子を電子受容体（フェロセニウムイオンやメチルビオロゲン等）に移動させることに成功している<sup>11)</sup>。

水素貯蔵容器については、炭素繊維などによって強化・軽量化され、35 MPaと70 MPaの充填圧のものが利用されているが、いずれも製造コストを大幅に低減するとともに、容器と充填の安全性に関わる国際基準調和を我が国が主導して推進する必要がある。また、水素供給ステーションに関しても、設置費用に約4億円を要するのが現状であり、それを半減することが目標とされている。ステーションでの水素供給に関わる課題については、水素供給・利用技術研究組合（HySUT）によって自動車メーカーとエネルギー企業が共同して行う実証事業を通じて解決が図られている。我が国では、4大都市圏を中心に2015年までに100基のステーション設置が予定されており、諸外国の計画を大きく上回っている。しかしながら、これによって水素の供給によって営業収益を得ることは難しく、ステーションの維持費用も含めた国の支援が不可欠とされている。また、燃料コストについてもガソリン価格並みのレベルにまで低減しなければならない。さらに、このような新たな燃料の利用に当たっては、社会的な理解と受容性を促す官民の連携による努力も不可欠である。

### (3-4)国際ベンチマーク

水素に関連したこれまでの国内プロジェクトとしては、1974年からのサンシャイン計画（ならびにそれに引き続くニューサンシャイン計画）、1993年から2002年まで実施されたWE-NET（World Energy Network）、2002年度から2011年度まで2期にわたって実施されたJHFC（燃料電池の実証プロジェクト）、2004年からの家庭用燃料電池・補機プロジェクト、2005年からのFC-Cubic（固体高分子形燃料電池基盤研究センター）、2006年からのHydrogenius（水素材料先端科学研究センター）、2007年からのHydroStar（水素貯蔵材料先端基盤研究事業）、2008年からのHYPER-FC（山梨大燃料電池ナノ材料研究センター）、水素インフラを構築するために2009年に設立された水素供給・利用技術研究組合（HySUT）などが知られる<sup>12)</sup>。

日本で、2009年度に世界で初めて家庭用燃料電池コジェネシステムが実用・販売開始されて以来、家庭用定置型電源・コジェネ利用において、我が国は世界を圧倒的にリードしている。

エネルギーキャリア関連に特化した政策としては、2013年に経済産業省・文部科学省合同検討会の検討をベースに、METI「再生可能エネルギー貯蔵・輸送等技術開発」ならびにALCA特別重点プロジェクト「エネルギーキャリア」としてスタートした。その後、後者は2014年秋からは拡大してSIP（内閣府戦略的イノベーション創造プログラム）がスタートした。SIPは基礎研究から出口までを見据えた重点研究開発プログラムであり、エネルギーキャリアは10ある領域の一つとして取り上げられ、2014年度は11グループに対して総額約33億円の予算が充てられている。これら研究開発は、2020年東京オリンピック・パラリンピックでのショーケースとしての実

証を出口目標としている。また経済産業省「再生可能エネルギー輸送・貯蔵等技術開発」においては、低コスト水素製造技術開発（アルカリ水電解の高効率低コスト化＝25万円/Nm<sup>3</sup>/hの半減）などが進められている<sup>10,13)</sup>。

2014年5月に閣議決定された「エネルギー基本計画」においては、水素利用の推進が明記され、エネファームやFCVの普及拡大、未利用褐炭などの資源からの水素製造、水素発電の実用化などが盛り込まれた。

海外の動向としては、国ごとに大きな流れがある。EUは再生可能エネルギーから得られた電力を用いての水電解・電解合成に注力しており、北米はシェールガス産出を背景としたメタンからの水素製造と、CCSによって回収された二酸化炭素利用が、中国と豪州では石炭ガス化による水素製造が取り上げられている。EUでは、FP7（第7期プログラム）においてRelHyと呼ばれる新規電気化学法による水素製造、とりわけ固体酸化物形電気分解(SOEC: Solid Oxide Electrolysis Cell)による水からの水素製造が行われてきた。この分野ではドイツカールスルーエ大学などが先進的な研究をしている。再生可能エネルギーの水の電気分解からの燃料転換技術としては、ドイツにおける前述のSolarFuelプロジェクトなどが知られる。

水素の製造と利用の分野における我が国の科学技術の最近の動向としては、Scopus(2011-2016)によると、水素製造(キーワード Hydrogen Production)においては世界中で17144報の論文が報告されたうち、1位中国が4530報、2位米国が2882報、3位韓国が1037報、4位日本が979報、5位インド925報と続いている。また、機関別としては東大が78報で世界30位、34位京大(74報)、44位東北大(64報)が上位100傑に入っている。また水素利用(キーワード Hydrogen Utili~)においては世界中で2308報の論文のうち、1位中国が750報、2位米国が358報、3位日本が134報、4位ドイツが133報となっている。また、大学としては9位東北大(17報)、31位九州大(12報)、同東工大(12報)、38位北海道大(11報)などが上位に入っている。これらから鑑みて、大学の化学系におけるランキングと比べて本分野は世界的に見て優れたプレゼンスを示しているといえる。

#### (4) 参考資料

- 1) JST-CRDS 研究開発の俯瞰報告書 環境・エネルギー分野 CRDS-FY2013-FR-02、2013
- 2) 塩沢文朗、DND 研究所、2013
- 3) JST-CRDS 戦略プロポーザル 反応プロセス革新 CRDS-FY2014-SP-05、2015
- 4) JST-CRDS 戦略プロポーザル 再生可能エネルギーの輸送・貯蔵・利用に向けたエネルギーキャリアの基盤技術 CRDS-FY2012-SP-08、2012
- 5) 藤嶋 昭、本多健一、菊池真一、工業化学雑誌、72, 108, 1969
- 6) 堂免一成、TRC ニュース 119号、2014
- 7) K. Domen *et al.*, Nature 440, 295, 2006
- 8) A. Kudo *et al.*, Chem. Soc. Rev., 38, 253-278, 2009
- 9) JST-CRDS 研究開発の俯瞰報告書 ナノテクノロジー・材料分野 (2015年)

- 10) 経済産業省水素・燃料電池戦略ロードマップ
- 11) JST、九州大学プレス発表、2013年2月8日
- 12) 橘川武郎、エネルギー新時代におけるベストミックスのあり方、第一法規、2014
- 13) NEDO、エネルギー技術戦略ロードマップ、2014

### 3. 3 シェールガス革命と化学プロセス（メタン利用のための触媒）

#### (1) テーマ名

シェールガス革命と化学プロセス（メタン利用のための触媒）

#### (2) 概要

石油と天然ガスは、熟成時の地層の深さにより、1000 m 程度の浅さの場合石油に、それより深い場合は地中が高温高圧になるため有機物の分解が進み天然ガスとなる。それぞれは、平坦な資源の層を形成しているが、褶曲などで比重の違いにより石油やガスが上に移動して油やガスの溜まりを形成した場合、在来型の油田・ガス田として掘削される。一方、平坦な層のまま眠っている油・ガスは、これまでは掘削が出来ないと思われていたが、2009 年以降、水平坑井という技術と、水圧と化学的破砕による掘削（フラクチャリングと呼ばれる）技術が確立されたことにより、これら水平な層に眠る石油やガスを掘り出すことができるようになった。このようにして得られた石油がシェールオイル、天然ガスがシェールガスと呼ばれる。よって、シェールオイル・シェールガスの組成（成分）は、従来の油田やガス田から得られるものとは大きく変わらない。天然ガスの場合、分解しきった場合、最も小さい炭化水素分子であるメタンが、分解しきれなかった分子はそれより大きいエタンやプロパンといった飽和炭化水素分子として存在しており、これらが同時に噴出する。

このような背景の下に、米国を中心に多量の天然ガス（シェールガス）が産出され、米国ではガスの価格が大幅に低下し、ガスを熱源として用いる産業の競争力が増強し、投資・工業の成長・雇用の創出が促進されている。エタンを熱分解して化学基幹原料であるエチレンをつくるエタンクラッカーや、天然ガス主成分のメタンを水蒸気などと反応させた後にメタノール・アンモニアのような化学原料へと転換する製造プラントを新設する動きが活発である。またシェールガス増産による北米ガス価格の低下は、多くの石油化学製品・プラスチック・医薬品の低コスト化につながるため、世界的な産業構造の変化を引き起こしている<sup>1), 2)</sup>。シェールガス採掘にともなう米国での天然ガス生産量は2010年時点で5 trillion であるが、2035年には13.6 trillion に伸びると推測されている。2010年時点で消費量が生産量より11%多い状況であったのに対し、2035年では生産量が消費量より5%ほど多くなると予測されている。これにより、アメリカにおける他国へのエネルギー依存性を大きく変化し、国内のエネルギー需要を天然ガスによって賄い得る可能性がある。さらにシェールガスによって精製炭化水素及び石油化学製品の製造部門へのコスト競争力が増すと考えられている。天然ガスの増大によって、当面の水素製造は水蒸気改質が主流な方法として用いられ続けていくと考えられる。シェールガスによる天然ガスの生産量増大は、脱石油依存の動きを加速させ、再生可能なエネルギー源への依存度を増やしていくことの一助を担っていくと考えられる。

このような変革の流れの中で、供給量が急増した天然ガスの主成分であるメタンを効率よく利用する技術が追いついていない問題がある。メタンは、これまでは都市ガスなどとして燃焼して用いられてきたが、前述の状況を受けて安価故にその利用法について研究が盛んに行われている。しかしメタンは、 $\text{CH}_3\text{-H}$  の結合エネルギーが439 kJ/mol と大きく非常に安定した化合物であるため、反応性に乏しい。メタンの利用法としては、燃焼などにより直接用いる方法として、発電による利用、圧縮天然ガス自動車による利用、製鉄などの利用があり、化学的に転換して用いる方法としては、間接的な転換利用法として、水素を製造し燃料電池などで用いる方法、水蒸気改質などで合成ガス（水素と一

酸化炭素の混合ガス）に転換し FT（フィッシャー・トロプシュ）合成（炭化水素の合成方法）やメタノールなどの燃料にする方法が、また、直接転換による利用法としては研究段階ではあるが OCM（酸化的カップリング）によるエチレン製造や酸化によるメタノール合成、芳香族合成などが知られる。以下、化学転換とその他に分けて、現状と今後を俯瞰する。

### (3) 国内外における研究開発の動向

#### (3-1)メタンと軽質炭化水素(C2-C4)の国内外の研究開発動向

##### ①メタンの化学的転換（メタン⇒合成ガス）

シェールガスや天然ガスの主成分であるメタンを、燃焼以外の利用として、化学的に転換して利用するために、工業化を目的とした様々な触媒プロセスが存在する。メタンの転換技術は大きく間接転換法と直接転換法に分類される。間接転換法はメタンを高温で触媒とともに水蒸気などと反応させ、一酸化炭素と水素を含む合成ガスを製造し、その合成ガスを原料としてメタノールや人造軽油などの化学品を合成するのが一般的である。メタンから合成ガスを製造するプロセスとしては、水蒸気改質（SR: Steam Reforming）、炭酸ガス改質（DR: Dry Reforming）、部分酸化（POx: Partial Oxidation）が主要なものである。

メタンの水蒸気改質はすでに 50 年以上の歴史を有し、大型のプロセスが世界中で多数稼働しており、大規模な用途としては熟成された技術である。水蒸気改質によって生成する水素の値段は 1 m<sup>3</sup>あたり 20～30 円ほどであり、ここ 80 年の間、アンモニア合成や石油精製のために多量に必要とされる水素を製造する主流の方法である。一方で、家庭用の燃料電池のために都市ガスから水素を作るような小規模なケースにおいては、今後さらなる技術開発が期待されている。課題は触媒への炭素の析出、反応プロセスの複雑さ（多段の熱交換に由来する）、高温に耐える材料（メタンの安定性故に反応温度が 700 °C を大きく上回る）などである。

メタンと炭酸ガスを反応させて合成ガスを得る方法（炭酸ガス改質）も既に知られている。炭酸ガス改質は温室効果ガスである CH<sub>4</sub> と CO<sub>2</sub> を同時に削減できることから、環境負荷の低減という観点からも注目されている。有効な触媒としては貴金属や Ni を担持させた触媒が知られているが、経済性の面から Ni 系触媒が望まれている。従来 of Ni 系の触媒では活性は高いものの、炭素析出によって劣化しやすいことが知られる。現在、集中排出源から回収（CCS）した二酸化炭素の利用法としても再び研究開発ブームが起こっている。

部分酸化反応は発熱反応であるため、総合的なエネルギー効率は 50%ほどと水蒸気改質に比べて劣るが、大きな吸熱反応である水蒸気改質と異なり熱を加え続ける必要がなく、シンプルで小型のプラントで合成ガスを製造することが可能である。触媒層の前部で大きな熱が生じるため熱回収が非常に重要である。有効な触媒としては SR・DR と同様に Ni 担持金属系触媒である。メタンを原料とした部分酸化（POM: Partial Oxidation of Methane）は多くの報告例がある。また、部分酸化反応による発熱を、水蒸気改質による吸熱分に補うように組み合わせるオートサーマルリフォーミング（Auto Thermal Reforming: ATR）によって効率を上げる手法がある。発熱反応と吸熱反応が同一反応器内で進行するため、触媒層の hot-spot の形成や炭素析出を抑制することができる。また原料である酸素と水の供給量を変えることで H<sub>2</sub>/CO を調整することができるため優れたプロセスである。

これらプロセスによって得られた合成ガスは、フィッシャー・トロプシュ反応やメタノール合成反

応、ジメチルエーテル合成反応により、簡単に人造軽油やメタノール、ジメチルエーテルへと転換することができ、いずれも巨大プラントが世界中で既に稼働している。とりわけ人造軽油合成については、アパルトヘイトによる石油禁輸を背景とした石炭ガス由来の南アフリカ、その後天然ガス由来の合成ガスによるマレーシアやカタールでの巨大プラント稼働が進んでいる。

### ②メタン間接利用 (メタン⇒合成ガス⇒有用化合物)

間接的な転換方法としては、合成ガスから付加価値の高いメタノールやエチレングリコールなどの化学原料に転換する技術が数多く報告されている。一例として近年需要が急増している低級オレフィン ( $C_2-C_4$ ) を FT 合成にて合成するプロセスを紹介する。低級オレフィンは元々ナフサのクラッキングや流動接触分解 (Fluid Catalytic Cracking : FCC) によって合成されていたが、近年の原油価格の変動やカントリーリスクの観点から天然ガスへの原料シフトが望まれている。メタノールは、液体燃料としての用途、近年では DMFC (Direct Methanol Fuel Cell) として電気エネルギーの取り出しへも利用されている。メタノールは MTG (Methanol to Gasoline) 技術が 1980 年代から注目され、燃料としての利用が知られてきたが、石油危機の影響が弱まると同時に忘れ去られていった。メタノールは主として天然ガスを改質して得られた合成ガスを、圧力 5~10 MPa、温度 473~573 K の条件下で  $Cu \cdot Zn / Al_2O_3$  系の触媒を用いて合成されている。近年のメタノール需要の増加に伴い、経済性の面からメタンを直接メタノールに転換する技術が求められている。

天然ガス生産量の増大に伴い、バイオマスと天然ガスを併用したプロセスも注目を集めている。現状ではバイオマス単体だと生成可能なエネルギー量に限りがあること、バイオマスを用いた FT 合成は低収率でコストが高いといった点が問題となっている。そこでシェールガスによって得られる天然ガスとバイオマスを組み合わせて効率良く合成ガス・液体燃料を作るプロセスが考えられている。

### ③メタン直接転換 (メタン⇒有用化合物)

メタンを直接化学的に利用する方法として、メタンの酸化カップリング、メタンのハロゲン化、メタンの芳香族化などが知られるが、いずれも生成物収量が低く効率が悪いいため、工業化には程遠い状況にある。メタンを直接転換により付加価値の高いオレフィンやメタノールのような含酸素化合物を合成することができれば、コストの高い合成ガスを経ずに目的生成物が得られるため経済性の面で有利である。しかし直接転換には二つの問題がある。一つは直接酸化の場合原料である酸素を空気中から分離しなければならない点、もう一つは商業ラインに乗る収率を達成しているプロセスが未だにないことである。これは生成物の収率が非常に小さく one-pot のプロセスであるため、分離に多大なコストが必要であることが原因である。

メタンを直接部分酸化・脱水素して付加価値の高いエチレンを生成させるプロセスは、メタンの酸化カップリング (OCM : Oxidative Coupling of Methane) と呼ばれ長らく注目されてきた。この反応では、エタンやエチレンの反応性が原料であるメタンよりも高いために、逐次酸化を抑制することが困難である。これまで酸化物触媒に注目して Lunsford や Choudhary が様々な触媒を用いて OCM を行ったが、未だに  $C_2$  収率が 30 % を超えた例は極めて少ない。<sup>3), 4)</sup> 面白い例としては、近年需要が増加している水素に着目して、エチレンと水素の選択性が高い触媒としてノンストイキオメトリーな酸化物として知られている  $CuCe$  系酸化物と  $CuZr$  系酸化物を用いて OCM を行った結果、特に  $CuCe$  系では 1123 K 下、メタン転化率が 25 %、 $C_2$  選択率が 92 % であったとの報告が知られる。<sup>5)</sup>

一方で、非酸化的なメタン転換として芳香族化が注目されている。BTX は非常に重要な化学原料であるため、天然ガスから合成することができれば大きな経済効果となる。しかし現状では Mo を担持させたマイクロ-ナノサイズの HZSM-5 触媒を用いた場合でも収率 7%程度である<sup>6)</sup>。

また、メタンとハロゲンを用いてハロゲン化炭化水素をつくる研究が 1980 年代から行われてきた。例えば、ハロゲン化メタンを合成する過程で、触媒として酸性質のゼオライトがよく用いられ、Oxyhydrohalogenation と呼ばれている。触媒として超酸担体上に Pt を担持した触媒がよく用いられている。これらは弱い発熱反応であり、選択性が非常に高い。ハロゲン単体を酸化的に再生する反応が効率よく行われればハロゲン化水素の分離や無害化が不必要となり、経済的である。これらプロセスでは、生成物に毒性や腐食の性質があるため、安全性の確保が第一となりコスト面での問題がある。腐食対策等の技術開発が進展し、低コスト化が実現できれば魅力的なプロセスである。

新しいメタン転換プロセスとして、ハロゲン化メタンからオレフィンや含酸素化合物を合成するプロセスが研究されている。SAPO-34 などの触媒を用いて、塩化物や臭化物を用いてメタンを一旦ハロゲン化し、それを重合や酸化することによりメタノールやジメチルエーテル、オレフィンなどを得ることができることが知られている。この場合は、ハロゲンによる反応器の腐食などが解決すべき課題として残っている。

#### ④軽質炭化水素(C<sub>2</sub>-C<sub>4</sub>)の直接転換

天然ガス田には wet natural gas と呼ばれる C<sub>2</sub>以上の成分を多く含むガス田が存在するため、メタン転換だけでなくより炭素数の多いアルカンの転換技術も求められている。以下に原料ガスの成分である C<sub>2</sub>-C<sub>4</sub>の直接転換について述べる。

近年、ポリプロピレンやアクリル酸などのプロピレン系誘導品の需要がアジアを中心に高まっているが、プロピレンは従来ナフサのクラッキングによる副生成物として回収しているためその量が世界的に不足している。そこで天然ガスの成分からプロピレンを直接合成する技術が求められており、米国を中心に供給過剰となっているエチレンを原料としたプロピレン合成が精力的に行われている。プロピレンの合成法として、プロパンの脱水素やメタセシス反応、メタノール転換 (MTO : Methanol to Olefin) などの研究が行われている。メタノールは液体であり輸送が簡便なため、急増するプロピレン需要に対応することができる。

軽質炭化水素 (C<sub>2</sub>-C<sub>4</sub>) を用いて含酸素化合物を合成する研究も数は少ないが行われている。RhCl<sub>3</sub>、NaCl、CuO を溶解させた CF<sub>3</sub>COOH 中にてカルボニル化合物の合成が報告されており、酸素と一酸化炭素存在下で炭化水素鎖が短くなったカルボニル化合物が生成しやすい (例えば C<sub>2</sub> から HCOOH など) ことが見出された<sup>7)</sup>。

#### (3-2)国際ベンチマーク

米国 DOE では、ARPA-E の Electrofuel プロジェクト (2011~2014) では酵素反応を用いてメタンを転換する試みがいくつか行われてきた。ARPA-E の REBEL プロジェクト (2015-) でも、中温域の燃料電池関連の研究において、Georgia Tech Research Corporation が 500 °C 以下で作動するメタン転換型燃料電池を研究している。また、液体系燃料電池において、FuelCell Energy 社が中温域で作動するメタンからメタノールに転換しうる反応プロセスの開発を進めている。

EU では Horizon2020 の中で Power to Gas が進められ、従来型天然ガスと再生可能エネルギー由来天然ガスならびに水素の融合利用が検討されている。また、天然ガスが安価に手に入る中東においては、政府系機関が天然ガスの転換・液化に大型のファンディングをつけて研究開発が進められている。

商業展開のフェーズとしては、合成ガスを経由した石油系製品製造においては、これまで南アフリカの SASOL や Shell, BP による長年の技術開発が行われ、現在 14 万バレル/日級のプラントがカタールなどで稼働している。また、ガスから人造石油（軽油）まで転換するプロセスにおいて、マイクロリアクターなどの開発が進められており、米国 Velosys 社などは、反応部と熱交換部を交互に積層し伝熱を効率化、高活性な触媒を開発してきた。これを用いた洋上油田・小規模ガス田における改質・GTL やバイオマスからの燃料製造（BTL : Biomass to Liquid）への適用が検討されている。米国の Siluria Technologies 社は MIT から出たベンチャーであり、メタンの 2 量化を経由するプロセスを検討しており、メタンの酸化二量化を経由したエチレン製造、さらにはエチレン液化に特化した技術開発をおこなっている。ウイルスをテンプレートに用いたナノワイヤ触媒ではメタンからの C<sub>2</sub>以上の炭化水素への選択性が向上し、エチレンの生成温度を従来の反応温度から 200 °C程度低下させうることを示した。

メタン転換の科学技術の動向としては、Scopus（2011-2016、キーワード Methane Conversion）による論文の状況として、全 2904 報のうち 1 位中国が 720 報、2 位米国 468 報、3 位ドイツ 178 報、4 位韓国 156 報、5 位イラン 148 報、6 位日本 144 報、以下スペイン、フランスと続く。また、研究機関別では東工大が世界で 22 位（18 報）、東北大が 62 位（12 報）などが入っている。これらデータから見ると、メタン転換は国際的な比較としてみると大学ランキングなどのデータに比較して我が国は劣位にあるといえる。

#### (4) 参考資料

- 1) Editorials, Nature, 460, 551-552, 2009.
- 2) 関根 泰他, 触媒, 55(3), 130-135, 2013.
- 3) J. H. Lunsford, Angew. Chem. Int. Ed., 34, 970, 1995.
- 4) V. R. Choudhary and V. H. Rane, J. Catal., 130, 411-422, 1991.
- 5) M. Schmal *et al.*, Appl. Catal. A:Gen., 375, 205-212, 2010.
- 6) W. Zhang *et al.*, J. Catal., 188, 393-402, 1999.
- 7) E. G. Chepaikin *et al.*, Kinet. Catal., 51(5), 666-671, 2010.

### 3. 4 電力自由化と再生可能エネルギー大量導入時代のエネルギーネットワーク

#### (1) テーマ名

電力自由化と再生可能エネルギー大量導入時代のエネルギーネットワーク

#### (2) 概要

2016年4月から始まる電力自由化、さらには2020年を目処に行なわれる発電と送電を法的に分離するなど電力供給のシステムが大きく変わろうとしている。また、ガス市場も2017年に小売の完全自由化が行なわれる予定であり、我が国のエネルギー供給が大きく変化している<sup>1),2)</sup>。

エネルギー基本計画<sup>3)</sup>で示したエネルギーベストミックスでは、2030年の電力供給における再生可能エネルギーの割合を22~24%としているが、変動電源と言われる太陽光は7%程度、風力は1.7%程度とされており、長期的にはこれらの変動電源の更なる導入、供給と需要一体となった双方向のエネルギーネットワークの構築によるエネルギーの安定供給が必要である。

また世界的にIoTが提唱され、よりダイナミックで自律的な情報のやり取りを実現するサービスプラットフォームをもつ社会の実現が期待されている。

こうした状況を受けて、これまで電力を中心として、供給者から需要者に対して一方向で供給されてきたエネルギーが、需要者から供給者へ情報さらにはエネルギーそのものを供給する、あるいは、需要者が能動的にエネルギーに関与する双方向のエネルギーシステムとなり、これにより、社会に新たな価値（サービス）を創出し、低炭素化、エネルギー効率向上、災害に強いレジリエントなシステムとなることが期待される。

我が国は、1964年に制定された電気事業法の下、発電から小売までを一貫して行う垂直統合型の電力会社10社が電力供給を行ってきた。バブル経済の崩壊後は、電気事業の高コスト構造や内外価格差の是正を目的とした制度改革が行われてきており、その結果、2013年度時点では販売電力量の家庭向けを除く60%が自由化対象になっているが、特定規模電気事業者（PPS）である新電力のシェアは4%にとどまっている。2011年3月の東日本大震災福島第一原子力発電所事故を受けて、①電力の安定供給の確保、②電気料金の最大限抑制、③需要家の選択肢や事業者の事業機会を拡大することを目的として、2013年4月に「電力システムに関する改革方針」が閣議決定された。この目的の下、①広域系統運用の拡大（2015年広域的運営推進機関設立）、②小売及び発電の全面自由化（2016年目処）、③法的分離の方式による送配電部門の中立性の一層の確保（2018年~2020年）、との内容の電力改革を行うこととしている。2015年4月に広域的運営推進機関が設立され、2016年4月より電力市場の完全自由化が始まる。このような状況の中、電力会社だけではなく、ガス会社、石油会社などのエネルギー関連企業、さらには情報系企業が発電業者や電力小売業者として申請を行ない、サービスを含めた競争が激化している。

欧米では1990年半ば頃より電力自由化が行なわれ、その後再生可能エネルギー導入が進められてきたが、我が国では2013年7月に開始されたFIT（Feed in Tariff：固定価格買取制度）により太陽光発電を中心に再生可能エネルギーの導入が進められており、同時に電力自由化を進めるなど世界に類のない取り組みを進めている。

スマートグリッドの概念は1990年代より提唱され、現在はスマートシティ、マイクログリッドな

ど様々な広がりを見せている。米国では、発・送電設備のインフラ不足、大停電事故、ピーク需要の削減や老朽化した電力網更新などを目的とした、電力供給の信頼性向上・強化型、欧州では、風力発電や太陽光発電の大量導入、大停電事故、低炭素型の街づくりを目的とした再生可能エネルギー大量導入型として捉えることができる。我が国は欧州と同様、発電・送電系と需要家を含む配電系を一体的に捉え、再生可能エネルギーの導入を促進する再生可能エネルギー大量導入型といわれている<sup>4)</sup>。

欧米でも様々な研究プロジェクトが実施されており、我が国においても実証試験を初めとして多くのプロジェクトが実施されているが、スマートグリッドは需要者を中心として、電力供給では低電圧の配電システムのスマート化、省エネ化を目的としたものが中心である。

ここでは、供給から利用まで含めたエネルギーネットワークの研究開発の現状と展望について概説する。

### (3) 国内外における研究開発の動向

#### (3-1) エネルギーネットワークの国内外の研究開発動向

##### ① 電力システムの現状と技術開発動向

我が国の電力は、総括原価方式により電力価格が設定され、電力会社が電力安定供給の責任を果たしてきた。電気は貯蔵することができず、発電から消費までを同時同量で制御することで、電力システムの安定性を保つためのシステムが構築されている。我が国の電力システム構成は、直列に接続されたくし型と称され原則、各電力間は1点で接続され、各電力会社管内で需給バランスを取ることを基本としている。一方、欧州では各国の電力システムをつないだメッシュ型と称され、大きな各国電力間の系統連係容量を有しているが、ドイツや英国では電力自由化、再生可能エネルギー導入により電力価格の高騰が課題となっている。また、米国では電力自由化や規制緩和により電力品質低下、電力会社の経営状況の悪化、多くの発電所設置による電力システムの複雑化がおこっている。

我が国では、電力完全自由化、発送電分離、再生可能エネルギー導入拡大ともこれからであり、FITによる再生可能エネルギー大量導入に対して、東北電力、九州電力管内では電力システムの安定性に対する課題が顕在化し始めている。

我が国でも、電力システムの技術として以下の研究開発が行われている。

- 超高压送電 (Ultra High Voltage 送電)、超高压直流送電、超電導技術、太陽電池や風力電の変動に耐える送電網の安定運用のための状態監視技術 (Synchrophasor などの活用)、電源および送電網の機器の最適制御技術
- 周波数制御領域、ランプ変動の制御を含めた、電力需給に係るあらゆる構成要素の最適活用と個別技術と全体最適のための組合せ、活用技術
- 従来電源の特性改善、太陽電池などの抑制・調整力、エネルギー貯蔵要素による需要の能動化調整、送電網の拡大・増強
- 需要と発電予測技術、準リアルタイムの起動停止計画に代表される運用計画技術の高度化

また、今後の研究開発項目として以下があげられる。

- 既存の火力発電の調整機能活用技術 (全負荷帯高効率化、負荷変動速度)
- 揚水発電 (特に可変速揚水)、二次電池、エネルギーキャリア等、各種エネルギー貯蔵技術そ

それぞれの特性に応じた最大活用技術

- 分散電源などのきわめて多数の小規模な対象を効率的、効果的に需給調整に活用するためのアグリゲーション技術
- 送電網、連系線の混雑管理と最大活用技術需要予測、発電予測技術、予測誤差の定量情報提供
- 起動停止計画、シミュレーション技術、実際の電力システムの運用技術

## ②スマートグリッドの現状と技術開発動向

電力自由化により需要家がより安価、環境に優しい電力を選ぶ、さらには、FIT に代表されるように需要家自身が発電し電力を売る状況に変化しており、これまで供給から消費の一方向システムから、需要側からも供給側にエネルギーや情報を供給する双方向のシステムが構築されていこうとしている。

スマートメータの設置や EMS (Energy Management System)、需要側の能動化技術である DR (Demand Response)、電気自動車との関係、電力小売業者であるアグリゲータ、送電・配電系統側の周波数制御や電圧制御、また各種系統や発電所故障時に対処するための予備電力確保に価値をつけるアンシラリーサービス、複数の小規模な自家発電設備や電力の需要抑制を統合し 1 つの発電所とする仮想発電所 (VPP : Virtual Power Plant)、需要家の節約により余剰となった電力を発電したことと同等にみなすネガワットなど、様々な検討が行われている。

このような状況の下、将来的にエネルギーの安定供給、低コスト化、低炭素化を達成するためには、電力のみではなく、熱エネルギーを含めたエネルギー全体システムの最適化が必要である。例えば、昼間や晴天時に発電する太陽光、風が吹くときに発電する風力など変動の制御、余剰に発電した電力の貯蔵（蓄電池、水素変換を代表とする化学的貯蔵、熱貯蔵等）など、エネルギーシステムとしての時間的、空間的な最適化が必要となっている。

長期的な視点での研究開発として、エネルギーネットワーク全体の評価モデル開発、高速取引市場・トランザクティブエネルギー、センサーNW からのビックデータ解析・最適化計算、リアルタイム計測・制御、超高速アルゴリズム、サイバーセキュリティ、電気の大域性を緩和するためのモジュール化技術（配電系を中心とした電力潮流制御、中央集中型の更なる高速制御、電力パケット、パルス送電、P2P 分散協調制御型、回線交換方式など）等があげられる。

## (3-2)国際ベンチマーク

### ①日本

第 5 期科学技術基本計画では、ネットワークや IoT を活用し、「超スマート社会」を未来の姿とし共有し、「Society 5.0」として深化することが示され、超スマート社会サービスプラットフォームのドメインとしてエネルギーバリューチェーンも含まれている<sup>5)</sup>。

経済産業省を中心に下記の取組みが行われており、官民一体の取組みとして、スマートコミュニティ・アライアンスの設立、米国グリッドワイズアライアンスとの協定を締結している。

- ・低炭素電力システム研究会
- ・次世代送配電ネットワーク研究会
- ・蓄電池システム産業戦略研究会
- ・次世代エネルギーシステムに係る国際標準化に関する研究会

- ・次世代エネルギー・社会システム協議会
- ・エネルギー・リソース・アグリゲーション・ビジネス・フォーラム

スマートグリッドに関する研究開発の代表例として以下が進められている。

- ・スマートコミュニティ実証事業
- ・分散型エネルギー次世代電力網構築実証事業
- ・電力系統出力変動対策技術研究開発
- ・次世代送電システムの安全性・信頼性に係る実証研究
- ・高温超電導実用化促進技術開発
- ・スマートグリッドの通信インタフェース標準化推進事業
- ・分散協調型エネルギー管理システム構築のための理論及び基盤技術の創出と融合展開
- ・COI 九州大学・共進化社会システム創成

また、スマートグリッドの構成技術となる、パワーエレクトロニクス、エネルギーキャリア、蓄電池、太陽電池の研究開発などが内閣府、経済産業省、文部科学省で行われている。

海外では電力自由化、再生可能エネルギー導入が進んでいる欧米を中心に様々な検討、研究が行われている<sup>6)</sup>。

## ②欧州

欧州では、EU 再生可能エネルギー電力促進指令（2001）により、電力分野への再生可能エネルギーの導入量を各国に規定しており、需要家側エネルギー効率エネルギーサービス指令（2006）によるスマートメータ導入の義務化、EU 再生可能エネルギー促進指令（2009）では、2020年までに最終エネルギー消費に占める再生可能エネルギーの割合を20%にすることを目指している。また、ETP Smart Grids、European Smart Metering Alliance（ESMA）、Smart Domestic Appliances in Sustainable Energy（Smart-A）等が組織されているETP Smart Gridsでは、「戦略研究アジェンダ(Strategic Research Agenda：以下SRA)」として、2006年にビジョン24をまとめている。2007年には技術戦略（SRA）25を発表、2008年9月にSRAの具体的な展開優先順位付け、展開スケジュールを定めたSDD26のドラフトを発表している。

Horizon 2020では、再生可能エネルギーからの水素・電力網がテーマとして挙げられており、2010年にスマート、持続可能かつ包括的な成長という視点の実現を目指した成長戦略「欧州2020」の実行プログラムとして位置付けられている。また、FP7の下、e-Highwayが行なわれている。これは2020年～2050年のEUの変換ネットワーク計画をサポートするための方法論開発を目的とし、再エネ供給の信頼性向上と市場との融合を確実にするため、可能性のあるEUの基本的な電力供給網開発計画や様々な将来の電力システムシナリオに基づく完全なEUグリッド構造のオプションを導くものである<sup>7)</sup>。また、2013年～2015年、送配電システムの新たな運用パラダイムの開発を目的としたSuSTAINABLE ProjectにEU9カ国より8パートナーが参画し、プロジェクトマネジメント(WP)と8つのWPの構成のもと、コンセプトの検討と実証試験が行われた<sup>8)</sup>。エネルギー分野の基本的フレームワークとして2010年に公表された欧州戦略的エネルギー技術計画(SET-PLAN)は、再生可能エネルギー利用拡大、CCS、送電網、燃料電池・水素、高効率エネルギー利用にフォーカスして策

定された。また、欧州標準化委員会（CEN）、欧州電気標準化委員会（CENELEC）、欧州電気通信標準化機構（ETSI）が、エネルギーシステムの構造、標準リスト、標準群更新のための手法の一つとして、スマートグリッドリファレンスアーキテクチャーを纏めている<sup>9)</sup>。

ドイツでは、Energiewendeとして、2010年にエネルギー供給のスマートな構造改革を掲げたハイテク戦略2020、2014年に持続可能なエネルギーの生産、消費を掲げた新ハイテク戦略を発表している<sup>10) 11)</sup>。2011年に、「第6次連邦政府エネルギー研究プログラム、環境適合性及び信頼性を備えたエネルギー供給のための研究」<sup>12)</sup>において、エネルギー効率、エネルギー貯蔵、送配電、炭素回収&貯蔵、燃料電池の開発、再生可能エネルギーの開発、横断的研究、送電網（伝送損失の低減、電力変動や伝送障害への迅速対応、情報通信技術を活用した電力需要管理の最適化など）、エネルギー貯蔵（熱的貯蔵、電気化学的貯蔵、力学的貯蔵、化学的貯蔵など）の研究開発を行なうこととしている。また、再エネ導入促進、CO<sub>2</sub>排出量削減、電力自由化促進、EV普及の4大目的に向け、ICT導入による電力システム最適化を進めるプロジェクトE-Energy German Smart Grid Projects構想が2006年に発表され、2008年実証開始、2012年に評価および標準化を行なっている<sup>13)</sup>。さらに、再エネの余剰電力で水を電気分解して水素製造・利活用するPower to Gas Project<sup>14)</sup>などが行なわれている。

### ③米国

米国では、DOEの「戦略計画2014～2018年（2014年4月）」においても3つの戦略目標の一つとしてエネルギーインフラの経済競争力、環境配慮、安定かつ回復力の強化支援—電力グリッドの近代化技術開発を取上げ、DOEの事故管理能力強化、戦略的石油備蓄（SPR）、電力システムを含むエネルギーネットワークに関する課題を提言している。また、DOEによる「4年毎のエネルギー計画見直し（QER）」（2015年4月）の中でもエネルギーインフラに焦点を当て、どのように近代化していくべきかの問題を検討している。具体的には、エネルギーインフラのレジリエンス、配電網の近代化、SPR利用などの非常時対応の検討、共用のエネルギー輸送インフラの改善、北米エネルギー市場の統合、エネルギーインフラの立地と許可についての提言している<sup>15)~18)</sup>。また、2003年に「Grid 2030」A National Vision for Electricity's Second 100 Yearsを発表し、今後の100年間を見据えた電力網の構築を目指し、「ICTを用いて電力システムの運用・制御を効率化する」というスマートグリッドのコンセプトを打立て、効率的で信頼性の高い電力網の構築を求めている<sup>19)</sup>。2015年から10年計画として示されたGrid Modernization Initiativeに対応して、DOEの研究所によるグリッド近代化コンソーシアムを組織し、従来の活動を1本化し、専門家や設備の統合や、DOE各部門（EERE、OE、EPISA）のグリッド近代化関連の予算を1本化した配分を行っている。さらに、NRELにエネルギーシステム統合設備を設置し<sup>20)</sup>、EU、ドイツと同様に将来のエネルギーネットワークのプラットフォームとして、スマートグリッドアーキテクチャーを整理している。また、商取引できるエネルギーTE（Transactive Energy）が提唱され、DOEファンドの下、GridWise Olympic Peninsula Project、Pacific Northwest Demonstration Project、GridSMART Programなどの実証試験が行われている<sup>21)</sup>。

ARPA-Eでは、電力グリッド技術の研究開発支援を行っており、2つのプログラムGENI（柔軟で効率的な電力技術：伝送網のエネルギー効率、信頼性、再生可能エネルギー統合機能などを高めるためのハード及びソフトウェア）、ADEPT（再生可能エネルギーを統合した伝送網：高効率電力変換を可能にする方策、そのための回路、トランジスタ、インダクタ、変圧器、キャパシタなど）で29のプロジェクトを実施しており、包括型提案募集プログラムによる伝送技術に関する14プロジェク

トが含まれている。また、2つの新しいプログラム NODES、GRID DATA についても 2016 年に開始された。

IEA では、供給と需要双方向の情報による、電力システムを最適化、高効率化し安定供給、低炭素化を達成するためのスマート電力システムのロードマップを纏めており、発電、変換、送配電、産業、サービス、消費のバリューチェーンにおいて、スマート電力システムとして 8 つの研究開発領域でハードウェアおよびシステム、ソフトウェアの必要な研究開発項目を示している<sup>22)・23)</sup>。

特許庁では、「次世代エネルギーシステムに関わる国際標準化に関する研究会」(経済産業省)の7つの構成技術を参考に、3つの電力系統側技術、①送電系統広域監視システム、②配電網の管理、③分散型電源の系統連系、5つの需要家側技術、④デマンドレスポンス、⑤EMS、⑥需要家用分散型電源システム、⑦EVの充放電システム、⑧AMIシステム、さらに、これらの技術がネットワークとして繋がっていくことから、⑨スマートグリッド関連サービス、の9つの技術分野に分類して分析を行なっている<sup>24)</sup>。1995年~2012年の論文発表は3,086件あり、1位欧州859報、2位米国691報、3位日本367報、4位中国195報、5位韓国89報、その他984報(含むカナダ、インド)となっている。いずれも増加傾向にあるが、欧州では2000年代初めから伸びており、米国でも2010年以降急増している。日本でも2006年頃から増加しているものの、その伸びは小さい。分野別では、送電系統広域監視システム、分散型電源の系統連系に関する件数が最も多く、2004年頃から分散型電源の系統連系に関する件数が急増し、2010年頃から、EMS、EVの充放電システムの件数が増加傾向にある。我が国では、産を中心に電力系統側技術、需要家側技術、学を中心に需要家側技術の研究開発が行われているが、欧州、米国に対して電力自由化、発送電分離が10年以上遅れており、欧米で進められているいるシステム化技術が遅れている。今後、基礎技術とシステム化技術を統合し、超長期のエネルギーネットワークのあり方を明確にして進める必要がある<sup>25)</sup>。

#### (4) 参考資料

- 1) 経済産業省資源エネルギー庁、電力小売市場の自由化について、2013年10月
- 2) 経済産業省資源エネルギー庁、電力システムに関する改革方針(参考資料)、2013年4月
- 3) 経済産業省資源エネルギー庁、エネルギー基本計画、2014年3月
- 4) 横山明彦、新スマートグリッド 電力自由化時代のネットワークビジョン、日本電気協会新聞部、2015年2月
- 5) 総合科学技術・イノベーション会議、科学技術基本計画(案)他、第15回総合科学技術・イノベーション会議資料、2016年1月
- 6) CRDS 研究開発の俯瞰報告書 主要国の研究開発戦略(2015年) CRDS-FY2014-FR-01
- 7) e-Highway2050 HP, <http://www.e-highway2050.eu/e-highway2050/>
- 8) [www.sense.tu-berlin.de](http://www.sense.tu-berlin.de), <http://www.sustainableproject.eu/> HP 他
- 9) CRDS-FY2014-FR-01 研究開発の俯瞰報告書「主要国の研究開発戦略(2015年)」, CRDS, 2015年3月
- 10) CRDS-FY2014-OR-01 科学技術・イノベーション動向報告~ドイツ~, CRDS, 2015年3月

- 11) DE20140916 ドイツの科学技術ノベーション政策 新ハイテク戦略, CRDS, 2014年9月
- 12) Research for an environmentally sound, Reliable and affordable energy supply, 6th Energy Research Programme of the Federal Government, Nov. 2011, Federal Ministry of Economics (BMWi)
- 13) E-Energy German Smart Grid Projects Overview, June 2010, e-energy HP, [www.e-energy.de](http://www.e-energy.de) 他
- 14) Hydrogenics HP, <http://www.hydrogenics.com/> 他
- 15) NEDO 海外レポート NO.1107 2014.5.27 米国エネルギー省戦略計画 2014~2018年(抜粋)  
<http://www.nedo.go.jp/content/100559932.pdf>
- 16) 平成 23 年度作業技術調査事業 海外主要国における研究開発活動の動向に関する調査  
[http://www.meti.go.jp/meti\\_lib/report/2012fy/E002537.pdf](http://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2012fy/E002537.pdf)
- 17) JSPS ワシントン事務所、「2016 年度米大統領予算教書における研究開発関連予算案の概要」  
[http://jspsusa.org/wp/wp-content/uploads/2014/08/150310\\_The-Presidents-Budget-for-Fiscal-Year-2016.pdf](http://jspsusa.org/wp/wp-content/uploads/2014/08/150310_The-Presidents-Budget-for-Fiscal-Year-2016.pdf)
- 18) EPA Strategic Plan FY2014-2018  
[http://www2.epa.gov/sites/production/files/2014-09/documents/epa\\_strategic\\_plan\\_fy14-18.pdf](http://www2.epa.gov/sites/production/files/2014-09/documents/epa_strategic_plan_fy14-18.pdf)
- 19) “GRID 2030” A NATIONAL VISION FOR ELECTRICITY’S SECOND 100 YEARS  
[http://energy.gov/sites/prod/files/oeprod/DocumentsandMedia/Electric\\_Vision\\_Document.pdf](http://energy.gov/sites/prod/files/oeprod/DocumentsandMedia/Electric_Vision_Document.pdf)
- 20) NREL、Energy System Integration、2015年6月  
<http://www.nedo.go.jp/content/100750424.pdf>
- 21) カリフォルニア州公共ユーティリティ委員会政策計画部レポート、2014年10月
- 22) Technology Roadmap Smart Grids、IEA、2011年
- 23) Smart Grid Reference Architecture, CEN-CENELEC-ETSI Smart Grid Coordination Group, Nov. 2012
- 24) 平成 24 年度特許出願技術動向調査ースマートグリッドを実現するための管理・監視技術一、特許庁、平成 25 年 4 月
- 25) CRDS 研究開発の俯瞰報告書 環境・エネルギー分野（2015年）CRDS-FY2015-FR-02

## 4. 情報科学技術分野

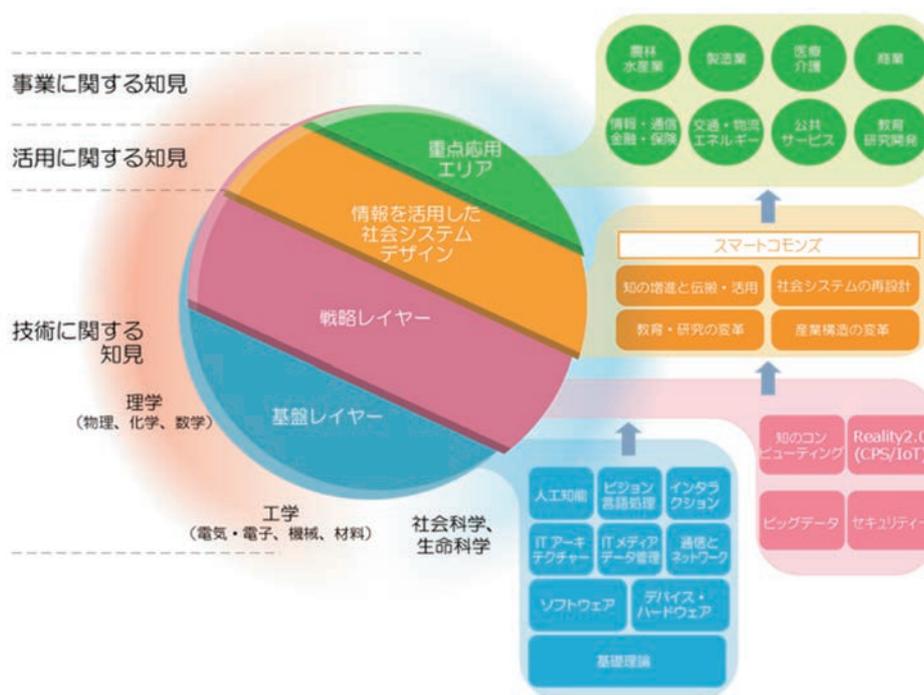
### 4. 1 情報科学技術分野の概要

情報科学技術分野は、科学としてよって立つ基礎理論から、その実装としての電子部品・デバイスや情報通信機器・組込み機械、さらには情報システム・情報サービスまでの広範な産業を支える技術分野である。同時に、その汎用工具的な性質から第二次、第三次産業はいうに及ばず、従来は直接関係ないと思われていた第一次産業や社会インフラ、社会システムの実装にまで深くかかわっている。

近年では、仮想化、コンポーネント化などの考え方が、企業の機能だけでなく社会の機能として位置づけられるようになってきた。CPS（Cyber Physical Systems）、スマーteràプラネットなどに代表される社会システム・社会サービスへの期待である。このような社会のクリティカルインフラとしての期待に応えるためには、情報技術が単に技術の進展だけを狙うのではなく、社会性、倫理性などにもとづいた社会デザインまで関与しなければならない。また、このようにして情報技術により構成されたプラットフォームを社会共通資本（スマートコモンズ）と考え、継続的な投資の必要性、セキュリティに係る問題をはじめとして社会的・経済的に捉えることが急務である。

このような観点から、「研究開発の俯瞰報告書 情報科学技術分野（2015年）」の俯瞰図のうち、既存の学術分類だけではとらえられない時代の変化に対応するための研究開発領域からなる「戦略レイヤー」から「知のコンピューティング」、さらに社会共通資本としてのプラットフォームを構成するために必要となる研究開発領域からなる「Reality 2.0」を本報告書において新たに書き下ろした。

情報科学技術分野俯瞰図（2015年補遺版）



- Reality 2.0 (CPS/IoT)

近年の IoT や CPS、ビッグデータ等をはじめとした情報科学技術の進展・普及に伴い、個人やビジネス、社会活動において、サイバー世界が物理世界と一体となって切り離せないものになりつつある。この動きが進展していくことで、近い将来、物理世界とサイバー世界が一体化した世界ができるであろう。このような世界を「Reality 2.0」と呼ぶならば、Reality 2.0 の世界では、サイバー世界、物理世界に存在する多様な機能（モノ、ヒト、コンピューターやそれらが提供する、製造、物流、調達、ヘルスケア、ファイナンス、コンサルティング、人事、教育等）が、ネットワークを通じて利用可能なコンポーネントとして存在する。このコンポーネントを適宜組み合わせることにより、サービスを構築することが可能となる。このような世界において必要となる研究開発領域を採り上げた。

- 知のコンピューティング

情報科学技術を用いて、知の創造を促進し、科学的発見や社会への適用を加速するために必要となる研究開発領域を採り上げた。特に、社会性、倫理性などにもとづく社会デザインにまで関与するために、知の社会適用に必要な ELSI/SSH やプラットフォームにフォーカスして研究開発領域を再構成した。

#### 参考資料

- 1) 国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）研究開発戦略センター（CRDS）、「研究開発の俯瞰報告書 情報科学技術分野（2015年）」（CRDS-FY2015-FR-04）、2015年4月、<http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2015/FR/CRDS-FY2015-FR-04.pdf>

## 4. 2 Reality 2.0 (CPS/IoT)

情報科学技術の進展は目覚ましく、その高度化と社会への普及はあっという間に進んでいる。データ処理技術や通信技術の進展とともに、ネットワークに接続される機器は増大し、その数は 2020 年には 500 億端末に上り、2025 年にはインターネットに接続する人口は 55 億人に達するとの予測がされている。こうした変化は、産業構造の変化を引き起こし、あるいは個人の生活や社会のあり方にも影響を与え始めている。

これまで、現実世界（実体社会）は、あくまで物理世界であり、サイバー世界は物理世界に情報をもたらすコンピューター群であった。ところが、近年の IoT (Internet of Things) や CPS (Cyber Physical Systems)、ビッグデータ等をはじめとした情報科学技術の進展・普及に伴い、個人やビジネス、社会活動において、サイバー世界が物理世界と一体となって切り離せないものになりつつある。この動きが進展していくことで、近い将来、物理世界とサイバー世界が一体化した世界ができるであろう（図 1）。CRDS ではこの世界を「REALITY 2.0」と呼んでいる<sup>1)</sup>。

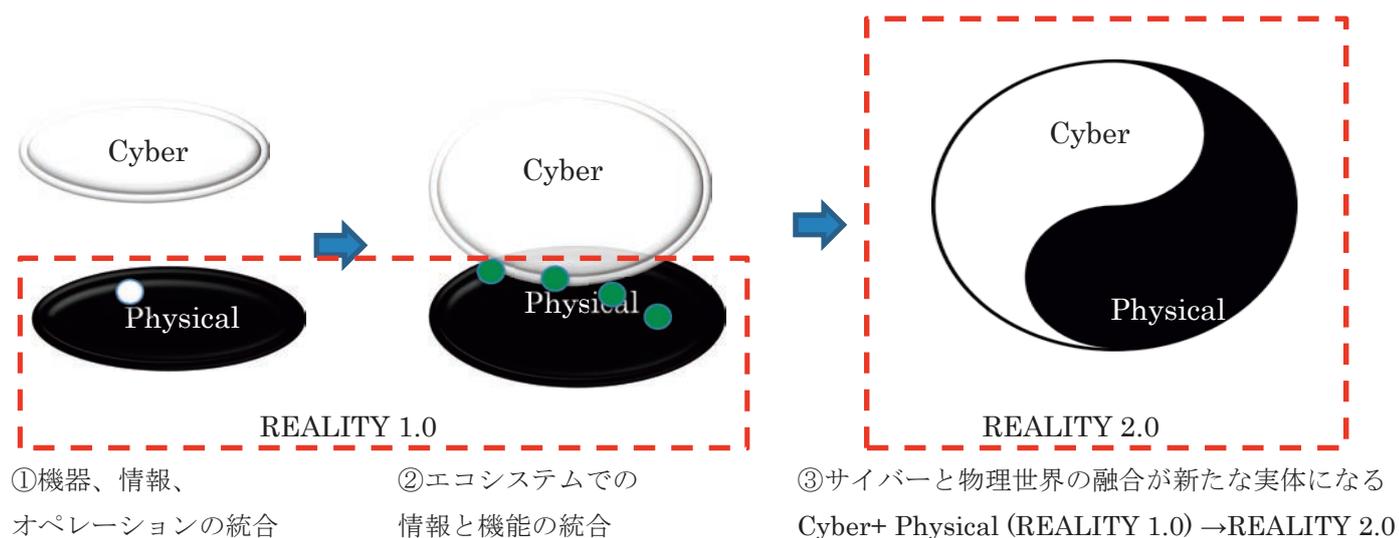


図 1 REALITY 1.0 から REALITY 2.0 の世界への移行

REALITY 2.0 の世界では、サイバー世界、物理世界に存在する多様な機能（モノ、ヒト、コンピューターやそれらが提供する、製造、物流、調達、ヘルスケア、ファイナンス、コンサルティング、人事、教育等）が、ネットワークを通じて利用可能なコンポーネントとして存在する。このコンポーネントを適宜組み合わせることによって、サービスを構築することが可能となる（図 2）。ここで、コンポーネントの構成を指定するものを、Software Defined（ソフトウェア定義）技術を核とした「実体定義レンズ」と呼ぶ。

実体定義レンズはソフトウェアプログラム的一种であり、サービスの要求者は、実体定義レンズを通じて、必要となる機能を要求する。実体定義レンズは、要求に応じた機能を持つコンポーネントをサービスプラットフォーム上で検索・発見し、それらを組み合わせることで要求に応じたサービスを構築する。

また、実体定義レンズは、適用ドメインやサービスに応じて複数作られる。これらを多段階に組

み合わせることができ、例えばモビリティとヘルスケアを重ね合わせることで、防災・減災に対応するシステムを構成することが可能になる。

また、セキュリティーや信頼性といった機能以外の要件（非機能要件）についても、実体定義レンズによって組み合わせることができ、要求するサービスに応じてセキュリティーの強度を利用者が選択するといったことが可能である。

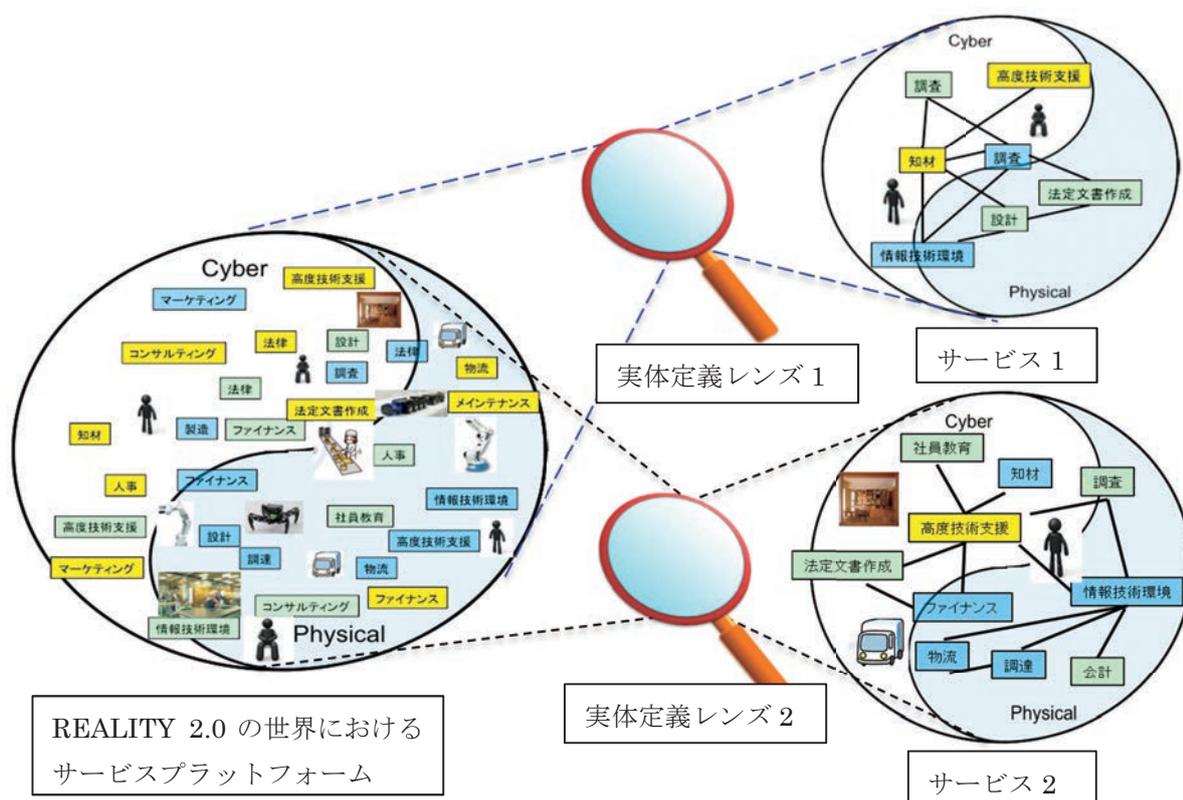


図2 サービスプラットフォームから実体定義レンズを通じたサービスの構築

こうした仕組みを構築していくことで、さまざまな機能のエコシステムが目的に応じて形成され、革新的なイノベーションが生まれるとともに、既存の価値観、社会規範が変貌していく可能性がある。

本章では、上記に向けて必要となる研究開発領域として、「ソフトウェア定義技術」について記載する。

【参考資料】

- 1) 情報科学技術がもたらす社会変革への展望 — REALITY 2.0 — の世界のもたらす革新  
<http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2015/XR/CRDS-FY2015-XR-05.pdf>

## 4. 2. 1 ソフトウェア定義技術

### (1) テーマ名

ソフトウェア定義技術

### (2) 概要

ソフトウェア定義技術とは、システムの構成要素となっているハードウェアやソフトウェアコンポーネントのインターフェースや機能の差異を吸収すると同時に、その挙動をソフトウェアで定義・制御する、抽象化と仮想化技術の総称である。

ソフトウェア定義データセンターは、その最たる典型で、ネットワーク、ストレージ、CPU などすべての構成要素がソフトウェアで定義・制御可能なサービスとして提供されている。

### (3) 国内外における研究開発の動向

これまでのアーキテクチャーの最大の弱点は、急速な外部環境の変化に対する仕様変更に対応できないことである。近年のビジネスは、リアルタイム性、拡張性、継続性、オープン性などがますます求められるようになっており、それを支えるためのテクノロジーも登場している。

現在のシステムは、ハードウェアとソフトウェアが混在し、ハードウェアについては、結線や設定など、人力に頼る必要がある。また、ハードウェアとソフトウェアが密結合しており、例えば、ハードウェアを変更すると、それに対応してOSやアプリケーションの見直しや動作確認が必要であるなど、技術の更新のタイミングの差異により、密結合したシステムの何かひとつが変更されただけで全体を見直す必要が生じることになる。このため、システムの入替えによる非機能要件の向上が見込まれても機能面に差異がない場合には入れ替えのインセンティブが働かなかつたり、全体コストの低減が見込まれても多数のシステムが稼働している中での一括置換えは現実的でなかつたりすることから、管理上の負荷の増大や新しい技術の導入の足かせになるという問題があった。

そこで、新しいアプローチとして、ソフトウェア定義が登場した。ソフトウェア定義とは、システムの構成要素となっているハードウェアやソフトウェアコンポーネントのインターフェースや機能の差異を吸収すると同時に、その挙動をソフトウェアで定義・制御する、抽象化と仮想化技術の総称である。例えば、ネットワークの流れを制御するネットワークスイッチは、複数のベンダーが商品を販売している。ネットワークスイッチは、ソフトウェアのコマンドによる制御が可能であるが、そのコマンドの内容や使い方は、ベンダーごとに異なっている。この違いを吸収し、どのベンダーのネットワークスイッチが使われていても、同じ方法で制御ができる仕組みをソフトウェア定義ネットワークという。

ソフトウェア定義は、ネットワーク（SDN: Software Defined Network）<sup>1)</sup>から始まり、ストレージ（Software Defined Storage）、コンピュータ（Software Defined Compute）、データセンター（Software Defined DataCenter）<sup>2)</sup>といったハードウェアへと広がり、現在では、Web サービスといったアプリケーションソフトウェア（SDAS: Software Defined Application Service）<sup>3)</sup>にまで広がっている。アプリケーションソフトウェアについても同様に、ソフトウェアベンダーごとに、同じ機能でもインターフェースが異なる。このインターフェースを統一し、どのベンダ

一のアプリケーションソフトウェア機能でも、ソフトウェア定義によって、制御ができるようになる。

SDAS は、再構成の迅速化と制御の簡素化を両立させることができる。物理プレーン、仮想化レイヤー、アプリケーションプレーンという 3 つの階層構造で全体を管理する。SDAS とは、SOA (Service Oriented Architecture) <sup>4)</sup> の概念を発展させたものである。SOA は小さなアプリケーションを”サービス”という単位で柔軟に組み合わせることで、システムの再構成を迅速化することができる。ソフトウェア定義アーキテクチャーは、SDAS の範疇である Web サービスに加え、コンピュータやストレージ、ネットワークなどのハードウェアインフラも対象とすることができる。

オープンコミュニティを中心として、ドメイン共通プラットフォームのソフトウェア定義化が進んでおり、代表的なものとして、IaaS (Infrastructure as a Service) 領域では OpenStack<sup>5)</sup> や CloudStack<sup>6)</sup>、PaaS (Platform as a Service) 領域では CloudFoundry<sup>7)</sup> や OpenShift<sup>8)</sup>、GE 社が開発中の Predix Cloud<sup>9)</sup> などがある。今後は、ドメインに特化した SaaS (Software as a Service) 領域への拡大が考えられる。

また、ソフトウェア構築定義テンプレート、業務フロー関連技術などを活用して、機能群を依存関係や設定値などを含めて自動的にインストール、構成することや、複数のクラウドサービスをつなげて、一つのシステムを構成することがソフトウェア定義を活用することで可能となる。

トップダウンアプローチである SOA は一般に広くは普及しなかったが、マイクロサービス <sup>10)</sup> というキーワードで、Web サービスは再度注目を浴びつつある。マイクロサービスはボトムアップアプローチであるため、複数の開発者から、同じような機能が異なるインターフェースで、個別に提供される可能性がある。アプリケーション側から見れば、サービス提供者を変えると、プログラムを書き換える必要がある。そのため、サービス提供者とサービス使用者のコミュニケーションが重要になる。

国内の事例でも、携帯電話会社が何か新しい料金プランを出せば、他社が即座に追従する。契約時の料金のシミュレーションや、料金計算にはシステムが必要だが、短期間で新料金プランに対応したシステムを開発していることになる。過去のプランも、契約者がいる限りは継続するので、オプションまで含めると、その組み合わせは膨大な数になる。携帯電話各社では、このような複雑なシステムでも短期間で対応できるように、開発手法、システム構造、ソフトウェアなどの工夫をしている。

昨今、インダストリー4.0<sup>11)</sup> やインダストリアル・インターネット <sup>12)</sup> など、企業内だけでなく、企業間で連携していく取り組みが始まっている。板金や溶接、組み立てなど各企業が強みを持つ工程をつなげて、ひとつの商品を作り上げていくバーチャルな工場を作ろうという取り組みも、そのひとつである。企業単独では商品を生産することができないものを、複数の企業が連携することによって実現する。

すでにこのような連携が、配車サービスを展開している Uber<sup>13)</sup> というシステムで、始まっている。配車アプリを通して、今居る場所への配車指示、目的地までの移動、決済などを行うことができる。現在は、人が運転する車が、“移動という機能”を提供しているが、将来的には自動運転車も、同様の“機能”を提供するだろう。配車を指示した人は、誰が運転しているのかを意識せずに、“移動という機能”を使用することになる。

このように、外部環境の変化に合わせて、必要な“機能”を組み合わせ、迅速にシステムを構

築するために必要な工夫を、あらかじめしておく必要がある。このようなスピード感を持って、優位性を確保することが、最重要課題であると考ええる。ここで“機能”をサービスと置き換えれば、以上の議論はすべてソフトウェア定義技術により実現可能な課題であると考えられる。

#### (4) 科学技術的・政策的課題

##### 1) “機能”の大きさの明確化とインターフェースの共通化

“機能”の大きさをどうするか、という課題は SOA の当初からある古典的な課題であるがいまだ決定的な解決策はない。“機能”を小さくすると、多くの人に使ってもらえる可能性がある。単価も安くなる。一方、インターフェースの呼び出しによるオーバーヘッドが大きくなり、性能が悪化する可能性もある。他社との差別化が難しく、競争が激化するかもしれないが、“機能”を使う側からすれば、スイッチングコストが安くなり、移行のモチベーションにもなるだろう。逆に、大きくすると、“機能”に自社の強みを反映でき、競合との差異を明確化できることで、単価を上げることができるが、汎用性が低くなるため、アプリケーションからの使用頻度が少なくなり、再利用性が悪化する。このためには、サービス毎に“機能”の大きさを最適化するために実証的な研究をする必要がある。また、サービス実装におけるノウハウを蓄積し、共有化していくべきである。

さらに、同じ“機能”であっても、実装によってインターフェースが異なると、それを呼び出す側の負担が大きくなる。標準化団体やオープンコミュニティなどにおいて、“機能”単位のインターフェースを共通化・標準化しておく必要がある。

##### 2) “機能”を適正に利用する仕組みの構築

“機能”をサービスとして提供するという事は、アウトプットに対する責任が発生する。“機能”の使用に関して代金を徴収できたとしても、それ以上の損失を憂慮すれば、外部公開しない、という選択をするかもしれない。システム全体の活性化が脅かされないよう、責任範囲を明確化しておく必要がある。そのために、“機能”を公開し、利用に供するプラットフォームを構築し、そのプラットフォーム上でメタデータとして仕様を公開できる仕組み、“機能”の信頼性を評価する仕組みを実装するといった方法が考えられる。権威のある認定機関で信頼性などを保証するよりも OSS や API エコノミーで行われているような競争に基づく市場原理に任せる方式の検討も行うべきである。

##### 3) サービスの変化に迅速に対応可能なシステム構造・環境の実現

機能群の実装であるサービスは、日々もしくは時々刻々変更を加えていく必要がある。開発現場の意向を踏まえて、SOA+DevOps 的に開発を行うマイクロサービスのようなボトムアップアプローチが重要となる。

例えば、アマゾンでは 11 秒ごとに新しいコードがデプロイ(展開)されており、最も多いときで 1 時間に 1079 回デプロイが行われる<sup>14)</sup>。シリコンバレーのスタートアップでは、短いサイクルでの事業化とその検証を繰り返す“リーンスタートアップ”を実践している。このようなスピード感が、他社優位性を確保し、企業の成長の原動力になっている。頻繁に修正を加えた場合でも、その修正が他に影響を及ぼさないように、あらかじめ、システムやソフ

トウェアの構造を設計、構築しておく必要がある。また、プログラムの修正を最低限に抑えるために、ルールやプロセスを簡単に追加、修正できる仕組みを取り入れておく必要がある。

こうしたことを実現する手段として、“機能”を公開し、それを利用するためのサービスプラットフォームの構築が考えられる。このプラットフォーム上でサービスに必要となる機能を検索し、それらの統合化により迅速なサービス構築可能とする。このためには、必要となる機能の検索、発見技術や機能同士を統合化するための、ソフトウェア定義技術の研究開発が必要となる。

#### (5) 注目動向(新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など)

- **FinTech** : Finance (金融) と Technology (IT 技術) の 2 つの言葉を合体させた造語である。つまり「IT を使ったお金にまつわるツールやサービス」のことを総称して「FinTech」と言う。“クラウドファンディング”もその一例で、将来的には、ソーシャルレンディングとしてお金を借りたい人とお金を投資したい人を結びつけるサービスができ、銀行を通さずに「誰でも銀行商売ができて、誰でも自由にお金を借りられる」可能性がある。
- **AirBnB** : 自分の空き部屋やスペースを有料で旅行者に貸すサービスである。宿泊する側の使い方はシンプルで、泊まりたい街を検索すると その街で物件を登録しているユーザーがヒットする。宿泊費や、家のタイプ（一軒家、プライベートルーム、シェアルームなど）から、自分の希望に合った物件を選び、希望日に空きがあれば予約ができる。受け入れ側から見ても、自分の家に空き部屋やスペースがあれば旅行者に有料で貸し出すことができる。
- **シェアリングエコノミー** : サービス・人材・プロダクトなど有形無形を問わず、交換・共有により成り立つ経済の仕組みのことを指す。欧米を中心に広がりを見せており、近年、日本でも浸透しつつある。例えば、“野球場で社員総会”、“有名スタジオで忘年会”など遊休スペースを簡単にインターネット上で貸し借りすることができる。
- **API マネジメント** : ウォーターフォール開発が主流の基幹システムと、スピードを重視するスマホなどのモバイル機器の進化速度や開発手法の差を補完し、迅速かつ効果的に連携を実現する方法として、「API (Application Programming Interface)」が今再び注目されている。API 公開においては、基幹システムの情報を社外のスマホなどのモバイル機器からアクセス可能にするため、セキュリティやプライバシーの配慮は必須で、また、API のビジネス成果を可視化し、制御するための監視や流量制御の機能も欠かせない。公開した API の品質が不適当な場合は企業イメージが損なわれる懸念もある。効果的に API を公開し、ビジネス貢献を図るためのツールや手段をまとめた技術は「API マネジメント」として急速な進化を続けている。
- **API エコノミー** : プラットフォームとなるアプリケーションやサービスの API を公開し、他社がこの公開 API を活用して新たなサービスを開発し提供することで、元のプラットフォームやその情報の付加価値を高める経済活動、または、高められた魅力的な情報が API 化されて更に流通することで、API によってつながれた市場が、新たなビジネス圏を生み出していく、インターネット上の新たなビジネスモデルである。
- **GitHub** : 何千もの組織、何百万ものユーザーがソフトウェア開発のコラボレーション効率の改善、コードレビューとプロセスの改善に利用しているプラットフォームである。ソフトウ

エア資産を共有することができるため、重複作業を防ぐことができるとともに、作成中のコードを有効に活用できるようになり、開発者の工数とコスト削減が可能となる。

## (6) キーワード

Software Defined Network、Software Defined Storage、Software Defined Compute  
Software Defined DataCenter、Software Defined Application Service  
Service Oriented Architecture、Web サービス、OpenStack、CloudStack  
CloudFoundry、OpenShift、Predix Cloud、マイクロサービス、インダストリー4.0  
インダストリアル・インターネット、Uber、標準化、DevOps、FinTech  
AirBnB、シェアリングエコノミー、API マネジメント、API エコノミー  
GitHub

## (7) 参考資料

- 1) NTT コミュニケーションズ株式会社,“SDN ガイドライン 第 0.1 版”,  
[http://www.o3project.org/ja/download/document/SDNguideline\\_ja\\_v0.1.pdf](http://www.o3project.org/ja/download/document/SDNguideline_ja_v0.1.pdf) (2016年3月17日アクセス)
- 2) ヴィエムウェア株式会社,“Software-Defined Data Center”,  
<http://www.vmware.com/jp/software-defined-datacenter/> (2016年3月17日アクセス)
- 3) ガートナー ジャパン株式会社,“デジタル・ビジネスのアプリケーション向け ソフトウェア・デファインド・アーキテクチャ”,  
[http://gartner.co.jp/b3i/research/150217\\_app/index.html](http://gartner.co.jp/b3i/research/150217_app/index.html) (2016年3月17日アクセス)
- 4) 日本アイ・ビー・エム株式会社,“SOA 入門: 第1回 SOA って何?”,  
[http://www.ibm.com/developerworks/jp/websphere/library/soa/soa\\_intro/1.html](http://www.ibm.com/developerworks/jp/websphere/library/soa/soa_intro/1.html)  
(2016年3月17日アクセス)
- 5) 日本 OpenStack ユーザ会,“日本 OpenStack ユーザ会”,<http://openstack.jp/> (2016年3月17日アクセス)
- 6) 日本 CloudStack ユーザー会,“日本 CloudStack ユーザー会”,  
<http://cloudstack.jp/> (2016年3月17日アクセス)
- 7) 日本 Cloud Foundry グループ,“日本 Cloud Foundry グループ”,  
<http://cloudfoundry.gr.jp/> (2016年3月17日アクセス)
- 8) アイティメディア株式会社,““使用”より“構築”で学ぶオープン PaaS 「OpenShift」(1/5)”,  
<http://www.atmarkit.co.jp/ait/articles/1304/25/news014.html> (2016年3月17日アクセス)
- 9) 日本 GE 株式会社,“産業用ソフトウェアプラットフォーム、「Predix クラウド」”,  
<http://gereports.jp/post/132395795854/predix-cloud> (2016年3月17日アクセス)
- 10) グローブエクスパートナース (株) 鈴木雄介,“マイクロサービスアーキテクチャとは何か”,  
<http://arclamp.hatenablog.com/entry/2015/06/13/213830> (2016年3月17日アクセス)
- 11) ベッコフオートメーション 代表取締役社長 川野俊充,“ドイツが描く第4次産業革命「インダストリー4.0」とは?”,  
<http://monoist.atmarkit.co.jp/mn/articles/1404/04/news014.html> (2016年3月17日アクセス)
- 12) 日本 GE 株式会社,“インダストリアル・インターネット”,  
<http://www.ge.com/jp/industrial-internet> (2016年3月17日アクセス)

- 13) 株式会社 日経 BP, “シリコンバレー出張で思い知った「Uber」の威力”,  
<http://business.nikkeibp.co.jp/atcl/opinion/15/221102/070900022/>（2016年3月17日アクセス）
- 14) 新野淳一, “Amazon は1時間に最大1000回もデプロイする。クラウドネイティブなデプロイとはどういうものか?”,  
[http://www.publickey1.jp/blog/12/amazon11000\\_aws\\_reinventday2\\_am.html](http://www.publickey1.jp/blog/12/amazon11000_aws_reinventday2_am.html)  
（2016年3月17日アクセス）

### 4. 3 知のコンピューティング

知のコンピューティングとは、情報科学技術を用いて、知の創造を促進し、科学的発見や社会への適用を加速することである。知のコンピューティングにより、人々の暮らしや社会システムの質的変革が促され、人と機械が共創した、より高度な知的社会が実現される。知のコンピューティングの開発により次のような成果が得られることを期待する。

- 知の発見と伝播・活用を促進し、科学の発展と社会への浸透と富の再配分を加速
- 最先端知識や技術の社会的適用の促進を図ることによる社会サービスの質の向上
- 新しいソーシャルコンピューティングの開拓による発見の加速
- 新しいコンピューティングパラダイムの開拓

知のコンピューティングを構成する研究開発領域を図3に俯瞰する。上段の3領域、①知の集積・伝播・探索、②予測・発見の促進、③知のアクチュエーションは、知のコンピューティングの最終的な目的となる領域を示す。④知の社会エコシステム・プラットフォームは、集積した知、生み出された価値を社会に還元して、共有・普及・促進を加速しやすくするための基盤となるソフトウェアとデータを含む。以上が新しい学術分野である。

下段の2領域、⑤個人・集団・生物に学ぶは、既存の学術分野を知のコンピューティングの文脈で整頓したものである。また⑥知の ELSI と社会適用は、知の集積・増幅・伝播・探索・予測・発見・アクチュエーションを可能にする倫理的・法的・社会問題の整備とガイドライン設計に関わる領域である。

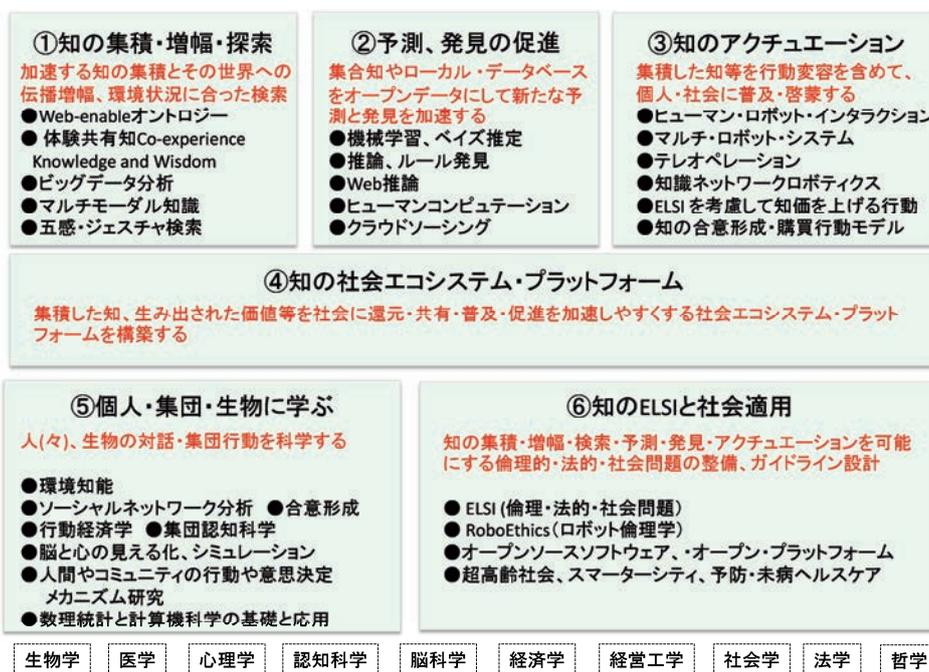


図3 知のコンピューティングの俯瞰図

今回の報告書では、③と④の密接な関連性を鑑み一つの領域として記述した。また、⑤は既存の学問領域が中心となるため改めて本節には記載することはない。

なお、執筆にあたり伊藤孝行教授(名古屋工業大学)、小林正啓弁護士(花水木法律事務所)、西田豊明教授(京都大学)の各位に協力をいただいた。ここに感謝の意を表する。

#### 4. 3. 1 知の集積・増幅・探索

##### (1) テーマ名

知の集積・増幅・探索

##### (2) 概要

急速に発展する情報ネットワーク社会の中で、変容していく知を、人工知能技術、人間・エージェント・インタラクション、コミュニティコンピューティングを総合して捉え、増幅し、共有し、体系化し、再利用するためのプロセスを支援するシステム構築のための研究開発課題である。

##### (3) 国内外における研究開発の動向

[背景と意義]

行動の資源となる知は、個人ごと、コミュニティごとに異なるばかりでなく、テクノロジーの発展とともに急速に変容している。そのように流動性・多様性の高い知を捉え、行動に結び付け、共有し、さらに競争力のあるサービスに結び付けていくことは容易ではない。なかでも、価値に着目した取り組みへの期待は大きい。社会にはいろいろな価値が錯綜し、個々人や社会が自分のホームグラウンドや目標を定めることも大変困難になってきた。価値は暗黙性が高く、日常雑事の背後に埋もれてしまい、価値に気付くべき時には気づかず、かなりの時間が経過した事後になってはじめて気づくことも多い。個々人にとっても社会にとっても、他者の価値に気付かないことは視野を広げるチャンスを失うばかりではなく、争いの原因になりかねない。構成員が暗黙裡に共有している価値に気付かないことは社会にとってはチャンスを失うこととなり、大きな損失である。価値のある知であるほどその存在は暗黙的である。達人の知のように必ずしも明文化されない感覚として保有されている場合もあれば、多くの人が分散して有しており、集合知プロセスを働かせたときはじめて顕在化してくるものもある。そのような知をタイムリーに捉え、多くの人が理解できるように増幅し、共有可能にして、体系化し、コミュニティで再利用することを可能にするための強力な支援技術が必要である。

[これまでの取り組み]

知のプロセスを捉え、人工システム化する試みは60年以上前から人工知能研究で取り組まれてきている。これまでの人工知能研究で、記号化された知への取り組みについては、適用範囲と限界についてはかなり解明されてきたと言える。他方、社会に新たな価値をもたらす知の活用に取り組むためには、記号化される以前の主観的な段階の知（原初知）や、コミュニティの中に浅く広く分散する知（集合知）も視野に入れることが必要である。

価値に注目した本格的な科学技術の取り組みはまだ行われていない。知識マネジメントは、価値の共有と強化に関わるものであるが、ビジネス的価値とそのビジネスプロセスへの実装に焦点が置かれており、一般市民レベルは視野の外に置かれている。サービス工学は、サービス消費者の要望に応えるためのサービス提供の科学技術を目指したものであるが、そもそもサービス消費者自身が自分の価値をどのように構成し、発展させていくかというサービス消費者の

立場は所与のものとして位置づけられている。また、価値も人工物によって媒介される価値に焦点が置かれている。CSCW (Computer Supported Collaborative Work)分野では、組織における価値の長期的な醸成などソーシャルコンピューティングにおける価値の役割に注目した招待講演や研究発表が徐々に増えつつあり、基礎的な研究基盤が構築されつつある。

データサイエンスは、ネットワークの出現で利用可能になった膨大なデータ資源から価値を導出するという点で関わりが深い。主として所与の価値基準に基づくデータからの法則発見に重点が置かれ、価値そのもののダイナミズムの支援という観点は乏しい。人工知能研究は情報の知的処理に関わる研究分野であり、知のプロセスの背後にある価値とも関わりは深い。従来研究は「知能」により重点が置かれ、価値とより深く関わる「心」についての取り組みは少なかった。認知神経科学は価値に関わる脳機能解明という観点からはここでの提案の科学的基礎を与えるものとして位置づけられる。認知神経科学で得られつつある基盤の上での価値のダイナミズム支援のテクノロジー開発が本研究課題の中心的関心事となる。

原初知や集合知への取り組みは、ネットワーク上のビッグデータの活用、各種センサーとアクチュエータの普及、認知神経科学の進展によってはじめて可能になった。これらを統合して、原初知や集合知まで含めた知のプロセスを強化する情報技術への本格的な取り組みはまだ始まっていない。

#### [今後必要となる取組み]

人工知能研究での取り組みのように、基本的にすべての知のプロセスを人工システムによって実行することを目指す必要はない。人間と人工知能 (エージェント) の混在した、人間・エージェント・ハイブリッドコンピューティングの枠組みをとることにより、人工システムによるコンピューティングで視野に入らなかった感覚や価値など暗黙性の高い知の次元を視野に入れることが重要である。

原初知と集合知がどのように形成されるか解明し、そのプロセスを強化する情報技術の研究開発が望まれる。価値に注目した取り組みが有望であると考えられる。ヒューマンコンピューティングの枠組みの中から、インタラクションの中からの価値創出、集合知を用いた価値発見、実践知に焦点を当てた取り組みを総合するアプローチが有望であると考えられる。データに対して知的プロセスを適用すれば、価値が生まれ、逆にデータと価値を与えると、その価値を引き出すための知的プロセスが推定されるという図式を用いれば、ヒューマンコンピューティングにより、データの背後にある価値を顕在化させ、データからどのようにしてその価値を導出できるかを推定することで、知的プロセスに迫る。知的プロセスの適切性は、そのプロセスを新たなデータに適用し、価値を算出し、それを人間の判断と比較する。概ねこのような考え方で、知のプロセスを逆算することにより、価値への早期の気づきを捉え、相互に理解可能なものとし、互いの価値を調整して、サービスや社会システムに発展させていく価値のダイナミクスを支援する情報技術の研究開発を行う。価値の発見、増幅、共有、体系化、再利用に関わる既存の支援技術を統合して一つのシステムにまとめあげる統合的なアプローチをとる必要がある。

価値の発見支援: 属人性が高く、主観に依存した価値発見のプロセスそのものを顕在化させ、その支援技術を開発する。ワークショップの手法を用いて参加者の価値を顕在化させつつ、グループの価値を作り上げていくこと、抽象的な題材を具体化して参加者が当事者意識で議論に

参加できるようにすること、などが必要である。価値、および、その価値が顕在化する事例をセットにして蓄積する。

価値の増幅支援：ワークショップ討論を通して顕在化される参加者の暗黙的な価値表現を捉え、それを具体化し、具体的なイメージにして他者にもわかるようにする。参加者が暗黙裡に供した「価値を的確に言い当てる」技術の開発はチャレンジングであるが、本研究課題解決に有効である。

価値の共有支援：共感を呼ぶイメージ提示が価値の共有には不可欠である。第一人称視点による主観の共有を支援する。

価値の体系化支援：価値の客観的側面と主観的側面を整合させて、様々な視点からの価値を統合するプロセスを支援する。

価値の再利用支援：価値を事例から分離して、新しい事例に適用したとき、同様の価値が生じるようにする。

#### (4) 科学技術的・政策的課題

非常に挑戦的な課題であるが、実験室にこもって行う基礎研究には適していない。むしろ、具体的な題材を用いて実践的に取り組む中から、技術を確立し、広めていくとともに基礎を深化させていくというアプローチが必要である。確立された学術コミュニティの中でのトップジャーナルやトップカンファレンス論文数による評価方法とは異なる評価が必要である。

#### (5) 注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

##### [新たな技術動向]

非言語コミュニケーションまで視野に入れて人と人とのコミュニケーションの深部に立ち入った分析を行い、感性や知恵に迫ろうという取り組みが増えている。例えば、オノマトペ（擬音語）に注目した表現の解明<sup>1)</sup>、スキルサイエンスなどがある。藤波努らのスキルサイエンスプロジェクト<sup>2)</sup>は、身体に反映された知識の表現であるスキルに注目し、その解明に取り組んでいる。また、回想法という手法を用いた記憶と身体活動の関係の解明も興味深い。慶應義塾の諏訪正樹もからだメタ認知という手法を用いて身体に記憶された運動からの知の解明<sup>3)</sup>に取り組んでいる。最近になって、これが、ビッグデータに支えられた本格的な価値創造の取り組みに結びきつつある。

##### [注目すべきプロジェクト]

インタラクションからの暗黙知の発見については次のようなプロジェクトが注目される。MIT Media LabのCenter for Future Storytelling<sup>4)</sup>では、物語に着目して、コミュニティ、経験、創造性などに関わる知恵の増幅に取り組んでいる。Max Planck Institute for Human Cognitive and Brain Sciences<sup>5)</sup>では脳の認知機能の解明に取り組む有力な研究チームを擁している。柏野牧夫らのIIPI (Implicit Interpersonal Information)の研究<sup>6)</sup>では、人間同士の円滑なコミュニケーションに必要な不可欠なソーシャルシグナルとその認知プロセスとの関わりを詳細に分析している。開一夫らのグループでは、乳児の発達の過程に注目して教える／教えられることのできるペダゴジカルマシン<sup>7)</sup>の開発に取り組んでいる。石黒らの存在感メディアの研究<sup>8)</sup>では、人間の存在感を遠隔に伝える研究を通して、人間の持つ価値に迫ろうとしてい

る。メディアレベルでは、後藤真孝らの研究チーム<sup>9)</sup>が音楽を自動分析して打楽器、歌声、ビートなどさまざまな属性を取り出せるようにすることで、コンシューマにまで創造の範囲を広げようとしている。ヨーロッパでは、Bielefeld大学がCITECを2008年に設立し非言語コミュニケーションを中心に大掛かりに研究を展開している<sup>10)</sup>。

集合知に関しては、松尾豊らの研究グループが人工知能手法を幅広く使い、ネットワーク集合知の収集と活用の研究を進めている<sup>11)</sup>。

実践を交えた総合的な取り組み：

企業レベルでは、IBM ResearchがCognitive Computingを提唱し、人間の細やかな知性をデータとして捉え、活用できるようにすることを目指している<sup>12)</sup>。SAPもクラウドソーシングに力を入れている<sup>13)</sup>。

## (6) キーワード

- ・人工知能、ヒューマンコンピューティング
- ・人間・エージェント・インタラクション
- ・コミュニティコンピューティング、CSCW

## (7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↑	非言語コミュニケーション研究 <sup>11)78)</sup> 、スキルサイエンス <sup>2)3)</sup> 、認知神経科学 <sup>6)</sup> など実践的な取り組みは多い。
	応用研究・開発	○	→	先端的な取り組みとして相澤らの食べものに関するライフログ <sup>15)</sup> やよしもとロボット研究所 <sup>16)</sup> などもあるがまだ大きな流れは見当たらない。
	産業化	○	→	大きな潮流は見当たらない。
米国	基礎研究	◎	↑	CSCW <sup>17)</sup> などにおいて挑戦的な研究が見受けられるほか、MIT <sup>4)</sup> 、CMU <sup>18)</sup> 、IBM Research <sup>12)</sup> の本格的な研究がある。
	応用研究・開発	◎	↑	IBM Researchの研究 <sup>12)</sup> など具体的な応用への取り組みが発展していて、伸びている。
	産業化	◎	↑	IBM Research <sup>12)</sup> などの取り組みに見られるように、産業化を本来の動機になっている。
欧州	基礎研究	◎	↑	Max Planck Institute <sup>5)</sup> やBielefeld大学CITEC <sup>10)</sup> など

	応用研究 ・開発	○	→	Guide to ICT-related activities in Horizon 2020 <sup>14</sup> を見る限り、この方面への取り組み意識は低いように思われる。
	産業化	○	→	SAP <sup>13</sup> )などでも集合知を活用しようという取り組みはかなり行われている。
中国	基礎研究	△	→	CSCW <sup>17</sup> /CHI <sup>19</sup> /HCOMP <sup>20</sup> )などに顕著な成果／活動は見当たらない
	応用研究 ・開発	△	→	CSCW <sup>17</sup> /CHI <sup>19</sup> /HCOMP <sup>20</sup> )などに顕著な成果／活動は見当たらない
	産業化	△	→	顕著な成果／活動は見当たらない
韓国	基礎研究	△	→	CSCW <sup>17</sup> /CHI <sup>19</sup> /HCOMP <sup>20</sup> )などに顕著な成果／活動は見当たらない
	応用研究 ・開発	△	→	CSCW <sup>17</sup> /CHI <sup>19</sup> /HCOMP <sup>20</sup> )などに顕著な成果／活動は見当たらない
	産業化	△	→	顕著な成果／活動は見当たらない

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究のレベル

応用研究・開発フェーズ：研究・技術開発（プロトタイプの開発含む）のレベル

産業化フェーズ：量産技術・製品展開力のレベル

(註2) 現状

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、

△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド

↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向

## (8) 参考資料

- 1) 第27回人工知能学会全国大会オーナーガイドセッション『オノマトペの利活用：「オノマトペ」という視点から現象を読み解く』  
<http://www.tkomat-lab.com/jsai2013/index.html>
- 2) 北陸先端科学技術大学院大学 知識科学研究科 藤波努 教授  
<http://www.jaist.ac.jp/ks/portfolio/fujinami/>
- 3) 慶應義塾大学 諏訪正樹研究室  
<http://metacog.jp/>
- 4) MIT Media Lab. Center for Future Storytelling  
<http://cfs.media.mit.edu/research.html>

- 5) Max Plank Institute Human Cognitive and Brain Sciences  
[http://www.mpg.de/149614/kognition\\_neuro](http://www.mpg.de/149614/kognition_neuro)
- 6) 日本電信電話株式会社 コミュニケーション科学基礎研究所 柏野牧夫 上席特別研究員  
<http://www.brl.ntt.co.jp/people/kashino/kashino/Top%28Jp%29.html>
- 7) 東京大学大学院 総合文化研究科 広域システム科学系 開一夫研究室  
<https://ardbeg.c.u-tokyo.ac.jp/>
- 8) 株式会社国際電気通信基礎技術研究所 石黒浩特別研究所  
<http://www.geminoid.jp/ja/projects.html>
- 9) 国立研究開発法人産業技術総合研究所 情報技術研究部門 後藤真孝 主席研究員  
<https://staff.aist.go.jp/m.goto/index-j.html>
- 10) Bielefeld 大学 CITEC (the Cluster of Excellence Center in Cognitive Interactive Technology)  
<https://www.cit-ec.de/>
- 11) 東京大学大学院工学系研究科 技術経営戦略学専攻 松尾豊 特任准教授  
<http://ymatsuo.com/japanese/>
- 12) IBM Research Cognitive Computing  
<http://www.research.ibm.com/cognitive-computing/index.shtml#fbid=r7QukTLiXAd>
- 13) SAP Training and Certification Shop  
<https://training.sap.com/shop/crowdsourcing/>
- 14) Guide to ICT-related activities in Horizon 2020  
<https://ec.europa.eu/digital-agenda/node/68342>
- 15) CREST ”食”に関わるライフログ共有技術基盤  
<https://www.hal.t.u-tokyo.ac.jp/crest/>
- 16) よしもとロボット研究所  
<http://www.yoshimoto.co.jp/yrl/>
- 17) The ACM Conference on Computer Supported Cooperative Work and Social Computing (CSCW2016)  
<http://cscw.acm.org/2016/>
- 18) Carnegie Mellon Univ. Human-Computer Interaction Institute  
<http://www.hcii.cmu.edu/>
- 19) The ACM CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI2016)  
<http://chi2016.acm.org/>
- 20) Conference on Human Computation & Crowdsourcing (HCOMP2016)  
<http://www.humancomputation.com/2016/>

## 4. 3. 2 予測と発見の促進

### (1) テーマ名

予測と発見の促進

### (2) 概要

科学的発見<sup>1-8)</sup>は、科学の中核を成し、人類の遥かなる飛翔を支えてきた。科学者がある仮説を打ち出し、それが観測・実験データと矛盾するならば、その仮説は再構築を迫られる。科学的発見のプロセスとは、仮説作りと実験データによる反証という絶え間ない連鎖であり、知識発展サイクル（観測、仮説、予測、実験、観測、…）の繰返しにより仮説が洗練されていくプロセスである<sup>2,6,7)</sup>。そのプロセスを支える「予測・仮説発見の技術」は、自然科学における科学的発見のみならず、社会科学や人文科学にも適用可能であり、さらにはビジネスや日常生活の多くの場面でも活用できると期待されている。

### (3) 国内外における研究開発の動向

予想外の（偶然の）観測は科学的探究の出発点であり、思いがけない重要な発見や発明につながっている。科学的発見のプロセスにおいて、観測結果を説明するために仮説が導入され、この仮説は新たな予測を導き、その予測は検証実験によって確かめられる。そして、その検証実験における新しい観測によって、前の仮説は採択または棄却もしくは修正され、知識発展サイクルの繰返しにより仮説が洗練されていく<sup>2,6,7)</sup>。チャールズ・サンダース・パース（Charles Sanders Peirce: 1839-1914）によれば、推測による仮説生成は「アブダクション（abduction）」であり、仮説からの帰結計算は「演繹（deduction）」、そして実験による結果の検証は「帰納（induction）」とみなされ、科学的発見のプロセスの各段階において本質的な役割を果たしている<sup>3,7)</sup>。本節では、発見の科学哲学に関する歴史<sup>1-3,6,7)</sup>を概観した後に、予測と発見を加速する知のコンピューティング関連研究の潮流と国内外の動向について俯瞰する。

#### (3.1) 発見の科学哲学に関する歴史

演繹法は、科学者はまず仮説を立てたのち、それを立証または反証する科学的エビデンスを求める思考法である。例えば、最初に「この袋に入っている豆はすべて白い」という大前提（一般原則）を置き、次に、「これらの豆はこの袋から取り出された」という小前提（事実）を提示すると、「これらの豆は白いに違いない」という結論が導き出される。この思考法は、大前提から入って論理を進めて実際の結論を導く方法であり、フランスのルネ・デカルト（René Descartes: 1596-1650）によって提唱された<sup>1-3,6,7)</sup>。演繹法では、大前提が究極の森羅万象理論に基づくものなら、誤りのない結論が導き出される。

一方、帰納法では、個々の事象の観察結果（経験事実）からパターンを見出して、一般的な規則を導くことで、一般的な結論を導く。つまり、帰納法は小前提「こちらの豆も、あちらの豆も、この袋から取り出された」（個々の事実）と結論「取り出した豆はすべて白い」から大前提「この袋に入っている豆はすべて白い」（仮説）を想定する思考法である。個々の豆について、実際の色（個々の事象）を観察した後、その経験から得られた観察結果に基づいて類似点をまとめ上げることで、

大局的な仮説を推論するのである。取り出した豆がどれも白いなら、袋の中の豆はすべて白いと想定するのが自然であるが、1697年にオーストラリアで実際に発見された黒い白鳥（ブラック・スワン：白鳥と同じカモ目カモ科ハクチョウ属に分類される鳥類）のように、同じ種類に分類される黒い豆が発見されれば、この仮説は反証されることになる。この帰納法を最初に明確に説明したのは古代ギリシャの哲学者アリストテレス（Aristotelēs: 384 B.C.- 322 B.C.）とされているが、この方法論を一般に広めたのは、フランシス・ベーコン（Francis Bacon: 1561-1626）であり、19世紀にはジョン・スチュアート・ミル（John Stuart Mill: 1806-1873）によって「帰納主義」と呼ばれる手法が体系化された<sup>1-3,6,7</sup>。

アブダクション（仮説生成）は、個別の事象を最も適切に説明し得る仮説を提示する推論であり、帰納法と違って、事象間の因果関係の解明に重きを置いている。つまり、「この袋の中の豆はすべて白い」という規則を見出し、「これらの豆はすべて白い」という観察結果を説明するための仮説「これらの豆はこの袋から取り出されたはずである」を生成するのがアブダクションである。この用語を最初に用いたのは、チャールズ・サンダース・パースであると言われているが、その概念は古く、アリストテレスが *Prior Analytics* において三段論法形式で示したものが起源とされている。カール・ポパー（Karl Raimund Popper: 1902-1994）は、仮説は反証可能でなければならないとする「反証主義」の立場をとって、ジョン・スチュアート・ミルの「帰納主義」を批判した<sup>1-3,6,7</sup>。

### (3.2) 予測と発見を加速する知のコンピューティング関連研究の潮流と国内外の動向

科学的探究を自動化し、新たな科学的知識を発見できるような、知能機械を作る試みは、コンピューター出現の時点からあった。しかしながら、科学的発見に必要な不可欠なものは、デバイス・ハードウェア・ソフトウェア技術の協創的深化に誘われる情報科学技術の先進化である。このことを世に知らしめたのは、2000年代以降のビッグデータ利活用のながれ動きと近年の人工知能（AI）ブームの再来である。並列処理を行う画像チップ・グラフィックスプロセッシングユニット（GPU）の大量生産による価格低下によって並列計算コストが大幅に低下するとともに、2009年にアルゴリズムの改良によって深層学習（ディープラーニング）プログラムが GPU で高速処理できるようになったこと<sup>9</sup>は、知のコンピューティングを取り巻く計算環境の加速的な進化につながっている<sup>10</sup>。2009年に GPU を使うことでニューラルネットワークを並列に稼働させることができることを見出したのは、Andrew Ng が率いる米国スタンフォード大学の研究チーム<sup>9</sup>であり、ニューラルネットワークの新たな可能性を拓いたことは特筆すべきことである。Andrew Ng は、米グーグル基礎研究所 Google X でディープラーニング技術を開発してきたスタンフォード大学准教授であったが、2014年5月に中国のグーグルとも呼ばれる百度（Baidu）にヘッドハンティングされ、Baidu がシリコンバレーに新設した AI 研究所の初代所長に就任したことは驚くべき事実であった<sup>10</sup>。

1960年代に米国スタンフォード大学で開発された AI プログラム Dendral は、化学者が行うような判断と問題解決の過程を自動化することで、未知の有機化合物を質量分析法で分析し、有機化学の知識を使って特定した世界初のエキスパートシステムである<sup>11</sup>。そして、この流れを引き継いで、1976年に D. Lenat により、探索ヒューリスティックス（経験則）手法を組み込んだ Automated Mathematician (AM) プログラムが開発され、面白い新概念やそれらに関する興味深い推測の発見が試みられた<sup>12</sup>。しかしながら、素数の概念のような興味深い新しい概念を発見するのにかなり高い能力を AM プログラムは示したものの、あらかじめ用意できるヒューリスティックスと発見でき

る規則の数は限定的であった。また、1977年から、P. Langleyらにより、多数の数値データの中から不変数を発見するBACONプログラムの開発が始まり、古典物理学(Keplerの第3法則、Ohmの法則、Galileoの落体の法則等)の再発見が行われた<sup>13)</sup>。その後、2000年代に入り、能動学習やアブダクション等の機械学習の進歩を背景にして、2009年には、英国のR. D. Kingらにより、AIロボット科学者Adamが、初期段階の薬剤設計(遺伝子とその機能の関係を調べる機能ゲノミクス)の自動化を目的として設計され、酵母の酵素に関する未解決問題に挑戦した<sup>14)</sup>。その後、新薬発見プロセスを迅速化するとともに、より経済的に行うために、後継機のAIロボット科学者Eveが開発され、生化学実験の仮説生成、実験計画作成、実験遂行に至る発見プロセスを具現化し、知識発展サイクルを繰り返す自動化ハイスループット仮説主導の研究開発が進められている[14]。また、同年(2009年)には、米国コーネル大学H. Lipsonのグループが物理現象(振り子の運動)観測によって物理法則(運動量保存の法則とニュートンの運動の第2法則)を自動的に導き出す実験を行っている<sup>15)</sup>。

発見科学(Discovery Science)という言葉は、有川節夫(九州大学)を代表とするチーム型の科研費重点領域研究「巨大学術社会情報からの知識発見に関する基礎研究」(1998-2001)の略称として使われたのが最初である<sup>4,5)</sup>。研究開始の初年度からDiscovery Scienceに関する国際会議を先導的研究活動の一環として立ち上げて、発見科学のムーブメントを起し、今まで毎年、世界各地でDiscovery Science国際会議が開催されている。このさきがけとなったチーム型研究の最終報告書はSpringerのLecture Noteシリーズから、「Progress in Discovery Science: Final Report of the Japanese Discovery Science Project (Springer, 2002/3/6)」として出版されている<sup>5)</sup>。そして、「情報洪水時代におけるアクティブマイニングの実現」(2001-2004年度特定領域研究:代表・元田浩)、「ITの深化の基盤を拓く情報学研究」(2001-2005年度特定領域研究:代表・安西祐一郎)、「情報爆発時代に向けた新しいIT基盤技術の研究」(2005-2010年度特定領域研究:代表・喜連川優)が戦略的に立ち上がり、2007年1月のJST-CRDSワークショップ「予測と発見-大規模情報からの『知識』獲得技術-」を経て、その後のFIRST喜連川プロジェクト「超巨大データベース時代に向けた最高速データベースエンジンの開発と当該エンジンを核とする戦略的社会サービスの実証・評価」(2009-2013年度最先端研究開発支援(FIRST)プログラム)につながっていった。そして、2015年5月には、経済産業省が主導して、産業技術総合研究所にAI研究センターが設立され、2016年には文部科学省が主導して理化学研究所にAIなどの統合研究開発拠点AIP(Advanced Integrated Intelligence Platform Project)センターが設立されることが決まっており、日本の情報学を中心とする発見科学が加速されるものと期待されている。

一方、AI研究を先導してきた米国でも、米国Obama大統領が”Big Data Research and Development Initiative”を宣言した2012年を契機に、発見情報学(Discovery Informatics)に関するムーブメントが米国を起点として起きており、発見情報学に関するワークショップやシンポジウムが毎年開催されるようになった<sup>16,17)</sup>。この動きは、コンピューティングにおける進歩が科学と工学のほとんどすべての領域を変容していることを再認識した結果であり、新しい発見の探究はコンピューティングのすべての領域を横断したイノベーションをもたらしていることを鑑みた動きである。彼らは、入手可能なビッグデータから洞察を得るために直面している能力の限界をビッグデータ研究の観点から再考することで、コンピューティングにおける共生的な進歩を通して限界に対処せざるを得ない状況にあると考えている。米国発の発見情報学は、前例のない複雑さを有するデー

タの本質を理解し洞察を得るための人間の能力を、適切な知的支援と自動化によって大いに高めることを目指している<sup>16,17)</sup>。

また、科学的発見に「集合知」で挑む動きがある。2013年6月に、G8科学担当大臣らによる科学研究データのオープン化に関する声明があり、その機運がますます高まってきた。オープンサイエンスのような動きは、「サイエンス 2.0」<sup>18)</sup>や「シチズンサイエンス」<sup>19)</sup>のような形で自然に出てきている。2007年には、英国オックスフォード大学でスタートしたオンラインプロジェクト Galaxy Zoo は、インターネット上で銀河の画像を分類するボランティア参加型プロジェクトであった<sup>20)</sup>。Galaxy Zoo には、20万人以上のボランティアが参加して、天文学者がハッブル望遠鏡で撮影した銀河の画像を鑑賞しつつ分類することで銀河研究を支援しており、100万枚の画像を分類し、天文学者による銀河形成に関する探査的研究を助けた<sup>21)</sup>。これらの成果は、渦状のアームや銀河中心のふくらみなど画像中の形の特徴を読み取り分類する能力に関して、人間はコンピューターよりもはるかに優れていることを示している。2008年、米国ワシントン大学の David Baker 教授ら、「タンパク質折り畳み」問題（化学的に安定した最低エネルギー構造の特定）にパズルゲーム感覚でチャレンジし、折り畳みの優劣を競い合う無料プログラム Foldit を発表した<sup>22)</sup>。タンパク質が取り得る形状は無数にあり、コンピューターによるシミュレーションでは膨大な時間がかかることから、「タンパク質折り畳み」問題は、科学における最も重要な未解決問題のうちの1つであると言われてきたが、Foldit 参加者（ゲームプレイヤー）は、人間の直感力（パターン認識能力）を活かしながら、マウスを使って得点が高い（エネルギー的により安定な）タンパク質構造を競い合って作ってゆくことでタンパク質構造予測に携わり、科学者が10年かかっても解けなかった難問題（HIV 治療薬を開発するために必要な酵素の構造解析）を3週間で解くことに成功した<sup>22)</sup>ことは驚きであった。また、2010年には、米国 Kaggle 社は、複雑なビッグデータ問題に取り組めるデータサイエンティストを

ソーシャルネットワーク的手法で世界中から集めて競争させるアウトソースサービスを開始した<sup>23)</sup>。データ所有者は予測問題とデータを提供し、データ解析コンペティションにて、複数のデータサイエンティストに予測モデル構築を依頼し、賞金を提示することで、コンペ参加者同士を競い合わせ、最も精度の良い予測モデルやアルゴリズムを提案させるのである。代表的事例である入院患者の予測コンペでは、過去の患者のデータを分析し、近々入院が予測される患者を早めにケアすることで、緊急入院数を減少させ医療コストを削減させた。日本国内でも、2013年にインフォコム社が主催する、日本初の懸賞金モデルによるデータ解析クラウドソーシングサイト CrowdSolving がサービスを開始し、数論的ロジックから導かれる数値予測、ヒトインフルエンザウイルスの株予測など多くの実績を重ねている<sup>24)</sup>。

#### (4) 科学技術的・政策的課題

##### ● コンピューターによる科学的発見のプロセスの問題点

コンピューターによる科学的発見のプロセスには、次のような賛否両論の問題点<sup>8)</sup>がある。科学的発見のプロセスに「科学的直感」や「セレンディピティ」が大事であり、正しい問いの立て方が重要であるけれども、現在のコンピューターには実現できないのではないか！？という否定的な意見がある。一方では、すべての問いを網羅的に立てれば、その中には正しい問いが入っているので、仮説検証を網羅的に行うことで、コンピューターにも科学的発見

が可能であるという肯定的な意見もある。コンピューターによる科学的発見が可能であることを実証するには、大規模な仮説生成と超高速・高精度の反証・検証サイクルの実現が必要不可欠であり、演繹的かつ知識集約型の学問領域における予測・発見を加速するには、体系的な知識の集約<sup>1-8,16,17)</sup>が科学的発見の礎となる。これを実現するには、米国 IBM のコグニティブ（認知）システム（Watson）開発のような、グランドチャレンジが必要不可欠である。

- オープンサイエンスによる科学的発見と科学研究データのオープン化

科学的発見に「集合知」で挑むには、科学研究データのオープン化が重要であり、オープンアクセスを、電子ジャーナルの価格高騰の文脈で考えるだけでなく、オープンアクセスに関する課題を学問的にもきちんと考える必要がある。科学研究データのオープン化の動きとともに自然に出てきたオープンサイエンス（サイエンス 2.0、シチズンサイエンス）の動きを、発見科学の観点から考えてみれば、データがオープンになっていることによって、市民を巻き込み、想定外の発見につながっていくことが期待される。これは科学の分野だけではなく、日本の古典文学の分野においても起こりえることである。例えば、国文学研究資料館における画像データベースがオープン化されることにより、市民の中でも国文学に非常に興味を持った人々によるシチズンサイエンス的な国文学研究に発展し、想定外の面白い発見につながっていくものと期待される。

### (5) 注目動向（新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など）

- IBM コグニティブ・サービスの世界展開 ～IBM Watson と脳型チップ SyNAPSE～

米国 IBM が開発したコグニティブ（認知）システム（Watson）は、2011年2月16日に米国の人気クイズ番組「Jeopardy!」に出場してクイズ王を破ったことで一躍有名になった<sup>25)</sup>。その後、人間の知的活動に関わる様々な機能や、音声認識や画像の理解へも Watson が対応可能となり、質疑応答（コールセンターでのエンドユーザーと対話）、創造的発見（新しい創薬の発見、薬の副作用の予測）、判断支援（癌診断支援や電子カルテアドバイザー、保険約款の内容と事故の内容判断、）等に利用できるように開発が進められている<sup>25,26)</sup>。また、Watson の質疑応答システムの中核アーキテクチャーを多言語化することで、Watson の日本語版やポルトガル語版の開発も行われ、IBM コグニティブ・サービスの世界展開が進められている。また、同社は、2014年夏に発表した脳型チップ「SyNAPSE」（開発コード名は TrueNorth；ネズミ並みの数のニューロンとシナプスを備えた非ノイマン型プロセッサ）の実用化に向けて、そのハードウェアとソフトウェアの開発環境を公開することで、SyNAPSE の普及活動を積極的に始めている。SyNAPSE の最大の強みは、画像認識や音声認識といった高度なパターン認識を極めて低い消費電力（約 0.07W/chip）で実行できる点であり、IoT 等のセンサーネットワーク末端におけるエッジコンピューティングに向けた用途開発の加速が目的である<sup>27)</sup>。現在、スイスの大学 ETH Zürich が中心とする研究チームが、自然言語解析アルゴリズムを SyNAPSE に実装する研究を開始するとともに、感情を解析する機能についても研究を開始している<sup>27)</sup>。

- グーグルのディープニューラルネットワーク技術と強化学習の進化と深化

米国のグーグルやフェイスブックは、ディープラーニング技術が画像認識やパターン認識

に非常に優れていることを証明するとともに、「神秘的な囲碁」に対する先導的な AI 研究を通して、ディープラーニングが AI にもたらす非常に多くの可能性 (ディープニューラルネットワーク技術、ある言語から別の言語への翻訳技術、人間の話し言葉 (自然言語) の意味理解等) を探っているとされている<sup>28)</sup>。Google が 2014 年 1 月に買収した英国の人工知能スタートアップ企業 DeepMind は、ディープラーニングと強化学習を用いた手法を使って囲碁の局面を評価する新しい手法を確立し、従来のモンテカルロ木探索の手法と組み合わせることで、AI 囲碁プログラム AlphaGo を開発した<sup>28-31)</sup>。この AlphaGo は既存の AI 囲碁プログラム (フランスの Crazy Stone や日本チーム DeepZen が開発した Zen) に 99.8% 勝つ<sup>30)</sup>とともに、囲碁ヨーロッパチャンピオンのプロ棋士に 5 連勝した後、2016 年 3 月には、世界最強のイ・セドル棋士に 4 勝 1 敗の成績で歴史的な勝利をしたことは驚くべきことであった。DeepMind の研究者たちは、イ・セドル棋士との世紀の対戦の前に、ディープラーニングを使って AlphaGo を訓練し、ある種の「知性」に持たせることで本番の戦いに挑んだのである<sup>28-31)</sup>。このようなアプローチは、結果の予測が難しく神秘的であると言われる囲碁において、良い手とはどんなふうに見えるものかを AI 囲碁システムが「学習する」という点で、計算パワーに頼った「しらみつぶしの手法」とは大きく異なっており、「予測・仮説発見の技術」の次の方向性を示唆しているかもしれない。

- 日本のオールジャパン的 AI 研究の挑戦

日本では、2015 年 5 月に、経済産業省が主導して、産業技術総合研究所に AI 研究センターが設立され、2016 年には文部科学省が主導して理化学研究所に AI などの統合研究開発拠点 AIP (Advanced Integrated Intelligence Platform Project) センターが設立される。AIP センターでは、同省が推進する「人工知能/ビッグデータ/IoT/サイバーセキュリティ統合プロジェクト」の中核となる革新的な研究や実証・実用化のための次世代基礎技術を大学等と連携しながら研究開発が遂行されるとともに、様々な人工知能・機械学習・ビッグデータ解析等の技術を組み合わせることで、革新的で高度な「統合プラットフォーム」を実現することを目指しており、2016 年は日本の AI 研究基盤元年となると期待されている。

## (6) キーワード

科学的発見、予測、仮説生成、帰納、演繹、直感、セレンディピティ、人工知能、集合知、ディープラーニング、強化学習

## (7) 参考資料

- 1) K. R. ポパー (著), 大内義一 (訳), 森博 (訳), 科学的発見の論理 上 (恒星社厚生閣, 1971).
- 2) N. R. ハンソン (著), 村上 陽一郎 (訳), 科学的発見のパターン (講談社, 1986).
- 3) 米盛裕二, アブダクション—仮説と発見の論理 (勁草書房, 2007).
- 4) 森下真一, 宮野悟 (共編), 発見科学とデータマイニング (共立出版, 2001).
- 5) S. Arikawa and A. Shinohara (eds.), Progress in Discovery Science: Final Report of the Japanese Discovery Science Project (Lecture Notes in Computer Science / Lecture Notes in Artificial Intelligence) (Springer, 2002).
- 6) 井上克巳, アブダクションとインダクション, 人工知能学会誌 25 (2010) 389.
- 7) 井上克巳, 人工知能による科学的発見, 電子情報通信学会誌 98 (2015) 35.
- 8) 北野宏明, 人工知能がノーベル賞を獲る日, そして人類の未来 —究極のグランドチャレンジがもたらすもの—, 人工知能 31 (2016) 275.

- 9) R. Raina, A. Madhavan, and A. Y. Ng, "Large-scale Deep Unsupervised Learning using Graphics Processors" in Proceedings of the 26th Annual International Conference on Machine Learning, ICML '09 (New York, 2009) 873.
- 10) ケビン・ケリー, "コグニファイ: なぜぼくらに AI が必要なのか", WIRED VOL.20, GQ JAPAN 2016 年 1 月号増刊 (AI 特集) 号 (コンデナスト・ジャパン, 2015) 16.
- 11) R. K. Lindsay et al., Applications of Artificial Intelligence for Organic Chemistry: The Dendral Project, (McGraw-Hill, 1980).
- 12) D. B. Lenat, "The Ubiquity of Discovery (Computers and Thought Lecture)", IJCAI PDF (1977) 1093.
- 13) P. Langley et al., Scientific Discovery: Computational Explorations of the Creative Process (The MIT Press, 1987).
- 14) R. D. King et al., "Make Way for Robot Scientists", Science 325 (5943) 945.
- 15) M. Schmidt and H. Lipson, "Distilling Free-Form Natural Laws from Experimental Data", Science 324 (2009) 81.
- 16) Y. Gil and H. Hirsh (eds.), 2012 NSF Workshop Report (Arlington, VA, February 2-3 2012). Available from <http://www.discoveryinformaticsinitiative.org/diw2012>.
- 17) Y. Gil and H. Hirsh, "Discovery Informatics: AI Opportunities in Scientific Discovery", AAAI Fall Symposium on Discovery Informatics: The Role of AI Research in Innovating Scientific Processes (Arlington, Virginia, 2012).
- 18) B. Shneiderman, "Science 2.0", Science 319 (2008) 1349.
- 19) R. Bonney et al., "Citizen Science: A Developing Tool for Expanding Science Knowledge and Scientific Literacy", Bioscience 59 (2009) 977. ; H. Rosner, "Data on Wings" Scientific American 308 (2013) 68.
- 20) M. Nielsen, Reinventing Discovery: The New Era of Networked Science, (Princeton Univ. Pr., 2011).
- 21) K. Land, et al., "Galaxy Zoo: The large-scale spin statistics of spiral galaxies in the Sloan Digital Sky Survey", Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 388 (2008) 1688.
- 22) F. Khatib, F. Dimairo, Foldit Contenders Group, Foldit Void Crushers Group, S. Cooper, et al., "Crystal structure of a monomeric retroviral protease solved by protein folding game players". Nature Structural & Molecular Biology 18 (2011) 1175.
- 23) 米国 Kaggle 社ホームページ <https://www.kaggle.com/>
- 24) 日本初のデータ解析クラウドソーシング (データ分析・予測モデル作成コンペ) マッチングサイト <https://crowdsolving.jp/>
- 25) D. Ferrucci et al., "Watson: Beyond Jeopardy!", Artificial Intelligence 199-200 (2013) 93.
- 26) S. Spangler et al., "Automated hypothesis generation based on mining scientific literature", Proceedings of the ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (New York, 2014) 1877.
- 27) Hot News "IBMが脳型チップ普及に本腰 ハードとソフトの開発環境公開-エッジコンピューティングに向けて用途開発を加速" 日経エレクトロニクス 2015/10 号 pp.18-19.
- 28) Wired 日本語版ニュース (2016.1.1), グーグルらが人工知能で「囲碁の謎」に挑む理由 <http://wired.jp/2016/01/01/mystery-of-go/>
- 29) Wired 日本語版ニュース (2016.3.16), AlphaGo とイ・セドルが、囲碁にもたらしたもの、AI にもたらしたもの <http://wired.jp/2016/03/16/final-round/>
- 30) D. Silver et al., "Mastering the game of Go with deep neural networks and tree search", Nature 529 (2016) 484.
- 31) 伊藤毅志, 村松 正和, ディープラーニングを用いたコンピュータ囲碁 ~AlphaGo の技術と展望~, 情報処理 57 (2006) 335.

### 4. 3. 3 知のアクチュエーションとプラットフォーム

#### (1) テーマ名

知のアクチュエーションとプラットフォーム

#### (2) 概要

人類の将来を見据えて、知の発見、創造、集積、伝搬、探索、影響などを通じて社会的な価値を最大化するための合意形成や紛争解決ができる系や場の理解とデザイン・構成するための技術及びそのための社会エコシステム・プラットフォーム

#### (3) 国内外における研究開発の動向

ソーシャルネットワークやスマートフォンの爆発的な普及によって、日常的な人間同士のインタラクションの質に変化が現れている。我々が日常的に使っている古典的な社会システムは、ソーシャルネットワークやスマートフォンのない時代のインタラクションに基づいた仕組みである。集合的知性としての昆虫や魚の群れは、そのインタラクションの方法を含んだ全体的なシステムとして優位に進化した結果と言われている。人間社会にも新しいインタラクションを導入することで集合的知性を促進する新しい社会システムを構築できる可能性が広がっている。

人間の集合的知性を情報技術によって促進するための方法論や概念を提供するのがマルチエージェントシステム研究である。マルチエージェントシステム研究は、主に社会の知性の本質を探りながら、新しい社会システムの可能性を探っている。分散人工知能を中心として、シミュレーション、ロボティクス、ゲーム理論といった学際的な研究が展開されている。

##### 【交渉と合意形成】

マルチエージェントシステム研究<sup>1)</sup>における重要な課題として、複数のエージェント（知的な主体）が、いかに交渉し、より良い合意を形成するか、という交渉とその機構に関する課題がある。社会において個人合理性を持つエージェントが協調作業をするためには、個々の利益や効用を最大化しながら、社会やグループの利益も最大化できるように合意を得る必要がある。交渉というインタラクションは、多数のエージェントから構成される社会などの分散環境かつ利益が競合する状況で本質的に不可欠な要素であり、マルチエージェントシステム研究では必ず考慮する必要がある。したがって、これまで、エージェント間の交渉プロトコル／交渉メカニズムの設計、個々のエージェントの交渉戦略の設計、交渉問題そのものの設計、交渉結果の評価手法、学習機構など、多くの研究が展開されてきた。

交渉についての研究として、代表的なものとして、米国カーネギーメロン大（CMU）の Professor Katia Sycara の労働紛争をシミュレートする PERSUADER に関する一連の研究<sup>2)</sup>がある。PERSUADER は、紛争に関する蓄積された事例に基づく事例ベース推論<sup>3)</sup>と多属性効用理論<sup>4)</sup>により、合意形成や説得のプロセスを自動的にシミュレートするシステムとして提案されている。非協力的なマルチエージェントシステムの一つとして多くの影響を与えた研究である。現在の Argumentation（討論）による交渉や Utility（効用）に基づく（ゲ

ーム理論に基づく）交渉の起源になった研究であり、マルチエージェントの合意形成に関する研究に多大な影響を与えている。

マルチエージェント研究では、エージェントが出会い、交渉し、合意形成し、そしてグループで協調するという、大きな協調に達するまでのプロセスを想定し、プロセスの個々の要素について研究が細分化されていった。エージェントの出会いや交渉については、効用理論やゲーム理論によって分析され<sup>5)</sup>、さらに自動交渉<sup>52,53,54)</sup>という研究に発展した。

#### 【チームワーク】

合意形成を行った後に、いかにして資源を分配するか、そしてグループとして活動するかというモデルについても、提携ゲームの理論やチームワークに関する研究によって行われた。特に、チームワークに関する研究は南カリフォルニア大学の Milind Tambe 教授によって確立されている。Tambe 教授は、共同意図（Joint Intention）モデルに基づいて各エージェントが共同のゴールを持つ。そして、共同のゴールとは別に、個々にはローカルなゴールを持ち得るような階層型のゴールプランのモデル STEAM<sup>6)</sup>を示した。Tambe 教授はプロダクションシステム SOAR を用い、ソフトウェア実装を示すことでその効果を示している。すなわち、エージェントは、互いに交渉することで合意に達し、合意を得た後はチームとして協調的に行動する一連のプロセスの個々の方式はそれぞれについて研究され、それぞれについて成果が上がっている。

#### 【オークション、マッチング】

マルチエージェントシステムの研究<sup>35)</sup>では、その後、ゲーム理論や数理経済学の理論が多く導入され、オークション理論やメカニズムデザイン理論に多くの影響を与えた。特に、オークション理論やメカニズムデザイン理論などの古典的な経済理論（新古典派経済理論）における計算量や情報の取り扱いなど情報科学的な観点を取り入れることでこれまでにはない計算論的メカニズムデザイン<sup>7,33)</sup>、アルゴリズムックゲーム理論<sup>8)</sup>、計算論的社会選択理論<sup>34)</sup>という新しい分野を開拓している。これらの理論は、腎臓の移植ネットワークの交換プロトコルや Google の電子広告オークションの理論<sup>9)</sup>などを説明する具体的な理論となっている。最近の展開としては、人間の社会の状況を実際にゲーム理論の 1 場面（スタッセルブルグゲームと呼ばれる）として定式化し、その理論的均衡点を元に、空港や野生生物保護のための警備員の監視スケジューリングの最適化が行われている<sup>10)</sup>。マルチエージェントシステムの研究は、社会そのものを対象にしているため、インターネットの普及とスマホによって多くの人が計算機パワーを自然に所有することで、これまではシミュレーションだけにとどまっていたような内容が、実世界において実際に効果的に働くようになっている。

#### 【グループウェア、Computer Supported Cooperative Work (CSCW)】

グループウェア及び CSCW の研究分野では、いかに計算機とそのネットワークが人々の協調作業を支援できるかという点について極めて多くの研究が行われてきた。ほぼ最近までの傾向は、人々の協調作業は Face-to-Face に勝る方法はなく、顔を見合わせ、膝を突き合わせて行うのが最適であり、どうにかして、計算機を用いて最適もしくは準最適なレベルの支

援を提供しようとしてきた。一方、近年、ほとんどの人々がスマホを持ち、常時ネットワークに接続しているような状況では、Face-to-Face とは異なるネットワーク越しのコミュニケーションの仕方が確実に進化している。つまり、Face-to-Face が良いかネットワーク越しのコミュニケーションが良いかという比較ではなく、むしろ相補的なコミュニケーション手段として確立している。

グループウェア・CSCW の研究の一つとしてグループ意思決定支援システムがあった。グループでの意思決定を様々な情報ツールを提供することで支援するシステムである。グループでの意思決定では、意思決定における代替案の作成や代替案の選択が重要であるとされ、代替案の作成のフェーズではブレインストーミングのような発想支援の手法が用いられた。例えば KJ 法などの発想技法や創造技法も広く研究され、計算機ネットワークを用いた手法も多く提案された。他にも、複雑な問題を議論・討議することを支援するツールとして、古典的には gIBIS という意思決定支援ツール<sup>11)</sup>も開発されている。これは、ワークショップの対話のファシリテーションの技法の一つとして課題をベースに捉え木構造にまとめる IBIS (Issue based information systems) method という方法をグラフィカルに表現するシステムである。この考え方は、wicked な (複雑な) 問題を議論を通して整理する場合に Issue (課題・論点) をベースに構造化することで、問題の本質を構造化し共有するための枠組みである。

代替案の選択はすなわちグループでの合意を形成することである。一般には投票方式などが広く採用された。しかし、投票方式を使えば民主的に決められるというのは一般的な誤解であり、Arrow の一般不可能性定理<sup>12)</sup>などに代表されるように理論的には民主的とされる条件を満たすことのできる投票方式は存在しないことが証明されている。認定投票方式など、意見の分布を概観するには利用できるが、投票だけによって決めてしまう方式は、決め方としては理論的には避ける必要がある。

グループウェア・CSCW の分野と産業組織論などの分野で注目すべき古典的研究成果として Tomas Malone 教授の「Future of Work」<sup>13)</sup>がある。計算機ネットワークを前提とした時、将来の組織や人間の働き方はよりフラットで自律分散的になることを 2000 年前後に予見している。このビジョンは様々な方面に影響を与えており、実際現在の社会のあり方はビジョンに向けて進んでいる。Face-to-Face ではない協調作業のあり方を検討する必要がある。その意味では古典的ではあるが MIT の Pattie Maes 博士のソフトウェアエージェントによる間接操作性<sup>14)</sup>がある。ヒューマンインターフェースがデスクトップを代表とするように直接操作性を追求したものが標準であるが、ソフトウェアエージェントのある程度の自律性により、グループでの意思決定 (例えば会議スケジューリングなど) を含めた活動や作業をある程度自動化することが今後本格的に実現される。

エージェントによって、グループ意思決定支援における合意形成支援をしようという研究<sup>15)</sup>も行われている。例えば、ある意思決定問題に対するそれぞれの参加者の好みや重み付けを階層意思決定法という構造によって表現し、この構造を用いてエージェントが自律的に合意案を発見支援するという方式が提案されている。ポイントは、人間の好みを構造化することでエージェントによる自律的な交渉や合意支援が可能になる。

最近では、ワークショップやハッカソンのようなグループワークによる議論の方法の効果

が広く認識されている。ワークショップでは、Diversity に富んだ人間のグループを集め、アイデアの発想、集約、及び合意形成というようなプロセスにより、発想に富む新しいアイデアを創造していくことをねらいとしている。特に、ファシリテーションとその技法の重要性が高まっている。インターネットを使った大規模なグループワークや議論のファシリテーションの方法やその支援技術は現在研究が行われている。さらに、上記のエージェントによるファシリテーションの支援が重要である。

#### 【ソーシャルコンピューティング】

一方、ソーシャルコンピューティングに関しては、The Wisdom of Crowds<sup>16)</sup>など群衆 (Crowd) を対象としたアイデアや意見の収集や集約手法が研究されビジネスにも応用されている。例えば、InnoCentive は、これまでは解くことのできなかった課題に対して解決方法のアイデアを収集するプラットフォームであり、すでに広く利用されており 25 万人以上の登録者がいる。インターネット上で、課題を投稿し、その解決方法を収集する。InnoCentive はクラウドソーシング (Crowdsourcing) の実現例の一つであり、大衆からの課題解決のアイデアをインターネットで広く集めることに成功している。クラウドソーシングはすでに実用段階にあり、特にアメリカでは非常に多くの応用領域や方法についてベンチャー企業を中心に様々な試みがなされている。

MIT の Pentland 教授らは、ソーシャル物理学 (Social Physics) と呼ばれる研究を立ち上げている<sup>17)</sup>。そこでは社会ネットワークをベースにして、人間のグループの振る舞いの分析、構築、誘導などを行っている。特に、DARPA のネットワークチャレンジでは、米国全土のどこかに配置された気象用の赤いバルーン 10 個をインターネットなどを最大限に活用して、それぞれの位置を正確に報告するという競技が行われた。Pentland 教授のチームでは、社会ネットワークにおけるつながりに基づいた報酬の与え方 (インセンティブメカニズム) を工夫することで約 8 時間で全てのバルーンを発見し、優勝を収めている<sup>18)</sup>。彼らのインセンティブメカニズムは、バルーンを見つけた人だけでなくその社会ネットワーク上の繋がりにも報酬を与えるというものであった。

以上のように社会ネットワークの振る舞いは、古典的な経済的合理人としての人間の捉え方よりもより現実に即していることが少しずつ分かってきている。つまり、近年の意思決定や経済学では人間はそれぞれ独立に価値を持ち自己利益最大化するような決定を行うというモデルが支配的であったが、社会ネットワークを前提にした場合、人間の意思決定は必ずしもそのような振る舞いをしないことが分かってきている。社会ネットワーク上で、人間のグループや集団の意思決定を適切に支援するためには、社会ネットワーク上の関係を観点に入れた人間の振る舞いの行動モデルや方法論が必要になる。

ソーシャルコンピューティングの概念によってワークショップや発想支援を行うモデルの一つとして MIT の Collaboratorium<sup>19,20)</sup>がある。ここでは、気候変動に関する課題とその解決方法をオンラインでクラウドソースの形で集め、集約している。さらに興味深いのは毎年、物理的な会議を開催し Collaboratorium で気候変動に関する話題について Face-to-Face で議論を行っている。オンラインとオフラインのワークショップを継続的に行っている一例である。Deliberatorium<sup>21)</sup>は Collaboratorium のオンラインの議論についてさらに構造化し

た討論方式でパブリックな意見を集約するのに使われている。

政治学では、熟議に基づく民主主義を実現する方法として **Deliberative Poll** という手法の有効性が認識され始めている<sup>22)</sup>。一般的に、世論調査 (Poll) では、サンプリングした対象者に対するアンケートを集約しそれを元に世論を分析する。それに対して **Deliberative Poll** では、サンプリングした対象者を集め課題に関する議論をし、持ち帰らせる。そしてしばらくしてからさらにアンケートを収集する。このように単にアンケートを取るだけでなく、間に議論や討論を挟むことによって、参加者自身やそのグループが課題そのものを学習することを促し、アンケートによる政治的意見の分布に明確な差が現れるようになる。単に投票をするだけでなく、対象者に課題について深く考えそして議論をすることで組織としての学習が進むという効果が期待され、次世代の民主主義の一形態である熟議型民主主義として注目されている。**Deliberative Poll** では必ずしもネットワークを用いた合意形成までを想定しているわけではない。

また、MIT の **Thomas Malone** 教授のグループは、人間のグループとしての知的活動についての集合的知性 (**Collective Intelligence**) のファクターが存在することを実験的に示している<sup>23)</sup>。人間がグループとして問題解決をするときには、個々の参加者が持つ能力以上の知性 (集合的知性) が発揮されていることが示されている。また、社会性を持つ動物の群れ (例えば小型の魚の群れやヒヒの群れ) における合意形成の仕組みも生物学的に解明されつつある<sup>50)</sup>。センサー技術の発達により、個々の動物のトラッキングがより正確に、より広範囲かつ継続的に行うことができるようになったためである。人間の社会ネットワーク分析にも応用されている。

以上のように、インターネット上で動作するプログラムとしてのエージェントの合意形成機構と、人間の社会ネットワークを介した合意形成の仕組みを融合することで、人間の合意形成を支援できるような仕組みが構築できる。これは、インターネットを常時利用している人類の社会ネットワーク上の新しい合意形成の仕組みとなることが期待出来る。

#### (4) 科学技術的・政策的課題

- 自由や民主主義に関する社会的な理解 (知識の欠如)
- 先端技術と生々しい現場の乖離
- 現実の大部分の問題は複雑な問題 (解けない問題) に属するのに対して、学術的な貢献が解ける問題に対する解法に比重が高く集まる点
- 人間の価値観の数式化 (技術的なボトルネック)
- 数式化は最低限の価値観であれば可能で、その場合は最低限の場合のあるべき解を示すことは可能
- それでも人間の意思決定の連鎖による合意がどこに向かうかを予測するためには、社会ネットワーク全体の分析も必要

## (5) 注目動向(新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など)

### (a) オンライン大規模意見集約

MIT Center for Collective Intelligence (CCI) のプロジェクト Deliberatorium<sup>21)</sup>がある。ここでは、インターネットを使った大規模な議論や協議を支援し、大規模な意見共有を可能にするツールが構築されつつある。このプロジェクトでは、大規模な意見の共有を目指して、議論の論理的構造（議論マップ）を構築するシステムを開発している。議論を議論マップという構造を用いているため、強い構造化による議論支援と言える。議論マップでは、Argumentation tools と呼ばれる議論構造化理論に基づき、参加者の意見を主張、賛成反対、および問題提起などに分類することで、議論の構造を明確化する。意見集約は完全に構造化した議論マップ上で行い、分類により投稿内容を組み立てていく必要がある。そのため参加者に負荷を強いるという問題がある。

さらに MIT CCI は、地球温暖化問題に焦点を当てて、解決プランを協議するシステムとして The ClimateCoLab というシステムを構築している<sup>19,20)</sup>。本システムでも、Argumentation Map を利用して意見の整理を行っている。さらに発散に向けた主となる機能として、地球温暖化に関する取り組み案を形式的に入力することで、その案が反映された世界を予想した簡単なシミュレーション結果を提供する機能である。例えば、各国の二酸化炭素排出量の変化を入力すると、温暖化の進行経過を確認できる。議論構造化を用いることで、参加者に高い負荷を強いる点は Deliberatorium と同様である。ClimateCoLab では、リアルな空間での対面型の議論をカンファレンス形式で行い、その後サイバー空間でのオンラインで議論を続けるなど、リアル空間での議論とサイバー空間での議論を交互にミックスしながら議論を継続的に行っている。

以上は、合意形成を支援するというよりは、インターネット上での集合知を利用して、多くのアイデアを集め、それらのアイデアを洗練化することを目的としている。一方、伊藤らは、多数の意見を集約し合意形成を支援するシステムや方法論の研究開発を行っている。ここでは大規模な議論を適切に整理し、エンカレッジし、さらにはより良い方向に導くようなファシリテータに着目している。Wikipedia や Linux のようなプロジェクトでも、参加者は自由に記事を書いたりソースコードを編集できるが、少数ではあるが特定数の管理層が注意深く大多数の活動を管理している。この少数の管理層の役割が実はプロジェクトの成功の要因の一つと言われている。大規模な合意形成や意見集約に関しても少数の管理層、すなわちファシリテータが必要である。実際に名古屋市次期総合計画の市民からの意見集約にオンラインの議論支援システムを開発しファシリテーション支援機能などを実装するなど、幾つかの実験を行いその有用性を確認している<sup>24-30)</sup>。

実験して明らかになってきたことは、大規模な議論では、参加者にとって、現在の議論の状況の把握、議論の内容に関する理由付け、さらに議論の内容に関する不整合など、議論の構造を適切に管理し、見える化することが重要である。そしてその構造を用いて、ファシリテータは適切に議論を整理でき、参加者も議論の内容を把握できる。さらには様々な人工知能技術を応用することで知的な議論支援が可能になる。今後はさらに、議論構造の可視化機構、エージェントの自動交渉機構、インセンティブ機構を発展させ、大規模議論を支援するためのツールとして開発し導入していく予定である。

### （b）討論型世論調査（Deliberative Poll）

1990年代頃から討論型民主主義もしくは熟議と呼ばれる枠組みの一つとして行なわれている。討論型世論調査はスタンフォード大学の James S. Fishkin 教授らによって提案されている<sup>22)</sup>。ランダムにサンプリングされた市民が意見を述べる（既存の世論調査）だけでなく、さらに一定の場所で討論をすることで、公共政策に関する課題の本質を市民が理解することと、社会的な合意を促進するための方法である。様々な公共政策の課題について国レベルや都市レベルですでに実行されている。オンラインを用いた討論型世論調査も行なわれているが、あくまでもサンプリングされた市民がオンラインで討論をする仕組みである。特徴的なのは、実施前と実施後において多くの場合に、必ず市民の意見の変化が現れ、社会的な合意が進んでいる点である。

討論型世論調査では、市民ら自身が対象とする公共政策の課題について討議を通じて学ぶ機会を与えられる。下のリストにあげるような非態度、合理的無知仮説などは望ましい状態ではないため、討論型世論調査によって公共政策に対して意見を深めるという意味で、有意義であると言える。

文献によると討論型世論調査は市民参加における以下の4つの問題をクリアできる手法とされている。

#### ① 非態度

政策について明確な意見を持っていないにもかかわらず、持っているかのように回答する回答に一貫性がなく、時間をおいて同じ質問を繰り返すと、ランダムに変動する

#### ② 合理的無知

市民ら一人一人が選挙を左右できる確率は非常に低いので公共政策について無知であることが合理的であると考えること

#### ③ 集団分極化

議論を行えば行うほど意見分布が極端な方向にシフトする傾向のことを言う。これによって、元々持っていた見解が強固になり集団間の溝が深まる傾向がある

#### ④ 参加バイアス

参加動機の高い者しか集まらないという傾向

### （c）紛争メディエーション（Dispute Mediation）

対立的な状況での合意形成を支援する方法として、メディエーション（調停）がある。一般に紛争のメディエーションと呼ばれることが多い。メディエーションについては、国際法上の調停であったり、日本では、裁判外紛争解決手続き（ADR: Alternative Dispute Resolution）と呼ばれるものもある。一般的に、メディエーションは、当事者以外の中立的な第三者によって解決案が提示され、その提示案に当事者らが合意することで、紛争の解決とすることを目指しており、国際政治から国内の民事調停法にまで極めて広い範囲が扱っている。Harvard Law School では The Public Disputes Program において様々な現実の紛争に実際にに関わり、調停やもしくは交渉の支援を行い、その事例を蓄積している。

#### （d）自動交渉エージェント

自動交渉エージェント、交渉理論、効用理論、数理経済学、ゲーム理論、メカニズムデザイン理論などをベースに、自動ファシリテーション機構、エージェント自動合意形成アルゴリズム、についての研究がある。以下に最近の動向を上げる。

自動交渉機構に関する研究は、非協力的ゲームの囚人のジレンマの状況を、交渉エージェント間の何らかの通信やインタラクションにより、より社会的に価値のある合意点を見つけるアルゴリズムを議論する<sup>31,32)</sup>。オークションでの最適化される経済的効率性は、その場での評価値の最大化でありパレート最適な合意点である。一方で、自動交渉機構の研究で議論されるのは、パレート最適な合意可能点が複数ある場合にどの点を選択するべきか、もしくは、エージェントの効用空間が不確実でより多くの探索により、より良い合意点を発見できるかという点である。オークションというフォーマットをベースにしていなくても、自動交渉エージェントの研究の方が、より一般的な交渉問題を取り扱っている。そのため、研究が個々のドメインで完結しがちであるため、ドメイン間での連携を図る目的で、自動交渉エージェントに関する国際プログラム競技会 ANAC (Automated Negotiating Agent Competition) が毎年開催されており、交渉戦略や交渉問題そのものに関する質の高度化を進めている<sup>52-54)</sup>。近年では、人間と交渉する自動交渉エージェントに関する研究もいくつか開始されており、論点とその値域が定義された妥協に基づく交渉であれば、ほぼ自動で行うことができる。

- 離散的な交渉空間における効率的な交渉探索アルゴリズム：交渉空間が離散的であると古典的な交渉解であるナッシュ解が定義できない場合が多い<sup>37)</sup>。したがって、ゲーム理論や経済学では既存にはほとんど研究がない。藤田、伊藤、クラインらは、Simulated Annealing や遺伝的アルゴリズムに基づく交渉解の探索手法を提案している<sup>38)</sup>。
- 効用モデル：効用モデルは、人間の好みをソフトウェアであるエージェントに伝えるために必要であり、現状では以下のような研究が行われている。
  - 論点の依存性を表現する効用のモデル：意思決定を行う時、複数の論点を考えるのが一般的である。例えば、自動車を購入する時に、排気量、色、タイプなどを考慮する。多属性効用関数は、このような複数の論点に基づく効用を定義できる。一般に多属性効用関数といった場合には、この属性の独立性を求めるが、交渉などの状況ではさらに各属性の値が他の属性の値に依存する場合が多い。そのような属性間の依存性を表現出来る論点の相互依存を許す多属性効用モデルが提案されている<sup>31)</sup>。
  - 人間の間での依存性を表現する効用のモデル：個々の人間の効用関数は他の人間の価値に依存する場合もある。人間の間での価値観の依存性を表現した効用関数も定義されている<sup>39)</sup>。
  - グラフによる効用のモデル：人間の効用をグラフによって表現する研究も幾つか行われている。多属性効用関数を表現することができる<sup>36)</sup>。
- 交渉戦略のモデル：交渉における戦略は、主にいかにして妥協するかということに主眼が置かれる。どのようなタイミングで相手に譲歩した案を提案するかによって、合意の成立や交渉の失敗に影響がある場合が多い。森、伊藤らは、進化的ゲームの均衡

点をベースに、妥協の度合いを測るモデルを提案している。これにより、ANAC2015において総合優勝している<sup>40)</sup>。

その他、説得や妥協の数理モデル、合意創造の信念共有モデルなどについても今後の研究が期待される。

自動交渉機構については、最難関な国際会議 AAMAS (International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems) と毎年同時開催されている国際自動交渉エージェント競技会 ANAC (Automated Negotiating Agent Competition) と国際ワークショップ ACAN (International Workshop on Agent-based Complex Automated Negotiations) が具体的なアルゴリズムのテストベッドとなっている。ANAC と ACAN は、毎年、米国、欧州 (英国やスペイン)、アジア (ホンコンやシンガポール)、および豪州から参加者を集めており、そのプロシーディングスはほぼ全てが Springer から出版されており<sup>41-49)</sup>、エージェント自動交渉の研究分野の世界的にリードするワークショップと競技会である。

#### (e) インセンティブメカニズム

コレクティブインテリジェンスの視点から、大規模な議論をいかにして誘導すべきか、ボランティアな活動のためのインセンティブを与えるべきか、という点についても追究している。古典的な例では、誘引両立なメカニズムでは、真実申告に対するインセンティブが働いていると言える。例えば第2価格オークションでは、真の評価値をそのまま正直に入札することが最適である。つまり、真の申告以外の申告をすると損をするような仕組みとして設計されている。インセンティブメカニズムとは、メカニズムの設計者またはメカニズムを使わせる側の者がメカニズムを使うユーザーや参加者に対して、何らかの方向へ誘導するための仕組みである。以下に最近の動向を示す。

- **DARPA Red Balloon Challenge** : DARPA が開催した競技会で、アメリカ全土に10個の気象用バルーンを配置し、インターネットを用い、全てのバルーンの正確な位置を発見するスピードが競われた。優勝チームは、ソーシャルネットワークにおける、バルーンの見つけ活動への招待の連鎖をうまく利用してインセンティブメカニズムを作成した。つまり、バルーンを発見した人、その人を紹介した人、またその人を紹介した人、というようにバルーンを発見した人までにいたる社会ネットワークの経路上にいる人すべてにうまく賞金を分け与えたのである。この仕組みはうまく機能し8時間で全てのバルーンが発見されている<sup>18)</sup>。
- **スコアリングルール** : 気象予測などで、気象予報官が自分の思った確率を正直に報告することで、最も高いスコアが得られるような関数を用いたスコアの方式である。その中の研究の一つとして、**Baysian Truth Serum (BTS: ベイジアン自白剤)** という方式がある。BTS のキーアイデアは、ある質問に対する回答について、その実際の頻度が、予測された頻度より大きい (**surprisingly common**) 場合に高いスコアをつけることにあり、これにより真実申告を引き出すことが知られている<sup>51)</sup>。

**Reputation** メカニズム : マルチエージェントの一連の研究において、各エージェントの行動に対する報酬関数を決めておき、行動をとった後にその報酬をポイントとして与える。そして、そのポイントに基づいてランキング (**reputation**) を決めるという枠組みである。様々

な方法が考えられるが、興味深い点は、各エージェントが競争的に自分の reputation を高めようとするのが仮定されている点で、それにより全体の振る舞いがより良い振る舞いになるようにメカニズムを設計する必要がある<sup>35)</sup>。

## (6) キーワード

ソーシャルコンピューティング、コレクティブインテリジェンス、熟議民主主義 (Deliberative Poll)、マルチエージェントシステム、エージェントシステム、ソーシャルフィジクス、メカニズムデザイン、大衆 (Crowd) コンピューティング、システムダイナミクス

## (7) 参考資料

- 1) Nicholas R. Jennings, Katia Sycara, Michael Wooldridge, A Roadmap of Agent Research and Development, Autonomous Agents and Multi-Agent Systems, Volume 1, Issue 1, pp 7-38, March 1998.
- 2) Katia Sycara, "Resolving Goal Conflicts via Negotiation". In Proceedings of the Seventh National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-88), St. Paul, MN., August 1988.
- 3) Christopher Riesbeck and Roger Schank. Inside Case-based Reasoning. Northvale, NJ: Erlbaum, 1989.
- 4) Ralph L. Keeney and Howard Raiffa, Decisions with Multiple Objectives. ISBN 0-521-44185-4, 1993.
- 5) Jeffrey S. Rosenschein and Gilad Zlotkin, Rules of Encounter: Designing Conventions for Automated Negotiation among Computers, MIT Press, 1994.
- 6) Milind Tambe, "Towards Flexible Teamwork", Volume 7, pages 83-124, 1997.
- 7) R. K. Dash, N. R. Jennings and D. C. Parkes, "Computational-mechanism design: a call to arms," in IEEE Intelligent Systems, vol. 18, no. 6, pp. 40-47, Nov-Dec 2003.
- 8) Noam Nisan, Tim Roughgarden, Eva Tardos, and Vijay V. Vazirani. 2007. Algorithmic Game Theory. Cambridge University Press, New York, NY, USA.
- 9) Benjamin Edelman & Michael Ostrovsky & Michael Schwarz, "Internet Advertising and the Generalized Second-Price Auction: Selling Billions of Dollars Worth of Keywords," American Economic Review, American Economic Association, vol. 97(1), pages 242-259, March 2007.
- 10) Milind Tambe. 2011. Security and Game Theory: Algorithms, Deployed Systems, Lessons Learned (1st ed.). Cambridge University Press, New York, NY, USA.
- 11) Jeff Conklin and Michael L. Begeman. 1988. gIBIS: a hypertext tool for exploratory policy discussion. In Proceedings of the 1988 ACM conference on Computer-supported cooperative work (CSCW '88). ACM, New York, NY, USA, 140-152.
- 12) Kenneth Arrow: Social Choice and Individual Values, 1963.
- 13) Thomas W. Malone, The Future of Work, How the New Order of Business Will Shape Your Organization, Your Management Style, and Your Life, Harvard Business School Press, 2004.
- 14) Pattie Maes. 1994. Agents that reduce work and information overload. Commun. ACM 37, 7 (July 1994), 30-40.
- 15) Takayuki Ito and Toramatsu Shintani, "Persuasion among Agents: An Approach to Implementing a Group Decision Support System Based on Multi-Agent Negotiation", In the Proceedings of the 15th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-97), pp.592-597, Morgan Kaufmann Publishers, Inc., 1997
- 16) James Surowiecki, The Wisdom of Crowds, Anchor, 2004.
- 17) Alex Pentland, Social Physics: How Good Ideas Spread-The Lessons from a New Sci-

- ence, Penguin Press, 2014
- 18) Galen Pickard, Wei Pan, Iyad Rahwan, Manuel Cebrian, Riley Crane, Anmol Madan, Alex Pentland, Time-Critical Social Mobilization, *SCIENCE*, 28 OCT 2011 : 509-512
  - 19) Malone, T. W. & Klein, M. Harnessing collective intelligence to address global climate change (Invited Lead Essay). *Innovations: Technology | Governance | Globalization*, Summer 2007, 2, (3), 15-26.
  - 20) Joshua Introne, Robert Laubacher, Gary Olson, Thomas W. Malone, Solving Wicked Social Problems with Socio-computational Systems, *Kunstliche Intelligenz*, February 2013
  - 21) Mark Klein , Enabling Large-Scale Deliberation Using Attention-Mediation Metrics. *Journal of Computer-Supported Cooperative Work*. 21(4):449-473, 2012.
  - 22) James S. Fishkin, *When the People Speak: Deliberative Democracy and Public Consultation*, ISBN: 9780199604432, 2011. (邦訳:「人々の声が響き合うとき: 熟議空間と民主主義」早川書房)
  - 23) Anita Williams Woolley, Christopher F. Chabris, Alex Pentland, Nada Hashmi, Thomas W. Malone, Evidence for a Collective Intelligence Factor in the Performance of Human Groups, *SCIENCE*, 29 OCT 2010 : 686-688.
  - 24) 伊藤孝紀, 深町駿平, 田中恵, 伊藤孝行, 秀島栄三, 「ファシリテータに着目した合意形成支援システムの検証と評価—オフィス家具の商品開発を事例とする」, 日本デザイン学会, 2015
  - 25) 伊美裕麻, 伊藤孝行, 伊藤孝紀, 秀島栄三, "オンラインファシリテーション支援機構に基づく大規模意見集約システム COLLAGREE - 名古屋市次期総合計画のための市民議論に向けた社会実装", 情報処理学会論文誌, 2015
  - 26) 伊藤孝行, 奥村命, 伊藤孝紀, 秀島栄三, "多人数ワークショップのための意見集約支援システム Collagree の試作と評価実験—議論プロセスの弱い構造化による意見集約支援—", 日本経営工学会論文誌, Vol.66, No.2, 2015
  - 27) Takayuki Ito, Yuma Imi, Takanori Ito, and Eizo Hideshima, "COLLAGREE: A Facilitator-mediated Large-scale Consensus Support System", *Collective Intelligence 2014*, June 10-12, 2014. MIT Cambridge, USA. (poster)
  - 28) Takayuki Ito, Yuma Imi, Motoki Sato, Takanori Ito, and Eizo Hideshima, Incentive Mechanism for Managing Large-Scale Internet-Based Discussions on COLLAGREE, *Collective Intelligence 2015*, May 31 – June 2, 2015 @ the Marriott Santa Clara in Santa Clara, CA (poster).
  - 29) Akihisa Sengoku, Takayuki Ito, Kazumasa Takahashi, Shun Shiramatsu, Takanori Ito, Eizo Hideshima and Katsuhide Fujita, Discussion Tree for Managing Large-Scale Internet-based Discussions, *Collective Intelligence 2016*, Stern School of Business New York University, June 1-3, 2016. (ACCEPTED poster)
  - 30) Kazumasa Takahashi, Takayuki Ito, Takanori Ito, Eizo Hideshima, Shun Shiramatsu, Akihisa Sengoku and Katsuhide Fujita, Incentive mechanism based on quality of opinion for Large-Scale discussion support, *Collective Intelligence 2016*, Stern School of Business New York University, June 1-3, 2016. (ACCEPTED poster)
  - 31) Takayuki Ito, Mark Klein, Hiromitsu Hattori, "Multi-issue Negotiation Protocol for Agents: Exploring Nonlinear Utility Spaces", In the Twentieth International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI2007), Hyderabad, India, January 6-12, pp. 1347- 1352, 2007
  - 32) Ivan Marsa-Maestre, Takayuki Ito, Katsuhide Fujita, Miguel A. Lopez-Carmona, Juan R. Velasco, Mark Klein, "Balancing Utility and Deal Probability for Negotiations in Highly Nonlinear Utility Spaces", In the Proceedings of the Twenty-First International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI2009) , July 11 - 17 in Pasadena, California, pp.214-219, 2009.
  - 33) 伊藤孝行, "計算論的メカニズムデザイン", コンピュータソフトウェア (日本ソフトウェア科学会論文誌)「ソフトウェアエージェントとその応用特集号」, 日本ソフトウェア科学

- 会, Vol. 25, No.4, pp.20-32, 2008.
- 34) David Lazer, Alex Pentland, Lada Adamic, Sinan Aral, Albert-László Barabási, Devon Brewer, Nicholas Christakis, Noshir Contractor, James Fowler, Myron Gutmann, Tony Jebara, Gary King, Michael Macy, Deb Roy, Marshall Van Alstyne, Computational Social Science, SCIENCE06 FEB 2009 : 721-723
  - 35) David C. Parkes, Michael P. Wellman, Economic reasoning and artificial intelligence, SCIENCE17 JUL 2015 : 267-272
  - 36) Rafik Hadfi and Takayuki Ito. "Low-Complexity Exploration in Utility Hypergraphs". Journal of Information Processing. Vol. 23, No. 2 pp. 176-184, 2015.
  - 37) Katsuhide Fujita, Takayuki Ito, and Mark Klein, "A Secure and Fair Protocol that Addresses Weaknesses of the Nash Bargaining Solution in Nonlinear Negotiation", Group Decision and Negotiation Journal (IF=0.783), pp.29-47, March 3, 2010 (online), 2012 (print).
  - 38) Katsuhide Fujita, Takayuki Ito, and Mark Klein, "An Approach to Scalable Multi-issue Negotiation: Decomposing the Contract Space", Computational Intelligence 30 (1), pp30-47, doi: 10.1111/j.1467-8640.2012.00462.x., 2014.
  - 39) Takayuki Ito, David Parkes, "Instantiating the Contingent Bids Model of Truthful Interdependent Value Auctions", In the Proceedings of the Fifth International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems (AAMAS2006),pp.1151-1158, 2006.
  - 40) 森 顕之, 伊藤 孝行, "推定期待効用に基づく自動交渉エージェントの提案", 情報処理学会 論文誌 2015年10月号, 2015.
  - 41) Naoki Fukuta, Takayuki Ito, Minjie Zhang, Katsuhide Fujita, and Valentin Robu, "Recent Advances in Agent-based Complex Automated Negotiation", Studies in Computational Intelligence 638, Springer, April 25, 2016. ISBN 978-3-319-30305-5
  - 42) Katsuhide Fujita, Takayuki Ito, Minjie Zhang, Valentin Robu: Next Frontier in Agent-Based Complex Automated Negotiation. Studies in Computational Intelligence 596, Springer, March 30, 2015, ISBN 978-4-431-55524-7
  - 43) Ivan Marsa-Maestre, Miguel A. Lopez-Carmona, Takayuki ITO, Minjie Zhang, and Katsuhide Fujita, "Novel Insights in Agent-based Complex Automated Negotiation", Series of Studies in Computational Intelligence 535, Springer-Verlag, ISBN978-4-431-54757-0, March 5, 2014.
  - 44) Takayuki ITO, Minjie ZHANG, Valentin Robu, and Tokuro Matsuo, "Complex Automated Negotiations: Theories, Models, and Software Competitions", Series of Studies in Computational Intelligence 435, Springer-Verlag, ISBN 978-3-642-30736-2, 2012.
  - 45) Takayuki ITO, Minjie ZHANG, Valentin Robu, Shaheen Fatima, and Tokuro Matsuo, "New Trends in Agent-Based Complex Automated Negotiations", Series of Studies in Computational Intelligence, Springer-Verlag, 2011, ISBN 978-3-642-24695-1, 2011.
  - 46) Takayuki ITO, Minjie ZHANG, Valentin Robu, Shaheen Fatima, Tokuro Matsuo and Hirofumi Yamaki(Eds.), "Innovations in Agent-Based Complex Automated Negotiations", Series of Studies in Computational Intelligence, Springer-Verlag, 2011, ISBN 978-3642156113, Oct 28, 2010.
  - 47) Takayuki ITO, Minjie ZHANG, Valentin Robu, Shaheen Fatima and Tokuro MATSUO (Eds.), "Advances in Agent-Based Complex Automated Negotiations", Series of Studies in Computational Intelligence, Springer-Verlag, 2009. ISBN 978-3-642-03189-2.
  - 48) Takayuki ITO, Hiromitsu HATTORI, Minjie ZHANG, and Tokuro MATSUO (Eds.), "Rational, Robust, and Secure Negotiations in Multiagent Systems", Series of Studies in Computational Intelligence, Springer-Verlag, ISBN 978-3-540-76281-2, 2008.
  - 49) Takayuki ITO, Hiromitsu HATTORI, Minjie ZHANG, and Tokuro MATSUO (Eds.), "Rational, Robust, Secure Negotiations in Multiagent Systems", IEEE Computer Society, 2005.
  - 50) Ariana Strandburg-Peshkin, Damien R. Farine, Iain D. Couzin, Margaret C. Crofoot, Shared decision-making drives collective movement in wild baboons, SCIENCE19 JUN

- 2015 : 1358-1361.
- 51) Dražen Prelec, A Bayesian Truth Serum for Subjective Data, *SCIENCE* 15 OCT 2004 : 462-466
  - 52) Tim Baarslag, Katsuhide Fujita, Enrico Gerding, Koen Hindriks, Takayuki Ito, Nick R. Jennings, Catholijn Jonker, Sarit Kraus, Raz Lin, Valentin Robu, Colin Williams, Evaluating Practical Negotiating Agents: Results and Analysis of the 2011 International Competition, *Artificial Intelligence Journal (AIJ)*, Elsevier Science, Vol. 198, May 2013, pp. 73–103, 2013.
  - 53) Tim Baarslag, Reyhan Aydogan, Koen V. Hindriks, Katsuhide Fujita, Takayuki Ito, and Catholijn M. Jonker, "The Automated Negotiating Agents Competition 2010-2015", pp.115-118, *AI Magazine*, Winter, 2015.
  - 54) 藤田桂英, 森頭之, 伊藤孝行, "ANAC : Automated Negotiating Agent Competition (国際自動交渉エージェント競技会) ," *人工知能*, Vol.31, No.2, 2016.

#### 4. 3. 4 知の倫理的・法的・社会的課題（ELSI）と社会適用

##### (1) テーマ名

知の倫理的・法的・社会的課題（ELSI）と社会適用

##### (2) 概要

知の倫理的・法的・社会的課題（ELSI）と社会適用は、知の集積・増幅・伝播・検索・予測・発見・アクションを可能にする倫理的・法的・社会問題の整備とガイドライン設計に関わる領域である。

##### (3) 国内外における研究開発の動向

人工知能や知的ロボットなど知的情報処理技術の研究開発が進展し、実社会への適用が次々と実現することに対して、倫理的・法的・社会的（ELSI: Ethical, Legal, and Social Issues）な視点での考慮は不可欠である。しかしながら、新しい科学技術の利用に関する懸念や不安は知的情報処理固有のものではない。そもそも、ELSIに関する研究は、米国が1990年にヒトゲノム計画を立ち上げた際に、研究に潜む倫理的・法的・社会的問題を同時に研究する<sup>1)</sup>としたことに端を発する<sup>2)</sup>。

ITにおいても、ELSIという言葉は使わないものの、情報の電子化に伴う個人情報漏洩やプライバシー侵害への危険性や不安に対して、早くも1980年にはOECD理事会の「プライバシー保護と個人データの国際流通についてのガイドラインに関する勧告」などの取組みが始まっていた。わが国においては2003年に「個人情報の保護に関する法律」が成立した後、数々の事故や紆余曲折の議論を経て、2015年には「改正個人情報保護法」が成立、匿名化などの情報処理を施すことでパーソナルデータの利活用を促進する枠組みが整備された<sup>3)</sup>。並行して学术界でも、水谷雅彦らによるプロジェクト「情報倫理の構築(FINE)」(1998-2002)にて応用倫理学の一分野として、現代社会特有の倫理的矛盾の解決を目指す情報倫理学を構築する試みも行われた<sup>4)</sup>。

ロボットについては、1980年代から自動車の組立工場などでの利用が普及し始めた産業用ロボットは、かつて産業革命当初、機械の普及による失業を恐れた労働者が起こした機械破壊運動（ラッドライト運動）のような排斥運動は起こっていない。新たに生まれたITや知的作業の雇用が労働力を吸収したためと言われる。一方で、人工知能により自らの行動を判断、決定し動作する知能ロボットは工場から家庭や街中に活動の場を広げた結果、周囲にいる人間に対する安全・安心の課題が重要になってきた。日本では総じてヒト型ロボットの開発が活発であるが、今日の自動車もロボットの一種とみなせる。特に、自動走行は、ロボットの3大要素である動力系技術、センシング系技術、制御系技術の高度な連携により初めて実現できるものである。車の自律的な判断による事故に対する責任問題は、倫理や法的な問題の議論を巻き起こして

いる。これはむしろ本稿の主題である知のコンピューティングの問題そのものといえる。

知的情報処理、特に人工知能は興隆期と幻滅期を繰り返しながらも、現在第3次ブームを迎えて、ゲームやクイズなど知的とされる分野においても人間の能力を凌駕するレベルになりつつある。近年の急激かつ驚異的な進展により、コンピューターが人間を超える臨界点というシンギュラリティ（Kurzweil<sup>4</sup>）という技術用語が新聞などの一般メディアにまで登場する。また、哲学者が超知性体 SuperIntelligence の脅威（Bostrom<sup>5</sup>）を描出すると、それに呼応する形で、今度は産業界や情報科学とは異なる学術界からは人工知能の開発に対する懸念が叫ばれるようになってきた（Musk<sup>6</sup>、Hawking<sup>7</sup>）。同時に経済学者や社会学者からは、人間の雇用を奪うコンピューター（Brynjolfsson<sup>8</sup>、Osborne<sup>9</sup>）という指摘や、人類はどこへ行くのかという哲学的な問題提起（Fuller<sup>10</sup>）がなされた。

#### [国内外の動向]

以下、各国地域の動向を列挙するが ELSI に関しては人工知能や知的情報処理に特化した活動は少なく、ICT や科学技術一般に関する ELSI を扱う活動が多い。

米国では、産業界が主導して ELSI 問題に取り組んでいる。特に企業から多額の投資が行われている。倫理に関しては 1980 年代から継続して取り組んだ情報倫理学も 2002 年には完了した。Google に設立されたという倫理委員会も実体は見えないままである。法的課題についても特に新しい法律を作るというよりも既存の法律の運用で対応するよう見える。これに比して社会的課題に対しては、企業、大学とも活動が活発である。Kurzweil の設立した Singularity University は学位を授与する大学ではなく教育も行う一種のシンクタンク兼ビジネスインキュベーターである。MIT の Brynjolfsson は 2011 年と 2014 年に 2 冊の本で人間と機械の新しいあり方について論じた。Stanford 大学では AI100 プロジェクトで 1950 年から 100 年間で人工知能が人々の仕事や生活にどのような影響を与えるかという研究を開始した。特筆すべきは The Future of Life Institute である（詳細は注目動向に記述）。

欧州では、欧州委員会が主導してファンディングとりまとめを行っている。1991 年から活動する欧州科学技術倫理グループはさまざまな倫理的問題を調査研究している。EU FP7 の下では、RoboLaw や Project ETICA (Ethical Issues of Emerging ICT Applications) が ICT に関わる倫理問題を扱っている。大学では、De Montfort 大学（英）CCSR (Center for Computing and Social Responsibility) や Oxford 大学（英）Future of Humanity Institute (FHI) の活動が目立つ。FHI は、人類とその繁栄に関する全体像を扱う多くの学問領域にまたがる研究機関として 2005 年に設立され<sup>11</sup>、”SuperIntelligence”の著者として著名な哲学者 Nick Bostrom が所長を務める。

中国では、2012年に北京大学に ROBOLAW.ASIA | YSAiL Initiative for Robotics, Law & Policy が設立された<sup>12)</sup>。ロボットだけでなく人工知能も含めた法律との関係を研究する。EU FP7 の ROBOLAW プロジェクトや早稲田大学 Humanoid プロジェクトと協力関係にある。

韓国では、2007年に産業資源省からロボット倫理憲章の草案を発表。第一条の目標から、人間・ロボットの共同原則、人間倫理、ロボット倫理、製造者倫理、使用者倫理、実行の約束の全七条からなる。

日本では、政府と学术界が主導して取り組んでいる。情報倫理に関しては上述したプロジェクト FINE (1998～2003) にて IT 専門家の倫理ではない情報化社会を生きる万人の倫理を構築した。少し時間を置いて、村田潔（明治大学）のプロジェクト「組織情報倫理学<sup>13)</sup>」（2012～2016）が始まった。村田らは De Montfort 大 CCSR との関係も深く ETHICOMP 2007（明治大学にて開催）を主催した。ロボットに関しては上述の通り安全基準やガイドライン<sup>14)</sup>が倫理に先行するが、本田康二郎はロボット倫理憲章を目指し一般市民を巻き込んだ活動をしている<sup>15)</sup>。また、新保史生らは、ロボットは安全基準だけで安心して利用できるわけではないとして、必要な法概念としての「ロボット法学会」の設立を目指した活動を 2015 年から開始した<sup>16)</sup>。土井美和子、萩田紀博、小林正啓は 2003 年より「ネットワークロボットフォーラム」にて、ロボットの社会受容に向けた活動を展開してきた<sup>17)</sup>。人工知能に関しては 2014 年には人工知能学会に倫理委員会が発足した。JST では、知的情報処理の ELSI に関して、CRDS を中心に 2013 年からワークショップを継続的に実施している<sup>18),19),20)</sup>。

#### (4) 科学技術的・政策的課題

##### [科学技術的課題]

CRDS では人文社会科学および情報科学関連の有識者を招聘して、「知のコンピューティング」の描き出す未来像に対して、人文社会科学／情報科学の双方からプロジェクトの推進において必要となる ELSI に関する論点を議論した<sup>19)</sup>。次ページの表に抜粋する。ただし、ここに探索された課題は、知のコンピューティングや人工知能・ロボットに専ら関わるものと、情報科学技術全般に共通するもの、さらには、科学技術一般の社会受容そのものに関わるものとの区別が必ずしも明確でない。本領域で重要なことは、既知の解決方法や智慧で解決できない本領域特有の課題を特定すること、そして、解決に必要な事柄を深く議論することである。人文社会学系の研究者も情報科学の研究者と共に自らの問題として取り組むことが求められる。同時に、研究者、企業、行政から一般市民まで含めた広い場で公共の問題として議論することも必要である。

表 1 想定される問題と倫理的・法的・社会的課題

倫理的・法的・社会的課題	想定される問題
新たな道徳 新たな犯罪 個人情報とプライバシー	ネット時代の情報倫理教育（子どもや一般人） ハッキングされた機械やシステムによる詐欺や盗聴・盗用 個人に関わる情報の利活用に関するさまざまな問題 機微情報の扱い、非言語情報の多くはプライバシー情報 看視と監視（監視カメラや通行履歴など）
知の所有権	平時や非常時（災害、犯罪、国防など）の使い分け 知の断片化の促進と専門知の経済基盤の流動化 二次情報、三次情報の所有権、知のエコシステム、AI の著作物
機械の判断と責任	機械の判断の正当性・妥当性の担保 結果に対する責任の帰着、責任のトップは人間だけか
機械の自律性 (SuperIntelligence)	自律的に動作する機械をいかに制御するか 判断・推論の信頼性の保証
人間の自由意志	人間の行動原理や意思決定のメカニズムの研究により、個人や 集団の合意形成や意思決定を制御・誘導することが可能になる
アイデンティティー	サイバー上の情報やプロファイリングによる虚像 それに基づく不公平や差別の助長
労働や雇用	情報の標準化による個性の喪失 機械により奪われる雇用問題 実践知の蓄積による名人・職人の雇用喪失
人間と機械の新たな関係	技術の進歩に人間はどう対応すべきか（抑制か活用か） 社会システムの技術への過剰依存、サイバーテロ

[政策的課題]

- ELSI に関する学際的な拠点  
知的財産センターが、研究者の知的財産の創造・保護・活用の促進を目的とする  
のと同じように、研究者の ELSI に関する普及啓発（後期教養教育）、相談（事前  
検証と事後対応）を支援して、ELSI 問題を適切に解決する仕組みが必要である。  
恒久的な機関として設立して継続的に支援することでさまざまなノウハウを組  
織的に蓄積することがわが国の国際的な競争力を向上させると期待する。
- 人文社会学者の継続的な関与に向けた取組み  
知のコンピューティングの ELSI については、倫理学者、哲学者、法学者、憲法  
学者、社会学者、政治学者、経済学者などの人文社会学者の研究者が自身の研究  
課題として積極的に関与することが望ましい。EU では人文社会学者が、Horizon  
2020 プロジェクトにおいて、SSH(社会人文学)に対する賢明な投資が EU に有益  
であると宣言した（ビルニウス宣言、2013 年リトアニア）<sup>21)</sup>。プロジェクトの終  
了と共に活動やコミュニティが終息することがないように、継続的な取組みが必要  
である。
- 実環境シナリオでの実証  
Paolo Dario（イタリア聖アンナ大学院大学）は、EU/FP7 RoboLaw プロジェク  
トにおいてロボットを市民が暮らす環境の中で働かせて試験した。さまざまな問  
題に遭遇し、対応に多大な努力を要したが、その結果、法規制の欠如、政治的手  
段、想定外の障害などが明らかになったという<sup>22)</sup>。知のコンピューティングが提

供するアプリケーションサービスにおいても特区などの制度を活用して実際の適用に向けた課題の抽出と必要な対処の試行を効率的に実施すべきである。

- 研究者に対する ELSI 教育の実践

藤垣裕子（東京大学）はリベラルアーツ（人間を種々の拘束や制約から解き放って自由にするための知識や技芸）をある程度の専門教育を受けた後で初めて意味をもつ「後期」教養教育と位置づけた<sup>23)</sup>。知のコンピューティングの社会的・経済的インパクトの大きさを鑑みるに、さまざまな機会を通じて幅広い研究者に教育を実践することが重要である。

### (5) 注目動向(新たな知見や新技術の創出、大規模プロジェクトの動向など)

- The Future of Life Institute (FLI)<sup>24)</sup>

2014年にJaan Tallinn（Skype共同創始者）らにより米国ボストンに設立。科学アドバイザーに、Nick Bostrom、Elon Musk、Steven Hawkingなど人工知能の開発に懸念を示す有識者も名を連ねるが、設立のミッションは「安全で明るい未来を作るための研究とイニシアティブを推進する」というもの。研究開発の優先順位や自動機械に関するオープンレターを発信したり、寄付金を基金とした研究開発の助成を行うなど積極的に活動を展開している<sup>25)</sup>。

- 科学技術振興機構

2013年開始のCREST「人間と調和した創造的協働を実現する知的情報処理システムの構築」では研究総括の萩田紀博（国際電気通信基礎技術研究所）の方針によりELSIへの取組みを採択の条件とするなど研究者にELSIを主体的に考える機会を与え続けている。CRDSでは、2014年に「知のコンピューティングとELSI/SSH」ワークショップを開催し、知のコンピューティングに関わるELSIの論点を議論した<sup>26)</sup>。その後もAAAS2015<sup>27)</sup>やESOF2016<sup>28)</sup>にて国際的な議論を展開している。JST社会技術研究開発センター（RISTEX）では2016年度から新規研究開発領域として「人と情報のエコシステム」（仮）にて、情報技術のもたらすメリットと負のリスクを特定し、技術や制度へ反映してゆく相互作用の形成を目指している。

### (6) キーワード

情報倫理、ロボット倫理、倫理委員会、プライバシー、個人情報保護、製造物責任、ロボット法、社会受容、科学技術社会論、倫理教育、後期教養教育、ELSI、SSH

(7) 国際比較

国・地域	イシュー	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	倫理的	→	○	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 水谷雅彦(京都大学)らのプロジェクト「情報倫理の構築 (FINE)」(1998-2003)、『情報倫理の構築』出版 (2003)</li> <li>● 村田潔(明治大学)らのプロジェクト「組織情報倫理学」(2012-2016)、EHICOMP 2007を主催</li> <li>● 人工知能学会に倫理委員会発足 (2014)</li> </ul>
	法的	↗	○	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 赤坂亮太(慶應大)が発起人となりロボット法学会設立に向けた準備委員会が活動を開始 (2015)</li> <li>● 徳田英幸らによる「ネットワークロボットフォーラム」(2003~)、『ネットワークロボット—技術と法的問題—』出版 (2007)</li> <li>● 無人航空機 (ドローン、ラジコン機等) の安全な飛行のためのガイドライン施行 (2015/12)</li> </ul>
	社会的	↗	◎	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 経産省・NEDOによる「生活支援ロボット実用化プロジェクト」にて生活支援ロボットの安全性に関する検討を実施</li> <li>● ISO13482「生活支援ロボットの国際安全規格」発行 (2014/2)。上記プロジェクト成果を経産省とNEDOが提案したもの</li> <li>● 人工知能が浸透する社会を考える、AIR: Acceptable Intelligence with Responsibility (2014)</li> <li>● 日本学術会議「科学技術の光と影を生活者の対話から明らかにする」分科会 (2015)</li> </ul>
米国	倫理的	→	○	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Deborah Johnson “Computer Ethics” (1984,1993,2002)。コンピューター倫理学に関する世界初の教科書。</li> <li>● Google Ethics Committee設立 (2014/1)</li> </ul>
	法的	→	○	<ul style="list-style-type: none"> <li>● We Robot: Conference on Legal and Policy Issues Relating Robotics (2012~)</li> </ul>
	社会的	↗	◎	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Rob Nail、Ray Kurzweil, “Singularity University” (2008)</li> <li>● Brynjolfsson and McAfee, “Race Against The Machine” 2011, “The Second Machine Age: Work, Progress, and Prosperity in a Time of Brilliant Technologies”, 2014</li> <li>● Max Tegmark, Jaan Tallinn, “The Future of Life Institute (FLI)” (2014/3)</li> <li>● Stanford大 “One Hundred Year Study on Artificial Intelligence (AI100)” (2014)</li> </ul>
欧州	倫理的	↗	◎	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Oxford大 “Future of Humanity Institute (FHI)”</li> </ul>
	法的	→	◎	<ul style="list-style-type: none"> <li>● EU/FP7プロジェクト RoboLaw (2012-2014)、“Guidelines on Regulating Robotics”発行 (2014)</li> </ul>
	社会的	↗	◎	<ul style="list-style-type: none"> <li>● De Montfort大、Centre for Computing and Social Responsibility (CCSR) (1996)</li> <li>● Vilnius Declaration - Horizons for Social Sciences and Humanities (2013)</li> <li>● Michael Osborne, “The Future of Employment: How susceptible are jobs to computerisation?” (2013/9)</li> <li>● Nick Bostrom, “Superintelligence: Paths, Dangers, Strategies” (2014/7)</li> <li>● HORIZON 2020, “Responsible research &amp; innovation” (2014)</li> </ul>
中国	倫理的	→	×	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 特になし</li> </ul>
	法的	↗	△	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 北京大 “ROBOLAW.ASIA   YSAiL Initiative for Robotics, Law &amp; Policy” (2012)</li> </ul>
	社会的	→	×	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 特になし</li> </ul>

韓国	倫理的	→	△	● 産業資源省『ロボット倫理憲章』発表（2007）
	法的	→	×	● 特になし
	社会的	↗	△	● SOCIAL IMPLICATIONS OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE - SIAI 2015

（註1） フェーズ（本稿では ELSI の各課題に対応させて記述）

倫理的：倫理的な課題に関する基礎研究、応用研究・開発、産業化のレベル

法的：法的な課題に関する基礎研究、応用研究・開発、産業化のレベル

社会的：社会的な課題に関する基礎研究、応用研究・開発、産業化のレベル

（註2） 現状

◎：他国に比べて顕著な活動・成果が見えている、○：ある程度の活動・成果が見えている、

△：他国に比べて顕著な活動・成果が見えていない、×：特筆すべき活動・成果が見えていない

（註3） トレンド

↗：上昇傾向、 →：現状維持、 ↘：下降傾向

## （8） 参考資料

- 1) 小林傳司『トランス・サイエンスの時代 科学技術と社会をつなぐ』NTT 出版、2007
- 2) 森亮二、日本の個人情報保護法改正の状況、情報処理 Vol.55 No.12、2014
- 3) 水谷雅彦他、『情報倫理の構築』、新世社、2003
- 4) Ray Kurzweil, “The Singularity Is Near: When Humans Transcend Biology”, 2006
- 5) Nick Bostrom, “Superintelligence: Paths, Dangers, Strategies”, 2014
- 6) CBSNEWS, “Elon Musk: Artificial intelligence may be “more dangerous than nukes””, 2014
- 7) BBC NEWS, “Stephen Hawking warns artificial intelligence could end mankind”, 2014
- 8) Erik Brynjolfsson, Andrew McAfee, “Race Against The Machine: How the Digital Revolution is Accelerating Innovation, Driving Productivity, and Irreversibly Transforming Employment and the Economy”, 2011
- 9) Michael Osborne, “The Future of Employment: How susceptible are jobs to computerisation?”, 2013
- 10) Steve Fuller, “Humanity 2.0: What it Means to be Human Past, Present and Future”, 2011
- 11) Future of Humanity Institute (<https://www.fhi.ox.ac.uk/>)
- 12) ROBOLAWASIA (<http://www.robolaw.asia/index.html>)
- 13) 組織情報倫理学、営利および非営利組織における情報倫理問題への対応ための政策提言に関する研究 (<http://www.cbie.meiji.jp/ja/>)
- 14) 経済産業省「次世代ロボット安全性確保ガイドライン」, 2007
- 15) 本田康二郎、プロジェクト「工学的関心に基づく倫理学の構築」（2013～2015）
- 16) 新保史生、「ロボット法学会」設立準備研究会 (<http://robotlaw.jp/archives/66>) , 2015
- 17) 土井美和子・萩田紀博・小林正啓、「ネットワークロボット—技術と法的問題—」, 2007
- 18) 科学技術未来戦略ワークショップ「Wisdom Computing Summit」, 2013
- 19) 科学技術未来戦略ワークショップ「知のコンピューティングと ELSI/SSH」, 2014
- 20) サイエンスアゴラ 2015「激論！先端 ICT の光と影」
- 21) VILNIUS DECLARATION  
([https://erc.europa.eu/sites/default/files/content/pages/pdf/Vilnius\\_SSH\\_declaration\\_2013.pdf](https://erc.europa.eu/sites/default/files/content/pages/pdf/Vilnius_SSH_declaration_2013.pdf))
- 22) Paolo Dario, “Testing Robotic Applications in Real-Life Scenarios”、ロボット革命国際シンポジウム、2016

- 23) 藤垣裕子、『科学・技術と社会倫理』、p139、東京大学出版会、2015
- 24) The Future of Life Institute (<http://futureoflife.org/team/>)
- 25) 西下佳代他、人工知能やロボットの社会的影響に関する先行的研究動向、第30回研究・技術計画学会予稿論文集、2015
- 26) 科学技術未来戦略ワークショップ「知のコンピューティングと ELSI/SSH」  
(<http://www.jst.go.jp/crds/pdf/2014/WR/CRDS-FY2014-WR-09.pdf>)、映像版  
(<https://www.youtube.com/playlist?list=PLwlAbCcz-l4sIISl7wnkSBvRGMVmI-Yzg>)
- 27) Wise Computing: Collaboration Between People and Machines, AAAS 2015 Annual Meeting, 2015
- 28) Wisdom computing: creative collaboration between humans and machines, EuroScience Open Forum Manchester 2016

## ■作成メンバー■

### ■ライフサイエンス・臨床医学分野（ライフサイエンス・臨床医学ユニット）

上席フェロー	永井 良三	フェロー	児山 圭
フェロー	齊藤 知恵子	フェロー	辻 真博
フェロー	西野 恒代	フェロー	矢倉 信之

### ■ナノテクノロジー・材料分野（ナノテクノロジー・材料ユニット）

上席フェロー	曾根 純一	フェロー	永野 智己
フェロー	荒岡 礼	フェロー	河村 誠一郎
フェロー	佐藤 勝昭	フェロー	末村 耕二
フェロー	中山 智弘	フェロー	馬場 寿夫
フェロー	宮下 哲	特任フェロー	馬場 嘉信

### ■環境・エネルギー分野（環境・エネルギーユニット）

上席フェロー	佐藤 順一	フェロー	緒方 寛
フェロー	島津 博基	フェロー	関根 泰

### ■システム・情報科学技術分野（システム・情報科学技術ユニット）

上席フェロー	岩野 和生	フェロー	鈴木 慶二
フェロー	高島 洋典	フェロー	土井 直樹
フェロー	富川 弓子	フェロー	藤井 新一郎
フェロー	的場 正憲	フェロー	茂木 強
フェロー	山田 直史		

※メンバー・所属・役職は2016年3月時点

CRDS-FY2016-FR-01

## 研究開発の俯瞰報告書

# 研究開発の新しい動向(2016年)

平成28年4月 April 2016

ISBN:978-4-88890-513-8

国立研究開発法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター

Center for Research and Development Strategy

Japan Science and Technology Agency

〒102-0076 東京都千代田区五番町7番地

電話 03-5214-7481

ファックス 03-5214-7385

<http://www.jst.go.jp/crds>

©2016 JST/CRDS

許可無く複写/複製することを禁じます。  
引用を行う際は、必ず出典を記述願います。

No part of this publication may be reproduced, copied, transmitted or translated without written permission.  
Application should be sent to [crds@jst.go.jp](mailto:crds@jst.go.jp). Any quotations must be appropriately acknowledged.



ATTAATC A AAGA C CTAAC TCTAGACC  
CT CTCGCC AATTAATA  
TAA TAATC

ISBN978-4-88890-513-8

TTGCAATTGGA CCCC  
AATTCC AAAA GGCCTTAA CCTAC  
ATAAGA CTCTAACT CTCGCC  
AA TAATC

AAT A TCTATAAGA CTCTAACT CTAAT A TCTAT  
CTCGCC AATTAATA

ATTAATC A AAGA C CTAAC TCTAGACC  
AAT A TCTATAAGA CTCTAACT  
CTCGCC AATTAATA

TTAATC A AAGA C CTAAC TCTAGACC  
AAT A TCTATAAGA CTCTAACT

ATTAATC A AAGA C CT  
GA C CTAAC TCTAGACC

0011 1110 000

00 11 001010 1

0011 1110 000

0100 11100 11100 101010000111

001100 110010

0001 0011 11110 000101

