

(7) 総合工学分野

① 総合工学分野のビジョン

総合工学は、複数の工学分野を統合する学問であり、その複眼的・学際的アプローチは現代社会及び将来の社会が目指すべき安全安心で環境に優しい社会を構築するために必須の学問である。総合工学分野においては、現代社会で発生する多くの課題に対して学問の総合力を持ってその解決に取り組むと共に、将来の社会に向けた工学分野の俯瞰的統合を視野に入れつつ新たな融合分野の創生についても積極的に取り組むことが重要となる。

2011年3月11日に我が国が経験した東日本大震災においては、福島第一原子力発電所事故を始め総合工学が果たすべき役割を十分に果たすことができなかったという反省を含め、総合工学にはより社会の重要課題に総合力を持って貢献することが求められている。社会における科学、社会のための科学をより重視し、各専門分野に閉じることなく多様で新たな概念に基づく学問の構築を目指していく。

② 総合工学分野の夢ロードマップの考え方

以下では、最初に総合工学全体の研究課題を掲げたロードマップを示す。総合工学を構成する応用物理学、エネルギーと資源、航空宇宙、計算科学シミュレーション、知の統合、バーチャルリアリティ技術、計測・制御・システム技術、及びサービス学についてどのような発展を遂げていくか、その方向を示す。総合工学は、これらの要素が要素だけにとどまることなく、総合的統合的学問の場において新たな学問体系とそれによる社会的価値を創出していくことを目指す。

総合工学の要素となる応用物理学、エネルギーと資源、航空宇宙、計算科学シミュレーション、知の統合、バーチャルリアリティ技術、計測・制御・システム技術、及びサービス学それぞれのロードマップとその考え方を以下に記す。

ア 応用物理学

応用物理学は、物理学を基盤として、異なる多くの学問分野を体系的に融合し、未来社会の基盤を創造することを担う学問である。これまでも社会と密接な関係を保ちながら学問の深化と統合を図りつつ、我が国の新たな産業を創生するための学問的社会基盤を構築してきたが、今後も応用物理学は、未来の社会像を描きながら、学問の発展を遂げ、学問と社会を結び付ける重要な役割を果たし、新たな産業創生のための技術基盤を構築していかなければならない。これを反映して、応用物理学では、常に時間軸を意識しながら各分野の学問的発展と社会への貢献を描きつつ、研究を遂行する。さらに、既に産業化された半導体技術等の新たな展開に向けた要素技術としての研究開発を推進するのみならず、環境・エネルギー分野、生物・生命・医学分野等との連携により、学問の融合と統合を進め、社会に新たな価値を提

供していく。また、人材育成についても未来社会が必要とする物理学を基礎として多様な分野を融合する人材の育成を進める。

応用物理学には多くの研究クラスターが存在するが、今回の夢ロードマップでは、その代表的クラスターの学問的發展をロードマップとして描いた。今回取り上げた分野は、前回 2011 年に策定した「夢ロードマップ 2011」で取り上げた研究クラスターに加え、日本学術会議第 22 期における学術大型研究計画の研究クラスターを追加したものである。要素技術としてのシリコンテクノロジー、有機エレクトロニクス、フォトンクス、プラズマ科学、スピントロニクス、バイオテクノロジー、超伝導の 7 分野に加え、横断型技術として医療エレクトロニクス、環境エネルギー、人材育成の 3 分野も取り上げ、合計 10 クラスターについてロードマップを策定した。以下に、それぞれの考え方とロードマップの概要を記す。

(ア) シリコンテクノロジー

シリコンテクノロジーロードマップとして、究極の集積化技術が切り拓く多機能・高性能ナノデバイスの世界を描いている。特に、シリコンテクノロジー発展の根幹である集積度の向上を縦軸とし、その成果として小型化・低コスト化、低消費電力化、多機能化、高速化を明確に表現した。また、Si CMOS プラットフォームは時間と共に微細化・高性能化することが予想されるが、日本の半導体業界の状況を鑑みて先細りとした。しかし、一番下に表現した各基盤技術を土壌として育つ新技術がナノレベルの Si CMOS プラットフォームに合流することにより、様々な機能の集積が実現され、発展する将来を表現した。さらに、上段には必要とされ、実現されられると思われる社会・世界観を表現し、それらを実現するために必要な要求が様々な新技術と合流・融合・反応することにより、さらなる発展を生み出すことが可能であることを表現した。結果的に、将来、様々な知が集積されるシリコンテクノロジーの未来が明るいことを理解されることを願っている。

(イ) 有機エレクトロニクス

有機エレクトロニクス分野では、トランジスタ等のスイッチングデバイス(将来的には演算デバイス)、太陽電池等の発電デバイス(将来的には、蓄電、物質生産も含めたエネルギーデバイス)、電界発光素子等の光機能デバイス、アクチュエーターやセンサー等の複合機能デバイスの検討が主に行われている。

現在、印刷技術による有機半導体電子デバイスの作製が盛んに検討されている。ここ 5 年程度で、印刷技術による高分子フィルム上への有機エレクトロニクスデバイス作製技術が確立され、安価で軽量、かつ柔軟なデバイスの製造技術が確立されるものと期待される。その後、デバイスの高効率化と集積化・高密度化が進み、トランジスタ等のスイッチングデバイスにおいては、単分子トランジスタの実現やその集積化が検討され、分子レベルの演算デバイスへと研究が進む。

発電デバイスにおいては、太陽電池に加えて、熱電変換素子等が実現され、集積化が進むと期待される。人工光合成による物質生産も視野に入るであろう。光機能デバイスにおいては、発光素子の高効率化が進み、有機半導体レーザーが実現され、それを用いた光通信素子や光演算素子の実現が期待される。アクチュエーターや化学センサーの大面积化や高機能化も重要な課題である。

(ウ) フォトニクス（光・量子エレクトロニクス）

まず、2013 年～2020 年は光波発生・計測・制御技術の確立の時期であり、光・量子エレクトロニクスを支える基盤となるレーザー技術・光制御技術が成熟する。特に、アト秒レーザーやテラヘルツ波等の極限光波が光物質科学やナノフォトニクス等の基礎研究のみならず、光計測応用やレーザー加工等の応用研究でも簡単に使えるようになり、分子イメージングや超解像マテリアルプロセッシングが可能になる。また、プラズモニクスや量子ドットの進歩により、光デバイスの超小型化が可能になる。さらに、コンピュータの進化によって、光情報プロセス・光メモリや光ヒューマンインターフェースは急速に進歩し、ユビキタス技術や3D技術が大胆に導入されるようになる。

次に、2020 年～2040 年は光波による物質のコヒーレント多次元制御の黎明時期と位置づける。レーザー技術・光制御技術のさらなる成熟に立脚し、従来、不可能であったナノスケールの分子や超分子の波動関数やエネルギー状態をコヒーレントに制御できるようになる。その結果、光による化学反応のコヒーレント制御を始め、分子並びに超分子の光による捕捉や操作(マニピュレーション)が可能になる。応用分野では、量子 OCT 等を駆使した生体機能のイメージング技術が確立されると共に、究極の3Dディスプレイであるホログラフィックテレビ等が登場する。さらに、脳機能を光で能動的に制御した新しいヒューマンインターフェース技術等も登場する可能性がある。

2040 年～2050 年は光波による物質のコヒーレント多次元制御がさらに進展し、化学反応のコヒーレント制御技術が確立し、創薬を始めとする応用分野へ応用されるようになるであろう。また、分子マニピュレーションを活用したライフサイエンス等も胎動するであろう。これらを背景に革新的フォトニクスが誕生するであろう。

(エ) プラズマ科学

社会の根幹を支えるエレクトロニクスデバイスの製造プロセス技術の極限と、その先のバイオ・有機材料の自己組織化による分子レベルデバイス、さらに究極的には原子レベルのデバイスをテクノロジードライバーとして、それらを実現するシーズ（原理）の研究をトップダウンプロセス、ボトムアッププロセス、共通基盤技術に分けて記載した。

トップダウンプロセスでは、反応種生成とその分布制御を、寸法、圧力、フェイズ（媒体相）にわたり実現する原理原則を見出す。また、反応を起こす表面への活性種輸送、原子、分子或いはバイオ細胞等の粒子ごとに制御した反応場の形成が研究対象となる。これにより、エネルギー制御した単活性種の選択照射や実用的な反応速度を持つ単原子層の堆積・エッチング、或いは生体分子操作が実現される。

ボトムアッププロセスでは、自己組織化成長を生産技術として実現するために、高速化、無欠陥化の可能性を追求する。律速機構の解明とトップダウンプロセス研究の活性種輸送の成果を融合し、自己組織化のための反応場制御原理を確立する。

共通基盤技術は計測技術とシミュレーションを取り上げた。計測できないものは制御、加工はできない。原子レベルの生産プロセスの実現には、精度を不確定性原理の極限まで追求し、反応場に影響を与えない無擾乱計測や反応制御と融合した計測、瞬時計測、全反応場の同時計測、ナノ構造の反応計測、プロセス中のデバイス特性その場計測、シミュレーションと融合した予測計測等の原理追求が必要である。

シミュレーションでは、高精度化に加え、マルチスケールでの高速計算、モデル化手法が課題である。基礎データとして、原子分子の電子・光励起断面積や反応確率、表面反応素過程のデータ収集は適宜その対象を変え、高精度化や利用しやすさを考慮して推進される。励起状態にある活性種、活性表面の素過程データの収集は大きな課題である。

上記基礎研究により反応制御の原理が確立されれば、技術開発により、現実の生産技術へ展開する。モニターやシミュレーターを利用しやすいチャンバ装置構成でフィードバックを容易にし、生産性、制御性を高めることができる。反応制御原理に基づき、高精度、大面積、安定性、生産性を追求する。

ディスプレイ、バイオ、エネルギーデバイス、環境技術のアウトプットへ向けて、技術開発を展開し、それらの応用ごとに高生産性・高性能な装置、1原子を制御する自律型製造装置、さらには有機・バイオの特性を活かした自己組織化反応による生産技術を実現するロードマップとした。そして、医療分野への展開として、医療用プラズマの計測と分子生物学による理解、及び安全性評価を通じた実用化への道筋を示した。さらには、農学、薬学等への波及効果を挙げた。

（オ）スピントロニクス

電子の持つスピンの性質を積極的に工学応用するスピントロニクス分野は、量子情報、フォトニクス、高周波応用、熱変換、情報記録の根幹となるストレージやメモリ、さらにはロジック回路等、材料開発や物性解明に立脚した応用物理学の基盤分野として重要な学術領域である。今後は、スピン系量子計算及び量子メモリの開発に基づく集積化された核スピン量子コンピューターへの展開、スピン

フォトダイオード等の実現を目指した光スピントロニクス確立、スピントルク発振等スピンの高周波応答を利用した高周波スピントロニクスデバイスの実現、スピンと熱との相互作用による局所素子冷却・熱スピン流生成技術の確立等が中核的課題となる。さらに、磁気ストレージの記録容量を向上させるため、エネルギーアシスト記録に代表される新記録方式の検討や、新材料の適用による磁気抵抗素子や記録媒体の特性向上等も重要な課題であり、また、超低消費電力動作を実現できるスピンを用いた不揮発・書き換え可能ロジック回路の開発も重要となる。以上の技術は、新しい機能性材料の開発やスピンに関わる物性物理の理解なくしては飛躍的な向上が困難であり、新材料探索やスピン流、ナノ磁性における基礎学問体系の確立も中核的課題となる。

(カ) バイオテクノロジー

バイオテクノロジー分野で研究開発を行う最終的な目的は生命現象と生体機能を理解し技術、システム、装置として利用することであり、当該分野における近年の進歩や発展は著しく、医療、新薬、食品、その他多くの新商品として人類及び社会に貢献している。その究極の目標は不老長寿、持続可能社会の実現、食料やエネルギー問題の解決、病気根絶、大気浄化、自然との共生といったやや抽象的な内容と思われる。

特に人類にとって「健康で元気なまま長生きしたい」というのは古今東西共通した欲求であり、人類が抱える種々の問題を解決すると共にバイオテクノロジーを駆使した不老長寿の確立は人類にとって夢である。そのためにはガン等の疾病を予防診断し完全に治療する必要がある。また、現在では未だ想像の世界から脱し得ないが、細胞1個から臓器を複製し、自己修復を行える究極の再生医療技術が30年以内に完成するかもしれない。

またバイオテクノロジー分野のみの成果として生み出されるわけではないが、30年後には1人に1台の割合で介護ロボットが使用されている可能性があり、機械、材料、システム、センサー、バッテリー等の要素技術にバイオテクノロジーの成果が大きく貢献することが期待される。そのため基礎基盤となる各基盤技術、新規学問領域開拓等の確立が現在、急務である。

(キ) 超伝導

超伝導は特異な物理現象の1つであり、その発見以後1世紀を経た現在でも基礎物理的研究や新超伝導物質探索研究が活発である。超伝導という特異な現象を利用しているため、超伝導材料には基本的に競合材料がない。そのため、ゼロ抵抗・高電流密度・マクロな量子効果等の特性を活かし、幅広い分野で応用研究が展開されている。その一方で、超伝導状態を保持するための冷却負担が材料開発や応用・普及の足枷となっているが、約4半世紀前の銅酸化物高温超伝導体の発見により、この冷却負担が軽減されることによって超伝導応用が加速され、また

この発見が室温超伝導体発見への足掛かりになると期待された。その期待に応えるように、現在までに高温超伝導体を用いた線材・デバイスが実用域に達しており、同時に従来の金属系超伝導体も含めた各種超伝導材料の用途は広がっている。また、それらと並行した最近の材料・機器・回路等の開発動向を見ると、超伝導応用が多様な施設・機器・デバイス等で確実に進むと予想される。

超伝導クラスターは、物質・材料開発、電力・産業機器応用、エレクトロニクス応用の3つ観点からロードマップを作成した。物質・材料開発については、高臨界温度の新超伝導体探索が様々な元素系で今後も進展することを想定すると共に、広範な実用に適する線材・薄膜の開発の方向を示した。電力・産業機器応用では、現在MRI等に広く利用されている超伝導電磁石に加え、リニア鉄道や核融合炉への電磁石応用の展開、船舶・自動車用のモータの開発・普及、さらに超伝導送配電線の実用化、自然エネルギーと組み合わせた全地球電力網の構築を描いた。エレクトロニクス応用ではSQUID等の超高感度センサーの多目的応用、各種通信応用、超伝導LSIや量子通信・量子コンピューターへの展開を表した。

(ク) 医療エレクトロニクス

心身共に健康で長生きするためには、QOL (Quality of Life) の高い医療が求められる。このことを実現するためには、超早期の段階で疾病を発見、確定診断を行い、治療による身体への侵襲を最小限にすることが必要となる。したがって、疾病に関係する特定分子を検出できる検査機器や画像診断装置、低侵襲手術を可能とするロボットや、放射線、超音波、光等を用いた非観血標的治療機器等の開発は中核的課題となる。

五大疾病に指定されている、ガン、脳卒中、急性心筋梗塞、糖尿病、精神疾患は、生活習慣が大きく影響すると考えられることから、予防医療のための機器開発は重要課題である。特に、若年層における死因の1位である自殺との関連が強いとされる精神疾患の患者数は、ガン患者の2倍以上に達しており、精神疾患に対する検査機器開発は、社会的意義も大きい。疾病を未然に防ぐ観点からは、遺伝子診断技術も重要である。予防医療は健常者の日々の健康管理に繋がるものであり、これらの膨大なデータを一元化して管理し、いつでもどこでも使えるようにする情報通信技術や医療ビッグデータとして活用する技術が必要とされる。

すべての疾病を早期に発見し、根治することは不可能であり、慢性化した疾患に対して継続的なモニタリングを行い、適切な治療や投薬ができるようにする機器や、失われた機能を代行する人工臓器、iPS細胞等を利用した機能再生の発展が期待される。QOLの観点からは、患者や高齢者の生活支援や癒し、見守りを行う看護・介護支援機器も医療エレクトロニクスの重要課題となる。

(ケ) 環境・エネルギー

化石燃料やウランはいずれ枯渇する。エネルギー供給を持続可能にするイノベ

ーションは、世界の最重要課題の1つである。エネルギー需給の均衡には、効果的な省エネルギー技術の導入・普及と、無尽蔵の自然エネルギー利用への転換とが必須と考えられる。本ロードマップは、技術を、システム、エネルギーの創出、省エネルギー・基盤技術の3つに分け、それらが有機的に発展し、社会基盤として機能していく流れを矢印で示した。

省エネルギー技術については、デバイス物理に基づき動作原理や構造を革新して大幅な省エネ効果が得られる、スピントロニクスや量子デバイス、超伝導、熱電発電等の新技術の実用化が期待される。一方、自然エネルギーを利用するためのエネルギーデバイスでは、太陽光や風力・地熱利用技術の進展に合わせ、それらのエネルギーを貯蔵・輸送しやすい燃料に効率よく転換するシステムの実用化への期待が急速に高まっている。太陽電池や燃料電池、2次電池を組み合わせ、或いはそれらを融合・変形させる多様な挑戦が、ナノ界面の物理化学の深耕と共にハード面の成果をさらに生むものと期待される。加えて、エネルギーの地産地消、電力マイクログリッド、熱電併給、ICTを活用した広域の需給調整等を含む社会のエネルギーシステムのスマート化を図れば、エネルギー供給の持続可能性が飛躍的に高まるものと予測される。

(コ) 人材育成

人材育成ロードマップでは、教育と男女共同参画の観点からロードマップをまとめた。

教育の要である初等中等教育においては、人類の発展に対する科学・技術の貢献について小学校から学び、科学・技術に対する憧憬、興味、理解を育てる。高等教育においては、専門家のみならず幅広い人材の創出を目指す。これまで大学での理工系教育は専門科目に偏っていたため内向き思考に陥りがちであった。そこで、文理及び他学部交流を行い、大学自体の持つ多様性を活かした人材のメルティングポット化により理工系人材を活性化し、戦略的思考能力を持つ若者の出現や、融合分野の創出を促す。また、文理をまたぐ多分野の人材の流動化を容易にする。さらに、起業家マインドを持つ若者や、技術の目利き能力を育て、科学・技術主導の新産業の創生を目指す。

男女共同参画においては、男女が均等に責任を担うべき社会の実現を目指す。種々の法整備、施策により育児休職等の制度は整備された。しかしながら社会全体が未だ家事・育児は女性の仕事との意識が強く、この固定的性別役割分担が社会構成の前提であり、長時間労働を是とする環境にあつては、社会進出した女性は家事・育児に伴う就業の中断、仕事との両立に苦しむか、男性と同様な仕事環境を選択せざるを得なかった。そこで、業務効率化、人材配分の適正化を行うと同時に、深夜残業の禁止等強制力を持って労働時間の低減を図り、男性の家事・育児の分担を促すことで女性が働きやすい環境へと改革し、男女が平等な構成員である社会の構築を目指す。

我が国の未来は、科学・技術によって切り拓かれる。そこでは理工系の素養を身に付けた人材が、男女の区別なく、リーダーとして、研究者として、教育者として、個々の多様性を活かしながら、生き生きと活躍する活力ある社会が実現されている。

イ エネルギーと資源

エネルギー・資源学会が(ア)から(ウ)までを取りまとめ、(エ)については、文部科学省科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会 原子力科学技術委員会に設けられた「群分離・核変換技術評価作業部会」での議論に基づき、日本原子力研究開発機構と日本学術会議 基礎医学委員会・総合工学委員会 放射線・放射能の利用に伴う課題検討分科会との連携によって取りまとめられた。さらに、(オ)については、日本学術会議総合工学委員会・材料工学委員会合同持続可能なグローバル資源利活用に係る検討分科会と資源・素材学会との連携により取りまとめられたものである。

(ア) 持続可能かつレジリエントなエネルギーシステムを実現する研究開発や制度

地球温暖化問題や在来型化石燃料資源の枯渇等、環境と資源の両面における地球規模の有限性のもとで持続可能なエネルギーシステムの構築が求められている。大規模災害等へのリスクに対してより強靱であり、迅速かつ柔軟な回復力を有するレジリエントなエネルギーシステムの重要性も、東日本大震災を契機として改めて再認識されるに至った。さらに、情報通信技術を活用したスマートエネルギー利用等、需給統合型のシステム構築に向けての検討も活発になってきている。

このような状況を踏まえ、①太陽、風力、バイオエネルギー、地熱、海洋等の各種再生可能エネルギーや、より高度の安全性を確保した原子力、シェールガスに代表される非在来型エネルギー利用、及び水素等の新しいエネルギーキャリアといった「供給オプションの維持拡張」を図るための活動、②非化石エネルギー技術やCO₂回収貯留(CCS)の開発による長期的なゼロエミッションを目指した「低炭素化」のための活動、③従来以上に「レジリエントなエネルギーシステム」の実現に向けた活動、④転換効率向上や最終需要機器効率向上等を組み合わせた適切なエネルギーマネジメントの実現により、エネルギー利用の一層の高度化に向けた活動を推進する。

(イ) 各種資源の効率的利用・リサイクル推進及び利用ポテンシャル拡大に関する活動推進

循環型社会の構築は、稀少な天然資源の消費抑制と廃棄物管理・抑制の両面において有効な方法である。金属（ベースメタル・レアメタル）、水、プラスチック等の各種資源を、環境負荷が小さくかつエネルギー節約型の利用を追求する研究開発及び制度整備が継続して必要である。都市鉱山・プラスチック・紙・水等の

「廃棄物処理とリサイクル」の推進、また新型軽量材料・新型パワーエレクトロニクス材料・新型触媒等の「新型機能素材」の開発や普及を図ると共に、それらを支える基盤技術である分離技術・ナノテク素材設計技術等の「材料基盤技術」の研究を推進する。

さらなる資源の利用ポテンシャル拡大を図るため、海洋資源や宇宙資源等の利用可能性についても、基礎的な調査研究活動を継続する。

(ウ) エネルギー・物質・情報を統合した次世代産業基盤の創出

エネルギー需給と情報を組み合わせたエネルギーの高度面的利用、物質生産・利用・廃棄とエネルギー利用との組み合わせは、それぞれ、スマートエネルギーネットワーク、コプロダクションとして既にその概念が整理されつつあるが、持続可能な産業・社会基盤の確立に向け、エネルギー、物質及び情報を統合して取り扱い、適切に管理していく統合マネジメントの概念を確立し、その普及を図る。

従来の生産・利用・廃棄というワンスルーの開放利用に対して、物質に体化されたエネルギー量の把握とエネルギーの質を考慮したエネルギー・物質統合フロー解析に基づき、再生を強化し生産に戻す各種プロセスの開発によって、エネルギーと物質の両面における循環型産業システムの形成を推進する。また、エネルギーネットワークの時間的・空間的なギャップを埋めるための供給、需要及びその変動要因に関する情報群を適切にマッチングさせ、電力や熱の有効利用のエネルギー需給・情報システム、及びその実現に必要な基盤技術の開発及び普及を図る。これらの活動は、エネルギー・物質・情報を統合した次世代産業基盤の創出に繋がるため、その理想的な姿を社会的・技術的な実現可能性を踏まえて描く。

(エ) 加速器駆動システムによる長寿命放射性廃棄物の核変換技術への挑戦

原子力利用の結果生じる高レベル放射性廃棄物は、その確実な処理処分が世界共通の課題となっている。放射性廃棄物処分の負担の大幅な軽減を目指し、千年を超えて放射能の影響を保持し続ける長寿命核種を高レベル放射性廃棄物から分離し、加速器駆動システム (Accelerator Driven System、ADS) を使って安定または短寿命核種に変換する技術の研究開発を推進する。この技術の実現には数十年を要すると考えられるが、国際的・学際的な協力のもと、理学・工学の広範囲な分野のポテンシャルを結集する。

(オ) 持続可能な鉱物資源の開発と利用

レアメタル・ベースメタルを問わず、鉱山における資源の質の悪化と開発条件の厳しさは年々高まってきており、これまでのように鉱物資源を安価に生産・消費できる時代は過去になりつつある。より深部化、僻地化する金属鉱床を探査・開発する技術の開発、鉱石の品位低下や不純物の混入等より処理が困難な鉱石を金属化する技術開発が求められている。また今日では、技術面にとどまらず、責

任ある持続可能な資源開発を目指して、開発地域の環境と社会文化にも最大限配慮した包括的な対応にもこれまで以上の努力が必要である。さらに消費国では、より経済性の高いリサイクル技術とそれを支える社会システムの確立が求められる。

加えて、我が国の喫緊の課題としては、これらに携わる人材の不足が顕著であり、大学と学協会、民間企業、政府が協力して長期的に人材育成に取り組み、海外の資源国で活躍できる人材を輩出することが資源の安定確保に繋がる。

ウ 航空宇宙

航空・宇宙分野においては、航空と宇宙という大きく2つの分野について、ビジョンとロードマップを起草している。

航空技術については、素材から製造、輸送、整備から人材育成まで、7つのカテゴリについて、2040年代までを見通して、ビジョンを構想図を用いて展望し、各年代に実現すべき事象や製品を、航空夢ロードマップとして記述している。特に、革新を続ける機体材料、水素を燃料とする脱炭素時代の航空機、超音速・極超音速旅客機等の出現に繋げる工程を掲げて具体的に説明している。

宇宙技術については、宇宙輸送、宇宙探査・科学、及び宇宙利用・地球観測の3つのカテゴリーに分け、今後30年を見越した、ビジョンを展望している。特に、宇宙輸送面で起こるであろう航空機とロケットに代表される宇宙機の融合、無人惑星探査や有人月惑星探査、地球重力圏界に建設が想定される深宇宙港、産業化と利用が拡大される地球観測について、ロードマップを示して実現への道筋を明らかにしている。

(ア) 航空宇宙科学技術のビジョン

a 航空分野のビジョン

航空分野では、以下の7つのカテゴリーに整理した。

- (a) 新素材
- (b) エネルギー
- (c) 航空製造技術
- (d) 航空輸送技術
- (e) 航空機整備技術
- (f) 航空文化
- (g) 航空科学技術と人材育成

各カテゴリーについて、2040年代までを見通して我が国のあり姿を想定することにより、いずれにおいても大国となるべく、航空夢ロードマップにおいて各年代に実現すべき事象や航空関連製品を想定する。

b 宇宙分野のビジョン

宇宙開発のモチベーションの1つは、宇宙が人類の知的な欲求を満たす科学対象の1つだからであり、そのために様々な高度な技術開発を行って宇宙観測や探査を推進してきた。今後とも果敢に挑戦し続けることに揺るぎはないだろう。

しかし、1960年代から始まった商業宇宙通信運用を皮切りに、衛星を活用した宇宙産業利用（宇宙から伝達されるあらゆる情報の質、量の拡大）は、拡大の一途を辿っており、ロケットによる衛星打ち上げ事業にも商業化の波が訪れている。高度であっても高コストな宇宙技術では通用なくなり、より民間の技術力を活用した低コスト化への新しい転換が求められており、今後ともこの傾向がますます強くなると思われる。

一方で、宇宙を利用する産業ニーズにも、既に宇宙観光に目が出つつある通り、今後30年を見越すと、宇宙輸送の技術を応用した地球上2点間の極超音速輸送であるとか、太陽発電衛星に代表される宇宙資源の活用等々のような大きな変化が起こることが予想される。

しかし、現時点での宇宙開発に関わる技術レベルでは、商業化ができたとしても民間の力で宇宙産業全体を牽引するまでには成熟しておらず、また現に民間マーケットもほとんどないのが実情である。したがって、宇宙開発を推進するのに必要な当面の技術開発は、国策レベル進めていくべき事業であることは明らかである。

宇宙夢ロードマップを

- (a) 宇宙輸送
- (b) 宇宙探査・科学
- (c) 宇宙利用・地球観測

に分けて示す。

(イ) 航空分野の夢ロードマップ

航空分野では、以下7つのカテゴリーに整理した2040年までの夢ロードマップを示す。

- (a) 新素材
- (b) エネルギー
- (c) 航空製造技術
- (d) 航空輸送技術
- (e) 航空機整備技術
- (f) 航空文化
- (g) 航空科学技術と人材育成

また、上記ビジョンが実現した場合に描かれる具体的構想図も示す。

(ウ) 宇宙分野の夢ロードマップ

a 宇宙輸送の夢ロードマップ

現在の宇宙輸送は、使い捨てロケットによるものであり、新しい製造や運用技術の開発により打ち上げコスト低減の努力が行われてきている。しかし、宇宙空間利用を飛躍的に拡大するためには、完全再使用型宇宙輸送システムの実現により宇宙アクセスのハードルを一挙に下げることが必須である。

ここ数年の出来事としては、宇宙観光旅行を目的とするサブオービタル宇宙輸送システムが商業運航を行うことになるだろう。そのサブオービタル技術と使い捨てロケット技術との融合によって進化発展する形態として、2020年代には宇宙ステーションへのアクセス手段としての部分再使用型、そして2030年代には完全再使用型2段式宇宙輸送システム(TSTO: Two Stage To Orbit)が出現するであろう。それらTSTOには、1、2段ともロケット推進段を組み合わせた形式、或いは1段が極超音速エアブリーザで2段がロケット形式の2種類が候補となる。

ここで1段目の極超音速エアブリーザは、有人宇宙輸送のための安全性や信頼性の向上が図られることで大陸間の極超音速旅客機へ発展し、2040年代には東京とニューヨークを2時間で結ぶ旅客輸送構想が現実のものになるだろう。

単段で宇宙と地表を往復する1段式完全再使用宇宙輸送システム(SSTO: Single Stage To Orbit)、いわゆる夢のスペースプレーンは、ロケット式とエアブリーザを取り込んだ複合エンジン(RBCC: Rocket Based Combined Cycle)の双方向の構想で検討され、2040年後半から2050年代には実現されよう。

ところで、静止軌道への究極的な宇宙輸送手段の1つとして宇宙エレベータ構想がある。ケーブル用の超軽量かつ超高強度の革新的材料技術が現実のものになれば、短時間で厳しい環境に耐えながら宇宙に飛び出す時代は終了し、現在の超高層ビルに上る感覚で宇宙空間へ移動する世界がやってくる可能性も夢ではない。

その他、2030年代には、軌道間を移動する有人宇宙船、重力天体に着陸する有人着陸機、さらに軌道間の物資輸送手段として高速輸送に使うCPS(Cryogenic Propulsion Stage)と少ない燃料で効率的に物資を運ぶ電気推進式軌道間輸送システム(OTV: Orbit Transfer Vehicle)が登場するであろう。2050年以降には、太陽光がふんだんには使えなくなる深宇宙探査に必要な輸送や、大推力電気推進機で、原子力発電を活用した電気推進システムが実現し、人類の宇宙活動の範囲はさらに広がっていくことであろう。

b 宇宙探査の科学の夢ロードマップ

宇宙とは、人類の知的欲求の根源であり、様々な知的挑戦を展開する舞台でもある。その宇宙観測と太陽系探査は、創造性豊かな科学活動を実施する意味

において、また宇宙探査は、人類の活動領域を広げるという面において重要である。

(a) 宇宙観測

宇宙望遠鏡を全波長域に展開し、各種天体や銀河及びブラックホールを観測することにより宇宙の姿を探り、その構造と開びやく以来の進化を明らかにする。2020年代には編隊飛行望遠鏡、干渉型高解像度望遠鏡を、2030年代には重力波望遠鏡等を実現し、重力環境や熱環境等が優れたラグランジュ点へ配置する等、性能向上や観測範囲の拡大を目指す。その他に磁気圏観測衛星等で地球近傍の宇宙空間の観測も行う。

(b) 太陽系探査

水星、金星、火星といった地球型惑星や月の探査を進め、その内部成層構造や原材料物質等を知ると共に重力天体周回軌道への投入技術や着陸技術の向上を図る。2020年代には、宇宙ロボティクス技術や惑星表面移動技術を活用した探査、金星気球や火星飛行機のようにそれぞれの天体に適した探査手法を用い効率的に探査を実施する。

小惑星探査として、ランデブミッションや往復探査によるサンプルリターンミッションを実施する。様々なタイプの小惑星をより多く探査することで、太陽系の起源に迫ることが可能になる。木星型惑星とその衛星、トロヤ群のような木星以遠の小惑星の探査も、太陽系の生い立ちを探る上で重要である。

また、ソーラ電力セイルのような日本独自の深宇宙航行技術を開発し、活用することで、木星圏及びそれ以遠の探査、さらには太陽系全体に活動領域を広げることを目指す。

(c) 有人探査

我々にとって最も身近な天体である月においては、数々の探査機によって調査が進められてきており、将来の利用に向けた活動を進める段階にきている。今後、越夜技術や移動技術について研究を進め、さらにこれまで培ってきた有人宇宙活動技術を発展させることで、本格的な月開発への道を拓くことを目指す。火星も月と並んで、将来の有力な人類の活動領域の拠点となりうる天体である。水の有無や表面の環境の調査を進めることにより、有人活動への可能性を探っていく。

小惑星は近年、米国を始めとする諸外国が有人探査の候補として注目している。小惑星は一度溶けてしまった大きな重力天体とは異なり、人類に有用な鉱物が表層に存在する可能性がある。探査によって鉱物資源としての可能性を探ると共に、利用のために捕獲、移動、そして宇宙空間で資源を抽出する技術について研究を進めていく。

(d) 深宇宙港

はやぶさで実現されているような往復探査では、宇宙空間における探査の拠点が重要となる。宇宙空間において燃料補給、宇宙機の整備を行うことができれば、深宇宙探査機はより効率的に探査を進めることが可能になる。拠点としては太陽-地球系のラグランジュ点が有力な候補である。少ないリソースで投入や維持が可能なラグランジュ点を深宇宙探査の拠点とする「深宇宙港」の実現を 2040 年代以降に目指す。太陽-地球系だけではなく、地球-月系のラグランジュ点についても、宇宙インフラ建設の有力な候補地点である。

c 宇宙利用・地球観測の夢ロードマップ

(a) 宇宙環境利用

当面は、国際宇宙ステーションをプラットフォームとして、将来の有人活動に必須となる技術の研究開発及び軌道上実証を進める。地球圏宇宙での経済活動の拡大には、地球上と異なる体験的価値の個人サービス提供が先導的役割を果たす。近い将来、大気圏外の観光や宗教行事等の短時間飛行が始まり、低重力環境利用の遊戯や療養施設等長期間滞在の提供へと段階的な発展が期待される。

2030 年代以降は、月面、小惑星、火星基地等を利用したプロセッシングを行う。再生型から閉鎖型の生命維持技術を経てテラフォーミングへと進展していくことが予想される。

安定してクリーンな電力供給を可能にする太陽光発電衛星は、地政学的な影響も少ないことから 2020 年代早期を目途に実用化に向けた見通しを付け、2030 年頃の実用化を目指す。

(b) 測位

我が国の衛星測位システムを使ったナビゲーションの高度化と地上系通信システムとの融合により、2020 年代には、自動車や農業機械等の自動運転、航空機や船舶等の衝突防止が可能になり、安全な交通網の形成と劇的な事故の低減が実現する。歩行者は、入り組んだ駅や地下街等でも迷わずに目的地まで快適に行くことができ、途中の店舗情報等も取得できる。物流においては、タグによる位置情報の取得により工場や倉庫の自動化が進む。地震、土砂崩れや雪崩等による行方不明者の救出も迅速に行えるようになる。

位置認証や時刻認証、また本人認証がいつでもどこでも利用できるようになる。高精度時刻情報が必要な次世代地上デジタル送信所や携帯電話基地局等でセシウム原子時計並み(精度 1ns)の時刻情報が使用できるようになり、高速化が進む。

GPS 気象学によりリアルタイムで全国の気象や電離層等の状態を知ること

ができる。火山、地震や津波観測網による予測と合わせて、的確な避難ルート情報が得られ、各種機関での情報共有によるスムーズな物資補給等や安否確認等が確実に行われる。

(c) 通信・放送

今後、地上や海洋、上空や宇宙の3次元空間のいつでもにおいても、地上や衛星ネットワークの区別を意識することなくシームレス衛星通信が可能になる。災害時や高速移動体、洋上船舶等との間の過酷な環境でもブロードバンド通信が可能になる。

高精細大容量の観測衛星のデータを衛星－地上間及び衛星間で伝送するための光通信装置の小型化、大容量化及び多元接続に関するサービスが実現し、災害時の被災状況の把握において極めて有効な観測データが伝送可能になる。既に量子鍵配送が衛星レベルで行われており、地球規模の無条件の情報安全性が確保されている。

(d) 地球観測

「より多くの手段で」「より詳細に」「より多くの波長で」「できるだけ高い頻度(時間分解能)で」、地球観測データを取得し、人類の必須データとして定着する。

2020年代には、超低軌道衛星、極軌道周回衛星及び静止軌道等様々なプラットフォームをコンステレーション運用し、継続性を担保しつつ発展性や革新性を考慮した高度なセンサデータが取得される。観測データは、オンボードでのデータ処理を経て携帯端末でも受信され、リアルタイムのビックデータとして情報利用される。利用コミュニティが大きく広がり、地球を理解し持続的な発展を目指すための根源データが完備される。

エ 計算科学シミュレーション分野（工学設計中心）

本ロードマップは、総合工学・機械工学委員会合同の計算科学シミュレーションと工学設計分科会の計算力学小委員会が中心にまとめたものである。この小委員会は工学関係の計算力学を推進している、日本機械学会、日本計算工学会、日本シミュレーション学会、日本応用数理学会、日本計算数理工学会、日本計算力学連合、可視化情報学会の代表からなる。本ロードマップをまとめるにあたり、計算力学小委員会のいくつかの学会が深く関わっている横関連合でまとめられたビジョン（[4]、[5]）や今後10年程度を見据えた我が国のHPCI計画の推進のあり方について新たな戦略を調査検討するため、2012年2月に文部科学省に設けられた「今後のHPCI計画推進のあり方に関する検討ワーキンググループ」の中間報告等も参考とした[6]。

(ア) 計算科学シミュレーション推進の現状組織と理想の組織

ものづくりに多大な貢献をしてきた計算科学シミュレーションは、京や来るべくエクサコンピュターの能力を最大限に利用するための並列処理技術やマルチスケール・マルチフィジクス解析技術の開発等ますますの深みが求められている。そのため、理化学研究所には京等の運用や計算科学技術の幅広い分野を支える計算科学研究機構(AICS)が設立されている。「京」や、全国の9つの大学が保有するベクトル型を含むスーパーコンピュータや大規模ストレージシステムをネットワークで結び全国共同利用を進めるHPCI(資源提供機関)もある。京等の運用には一般社団法人HPCIコンソーシアム等と協力して進められ、計算科学シミュレーションの推進には、分野1(生命科学)、分野2(新物質・エネルギー)、分野3(防災・減災)、分野4(ものづくり)、分野5(物質と宇宙)に分けて進める文部科学省HPCI戦略プログラムとの連携もある。学術的な深みを追及しつつ、一層の広がりを得るには、数学・数理科学や情報科学を前面にした研究を推進し人材を育成することが重要である。これらを実現するには、これらの明確なミッションを有する計算科学シミュレーション先端基盤国際共同拠点(以下、計算科学共同拠点)を設置することが欠かせない。

この計算科学共同拠点の研究推進と人材育成のミッションは次の通り([7]、[8])。

- 1) 基盤的アプリケーション・ソフトウェアの開発やアプリケーション・ソフトウェアをカスタマイズして、設計システムに実装
- 2) このような設計システムを駆使して、製品のブレークスルーや減災や災害を未然に防ぐための対策案の提供
- 3) シミュレーションソフトウェアの維持・改良・発展を効率良く実施
- 4) 品質保証を体系化し、標準化
- 5) マルチスケール・マルチフィジックスのシミュレーションを成功に導くための、化学或いは物理或いは生物と数理(ゲノム等の大量データから何らかの法則性を得たり、非線形現象に対応する確率統計を考慮した数理モデリング、計算スキームの作成等)及び計算機科学(ソルバーの開発、並列計算実装、計算性能最適化、ハードウェア等)にわたる広いスペクトルの範囲で少なくとも連携できる能力

この計算科学共同拠点と全国の研究室をネットで結び、Inria 研究所等世界の有力な組織とコネクションを結び共同研究・共同開発も行える組織とする。

(イ) 関連学会との広がり

工学設計から広がりを見せる計算科学シミュレーション関連の学会について述べる。自動車の衝突シミュレーションで大きな成功を得た計算科学シミュレーションは、これをきっかけとして適用範囲をどんどんと広げていった。計算力学関連学会に所属する研究者を広くカバーする組織としての日本計算力学連合(JACM)

は、工学関係の 25 の学協会から構成される。今後は、夢ロードマップ 7-4-2 に示されるように理学や医学等他分野との連携や第 4 の科学であるビッグデータを扱う学会との深い連携が期待される。

(ウ) 心と脳シミュレーション

製品開発でいえば、マルチスケール・マルチフィジクスの領域は未だ十分ではないが、マクロレベルの解析はほぼ終了している、残された課題は、乗り心地、音質等人間の心に関する課題である。表情を見て各個別の心の特性の把握を試みる研究は既にスタートしている。今後は、疲労を軽減するための癒しの構造や満足度の把握が顔の表情だけでなく生体情報や動作等のフュージョン技術により把握できるようになる。人間の意識の発生と時間発展のシミュレーション等も可能となる。また、ヒトの脳は約 10^{11} 個の神経細胞で構成され、各々の神経細胞が 1 万個の別の神経細胞と結合するという複雑な構成となっているが、この複雑な脳をまるごと解析することの一部実現が得られると予想されている。

(エ) ものづくりシミュレーション

自動車为例にすると、部品レベル、シャシー、エンジン、ボディ等の系レベル、車両全体それぞれに試験項目があり計 400 項目にもわたる。これらの性能間にはトレードオフの関係にあるものが多いが、商品設計のコンセプトに基づきボタン 1 つでこれらの確認ができるようになる。人間特性の検討、作業者のヒューマンエラーを極力少なくする製造法も検討できる。統計処理を駆使して各仕向け地への商品の適切な配置数の設定、仮想現実感で仕向け地での走行フィーリングも実感できる。製造も見たものはすぐモデリングでき特性把握もできる。第 4 の科学といわれているビッグデータ科学の成果も活用し、マルチスケール・マルチフィジクスの多大な恩恵も受けてタイヤの化学成分の変化とマクロな乗り心地の関係等も得ることができる。

(オ) マルチスケール・マルチフィジクスシミュレーション

分子・物質シミュレーションや防災・減災に資する地球変動予測シミュレーション等では分子レベルの 10^{-10} m から地球及び大気圏規模の 10^5 m のオーダーを持ち、時間規模で水分子の衝突時間 10^{-15} 秒から地殻変動等 10^{10} 秒の超大規模・複雑な広がりを持っている。このようなマルチスケール・マルチフィジクスシミュレーションもコンピュータの進歩と共に現実のものとなりつつある。そのためのシミュレーション技術として例えば分子・物質の領域では、理論化学をベースとしたモデリング系のシステムと、データベースや知識情報処理技術に基づく情報科学系のシステムで進められている。このようなシミュレーションが可能となると、機能、材料、成形法の最適組み合わせが可能となり、設計のイノベーションも得られ、今後の工学設計においても最重要なテーマである。現在は、計算力

学小委員会に所属する研究者においても心臓シミュレーターの開発を始めその適用が進みつつある。今後の心と脳の領域のシミュレーションにおいても必須のものである。このロードマップは、例えば文献[7]等にも示されており、ここではそのことの紹介にとどめる。

オ 知の統合学：価値共創するレジリエントな進化型社会を実現する横幹科学技術

科学・技術の進展に伴って工学の諸分野はますます細分化されつつある。一方、科学・技術が社会に浸透し人々の生活に深く根をおろすに伴い、安心安全社会や環境に優しい社会の実現等これまでの細分化された技術では解決不可能な社会が抱える複雑な問題が生じている。個別化して発展した個別知を統合し、現在、人類が抱えている諸問題を解決するための「統合知」とすることへの期待は大きい。この「知の統合」に向けた流れを強化していくためには、個別分野に依存しない共通の概念や方法論を確立していくことが緊要である。これが「知の統合学」という学問領域の役割であり、「知の統合」に向けた方法論の確立を通して、社会的問題の解決に大きく貢献することが望まれている。

「知の統合学」の大きな特徴の1つは、工学や、理学・医学・農学等自然科学の分野だけではなく、人文・社会科学を含む非常に幅広い学術の領域分野に適用可能な普遍的な概念や方法論を対象とする学問分野であるという点にある。すなわち、「知の統合学」は、「もの（対象）」をベースとして、どちらかというとは排他的に発展してきた個別学問分野とは性質を異にするもので、特に「コト（機能・働き）」を対象として個別分野に依存しない普遍的な方法論の確立を目指している。

また、「社会が抱える複雑な問題の解決」に向けた知の統合による総合的かつ革新的な研究に不可欠な共通の場を提供することも「知の統合学」の役割であり、学術による社会的価値の創造の基幹部分を担うことが期待されている。

横断型基幹科学技術研究団体連合（以下、「横幹連合」という）は、10 年前に発足して以来、約 40 の参加学会と共に、科学・技術の過度の細分化に異議を申し立て、個別学問領域を横断する基幹科学技術の重要性を主張してきた。中でも、自然科学と人文社会科学の間の溝は深く、相互交通のハブが必要である。横幹連合には、まさにこの役割を担うべく、異なる知の間の共通性を抽出することを通じて新しい知を創造することを目指し、文理にまたがる幅広い分野の学会が参集している。その中から、日本の科学・技術が、社会をおびやかす潜在的リスクを超克し、人間の生存の複雑さ多様さ現代社会の複雑さ多様さに対応して公共に資することのできるまでの体制が生まれることが、我々の目標である。

以上を踏まえて、横幹連合は、現時点における多様なスマート要素技術が、2020 年までには「スマートシティ」という総合的な環境において文理協力的に統合され、

さらに 2030 年までには文理融合的相互連携によってより全体的な「スマート社会」へと発展し、2040 年の段階では「価値共創する進化型社会」を達成することを目指すロードマップを提案する。ロードマップは、以下の 3 つの軸に沿って進行する。

(ア) リスクに負けないレジリエントな社会の実現

2011 年 3 月 11 日日本を襲った東日本大震災は、科学・技術の進んだ現代社会をおびやかす様々なリスクの存在を改めて我々の眼前につきつけた。このときに明らかになったのは、単に自然災害の脅威の大きさだけではなく、現代の社会的リスクが自然科学と人文社会科学の双方の領域にまたがり、複雑に入り組んだ構造をしているため、これまでのような分離分割された枠組みでは対応できないという事実であった。現代の社会の脆弱性を多方面から解析し、「マルチエージェント・シミュレーション」等を媒介として、個別要因の相互連環をシステム科学的に統合的に解明し、横幹科学技術としてこれを克服することが、レジリエントな社会実現のために急務である。

(イ) 多様性を活力とし、地球世界に貢献する社会の実現

社会的弱者或いはマイノリティの視点を社会に活かすことは、単に公正性の観点からだけではなく、多様な視座、多様な選択肢、多様な価値観を社会の中に活かすことで、社会の活力を向上させ、社会的リスクを解決する基盤ともなる。社会の多様性は、まさに社会的豊潤さの源泉であり、もう 1 つの軸である社会的公共性の保証でもある。横幹科学技術は、自然科学と人文社会科学が手を携え、「社会的期待発見」を行い、「文理共創の人材育成」を踏まえつつ、持続可能な「進化的イノベーション」の基盤を構成する。

(ウ) 弱者に寄りそい公正性を追求する社会的公共性の再構築

社会が豊かになっても、弱者に寄りそい公共性を備えていなければ、社会の中に目に見えない歪みが蓄積し、社会の脆弱性を潜在的に拡大し、社会を背後からおびやかす。社会的公正性の追求は、社会的理念として重要であるばかりではなく、社会のガバナンスの包括的基盤であり、社会的豊潤を担保する多様性確保の前提でもある。横幹科学技術は、「人工物の人間中心設計」「人間支援型制御技術」「記憶の伝承」等を通じて社会的公共性の再構築を図る。

ロードマップの各所に配置された横幹科学技術は、これら 3 つの軸を自在に超えて、相互に有機的に連携し、ダイナミックに共進化し、新たな価値の共創を持続的に可能にする進化型社会のインフラストラクチャーを実現していくのである。

カ バーチャルリアリティ技術：バーチャルリアリティが拓く生きがいのある社会

今後、我が国は少子高齢化が進むことが避けられず、労働力の低下が懸念されている。また、都市部の核家族化、地方の過疎化が進み、人と人の連帯が薄れた社会になることが懸念される。バーチャルリアリティ技術が進展することで、時間や距離、個人の能力を制約としない、裾野の広い社会参加が可能となり、これらの問題を緩和・解決することができる。これにより、誰もが社会と接点を持ち、それぞれの能力を最大限に発揮して貢献することが可能となり、生きがいのある社会を創ることができる。

まず、現在から東京オリンピックが開催される 2020 年頃にかけて、古典的な形状計測や行動計測等の技術が十分に発展し、物理世界をバーチャル世界に取り込む技術がほぼ完成する。同時に、3D プリンタに代表されるバーチャル世界の実体化技術が進展し、物理世界とバーチャル世界の相互変換が自在に行えるようになる。また、災害支援等でトレイグジスタンス技術が実用化され、離れた場所での物理世界への働きかけが可能となる。さらに、古典的な五感体感型メディアや遠隔視聴方式基盤も確立され、これらを用いて超臨場感メディアが創出され、スポーツや観光、医療等の分野への応用が進むと考えられる。これらは高速ネットワークや高性能計算基盤と並ぶ、新たな「学術基盤」となっていく。

一方、多様な感覚の記録・再生・統合、クロスモーダル技術等の研究が大幅に進展する。バイタルデータや思考・情動までのライフログを記録・分析するディープデータ技術が進展し、それらの個人利用を可能にするオープンバイタルメディアが発展する。これらは、個人の創造的活動を支える「創造基盤」となっていく。また、人の「身体」を基準とした主観的身体感覚の計測・記録・追体験に関する研究が進んでいく。

以上のような技術展開を背景として、東京オリンピックまでには、例えばスポーツ選手の主観的身体感覚の記録や再生、追体験が実現されていく。これにより、選手と同じフィールドに立ち同じ感覚を共有できる追体験型スポーツ観戦、選手の身体・認知能力の解明、効率的強化方法の探求、メディア・ロボット技術を用いた能力の補完や強化、スポーツ愛好者の拡大による国民の健康増進等が可能となる。

2020 年以降は、感覚だけでなく高次の知情意情報等の記録、再生、或いは自在なリミックス等を行う「超感覚技術」が進展していく。これらはさらに思考や認識の記録、伝達、他者との共有等を行う「超認識技術」に発展していく。また、これに連動して、脳内の意識から物理世界に直接働きかけることのできる「超トレイグジスタンス技術」が進展していき、バーチャルな情報を様々な感覚情報に変換する「可感化技術」や思い描いたものを実際に物質化する技術が発展していく。

これらの技術展開を背景として、物理世界とバーチャル世界が境目なく結ばれた「R-V(Reality-Virtuality)連続体基盤」が形成され、その基盤の上に都市－地方、個人－社会がシームレスに繋がれた社会が構築されていく。このバーチャル社会基盤の上で、時間や距離等の物理的制約、運動や認知能力等の身体的制約から解放されて、誰もが自由に社会参加、生産活動、ひいては経済的自立が行えるようになる。これには、ロボットを介したバーチャル労働や技術伝承等も含まれる。同時に、個人データや著作物、身体技能、知識体験等が自由に流通・共有・伝承される情報社会基盤が成立する。

これらを基盤として、身体のかげを超えて感覚情報や思考、認識を直接やりとりする超感覚・超認識技術と連携しつつ、2040年頃には誰もがそれぞれの個性や長所を活かしてお互いに繋がりあい、わかりあいながら生き生きと生産的・創造的活動を実施していける「ロングテール型超参与社会」が実現していく。

キ 計測・制御・システム技術

ここでは、計測・制御・システム分野のビジョンをまとめるにあたっての基本的な考え方について述べる。

未来には、おおむね予測できる未来とそうでない未来がある。未来の夢を語るとき、おおむね予測できる未来を前提条件とすることは、これから語る夢の確度を高める上で有効なことである。これらおおむね予測できる未来を前提とすることで、未来社会が要請する科学・技術を的確に予測することができるようになるからである。

今回、計測・制御・システム分野のビジョンを描くにあたり、まずこの未来社会が要請する科学・技術を考察し、これらをビジョンとした。次に、計測・制御・システムの各分野の学術の基礎となる要素を抽出した。最後に、未来社会が要請する科学・技術に対し、この学術の基礎となる要素がもたらす効用を考察することにより、ビジョンの中心にある目指す社会を実現するための分野としての考え方を導き出した。

さて、おおむね予測できる未来として、

- (a) 2050年、世界の人口増加により、地球面積にして1.5倍以上の作付面積が必要になるほどの食糧不足が訪れる。
- (b) 日本の全人口に占める65歳以上の人口比は、2030年には約30%以上、2050年には約40%以上になる。
- (c) 総じて、日本の就労人口、就労生産性が低下し、日本のGDPは低下することが予想される。

等を念頭に置いた。これらから帰着される未来社会における解決すべき課題は、

- (a) 地球の天然資源の枯渇対策
 - (b) 環境汚染対策
 - (c) 高齢化社会における高齢者の活力維持、社会・生産活動に参加できる仕組み作り
 - (d) 国内生産力の低下に対する業務・生産プロセスの効率化・自動化、新たな市場・価値の創造
 - (e) 社会リスク（自然災害、人為災害）への備えと減災
- 等になるであろう。

次に、こういった未来社会の課題を解決するために、未来社会が要請する科学・技術として、次のようなものを挙げ、これをビジョンの最外周に置いた。

(a) 新しい社会インフラの構築

具体的には、原動力ユーティリティーとしての電気システム（Smart Grid）・水供給システム・ガス供給システム、移動手段としての交通・物流システム、伝達手段としてのコミュニケーションシステム等広範な分野で新しい要請が生まれ、それに応える科学・技術が求められるであろう。

(b) 持続可能社会の実現

地球環境保全や地球温暖化防止については、既に今日でも検討の重要性が認識されている。地球資源の保持については、昨今議論が盛んなエネルギー資源だけでなく、食料資源・水資源についても、その保持のための科学・技術が求められるであろう。

(c) 安心・安全社会の実現

地震・津波・台風・竜巻・火災・土砂崩れ等の自然災害、交通事故・犯罪・建物・橋梁・トンネル崩壊・テロ・サイバー攻撃等の人為災害等への備えが求められるようになる。特に人口の高齢化と同時に社会インフラの高齢化が進むことが、予防保全や発災時の避難・誘導活動等に、従来と違った要請を生むことになる。

(d) 活気ある高齢化社会の構築

高齢化社会の訪れは避けようがないので、高齢者の就労生産性の向上を図り GDP を維持向上する要請（具体的には移動支援や作業支援等）と、非就労高齢者に対する社会負担を軽減する要請（具体的には高度医療の充実や生活・介護負担の軽減等）に応える科学・技術が求められる。

(e) 産業力向上

前述の新しい社会要請に応えるために、最も確実に成果が約束されている手段の1つは、第1次（農林水産）第2次（製造）第3次（サービス）産業の産業力を向上することである。これに応える科学・技術は、いつでも求められている。

(f) 快適・便利社会の実現

20 世紀後半に急速に発展した ICT により、計測制御技術が S2CT (Sensing, System & Control Technology) として萌芽することが予見されている。それがさらに進化

したパーソナルS2CT、ロボティクスとS2CTの融合等により、S2CTが社会の快適性・利便性の向上要請に応えていくキーワードになることが予見される。

(g) 未来志向社会の実現

人間は夢を追い求める動物でありフロンティア分野（宇宙、深海、極限環境）への挑戦は、常に社会（文明）の要請である。またこの分野へ挑戦する教育の高度化、研究開発の強化は、この要請に直截的に応える鍵である。地球上に多くのフロンティア地域が残っていた19世紀やSFの世界と違い、フロンティア分野の研究が、すぐフロンティア領域への進出に繋がることは少ないかもしれないが、この分野に応える科学・技術は、他の未来社会要請へ転用や、他の科学・技術との融合による活用が期待できる。

(ア) 科学・技術の基礎としての計測分野のロードマップ

学術の基礎となる要素を検討するにあたり、まず学術のトレンドとして、

- (a) 基礎理論・技術の深耕
- (b) 対象システムの大規模・複雑化
- (c) 異分野連携によるイノベーションの創出
- (d) 知の統合

を意識することとして、これらをビジョンの中に記述した。これらのトレンドを意識しつつ、計測分野の学術の基礎となる要素として、以下を挙げた。

- (a) 力学量計測
- (b) 温度計測
- (c) パターン計測
- (d) リモートセンシング
- (e) アンビエントセンシング
- (f) センシングフォトニクス
- (g) 先端・電子計測
- (h) スマートセンシング
- (i) 計測による逆問題

次に、これらの学術の基礎となる要素によって、未来社会の要請に応えられるであろう効用を記述した。

この効用を統合することにより、ビジョンの中心に据えられた目指す社会を実現するための計測分野としての考え方ー実世界の認識ーが導き出される。

(イ) 人工物、環境、社会の制御分野のロードマップ

制御分野の学術の基礎となる要素としては、以下を挙げた。

- (a) 制御理論
- (b) システム同定
- (c) モデリング手法

- (d) ビックデータフィードバック
- (e) 多階層フィードバックシステム・ネットワークシステム
- (f) 制御技術応

次に、これらの学術の基礎となる要素によって、未来社会の要請に応えられるであろう効用を記述した。

この効用を統合することにより、ビジョンの中心に据えられた目指す社会を実現するための制御分野としての考え方 ―実世界への働きかけ― が導き出される。

(ウ) システム（大規模複雑システムの設計と構築）分野のロードマップ

システム分野の学術の基礎となる要素としては、以下を挙げた。

- (a) 基本理論
- (b) 支援技術
- (c) 人間・社会／社会経済システム
- (d) 生命システム
- (e) 工学システム／人工物

次に、これらの学術の基礎となる要素によって、未来社会の要請に応えられるであろう効用を記述した。

この効用を統合することにより、ビジョンの中心に据えられた目指す社会を実現するための制御分野としての考え方 ―実体化― が導き出される。

(エ) 計測分野のロードマップ

2014 年の現在から、2020 年、2030 年、2040 年まで 10 年ステップで達成されるキーワードを拾った。昨今、科学・技術の様相がモノからコトへ変貌していると叫ばれている。そこで、これらのキーワードをモノとコトの軸に分け、3 次元で捉えることにした。

計測分野のマイルストーンとして、2020 年代には「工場・設備環境から身の回り・非設備環境へのセンシング技術の展開」が進むと想定した。キャッチフレーズは「身の回りのセンシング」である。

2030 年には「極限環境におけるセンシング技術の高度化と普及」が進むと想定した。キャッチフレーズは「極限環境のセンシング」である。

2040 年代には「地球・宇宙・生体・ナノをリアルタイム・シームレスに監視するセンシングシステムの確立」が達成されると想定した。キャッチフレーズは「地球・宇宙・生体・ナノのセンシング」である。

(オ) 人工物、環境、社会の制御

制御分野のマイルストーンとして、2020 年代には「ICT・ビックデータによる制御の広域リアルタイム化」が進むと想定した。キャッチフレーズは「安全・安心の制御」である。

2030 年には「大規模・複雑系社会システムの制御」が進むと想定した。キャッチフレーズは「環境・資源の制御」である。

2040 年代には「超分散・生体システムへの制御の応用範囲拡大」が進むと想定した。キャッチフレーズは「未知・未来の制御」である。

(カ) システム（大規模複雑システムの設計と構築）

システム分野のマイルストーンとして、2020 年代には「環境・資源・エネルギー問題の解決」が図られると想定した。キャッチフレーズは「課題空間レベルのシステム構築手順の確立」である。

2030 年には「豊かな低炭素・グリーンライフ」の実現が進むと想定した。キャッチフレーズは「実空間レベルのシステム構築手順の確立」である。

2040 年代には「活気ある高齢化社会の実現」が達成されると想定した。キャッチフレーズは「実社会レベルのシステム構築手順の確立」である。

ク サービス学

サービス学はサービスを研究対象とする新しい学問分野である。サービス科学、サービス工学等とも呼ばれるが、ここではサービス学と呼ぶ。従来、サービスは経済活動として位置づけられ、経営学的視点から論じられることが多かった。しかし、サービス産業が経済先進国においては GDP の 70%以上を占めること、そして、米国等において、サービスサイエンス（IBM が SSME (Service Science、Management and Engineering) と名づけた）が重要な政策として位置づけられたことから、サービスを科学的に解明する必要性が認識され始めた。サービスは実社会に既存である。よって、その体系化には認識科学的体系と設計科学的な評価論理を要する。しかしながら、サービス学の体系化は両者共に未だ不十分である。にもかかわらず、この分野における夢ロードマップを作成する理由は、実サービスと科学・技術を融合させることによって、我が国のサービスの世界的競争力を高めることと、サービスに関与する多くの生活者（顧客・従業員・地域住民等のステークホルダー）の生活の質を高めるためである。

サービス活動は多様な産業分野で見られる。例えば、日本標準産業分類では、情報通信業（G）、卸売業・小売業（I）、学術研究、専門・技術サービス業（L）、宿泊業、飲食サービス業（M）、医療・福祉（P）等が列举され、さらにそこには多くの業種が含まれる。それら固有の分野において、Terminology が整備され、Taxonomy が理解の枠を示すことで、その分野における新たなサービスの創出、既存サービスの観測、分析が可能になるが、さらに、サービス学はそれらの分野共通の論理、特に人間活動の論理を追求する。サービス学はサービスの提供側と受給側との価値共創過程を記述可能とし、その論理を解明して、設計に資することを目的とする。

よって、サービス学は、

- ・サービス活動に共通に見られる論理を解明する
- ・顧客や従業員を含む人間の行動を理解し、モデル化する
- ・サービス学の体系をもとに、サービスを設計する

との側面を持つ。

サービス学分野のロードマップ

サービス学の進展は部分的に生産科学の進展の歴史と類似する。19 世紀の最後に F. W. Taylor が科学的管理法を提案し、作業の標準化から作業記述を可能にし、その後の計算科学の導入に繋がった。サービス業においても同様にマニュアルによる作業標準化が進んだが、それらは供給者側の論理であり、サービスを受ける側、顧客視点での研究は主にサービス・マーケティング、サービス・マネジメント等の経営学分野が担ってきた。よってサービス学は、サービスを現象として観測し、分析し、モデル化を経て、最終的には設計論理として利用する展開が進み、それらを繋げる演繹的な理論構築等が予想される。これらは、社会の経済活動や文化に基づいているため、上記の展開は経済状況や社会の文化的傾向に強く影響を受け、統一された単一の論理に収束することはない。

サービス学のロードマップは、(ア)サービス論理、(イ)人間行動理解、(ウ)設計適用の3分野で進展する。

(ア) サービス論理

サービス理論のより深い理解が進み、サービスの定義、サービスや物財の所有権、利用権等の概念が調整され、関連する法制度の整備が進む。ビッグデータとディープデータを活用した解析技術が進展し、サービス理論と結び付く。製造業製品のサービス化が体系付けられ、製造業のビジネス形態がサービス中心に大きく変化する。個人の知とコミュニティの知との融合が加速し、サービスの価値が増大する。

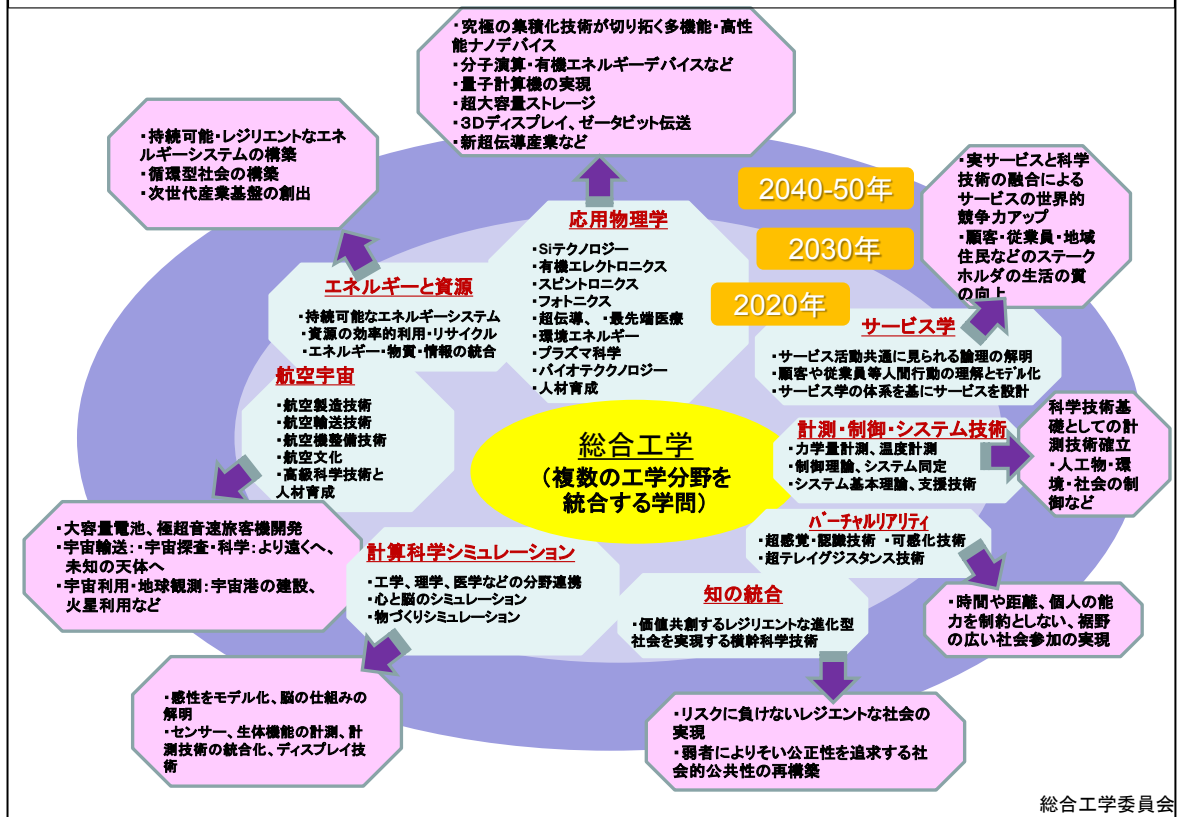
(イ) 行動理解

Information Communication Technology の進展により急速に発展する。ビッグデータの解析による行動のパターン化と、ディープデータによって行動の背景にあるニーズ、知覚品質、期待、満足、意図等が明らかになる度合いが一層拡大する。個人データに関して匿名化技術が進展すると共に「消去する権利」他の法整備が進み、個人データの公開と利用とが相互に加速される。行動理解をサービス提供に繋げたビジネスが増大する。脳科学、心理学、行動科学との連携が進み、人間の身体的行動と心理的活動との間の関係の解明が進む。

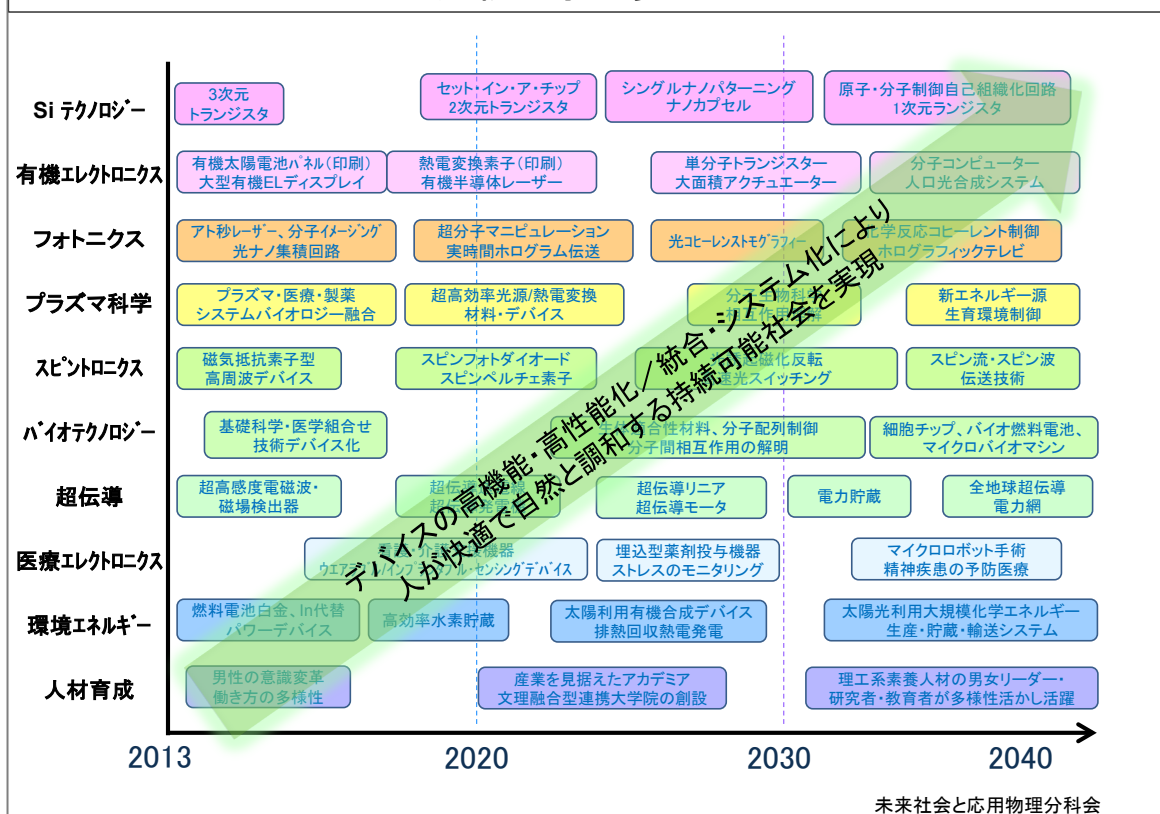
(ウ) 設計適用

サービス論理構築で獲得した諸原理を用い、顧客と従業員個人の行動理解データから高い精度でサービスを提案し、また共創的利用を促すシステムが普及する。それに対して、顧客側では大量の提案に対する行動を防御的に管理するエージェントが普及する。また、様々なステークホルダーの要求を満たしながら、全体として社会的に望ましいサービスを実現するための制度設計の方法論が確立し、多くのサービスに適用されていく。製造業のサービス化により、利用過程まで含めたCAD（Computer Aided Design）システムが一般化し、製品利用過程を含めたサービス全般の実時間監視による価値共創が高まる。

7 総合工学分野の夢ロードマップ



7-1 応用物理学の夢ロードマップ



**小型化・低コスト化
低消費電力化
多機能化
高速化**

**安全・安心な
高信頼社会へ**

**持続的で
希望あふれる社会へ**

**自然と調和する
豊かな世界へ**

活動支援ロボット:

- ・5感を持つロボット
- ・介護支援、自動運転カー

どこでも・だれでもつながる:

- ・全ての物への情報の埋め込み
- ・自由で人間のからないアクセス

自由な情報処理:

- ・感情も伝える自動通訳
- ・高臨場感
- ・ヒューマンインターフェース

健康・長寿命・高信頼社会:

- ・高齢・少子化対応健康サポート
- ・スマートヘルスケア
- ・セキュア・システム

新材料・新構造の導入

自律型ロボット:

- ・人の代わりにな仕事をするロボット

思えばつながる:

- ・考えるだけで情報通信

自在な情報管理:

- ・思い出してくれる記憶補助
- ・交渉もする電子秘書
- ・しみわたる感動

省エネルギー:

- ・充電・給電レス自立システム

パイオナノテクノロジーとの融合

超微細ロボット:

- ・血管中を進む自動治療医療ロボット

自然につながる:

- ・情報のやりかこ

自然な情報利用:

- ・あらゆる場所での情報のやりとり
- ・人の5感能力を超える安らかな感動

創エネルギー:

- ・電力供給型端末システム

モレキュラーテクノロジーとの融合

1 nm

2.5nm

1.5nm

5.0nm

8nm

11nm

16nm

22nm

32nm

**原子・分子制御
自己組織化回路**

**1次元トランジスタ
単電子素子
分子素子とのインターフェース
マイクロロボット**

**スピントリニクス
シングルナノバタニング
ナノカプセル
ナノマニピュレーション
共鳴系トネル素子**

モレキュラー技術

スピン、パイオ技術

MEMS, センサー、ナノマテリアル、計算技術

CMOS回路基盤技術

RF・センサー・MEMSの融合

**エネルギー
ハーベスター/ストレージ**

3次元トランジスタ

2.5/3D集積化

2次元トランジスタ

セット・イン・ア・チップ

2013年

2020年

2030年

2040年

西暦

応用物理学会 シリコンテクノロジー分科会

Si CMOSプラットフォーム

高効率化、高集積化、ハイブリッド化

2013年 2020年 2030年 2040年 西暦

低価格・高効率・低環境負荷デバイス、材料の開発

実用化・市場展開を考慮した、軽量・低価格を実現する要素技術の開発
印刷技術によるデバイス製造技術の展開
高効率化による環境負荷の低減

高次・複合機能デバイスの開発と材料のハイブリッド化

分子機能の複合化によるハイブリッド材料の開発
高次機能・複合機能分子、デバイスの開発

デバイスの統合・集積化

分子デバイスの集積化技術の開発

分子コンピューター

分子メモリー

単分子トランジスター

単電子トランジスター

印刷による集積回路

印刷による熱電変換素子

印刷による有機太陽電池パネル

有機光集積回路

有機光通信集積素子

有機半導体レーザー

大型有機ELディスプレイ

高効率アクチュエーター

化学センサー

大面积アクチュエーター

大面积センサー

演算デバイス

エネルギーデバイス

光機能デバイス

複合機能デバイス

基礎研究

ソフトマターエレクトロニクス：高分子、ゲルなどの電子機能に対する理解
分子エレクトロニクス：分子素子の基礎理論の充実
ソフトマター化学：新規機能性有機材料の設計と合成

分子機能集積：分子素子集積に関する基礎理論

応用物理学会 有機分子・バイオエレクトロニクス分科会

7-1-3-1 応用物理学 ～フォトンクス(光・量子エレクトロニクス)～ (フォトンクスが拓く未来社会)



7-1-3-2 応用物理学 ～フォトンクス(通信)～ (フォトンクスが拓く未来社会)

