

報告

理学・工学分野における
科学・夢ロードマップ 2014
(夢ロードマップ 2014)



平成26年(2014年)9月19日

日本学術会議

第三部

この報告は、日本学術会議第三部拡大役員会が中心となり、理学・工学系学協会連絡協議会の協力を得て、審議した結果を取りまとめ公表するものである。

日本学術会議第三部拡大役員会

部長	荒川 泰彦	(第三部会員)	東京大学生産技術研究所教授
副部長	巽 和行	(第三部会員)	名古屋大学物質科学国際研究センター特任教授
幹事	相原 博昭	(第三部会員)	東京大学理事・副学長、大学院理学系研究科教授
幹事	土井 美和子	(第三部会員)	独立行政法人情報通信研究機構監事
副会長	家 泰弘	(第三部会員)	東京大学物性研究所教授
	石川 幹子	(第三部会員)	中央大学理工学部教授
	石原 宏	(第三部会員)	東京工業大学名誉教授
	伊藤 早苗	(第三部会員)	九州大学副学長・応用力学研究所教授
	岸本 喜久雄	(第三部会員)	東京工業大学大学院理工学研究科教授
	楠岡 成雄	(第三部会員)	東京大学大学院数理科学研究科教授
	栗原 和枝	(第三部会員)	東北大学原子分子材料科学高等研究機構教授 多元物質科学研究所教授
	小長井 誠	(第三部会員)	東京工業大学大学院理工学研究科教授
	永原 裕子	(第三部会員)	東京大学大学院理学系研究科教授
	西尾 章治郎	(第三部会員)	大阪大学大学院情報科学研究科教授
	前田 正史	(第三部会員)	東京大学理事・副学長、生産技術研究所教授
	和田 章	(第三部会員)	東京工業大学名誉教授

日本学術会議第三部拡大役員会夢ロードマップ2014 ワーキンググループ

委員長	渡辺 美代子	(第三部会員)	独立行政法人科学技術振興機構執行役
	石川 幹子	(第三部会員)	中央大学理工学部教授
	相原 博昭	(第三部会員)	東京大学理事・副学長、大学院理学系研究科教授
	安達 淳	(連携会員)	大学共同利用機関法人情報・システム研究機構 国立情報学研究所教授
	大橋 弘美	(連携会員)	日本電信電話株式会社 NTT フォトニクス研究所部長
	新野 秀憲	(連携会員)	東京工業大学精密工学研究所長・教授
	杉原 正顯	(連携会員)	青山学院大学理工学部物理・数理学科教授

中村 正人	(連携会員)	独立行政法人宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所教授
長井 寿	(連携会員)	独立行政法人物質・材料研究機構ナノ材料科学環境拠点マネージャー
森 初果	(連携会員)	東京大学物性研究所教授
依田 照彦	(第三部会員)	早稲田大学理工学術院創造理工学部教授

報告の作成にあたり、以下の理学・工学系学協会連絡協議会の協力学協会にご協力頂きました。

数理科学分野	日本数学会、日本応用数理学会、統計関連学会連合
物理学分野	日本物理学会、日本天文学会
地球惑星科学分野	日本地球惑星科学連合
情報学分野	情報処理学会
化学分野	日本化学会、高分子学会、電気化学会、日本セラミックス協会
総合工学分野	応用物理学会、エネルギー・資源学会、 日本航空宇宙学会、日本機械学会、 日本シミュレーション学会、日本計算工学会、 日本応用数理学会、日本計算数理工学会、可視化情報学会、 横断型基幹科学技術研究団体連合、 日本バーチャルリアリティ学会、計測自動制御学会、 日本原子力学会、サービス学会
機械工学分野	日本機械学会、自動車技術会
電気電子工学分野	電気学会、計測自動制御学会、 電子情報通信学会、照明学会、映像情報メディア学会、 日本生体医工学会、日本医療情報学会
土木工学・建築学分野	日本建築学会、土木学会、都市住宅学会、 日本コンクリート工学会、地盤工学会
材料工学分野	日本金属学会、日本鉄鋼協会、日本材料学会、 資源・素材学会、溶接学会、日本鑄造工学会、粉体粉末冶金協会、 日本塑性加工学会、高分子学会、日本セラミックス協会、 バイオマテリアル学会、軽金属学会、日本 MRS、 材料戦略委員会

本件の作成にあたっては、以下の職員が事務及び調査を担当した。

事務 盛田 謙二 参事官(審議第二担当)

齋田 豊 参事官(審議第二担当)付参事官補佐(2014年8月まで)
松宮 志麻 参事官(審議第二担当)付参事官補佐(2014年8月から)

調査 辻 明子 上席学術調査員

要 旨

1 本報告書作成の背景と課題

第 21 期日本学術会議第三部（理学・工学）は、理学・工学系学協会連絡協議会の協力のもと、2011 年 8 月 24 日に「理学・工学分野における科学・夢ロードマップ」（以下、「夢ロードマップ 2011」という）を報告として公表した[1]。これは、2011 年 7 月 7 日に公表された「日本学術会議の機能強化」において科学者コミュニティとしての日本学術会議協力学術研究団体（以下、「学協会」という）との連携の重要性が謳われたことを受け、日本学術会議と学協会との連携を進めた結果であった。この報告は、理学・工学分野が一体となって科学者の夢をロードマップという形にすることを初めて試みたものであり、2010 年 4 月に公表された「日本の展望 - 理学・工学からの提言 - 」の図解版ともいえる[2]。「夢ロードマップ 2011」は初めての試みであり、1 年あまりという短期間で仕上げたこともあって、内容の精査が十分でなかったことに加え、様式も十分統一を図ることができなかったこと等の反省がなされた。

また、夢ロードマップ 2011 の公表の 5 ヶ月前に東日本大震災が発生したが、科学者は震災に対して理学・工学の総力を挙げて解決の道を拓くことができなかったという反省が残され、社会における科学者の責任がより大きな課題となった。これと同時に、震災により理学・工学分野の新たな科学技術課題が浮かび上がった。しかし、東日本大震災発生時点では既に夢ロードマップ 2011 の内容はほぼ確定していたため、抜本の見直しができない状況にあった。

第 22 期日本学術会議第三部においては、これらの反省を踏まえ、2011 年に公表した夢ロードマップ 2011 をもとに、内容の精査を行い、東日本大震災で明確になった課題も踏まえて、より充実した「理学・工学分野における科学・夢ロードマップ 2014」（以下、「夢ロードマップ 2014」という）として公表することとした。

2 報告作成の方針

夢ロードマップ 2014 の作成にあたっては、以下のことを方針とした。

第 1 は、2011 年に作成した夢ロードマップ 2011 の改訂版とし、夢ロードマップ 2011 を基本とすることである。科学者の夢は 2、3 年の単位で変化するものではなく、長期的視点が基本となる。したがって、3 年前に作成した科学者の夢を基本とし、その見直しを行うこととした。

第 2 は、東日本大震災にて明確となった課題を取り入れることである。夢ロードマップ 2011 では対応できなかったことを反省し、また震災から 3 年が経過し、課題の整理がなされた現時点において、より明確となった課題をしっかりと取り込むことである。

第 3 は、科学者のみならず、社会や国民にわかりやすく示すことである。科学者の夢を科学者間で共有するだけでは、そこに社会的意義を見出すことはできない。社会や国民に

わかりやすく示し、科学者と国民の対話の機会を提供することを目的の1つとしたものである。科学者コミュニティ、研究開発機関、府省のみならず、社会で広く活用されることを期待するものである。

3 報告の内容

(1) 夢ロードマップ 2014 の意義

理学・工学分野において、科学者が社会の課題を認識しながら科学者の夢を社会や国民に示すことは、科学者の責務を果たすことであると共に、社会や国民の幅広い理解を得ながら科学者と国民が共に議論する機会を提供するものである。

(2) 理学・工学全分野の夢俯瞰マップ

夢ロードマップ 2014 は、日本学術会議第三部（理学・工学分野）の総意として科学者の夢を図形化したものである。理学・工学全体の将来の夢を1枚の「理学・工学全分野における科学・夢俯瞰マップ」（「夢俯瞰マップ」）として作成し、あらゆる分野の科学者、社会や国民に示すものである。

(3) 分野別の夢ロードマップ

理学・工学の11分野（環境学、数理科学、物理学、地球惑星科学、情報学、化学、総合工学、機械工学、電気電子工学、土木工学・建築学、材料工学）において、各分野のビジョンを示し、そのビジョンに基づく科学・夢ロードマップ（「夢ロードマップ」）とその考え方を示す。

目 次

1	はじめに	1
2	理学・工学分野全体の夢俯瞰マップ	2
3	分野別の夢ロードマップ	4
(1)	環境学分野	4
	環境学分野のビジョン	4
(2)	数理科学分野	8
	数理科学分野のビジョン	8
	数理科学分野の夢ロードマップの考え方	9
(3)	物理学分野	14
	物理学分野のビジョンと夢ロードマップの考え方	14
(4)	地球惑星科学分野	21
	地球惑星科学分野のビジョン	21
	地球惑星科学分野の夢ロードマップの考え方	23
(5)	情報学分野	35
	情報学分野のビジョン	35
	情報学分野の夢ロードマップの考え方	37
(6)	化学分野	43
	化学分野のビジョン	43
	化学分野の夢ロードマップの考え方	43
(7)	総合工学分野	70
	総合工学分野のビジョン	70
	総合工学分野の夢ロードマップの考え方	70
(8)	機械工学分野	111
	機械工学分野のビジョン	111
	機械工学分野の夢ロードマップの考え方	112
(9)	電気電子工学分野	119
	電気電子工学分野のビジョン	119
	電気電子工学分野の夢ロードマップの考え方	119
(10)	土木工学・建築学分野	147
	土木工学・建築学分野のビジョン	147
	土木工学・建築学分野の夢ロードマップの考え方	147
(11)	材料工学分野	153
	材料工学分野のビジョン	153
	材料工学分野の夢ロードマップの考え方	156
4	おわりに	166
	<参考文献>	167

< 参考資料 1 > 審議経過	169
< 参考資料 2 > 理学・工学分野における科学・夢俯瞰マップ（技術）	170

1 はじめに

理学・工学分野において、科学者が社会の課題を認識した上で、将来に向かって夢を社会に示すことは科学者自身の責務であると考えます。またこのことは、社会や国民と共に議論する機会を提供するものであり、重要である。この観点から、第21期日本学術会議第三部は、「理学・工学分野における科学・夢ロードマップ」(以下、「夢ロードマップ2011」という)を2011年7月に報告として公表した[1]。この報告は、理学・工学分野が一体となって科学者の夢をロードマップという形にすることの初めて試みとして意義があった。一方、夢ロードマップ2011の公表の5ヶ月前に東日本大震災が発生し、科学者は震災に対して解決の道を十分拓くことができなかつたという反省が残された。震災により理学・工学分野の新たな科学技術課題も数多く浮かび上がった。しかし、東日本大震災発生時点で既に夢ロードマップ2011の内容はほぼ確定していたため、その時点では見直しを十分図ることはできなかつた。

第22期日本学術会議第三部では、夢ロードマップ2011の重要性を再確認した上で、これの改訂を進め、改めて「理学・工学分野における科学・夢ロードマップ2014」(以下、「夢ロードマップ2014」という)として公表することとした。科学者のビジョンは2、3年の単位で変化するものではなく、長期的視点が基本となるので、夢ロードマップ2011の内容を基本としているが、様式の統一や内容の充実を図った。また、東日本大震災に関しては、3年が経過した現時点において、より明確となった課題を取り込むこととした。

夢ロードマップ2014は、理学・工学の各分野のビジョンと、そのビジョンに基づく科学・夢ロードマップ(以下、「夢ロードマップ」という)から構成されている。また、理学・工学全体の将来の夢を1枚の俯瞰マップとして集約した、「理学・工学全分野における科学・夢俯瞰マップ」(以下、「夢俯瞰マップ」という)も示している。夢ロードマップ2014により、理学・工学の分野を越えた科学者コミュニティにおける学術のビジョンの共有に資することを期待する。また、科学者コミュニティ、府省のみならず社会で広く活用され、科学・技術及び社会の発展に貢献できれば幸いである。

なお、分野別のビジョンや夢ロードマップの記述においては、分野によりボリュームやトーンに差異があるが、これは分野の特性とコミュニティの意思を尊重したためである。

最後に、夢ロードマップ2014を作成するにあたりご尽力頂いた理学・工学系学協会連絡協議会の協力学協会の関係各位に心から感謝の意を表する次第である。

2 理学・工学分野全体の夢俯瞰マップ

日本学術会議第三部はその総意として、理学・工学分野全体の夢を1枚に集約し、「夢俯瞰マップ」として表した。これは、理学・工学分野における科学者の夢を、理学・工学に限定しないあらゆる分野の科学者コミュニティ、府省を含む社会全体、及び社会を構成する人々に示すものである。科学者は現状の科学技術課題の解決と共に、常に将来の夢を持ちながら、その夢の実現を目指して研究に取り組んでいる。特に前回の報告（夢ロードマップ2011）から変わった点は、報告準備の最終段階で起こった東日本大震災を踏まえて理学・工学分野が自然と人間生活の関わりに対しさらに理解を深め、自然から受ける様々な災害に対しても予測、防災等で対応していくべきという観点を取り入れたことである。

夢俯瞰マップの中心には、現在の日本学術会議の基本方針の1つである「Science for Science, Science for Society」を配置した。現代の科学者が取り組む科学は、科学の発展のための科学であり、また社会のための科学でもある。

夢俯瞰マップにおいて、中心に近い部分には直近の2020年に実現したい夢が示され、中心から遠い周辺部分には、2050年頃の実現を目指した夢が描かれている。現時点から将来に向け、夢が広がることを描いたものである。最も外周部にある青色の枠の中に示された記述は科学・技術の成果が社会において実現される将来像であり、8種類の将来像を示した。黄色矢印の枠の中に示された記述は科学・技術が目指すべき方向を示している。

図の最下部に描かれた目指すべき方向の「数学・数理科学・計算科学の深化と展開」及び「物質の極限・宇宙の成立ちの理解」により、社会における将来像として「自然を読み解き社会と調和を図る」ことが実現されるものと考え、これらが科学の根幹となつてすべての科学・技術を支えるという位置づけを示したものである。右側には、目指すべき方向である「数学・数理科学・計算科学の深化と展開」に加え、「産業・生活を支える共通技術の形成」、「医療バイオ技術への応用」、「材料の創製と高機能の探求」により、社会における将来像の「情報技術で快適な生活を実現する」、「科学・技術で健康と長寿を実現する」、「新材料と資源を有効に活用する」ことが実現されるという夢を示した。左側には、目指すべき方向である「物質の極限・宇宙の成立ちの理解」に加え、「地球環境の理解・予測・保全」、「フューチャーアースによる環境問題の解明・適応・緩和と国際的合意形成」、「新しい環境・エネルギー技術の創成」により、社会における将来像の「人間活動と地球環境の調和を図る」、「自然と共生する世界を実現する」、「環境・エネルギー技術で地球を守る」ことが実現される夢を示した。上部には、目指すべき方向である「革新的防災・減災技術の進化」、「材料の創製と高機能の探求」によって、社会における将来像の「安全・安心・豊かな社会で人をはぐくむ」ことが実現されるという科学者の夢を示している。これは、前述したように東日本大震災を経験した我が国の科学者が痛感している課題に対してそれを克服するため、その成果を夢として描いたものである。

本夢俯瞰マップには科学・技術により実現される夢が示されているが、この夢を実現するための技術の具体像も検討され、これを根拠とした夢を示したものである。それぞれの夢を実現するための技術の具体像は、別途 参考資料2 理学・工学分野における科学・夢俯瞰マップ（技術）として掲載した。

3 分野別の夢ロードマップ¹

(1) 環境学分野

環境学分野のビジョン

環境学は、自然と人間活動の相互作用により生じている現象を科学的に解明し、喫緊の環境問題を解決すると共に、将来の潜在的環境問題の発見とその予防に向けた方法論を提示し、新しい技術開発及び社会システムを創造することにより、有限な地球環境の持続的維持を目標とする学問である。

そのためには、

- ・人間と自然の相互作用を理解すると共に
- ・人間と自然の相互作用を持続的、発展的に維持する

ことが必要であり、その学問体系は“対象を知る”ことを主眼とする分析的方法論のみならず、“対象を良くする”、さらには“新たな創造をする”という設計学（デザイン学）としての性格を包含している。

この夢ロードマップは、環境学の対象とする課題、及びそうした研究の構造を明示的に示すと共に、環境問題の解決に至る道筋（ロードマップ）を示したものである。環境学の特色は、国内はもとより国際社会とも協働し、数多くのステークホルダーの参加のもとに、実際に生じている問題の解決に向けて、社会的共通資本の構築と適応策・緩和策を提案することにある。これら環境学の特色としての科学的アプローチと、環境問題の解決に資する社会技術の開発により、自然と人間が共生する持続可能な社会を実現することが環境学の究極の目標である。

以下に、2050年をターゲットとする環境学の具体的ビジョンを示す。

ア ビジョン1：低炭素社会の実現と気候変動の安定化

気候変動問題が長期にわたって人類の大きな課題になることは疑いのないところである。現象解明の面では基礎的なプロセスの解明とその基礎となるモニタリングの国際的なシステムを継続して充実させていくことが求められる。一方で、人間側のアクションとして気候変動を緩和するための省エネルギーの技術とシステム、気候変動の影響に対する適応策も強化していかなければならない。これらの緩和策・適応策を強化にあたっては国際的な合意のもとでそれぞれの国が取り組む必要がある。究極的には低炭素社会を実現し、それによって気候変動を安定化させることが目標である。

イ ビジョン2：COP10 新世界戦略「自然と共生する世界」

生物多様性条約第10回締約国会議（COP10）で採択された新たな戦略目標（2020年までの具体的な目標である20項目の愛知目標を含む）を国際社会が達成するた

¹ 分野別の夢ロードマップは、学協会が主体となって作成したものと、日本学術会議の分野別委員会あるいは分科会が主体となって作成したものがあり、各夢ロードマップにはそれぞれの作成主体が記されている。

めの科学的な基盤として、生物多様性と生態系サービスの指標の開発及びそれらを用いた現状評価及びシナリオに応じた予測手法が必要である。SATOYAMAにおける人間と自然の共生の原理を探り、科学と参加を旨とする自然再生や伝統的な営みの再生等を通じて実践例を積み重ね、「自然と共生する世界」を構築することが2050年までの目標である。

ウ ビジョン3：安全安心な社会の実現

化学物質や放射能を含めた物質は生活に有用であるが、量や使用方法によっては有害となる。また、ものを作る過程で、意図せず発生する化学物質もある。POPsやPM2.5のように越境移動する有害物質もある。「自然と共生する持続可能な社会」を最終的に実現するためには、有害な物質を抽出し、その世界的な分布マップを作成し、リスク評価・リスク管理・リスクコミュニケーションの手法を確立して、実施することが必要である。また、これら有害物質が持つ「リスク」をどのように捉えるべきかについての考え方を多くの政策関係者と共有し、その考え方を政策提言や科学コミュニケーションに結び付けることが重要である。これを実現するためには、科学技術と社会の関係をわかりやすく説明できるレギュラトリーサイエンスの専門家を育成し、多くの関係者と共有できる考え方を普及することが望まれる。これらに対して達成目標とそれが実現される年代を設定し、行動することが重要である。

エ ビジョン4：レジリエントな循環型社会の世界的確立

産業革命以降の社会においてはエネルギーと資源の消費が格段に増加し、人口の増加と相まって環境に対して様々な影響を与えている。典型的な問題である大気・水汚染、廃棄物問題は国によってその状態が様々であり、個別の問題解明が求められる。今後も人口増加が生じる途上国では汚染解決が課題であり続ける一方で、成熟した国ではより高い環境の質を求めることが目標となり、いずれも循環型社会の達成が目指される。一方で災害に対する復元力（レジリエンス）を高めていくことも長期的な課題である。国際的な協力を進めながらこれらの課題を地域や国として解決していくことが目標である。

オ ビジョン5：流域自然共生居住の実現

人間の居住は環境に影響を与えると同時に環境に依存している。人間居住の集合の場である都市或いは地域の空間規模で問題を捉えることが必要であり、土地の利用形態が最も根本的な問題である。途上国では巨大都市成長に伴う環境劣化が、我が国では人口減少下の都市活動の維持が大きな問題となっている。これら土地と関連の深い人間居住の問題を扱うには、地域が共有する問題を地域が共同して取り組む枠組みである流域圏として問題を捉えることが重要である。それぞれの地域の特性を活かし、豊かな文化的な側面を含みつつ自然と共生する居住を世界的に実現していくことが目標である。

カ ビジョン6：国際プログラム（Future Earth）の展開

ここまで述べてきた多様な環境の課題は様々な規模を持ちながらも、地球全体の環境の変化と捉えることができ、それら多様な環境の課題に取り組む持続性科学の確立が課題である。Future Earth プログラムはこのような認識のもとに始まった国際的な研究プログラムである。持続性のほとんどの課題は社会の様々なステークホルダーと深い関わりを持つ。様々なステークホルダーと共に研究及び活動を設計、実施し、その成果を分かち合う必要がある。対象となる環境事象は多岐にわたる。まずは我が国としてはアジア地域を中心に取り組みを進め、さらにそれを全球のネットワークに広げていくことが目標である。

キ ビジョン7：持続可能な発展のための教育の普及（ESD：Education for Sustainable Development）

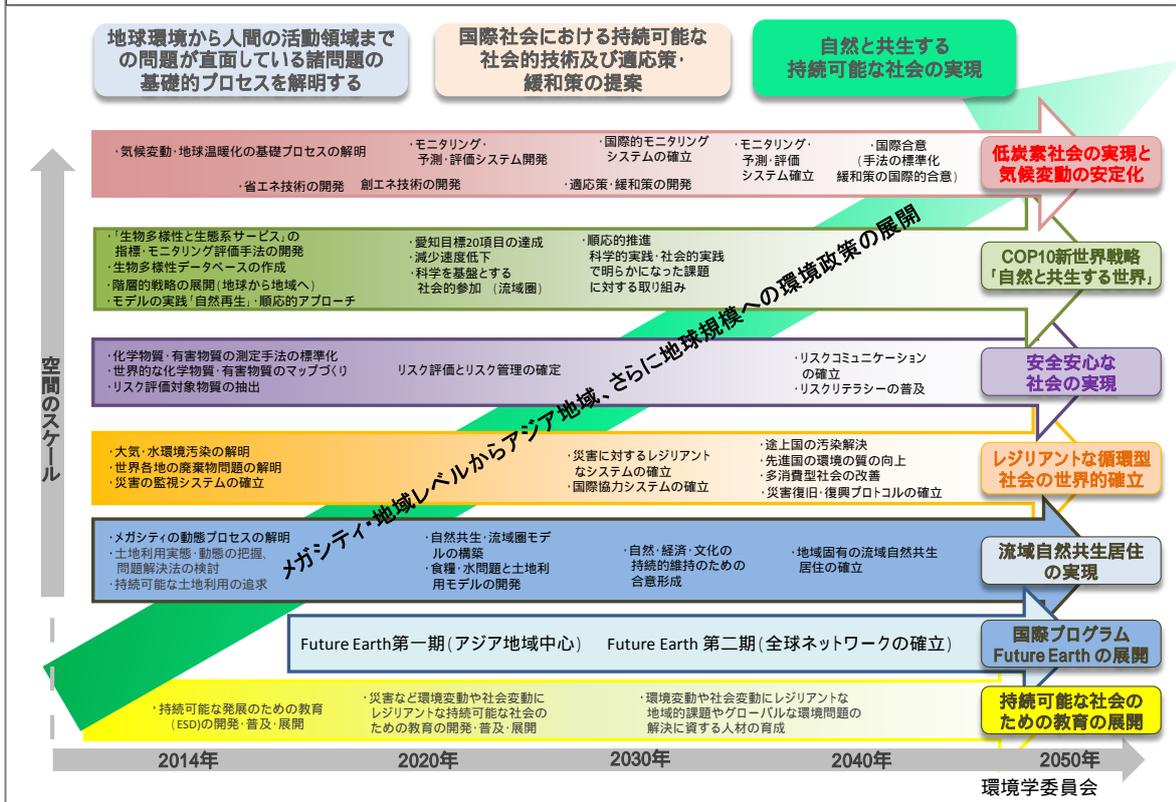
持続可能な社会の実現のためには社会の主たるアクターである人間の行動が極めて重要であり、教育はその基盤形成において長期的かつ継続的な役割を果たす。世界的なイニシアティブである「持続可能な発展のための教育（ESD：Education for Sustainable Development）」を初等中等教育はもとより、高等教育、さらに生涯学習として進めていくことが肝要である。

持続可能な社会は、災害等環境変動や社会変動に対してもレジリエントな社会であり、その基礎となるコミュニティが確立している必要がある。このコミュニティの再構築を目指すためには、内発的な教育が重要であり、防災教育と環境教育の統合や学校教育と地域づくりも含めた社会教育の統合化を推進し、生涯教育の視点に立った形で幅広く進めていくことが必要である。それは地域的課題から地球全体の課題までの射程を有する持続可能な社会のための教育である。その普及、展開によって災害等の環境変動への対応も含めた持続可能性な内発的発展に資する人材を継続的に育てていく。

ク ビジョン8：環境政策の深化と展開

ここで述べた様々な側面の目標を相互に調和が取れた形で達成するためには、その実現を支える環境政策・環境研究が変化を遂げることが求められる。新たに生じる環境上の課題に対しては絶えざる対応を機動的に採ることが求められる。空間的にも広く、また多数の学術分野にまたがる領域に対して環境政策・環境計画を深化させていくことが必要である。環境政策や計画を立案するにあたっては、ステークホルダーの能動的な参加を得る必要があり、これらの改革を通じて、インタラクティブで総合性・機動性に富む環境政策・環境計画を実現していくことが最終的な目標である。

1 環境学分野の夢ロードマップ



(2) 数理科学分野

数理科学分野のビジョン

数学・数理科学は長い歴史と豊かな広がりを持つ学問であり、人類の出会い様々な課題を数学的概念として定式化し解析し社会に貢献する。その成果の汎用性は高く、数・自然界の法則のような根本的な理論体系を理解するだけでなく、生命現象、新機能素材、環境問題、エネルギー、食料・水問題等の学際的研究や社会の重要な問題を解決するための研究にも広く応用されており、人類社会の発展に大きく貢献してきた。国の科学技術戦略である第4期科学技術基本計画においても複数の領域に横断的に用いられる科学・技術の研究開発の共通基盤技術として位置づけられ、より一層充実・強化していくことが記載されている[3]。

なお、本ロードマップは、日本数学会、日本応用数理学会と統計関連学会連合との連携のもとで策定を行ったものである。

ア 数学から数理科学へ

数学は、古代ギリシア時代より、自然現象や物質の性質を記述する基本的言語として自然科学・工学と互いに影響を与えあいながら発展してきた。20世紀後半に情報技術（IT）が急速に重要性を増すと共に、情報を的確に記述しその中から有用な情報を抽出するための数理、自然現象の方程式では記述できない複雑な社会システムをモデル化するための数理、不確実性を持つ現象をモデル化し解析する数理等が求められるようになった。長い歴史を有する伝統的な数学は、このような新しい刺激を受け、統計数理、数理工学等を含む広い意味での数学、すなわち数理科学として大きく発展し、諸科学の研究における基礎概念を記述する言語の提供や解決の道具を提供する一方で、企業における生産システムの最適化、研究開発の加速、コスト削減に大きく貢献してきた。その後、21世紀に入り数理科学及び関連する分野の進展と共に大規模データをリアルタイムに解析し統計的推測に繋げることや複雑なシステムをより精密にモデル化し予測に繋げることも可能になりつつある。今後は生命現象の解明に繋がる新たな数理の展開が期待されている。将来的には、地球規模の問題を解決しながら人が豊かに生きることを目指し、人間の感性、思考、言語等を取り扱う数理等も開発されるであろう。

イ 数理科学の深化

数理科学の発展は社会からの刺激を受けた研究者の自由な発想と創造性がもたらし、知的好奇心・探求心は研究の原動力となって独自の理論や視点を数多く生み出してきた。このような研究プロセスは現代もダイナミックに発展を続けており、高度で多様な問題が提案される度に解決され、そしてまた新たな問題へと繋がっている。数理科学の発展は他の分野と比べると基礎科学であるがゆえに予想しづらく、アイデアが成熟する前に急いで短期的な目標を定めてしまうと飛躍的発展の弊害となることもあるが、その意味するところすら漠とした未踏の課題、

例えば、高次構造における双対性・対称性、離散構造の新たな数理、無限次元空間の幾何構造、非可換世界観の具体化、非線形現象の解明、複雑系数理モデルによる稀現象の解明、連続体の構造の多角的解明等の概念が定式化されるならば、他の分野ではそれ以前に想像すらできなかった斬新な展開とさらなる深化が数理科学にもたらされるであろう。

ウ 数理科学の展開

また、社会の課題に応える数理科学への期待が急速に高まっている中、ビッグデータを活用した現象・システムの構造解明、複雑系数理モデルや非線形時系列・複雑ネットワークに関する理論の展開、予測・リスク管理、最適化・制御への応用展開等を通じて、数理科学が諸分野・産業界と直接的で新しい連携関係を創り出している。それと並行する形で、国全体の科学技術イノベーションを加速することにより知識創造立国実現に貢献しようという大きな流れが数理科学に関するコミュニティの連携をさらに深めながら湧き上がっている。数理科学は大きな変革の時期に来ている。

数理科学分野の夢ロードマップの考え方

ア 国際研究拠点形成と世界をリードするイノベーション共創の場づくり

このような新たな概念やアイデアを生み出す場として、多様な背景を持つ研究者が一堂に集い、日常的に議論を交わす数学・数理科学の拠点の設置が強く望まれている。実際、諸外国には、短期滞在型・長期滞在型、プロジェクト型、分野融合型、ネットワーク型等訪問研究員を主たるメンバーとする個性的な国際研究拠点があり、最先端研究を生み出している。京都大学数理解析研究所、統計数理解析研究所は世界を先導する有数の研究所であり、また産業界の要望に応じて九州大学マス・フォア・インダストリ研究所が設立された。しかしながら、これらの研究所は常任研究員が主要メンバーとなっており、今後は時代の要請に機動的に対応して革新的なテーマ及び短期プログラムを設定することができるようにし、また世界中から優秀な頭脳を集結させられる場となる訪問型国際研究所が日本にも不可欠となる。そのような研究所は日本の数理科学大国としての国際的な地位保持と、国際貢献の基盤となるばかりでなく、国全体の科学・技術の基盤強化と戦略分野の牽引役も果たすことが期待される。

イ セレンディピティを生み出す研究多様性の確保と社会に貢献できる数理科学人材の質的・量的充実

研究の動機には様々なものがある。例えば古代ギリシアの素朴な幾何学の問題が、中世以降に最適な航海術というナビゲータの役割を果たした。その後、19世紀には非ユークリッド幾何学、リーマン幾何学へと発展した結果、それが思いがけなく相対性理論を記述する言語を与え、さらには素粒子理論の数学的基盤構築、

宇宙の構造解明等の様々な科学・技術への応用に結び付いた。このように、数学の理論が創成されてから応用されるまでには長い年月がかかることが一般的である。応用に役立った数学の理論も、必ずしも当初から応用を目的として作られたものではなく、純粋に概念の思想的追求の結果であったことも多い。このため、数理科学の研究の発展のためには、研究の多様性が確保されることが最も重要である。数理科学研究者人材の質的・量的充実、多様な人材育成、国際的地位確保の基盤となる教育研究拠点、自由な思索を担保する連続した研究時間の確保や長期的視野に立った評価、安定的基盤経費の充実、挑戦を奨励する雰囲気醸成等が、思いがけない連想・ブレイクスルーを生み飛躍的發展をもたらす。さらに、諸科学や産業技術分野の研究、学際的研究、社会的問題解決のための研究等に積極的に参加する学際的視野を持った数理科学研究者を計画的に増やしていくことが必要である。日本では、数理科学素養を持ち国内及び国際社会で活躍する人材が諸外国に比べ圧倒的に不足していることは様々な機会に指摘されている。数理科学教育の充実、世界の動向と照らし合わせても、大変緊急性が高い課題である。数理科学が人間の数理、社会システムの数理と発展していくときには、科学者倫理の問題は避けて通れなくなる。数理科学教育と合わせて全人的な教養教育も合わせて行っていく必要がある。

2 数理科学分野の夢ロードマップ ～新たな展開と深化を目指して～



2-1 数理科学分野の俯瞰図



2-2 科学の本質に挑戦する数理（数学・数理科学の深化）



2-3 社会的課題に応える数理（数学・数理科学の展開）



(3) 物理学分野

物理学分野のビジョンと夢ロードマップの考え方

物理学は、自然現象の根源を探求し、宇宙と物質の起源と進化を解明し、同時に、新しい技術や産業の根幹をなす知と技を生み出すことを目指している。物理学の各分野はそれぞれに独自の目標と夢を持ち、その実現を目指したロードマップを作成した。ロードマップは、物理学の現在までの確固たる成果に基づくと同時に、物理学全分野さらには物理を超えた他分野との連携・協奏による科学の新展開を追求している。さらに、新たな謎の出現や予期せぬ発見から始まる「新しい道」の創出を常に意識し、基礎科学とその応用のフロンティアが限りなく広がっていくことを最大の夢としている。

ア 素粒子物理学

素粒子、宇宙、時空の起源を解明し、物質と時空を1つの原理から説明する究極理論の完成を目指す。主たる研究手段には、加速器実験、地下実験、大規模計算、数理科学を含む理論等がある。

イ 原子核物理学

クォークから陽子・中性子等のハドロン粒子を経て様々な原子核が生成するという宇宙での物質の創成・進化のプロセスを解明する。主たる研究手段として、加速器実験、地下実験、大規模数値計算、理論等がある。

ウ 天文学・宇宙物理学

宇宙の構造・起源・未来と宇宙の物質・天体の進化の全容を解明し、さらに宇宙における生命を探査する。主たる研究手段には、可視光から電波にわたる望遠鏡や人工衛星に搭載した装置による観測、重力波観測、大規模計算機、理論等がある。

エ 物性物理学

物質と物性の理解を究め物質観を構築し、新物質を探索すると同時に、新機能物質の創成を目指す。主たる研究手段には、ナノ・マイクロプローブや極限環境装置を駆使した実験、放射光や中性子等の量子ビームを用いた実験、大規模計算、理論等がある。

オ 原子・分子・ナノ物理学

量子力学の完全解明、量子情報処理技術の実用化そしてナノサイエンス・テクノロジーのさらなる展開を目指す。主たる研究手段には、レーザー技術を駆使した原子・分子の制御、先端ナノ顕微技術・超微細加工技術を駆使した実験、理論等がある。

カ プラズマ・流体・非平衡系・生命物理学

プラズマを含む流体や生命を含む非平衡系のダイナミズムと乱れの現象を解明し、自然界の変化の全容を明らかにする。さらに、核融合発電の実現や生命現象・経済現象への広範な応用を目指す。主たる研究手段には、大型プラズマ実験、大規模計算、様々な先端技術実験、理論等がある。

キ 光量子科学

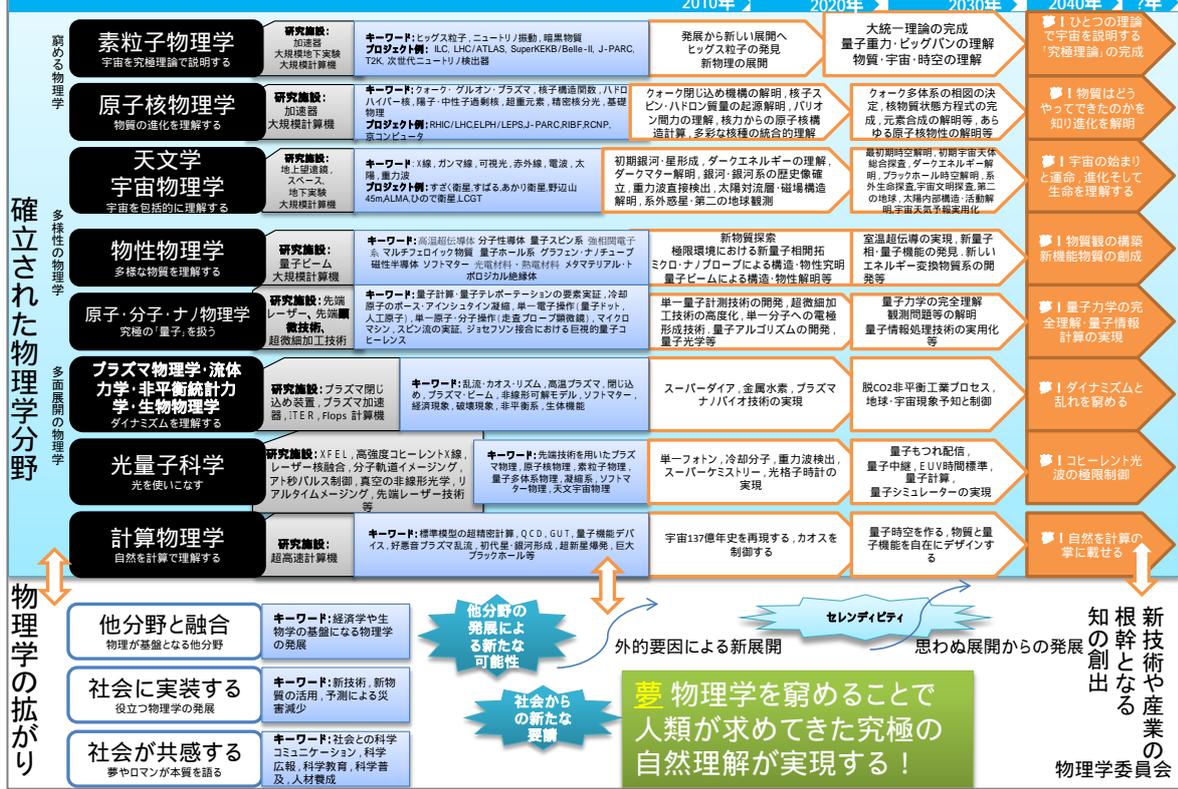
光（フォトン）を使いこなして、基礎物理学からグリーン・ライフイノベーションまでの多面的かつ学際的研究を目指す。主たる研究手段には、X線を含む先端レーザー技術やコヒーレント光による実験がある。

ク 計算物理学

自然現象のすべてを計算機の上で再現すると同時に、プラズマ、乱流等カオスの制御や新物質・量子機能の設計を実現する。同時に、物理学の全分野にわたる学際的、多面的研究の展開から、新たな学理を発見することを目指す。

3 物理学分野の夢ロードマップ ~ 究極の自然理解を目指して ~

1. 自然現象の根源を探らし、宇宙・物質の起源と進化を解明する 2. 新技術・新産業創出の根幹となる知と技を産み出す



3-1 素粒子物理学



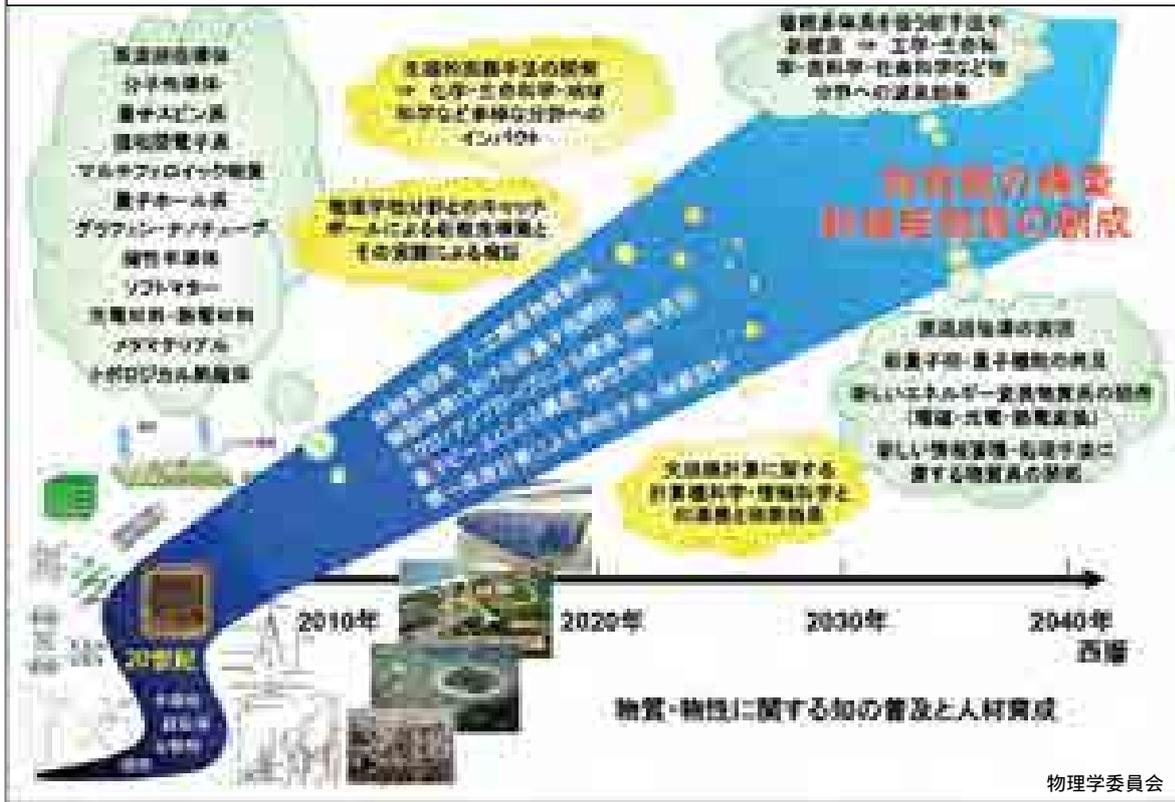
3-2 原子核物理学



3-3 天文学・宇宙物理学 ~ 知の地平線を拓げる ~



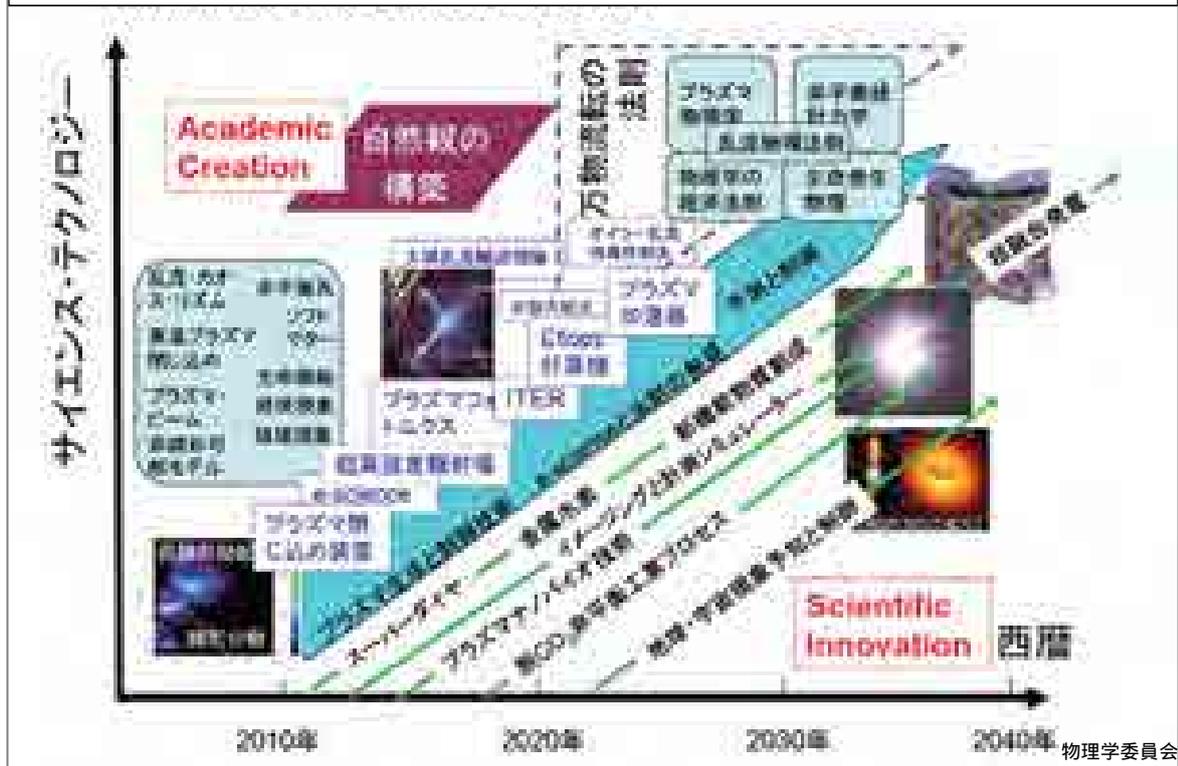
3-4 物性物理学 ~物質・物性を極め、新機能を引き出す~



3-5 原子・分子・ナノ物理学 ~ナノテクノロジーを使って原子・分子・ナノ物質を操る~



3-6 プラズマ・流体・非平衡系・生命物理学 ～ 万能流転: ダイナミズムと乱れを極める ～



物理学委員会

3-7 光量子科学



物理学委員会

(4) 地球惑星科学分野

地球惑星科学分野のビジョン

地球惑星科学は太陽系全般における固体、流体、気体、プラズマ、そこに芽生える生命の多様な形態、さらにそれらと人間の関係を研究の対象とする幅広い学問分野である。特に地球という惑星は我々にとって身近な存在であり、この惑星の起源・進化・現在・未来の研究を通して太陽系の他の惑星、さらには系外の惑星系までを理解しようとする、野心的な学問分野でもある。

地球惑星科学は自然現象の理解という基礎科学的な面と様々な環境問題や災害等に対応するための応用科学的側面を併せ持っている。

ア 基礎科学的側面

地球惑星科学は、地球と太陽系全体を構成する要素によって作られている自然体系を「地球惑星システム」として捉え、特に地球の自然及び社会体系の進化とダイナミクスを理解し、その将来予測を目指す総合的な学問領域である。さらに、生命の存在と進化について、その本質を理解することを目指している。

地球惑星科学コミュニティが解明しようとしている研究テーマは、以下のように多岐にわたっている。

- ・地球を太陽系の一惑星、太陽系を銀河内の一惑星系とみなし、生命が存在する地球の普遍性と特殊性をより客観的に理解し、さらに地球と生命の40億年以上にわたる共進化を理解すること。
- ・太陽活動の変動が地球周辺の宇宙環境や地球大気に及ぼす影響を理解すること。同時に、大気及び海洋、陸水系における物質の運動と化学組成、さらに高層の電離圏や磁気圏とそれらの相互作用を理解すること。
- ・固体地球や惑星内部の進化・変動を統一的に理解すること。地震・火山噴火のような瞬間的活動から造山運動・マンテル対流のような長期的活動まで、様々な時間・空間スケールにおいて地球惑星システムを解明すること。
- ・地球の表層部分で展開される人間の様々な活動と地球の相互作用を分析し、その情報を蓄積して、社会に開かれた研究基盤とすること。また、様々な階層からなる複雑系である地球惑星システムの変動を大規模計算を通じて理解し予測すること。

現在、これらをさらに統合し、地球史から人間生活までの時間スケール、太陽系から分子レベルまでの空間スケール、微生物から人間までの生物活動スケールを俯瞰した総合的な学問が誕生しつつある。この新しい学問によって、地球惑星システムの挙動と進化を様々な時間スケールと空間スケールで記述し、さらに未来の状態を予測することが可能になるだろう。

地球惑星科学は、基礎研究、モデル研究並びに継続的な観測調査とデータベース構築を基盤としている。特にモデル研究においてはどの分野においても、大規模な計算機科学がバックボーンとなっている。これらの研究の推進と並行して、地球を

理解し人間社会のあり方を考える力を養う一貫した教育の振興にも積極的に取り組むことが重要である。

イ 応用科学的側面

地球惑星科学は上記のように基礎的学問としての発展を目指すと同時に、以下の2つの社会的役割を果たすべきだと考えている。

(ア) 地球環境問題にアプローチし、これを解決する方向性についての発言を積極的に行うこと

太古から、人間は地球そのもの、或いは惑星としての地球の運動等に依存して活動してきた。例えば、時、暦、天体の位置関係に基づいた航法等は、古来、人間生活の基本となっている。鉱物資源や化石燃料等を通じて宇宙そして地球から恩恵を受けている。地球の状態を維持してきたのは太陽と地球内部システムからのエネルギーであった。しかし、近年、人間活動が自然に影響を及ぼすほどに大きくなってきている。地球は有限の小さな惑星である。現在、世界人口は70億人に達しており、2065年には100億人を超えると予想されている。エネルギー、水、食料、資源の枯渇が問題になっており、それらの消費増大による環境負荷、地球生態系の変化等、地球は劇的な変動の最中に置かれている。私たちと地球はどこへ行くのか、誰もが深い関心を抱いているが、その予測は簡単ではない。それは、地球自体が様々な変動を内包し、さらに太陽からの影響も受けており、その複雑な地球システムの挙動が未だ十分に解明されていないからである。

地球温暖化に象徴される環境問題、地すべり・土砂災害、砂漠化や水不足等、人々の生存に関わる出来事は、すべて惑星地球と人間の活動に起因している。この人間活動を含む新たなシステムの将来について、我々は学問的に責任ある発言をしていかなければならない。

(イ) 自然災害の規模を予測し、災害に備え、起きた災害にどのように対応すべきか発言していくこと

日本列島が面している海洋プレートの沈み込み帯は、巨大地震・津波や火山活動の源である。つまり、我が国は、地震や火山等の地球活動の最も活発な地域に位置しており、また地球上で最大の大陸と最大の海洋の境界という、地球環境を把握する上で極めてユニークな場所にある。反面、この事実は、私たちが常に自然災害と向き合わなければならない運命にあることも意味している。その意味で、地球惑星科学の振興は、我が国の国益に直接繋がっており、また、国際的な使命でもある。2011年に発生した東北地方太平洋沖地震津波は、未だ人類の持っている知識・経験が悲劇的災害に立ち向かうのに十分ではないことを教えてくれた。しかしながら、現時点では完全ではなくても、このような巨大地震・津波や火山噴火の再来周期や災害リスクの見積もりのもとになるデータを、将来はさらに多

くの情報を社会に提供する義務を負うのが地球惑星科学である。

地球惑星科学分野の夢ロードマップの考え方

我々の最も良く理解している惑星地球の姿は、永久の昔からこうであったのではない。地球には起源があり、今とは異なる姿を取りつつ現在に至ったのである。この地球の歴史を調べ、さらには地球の未来の姿にも迫る必要がある。地球惑星科学の目指す方向は

(A) まず宇宙に開いた地球像の創出を行う

地球は唯一無二であるかという問いに答え、
地球の持つ個性と普遍性、銀河史の中の地球史を理解する

(B) 次に太陽系内及び系外惑星の多様性の理解を行う

地球システム全容の理解と社会への貢献を考え、
地球の起源・進化・現在・未来を理解する
さらに惑星圏・表層環境・内部活動の変動機構解明と高精度予測にアプローチし、
地球環境と人間活動の関係解明、災害・地球環境問題の克服に尽くす

(C) 最終的には生命を育む地球惑星環境の理解が必要となる

惑星環境と生命の共進化を理解し、
第2の地球・生命生存可能惑星について考察する

この目標に至るため、5つの学問分野が関連し合い、協力し合っている。それらは、

- ・宇宙惑星科学
- ・大気水圏科学
- ・地球人間圏科学
- ・固体地球科学
- ・地球生命科学

と呼ばれる。これらの分野をあまねく理解することにより上に述べた地球科学がバランス良く発展するのである。地球惑星科学の総合的な学会組織である日本地球惑星科学連合は上記5つの科学に対応する5つのセクションから成り立っており、以下は、これらの将来ビジョンを示すものである

ア 宇宙惑星科学の夢ロードマップ

宇宙惑星科学は他の地球惑星学問分野と同様に、或いはそれ以上に探査技術、観測技術、分析技術の進歩と歩調を合わせ進んでいく。特に日本における惑星探査はごく少数の成功（始源天体イトカワからの試料回収）を例外として、未だ達成され

ておらず、これが行われると新しいものにアプローチできるという点で飛躍的な進歩を遂げる。

進歩のステップは大きく 10 年ごとに 3 つに分かれる

- (A) 宇宙における惑星系形成の仕組みを明らかにする
- (B) 第 2 の地球・生命居住可能惑星を宇宙に見出す
- (C) 生命を育む様々な惑星環境を理解する

(A) を達成するためにはまず太陽系の様々な惑星を訪ね、その環境を理解しそれぞれを比較する必要がある。その中には、地球を含む各惑星と太陽との相互作用の様々なあり方も含まれる。惑星の探査は技術的理由から、地球に近くまた太陽に近い惑星から始まり、次第に太陽から離れた惑星に展開していく。これはより始源的な環境を調べるという方向性とも一致する。また系外惑星の観測を開始し、これを計算機によるシミュレーションと比較していく必要がある。探査機は発展途上段階にあり、大規模探査の前にイプシロンロケットを使った小型高性能探査がまず初めに行われるべきである。

(B) を達成するためには太陽と惑星の相互作用をより深く理解すると共に、太陽そのものをさらによく知らなければならない。そして、目を外に向ければ第 2 の地球と呼ばれるものが発見されていくだろう。天文観測と太陽系探査の融合がなされるステップである。また宇宙からやってくる物質を分析する方法が確立される時期でもある

(C) は宇宙惑星科学と生命科学の融合のステップである。惑星を持つ恒星系は普遍的なものであると考えられ、様々な太陽系の中で我々の太陽系がどのような位置を占めるかが明らかにされる。

注意しなければならない点は、これらの進歩がすべてその場における探査によるのではなく、地上の観測（多種の地上観測の総合化）、地上での分析技術の進歩、また宇宙天気・機構研究の基盤としての長期連続モニタリング等と連携して行われることである。統合された観測のデータベースの構築も必須である。

イ 大気水圏科学の夢ロードマップ：基礎過程の理解及び予測と監視

本分野の発展は、単に技術の向上だけによるものではない。観測やモデルの「高精度・高解像化、多次元化・多様化、結合領域拡大、観測空白域縮小」と捉えるのが妥当である。また、観測とモデルのそれぞれにおいての発展が重要であり、大気海洋陸水・環境を理解し予測するためには、両者は協調して進むべきものである。したがって、常に意識すべき大きな方向性は、「新しい観測網の展開、計算機技

術・数値モデルの発展」と考える。また、本分野は、人間生活に深く関わる分野であるため、社会への貢献或いは社会への責任という視点での記述も加えた。また、本分野は、国際的にトップレベルの学術成果を発信していく一方、アジアにおける観測網の充実等国際社会の中での役割分担も意識して発展させる必要がある。

以下、現在の科学レベル、近未来、遠い未来において実現が期待される科学をキーワードにより記述する。

(ア) 現在

階層モデル・結合モデルの開発・利用、観測網の拡充・空白域へ観測拠点整備、長期気候データの蓄積が重点的に行われている。

結合モデルとしては、全大気モデル/海洋階層構造モデル/生態系・水循環結合モデルが既に実現されており、また、メソ気象解像度実用・雲解像度開発/エアロゾル・化学・乱流/雲/重力波パラメタリゼーションにおける大きな発展があった。

観測と監視の視点では、太陽活動の気候影響研究/大型大気レーダ観測網/定常気象・水文・生態系観測網/再解析長期気候データ/小規模集中観測(雲ライダー・各種ゾンデ・航空機・地上ステーション等)/漂流ブイ観測(物理気候)/アジア生物多様性観測/地球観測衛星(雲・水蒸気・風・大気組成)・GPS衛星(可降水量・気温)/ドームふじ氷床コア解析・次世代コア技術が国際的なコンセンサスの中で実現しつつある。

計算機技術の発展が本分野には深く関わっており、特にモデル研究には重要である。地球シミュレーター、次世代スーパーコンピューターの利用が現在では重要で、これにより温暖化予測は実現し、シビアウェザー(竜巻・台風・短時間豪雨)の予測も実現しつつある。これらは社会貢献にも結び付いている。

(イ) 近未来

観測・モデルの多元化・総合化が進み、社会ニーズにも迅速に対応できる機動的観測システム整備が進むと考えられる。多元的総合的な地上観測網が充実し、多機能な衛星観測も発展してゆく。社会貢献としては、水・GHG・汚染物質の把握と予測、エネルギー管理・防災・交通管理・土地利用/農業への応用が実現するものと考えられる。

(ウ) 遠い未来

着実に地上及び宇宙からの観測網が充実し、宇宙・大気全層・海洋の精密監視が定常的に行われるようになる。また、観測データのモデルへの同化技術も高度化し、宇宙・大気全層・海洋の高精度予測が実現する。アジア域において主導的観測研究がなされ、環境監視とジオエンジニアリングを組み合わせた気候変動と環境変化に関する高度な対策技術も目指す必要がある。

ウ 地球人間圏科学の夢ロードマップ：持続可能な日本、アジア、世界の実現への道

21世紀前半の我が国における地球人間圏科学の最大の課題を、「持続可能な日本、アジア、世界の実現への貢献」と規定し、それを地域・社会のサステナビリティ及び知識・情報の質・量・モビリティ等で決まる広い意味でのサイエンスレベルの向上により実現するという道筋を描いた。全期を以下の通り3期に分け、全期を通じてサイエンスレベルを押し上げる力として教育・研究により駆動される人・情報・知識の循環を掲げた。

(ア) Phase I (2014年頃～2023年頃)

ICSU (国際科学会議) の提唱する長期的研究計画 Future Earth の想定期間と重なる。この間に FE の指針に沿って地球人間圏が抱える諸問題の実態把握と改善の道筋を明らかにし、地球人間圏科学の研究・教育の充実と世界的展開の流れを確実にする。具体的には以下の研究・実践活動を進める。

- ・陸域持続可能性研究：土地利用・被覆変化、土地・資源・エネルギー、都市、農村、林野、土壌、水文、環境保全、生態系保全、環境劣化、廃棄物、統合モデル、地球情報整備等
- ・沿岸・縁辺海域・海洋持続可能性研究：陸域 - 縁辺海域システム、沿岸・縁辺海域利用、環境保全、生態系保全、海洋資源、汚染の発生と浄化等
- ・自然災害 (ハザード) 研究：気候変化影響、地震動、洪水、津波、地すべり等
- ・災害リスクの統合的研究：災害リスク統合研究 (IRDR) 等国际研究計画の日本拠点の形成、災害原因の学際究明と評価、データ・情報の統融合、リスクガバナンス、地域特性を踏まえたレジリエンス研究、災害リスクに係る自然・社会・人間の関連性の解明と防災・減災への貢献、分野間連携・科学 - 社会連携の強化等
- ・地殻災害軽減の研究：「地震及び火山噴火予知のための観測研究計画」(2009～2014)を継承する「災害軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」(2014～2019)等による災害科学としての地震火山災害誘因(ハザード)予測等
- ・地球人間圏科学研究・教育・情報ネットワーク：学校市民参加モニタリングネットワーク、ESD、地球人間圏科学教育、グッドプラクティスの発掘と推進等

(イ) Phase II (2024年頃～2033年頃)

Phase I の成果を活かし、全人類的パートナーシップを確立し、持続可能な日本、アジア、世界への道を見出すことを目標とする。具体的には、

- ・地球人間圏科学研究・教育・情報ネットワークの一層の充実と世界的展開

- ・陸域・沿岸・縁辺海域・海洋持続可能性研究の一層の充実と世界的展開
- ・リスクマネジメント研究・教育の一層の充実と世界的展開
- ・グッドプラクティスの充実と推進

(ウ) Phase III (2034年頃～2043年頃)

Phase II の成果を活かし、地球人間圏科学・教育の充実と世界的展開に努めると共に、すべての人類の協和、英知の結集、地球環境倫理の確立を実現し、以下の目標を達成することに寄与する。

- ・持続可能な世界を生きるための新しい地球観、生命観、自然観、人間観、世界観の創出
- ・地球環境問題の克服：人口問題、食糧問題、土地・資源・エネルギー問題、温暖化問題
- ・汚染の縮小、自然災害の減少、格差・貧困の削減
- ・持続可能な世界を導き維持する地球人間圏科学のさらなる高度化と教育の推進
- ・科学の果実の全人類の共有

以上により、人と自然が調和した平和で持続可能な日本、アジア、世界を実現することに最大限の貢献をすることが、我が国の地球人間圏科学の「夢」である。

エ 固体地球科学の夢ロードマップ：稠密観測・極限実験・高感度分析が拓く固体地球科学

地球は、海、陸、生命が存在し、大きな衛星「月」との強い相互作用、及びプレート運動、地殻変動、ダイナモ作用を伴う活動的な惑星である。なぜ地球がこのように活動的であるのか、未来の地球と人間社会の関わりはどのように変化していくのか、また宇宙の中でもユニークであるのか普遍的であるのか、これらの疑問のもと、系外惑星の探索、発見と共に「地球」の描像が大きく変わりつつある。地球での知見がリファレンスであると同時に、より一層、惑星「地球」の深い理解が求められている。

地球は、便宜的に固体地球圏、気圏、水圏、生物圏等に分けられるが、地球の根源的理解のためには、明らかにこれらを1つのシステムとして捉える必要がある。その中でも、質量の99.98%を占める固体地球は重要な部分であり、火成・脱ガス作用、大陸形成、プレート物質循環等を通して、表層環境や生物進化に深く関わる。固体地球の徹底的な理解は、人間社会にとっても重要である。巨大な地震・津波・噴火を含む変動現象の評価・予測と防災、資源の探求及び開発、環境の保全と改善等への貢献を通して、人間や社会活動と深く関わる。

惑星「地球」とそこでの現象の理解には、形成から現在に至るまで、及び表層から深部までの構造、進化の全容解明が必要である。それらに基づき、宇宙中での「地球」の個性と普遍性が明らかになり、未来予測や人間社会への貢献も可能となる。すなわち、「地球の構造、変動、歴史を解明」をさらに推し進め、「惑星『地球』のシステム全容を理解し予測する」ことが、「宇宙に拓いた地球像を創出する」ことに繋がるのである。

(ア) 項目・キーワードの関連性

a 地球の構造、変動、歴史を解明

表層 - 中心核の実験的再現・数値計算

- ・地殻 - マントル - 核とメルトの相平衡・転移（高輝度 X 線・中性子ビームライン）
- ・プレート・マントル対流、MHD ダイナモ

陸域稠密観測 - 海域掘削と構造・資源・ダイナミクス

- ・地震 - 測地観測網（Hi-net、DONET/2）、重力、素粒子（ニュートリノ、ミュオン）
- ・巨大変動（地震・津波・噴火）評価・予測と社会還元（災害科学・防災施政との連携）
- ・大規模高精度波形・データ解析、トモグラフィー（地震波動理論の高度化）
- ・海陸地質 - 元素資源マッピング（深海掘削、超深度掘削、海陸新資源）

地球史解読

- ・リターンサンプルによる形成初期進化（サンプルリターン）
- ・地球史・生命環境史の特異点研究

b 惑星『地球』のシステム全容を理解し予測する

全地球の組成・物性・ダイナミクス

- ・次世代高輝度ビームライン物性実験（レーザー圧縮物性測定、氷惑星）
- ・全地球・ミクロ - マクロ変動結合計算（第一原理計算シミュレーター）
- ・素粒子による熱源分布トモグラフィー（ニュートリノトモグラフィー）

海陸常時稠密観測と高精度予測（新環境制御、廃棄物処理）

- ・日本一周ケーブル、太平洋地球物理観測網（地殻変動高精度予測）
- ・地震・津波・火山噴火活動評価手法高度化（強振動予測定量化）

地球史 - 生命発生・進化

- ・地球形成過程：マグマ海、GI（Giant Impact）、月（スーパーアース、ガス惑星）
- ・地球史化学・生物層序と内外営力（同位体精密分析顕微鏡、冥王代、初期地球）

c 宇宙に拓いた地球像を創出する

岩石・ガス惑星物性、資源（惑星地質・構造探査、太陽系新資源）

- ・超高温高压下での惑星内部構造と新物性
- ・惑星：地質、新資源、ハビタビリティ、利用検討

最先端稠密全球ネットワークによるリアルタイム観測（長期地球変動予測）

- ・固体地球・表層・月・太陽相互作用の稠密観測
- ・地震・火山噴火・変動高精度予測、防災手法確立

シームレスな地球形成・進化史：データとシミュレーション（固体地球 - 表層・生命圏 - 宇宙圏統合進化モデル）

- ・集積過程：冥王代から現在まで、
表層環境から地球中心まで、
全地球システム史と未来予測

段階的に、地球科学、惑星・天文学、生命科学を融合し、地球の個性と普遍性の理解、銀河史の中の地球史の理解を目指す。

(イ) 基盤手法

これらの進展は、主に固体地球科学の夢ロードマップの副題及びロードマップ下部に掲げられている以下の手法によって支えられる：(1) 表層から中心核まで、及び地球史に及ぶ稠密観測：物質科学的観測（地質・岩石・鉱物学、古生物学、地球化学的手法による全地球・地球史野外調査、組織構造解析、試料サンプリング）及び地球物理学的観測（地震 - 測地観測網、重力、素粒子による海陸連結稠密常時変動観測）(2) 室内実験及び数値実験による極限実験：地球惑星物質の物性に関わる超高温高压発生実験、スーパーコンピューターによる第一原理計算、地球内部及び全地球システムの大規模連結シミュレーターによるダイナミクスの解明、ビッグデータ解析によるシステム解読、(3) 生体物質を含む地球惑星物質の高感度分析：高解像度構造解析、ナノスケール全元素・同位体分析。

a 全元素 - 同位体分析、分子構造解析：物質分化・生命進化の解明

4次元グローバルサンプリングによって得られる宇宙・地球の無機・有機・生体物質試料について、全元素・全同位体存在度及び分子構造を解析し、冥王代の実態解明に加え、地表付近の諸過程（生命誕生・進化、酸素大気の出現、炭素や栄養塩の循環、大陸及びプレートの形成・進化、火成作用の変遷、気温・組成の急変事件と生物進化、宇宙線強度変化）地球内部プロセス（マントル対流とプレート物質の循環・分化、内核の成長とダイナモ作用）及び内部と表層の相互作用（水・炭素循環等）を解読する。極微量/ナノスケールの局所分析を駆使し、隕石、初期地球物質（例えば結晶中包有物）初期生命の痕跡を徹底探索・解析する。

b 大規模稠密観測による地球内部構造と変動機構の解明

全地球を覆う地球物理学的観測（GPS、VLBI、応力計、超伝導重力計、地震・電磁気、素粒子（ニュートリノ、ミュオン）による観測）を展開し、地殻・マントル・核の構造と変動を捉える。特に、海域にも陸域と同程度の稠密高精度観測網を設置することにより、従来は見えなかった領域及び高解像度で地球内部を透視し、プレート物質の大循環、コア・マントル境界の実態、核内部の構造と変動に加え、ほぼリアルタイムでプレート内及び境界の構造とダイナミクス（地震、火山現象を含む）を捉える。これらが、活動的惑星「地球」の個性と普遍性の理解、及び巨大変動現象（巨大な地震・津波・噴火を含む）に対する近未来の高精度評価・予測の基礎となる。

c 4次元グローバルサンプリングによる地球史及び内部構造の解明

初期地球物質（隕石、生体物質を含む）の徹底探索による集積からマグマオーシャン、コア形成、ジャイアントインパクト、大気・海洋・大陸地殻・プレート及び生命の出現に至る構造とプロセスを解明し、隠された時代「冥王代」の実態に迫る。全時代・全地域・超深度に及ぶ稠密サンプリングにより、地球の物質科学的構造と進化を地球史に及ぶ時空間（4次元）で捉え、内部・表層を包括する地球システムを実証的に解明する。

d 形成から現在、地表から中心に至る条件での物性・反応実験

地球の形成と進化に関わる幅広い温度・圧力・組成条件に対応し、物性、相平衡・化学反応の実験を、全元素・全同位体分析・分子構造解析技術、高輝度X線・中性子線ビームラインと大容量試料（mm~cm）の物性再現・測定装置等と組み合わせ、物質の状態や構成則を制約する。集積やジャイアントインパクトに関連する岩石・鉱物の衝突や蒸発・凝縮、マグマオーシャンに関連する溶融、大陸やプレートの形成に関わる物質分化と物性、コアの形成・進化・構造に関わるメタル・ケイ酸塩反応、生命現象に関わる鉱物表面での反応、高分子や有機物合成等様々な物性や反応を制約する。

e スーパーコンピューティング：連結モデル、データ解析、未来予測

惑星形成過程から初期地球の大規模分化に至るシームレスなシミュレーション、炭素・二酸化炭素等物質循環の地球内部・表層の連結シミュレーション、ゲノム・メタゲノム、タンパク質解析等による生物多様性・進化の解析、コア・マントル・地殻を統合したダイナモ・プレート運動・大陸移動を含む統合シミュレーション、地震サイクル・地殻変動を含む局所高精度計算により、地球システムの振る舞いを定量的に理解、予測する。大規模なグリッド、大きな物性コントラスト（例えばプレートとその境界）、膨大なデータ等を含むシミュレーション・解析のために、大容量メモリ（~10¹⁰ギガバイト）を用いた超高速

演算を行う。

オ 地球生命科学の夢ロードマップ

地球生命科学の向こう 30 年間の目標は、地球システムの中における生命の役割を明らかにすることである。これは、我々現代人類の地球史的背景を理解することに繋がる。2040 年までを以下のように大きく 3 つのステップに分ける。これらは、10 年ごとにどのレベルまで解明されることが期待されるのかを示すものである。

- (A) 地球における生命圏の仕組みを明らかにする
- (B) 地球生命圏の広がり・限界を探索する
- (C) 地球とは何か、生命とは何か、現代人類とは何かを理解する

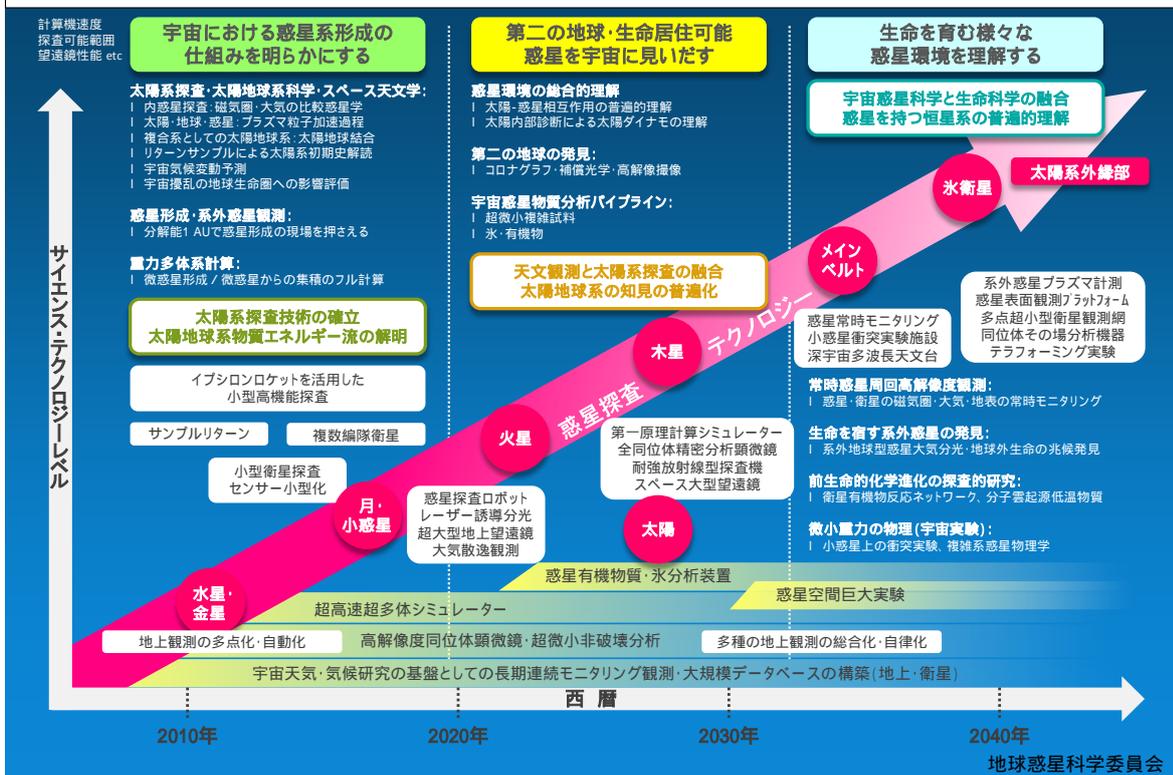
(A) の達成のためには、40 億年にわたる地球生命史の解読、地球史上の様々な環境変動イベントの要因の解明、極限環境（地球外も含む）の生命に関する理解等、基礎的な情報を整備する段階である。(B) では、(A) で整備された情報をデータベースにする等により体系化した上で、さらに新たな情報を得るためのテクノロジーを開発する一方で、生物資源の利用等の応用的な方向にも足を踏み出す段階である。(C) では、地球生命を機構レベルで本質的に理解する段階に到達する一方で、地球外生命の存在に関してはより実証的な研究に進む。また、それら研究成果が社会に還元され、地球生命に対する人々の理解が大きく進む。

なお、これらのステップを達成するためには、サンプル探査や分析・実験等の技術的レベルの向上に加え、研究試料の収集・管理のようなアーカイブの継続的整備も必要である。

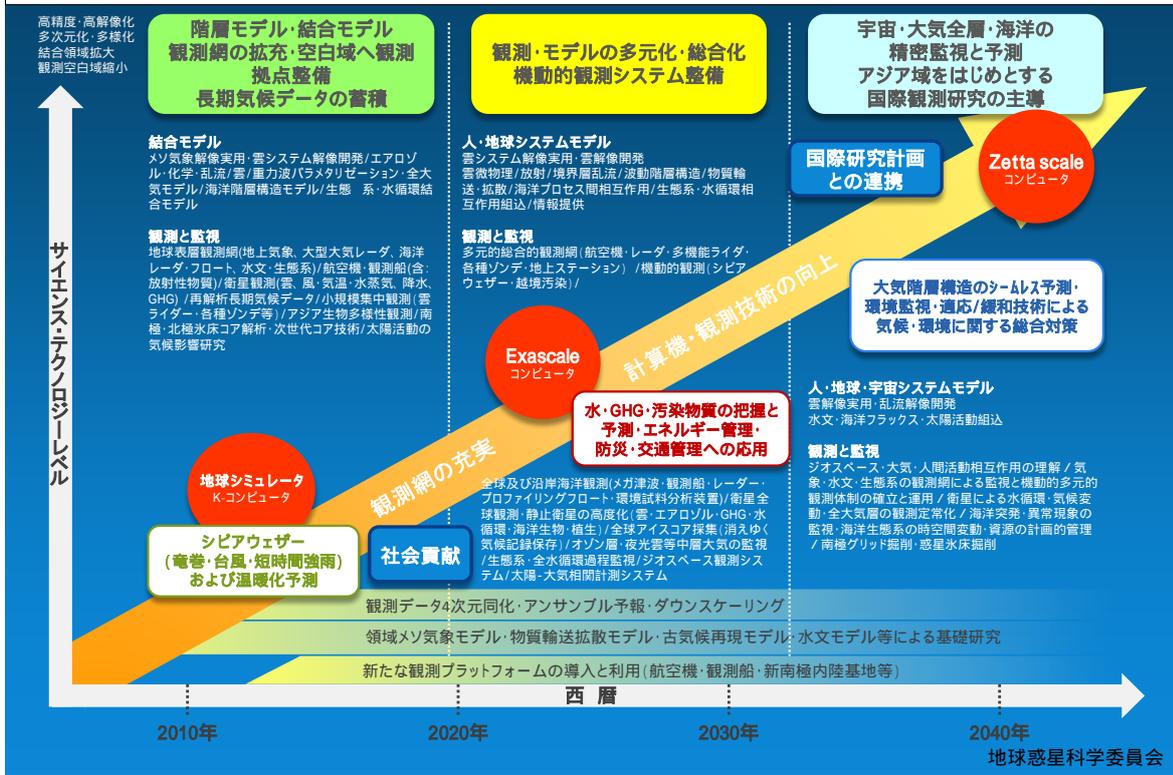
4 地球惑星科学分野の夢ロードマップ 概要



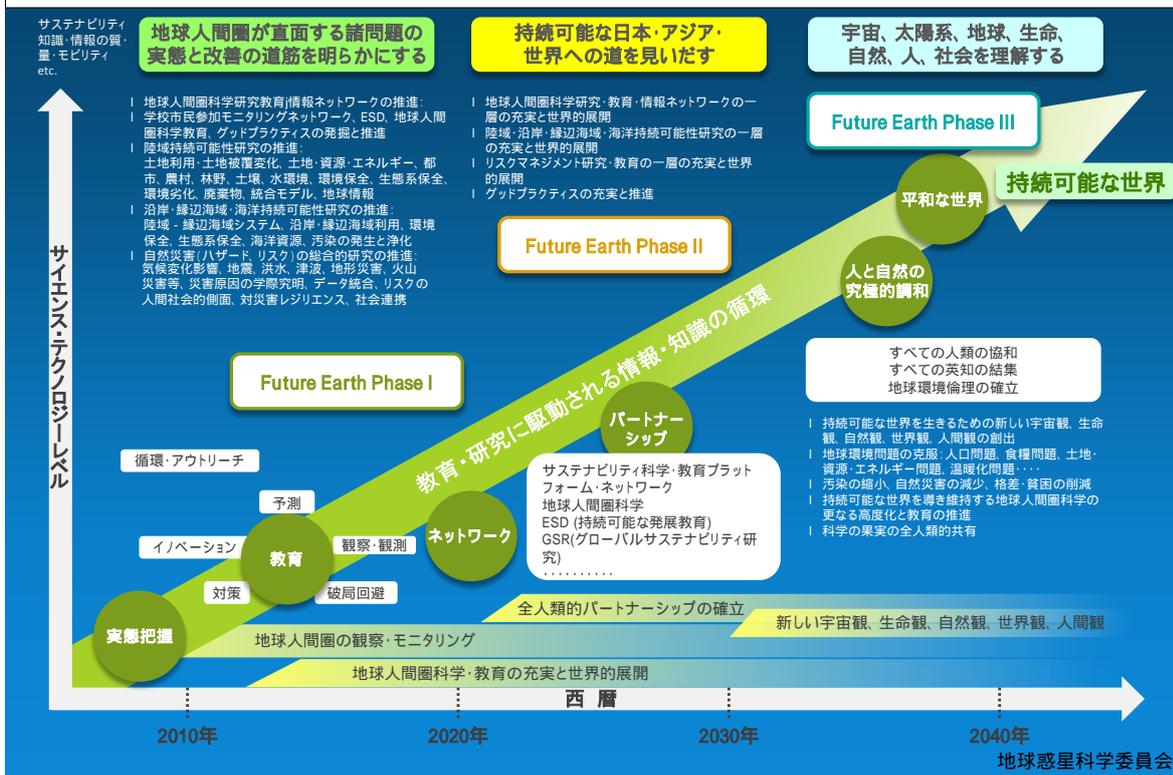
4-1 宇宙惑星科学の夢ロードマップ ~ 究極の探査・観測・分析が切り拓く宇宙惑星科学 ~



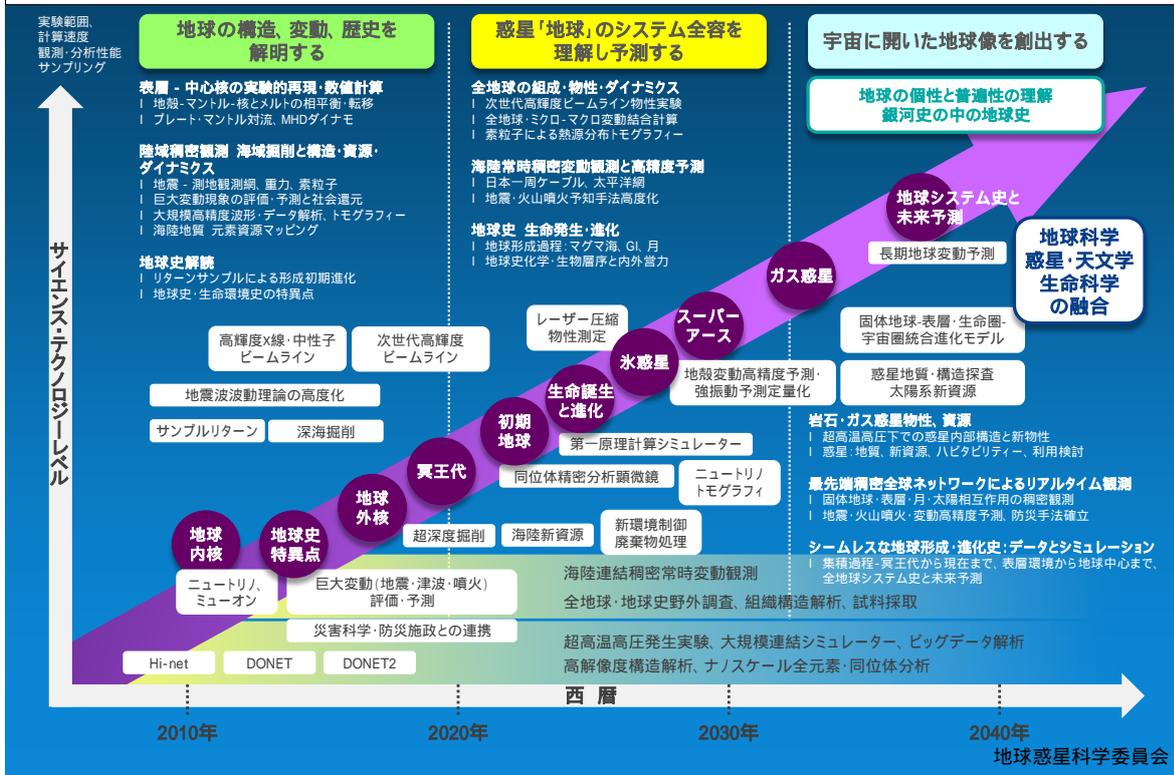
4-2 大気水圏科学の夢ロードマップ ～基礎過程の理解と気候予測および気候監視～



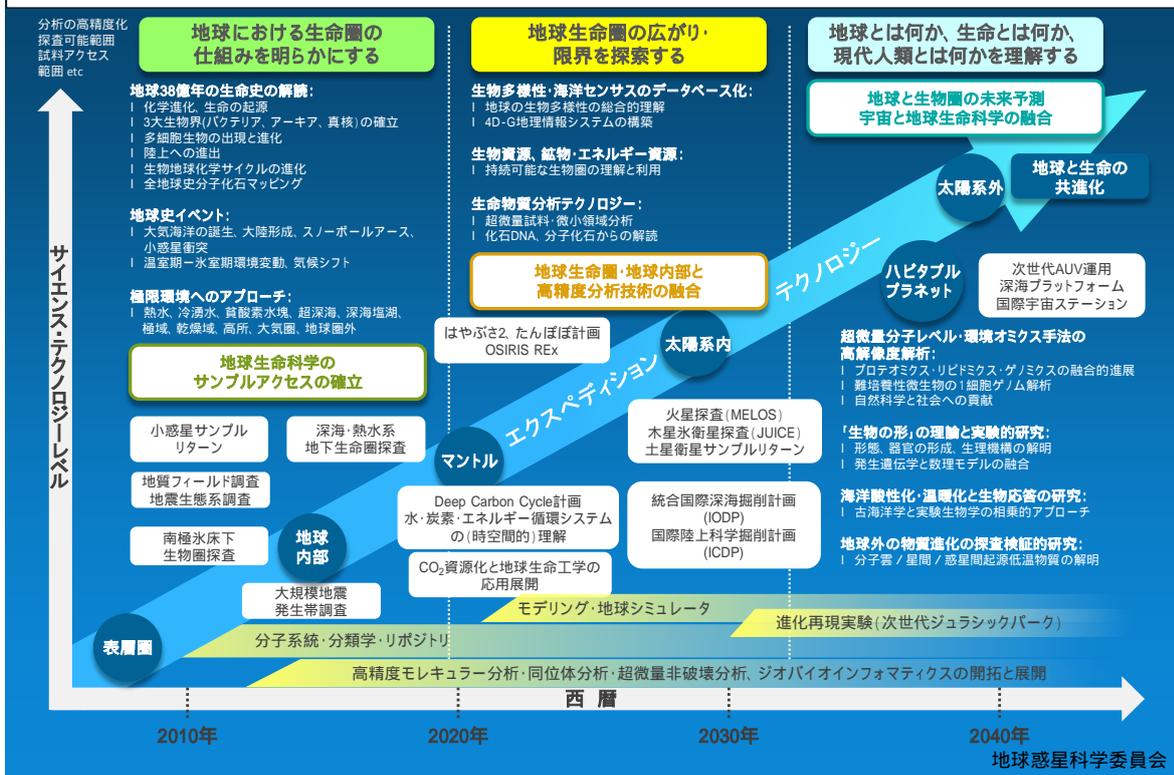
4-3 地球人間圏科学の夢ロードマップ ～持続可能な日本、アジア、世界の実現への道～



4-4 固体地球科学の夢ロードマップ ～ 稠密観測・極限実験・高感度分析が拓く固体地球科学～



4-5 地球生命科学の夢ロードマップ ～ 次世代の探査・観測・分析が描く地球の生命像～



(5) 情報学分野

情報学分野のビジョン

従来、情報学分野、特にその根幹をなす情報処理技術のロードマップは要素技術のみにより語られることが多かった。しかし、スマートフォンやインターネットの日常的な使用に垣間見られるように、情報処理技術が人間生活の隅々にまで浸透し、情報処理技術を基盤とした生活様式が構成されることで、あたかも文字の発明が新しい文化体系を形成したかのごとく、情報処理技術によって新しい文化が花開き、人間生活の方向や価値に多大な影響を与えるようになると思われる。すなわち情報処理技術は、単に理工学の一分野として技術の発展のみで語ることはできず、生活様式をも取り込んだ形で展開様式で議論することが重要となってくる。そこで、この情報学分野のロードマップにおいては、要素技術だけでなく、情報学分野の基盤となる諸技術と人間生活との関わり合いを示唆するようなロードマップを考えることにした。この際、人間社会において実現を望む「夢」の社会に関する4つの柱を立て、それぞれの柱についての諸技術の関わり合いを論じることとした。ここで、4つの「夢」の社会とは、以下に記す「人智高資産化社会」、「活力高生産社会」、「安心安全快適社会」、「持続可能社会」である。

ア 人智高資産化社会

人智高資産化社会では、高精度・高速な電子化技術、光学計測技術、大量データの蓄積・検索・送受信技術、超臨場感表現技術の発達により、多様な文化資源や日常体験のデジタルアーカイブ化が行われ、人智の再構成が進み、効率的に臨場感ある体験が可能となる。その結果、五感で感じる世界遺産・遺跡の電子化（eHeritage）や過去の成功失敗の体験、歴史的イベント等が臨場感を持って学習できるようになる。

また、構築されたアーカイブを基本データベースとする新しい学問体系「サイバーヒューマニティ」が展開されるようになる。さらに、大規模公開オンライン講座（MOOC）等のE-ラーニングが世界的に普及し、学習に対する国や地域の差が縮小していく。

一方、現実環境をコンピューター上に拡張する拡張現実感（Augmented Reality: AR）や複合現実（Mixed Reality: MR）等の技術は、その規模と感覚器官をさらに拡張し、メディアアーカイブ技術と連携して新たな現実・非現実感体験を生むようになる。さらには、3次元（3D）プリンタや機能に関する高次表現方法の普及により、個々人の嗜好に合致するものを要望する量だけ生産するテーラーメイドプロダクションの実現が進展していく。

イ 活力高生産社会

活力高生産社会では、エンターテインメントコンピューティング技術、ウェアラブルセンシング技術の発展により、嗜好に合うもの、或いは望ましく思うものの定量

化への途が拓け、これと知的ロボット技術の発展とが相まって、人間の活動の肩代わりが進み、個々人が行いたいことが遠隔操作によって効率的に実現できるようになる。

歩行やグローバル・ポジショニング・システム（GPS）による位置情報等の日々の活動がライフログとして記録され、またセンシング技術の発達に伴い、活動だけでなく視覚、聴覚、嗅覚等といった五感のセンシングも行われるようになる。やがては、脳との直接的な入出力による効率的な意図の伝達が可能となる。

また、研究対象であったヒューマノイドは技術開発が継続的に発展し、自律的な適応が可能なレベルまで到達する。さらに、例えば、故人のアーカイブされた情報をもとに、電子的に人格等の身代わりを可能とするようなロボットまで登場する。

ウ 安心安全快適社会

安心安全快適社会では、治療記録を始めとしたカルテの電子化が進み、それぞれの地域や病院で管理されていたデータがやがて相互運用できるようになる。アクセス制御と本人認証技術の発達に伴い、最終的には医療記録の自己管理（Personal Health Record: PHR）が実現する。

高齢化社会に対しては、インターネットに接続された家電製品を応用した見守りサービスから始まり、介護やりハビリを支援するロボット等が実現されていく。最終的には、自律して能動的な介護を行うエージェントにまで発達する。

また、センシング技術や高度情報化交通システムの導入により、運転の支援や渋滞の予測等が実現していく。さらに、車両の種類等が限定される可能性はあるものの、無人の自動運転技術が登場する。

物理的な安全社会だけではなく、サイバー社会についても多くの技術革新が見られる。深刻度が増している不正アクセスに対する早期検出技術が浸透してだけでなく、不正者の追跡が可能になる能動的なセキュリティ基盤が整備されていき、迷惑メールやマルウェアが撲滅された安全なサイバー社会が実現する。

また、共通番号制度と認証技術の発達により、大規模で安全な個人認証が可能になる一方、個人情報やサイバー社会での行動が匿名化されたり、或いは秘匿解析技術（プライバシー保護データマイニング）が適用されたりすることで、プライバシーが保護されたままでもビッグデータ技術を活用した情報推薦や個別化（パーソナライズ）されたサービスが享受できるようになる。

エ 持続可能社会

持続可能社会では、電子政府・電子行政サービスが国民一人一人に行き渡り、必要なサービスがいつでも受けられ、災害時においても麻痺することがない頑強性の高いインフラが提供されるようになる。現在のマイポータルサイト（ワンストップ行政サービス）では、サービス利用のために利用者の申請手続きが必要であるが、やがて申請不要で教育や医療等の必要な社会サービスが利用可能になっていく。さ

らには、エージェント技術の普及に伴い、個々人対応の行政エージェントが実現する。

また、地震や台風等の災害に対しても、必要な災害情報を正確かつ迅速に通知するサービスが普及する。さらに、サービスが停止することなく、しかも災害耐性が高い（レジリエントな）情報基盤やエネルギー管理基盤が提供される。

情報学分野の夢ロードマップの考え方

ア 基盤的な研究開発の進展に関する夢ロードマップ

ドッグイヤーと称される情報学分野の発達は極めて早く、さらにはサービスの自由度と多様性が高く、将来の予想はなかなか困難である。そこで、情報処理学会の「コンピュータサイエンス(CS)領域」に属する全研究会の主査が中心となって、情報学分野の基盤的な研究開発内容に関して、次の4つの軸の上で2030年までに実現していくと予想される重要項目を列挙した。その結果をもとに、2010年から2030年までの10年ごとの基盤的な研究開発の進展に関するロードマップを作成した。

- ・アーキテクチャ
- ・オペレーティングシステム/プログラミング
- ・データベース
- ・アルゴリズム

なお、それぞれの軸上に記載されている重要項目は、最先端、或いは今後を予見した研究トピックとの関わりが深い。したがって、現状では広く一般に認知されていない項目名が多分に含まれていることに留意されたい。

イ 人智高資源化社会の夢ロードマップ

人智高資源化社会に関するロードマップは、情報処理学会のコンピュータービジョンとイメージメディア研究会、コンピューターと教育研究会等が所属する「メディア知能情報(MI)領域」が中心となって作成した。情報学分野の学術体系の継続性を重要視する観点から、日本学術会議第三部 報告「理学・工学分野における科学・夢ロードマップ」[1]の46頁に掲載されている前回の情報学分野の夢ロードマップにおける次の4つの項目をベースにして、人智高資源化社会の今後の発展を検討した。

- ・フィジカルアーカイブ
- ・メディアアーカイブ
- ・サイバースクール
- ・超臨場感メディア

これらの項目に関する技術は相関が高く、互いに関連して発展することが予想されている。例えば、ブレン・マシン・インタフェース(BMI)を用いた学習技術が実現すると、それを応用した全感覚没入体験が可能な超臨場感メディアに応用されると考えられる。そのような関連する技術を矢印で結んでいる。この矢印の意味は、

他の社会に関するロードマップでも同様であり、両方向の矢印は相互に関連することを意味する。

ウ 活力高生産社会の夢ロードマップ

活力高生産社会に関するロードマップは、人智高資源化社会に関するロードマップと同じく、情報処理学会のエンターテインメントコンピューティング研究会やゲーム情報学研究会を有する「メディア知能情報(MI)領域」が中心となって策定した。人智高資源化社会の場合と同様に、前回の情報学分野の夢ロードマップで挙げられている次の4つのキーワードを選び、それらに関わる技術の発達を予測している。

- ・金融システム
- ・エンターテインメントコンピューティング
- ・ウェアラブルセンシング
- ・知的ロボット

金融システムの電子化については、銀行口座情報を始めとして既に実現しているものもあるが、今後はゲーム内通貨を始めとしたサイバー社会における財産との融合も進むことが予想される。さらに、五感のセンシングや身代わりロボットの進展により、より人間を主体とする技術の確立が予想される。

エ 安心安全快適社会の夢ロードマップ

安心安全快適社会に関するロードマップは、情報処理学会のコンピュータセキュリティ研究会、インターネットと運用技術研究会等が所属する「情報環境(IE)領域」が中心となって技術予測を行い、策定した。前出の2つの社会の場合と同様に、前回の情報学分野の夢ロードマップで挙げられているからキーワードから次の5つを選び、その技術動向を予測している。

- ・パーソナルヘルスケア
- ・高齢化対策
- ・高度情報化システム
- ・サイバーセキュリティ
- ・プライバシー

医療データの電子化や電子カルテの一部は、現在までに既に一部実現している。今後は、それらが標準化プロトコルを介して互いに結合した大規模医療データベースの構築へと結び付いていくことが予想される。ただし、個人の健康に関する個人情報が悪用されたり、本人の意図しない目的で利用されたりしてはならない。そこで、各種の暗号技術、認証基盤、及び匿名化技術の発展と合わせて、これらを安全かつ快適に活用していくことが求められている。

オ 持続可能社会の夢ロードマップ

持続可能社会に関するロードマップは、安心安全快適社会のロードマップと同じく、情報処理学会の情報システムと社会環境研究会やモバイルコンピューティングとユビキタス通信研究会が所属する「情報環境(IE)領域」での議論に基づいて策定した。他の社会の場合と同様、前回の情報学分野の夢ロードマップから次の4つのキーワードを選び、それらに関するより詳細な検討を行った。

- ・ パーソナル行政サービス
- ・ 電子政府
- ・ レジリエント社会
- ・ サイバーフィジカル

電子政府は、現時点でも一部のサービスが実現しているが、その利用は限定的であり、投票や年金記録等の行政サービスは未だ実現されていない。それらは、共通の認証基盤の普及と共に、緩やかに実現していくものと予想されている。ただし、強制的な電子政府の利用を進めた場合、デジタルデバイドを生じてしまうことが懸念される。プライバシー保護等の課題解決を図りつつ、信頼できる電子政府の基盤の実現が望まれる。また、地震や台風等の各種災害に対しても、麻痺することがない頑強性の高い(レジリエントな)情報基盤やエネルギー管理基盤も合わせて実現されていくことを予想している。

5 情報学分野の夢ロードマップ ~全体図~



5-1 基盤的な研究開発の進展に関する夢ロードマップ

2010	2020	2040
<ul style="list-style-type: none"> 高度集積回路 超集積ハードウェア (3D) アーキテクチャ メモリーコア高集積プロセス 高集積・高集積・高集積・高集積・高集積 マルチスケールシミュレーション 	<ul style="list-style-type: none"> 異種ハードウェアアーキテクチャ 異種ハードウェアアーキテクチャ 二次記憶デバイス 異種ハードウェアアーキテクチャ Everything as a Service アーキテクチャ 	<ul style="list-style-type: none"> 異種ハードウェアアーキテクチャ 異種ハードウェアアーキテクチャ 異種ハードウェアアーキテクチャ 異種ハードウェアアーキテクチャ 異種ハードウェアアーキテクチャ
<p>イノベーション・ソフトウェア・プラットフォーム</p> <ul style="list-style-type: none"> 大規模データ処理技術 モジュール化技術 コンテキスト感知プログラミング ディバンププラットフォーム セキュリティ・セキュリティ 	<ul style="list-style-type: none"> クラウドと on-premise の Everything as a Service 技術 オープンディベロップメント サイバーフィジカル 異種ハードウェアシステム統合技術 ハイブリッド異種ハードウェアプログラミング 	<ul style="list-style-type: none"> 異種ハードウェア・ソフトウェア・ハードウェア 量子計算ハイブリッドシステム 超集積・超集積プログラミング 量子プログラミング
<p>データベース</p> <ul style="list-style-type: none"> ビッグデータ管理フレームワーク 多メディアビッグデータ管理 クラウドソーシングフレームワーク 自律分散型データベース ストリームマイニング 	<ul style="list-style-type: none"> 異種ビッグデータ管理フレームワーク 多メディアビッグデータ管理 自律分散型データベース クラウドソーシング管理フレームワーク ストリームマイニング管理フレームワーク 	<ul style="list-style-type: none"> データマイニング型大規模データマイニング クラウドソーシング管理フレームワーク
<p>ソフトウェア</p> <ul style="list-style-type: none"> ビッグデータ管理 マイニング技術・多媒体管理 自律分散型アルゴリズム 自律分散型アルゴリズム 匿名化・匿名化 	<ul style="list-style-type: none"> 自律分散型管理フレームワーク 自律分散型管理フレームワーク 自律分散型管理フレームワーク 自律分散型管理フレームワーク 自律分散型管理フレームワーク 	<ul style="list-style-type: none"> 異種分散型マイニング 自律分散型管理フレームワーク 自律分散型管理フレームワーク

情報学委員会

5-2 人智高資源化社会



5-3 活力高生産社会



5-4 安心安全快適社会



5-5 持続可能社会



(6) 化学分野

化学分野のビジョン

現代の科学に課せられた使命は、「持続する発展」を地球規模で実現するための方策を見出すことである。現代社会が抱えている、例えば「地球温暖化」「エネルギー危機」「食糧問題」「レアアース禁輸」「オゾン層破壊」等の諸問題は、本質的に化学の問題に帰着するといえる。「化学の問題には化学で答える」ことこそが、私たちに課せられた責務であり、社会的情勢の変化に応じた素早い対応が必要であると考えなければならない。

本夢ロードマップの化学分野では「長期持続可能な地球環境の創成」「持続的・安定的エネルギー供給」「豊かな社会を支える新材料」「安全安心・健康長寿の実現」「知的好奇心に支えられた新分野開拓」へのゴールに向かう課題をまとめた。

現在の代表的課題を見ると、(1)資源・環境分野の究極の夢は、地球環境の維持・発展に資する材料技術の発明とその実用化である。地球環境の保全には環境浄化、省エネルギー、省資源を一体的に実現する必要がある。また(2)元素戦略では、特にレアアースの資源確保が大きな課題として浮上している。脱稀少元素材料、脱稀少元素触媒、海外や都市鉱山からの有用元素回収等の課題がある。(3)エネルギー関連技術の開発目標は、蓄電、発電、省エネルギーに分けられる。また、(4)生命現象に関連する材料の高機能化は、ライフイノベーションに直結する基盤技術である。

この推進のために、私たちは企業や地域の要請による「課題解決型の研究(社会的要請)」や大学における知的活動に主導された「基礎/基盤研究(知的好奇心)」等の研究機構の整備を進めることが求められる。さらに強いリーダーシップを発揮したナショナルプロジェクトという研究プラットフォームを編成して、知を結集して社会が直面する諸問題を解決していく決意をしなければならない。

その一方で、私たちは明るい未来を夢見る「努力」も続けていかなければならない。

科学は自然から学び、時にそれを模倣し時にそれを凌駕する努力を続けてきた。そうした知恵と工夫こそが科学技術立国である我が国の屋台骨である。私たちにそうした夢を見る自由や、解決する過程を反芻することはできるだろうか。そうした土壌を形成し、人材を育てることもまた、学協会に社会から託された義務であると感じる。

化学分野の夢ロードマップの考え方

以下では、化学分野を構成する有機化学分野、無機化学分野、生物化学分野、物理化学分野、ナノテク化学分野、電気化学分野、高分子化学分野、セラミックス化学分野についてそれぞれのロードマップとその考え方を記す。

ア 有機化学分野の夢ロードマップ

(ア) 有機化学分野の「化学の夢」

化学は実用的な面から我々の日常生活を支える基盤技術であると共に、物質の関わる様々な事象を原子レベルで解明する基礎科学としても果たす役割は大きい。

本項では特に基礎科学としての視点から有機化学の30年後の姿を展望する。

(イ) 有用物質生産のための新合成手法

有機化合物が、我々の生活の基盤を支える基本的な化合物群であり続けることは、30年後も間違いはない。この有用な化合物群をいかにして合成するか、すなわち物質生産の方法論の開発研究は、社会的な要請に対応して発展してきている。30年後の物質生産法として確実に要求されることは、貴重な有機資源を無駄なく効率よく利用する合成法の確立、反応の超効率化による廃棄物及びエネルギーミニマムな合成法の確立、ユビキタス金属や非金属触媒を用いる合成法の確立、また化石資源以外の有機資源の活用等、現代の我々が課されている制約に対応しうる、新たな独創的な物質合成の方法論の開発である。このような観点から、炭化水素類を出発物質として用いる物質生産法の確立は至上命題であり、例えば炭素-水素結合や炭素-炭素結合等の不活性結合の革新的な自在変換法の実現が望まれる。また例えば加水分解反応等基本的な反応を最小限の廃棄物及びエネルギーで推進することのできる超効率的・汎用的な触媒反応の実現も重要な課題である。いずれにおいても鍵を握るのは、高度な分子設計に基づいた高機能触媒の開発である。

また、貴金属類は多くの反応の鍵を握る遷移金属触媒の中心元素であるが、近年これらレアメタルは供給構造の脆弱さが大きな問題となっている。これらを安価で入手容易な金属（ユビキタス金属）触媒に代替すること、さらには金属を用いずに生体分子を凌駕する高い特異性、選択性を持つ触媒系を構築することも、これからのものづくりの基盤を支え続けるためには緊急の課題である。ここでは有用物質生産に結び付くことが期待されるいくつかの合成手法の夢を示した。

(ウ) 物質合成の合成戦略

物質合成の方法論の展開と共に、実際に有用化合物を合成するための合成戦略も物質生産の観点からさらに進化し続けるであろう。天然有機化合物や構造的に興味深い化合物、人知を尽くして設計した機能性物質等、標的化合物の高度化、複雑化はさらに進むと考えられる。また後述するように天然有機化合物の探索等からも思いもよらない新たな標的が登場し研究者の好奇心を刺激し続けるであろう。このような化合物群を生物が創るよりも効率よく、自由自在に合成することのできる合成戦略の実現により、新しい生物活性を持つ多くの分子の創出が可能となる。これにより天然物を超える活性を持つ人工分子、生命の理解と制御に貢献する新しい試薬や、臨床的に価値ある医薬の提供が期待される。

(エ) ボトムアップ集積化による電子材料合成

有機化合物の多様性を科学・技術に活用する重要なアプローチとしてナノスケールの分子デバイスの開発を目指した研究が今後重要性を大きく増していくもの

と考えられる。現時点では機能性分子素子をナノサイズの空間に効率よく接続する技術はなく、これが分子エレクトロニクスを実現する際の最大のボトルネックとなっている。今後物質合成の究極的な姿として、例えばナノメートルスケールの電子回路をオングストロームスケールの有機分子からボトムアップ的に作製する手法を実現することで、従来の高エネルギーを消費する微細加工装置や高価なレアメタルに代わり安価な反応装置（ビーカーやフラスコ）と有機分子による集積化が可能となり、製造コスト・エネルギーを大幅に削減できると共に、環境にも優しい革新的技術となると期待できる。

(オ) ゲノム情報に基づく天然物の探索と生産

新たな医薬品のリード化合物としての天然有機化合物の役割は今後も重要な位置を占めるものと考えられる。近年、遺伝子情報から天然物（低分子化合物）情報を見出すことが可能になりつつあるが、そのためには生合成機構の解明が必須であり、遺伝子情報と生合成酵素そして最終代謝産物の構造情報との相関付けが必要となる。今後この技術が確立されれば、これまでの探索で見出されてこなかった単離困難な天然物の存在も予測できる。また、天然物の意義、なぜ、どのように生き物が作り出して来たのか、といったことも遺伝子配列に基づいた進化論的な解析から明らかになる。これらは有用な物質を天然から見出す全く新しい手法であり、さらに異種発現系を自在に操ったタンパク質発現系を確立することにより、遺伝子情報に基づく有用物質生産も可能になる。

(カ) 生命の起源

基礎科学的な有機化学の立場からのアプローチが必要な課題として、有機化合物の「不斉の起源」の問題がある。生命の誕生の鍵を握る現象であり、有機化学に限らず広範囲にわたる諸説が存在するが、1つの強力な仮説として円偏光や水晶、隕石に含まれるアミノ酸が不斉の起源として働いた可能性がある。前生物的な環境下で生成する生体関連分子の不斉自己触媒反応の開拓により、原始の地球上で起こった不斉分子の化学進化をフラスコ内で再現することが実現可能となり、生命の起源の解明に繋がることが期待される。

(キ) まとめ

有機化学の関わる科学・技術は多岐にわたり、ここではそのごく一部を取り上げた。多様な応用科学の基盤を支える有機化学は基礎科学の観点からその重要性が極めて高い。本質を深く掘り下げる学術研究が、結果としてその応用面での飛躍的な発展を支える基盤になるものと確信する。

イ 無機化学分野の夢ロードマップ

(ア) 無機化学分野の「化学の夢」

無機化学分野では、バイオミネラリゼーションからヒントを得て意のままに物質・形態合成を行う技術、反応触媒や高機能材料を自在に設計・合成・大量生産する技術、あらゆる分子の立体構造を決定できる解析法の創成、バイオの力を用いて元素回収・環境浄化を行うこと等が、是非とも実現したい化学の「夢」として挙げられている。いずれも、20世紀型エネルギー・資源大量消費社会から持続可能な太陽利用・低炭素社会への革新的転換に貢献したいと願う化学者の「夢」である。

(イ) 生物無機化学

生命が数十億年をかけて育んできた能力や仕組みに、人類が学ぶところは極めて大きい。例えば生物は各種の無機元素を取り込み、骨や歯はもちろんのこと、貝殻や真珠、珊瑚、棘皮動物(うに、ヒトデ等)の硬い体、走磁性細菌が持っている磁石、カヤの葉の鋭利なシリカ等無機材料を巧みに作って利用している。このプロセスをバイオミネラリゼーション(生体鉱物化)といい、省資源、省エネルギー型の環境に優しい化学プロセスであるため、これを見習って人工材料のサステナブル合成法の創製に役立てたいという「夢」がある。

バイオミネラリゼーションの分子レベルの本質は未だ不明な点も多く、今後解明の努力が必要である。新しい材料合成技術を開発して、分子バイオニクスを応用した形態合成・集積・複合階層構造構築技術を確立していくことにより、ゆくゆくは生物を超える機能を発現できる電子・光学デバイスやマイクロマシン等が様々な応用分野で実現していくであろう。

アパタイトに代表される無機生体材料も、高齢化社会の中でますます重要性が増してくる。ナノオーダーで複雑な形態を持つ材料と生体との界面制御を行って、材料から生体内へシグナル伝達することが可能になれば、外部から拳動がコントロールできる人工臓器の開発に繋がる可能性がある。

また生物の持つ元素取り込み能力を活用し、汚染環境中や廃水中の重金属イオンや有害無機イオンを機能性無機微粒子に変えて利用し、元素資源の確保や環境浄化を目指していくことも重要な「夢」である。これを実現するには、鉱物化機能を有する微生物の探索、生体関連分子の探索、金属イオン輸送・酸化還元に関与する生体分子種の同定と反応系の解明、合成微粒子の機能性評価と解析等、研究すべきことは山積している。しかし、これは化学者の大きな使命の1つでもあり、取り組み甲斐のあるテーマといえよう。

(ウ) 配位高分子

金属イオンと有機配位子との自己組織化で組み上がる配位高分子(金属有機構造体)の化学は近年発展が目覚ましく、様々な応用が考えられている。気体の貯

蔵・分離等は既にかなり研究が進められているが、ここでは触媒設計及びレアメタル回収に応用する「夢」が提案された。

様々な反応触媒を自在に設計・合成・大量生産する技術は、化学者の1つの「夢」である。未来のエネルギー・環境・医療分野への幅広い応用が期待できる触媒は、触媒サイトの精密な時空間制御と共にイオン、分子等を自己組織的に集積化したものになるであろう。格子状ナノ空間材料の内部に、金属触媒サイトを数や位置を規制して導入することが自在にできるようになると、触媒反応効率が既存の触媒に比べて100倍以上に達する新しい触媒ができる可能性がある。

また、配位高分子の高い貯蔵能力と、柔軟に構造設計が可能である点を活かせば、選択的な元素の吸着・回収が可能となるだろう。特に現在枯渇が懸念される各種レアメタルを、廃液や海水から抽出できるようになれば、これらが重要な資源となり、安定的に市場に供給・リサイクルできるシステムの構築が可能となる。元素選択性の高い配位高分子の設計、耐久性の向上、レアメタルの回収法等課題は多いが、豊富な都市鉱山と海水に恵まれた我が国にとっては、実現が大いに待たれる課題といえる。

(エ) 自己組織化を利用する構造解析

有機小分子から核酸・タンパク質に至るまで、あらゆる分子の精密な構造の決定は化学者の「夢」の1つである。これを実現する新しいNMR立体構造解析法の開発のために、磁場配向性分子と解析分子を結合した分子に変換して磁場配向誘起を可能にする技術の開発が不可欠である。有機小分子から生体高分子に至るあらゆる分子をテーラーメイドに認識する自己組織化分子を意のままに作る方法論の開発が進めば、夢の実現はそう遠くはないかもしれない。

(オ) 無機材料設計・合成

大きな可能性を秘めた各種の無機材料を、意のままに設計・合成することは、科学者にとって極めて大きな「夢」である。望みの反応を実現する触媒の設計には、金属酵素をモデルとし、その活性中心を抜き出して人工の物質として再現するアプローチが提案された。例えば安定なポリオキソメタレート等に酵素の活性中心を埋め込み、安定な無機化合物をベースにその機能を自在に引き出すことができれば、触媒の設計という重要な分野は新たなステージを迎えることとなるだろう。

高度情報化社会の進展に伴い、高密度情報記録媒体のニーズは増す一方である。最近、量子磁石の可逆的スイッチングが成功しており、これを情報記録に応用できれば、1分子を1ビットとする媒体が実現することとなる。高いブロッキング温度を持つ量子磁石の開発、情報の読み取り技術等が必要となるが、未来のデバイスとして大いに夢が持てる。

金属酸化物は高温超伝導、光触媒、超巨大磁気抵抗効果等の類い希な機能を示す素晴らしい材料であるが、未だ機能の設計・構造の制御が難しい領域でもある。

シンクロトロン光を用いた解析手法と、酸化物分子線エピタキシーによる合成手法を一体化し、今までにない物質設計を可能とする手法が提案されている。この手法が進めば、新しい物質を生み出すための力強いエンジンとなる。

(カ) まとめ

無機化学分野は、材料科学・超分子化学・生化学等実生活に大きな影響を与える分野に対し、重要な基盤を提供する。鍵を握るのは、高度な制御のもとに原子や小分子を積み上げ、自在に意図した機能性材料を構築する技術であろう。既に多くの分野でこうした高度制御技術の萌芽が見られており、今後ますますの進展が期待される。

ウ 生物化学分野の夢ロードマップ

(ア) 生化学分野の「化学の夢」

近年の生化学分野は、従来の古典的な生化学の枠を超え、化学と分子生物学・細胞生物学との融合へと歩み出した。これは、「化学」という人工的で自由度の高いツールが、これまでの既存の生物学の枠内ではわかり得なかった生命活動の詳細を解明するのに非常に役立つことに多くの科学者が気づき、それらを融合することに努力を続けてきたからに他ならない。このような時代の流れに伴い、これまで「バイオケミストリー」と呼ばれていた研究の多くは、「ケミカルバイオロジー」と名を変えて呼ばれるようになった。また、この10年で「ケミカルバイオロジー」或いは「化学と生物学の接点」を前面に押し出した関連研究誌も数多く発刊された。この研究の潮流は、生物学の先、すなわち医学との融合に進展していくものを考えられ、従来の古典的な薬学を超える概念を持った「ケミカルメディシン」へと進化を遂げることが予想される。化学をツールとしたケミカルバイオロジー研究により、多くの生命活動の詳細が分子レベルで理解され、さらには薬剤開発や再生医療等に寄与できるケミカルメディシンへと繋がることで、人類の生活と健康に大きく貢献できることが本分野の「夢」といえる。

(イ) タンパク質化学

タンパク質化学は、バイオテクノロジーの発展や薬剤開発に多大な寄与をしてきた研究領域である。近年は、ケミカルバイオロジー研究の進展と共に、蛍光プローブや生体環境下でのタンパク質ラベル化技術の開発が進み、細胞内外の様々なタンパク質の局在化やフォールディング、複合体形成の挙動を分子レベルで、さらにはリアルタイムで解明しようという試みが盛んに行われている。とはいえ、これまで開発された技術は万能ではなく、細胞内の極微濃度のタンパク質でも感度よく検出可能な技術の開発や信頼度の高いハイスループットスクリーニング技術開発の継続は不可欠である。また、抗体医薬に代表されるタンパク質製剤の開発やそれに代わる新規バイオ医薬品も、今後の新規医薬品開発には必要不可欠で

ある。そのためにはタンパク質の構造と機能の相関をより高次元で理解し、高精度かつ高速度で構造や機能・作用機序を予測する方法論の確立も夢である。

また超好熱菌や高度好塩菌のような極限環境微生物は、これまで知られていないような耐久性を持つため多方面への応用が期待される。またその環境耐性のメカニズム解明は、新たな機能性タンパク質創造のアシストに繋がると期待される。

(ウ) 細胞

細胞内での生命活動は、突き詰めれば、生体分子の化学的な反応と相互作用で説明できるはずである。しかし、様々な生体分子の化学反応と相互作用が、同時にかつ複雑に進行しているため、各反応や相互作用の一義的な理解では説明することが難しい。また、細胞は常に細胞膜に囲まれ、その細胞膜にも様々なタンパク質や低分子化合物が存在し、さらに膜タンパク質の多くは糖鎖修飾を受けている。ウイルスのように、その細胞上に存在する糖タンパク質を認識して侵入してくる病原体も多いが、そのダイナミックな変化を理解するには、細胞膜と糖鎖、さらにはタンパク質のそのものの構造変化まで理解をしなければならない。したがって、細胞膜1つにとってもその理解を深めるには、各論ではない総合的な理解が必要となる。さらに、匂いや感覚といった生命活動もまた膜上に存在する受容体を介して起き、この受容体も糖タンパク質であることが多い。細胞という複雑なシステムを化学的視点から解剖し理解をしたと思っただけでは不完全で、その理解を検証するために機能をシンプルファイした人工細胞の創製も必要となる。最終的には、その検証から、「生命起源の謎」に迫ることもできるかもしれない。

(エ) 糖鎖

核酸、タンパク質に続く第3のバイオポリマーと呼ばれる糖鎖は、細胞間のコミュニケーションに重要な役割を果たし、ガンや感染症の発病にも深く関与している。しかしその合成法は十分に確立しておらず、このためその生体内での役割も未解明の部分が多い。自由にオーダーメイドできる糖鎖合成法の確立、それを用いた機能解析や疾患治療への応用は重要な「夢」である。

(オ) 創薬化学

最も直接的に社会に貢献する生化学の応用として、医薬品創出がある。ターゲットタンパク質の構造から、自在に医薬をデザインする方法論は永年研究されているが、未だ理想には程遠く、その創出が待たれている。特にタンパク質間の相互作用を対象とする医薬品は大きな可能性を秘めているが、低分子でこれを効率よく制御する方法は未だ見出されていない。その確立は社会に極めて大きなインパクトを与えうる。

(カ) 核酸化学

分子生物学や細胞生物学の発展は、核酸化学とタンパク質化学の進歩なしではあり得なかった。望みの配列を持つ DNA や RNA を手に入れるのも、核酸の化学合成技術がなければ実現しない。さらには、この数年でゲノムの配列の解読技術が大幅に進歩し、次世代シーケンサーのような化学を含めた幅広い分野の技術を集約することで実現された機器も登場した。一方で、核酸を単なる遺伝情報物質としてみるのではなく、機能を持った生体分子として捉えた研究も進められてきた。例えば、天然の核酸を修飾した分子や人工的な塩基を持つ核酸分子、さらにはペプチド核酸のように骨格そのものも核酸と異なる化学構造を持ちながら核酸のように機能する分子が開発された。また、siRNA や microRNA のように、従来の RNA 機能の常識を覆すような発見もなされ、核酸化学の重要性はさらに増した。核酸分子は、高いデザイン性が最大の武器である。したがって、今後研究者自らが核酸の構造をデザインし、目的の機能を発現できる技術、また生体内デリバリー等の関連技術の開発が、将来の核酸化学の夢となる。

(キ) ケミカルバイオロジー

ケミカルバイオロジー研究には、大きく分けて2つの潮流がある。1つは、生命活動を制御する化学物質を探索する研究である。そのような化学物質を人工物に求めるか、天然物に求めるか、その違いによりアプローチは異なるが、いずれも従来から行われていた方法論でもある。しかし、後者については近年天然物の合成機構が急速に解明され、合成系の人工的な改変から天然物を超えた擬天然物合成へと、研究がシフトしてきている。一方で、現在の技術では擬天然物の de novo 生合成を達成することはできず、この夢の実現には大きな技術的・知識的な壁を乗り越える必要がある。

もう1つの潮流は、細胞の生命活動を分子レベルで解明できる感度の高い新規プローブの開発、さらにその究極的な応用として、医療現場で簡便に使いかつ信頼度の高い診断薬の開発である。今後、医療はパーソナルメディスン(個別医療)へと進む。その際に必要不可欠なのが、高感度と簡便性を併せ持つ化合物プローブである。また、それに合わせた安価な機器開発も普及には不可欠であろう。

さらに、ケミカルバイオロジーが担う最も大きな出口が薬剤開発である。核酸化学、タンパク質化学、天然物化学から合成化学に至るまで、すべての知識と技術を統合して、人類の生活と健康に寄与できる薬剤の開発を、安価にかつ迅速に進めることができるようになるのがケミカルバイオロジー研究の夢である。

(ク) バイオイメーjing

GFP が 2008 年ノーベル化学賞の対象となったことでもわかる通り、生命活動を直接観察できるバイオイメーjing技術は現代生物学において重要な地位を占める。現在のところ対象となるのは限られた生体分子のみであり、普遍的なプロー

ブは存在していない。プローブとなりうる分子の普遍的な設計指針、それを感知できる超解像度蛍光顕微鏡が完成すれば、シグナル伝達の過程や細胞深部の構造体可視化が可能となる。生物学に革命的な進展をもたらす「夢」であり、その期待は非常に大きい。

(ケ) まとめ

化学と生物学、そして医学との新しい接点が「生命体」としての細胞の理解につ繋がり、「ケミカルバイオロジー」から「ケミカルメディシン」へと研究が広がることで、人類の生活と健康に最大限に貢献できる研究へと進化する、それがこの分野の「夢」であろう。

エ 物理化学分野の夢ロードマップ

(ア) 物理化学分野の「化学の夢」

分子や結晶を構成する1つ1つの原子の動きを追跡できる原子スケールの空間分解能と、電子や原子核の運動を捉えることが可能なアト秒(10^{-18} 秒)レベルの時間分解を同時に手に入れることができれば、化学者は反応過程をまるで映画館で映画を見るように観測することが可能になる。レーザー技術の著しい発展とナノテクノロジーの深化によってそのような観測が将来可能になることも夢ではなくなりつつある。本項目ではこのような「物理化学の夢」である、個々の分子同士が衝突し、新たな分子を生成するときを生ずる電子波動関数の変化や、原子核の動きを精密に観測するための様々な「夢の計測法・操作法」が紹介されている。これらは、機能を極限まで高めた材料や、高効率・高選択性を有する化学反応場等の設計指針を得るための究極の計測法となるであろう。

(イ) 光源技術

物理化学のみならず、化学の発展にX線、紫外線、可視光線、赤外線等の「光」が果たしてきた役割は極めて大きい。1つのフェムト秒(10^{-15} 秒)レーザー光源から出た光を液滴、半導体、金属、等様々な物質と相互作用させることによって、X線からテラヘルツ領域の様々な波長の光を生み出すことが可能となりつつある。このような光波長変換のメカニズムの詳細が解明され、制御技術が開発されれば、テーブルトップやパームトップサイズフェムト秒レーザーからでも高強度な様々な波長の光を発生させることが可能となり、X線による原子の動きから、テラヘルツ分光による水素結合の様式まで、様々な計測が実験室レベルで可能となるであろう。

(ウ) 電子波動関数や原子の動きを可視化する測定法

これまで多くの化学者は、フラスコの中で起きている統計的な結果を反応結果として観測し、反応設計にフィードバックしてきた。しかし、1つ1つの分子の

化学反応や構造変化に伴う電子波動関数の変化、及び原子の動きを動画撮影するように測定する方法論を開発することができれば、高効率で高選択的な反応を駆動する新しい反応場の設計に大きく貢献することになるであろう。このような電子波動関数や、原子の動きを可視化するために様々なアプローチがなされている。アト/フェムト秒パルスレーザーを励起光源とし、サブナノメートルの空間分解能を有する光電子顕微鏡、高い時間・空間分解能を有する近接場顕微鏡、X線自由電子レーザーをプローブ光源、フェムト秒レーザーをポンプ光とするポンプ・プローブ法等があるが、いずれの場合も、用いる光源の性能を究極に高めることが求められており、多くのブレークスルーを伴うそれら光源開発や光波制御技術の開発が必要とされる。

(エ) 生体内における生体分子の可視化技術

細胞、組織、個体等生体の様々な階層において、タンパク質の分子間相互作用や酵素活性等、様々な生体分子の機能やシグナル伝達過程をリアルタイムでイメージングする方法論の開発は、生命の仕組みの解明のみならず、疾病の検査等の医療技術としても極めて有用であり、発展が強く望まれている計測法の1つである。この夢を実現するためには、これらの生体分子を高感度に検出・可視化するためのプローブ開発原理の確立と、生体深部を高い時間・空間分解能で観察することのできる超解像蛍光顕微鏡と超高感度光検出器とからなるイメージングシステムの開発が必要となる。これらの技術が開発されれば、将来、X線による被爆を受けずに体の内部を可視化して検査することも可能となるであろう。

(オ) 金属ナノ構造により光を局在化させる技術

一般的な分子が有する吸収断面積の値から明らかなように、光と分子の相互作用は大きくない。そのため、分子を確実に励起し、計測するには光源として光強度の高いレーザーが必要となる。しかし、最近、金属ナノ構造が示す局在プラズモンと呼ばれる現象を利用すると、金属ナノ構造に入射した光が局在し、増強されることが明らかにされている。このようなナノ空間に分子を配置すれば、光と強く結合でき、微弱光を用いても高感度な蛍光計測が可能となることも明らかにされているが、光エネルギーを有効利用するためには、今後より大きな光増強場の実現が必要とされている。これら局在プラズモンを示す金属ナノ構造は、入射光を増強できる光アンテナとなることを示しており、入射した光エネルギーを余すところなく電気エネルギーに変換できる太陽電池や、高密度光記録等、究極の光デバイスへの発展が期待されている。

(カ) 原子・分子の操作技術

光が物質と相互作用したときに発生する光圧等を利用して分子を整然と並べて結晶化する技術が開発されている。これまで結晶化が困難とされてきた様々なタ

ンパク質分子に関しても本手法によって結晶化できることが明らかにされつつあり、その構造解析が進められている。光による分子の結晶化のメカニズムが解明され、普遍的な方法論として利用することが可能になれば、種々のタンパク質の構造解析が進み、タンパク質と反応する物質が予測できる等、新薬の開発に貢献できると期待されている。一方、近年の走査型プローブ顕微鏡の発展によって原子を1つ1つ操作したり、電子顕微鏡の高性能化に伴って有機分子を単分子で観測することが可能になってきた。これらの方法論を融合することによって、分子模型を組み立てるように、原子や分子を自在に操作して新しい有用な分子を合成できる夢の合成法が確立できると期待されている。

オ ナノテク化学分野の夢ロードマップ

(ア) ナノテクノロジー分野の「化学の夢」

原子を1つずつ自在に並べて物質を作り上げる、これは化学者に共通する夢といえる。ナノテクノロジー分野においては、生体材料や電子デバイス等の機能性マテリアル等様々な視点に立った夢が描かれているが、夢の実現のため、ナノメートルよりも1桁小さい原子レベルで構造を制御することの重要性が強く意識されている。また、そこには既存の有機化学、無機化学という垣根は存在せず、あらゆる元素を利用しようとする柔軟な発想が見て取れる。

(イ) クラスタとナノ粒子

コロイド粒子に代表されるナノ粒子の化学は、特にこの四半世紀に目覚ましい発展を遂げた。無機物質でありながら、有機化合物のように1原子レベルで構造が制御されたナノクラスタの合成法も確立されつつある。

特にQドットに代表されるナノ粒子は、量子サイズ効果によりバルクの物質とは異なる特徴的な物性を示す。高機能というだけでなく、高い安定性を有することから実用性の点からもその重要性は高まっており、実際に様々な物質が開拓されてきた。しかしながら、現状では、すべての無機物についてこのようなナノクラスタ合成が可能なのではなく、様々な大きさのクラスタを自由自在に合成できる普遍的な手法の確立が待たれている。

また、球や楕円体のような単純な構造を有するクラスタだけでなく、ドーナツ状或いは中空のような空孔を有するクラスタ等、様々なトポロジーを有するクラスタは合成手法及び物性面の両面から挑戦的な課題であり、興味が持たれる。

一方、無機クラスタと有機化合物の複合化は、単独の物質では実現できない新機能を発現させるために欠かせない方向性である。これまで、ナノクラスタと有機分子の複合化を行う場合、主として有機分子によるナノクラスタの表面修飾が行われてきた。しかしながら、ここで描かれている例のように、自己組織化或いは自己集合化を利用することにより、有機分子とナノクラスタが高度に

組織化された新しい概念の無機有機ハイブリッドナノ材料が得られるものと期待される。クラスター化学には未だ多種多様な可能性が秘められている。

(ウ) 炭素系ナノ材料

フラーレン、カーボンナノチューブ等の炭素系のナノ構造体は、容易に入手可能なナノサイズの「分子」として注目を集めてきた。3次元的に広がる π 共役系、中空構造、化学修飾の容易さ、等の特徴的な性質から、カーボンクラスターは電子材料、構造材料、医療分子デバイス等多様な応用可能性が考えられてきた。この分野は特に理論的研究が先行しており、炭素原子の並び方、或いは欠陥の導入等、カーボンクラスターの構造と物性の相関について様々な予測がなされてきた。その中で、炭素を他の元素に置換する化学的ドーピングは最も挑戦的であり、かつ誰もが実現可能性を感じながら実現できていない「夢」ということができる。また、無機のクラスターの場合と同様、ドーナツ状構造等、様々なトポロジック特徴を有するカーボンクラスターの合成手法を確立することができれば、大変興味深い。

(エ) 生体機能材料とナノテクノロジー

生体分子のサイズはナノメートルオーダーであり、これらの分子が単独或いは集合化することで様々な機能を実現している。生体分子の機能を制御或いは利用したり、またこれらを模倣、補完するような材料を開発したりする上で、生体分子と同様のサイズの物質を扱うナノテクノロジーの役割は極めて大きい。すなわち、生体分子の大きさや形にフィットするナノ構造体の形成手法の確立、或いはそれを利用した生体分子の機能制御は、医薬品、再生医療等様々な観点から重要性の極めて高い課題である。

また、分子を秩序的に配列し、さらに、その結果形成される分子集合体をまた並べる、という生体の構造に見られる階層構造を実現することは、物質の構造の精密に制御するという観点からナノテクノロジーの大きな目標の1つといえる。

また、生体機能の大きな特徴として、化学現象の時空間制御が行われていることが挙げられている。これまで開発されてきた機能性分子の多くでは、分子の立体構造の変化は考慮されてこなかった。しかしながら、生体分子においては、立体構造がその機能発現に密接に関わっている。分子の立体構造の制御に向けた研究は未だ緒についたばかりであり、これを実現することにより生体の持つダイナミズムを人工的に再現する道が開けるものと期待される。

(オ) 分子機械

ナノテクノロジーの概念を最初に提唱したのはRichard Feynmanといわれているが、その当時の講演で1つの可能性として触れられて以来、分子機械の開発はナノテクノロジーにおける重要な目標とされてきた。それから半世紀ほど経って

いるが、機械的動きを起こす合成分子は着実に発展を遂げてきた。現状では、未だ1分子レベルでの動きを制御することにとどまっているが、分子機械は電気エネルギーを使わずに機械的な動きを起こすことができるため、これを利用した新しい概念の機能性物質開発へと繋がるのが期待されている。一方、これと並行して、分子生物学の立場から生体分子機械のメカニズムが明らかになりつつあり、その洗練された分子の動きは、我々に有機分子の持つ可能性の高さをはっきりと実証してきた。現在、自然が生み出した生体分子機械に匹敵する精密な動きを実現する合成分子を作り出すことが1つの目標になっているが、今回示されているような人工分子機械と生体分子機械を組み合わせたハイブリッド分子機械は、さらに高度な機能を追求する「分子サイボーグ」の創製に繋がるものと期待される。

(カ) まとめ

生体分子、合成分子を問わず、機能性分子の多くはナノメートルサイズであり、ナノテクノロジーに対する化学的なアプローチは、このような巨大分子の合成手法と物性の開拓を両輪で進めながら進展していくものと予想される。分子のサイズが大きくなるにつれ、その構造の多様性は飛躍的に増していく。こんな分子を作れたら面白い、という「夢」はこれからもどんどん生まれてくると思われるが、それを実現するためには、まずは地道な合成反応の開拓を丹念に進めていくことが必要であり、その先には未だ無限の可能性が広がっていることは間違いない。

カ 電気化学分野の夢ロードマップ

(ア) 電気化学分野の「化学の夢」

ボルタやファラデーによって電気と化学の関連性が発見されて以来、電気と化学の境界領域を究める電気化学は新たな産業を生み出し、社会の進歩を先導してきた。21世紀に入ると、エネルギー神話の崩壊、資源の枯渇、環境対策等、人類がこれまでに経験したことのない課題に直面し、前世紀までのパラダイムに根本的な見直しが迫られている。電池、センサ、イオン液体等の領域で新しい技術が創出され、これらがパラダイムの変化をもたらし、持続的発展社会形成の一翼を担い続けることが電気化学分野の「夢」である。

(イ) 電池・燃料電池

電池は今や、産業、日常生活等人類の活動に欠くことのできない存在に育っている。その重要性は今後も変わらないが、太陽光発電や風力発電等の再生可能エネルギーの大量導入が本格化すると、大電力の貯蔵や電力系統の需給バランスの安定化に対する要求がますます高まり、高容量、高出力の蓄電池が不可欠となる。また、スマートグリッドの普及により、分散型電源としての蓄電池の役割も大きくなってくる。正極に空気中の酸素を用い、負極に金属を用いる金属空気2次電池のような新しい発想による電池がこれらの期待に応えてくれるだろう。既存技

術ではあるが、NaS 電池はその安全性や性能が向上し、再生可能エネルギー用の蓄電池として再び注目され広く普及するものと思われる。

自動車における電池の進展も見逃せない。コストやインフラ整備の点で2次電池に後れを取った感のある燃料電池であるが、2次電池が出力密度とエネルギー密度の両立に苦戦し続けると、燃料電池が巻き返してくる。酵素を電極触媒に利用して糖やアルコールから電気を得る酵素バイオ電池も燃料電池の一種であり、期待が持てる。

(ウ) 化学センサ

ガスセンサ、バイオセンサに代表される化学センサは、感度、応答性、選択性の極限を追求した研究開発が継続されるであろう。これらの研究開発においては、ナノ粒子、薄膜、微生物といった超微細化技術が実現の鍵をにぎるものと思われる。この技術は電子移動の本質を明らかにし、これを制御することを可能にする。この段階になると、モニターや警報といった役割からコントロールの役割が期待されるようになる。環境及び生体の分野では、共にセーフティネットワークをどのような形でいかにして構築するかがこれからの課題となる。進化した化学センサは、詳細な情報を迅速に検知、比較することによってネットワークをコントロールするという主要な役割を果たしてくれるはずである。

(エ) イオン液体

イオン液体は従来の電解質溶液に代わるイオン導電体として期待されており、今後は液体だけでなく、イオンゲルのような固体化技術も進展するであろう。固体化が容易になると、その利用範囲は拡大する。上述の電池、センサはもちろんのこと、太陽電池、キャパシター、アクチュエーター等も考えられる。環境・エネルギー分野を支える重要な素材に育つと予想される。

(オ) 有機電解合成

有機電解合成は廃棄物の極めて少ない合成法であり、今後はグリーンケミストリーの先導役として、さらに安全な、反応率の高い合成法の確立が求められるであろう。そのために、揮発性・可燃性の有機溶媒に代えて上述のイオン液体を用いる、電極への物質移動を容易にするために光や超音波を照射する等、他の分野の技術との融合が促進されるものと思われる。環境調和型の化学合成法として、新規産業創出の基盤技術にもなるだろう。

(カ) まとめ

電気化学は時代と共に新たな産業を生み出し、その進歩を先導してパラダイムを形成してきた。これからは、特に環境・エネルギーの分野でパラダイム・シフトが不可欠であり、ここでも電気化学の果たす役割は大きい。電子導電体とイオ

ン導電体の界面や電子移動の本質を見極めながら新たな技術を創出し、化学の「夢」を実現していきたい。

キ 高分子化学分野の夢ロードマップ

(ア) 高分子化学分野の「化学の夢」

高分子は私たちの生活基盤を支える材料の1つであり、より快適で安心・安全な社会のために新しい高分子材料の開発が常に求められている。科学・技術の発展に伴い、精密に構造制御された高分子の合成法や、高分子を精密に構造・物性解析する方法が次々と開発されており、高分子化学分野は大きく発展を続けている。再生可能な資源から低環境負荷で合成される高分子、生体の機能を代替するような機能性高分子、金属を代替し軽量・高強度で環境に優しい高分子材料、電気消費量の少ないフレキシブルな電子情報デバイスのための高分子材料、生体のように自己修復する高分子材料等、様々な夢のあるターゲットの実現が目前に迫っている。高分子化学分野においては、無機系とのハイブリッド化、物理化学的な先端分析手法の導入等、他の分野との融合や連携も今後の夢の実現には必要不可欠である。

(イ) 精密重合系の開拓

有用な高分子をいかにして合成するかは重要な課題である。立体規則性、分子量・分子量分布、共重合組成・共重合連鎖分布等、高分子に特徴的な多種多様な因子を制御できる精密重合系の開拓が必要とされている。また、ポリオレフィンの機能性向上を指向した非極性・極性オレフィン共重合のための革新的な触媒の開発、分子デバイスとしての展開が可能な共役系高分子の精密合成技術の向上、光学材料等への高機能化に展開可能なヘテロ元素含有高分子の合成等が求められている。さらに、高度に立体制御が可能な超高選択的重合触媒の開発、完全立体特異性重合の実現等、高分子鎖一本の精密構造制御は、高分子に特徴的な階層構造や極限性能発現と関連して重要である。また複数の外部刺激に対して独立して応答する多重刺激応答性ポリマーの開発は、医用材料、分離材料、情報材料等の様々な分野で開発が望まれている。これまでの機能性高分子を凌駕する物性を示す超高性能高分子材料、様々な機能ユニットのシーケンスを精密に配置した定序配列高分子合成は、合成高分子が生体高分子を越える夢を実現するためには重要な合成分野である。

さらに、これからのブレークスルーとなる新材料の創製に向けて、新しい合成概念の創出も夢のある課題である。無機成分と有機成分をナノレベルで組み合わせる従来の有機無機ハイブリッド化技術に、無機元素と有機元素とを元素レベルで複合化させた無機高分子合成技術を融合させた元素ハイブリッド高分子の合成法の開発が期待されている。

(ウ) 高分子ナノ複合材料の開発

複数の高分子或いは高分子と異種材料をナノスケールで複合化すると単一の高分子では実現できないような物性を示す高分子ナノ複合材料が実現できる。高分子ナノハイブリッド材料の高機能化や実用化のためには、高分子の階層構造制御、異種材料の分散技術、高分子の物理化学的な特性の制御、成形加工技術を駆使した材料開発が必要不可欠であるが、未だ発展途上の段階である。ナノ複合化された材料を評価するための実空間観察、逆空間観察技術の開発等の先端解析技術の開発も必要不可欠な技術となる。さらに分子レベルで複合化した分子複合材料、機能のトレードオフをナノレベルの構造制御で解消する超ハイブリッド型高分子ナノ材料の開発により、複合材料を構成するそれぞれの成分の物性や機能性を大きく凌駕する夢の高分子材料の実現が期待できる。

(エ) 高分子高度構造材料

高分子を自動車、飛行機、建築物等の構造材料に応用し、安心・安全を確保するためには、強度のみならず耐久性も必要不可欠である。要素となる高分子の分子設計、階層構造自在制御、ブレンド等の複合化、界面接着強化等による高強度・強靱化、高度構造材料と実用化されるための高耐久化等は基礎研究をベースにした研究が必要不可欠であるが、系統的な基礎研究が行われているとはいえない。より効率的な材料開発には分子レベルからマクロな構造体に至る材料設計・強度設計の階層的シミュレーションに基づく材料設計を行い、それに基づき合成・成形加工を行うのが有効である。そのため高分子の個性を反映した高度なシミュレーション手法の開発が切望されている。さらに疲労・環境安定性等の耐久性の加速試験法を確立することにより軽量高強度かつ信頼性のある安心・安全な高分子高度構造材料が実用化され、現在使われている金属系材料を置き換えることができれば、軽量化によってエネルギー消費や二酸化炭素排出量の削減が実現できる。

(オ) 環境調和型高分子材料の開発

持続可能な社会の実現にはリサイクルと再生可能な資源からの高分子合成が必要である。これまでのリサイクルはエネルギーバランスの点で問題があり、植物由来高分子は製造コストと物性の観点から新規概念の合成手法が必要である。

非可食植物由来モノマーや二酸化炭素を用いて、環境低負荷の合成プロセスにより、物性・加工性のバランスの取れた高分子を合成し高機能化することは、再生可能な資源の有効活用という視点から、今後一層の研究が必要不可欠である。

一方、汎用高分子材料リサイクルシステムの効率化は喫緊の課題であり、未来に向けて継続的に取り組むべき課題である。現状ではリサイクルによる物性低下、リサイクルコスト等の問題点が解決できていない。リサイクルによって物性が低下しない完全リサイクル型高分子の開発、汎用プラスチックや複合材料に匹敵した物性を示し、環境に低負荷の合成プロセスで調製できる自己修復性高分子材料の開発は究極の環境調和型高分子材料となる。

(カ) 生体を模倣した高分子材料

生体を模倣した高分子材料として、生体系に類似した高分子材料合成法或いは生体高分子のように複雑な情報を担持した高分子の開発が挙げられるが、未だに実現されていない。これらは精密高分子合成の開発とも密接に関連しており、高効率の鋳型重合による高分子合成とその高精度化、モノマーやセグメントに情報を担持した配列制御された情報担持型高分子の精密合成、さらに1次構造から高次構造までの階層構造を意識した生体模倣機能性高分子合成システムの開発等、生体を凌駕する高分子材料の実現は高分子化学の夢の1つである。

ク セラミックス化学分野の夢ロードマップ

セラミックスは無機固体材料の総称であり、古くから陶磁器として人間の生活に密着してきた材料である。技術の進展に伴いセラミックスの応用分野は広範囲に拡大し、それを支える科学・技術も化学分野だけでなく物理、生命科学、ナノテクノロジー、計算科学等極めて多くの分野にわたっている。時代の変遷によりセラミックスの使われ方は変化しても、セラミックスに関わる研究・開発は一貫して「材料技術で人の生活に貢献する」ことを目標としている。しかしながら、近年、生活への貢献の内容は大きく変化しつつあることも事実である。かつては経済成長に伴う便利さや物質的な豊かさの追求が研究・開発の目標とされてきたが、地球温暖化、人口爆発、資源・エネルギー枯渇等多くの地球規模での問題が顕在化するにつれ、持続性のある社会の実現を人々は望むようになり、それに伴い研究・開発の目標も「物質的な豊かさ」から「心の豊かさ」へのシフトしている。このような中でセラミックス化学分野の目標は、「人々の心豊かで幸せな生活をセラミックスの科学・技術で実現する」ことであり、この目標を達成するための具体的な「夢」を以下のように設定した。

(ア) 安心・安全のための材料

人の居住空間、輸送機関、公共施設、さらには食品、薬品の安全性の確保には、センシング技術が重要な役割を果たす。焦電素子による赤外線センサーはそのまま人侵入者センサーへの応用が可能であり、その他にも麻薬、爆発物、有毒ガス、毒物・劇物、細菌・ウイルス等のセンサーの多くにはセラミックス材料が使われる。これらはセキュリティセンサーと呼ばれるものである。センサーはもともと人間の五感を代替するものであり、それらの発展も人間の生活を豊かさにも貢献する。感性センサーと呼ばれるこれらのセンサーには、目や耳の不自由な人を助ける視覚・聴覚センサー、食品の品質を向上するための味覚センサー、高性能ロボットが持つ触覚センサー、さらには、快適な空間を実現するための匂いセンサー等がある。一方、放射性廃棄物の処理技術は、人々の安心・安全を実現する上で必須である。セメントやガラスによる放射性廃棄物の固化・貯蔵技術の開

発は、セラミックスの夢として実現しなければならない。さらに、公共施設での安全・安心の空間は、閉ざされた密室ではなく、プライバシーを保った上で制御された公開性を必要とする。特殊なガラスによるシースルーセラミックスはこのような空間を実現ための材料である。

(イ) 高度センシング・信号変換材料

人の生活に貢献するエレクトロニクス製品は、何らかの信号を受信し、それを変換して出力している。受信の部分を担うのが高度センシング技術で多くのセラミックスが使われる。例えば、温度、圧力、湿度、ガス濃度、液体・気体流量、微粒子濃度、アルコール濃度等で、これらの性能向上を図ることはエレクトロニクス製品の機能向上のため必要である。特に高温で使用できる圧電センサー（圧力センサー）は、内燃機関のシリンダー内爆発圧力や火力発電所の排気ガス圧力のセンサーとして期待されている。電気回路における受動部品には抵抗(R)、キャパシター(C)、インダクター(L)があり、信号（波形・位相）換素子として利用されている。これらの素子の多くはセラミックスでできており、既に産業として成立し、我が国も最も強い産業分野の1つとなっている。これらの産業の競争力をさらに高め、画期的な新材料や新技術を作ることが本分野の夢であり、そのための科学・技術の進展を図る。広義の信号処理は、電気・磁気・機械的な信号の相互変換を意味する。例えば、圧電素子は電気・機械信号の相互変換素子として多くの分野で使われている。電気（誘電）-磁気の変換はマルチフェロイック材料として基礎研究が盛んな分野である。新規な信号変換材料は、そのまま新規デバイスの実現に結び付くため産業界からの期待も高い。時間はかかっても基礎研究から体系的な取り組み、最終的には全く新しいデバイスの実現という夢を実現したい。

(ウ) 美感性材料

ディスプレイ用ガラスは、現在のセラミックス産業の中で大きな市場を有する分野の1つであるが、さらなる薄型・軽量化が強く求められている。ガラスのみならずセラミックスに共通する本質的な弱点である脆性克服のために、まずは次世代精密加工や次世代表面修飾プロセスが研究対象となる。さらに、革新的な超薄・軽量型のタッチパネルや光子操作等高度な情報処理機能を有する新型ディスプレイが未来に向けた開発目標となり、その先には人間の感性に整合するあらゆる形態や機能化が可能な美感性材料へと昇華していく。

(エ) 蓄光・蓄熱用材料

次世代の発光や発電材料の開発が盛んであるが、同時に、種々のエネルギー形態の中で利用されずに捨てられる割合の高い光熱エネルギーに着目する。これらは、これまではあまり顧みられなかった分野であり、太陽光の未使用成分の蓄光

(タイムシフターによる夜間発電等)や膨大に散逸している熱エネルギーの集散・回収に役立つ熱集積回路等を、形態制御や微細・大型化が容易でかつナノ結晶化等により機能複合化が自在となってきたガラスを母体として開発する。実際には、既存の太陽光発電や熱電素子等の機能を損ねることなく、シースルーカバーのような形状により、発電エネルギー機能と蓄エネルギー効果を集積化する。

(オ) 高性能蓄電システム

エネルギーの形態として最も優れているのが電気であることは誰もが認めることである。しかし、エネルギー源としての電気には「貯める方法が限られる」という決定的な欠点が存在する。この意味で高性能蓄電システムの研究・開発は、現在、人類が取り組むべき最重要の課題であるといっても過言ではない。重量あたりのエネルギー貯蔵量が最も高い素子がリチウム電池であるが、これ以上の向上には抜本的な技術革新が必要となっている。リチウム固体電解質の利用、リチウム空気電池の実現はまさに夢であり、そのためにセラミックス技術も中核的な役割を果たす。一方、積層セラミックスキャパシターは、放出するパワーの密度では非常に優れているものの、重量あたりのエネルギー貯蔵量は非常に小さい。蓄電システムとして積層セラミックスキャパシターを使うには、パワー密度を決める周波数特性は犠牲にしてもエネルギー貯蔵量を増やす材料・素子構造を作る必要がある。現在の高度セラミックス製造技術を用いれば決して不可能ではなく、目指すべき夢として挙げておく。

(カ) 環境浄化材料

現在、PM2.5 や環境ホルモン等、または放射性同位体等の汚染が非常に問題となっている。これらの問題について、まずはセラミックス多孔体を用いて、有害物質の吸着除去について検討する。セラミックスは耐熱性や物理的耐久性に優れており、これは多孔体を高温で使用したり、また再利用するのに非常に役立つ。次の段階としては、光触媒による分解除去である。吸着した有害物質を、特に可視光型光触媒によって分解したり変質させることができれば、新たなエネルギーの投入なしに環境浄化が可能となる。さらに燃焼により発生し、現在問題となっているPM2.5の回収除去等、有害物質から有害微粒子へとそのターゲットを広げていき、最終的には統合的な有害物質や微粒子の除去技術を確立する。

(キ) 特定元素の回収・除去システム

戦略物質である希土類元素、白金族、リチウム、コバルトやヘリウム等、比較的貴重な元素の使用量を少なくする技術は非常に重要であると同時に、使用済み部品から、これらを回収する技術も非常に大切である。特定元素の回収・除去については、まずはセラミックス多孔体や層状化合物への吸着を検討する。元素サイズや分子形状によっては、セラミックス多孔体で吸着可能な場合もあるし、イ

オンであれば層状化合物へのイオン交換による回収が現実的である。またセラミックス表面と回収元素との相互作用が重要なキーポイントとなることから、表面を改質しつつ、疎水性相互作用、双極子相互作用等の種々の相互作用を駆使して、特定元素が回収可能な材料の創製を目指す。最終的には、それらの材料を組み合わせた特定元素回収システムの構築を目標とする。

(ク) ナノ粒子の科学・応用技術の確立

新しいナノ粒子構造指針を開発する。例えば、人間の感性に訴える光学機能性といった新しい特性を持つナノ粒子を得るため、感性工学との融合によりナノ粒子構造を設計する。

粒子生成反応が進行する化学反応場を高度制御する「ケミカルデザイン」により、ナノ構造制御したナノ粒子を合成する。ナノ粒子の重要な応用分野である環境浄化（光触媒等）、エネルギー有効利用（燃料電池、先端電子デバイス等）、さらに、医療診断デバイス（医療機器、ヘルスケア）への応用を実現する。

(ケ) 脆性克服のための材料科学

破壊靱性パラメーターを再検討して、ナノ構造に対応する破壊靱性理論を再構築し、ナノ構造制御材料による破壊靱性の向上を目指す。共有結合或いはイオン性結合と共に金属結合性領域を持つ、言い換えると異種結合性領域を内在する超配向バルク体の作製を目指す。この新しい材料設計を実現するため、新規な前駆体となる特異構造粉末を用いてバルク体作製を実現する。前駆体の結晶構造を利用した超配向技術を開発し、均質な超複合化焼結体を作製する。強度・靱性の高度化により、高度非脆性材料を開発する。

(コ) 高効率航空機用エンジン部材

燃料費削減及び環境負荷低減の観点から、航空機の燃費向上が強く求められており、その実現にはジェットエンジンの重量減と熱効率の向上が鍵となる。熱効率の向上には、タービン入口温度を高めることが効果的であり、例えば、従来材であるニッケル基超合金の場合には、タービン入口温度を高めるために、空気冷却に加えて、遮熱コーティングの適用が検討されている。また、セラミックス基複合材料は、ニッケル基超合金と比べて比重が1/4と軽量であり、1300度以上の高温でも使用できる耐熱性から、次世代タービン部材材料として注目されている。候補材の1つであるSiC等のSi系セラミックスは、水蒸気雰囲気中では、減肉するためにジェットエンジン部材に用いる際には耐環境コーティングが必要になる。そのため、高効率航空機用エンジンセラミック部材及び遮熱・耐環境性コーティングの開発を目標とする。

(サ) 大型部材製造プロセスの確立

軽量で、剛性が大きく、耐熱性・耐食性に優れたセラミックスを製造装置やシステムに組み込むことで、製造効率の向上が期待される。例えば、液晶・半導体製造ラインでは、セラミックスを大型の精密生産用部材として活用することで、製品の処理能力の向上や微細加工化が可能となる。これらの要求に応えていくには形状付与の自由度を高める必要があるが、従来の一体型のセラミックス成形技術では対応が困難である。軽量・高剛性・高精度セラミック部材を実現するために、例えば、高機能化された小さな精密ブロックを作製し、立体的に組み上げ、高効率で接合・一体化して所望とする大型（巨大）化・複雑化・精密性すべてを満たした部材を得ることのできる革新的なプロセス技術の確立を目標とする。

(シ) おいしい水を作る材料

水は、人類を始めとする生物の根源の1つであり、人類はこれまで安全な水を得ることに邁進してきた。我が国では既に水は安全・安心なものとして水道より供給されるが、世界的には未だ水道水を安心して利用できない国も多い。また一方で、我が国においても、自然災害時等に安全なおいしい水を手に入れるのは困難な場合もある。さらに、一部では水に対して偏った信仰も存在し、非常に高価に販売されている例もある。そのため、安全・安心な水を作る材料開発は、人類を豊かにする技術として非常に重要である。まず初期段階としては、有害物質の除去や殺菌等の水質調整を簡易に行える技術を開発する。続いて、触媒やセラミックセンサー等による安全性確保技術を検討し、最終的には、水質改善システムを構築する。

(ス) 生体環境に調和する材料

セラミックスは医療分野において、歯や骨に代表される硬組織の代替材料として用いられてきた。例えば、骨の代替材料には、様々なセラミックスが用いられているが、自家骨をしのぐには至っていない。生体骨は、応力に応じてリモデリングを生じ、骨梁を改善することにより安定した構造を有し、また、微小骨折が生じた場合、骨組織のリモデリングにより骨折部位を修復し、生体機能を回復する。このように生体内において、骨は吸収と再生を繰り返しており、埋入された骨補填材も同様に吸収され、自家骨に置き換わることが望ましいとされている。現在、骨補填材として幅広く利用されているハイドロキシアパタイトは、生体内において難溶性で自家骨に置き換わることが困難とされている。そこで、生体骨の組成や構造に類似したセラミックスや複合材料を開発することによって、生体組織と同様な機能を持つセラミックスの臨床応用が可能となる。

(セ) 細胞に機能する材料

セラミックスは生体内に埋入されると、無機イオンやタンパク質の吸着が始まり、細胞接着、機能発現を経て、損傷部位の治癒が開始される。セラミックスの組

成や表面性状を制御することにより、細胞機能をマニピュレートすることが可能であり、硬組織や軟組織等適応部位の細胞種に適したセラミックスの創製や表面改質法の開発が期待される。しかしながら、セラミックスが細胞機能をマニピュレートするメカニズムは未解明のままであり、それらを解明し、細胞の機能発現に基づいたセラミックスの設計・創製が急務である。

再生医療の発展と協調して、10年後にはiPS細胞/ES細胞や間葉系幹細胞等の幹細胞を含む細胞の増殖・分化を制御するセラミックスを創製し、20～30年後には細胞の高次機能発現を制御、再生医療に資するセラミックスの実現が期待される。

また、セラミックスは、薬物送達システム(DDS)の担体として開発が進んでいる。ナノサイズのセラミックスは、生体内において吸収可能であり、遺伝子や薬物の複合体を効率よく細胞に導入し、細胞の機能を調節しながら、タンパク質産生や遺伝子ワクチンを作製することが可能であることから、効率的な遺伝子治療を実現するDDSの担体として期待される。

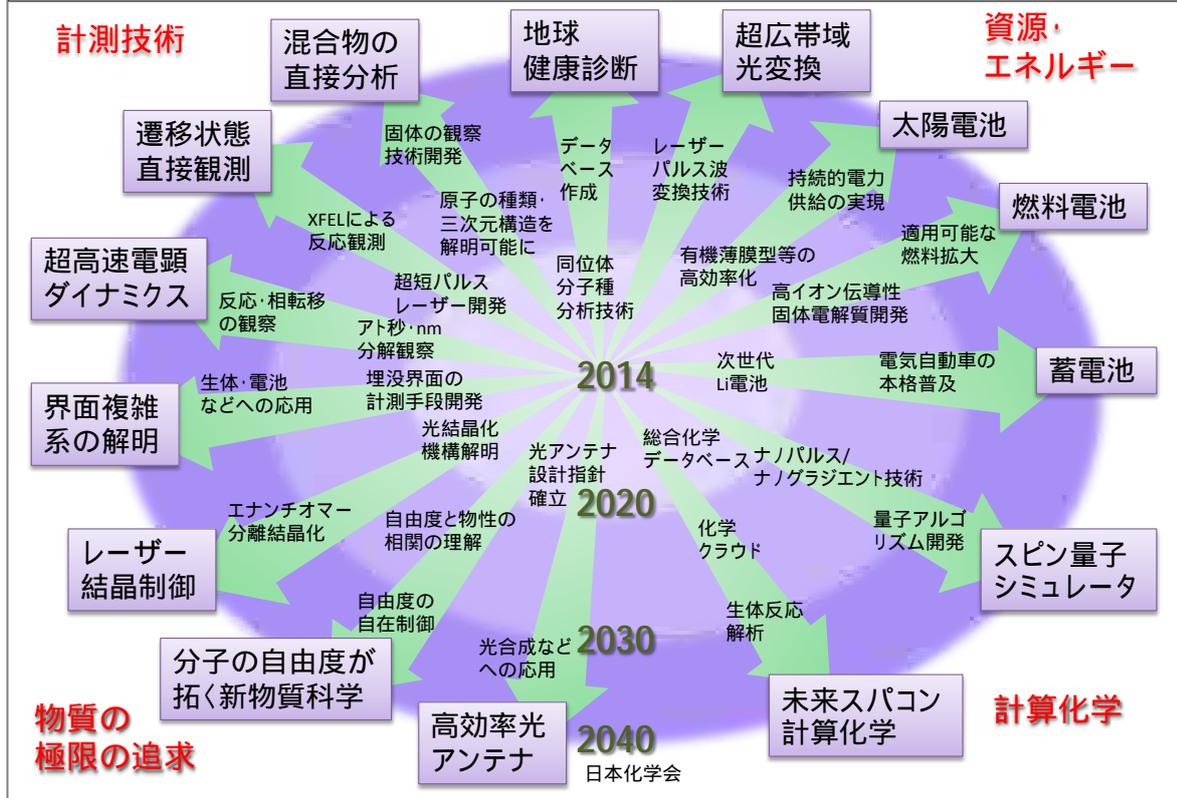
(ソ) 高齢者の高度医療のための材料

日本国内では、4人に1人が65歳以上になる超高齢社会を迎えて、基礎疾患を有する患者や高齢者が増加し、その治療方法や治療用人工材料の高度化が求められている。骨量及び骨質の減少を伴う骨粗鬆症は、主に閉経後の女性や糖尿病患者等で発症し、骨形成の減弱と骨吸収の増加が認められる。このような低下した生体反応に対してセラミックスの臨床応用を行い、セラミックスの適応範囲が拡大すること、そしてそれにより人々のQOLが向上することが期待される。

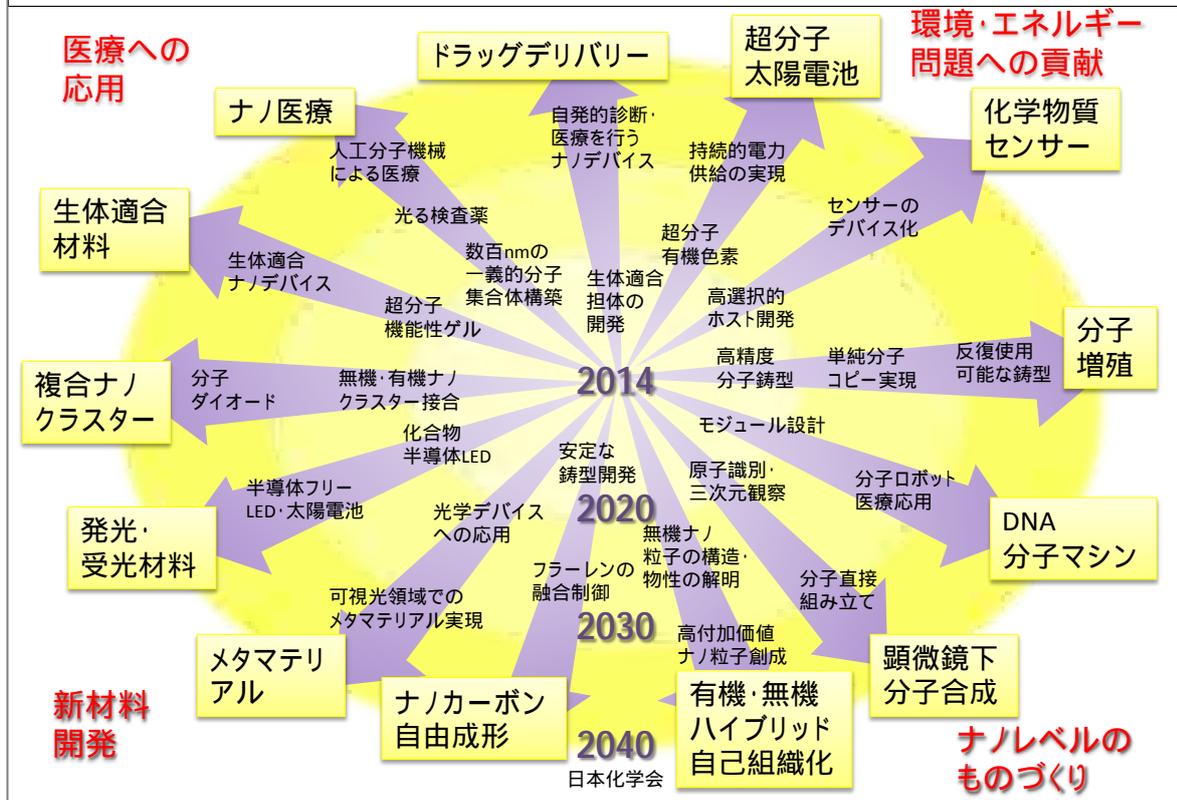
また、セラミックスを生体内に埋入した場合、感染による抜去、再治療の必要性が生じる場合がある。生体機能が低下した場合、通常では予知し得ない感染が生じるが、抗菌活性を有したセラミックスの創製により、抵抗力の低下した高齢者や有病者においても、安心・安全な治療を行うことができる。

また、中心静脈栄養等カテーテルを長期留置する場合等に抵抗力の弱い高齢者でも重篤な感染を防止するようなデバイスの創製が期待される。

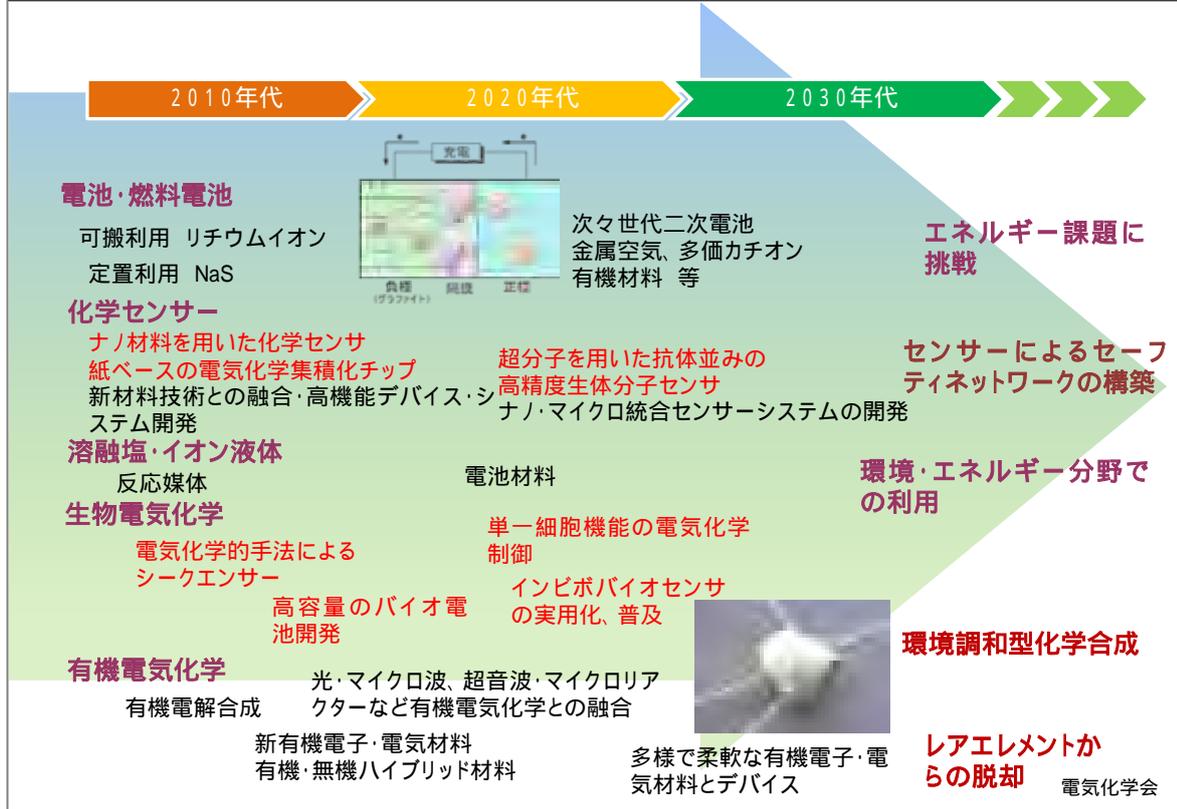
6-4 物理化学分野の夢ロードマップ



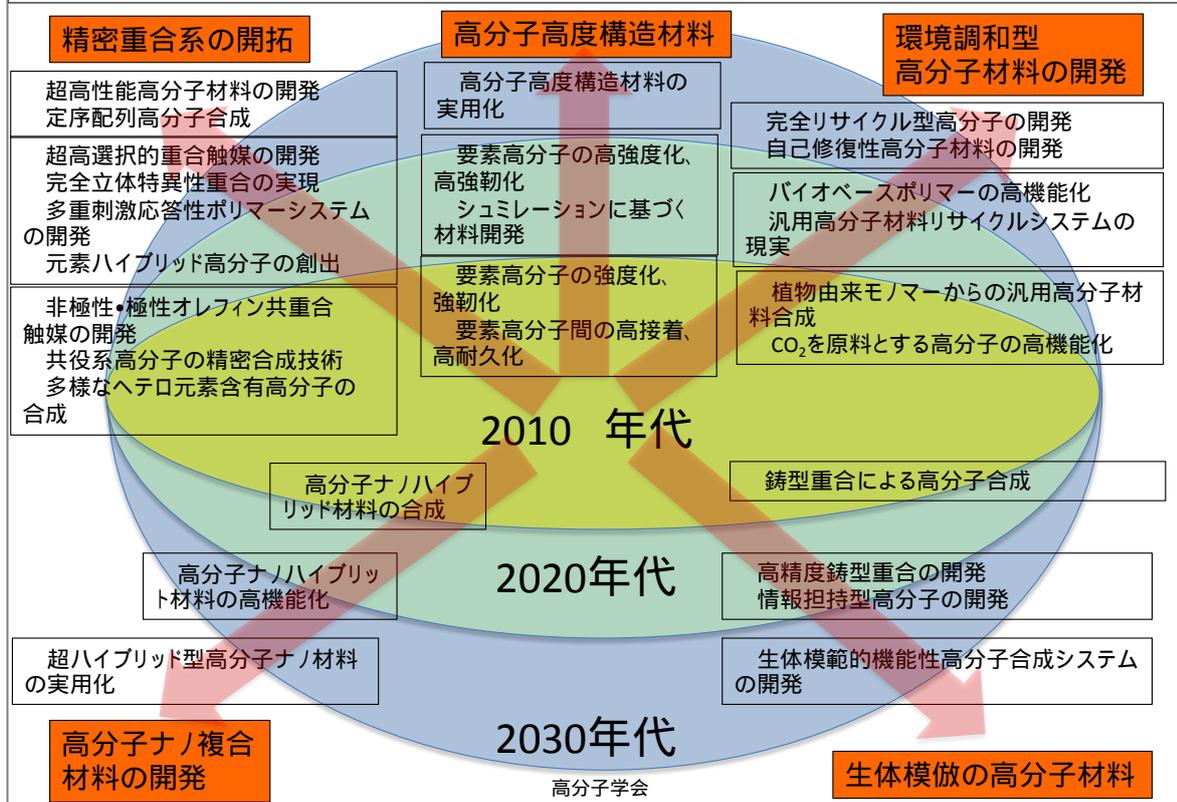
6-5 ナノテク化学分野の夢ロードマップ



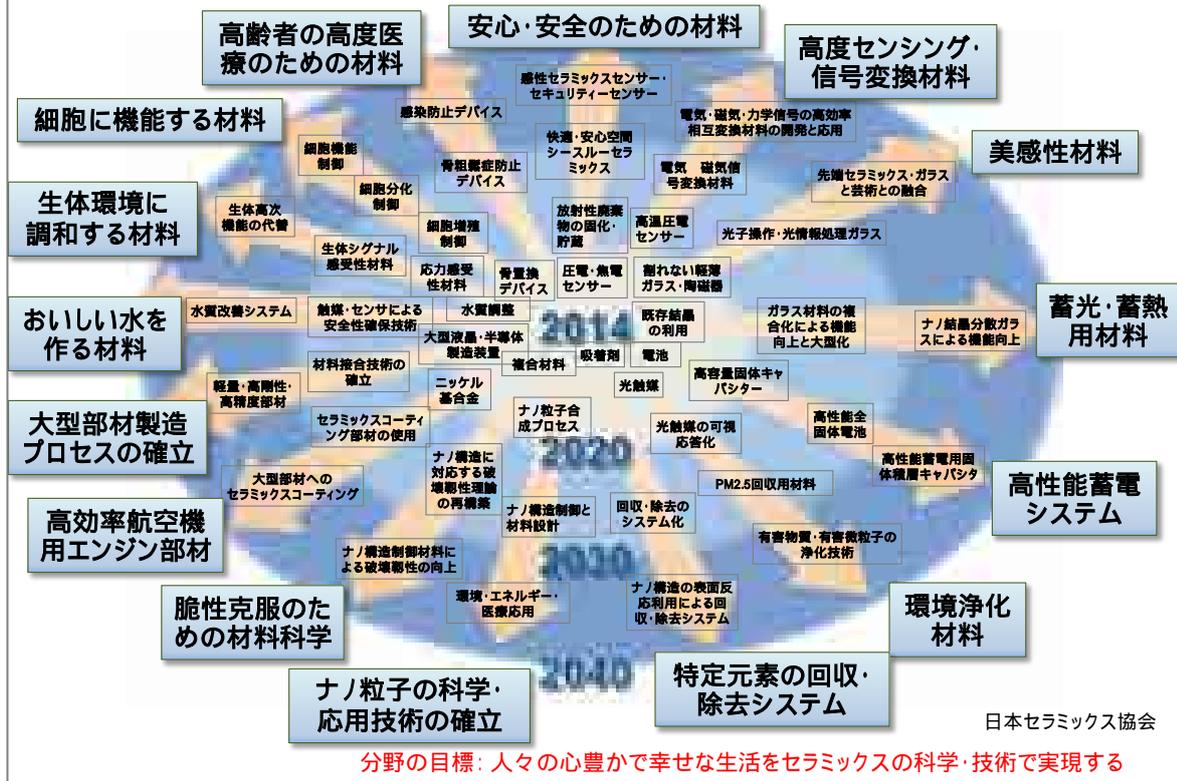
6-6 電気化学分野の夢ロードマップ



6-7 高分子化学分野の夢ロードマップ



6-8 セラミクス化学分野の夢ロードマップ



(7) 総合工学分野

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。

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、トランジスター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、トランジスター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ー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、コンピューターの進化によって、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、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、フォトリクス、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っては、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、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、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、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、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しなくなり、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来ている。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
の情報が得られ、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ー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、「文理共創的人材育成」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、弱者に寄りそう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 - 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、身体のコル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があ、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。未来の夢を語る時、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 - 実世界の認識 - 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）等が列挙され、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。

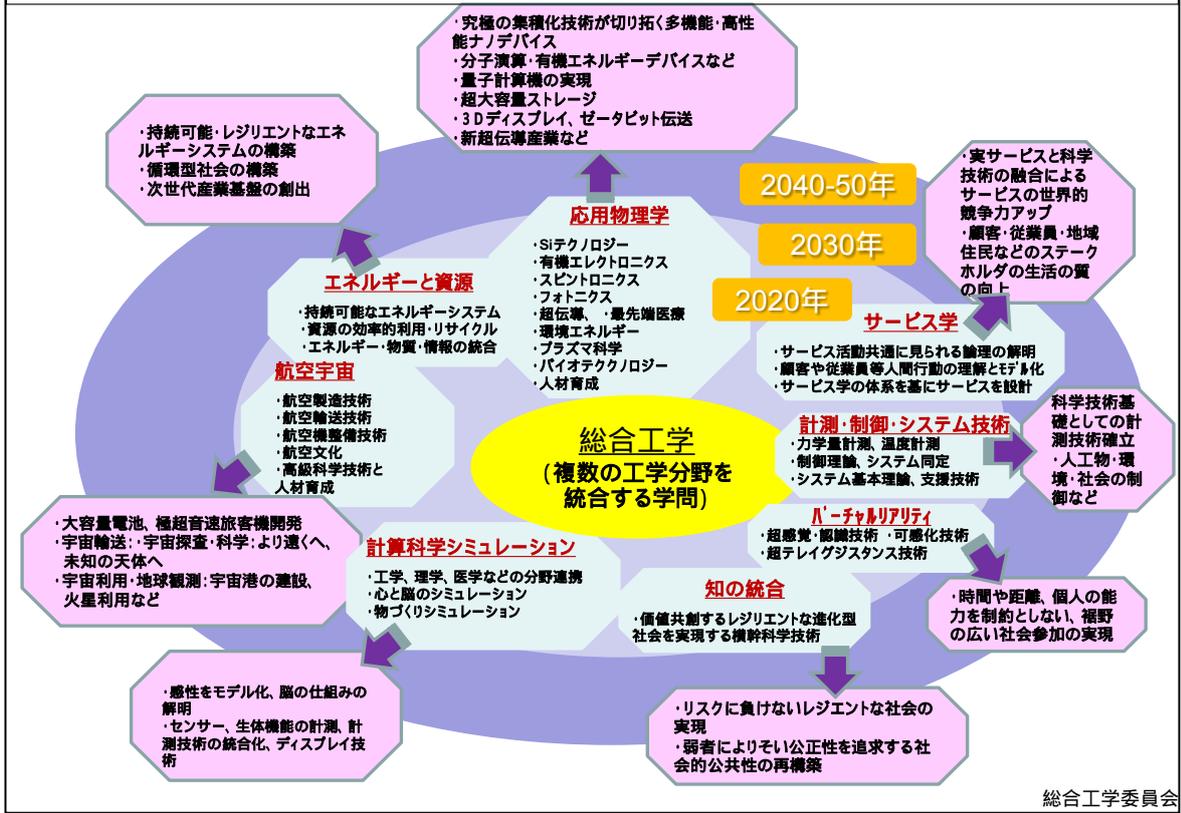
(イ) 行動理解

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。

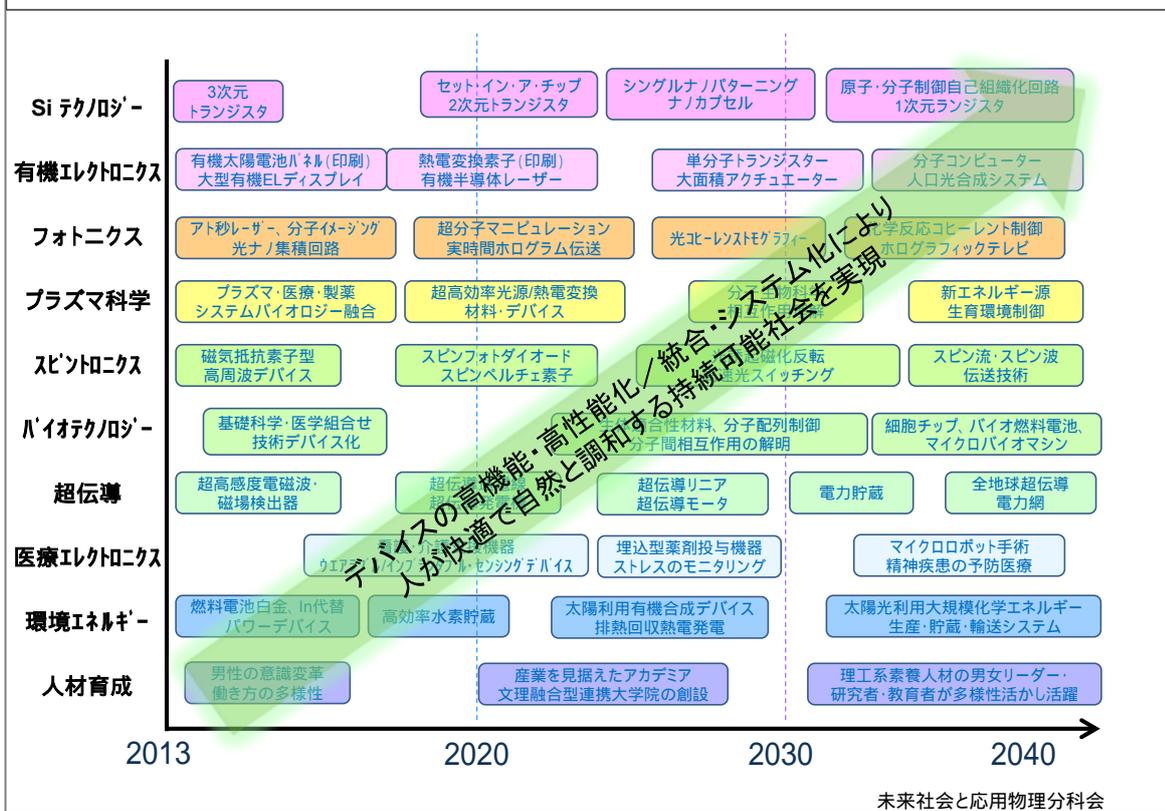
(ウ) 設計適用

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



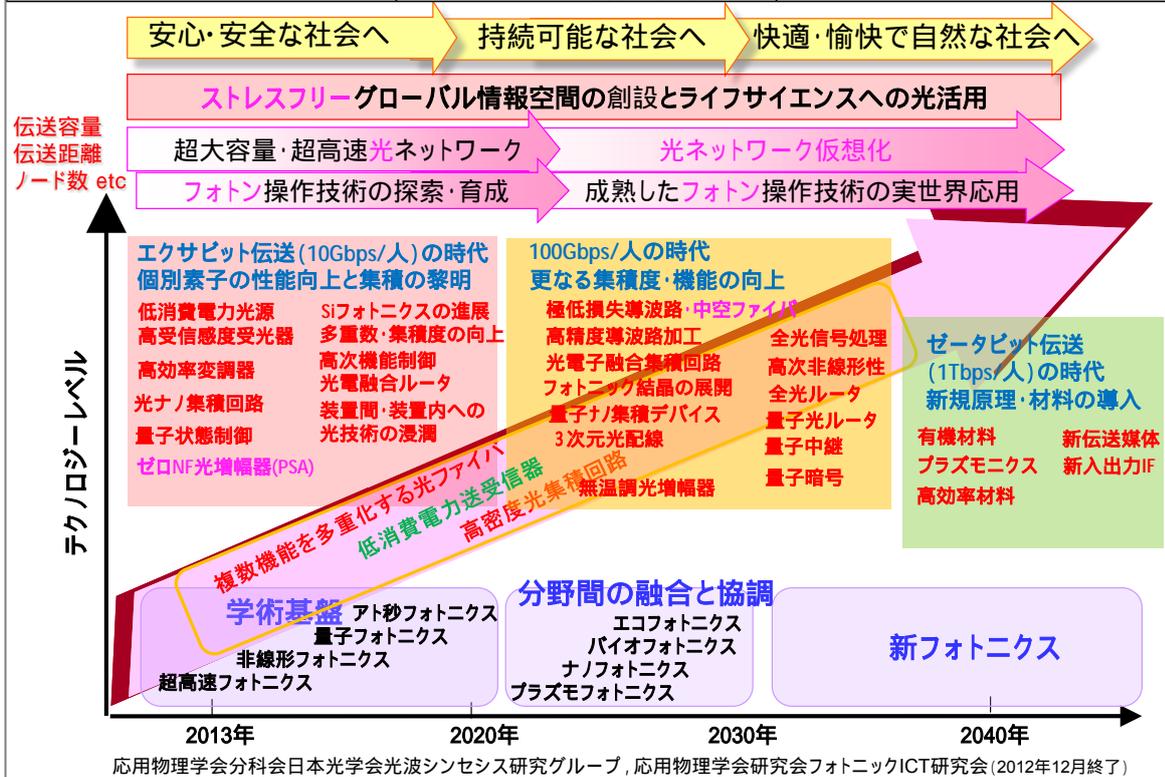
7-1 応用物理学の夢ロードマップ



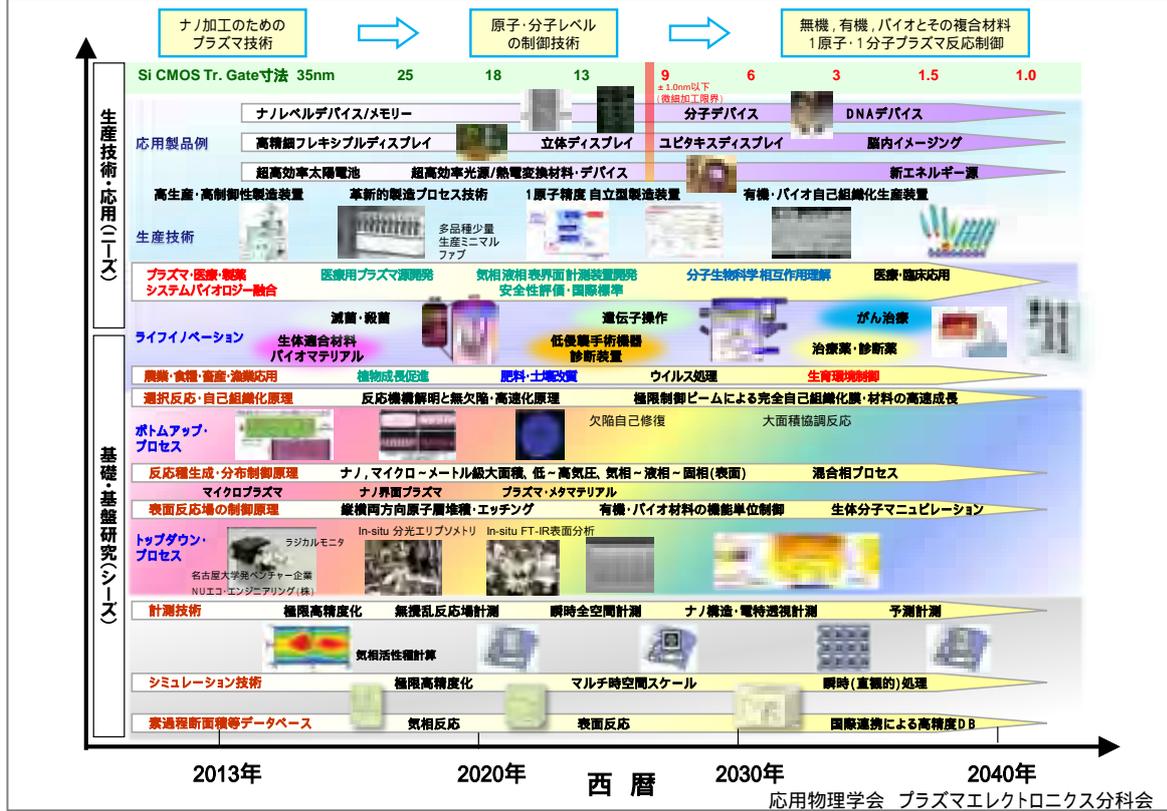
7-1-3-1 応用物理学 ~フォトニクス(光・量子エレクトロニクス)~ (フォトニクスが拓く未来社会)



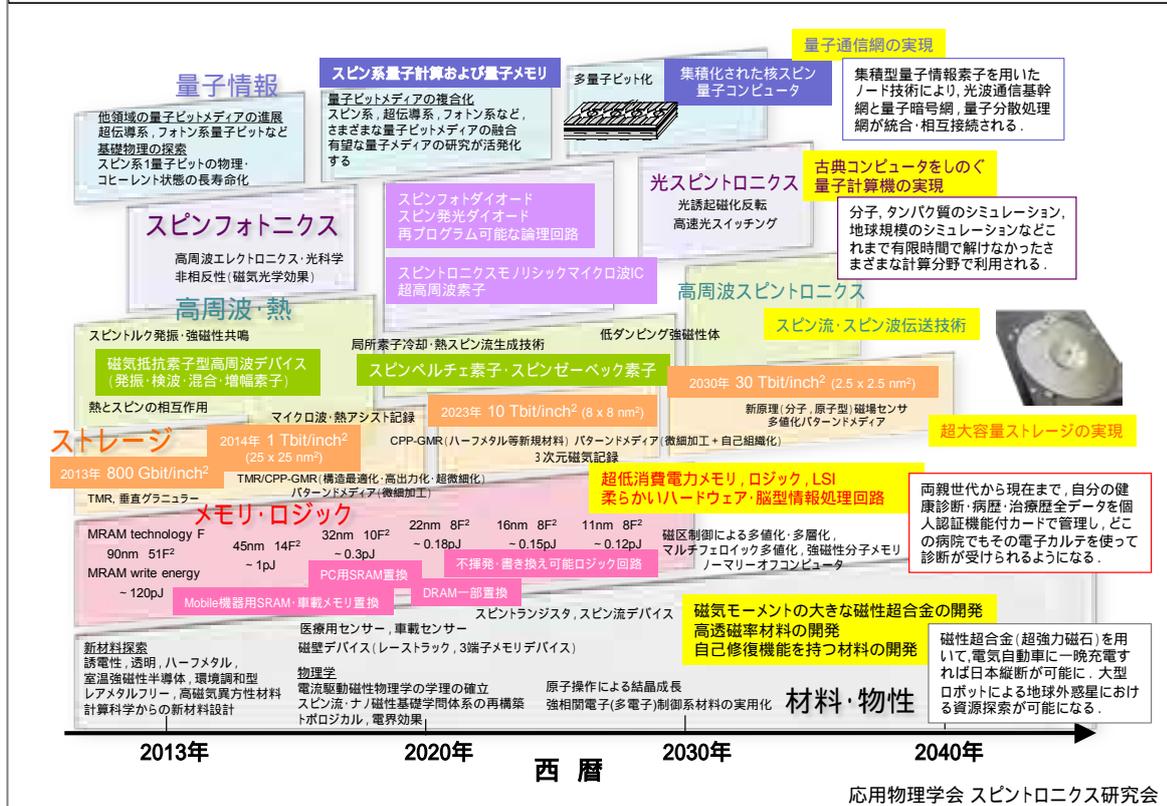
7-1-3-2 応用物理学 ~フォトニクス(通信)~ (フォトニクスが拓く未来社会)



7-1-4 応用物理学 ~ プラズマ科学 ~



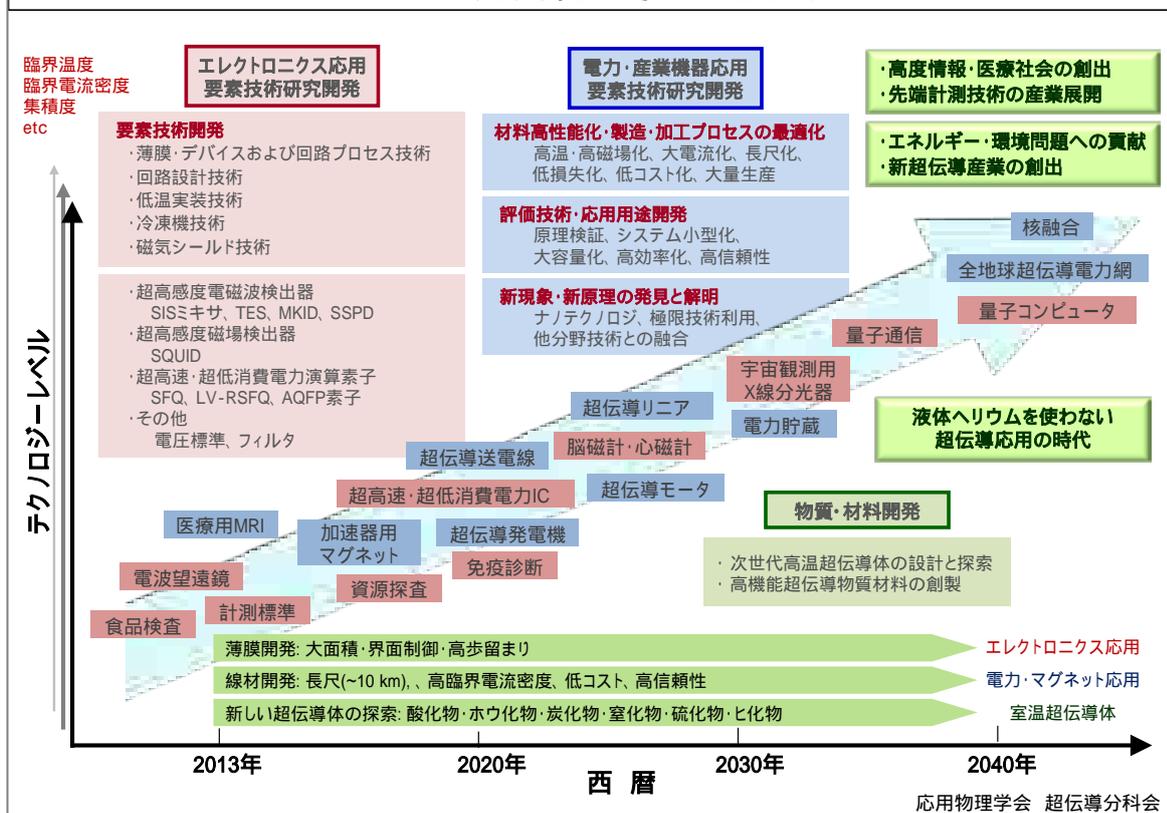
7-1-5 応用物理学 ~ スピントロニクス ~



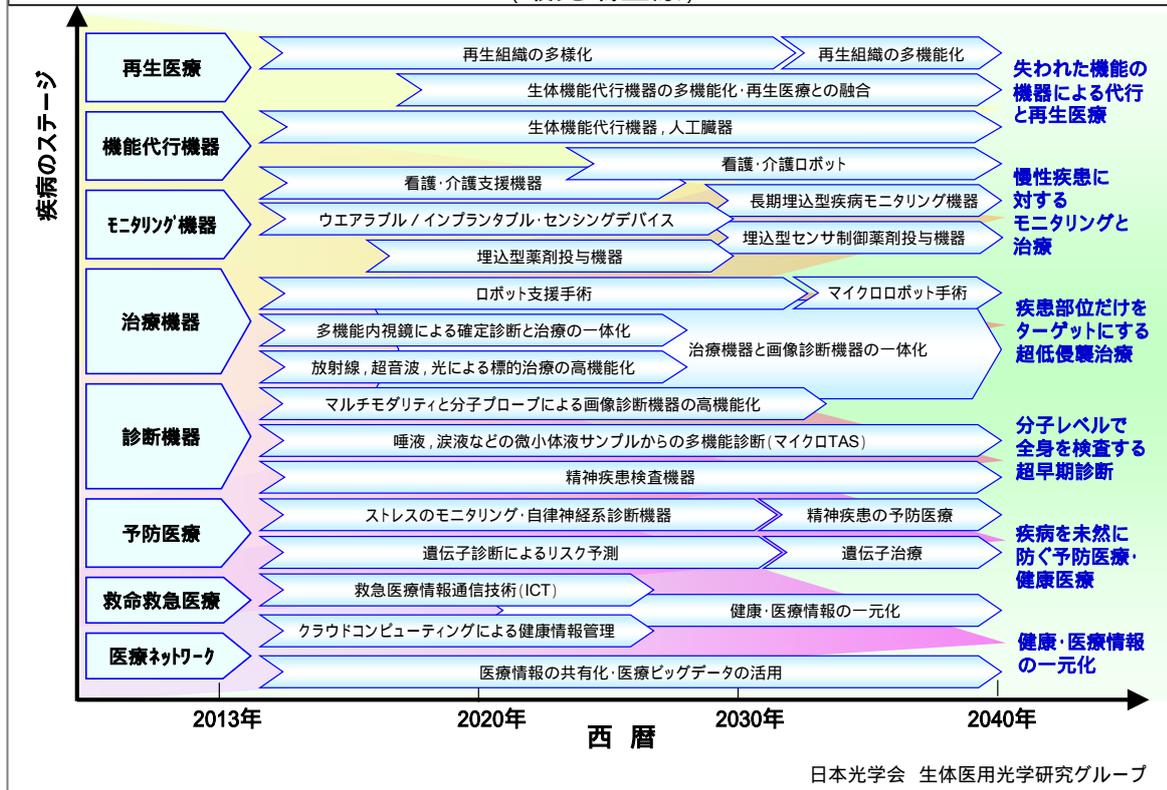
7-1-6 応用物理学 ~ バイオテクノロジー ~ (健康と活力を保って長生きする)



7-1-7 応用物理学 ~ 超伝導 ~



7-1-8 応用物理学 ~医療エレクトロニクス~ (最先端医療)



7-1-9 応用物理学 ~環境・エネルギー~

