

科学技術予測調査
分野別科学技術予測
各分野の将来展望

2015年5月

文部科学省科学技術・学術政策研究所
科学技術動向研究センター

目次

1. 「科学技術予測調査」の全体像	1
2. 「分野別科学技術予測」の概要	2
3. 各分野の将来展望	5
3-1. ICT・アナリティクス分野	5
3-2. 健康・医療・生命科学分野	6
3-3. 農林水産・食品・バイオテクノロジー分野	8
3-4. 宇宙・海洋・地球・科学基盤分野	14
3-5. 環境・資源・エネルギー分野	16
3-6. マテリアル・デバイス・プロセス分野	17
3-7. 社会基盤分野	19
3-8. サービス化社会分野	21

1. 「科学技術予測調査」の全体像

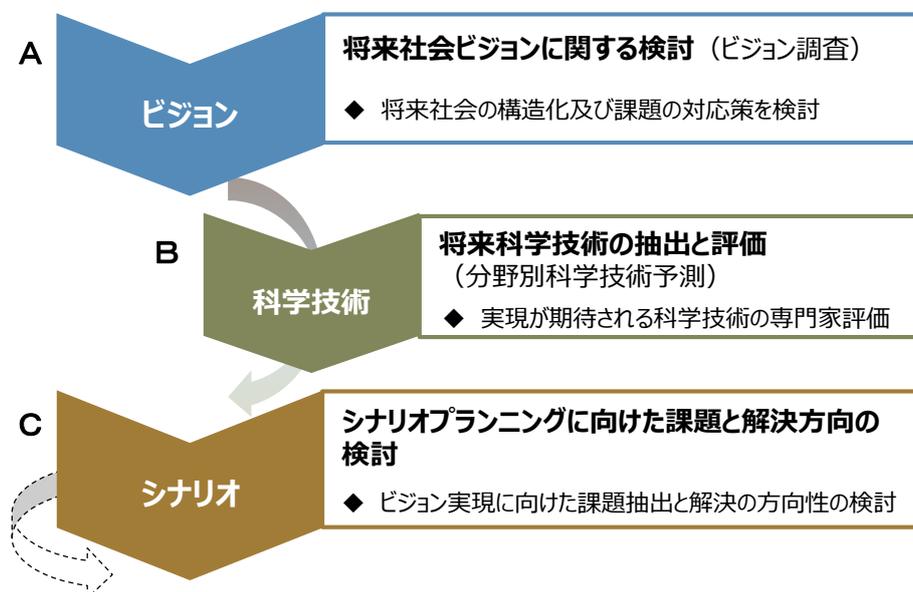
我が国では、科学技術の中長期発展を展望する大規模な「科学技術予測調査」が1971年から約5年毎に実施されている。第5回調査(1992年)からは、科学技術・学術政策研究所が実施主体となっている。

科学技術・学術政策研究所は、科学技術イノベーション政策・戦略の議論に資することを目的として、10回目に当たる「科学技術予測調査」を2013年度から実施してきた。

調査は、三つの段階から構成される(図表1)。第一段階は、社会の側の視点から将来起こりうる変化を展望し、その対応策を検討する「将来社会ビジョンに関する検討(ビジョン調査)」(A)、第二段階は、科学技術の側の視点から注目される科学技術の将来を展望する「将来科学技術の抽出と評価(分野別科学技術予測)」(B)である。第三段階は、第一段階及び第二段階の検討結果を統合し、将来社会の課題抽出と解決の方向性の検討を行う「シナリオプランニングに向けた課題と解決方向の検討」(C)を行う。

本報告は、第二段階である「将来科学技術の抽出と評価(分野別科学技術予測)」(B)について、将来科学技術に関するウェブアンケートの結果(2014年11月速報版公表済)を踏まえ、調査のために設置した分野別委員会の座長が当該分野の将来展望をとりまとめたものである。

図表1: 調査の全体像



2. 「分野別科学技術予測」の概要

本調査では、注目される科学技術発展の方向性及び実現のための重点施策についてウェブアンケートにより多数の専門家の見解を収集し、その結果を分析した。将来を展望する期間は、2050年までの約30年間とした。

(1) 調査対象

今般の調査では、以下の8分野の科学技術を調査対象とした。従来調査してきた分野に加え、インダストリー4.0 やプロダクト・サービス・システム(PSS)などの新しい潮流に鑑み、従来の製造関連分野を発展させる形で「サービス化社会」分野を新設した。

- ① ICT・アナリティクス
- ② 健康・医療・生命科学
- ③ 農林水産・食品・バイオテクノロジー
- ④ 宇宙・海洋・地球・科学基盤
- ⑤ 環境・資源・エネルギー
- ⑥ マテリアル・デバイス・プロセス
- ⑦ 社会基盤
- ⑧ サービス化社会

各分野の下に10程度の細目を設け、細目毎に調査対象とする「科学技術課題」(以降、「トピック」と言う)の検討を行った。将来の経済社会あるいは科学技術自体の発展に大きなインパクトをもたらす潜在可能性の高い科学技術を抽出し、各細目10件程度のトピックを設定した。図表2に細目及びトピック数を示す。

(2) アンケート実施概要

設定したトピックに対して、研究開発特性、実現可能性、及び推進のための重点施策を問うアンケートを2014年9月に実施した。

回答者は、科学技術・学術政策研究所が持つ専門家ネットワークの専門調査員(産学官の各分野の専門家約2000名)、及び、関連学協会の会員等である。後者については、関連学協会の協力を得て、ウェブサイト掲載あるいはメーリングリスト等により、会員に対し回答協力を依頼した。その結果、8分野計で4309名から回答を得た。

アンケートの質問項目を図表3、回答者属性を図表4に示す。

図表2: 分野別の細目及びトピック数

分野	細目数及び細目詳細	トピック数
ICT・アナリティクス	12 細目 [人工知能、ビジョン・言語処理、デジタルメディア・データベース、ハードウェア・アーキテクチャ、インタラクション、ネットワーク、ソフトウェア、HPC、理論、サイバーセキュリティ、ビッグデータ・CPS・IoT、ICTと社会]	114
健康・医療・生命科学	10 細目 [医薬、医療機器・技術、再生医療、コモンディジーズ、難病・希少疾患、神経・精神疾患、新興・再興感染症、健康・医療情報・疫学、基盤技術、その他]	171
農林水産・食品・バイオテクノロジー	17 細目 [農: 高度生産、作物開発、疾病防除、バイオマス利用、環境保全 / 食品: 高度生産、流通・加工、食品安全、食品機能性 / 水産: 資源保全、育種・生産、環境保全 / 林: 高度生産、バイオマス利用、環境保全 / 共通: 情報サービス、その他]	132
宇宙・海洋・地球・科学基盤	10 細目 [宇宙、海洋、地球、地球観測・予測、加速器・素粒子・原子核、ビーム応用: 放射光、ビーム応用: 中性子・ミュオン・荷電粒子等、計算科学・シミュレーション、数理科学・ビッグデータ、計測基盤]	136
環境・資源・エネルギー	11 細目 [エネルギー生産、エネルギー消費、エネルギー流通・変換・貯蔵・輸送、資源、リユース・リサイクル、水、地球温暖化、環境保全、環境解析・予測、環境創成、リスクマネジメント]	93
マテリアル・デバイス・プロセス	7 細目 [新しい物質・材料・機能の創成、アドバンスド・マニュファクチャリング、先端材料・デバイスの計測・解析手法、応用デバイス・システム (ICT・ナノテク分野、環境・エネルギー分野、インフラ分野)]	92
社会基盤	7 細目 [国土開発・保全、都市・建築・環境、インフラ保守・メンテナンス、交通・物流インフラ、車・鉄道・船舶・航空、防災・減災技術、防災・減災情報]	93
サービス化社会	10 細目 [経営・政策、知識マネジメント、製品サービスシステム(PSS)、社会設計・シミュレーション、サービスセンシング、サービスデザイン、サービスロボット、サービス理論、アナリティクス、人文系基礎研究]	101
計	84 細目	932

図表3: アンケートの質問項目

項目	内容
研究開発特性	重要度、国際競争力、不確実性、非連続性、倫理性
実現可能性	技術実現の可能性、(実現可能な場合)技術実現時期 社会実装の可能性、(実現可能な場合)社会実装時期
重点施策	技術実現 / 社会実装のため最も重点を置くべき施策 (人材戦略 / 資源配分 / 内外の連携・協力 / 環境整備 / その他)

図表4:回答者属性

	回答数*	(所属)			(年代)				
		大学等	企業他	公的機関	20-39	40-49	50-59	60-	N.A.
ICT・アナリティクス	936	52%	40%	7%	28%	26%	23%	8%	15%
健康・医療・生命科学	877	51%	42%	8%	30%	26%	23%	8%	13%
農林水産・食品・バイオテクノロジー	496	44%	25%	31%	27%	27%	23%	11%	12%
宇宙・海洋・地球・科学基盤	1,431	49%	34%	17%	28%	26%	22%	11%	12%
環境・資源・エネルギー	833	47%	38%	16%	27%	24%	22%	17%	11%
マテリアル・デバイス・プロセス	672	58%	29%	13%	38%	25%	17%	11%	8%
社会基盤	509	42%	43%	15%	26%	26%	23%	17%	8%
サービス化社会	324	43%	42%	15%	24%	27%	25%	12%	10%
計	6,078	43%	42%	15%	30%	26%	22%	12%	11%

*複数分野に回答した者が重複計上されているため、ここでの計は回答者数(4309名)と一致しない。

(3) 検討体制

本調査の実施に当たって、以下に示すように、調査分野ごとに委員会を設置した。各委員会は、10名程度の専門家から構成される。委員会では、調査対象とするトピックの検討、アンケート実施のための関連学協会等の推薦、調査結果の分析及びとりまとめを行った。

(敬称略、所属は2015年3月時点)

分野別委員会	座長	所属
ICT・アナリティクス	喜連川 優	国立情報学研究所 所長
健康・医療・生命科学	小此木 研二* 高坂 新一*	大阪大学 産学連携教授 国立精神・神経医療センター神経研究所 所長
農林水産・食品・バイオテクノロジー	亀岡 孝治	三重大学 生物資源学研究科教授
宇宙・海洋・地球・科学基盤	土肥 義治	公益財団法人高輝度光科学研究センター 理事長
環境・資源・エネルギー	矢部 彰	独立行政法人産業技術総合研究所 理事
マテリアル・デバイス・プロセス	小関 敏彦	東京大学 副学長、工学系研究科教授
社会基盤	小池 俊雄	東京大学 工学系研究科教授
サービス化社会	持丸 正明	独立行政法人産業技術総合研究所 サービス工学研究センター長

* 共同座長

3. 各分野の将来展望

3-1. ICT・アナリティクス分野

(1) 本分野の対象

ICT・アナリティクス分野における研究領域の伝統的な分類に加え、最近特に発展が著しい研究領域の動向にも配慮して12の細目を設定した。具体的には、①計算機の必須構成要素である「ハードウェア」、「ソフトウェア」および必須処理対象に対応する「デジタルメディア・データベース」、②計算機同士あるいは計算機と人間・社会をつなぐ「ネットワーク」、「インタラクション」、③現時点で人間の知能に優位性がある分野を中心に計算機の能力向上を目指す「人工知能」、「ビジョン・言語処理」、④極めて大規模あるいは高度に複雑な計算・データ・システムに焦点をあてた「HPC」、「ビッグデータ・CPS・IoT」、⑤社会との関係を考え、良い意味でのICTのブレーキ役も果たす「サイバーセキュリティ」、「ICTと社会」、そして、⑥インパクトが大きな研究の基盤となる「理論」の計12細目である。

(2) 結果の総括

アンケートの結果、総じて重要度が高いまたは非常に高いと評価されたトピックが多かった。重要度に関して回答者の平均点が高かった上位10件を分類すると、HPCやビッグデータに関するもの5件、セキュリティ・プライバシーに関するもの2件、医療・介護・高齢者支援に関するもの2件、防災・減災に関するもの1件であった。HPCやビッグデータにより新たなフロンティアを開拓するとともに、我が国で特に問題となっている高齢化社会や災害などに備え、安全・安心な社会を実現することが求められていると考えられる。

一方、国際競争力に関しては、細目で分類すると「HPC」や「ネットワーク」が比較的強く、「サイバーセキュリティ」や「ソフトウェア」は重要度こそ高いものの比較的弱いとの結果であった。「ビッグデータ・CPS・IoT」や「ICTと社会」も比較的弱い。国際的に強い領域を伸ばすとともに、今後の社会の発展のために重要だが弱い領域の補強も考える必要がある。

技術実現のための重点施策に関しては、一般的に「人材戦略」、「資源配分」の回答比率が高かった。特に、「理論」と「ソフトウェア」は「人材戦略」の比率が高く、「ネットワーク」は「資源配分」の比率が高い。一方、社会実装の段階になると「環境整備」の比率が増えてくる。特に高いのは「ビッグデータ・CPS・IoT」である。社会に深く浸透するタイプの技術は、価値が極めて高い可能性がある反面、既存の制度等との不整合が生じやすく「環境整備」が大きな問題となるのであろう。研究の領域やフェーズによってかなり違った施策が必要となることが、アンケート結果から伺える。

実現・実装の時期に関しては、約95%のトピックで平均すると2025年までには技術的に実現され、ほぼ同数のトピックで平均すると2030年までには社会に実装されるとの回答があった。なお、これらの平均値は「実現しない」や「わからない」という回答を除いて計算されており、「実現しない」や「わからない」の回答比率が高いトピックも少なからず存在する。2050年頃までの予測を行うことを想定してトピックを作成したが、結果として、空振りとなった感がある。ITは非常に変化の激しい分野であることから、10～15年以上先のことは専門家に聞いても確信をもって判断することが困難

であることを反映していると考えられる。

(3) 今後の展望

アンケートの結果に基づき、ICT・アナリティクス分野の今後の発展の方向性として重要と思われる点を示す。

まず、ムーアの法則に代表される指数的な成長が、この分野ではベースラインになる。物理限界や電力消費量の問題により成長率が低下することもあるが、画期的な計算方式等の考案や ICT が創出するネットワーク効果によりベースラインをはるかに上回る成長が可能となることもある。この急速な成長をドライビングフォースとして、技術的あるいは経済的に従来は到達不可能であった領域を次々に切り拓いて行くところに ICT の魅力がある。このような成長を加速し、新領域を切り拓く技術の研究開発は重要であり、ビッグデータ、HPC、ハードウェア、ネットワーク、理論などの広範な分野で研究開発の進展を支援する施策が重要となろう。

今後、IoTからのデータ創出量が爆発的に増大し、それにともないビッグデータ・アナリティクスの主戦場がシフトすることが予想される。また、ICT の「共有によるシナジー」を創出する力が、オープンデータの流れを加速させ、オープンサイエンスとともに産業界にも大きな影響を与えるであろう。データの利活用は一層加速され、Future Earth のような国際連携活動にも大きく貢献することが期待される。他の分野の調査結果でも言及されているように、これらは ICT・アナリティクス分野にとどまらず、広範な諸分野の研究開発の発展に資するものである。このとき、ICT の研究開発競争の焦点として、多様な解析技術を搭載したデータプラットフォームが重要となる。リアルタイム解析とビッグデータの融合、HPC と連携したシステム研究なども重要となるであろう。

一方、ICT の社会実装が加速され、人々の日々の生活により大きな影響を与えるようになればなるほど、情報の取り扱いにはより一層慎重な態度が求められるようになる。たとえば教育分野では、オンライン教育の普及により膨大な学習データが取得可能となってきた。学習効果をより向上させるために、学習履歴に加え、学習者の行動や健康状態のデータ(睡眠時間、血糖値等)なども統合してデータ解析を行うことが有効であることは容易に想像される。しかし、このようなシナリオには、未成年者の学習履歴のような機微な情報を秘匿すべきか、それとも限定的に共有すべきか等の丁寧な議論を避けては通れない課題がある。いわゆる ELSI の問題であり、情報分野と人文社会学との連携研究が不可欠と考えられる。

[喜連川優 (国立情報学研究所所長)]

3-2. 健康・医療・生命科学分野

(1) 本分野の対象

広義の生命科学には農林水産分野も含まれるが、科学技術の性格・問題解決手法に違いがあるため、本分野では人における健康・医療に特化して将来動向を調査することとした。しかし、100 を有に超える医学関連学会が存在することから容易に想像できるように、医療関連科学技術は極めて多岐・多様であり、すべてを網羅することは不可能である。そこで疾患とそれらを克服するため

の手段という構成とし、個別の疾患としてはアンメットニーズの高い精神・神経疾患、難病・希少疾患および新興・再興感染症を取り上げ、がんをはじめとするそのほかの疾患はコモンディーズとしてまとめた。

一方、疾患に対処する手段としては、生命科学基盤技術、健康・医療情報および疫学・ゲノム情報、再生医療、医療機器・技術、医薬、およびその他の細目を設けて調査すべきトピックを設定した。

結果として 171 件の設定となったが、これでも多様な医療領域を網羅することは不可能であり、多くの疾患を調査対象から外さざるを得なかった。従って、本予測調査の結果はモデルケースとしてとらえていただきたい。

(2) 結果の総括

総数 877 名から回答をいただき、回答者所属の内訳は大学・公的研究機関が 70%、製薬会社が 11%、医療機関が 8%、その他が 11%であった。医薬、医療機器・技術および生命科学基盤技術のトピックに対しては 30%を超える方から回答があった。回答者にとって親密度の高いトピックが多かったためと思われる。しかし、エボラ出血熱やデング熱の感染拡大が懸念されていた期間の調査にも関わらず、新興・再興感染症のトピックの回答者はもっとも低く 11%であったのは意外であった。

相対的な重要度および国際競争力比較では再生医療が最も高く評価された。iPS 細胞が日本発の技術であり、実用化の面でも再生網膜色素上皮細胞の移植が日本で最初に実施されことなどの点が大きく影響していると考えられる。先進的医療機器では欧米の後塵を拝していると思われているが、医療機器・技術の国際競争力は高いという評価であった。先進医療機器を日本の要素技術が支えていることおよび内視鏡等の一部の医療機器が世界の先頭を走っていることが本調査結果につながっているものと考えられる。日本企業が得意とするきめの細かい工夫を加えることによって、先進医療機器の日本製改良版が世界に普及していくことが期待される。重要度が高いとみなされた精神・神経疾患研究の国際競争力は必ずしも高くないという評価であった。これらの疾患は患者数が多く、深刻度も高いので、基礎研究および治療・創薬研究の両面からテコ入れが必要である。新興・再興感染症も重要度が高いと判定されたにも関わらず国際競争力が低いとみなされている。日本は衛生環境が整っており周囲を海に囲まれているため新興感染症の脅威にさらされる可能性が低い。国際交流がますます活発化することを考えると、リスク対策としての感染症研究・教育の充実が必要であろう。健康・医療情報および疫学・ゲノム情報は重要度スコア 3.1 であり決して低い評価ではないが健康・医療・生命科学分野内での重要度評価は相対的に低く、国際競争力も高くないとの評価であった。格段に複雑化してきている生命科学研究においては情報処理の高度化なくして発展は考えられない。意識改革、人材育成も含めて推進戦略の再考が必要であろう。

不確実性と非連続性がともに高いとみなされる細目として、精神・神経疾患、医薬および再生医療が挙げられた。このような性格の分野では柔軟性のある研究環境下での突出した着想によって突破口が開かれる事が多い。従って安易なトップダウン方式の選択と集中は避けるべきであり、起業が欧米ほど活発でない風土の日本では、官民ともにある程度広く薄い研究資源を増加させる別の

仕組み作りが必要であろう。

再生医療 17 件の全トピックが 2025 年までに技術的に実現し、13 件が 2025 年までに実装される
とした回答者が半数を超えた。しかしながら規制・倫理的側面・安全性・医療費等超えなければなら
ない課題が多いことを考えるとやや楽観的に過ぎる可能性もある。また、ある細目ではトピック設
定が全容解明といった包括的な設問が多く設定され、別の細目では極めて具体的な技術的設問
などが多く設定されるなど、細目間でトピック設定のされ方が異なっている点は、調査結果を判断
する上で注意を要すると考えられる。

(3) 今後の展望

生命科学研究は分子生物学的研究手法の確立およびヒトゲノム解読によって大いに発展したが、
まだまだブラックボックスの多い健康・医療・生命科学分野では、次なる革新的研究手法の開発お
よび膨大化する情報の活用による新たな展開が世界的に求められている。このような状況下で日
本においては以下のような施策が望まれる。

- ・幹細胞基盤研究の再生医療への応用展開
- ・精神・神経疾患に対する基礎、創薬、治療の面からの研究推進方策の見直し
- ・リスク対策としての感染症研究・教育の充実
- ・生命科学研究へ情報科学を取り入れるための人材育成
- ・強い要素技術力ときめ細かな気配りに基づく使いやすい先進医療機器の開発
- ・欧米でのベンチャー起業に代わる、裾野が広がった研究投資の仕組み創り
- ・トップダウンによる短期決戦型重点研究課題推進と独創的なシーズを育てる補助金型基金の充
実などバランスのとれた研究投資の仕組み作り

[小此木研二(大阪大学産学連携教授)、
高坂新一(国立精神・神経医療センター神経研究所所長)]

3-3. 農林水産・食品・バイオテクノロジー分野

(1) 本分野の対象

農林水産業は、食品産業側から見ると原材料が供給される産業という位置づけであり、バイオテ
クノロジーは農林水産業・食品産業はもとより、新しい医療、環境、エネルギー産業の発展にも大き
く貢献している。農林水産業の対象生物は代表的農作物・樹木・海藻などの植物、きのこなどの菌
類、乳酸菌・微細藻類などの細菌、家畜などの動物である。

さて、20 世紀の成功の裏で進行した環境負荷の増大、水資源の枯渇、土壌の塩類集積などが
世界各地で深刻な状況を生み出し続けている。このような状況を打破するための持続可能な農業
システムとして、環境保全型あるいは生態調和型農業、様々な形で ICT(センサネットワーク)を援
用するスマート農業などの実践が始まっている。また、現状の技術による食料増産では世界の更な
る人口増に対応できないとの予測から、農作物の戦略的育種技術の早急な確立が望まれている。
気候変動などに伴う露地栽培でのリスク対応として、水耕栽培を基本に清浄な環境下での農作物

の工学的生産システムにも期待が持たれているが、高コスト体質を考慮すると、生産立地は保存や流通コストが少ない大都市郊外の地域に限定せざるを得ないと考えられる。また、我が国は大量の穀物を輸入し、この穀物を飼料として家畜や家禽に与え嗜好性が高く高付加価値の動物性食品を生産し、流通させている。世界的な自由貿易の流れの中で増加しつつある畜肉の輸入も、大量の穀物消費の上に成立しているという事を踏まえた理解が必要である。

植物科学は世界のトップレベルにあり、モデル作物の開発を行う実験室レベルでの個別技術要素については蓄積が出来ているが、社会実装を目指した次の研究段階として、フィールドと実験室を効率的につなぐ研究システムの構築が必要である。また、個別の遺伝子レベルを超えて、遺伝子ネットワークの機能を理解し、それを品種開発につなげるためには、さらなる基礎的研究の積み上げが必要と考えられる。

気候変動の影響が顕在化する中で、森林の保全はこれまで以上に重要となっている。世界の森林面積は先進国では横ばいないし微増で推移しているのに対し、アフリカ、南米、東南アジアにおいては減少を続けており、熱帯林の保全と乾燥地帯等での森林の再生といった森林の多様な機能を的確に発揮させるための持続可能な森林システム整備が緊急の課題となっている。

21 世紀には、海洋を人類の食料生産の場として有効利用を図ることが極めて重要になると予想される。そのためには、自然環境を守るための保全を目的とした技術開発、そこに棲息する魚類・貝類・甲殻類・軟体動物などの資源管理を徹底する技術開発、そして人為的な魚介類の効率生産に向けた畜産的研究開発を国際的連携のもとで推進する方向性が求められる。特に近年の特徴としては、適正な資源管理を行い、持続可能な水産物の確保を図ろうとする技術開発が多く認められる。

21 世紀の日本の農林水産業の難しさは、国際的シナリオと国内的シナリオが必ずしも一致しないことであろう。世界人口の増加傾向とは異なり、日本の人口は減少し始めており、2050 年には中位推定で約 9500 万人の人口となり、2050 年から 2100 年までは 65 歳以上の高齢化率が約 40%で推移すると予測されている。農林水産業がコミュニティへの依存性が高い産業であることを考えると、実現可能で持続可能な農林水産業の地域性を重視する国内シナリオの設計が急務となっている。近年、農林水産業は食糧や食品の原料だけでなくエネルギーの原料を産出する産業としての側面も持ち始めているため、地域・食料・エネルギー・経済を要素とする地域経済モデルの構築とモデルを実践するための戦術・戦略が必要となっている。

人口が減少する地域社会で持続可能性を持つ農林水産業を実践するためには、医療費の増大に対抗しうる「食と健康」をキーワードに加工食品までを視野に入れた六次産業化、地産地消と再生可能エネルギーによる地域設計が求められる。特に、高齢化社会における生活の質の基盤となる「健康寿命の延伸」の重要性を考えると、生活習慣病の予防は、悪性新生物、糖尿病、高血圧性疾患、脳血管疾患をはじめ、健康寿命の延伸との関係もあり、個人の生活の質を保ち、結果として医療費削減に繋がることとなる。

一方、地域では再生可能エネルギー戦略の一環として、バイオマス利用による低炭素・循環型社会に向けた活発な技術開発が行われてきているが、旧来からの直接燃焼法やメタン発酵などを除き、新技術の日本社会への実装はいまだ限定的である。豊富な森林資源をもつ我が国でバイオマスの社会利用が進むためには、バイオマス資源の生産、広範囲に分布する資源の効率的収集・

供給、資源のエネルギーあるいはマテリアルへの変換、生産されたエネルギーやマテリアルの利用者への供給、およびその過程で生ずる廃棄物の利用・処理のすべてのプロセスについて効率的な技術が開発され、それら諸技術を統合したバイオマス利用システムがコストや内在する環境価値の面で社会に受け入れられる必要がある。

(2) 結果の総括

環境保全型農業、生態調和型農業を世界レベルで実現するためには、農業生産に伴う資源循環や生態系の変化をモニタリングするためのICTを活用した仕組み作りと、このモニタリング結果に基づき生態調和と環境の最適化を意識しつつエネルギー投入量のスマート化と農業生産量の最大化を実現する戦略構築が求められている。また、農作物の戦略的育種も不可欠な技術であり、植物の生育を制御する遺伝子基本ネットワーク、成長制御のシグナル伝達機構などの解明のための適切な施策と人材戦略が求められている。また加速度的に蓄積されるゲノム情報を作物開発に生かすには遺伝子組換え技術の実用化が重要とも考えられ、我が国の遺伝子組換え作物に対する社会的受容の困難さへの真摯な対応が求められる。

環境調和性の高い農業を実現させつつ、高品質・機能的農産物を安全に生産する技術の中で、生物学的方法で病虫害防除と作物の生育促進を目指す技術の重要性が高まることが予想される。年々激しさを増す気候変動リスク下での食料安全保障への対応として、気象予測を栽培管理に活用するICTがキーとなるが、このような新しい農業を実践するには、灌漑・排水のための基幹的農業水利施設の戦略的な維持管理・更新技術、および農業者の最適な栽培管理を実現する完全自動化にこだわらない適切な自動化・ロボット化も重要である。気候変動に伴い新規の病虫害の侵入リスクが高まり、人・物が容易に国境を越える今日、動植物の疾病防除技術は農業生産の維持に欠かせないものである。

バイオマスエネルギーやバイオケミカルズ利用の社会実装が期待されて久しいが、コスト面での障害を打破するブレークスルー技術が必要であり、酵素を用いたバイオマスの分解・発酵に関連する技術開発に期待が持たれる。木質バイオマス等の有効活用に関しては、木材を構成する主要な成分であるリグニンの高能率な有効活用技術開発、燃料利用面では合成燃料製造の高効率システム構築が必要となる。また、農山村地域における地産型バイオマス利用やバイオマス供給の実態に即した弾力的な対応を可能にするための新たな小型発電技術が期待される。さらにバイオマス利用技術の総合検討ツールの開発は早急に取り組むべき重要課題である。

森林管理に関しては、国際的視点では、熱帯林破壊防止と再生活動のための観測・評価技術が不可欠である。樹木が生育しにくい環境の拡大に対応するために世界レベルで進められているスーパー樹木の開発や、各国で進められている主要な商業利用樹種に関する遺伝的地域区分の把握技術への対応が必要である。さらに、獣害対策、マツ枯れ病の完全制圧、防災対応の森林管理技術などが重要課題である。人工林を有効に利用拡大していくことも重要で、林業労働を重筋労働から解放する飛躍的な技術開発と、その担い手の確保に加え、人工林の高林齢化に伴う伐採・搬出・加工の革新的技術、主伐後の再生産を確保するための森林造成技術の開発、さらに、木材の付加価値を高めるための技術開発が必要である。

水産資源の持続的管理技術開発は極めて重要であるが、確実性が低く進展する研究テーマを

除けば、研究開発における失敗の許容や複数手法の検討等の必要性や人材戦略が重要と考えられる。育種・生産に関しては、国際競争力の高いウナギの人工生産システム開発に大きな期待がもたれるが、一般的に育種技術開発では技術的実現及び社会実装に向けて内外の連携と協力が必要と思われる。環境保全面では、東日本大震災での原子力発電所事故現場からの拡散放射性物質の水産物汚染の関連で、複数手法の検討を伴う沿岸域における漁業の再生を図るための放射性物質除去技術は極めて重要である。

食品加工を重視する六次産業化の中で特に食品素材の高度生産技術が重視されている。人工光合成技術で生産される小分子量の有機化合物(酢酸、ギ酸、メタノール)を微生物と醗酵技術を用いて、より付加価値の高い食品素材(タンパク質や脂質といった栄養素)に変換することにより食品素材と食料の工場生産が可能となる。大都市近郊の工場空地を活用し、ICT を用いることで 24 時間無人での高効率な操業も可能となるため、高効率な工場生産を可能にするための、必要栄養素や有用物質を高品質で安価に生産する基盤的技術開発が求められる。流通・加工技術面では、我が国の魚介類で生まれた生体や低温での流通システムや高度な凍解凍技術、スリミ加工技術は世界をリードする水準であることと輸送コストを削減する観点から、収穫後も生きている野菜や果実などの植物性食材の品質を保持し短期間、食品内部の水を制御することができる新しい低温保蔵技術開発が重要視されている。

食品の安全に関わる問題は、安全管理に関わる問題、バイオテロとして取り扱う問題、食品情報の偽装など倫理に関わる問題に分けて考える必要があるとともに、安全が確保されても安心に必ずしも結びつかないという心理的な問題を含んでいる難しさがある。水産業と同様、拡散放射性物質の農産物汚染では、安全は確保されたものの安心に対する問題が完全に解決されていないため、その影響は食品の海外輸出においても重大な障壁となっている。これは日常的な食品の安全性に関する国の指導が徹底していないことに加え、問題が生じてから場あたりに急遽安全性情報を提供しても消費者の理解は得られないことを示唆している。一般に、食品の安全性の伝達では、食品の生産、保存、流通、加工の各段階でデータの透明性と合わせて消費者の科学的理解を高める施策が極めて重要である。食品の安全性に関する技術開発では早期の解決が求められるため、時間と費用が必要であることを考えると、新たな人材の養成と広汎な研究を支える施策の実施が求められる。

機能性食品面では、遺伝子の解析と改変操作技術の進歩により、食品原料となる農作物中の生理活性物質の含量を増大させることが可能となってきたことが重要である。このような農作物を作出し消費者個人の多様な生理的要求に適切に応えるには、基礎的な検討から生産や流通の体制、過剰摂取の防止策などを総合的に解決する必要がある。この技術は生活習慣病の予防や発症後の症状の改善に資するだけにとどまらず、日常の「生活の質」の向上につながることは言うまでもない。ヒトゲノム解析完了後、新規の機能性を有する食材を食生活に適切に組み込む検討も広汎に行われているが、両者が調和する様なガイドラインはないため、ビッグデータの活用を含め新規な研究展開が必須である。

農林水産業では、ICT を用いたさまざまなプラットフォームでのセンシング・モニタリング、衛星・UAV 等を用いたリモートセンシング、最先端の分光計測などによるキャノピーマネジメントのための近接場センシング、および植物工場・養殖工場の計測・制御技術などが必要となるため、他分野で

開発されつつある要素技術を組み合わせるシステムを構築し研究を行うことが重要である。また、地球規模でのセンシング・モニタリングシステム構築では、国際的に通じる理念と経済性に基づく国際連携体制の構築と国際プロジェクトが不可欠である。また、本分野でもビッグデータ解析が重要になることも予想されるが、データの持つ構造を重視するボトムアップ型でデータドリブンなデータベース設計と新たな解析手法の導入も必要となろう。

食品の健康・医療につながる情報では、「健康に資する食品」と「美味しさ」に関わる課題が重要である。食品と薬品とは本質的に役割が異なるため、食物の薬品化が進行している現状は好ましくなく、生産者に対する指導とともに科学的な栄養生理学的知見に基づいた食育の充実が求められる。また、現状での「美味しさ」研究に関しては、認知科学の知見を活かした官能評価の高度化が確実な方法であるため関連分野の総合的な基礎研究の高度化が必要である。

(3) 今後の展望

著しい経済発展を遂げつつある BRICS (ブラジル、ロシア、インド、中国、南アフリカ) などの穀物消費の増加により世界の食料需要が増加する一方で、穀物生産の伸びが鈍化し、食料安全保障が世界の重要課題となってきた。しかし、20世紀から続く世界の人口増に対し、2012年に人口のピークを迎え減少が始まっている日本では世界とは異なる食料安全保障戦略が求められている。本分野では、分野を構成する3つの要素(農林水産・食品・バイオテクノロジー)が有機的に連携され持続可能性を持ちながら、この分野が強化される戦略構築が必要である。

農薬や化学肥料の使用を抑え、自然生態系本来の力を利用して行う農業、すなわち持続可能な「環境保全型農業」が推進されている。我が国では、稲作を中心とする露地栽培では収量性よりも環境の保全や食の安全・安心および品質を重視した農業が展開されてきたが、今日、消費者あるいは食品産業側が求める農作物の品質設計を可能とする科学的農業への転換が必要となっている。野菜工場を含む施設栽培でさえも農産物の品質設計は現状不可能であり、生育環境・農作物・栽培管理用のセンサー開発と共に ICT を活用し、品質設計と高い生産性を可能にする「環境保全型農業」の構築が求められている。重要関連技術としての品種開発では、耐病性など単純な農業形質を支配する遺伝子の解明が進み、ゲノム育種による品種化が実現している。今後の対象は、環境耐性や収量性などの複数の遺伝子の相互作用による農業形質であるが、このような農業形質を正確に評価する技術開発も併せて必要であり、遺伝子発現情報など、いわゆるビッグデータの解析と合わせ、情報工学分野との連携が極めて重要である。

我が国では人口が減少し、地域コミュニティを健全な形で存続させることが重要課題となってきた。地産地消とバイオマスなど再生可能エネルギーの利用は地域保全にとって確かな方向であり、また資源の乏しい日本において、唯一豊富な森林資源と研究蓄積を活用した森林バイオマス利用は高い可能性を有している。その実現には、原料となるバイオマス資源の生産と供給から、バイオマスのエネルギーやバイオケミカルズへの変換と利用者への供給、及びその過程で生ずる廃棄物の処理・利用までのプロセスについて整合性を持つ技術開発とそれを統合する社会受容性の高い利用システムの構築が求められる。今後は、新規の技術開発及び既存技術の効率化・低コスト化とともに、それらを核とする利用システムについて、社会技術に照らして評価し社会実装試験に取り組むことがバイオマス利用の加速化に求められる。また、新しい日本農業やバイオマス利用

社会の創造には、先端科学を担う研究者のみならず、社会の抱える課題解決を担う研究者を育成する施策に加えて、一貫した政策のもとでの産・学・官連携の一層の強化が求められる。

森林バイオマスとも関係の深い我が国の林業について少し述べる。我が国においては、森林管理の粗放化の中で、適切な手入れがされていない森林、病虫害や獣害等を受けている森林が多く存在する。また、我が国の森林は木材生産という面での利用に乏しいが、木材利用が森林の整備に直結し地球温暖化の防止にも役立つことなどを考えると、成分利用を含め木材の全てを利用するとともに、エネルギー利用を含めカスケード型利用の視点に立つ木材生産の一層の拡大と関連する技術開発が必要である。

世界的に陸上での動・植物性タンパク質源の供給が増えない中、今後魚介類への依存を高めることは間違いないと考えられ、養殖生産量の増加を図るための育種技術の開発が不可欠である。また、天然の魚介類を持続的に安定生産するために海洋(河川・湖沼を含む)環境の保全と、資源管理技術を駆使した保全が必要となる。特に、水産資源の持続的利用のためには国際連携に基づく海域を特定した管理と公海上を含めた総合的な管理システムの構築が必須である。また、今後の海洋資源の保全と開発研究は単に我が国に資するだけでなく、世界の人口増加への対応を考える必要があるため、産官学の一致した水産・海洋に関する拠点形成(組織改編)を伴う重点化と財政的な支援が重要である。

食料や食品の高度生産では、土壌の有無に関わらない野菜工場などの生産システムや、海水魚介類の内陸養殖などが登場し、既存技術の高度化による農水産物生産基盤が大きく変わりつつある。大都会近郊にある海外移転した工場や跡地は少ない初期投資で野菜工場化することが可能であるため、戦略的な国レベルの対応が望まれる。我が国では食品の鮮度維持のために原料農産物と加工食品に対して保存、流通、加工の各段階で厳しい品質管理が求められる。このような中で創り上げられてきた様々な要素技術を総合的に統一し、最先端の分析技術と分子生物学的解析とを組み合わせれば、世界をリードする食品管理システムの構築が可能となるため、その実現に向けて、食品の生産、保存、流通、加工各プロセスでの費用対効果に応える共同研究の推進が必要と考えられる。安全・安心の面で GMO(遺伝子組み換え作物、Genetically Modified Organism)について触れておきたい。GMO が未知の毒性物質を産生する可能性については、実験動物による従来食体験のある非 GMO との比較実験で生物学的同等性が証明されることが認可の前提であるため、GMO の安全性に関わる論文の問題提起の取り扱いには政府などの公的機関による評価が極めて重要である。併せて、人口増加で食糧生産が頭打ちになる中で、GMO を含めより効率良く穀物に含まれるタンパク質を、我々にとって有用な動物性タンパク質に転換する畜産業の発展がより一層重要になると考えられる。

国民のタンパク質栄養状態を良好に維持することは、健康日本の礎であり高齢化進展の中で活動的な高齢者を支えることにつながる。ウシなどでは人工授精技術の一般化により嗜好性と価格の高い牛肉生産が行われているが、穀物を中心とした飼育の効率の高度化や畜産廃棄物の処理や高度な利用技術、トリインフルエンザ等の伝染性疾患の防御技術はワクチン等の開発が不十分であり、残念ながら患畜の全頭処分や輸入食肉の検疫などの水際の対応であり、より一層の技術開発が求められる。休耕田や耕作放棄地を活用して飼料用穀物の生産拡大を行うことが極めて重要と考えられるが、そのためには我国の気候風土に合致した生産性の高い作物の戦略的育種

とそのためのおミックス戦略および圃場を用いたフィールドフェノミクスセンターの創設は必須の条件となろう。

近年、機能的食品に関心が集まり、特定の食材を適切に摂取すれば症状に応じて一定程度の効用が期待されるため、有効成分を濃縮したサプリメントが大きな市場を形成している。しかし、消費者が目安量に基づいてサプリメントを食品として摂取し、用法用量は消費者の判断にまかしている現状は好ましい健康管理ではないと考えられる。個人レベルの健康に合わせて必要量だけが摂取出来るシステム構築と徹底した食生活の指導が行われるべきであり、薬物とサプリメントの併用での評価手法の確立が求められる。食の「美味しさ」に対する期待は極めて高く有史以来の希求課題でもあるが、現状では統一的に説明できる状況ではない。「美味しさ」に関しては、食由来の要素信号の脳内処理の仕組みの解明が先決課題であり、当面は官能評価データと補完的情報として機器分析データを持つデータベース構築が優先されるべきである。

まとめとして、地域社会の変遷予測と持続可能性に基づく食・農・環境・経済モデル構築とその実証拠点について触れる。それは、地域資源を活用しながら、再生可能エネルギーをベースに、モニタリングに基づき高度に最適化された環境保全型露地栽培や高度施設栽培を戦略的に組み合わせ、農林水産業の六次産業化をはかるようなスマートビレッジの実現である。また、このスマートビレッジを維持・管理するための地域独自のコーディネータ、アグリゲータ、ファシリテータなどの人材育成と、育成された人材が持続的に活躍できるシステム構築が求められる。

最後に、今回の調査では触れられなかった社会技術 (Science and Technology for Society) に触れておきたい。現実の実現可能なシステムを考える場合、資金をどのように調達するか、あるいは社会の人々にその導入の必要性をどのように伝えるか、が大きな課題となるため、自然科学と社会科学が融合して取り組む社会技術は極めて重要であり、総合的な実現可能性について理論的にアドバイスできる社会科学の専門家の育成が求められている。

[亀岡孝治(三重大大学生物資源学研究科教授)]

3-4. 宇宙・海洋・地球・科学基盤分野

(1) 本分野の対象

本分野では、基礎科学からイノベーションまで広く科学技術や社会の発展をもたらす基盤的な事項を扱っている。前回調査では、科学的探求及び社会応用の観点から、宇宙及び地球の諸現象を捉えるための科学技術を主に取り上げた。今回調査においては、科学技術の進展を下支えする技術と位置づけられる計測・解析技術、及び、計測・解析により得られる大量データの利用技術を検討範囲に加えた。これらの科学技術は、いくつかの分野で散発的に扱われてきていたが、独立した細目として明示的に取り上げることは大きな意味を持つ。

本分野の検討範囲に含まれる科学技術の多くは、多額の予算、大型装置・施設を要すること、多様な研究者が関与すること、手段あるいは結果の供用を前提としていること、といった特徴を持っている。科学技術イノベーションを支える基盤として、あるいは、産業界へのスピノフの可能性を持つ先端研究開発として、政府の関与が求められる分野と言える。

宇宙及び地球を対象とした探査・観測技術は、宇宙の進化や生命起源の探究など基礎科学の進展に寄与すると共に、地球環境や安全確保など社会の様々な課題解決に向けた展開の可能性を持ち、商業利用を想定しての研究開発の方向性も見られる。国際的な連携協力枠組みの下での活動や我が国の地理的特性に基づく先導的役割への期待など、国際的に相応の貢献が求められる領域でもある。

計測・解析技術については、従来捉えきれなかった現象の観察が可能となることにより新たな発見やアプローチがもたらされ、それが我が国の科学技術力や産業競争力の強化に繋がることが期待される。生み出される成果のみならず、装置・施設の開発自体も我が国の科学技術力を示すものとなる。

大量データの利用技術は、今後の科学技術発展や社会に大きな変革をもたらす可能性があることから、注目を集めている。計測・解析技術の発展に付随して推進すべき技術として、データベース構築やデータ統合などの基盤構築、及び、モデリングやシミュレーション技術が挙がる。データ保存・転送技術やハイパフォーマンスコンピューティングの進展も求められる。さらに、大量の非構造化データの活用も将来に向けて検討すべき事項である。

そこで今回調査では、従来から取り上げている宇宙・海洋・地球領域においては、基礎科学の進展の側面と共に、地球環境や防災等の社会課題を考慮した科学技術を取り上げた。計測・解析に関しては、産業界のイノベーションへの大きな寄与が見込まれるビーム応用、シミュレーション技術、及び、数理学・社会数理を新たに取り上げた。また、計測基盤として、新たな可能性を拓く光計測技術を取り上げた。設定した細目は、計 10 細目である。トピックの中には複数細目に跨がるものも存在するが、トピック設定の視点や回答しやすさ等を考慮し、いずれかの細目に属させた。

(2) 結果の総括及び今後の展望

本分野で取り上げたトピックについては、全般的に、重要度と国際競争力が高く、重要度が高いトピックは国際競争力も高いとの評価がなされた。また、不確実性や非連続性は相対的に低い、すなわち継続性が高いこと、また倫理面の考慮はあまり求められないことが示された。我が国の高い国際競争力は、過去の投資により世界有数の施設を保有し、最先端の研究を可能とする環境を備えていることと無関係ではないだろう。研究環境がすべてではないが、科学技術の世界に新たな展開をもたらすことは確かである。それが十分でない場合、研究の機会が大きく減じられ、その結果、国際競争力が高まらず、人材も育たないおそれがある。重点施策として「資源配分」が選択された割合が他分野と比べて高いことが本分野の特徴を端的に表している。当然資源の総額は限られており、すべてを満たす配分は不可能である。限られた資源を最大限有効に生かすため、いつ何を整備するべきか、国内外または産学官の連携・協力をどう進めるか等、戦略的な議論が求められる。

分野全体を概観すると、第一に、長期的視野に立った継続的な推進の必要性が挙げられる。独自開発であれ国際共同であれ、画期的な成果を生み出す装置・施設はその計画から稼働まで長期間を要するためである。また、自然の諸現象データはその時々でないと取得できないため、必要となった時点で取得体制が整っているか否かですべてが決まる。長期にわたる継続的なデータがあつて初めて意味を持つ例も少なくないことも忘れてはならない。早期の計画立案は、その必要性

が一般に認知されにくいことから、社会受容のための説明も求められよう。併せて、装置・施設などの稼働のため、あるいは得られたデータの加工のためのソフトウェア開発と人材育成も適時に着手する必要がある。

将来のニーズと科学技術発展や社会経済に与えるインパクトを想定し、さらに整備からその後の運用や維持管理まで含めたリソースを見越し、優先度の高い装置・施設等の整備に向けた適時の取り組みが求められる。人材も、短期的な成果に着目するのではなく、長期的視点での育成が必要となる。

第二に、基盤としての認識の明確化と分野を超えた一体的推進のための検討の必要性も挙げられる。本分野で扱う科学技術は横断的な技術であり、応用先の分野の知見を取り入れることによって社会実装への展開につながると考えられる。こうした基盤的な領域は社会実装の観点からの議論の流れの中では見過ごされやすいが、意識して明確に位置づけていく必要がある。

[土肥義治(公益財団法人高輝度光科学研究センター理事長)]

3-5. 環境・資源・エネルギー分野

(1) 本分野の対象及び結果の総括

東日本大震災以降、エネルギーおよび環境分野は大きな政策転換を余儀なくされている。また京都議定書に次ぐ新たな地球温暖化問題への対応など、我が国の国際社会への対応は、各国からも注目を浴びている。そのような中、今回取り上げたトピックを俯瞰すると、資源配分を確実に進めることにより、おのおのの技術発展が確実にされるような結果が多く見られる傾向となった。一方で、重要性が高く、不確実性、あるいは非連続性の高いトピックとしては、地球温暖化、リスクマネジメント、資源に属するトピックが多く取り上げられた。これらのトピックの解決のためには、ブレークスルーが必要であり、積極的な研究開発が極めて重要である。

我が国はエネルギー自給率が極めて低く、安全・安心社会の実現のためにエネルギー生産の技術開発は重要な課題と言える。しかし、技術的に新旧の組み合わせと革新を要するものまで幅が広い。いずれも実現のためには、事業採算性をクリアする必要がある。将来を見据えた長期展望に立った政策的支援が必要な分野と言える。エネルギー消費に関しては、エネルギー利用のマネジメントに加え地球温暖化対応の視点も重要である。ICT、ソフトウェア、電池技術、内燃機関など種々の技術の連携と、一体化したシステム開発体制の構築が必要である。

地球温暖化に関する技術としては、激甚気象災害の発生機構解明、ゲリラ豪雨予測、地球温暖化の定量的モデル、温室効果ガス削減排出削減対策と選択手法、化石燃料を使用しない船舶・飛行機の開発、気候変動による食糧生産の予測が重要である。社会科学分野の研究課題を含み、非連続性は低い。

資源に関する技術として、海洋鉱物資源の採鉱、揚鉱技術、深海底金属資源の経済的採取技術、メタンハイドレート採掘利用技術、環境汚染のないシェールガス採掘技術が重要である。エネルギー流通・変換・貯蔵・輸送に関する技術として、新規の水素貯蔵材料技術、一次エネルギー源が変化しても有効に活用するための技術可能性の追求が必要である。さらに、エネルギー生産

技術としての核融合発電の重要性も指摘された。

リサイクル・リユースに関しては、重点施策等は際立った項目がないが、あえて言うならば、内外連携が必要であるという回答割合が比較的高い。社会実装に向けては、社会システムとしての取り組みが必要となるため、地域主体の形成や市民合意等の社会受容性を高める仕組みが重要である。そして放射性廃棄物処理、レアメタルに関する人材不足が懸念されている。

水は、連続的に進化していく技術で国際連携等に配慮し進めていくことが、世界のビジネスを先導していく上で重要とされる。

リスクマネジメント技術として、化学物質リスク管理・低減技術、低線量放射線リスクに関する合意形成手法が重要である。

(2) 今後の展望

我が国では高度経済成長とともに発生した大気汚染を改善するための技術開発が発達し、いまや世界でトップクラスを誇るが、一方で隣国中国からのPM2.5問題など、新たな問題への対応が迫られている。そしてグローバル社会の進展とともに日常生活を取り巻く多様なリスク、例えば国外からの外来種の侵入と移動拡散、生態系の多様性と機能、そして持続可能社会を具現化するためのスマート都市システム的设计などについても、2020年のオリンピックを契機に今後新たな展開が重要となってくるであろう。

[矢部彰(独立行政法人産業技術総合研究所理事)]

3-6. マテリアル・デバイス・プロセス分野

(1) 本分野の対象

マテリアル・デバイス・プロセス分野は、ICT、環境・エネルギー、ライフサイエンス、インフラ等に関わる社会課題解決のための分野横断的な基幹科学技術分野であり、細目はそのコアとなる「新しい物質・材料・機能の創製」、「アドバンスド・マニュファクチャリング」、ツールとなる「モデリング・シミュレーション」、「先端材料・デバイスの計測・解析手法」、応用となる「応用デバイス・システム(ICT・ナノテク分野)」、「応用デバイス・システム(環境・エネルギー分野)」、「応用デバイス・システム(インフラ分野)」の7つから構成され、分野の基礎から応用までが体系的にカバーされた。当分野は全体的に日本が国際的に強い分野であり、当分野の今後を、本調査を通して予測することは、日本の科学技術の発展と国際的な優位性、産業の競争力や持続可能社会の実現を検討する上で極めて重要である。今回の調査ではそれを意識し、それぞれの細目に対応する計92トピックを取り上げたが、その中にはデジタルファブ리케이션やインフォマティクスなどの当分野の最近のトピックも盛り込んでいる。なお本調査では、ターゲットが比較的明確な医療・バイオ等への応用に関しては他分野(健康・医療、バイオ等)で扱うこととトピックを設けていない。

(2) 結果の総括

総数672名から回答を得たが、今回からWebを通じた調査となったため、前回と比較して回答者

の年齢層に変化が見られた。回答者で最も多かったのは30代で全体の39%、次いで40代の28%であるのに対し、前回回答者が最も多かった50代は19%に留まった。したがって今回の結果は比較的若手の意見が強く反映されているといえる。また回答者の所属は学術機関が最も多く58%、職業は大部分が研究開発で86%であったが、これらは他分野と比較しても高く、当分野は学術機関の研究者の意見が相対的に多く含まれているといえる。

結果を概括すると、先ず重要度や国際競争力に関しては、ICT・ナノテク、環境・エネルギー、インフラの各分野に対応する「応用デバイス・システム」のトピック群が、コアおよびツールに関わるトピック群より相対的に重要度が高く、かつ国際競争力も高いと評価されており、我が国の強みを活かす今後の重点化の方向を示すものと考えられる。特に、二次電池、太陽電池、燃料電池に関するトピック、ならびに高性能かつ低消費電力のLSIやメモリーに関わるトピックが重要と評価されているが、その多くは環境・エネルギーに関する社会課題解決に直結したトピック群である。また、ツールとなる「モデリング・シミュレーション」は、重要度は高かったが、国際競争力は低いと評価されたトピックが多く、強化が必要と考えられる。

多くのトピックが、2025年までに技術的实现、2030年までに社会実装、リードタイムは5年程度との予測であったが、マニュファクチャリングや計測・解析手法などは実現・実装の時期がそれよりやや早まる予測であった。技術实现を促すためには、「新しい物質・材料・機能の創製」、「モデリング・シミュレーション」、「先端材料・デバイスの計測・解析手法」では人材戦略が重要であり、応用デバイス・システムの各分野（ICT・ナノテク分野、環境・エネルギー分野、インフラ分野）、ならびに「アドバンスト・マニュファクチャリング」では人材戦略と共に資源配分も重要であることが指摘された。社会実装を促すためには、いずれのトピック群も総じて資源配分が重要であるとされているが、「モデリング・シミュレーション」では、技術实现、社会実装、いずれにおいても人材戦略が重要とする割合が突出して高く、強化の方向性を明確に示している。実際、トピックの多くが、人材戦略が必要なトピックの上位を占めた。また「新しい物質・材料・機能の創製」や「アドバンスト・マニュファクチャリング」では内外の連携・協力が必要との評価も多く、技術の広がりや標準化のための連携・協力の必要性を示している。他方、害虫駆除や再生臓器などは倫理性とともに社会実装における環境整備の必要性が指摘された。室温超電導材料や人工的核変換装置などの革新的な材料や技術の開発は実現の不確実性・非連続性が高いと評価された。

(3) 今後の展望

マテリアル・デバイス・プロセス分野は、我が国の科学技術や産業競争力の基盤を担う基幹分野であり、これまで日本の強みを発揮してきた分野であるが、今回の調査を通して今後の重点化の方向性について示唆が得られた。

エネルギー変換や貯蔵に関連するデバイス・システム、高性能で低消費電力型の情報処理や記憶に関連するデバイス・システムなどの研究開発は、持続可能社会や高度情報社会に対応する技術開発として必要性の認識が高く、今後も重点化を継続する必要がある。同時にこれらの研究開発はナノテクノロジーを駆使した材料、デバイス開発を基盤としており、日本の国際競争力の維持・強化の上でも重要である。なお今回の調査で重要度の評価は、トピックごとに示された目標数値にも負うところもあり、言い換えれば、今後の研究開発でも適切なターゲットの設定が重要である。

また、その実現には、性能向上が限界に近い現行の材料から更に高度の性能を有する新たな材料への転換が必須であり、「新しい物質・材料・機能の創製」の基礎研究とは不可分の関係にある。有機半導体やグラフェン、室温超電導材料などはその一例である。今回の調査では「新しい物質・材料・機能の創製」の重要性は必ずしも明示的でないが、重要度の高いトピックの実現を継続的に可能にするためにも基礎・応用にまたがる適切な人材戦略と資源配分が重要である。

「モデリング・シミュレーション」の研究開発の重点化も今後重要である。新たな研究開発や技術開発において対象となる物質・材料の数は近年飛躍的に増えており、従来の試行錯誤的な研究開発から脱却してマルチフィジックス・マルチスケールの高度なシミュレーションを援用した高効率な研究開発が必要である。実際、世界ではその流れの中で高度な計算とデータを融合したマテリアル・インフォマティクスや ICME (Integrated Computational Materials Engineering) が極めて活発に検討されており、米国の MGI (Materials Genome Initiative) もその代表的なものである。今回の調査でも重要性は評価されたが、同時に我が国の競争力は低く、今後の人材戦略が必須との指摘がなされた。このことから、我が国として今後、モデリングやシミュレーションを十分に活用して物質・材料創製やデバイス・システムの創製を加速するために、人材戦略を中心としたこの分野の充実と競争力強化を図る必要がある。

また、モデリングやシミュレーションに加えて、研究開発の実現を加速するためには高度な計測・解析手法の開発も極めて重要である。さらに研究開発の実現ルートの多様化や社会実装に向けてはアドバンスド・マニュファクチャリング技術の確立も重要である。

なお、研究開発を進める上で、人材戦略や資源配分と共に、トピックによっては内外との連携・協力や、倫理性への配慮が必要なトピックもあることに留意する必要がある。前者は、標準化が必要な技術課題や非続性や不確実性の高いチャレンジングな課題に関わるもので、複数の研究者や研究機関の連携によってその達成が加速される可能性があり、そういった連携・協力体制作りが重要である。また後者はバイオテクノロジーを用いたデバイスやプロセスに関わるもので、倫理性への配慮と共に、それらが理解・承認される環境整備も重要である。

マテリアル・デバイス・プロセス分野は、ICT、環境・エネルギー、ライフサイエンス、インフラ等に関わる社会課題解決のための分野横断的な基幹科学技術分野であり、今回の調査を活かした研究開発の重点化や、その実現の加速に向けた適切な人材戦略や資源配分、連携協力体制の構築などが望まれる。さらにそれらを通して次世代を担う当分野の人材育成が継続的に行われることも重要であることを併せて付記する。

[小関敏彦(東京大学副学長、工学系研究科教授)]

3-7. 社会基盤分野

(1) 本分野の対象

急激な人口減少と少子高齢化が進み、経験したことのない規模の災害が多発している。一方、国際競争が厳しさを増すなかで、我が国は高度経済成長の外挿から大きく下方修正された経済の安定成長期にある。また、人々の価値観の多様化が進み、合意の形成が困難になってきている。

このような状況下で、安全で安心で、活力のある豊かな社会を支える社会基盤の形成における科学技術の役割はますます高まっている。時間的、空間的規模が大きく、顕在化していない課題への対応をも求められる本分野の科学技術の重点化に当たっては、トピックの研究開発の特性の理解とそれに基づく重点化方針が重要となる。

本調査では、まず、社会基盤に関連する省庁の重点施策をクラスタリングして、マッピングすることにより、「作る」、「メンテナンス」、「次世代インフラ」、「レジリエンス」の4つに概念整理した。その上で、過去のトピックや新規トピックをクラスタリングすることによって、7細目、93件を設定した。

(2) 結果の総括及び今後の展望

これらのトピックに対するアンケート調査を実施して、30～60代を中心に、特定の年代に偏ることなく、500名あまりの有効回答を得た。分野全体を俯瞰すると以下の特徴が見出される。

研究開発の特性として、重要度と国際競争力の評価を直行する軸に取り、各トピックの評価結果をプロットすると、細目間の相対的な位置関係を理解することができる。例えば、「インフラ保守・メンテナンス」の細目のトピックはいずれも、重要度と国際競争力が高く評価されており、「防災・減災情報」の細目にもこの2点の評価が高いトピックが多く含まれている。「車・鉄道・船舶・航空」の細目では、重要度の評価はトピックによって広く分布しているが、国際競争力の面では他の細目のトピックと比較して高い値を示している。ただしその中でも、航空に関するトピックは重要度が高いのが特徴である。防災・減災に関して情報関連のトピックと技術関連のトピックを比較すると、重要度と国際競争力の双方で情報関連のトピックの多くが高く評価されているのに対して、技術関連のトピックは双方が相関を持ちながら幅広く分布している。このようなマッピングをもとにした相互比較によって、各トピックの成熟度、新規性、社会の変化との関連性、ニーズと現状レベルのギャップなど、トピックの特性を理解し、施策の時間軸(継続的、短期重点的)や規模の指針や、トピック間の連携による総合化の推進などに活かすべきである。

施策の重点化に関しては、すべての細目の共通事項として、技術実現を導くには資源配分が、また社会実装には資源配分に加えて環境整備が、それぞれ重要と評価されている。人材戦略、資源配分、内外の連携・協力、環境整備のそれぞれの施策を重視すべきと評価されるトピックは、細目を超えて、また技術実現と社会実装において、異なっている。ただし、技術実現に関しては防災・減災の分野で人材戦略や資源配分が、社会実装に関しては国際協調に関する分野で人材戦略や環境整備が重要という結果が読み取れる。このような特性を抽出することによって、メタなレベルで施策の重点化を包括的に考えていくことが肝要であろう。

また重点化すべき施策と技術実現時期の関係の特徴としては、2020年代前半に技術実現が見込まれるトピックでは、社会実装のための環境整備が重視されている。一方、2020年代後半に技術実現が見込まれるトピックは、技術実現のための人材戦略と社会実装のための内外の連携・協力の重要性が強調されている。このように、科学技術の成熟度、達成感に応じて、重点施策を適応させていく工夫が必要となる。

[小池俊雄(東京大学工学系研究科教授)]

3-8. サービス化社会分野

(1) 本分野の対象

競争力の高い高度な科学技術が、必ずしも付加価値が高く市場性の大きい製品に繋がるわけではない。最終顧客にとって過剰性能な製品になり、基本機能を同じくする低価格商品に取って代わられてしまったりする。このような社会情勢の中で、モノの構造や機能を高度化して価値提供するという考え方から、モノが使用される時点で提供者と使用者が相互に協力しながら価値を創造するという考え方への転換が求められている。これは、製品の高付加価値化や市場創成という産業領域だけでなく、高齢化や地域過疎化などの社会問題解決のための公的事業にも通じることである。このような背景の中、新たにサービス化社会分野が設定された。製造業がサービス化し PSS を目指す社会、さらには、さまざまな事業活動がサービス学を基盤として設計、運用され、持続的に価値を生産できる社会の実現を指向している。ここでは、このような社会を産み出すために求められる科学技術・学術研究について、その技術動向と国際競争力を見極め、社会問題解決のためにどのように研究資源を投入すべきか、その成果がどの時期に社会実装されていくかを調査した。本稿では、調査結果から、サービス化社会分野全体の位置付けと方向性について俯瞰する。

(2) 結果の総括及び今後の展望

サービス化社会分野は、経営学や経済学などの人文社会系を含む分野であることを特徴とする。顧客接点階層の科学技術、製品・サービス設計というマネジメント階層での方法論、それらの基盤としての理論的基礎研究があり、研究階層間の相互連成が求められる点も、この分野の特徴であると考えている。他分野の調査結果と比較した場合、サービス化社会分野は、回答者数がやや少ない。これは、新分野であって、成熟した大きな学術団体に支えられているわけではないことにも起因している。年齢層や大学、企業、公的機関の比率などは他分野とほとんど変わらない。

他分野と比較した場合、重要度が高いとされたトピックの数が相対的に少ない。冒頭に記述した通りサービス化社会分野は、日本の社会変革を指向するものであり、それ自体の重要性が低いと言うことは考えにくい。重要性が低いという結果は、そのような社会変革の意義は認めた上で、その変革に科学技術がいかに貢献できるかが明瞭ではない点にあると思われる。また、サービス化社会分野の研究は、その国際競争力が低いという結果になっている。これは、研究層の薄さ、研究が文理に分かれ個別に進められている現状、政府系の研究資金が十分ではなく、また民間企業もサービス設計や運用のための科学技術に十分な資金投入をしていないことが遠因と考えている。関係する著名国際会議での発表件数などを見る限り、この分野の研究者個人の研究能力が乏しいわけではない。さらに、サービス化社会分野のトピックについては、その実現について、不確実性が高く、また、非連続性が求められるという調査結果が得られている。加えて、倫理的観点においても、同分野は非常にハードルが高い研究領域であるという結果になっている。サービス化社会は、サービスを通じてさまざまな個人の行動情報や環境情報が収集され、連結されてビッグデータとして分析され、新しい知識を構成していく社会である。このような社会は、個人情報保護や、サービス介入による行動操作という観点において科学技術が正しく運用されない場合の倫理的リスクを内包している。工学系だけで、この分野の研究を推し進めるべきではない理由がここにも存在する。

このような調査結果を俯瞰すると、サービス化社会分野の大きな方向性が伺える。第一は、文系と工学系に分かれ、個別分散的に進められている国内研究の連携を深め、文理融合でなければ解決し得ない大きな社会的課題に取り組む研究を推進することである。すでに、北欧やドイツでは、公的研究機関(VTT や Fraunhofer)に工学系の研究者とともに経営学や社会学を専門とする研究者が常勤職員として雇用され融合的な研究が進められている。大学や研究機関の人事採用の硬直化を解消するとともに、学会などで文理融合型の研究を推進していくことが必要であろう。第二は、実装を担う社会側の意識改革である。社会をサービス化する担い手は研究者だけでなく、それを利用し実装する実社会側のパートナー(産業、地域行政)との連携が不可欠である。パートナーによる研究資源の提供だけでなく、パートナー自身がサービス化への高い意識を持つことが求められる。その上で、顧客接点階層として競争力のあるセンシングやロボットをマネジメント階層と連携させ、PSS としてデザインし、ビジネスとしてマネジメントするような研究課題に取り組んでいくべきである。そのサービスを通じて蓄積される情報について知識マネジメントが用いられ、その知識が再びサービスの高度化設計や生産性向上に環流する。これらが個別に進められるのではなく、社会実装を目標とする具体的なプロジェクトとして文理、産学連携で推進することが、この分野の研究ポテンシャルを高め、国際認知を高めることに繋がる。これらのプロジェクト指向型研究の基盤として、サービス理論、アナリティクスなどの基礎的研究を進め、新しい理論的パラダイムの変換を目指す。このような戦略的な研究活動と社会実装実績によって初めて、当該分野の科学技術がサービス化社会への変革に不可欠のものと社会認知され、その重要性が理解されることになろう。それが、倫理的ハードルが高く、非連続性、不確実性が高いこの分野に果敢に挑戦する研究者を増やし、層を厚くしていく。

サービス化社会分野のトピックの多くは、他の分野に比べ、研究開発の実現年が近い将来に設定され、かつ、研究開発から社会実装実現までのスパンが短い傾向があった。研究課題の難しさや倫理的ハードルの高さは、相反する結果のようでもある。環境・エネルギー分野にも似たような短期化の傾向が見られることから、サービス化社会で解決しなければならない課題の多くが永く待つことのできない喫緊の課題であることを意味していると考えている。文理融合、産学連携によって、サービス化社会をいち早く産み出すことが求められている。

[持丸正明(独立行政法人産業技術総合研究所サービス工学研究センター長)]