

ほらいずん

未来につながるクローズアップ科学技術領域

－ AI 関連技術とエキスパートジャッジを組み合わせた抽出－

科学技術予測センター 特別研究員 蒲生 秀典、第 2 調査研究グループ 上席研究官 小柴 等

科学技術予測センター 上席研究官 重茂 浩美

【概要】

第 11 回科学技術予測調査の一環として実施したデルファイ調査において選定された科学技術トピックを基に、科学技術イノベーション政策の観点から取り上げるべきクローズアップ科学技術領域について分野を超えた複合的な観点から抽出した。科学技術 7 分野において選定された 702 の科学技術トピックについて、AI 関連技術（自然言語処理と階層的クラスタリング分析）を活用し、32 の科学技術トピッククラスターを抽出した。その結果と専門家による評価（エキスパートジャッジ）を組み合わせることにより、分野横断・融合のポテンシャルの高い 8 領域と特定分野に軸足を置く 8 領域を抽出した。

キーワード：科学技術予測，科学技術トピック，科学技術領域，人工知能（AI），分野横断・融合

1. はじめに

科学技術・学術政策研究所（NISTEP）では、科学技術予測調査を将来に向けた科学技術の発展の方向性を検討する大規模調査として 1971 年より約 5 年ごとに実施している。2017 年から 2020 年にかけて実施中の第 11 回科学技術予測調査では、我が国の科学技術イノベーション政策に資することを目的に、2050 年までを展望した科学技術の未来像と社会の未来像の、両面からの検討を進めている^{1~3)}。

一方、新たな未来を切り拓き、種々の課題を解決していくための科学技術イノベーションが世界的に推進される中で、複数の学問分野を横断・融合する科学技術領域が改めて注目されている。その理由の一つとして、世界的な地球環境問題、人口動態変化への対応、エネルギー・食料・資源の確保など、これまでに専門化、細分化を進行させてきた学問だけでは対処しきれない社会的課題が顕在化し、それらの解決が必要とされていることが挙げられる。また、最先端計測技術と高度情報処理技術との融合により、これまで捉え

られなかった物理現象や生物現象を明らかにすることも可能になりつつあるなど科学的課題の解決や、異分野間の知的な触発や融合による新たな知の創造が期待されていることも、分野横断・融合領域が注目される理由の一つである。

こうした背景をふまえ、第 11 回科学技術予測調査の一環として、科学技術の未来像をより分野横断・融合的な観点から検討するため、2018~2019 年に実施したデルファイ調査³⁾ 注¹⁾ において科学技術 7 分野の専門家によって選定された全 702 の科学技術トピックを基に、科学技術イノベーション政策の観点から取り上げるべき 16 のクローズアップ科学技術領域を抽出した。その手法として、近年進展が著しい AI 関連技術^{注²⁾} と専門家による評価（エキスパートジャッジ）とを組み合わせることが特徴である。

本稿では、このクローズアップ領域抽出の概要について記す。なお、手法並びに抽出過程、領域の詳細、及び領域抽出の基となった 702 の科学技術トピックについては、詳細を記した報告書⁴⁾ を参照いただきたい。

注 1 多数の人に同一内容の質問を複数回繰り返し、回答者の意見を取れんさせるアンケート手法。

注 2 ここでは、メディア等で AI として語られることの多い機械学習と自然言語処理を中心とした人工知能及び関連技術を指す。

2. クローズアップ科学技術領域の抽出方法

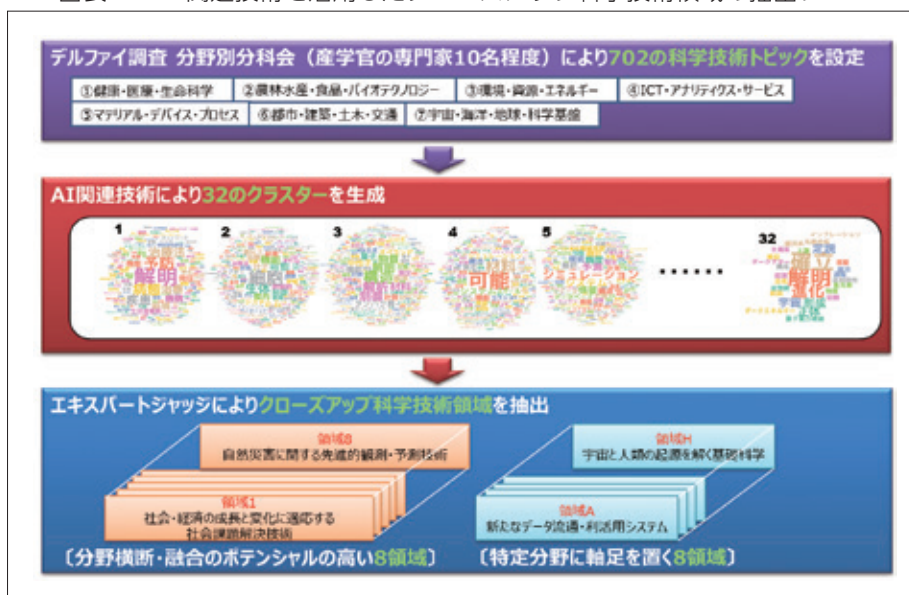
クローズアップ科学技術領域の抽出には、デルファイ調査で選定した科学技術トピックを基礎データとして用いた。デルファイ調査では科学技術7分野を設定し、分野ごとに設置した産学官の専門家（各分野10名程度、計74名）からなる分科会での検討を経て、2050年までを見据えた研究開発課題として702の科学技術トピックを選定した^{3,4)}。7分野は、①健康・医療・生命科学、②農林水産・食品・バイオテクノロジー、③環境・資源・エネルギー、④ICT・アナリティクス・サービス、⑤マテリアル・デバイス・プロセス、⑥都市・建築・土木・交通、⑦宇宙・海洋・地球・科学基盤である。これら702の科学技術トピックの中で、表現が類似するトピック群を科学的技術的に関連するものとみなし、科学技術トピッククラスターとしてグループ化を行った。続いて、この科学技術トピッククラスターの定量的・定性的分析を行い、エキスパートジャッジによりクローズアップ科

学技術領域を抽出した（図表1）。クローズアップ科学技術領域は、分野横断・融合のポテンシャルの高い領域を主対象とし、加えて、個別分野の精緻化・先鋭化による新たな領域創出の可能性があることも考慮し、特定分野に軸足を置く領域も対象とした。

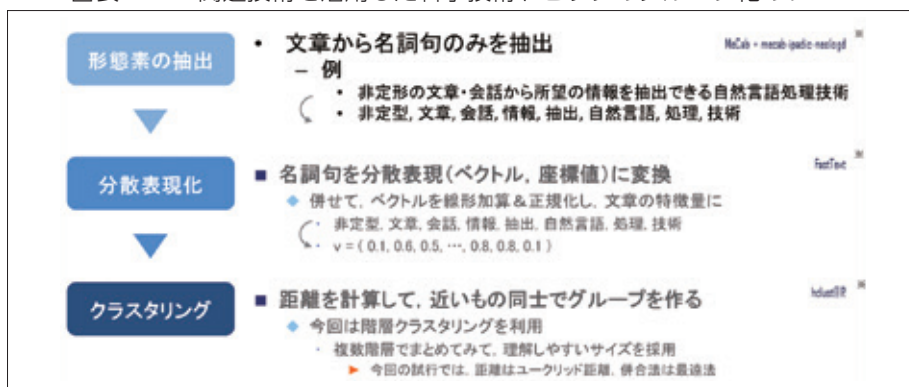
2-1 AI 関連技術を活用した科学技術トピックのグループ化（科学技術トピッククラスターの生成）

科学技術トピックのグループ化の流れを図表2に示す。はじめに、702科学技術トピックを形態素（意味を持つ最小単位）に分割し、それぞれの品詞等を判別して名詞句のみを抽出した（科学技術トピックの記述例は、図表5及び図表8を参照）。次に、これらの名詞句に基づいて科学技術トピックのベクトル化を行った。ここでは、大規模なデータセットを用いて別途算出しておいた300次元の単語分散表現をベースに、各名詞句の分散表現を線形加算した総和を正規化して各トピックの特徴量（ベクトル）とした⁵⁾。この科学技術トピックの特徴量に対して、階層的クラス

図表1 AI 関連技術を活用したクローズアップ科学技術領域の抽出フロー



図表2 AI 関連技術を活用した科学技術トピックのグループ化のフロー



*使用したソフトウェア、アルゴリズム

ター分析（最遠隣法、ユークリッド距離）を適用し、類似するトピックをグループ化した。階層的クラスター分析のクラスター数については、2、4、8、16、32、64、128 など複数のレベルで分割し、それぞれのレベルで人間の解釈の容易性や意味的妥当性などを考慮して 32 分割を採用し、結果として 32 の科学技術トピッククラスターを生成した。また、クラスターごとに科学技術トピックについて名詞句の出現数をカウントし、出現数と文字の大きさを対応づけたワードクラウドとして出力し可視化した（ワードクラウドは、図表 3 及び図表 6 を参照）。

2-2 科学技術トピッククラスターを基にしたクローズアップ科学技術領域の抽出

AI 関連技術により機械的に生成した 32 の科学技術トピッククラスターについて、それぞれのクラスターに属する科学技術トピックを専門家の視点で分析し^{注3}、下記の指針に基づいて内容が近似するクラスターを統合するなどの再構築を行った。

- ✓ デルファイ調査の少なくとも 2 分野以上の科学技術トピックを 10 程度以上含み、分野横断・融合のポテンシャルが高いと考えられる科学技術領域を主対象とする。
- ✓ デルファイ調査の 1 ないし 2 分野のトピックを 10 程度以上含む領域は、特定分野に軸足を置く科学技術領域として考慮する。
- ✓ 科学的・社会的課題を解決する上で重要な科学技術領域を対象とする。
- ✓ 科学技術領域全体を見た上でのバランスを考慮する。

最終的に、分野横断・融合のポテンシャルの高いクローズアップ科学技術 8 領域と、特定分野に軸足を置くクローズアップ科学技術 8 領域を抽出した。これら計 16 のクローズアップ科学技術領域に名称と概要を付与するとともに、領域ごとに代表的な科学技術トピック（10 程度）を選定した。

3. クローズアップ科学技術領域の概要

3-1 分野横断・融合のポテンシャルの高いクローズアップ科学技術領域

先に述べた手法により、デルファイ調査における 7 分野のうち、複数の分野の科学技術トピック群から構成

される、分野横断・融合のポテンシャルの高い科学技術 8 領域を抽出した。その全体像を図表 3 に、それぞれの領域名、概要、科学技術トピック数を図表 4 に示す。

AI 関連技術によりクラスターを生成した結果、頻出ワード“社会”“システム”を中心とする社会課題解決技術関連（領域 1）、サーキュラーエコノミー・モニタリング・評価・予測関連（領域 6、7）、自然災害・観測・予測関連（領域 8）など、デルファイ調査で設定した分野を超えて「人間・社会」あるいは「地球・環境」に関係する、幅広い社会課題に対応した領域が抽出された。例えば最も多くの科学技術トピックを有する、領域 1「社会・経済の成長と変化に適応する社会課題解決技術」では、複雑な社会現象をモデル化・シミュレーションすることにより理解し、現象の制御につなげる、情報処理技術と数理科学的アプローチが中核となる。図表 5 に一例として領域 1 の主要となる科学技術トピックリストを示す。

また、“構造・解析”、“シミュレーション”を頻出ワードとする計測・情報科学ツール関連（領域 3）、バイオモニタリング・バイオエンジニアリング関連（領域 2）、材料・システム創成関連（領域 4）、電子・量子デバイス関連（領域 5）など、基礎科学・基盤技術から応用・実用まで幅広い分野に及び科学技術トピックから構成される「基盤的科学技術（基盤 S&T）」からなる領域が抽出された。これらは、共通基盤技術あるいはプラットフォームとして、今後顕在化しうる社会課題解決にとどまらず、将来の経済・社会に大きな影響を及ぼす、新たな価値創造を担う科学技術領域として位置づけられる。

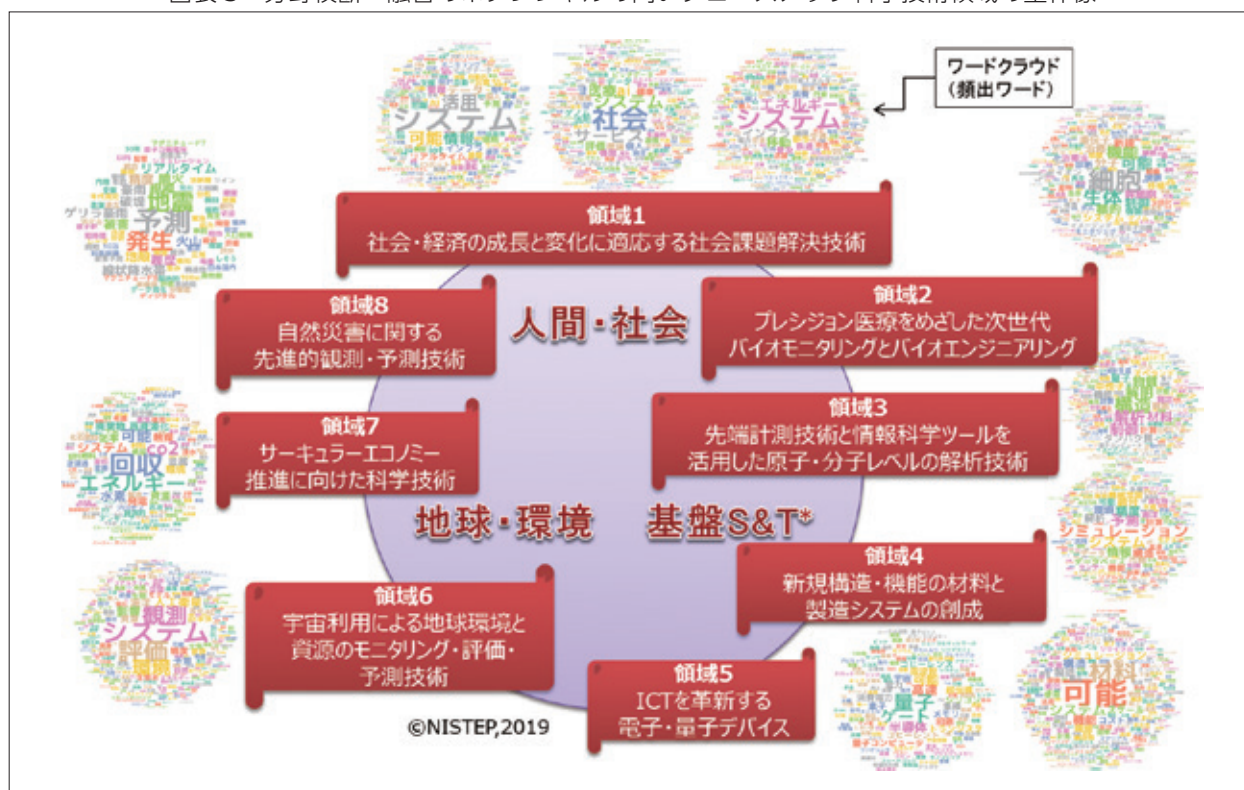
3-2 特定分野に軸足を置くクローズアップ科学技術領域

続いて、デルファイ調査における 1 又は 2 分野程度の主要な科学技術トピックから構成される、特定領域に軸足を置く科学技術 8 領域を抽出した。その全体像を図表 6 に、それぞれの領域名、概要、科学技術トピック数を図表 7 に示す。

これらの特定領域に軸足を置く領域は、デルファイ調査の各分野において将来に向け特に重要視された科学技術の方向性として捉えられる。ICT・アナリティクス・サービス分野を中心とする、“情報”“ロボット”“通信”が頻出ワードとなる「情報・サービス」関連が最も多く、データシステム（領域 A）、ロボット技術（領域 B）、次世代通信（領域 C）の 3 領域が抽出された。また、「社会・産業・生活インフラ」

注 3 デルファイ調査 7 分野ごとに設置した分科会の座長で構成される専門家会合を、2019 年 2 月 28 日及び 3 月 5 日に開催し議論した。

図表 3 分野横断・融合のポテンシャルの高いクローズアップ科学技術領域の全体像



*S&T : Science and Technology

図表 4 分野横断・融合のポテンシャルの高いクローズアップ科学技術 8 領域の概要

領域 No.	領域名	概要	トピック数
1	社会・経済の成長と変化に適応する社会課題解決技術	社会的インフラストラクチャー、都市建築空間、教育、医療、金融などの多様な社会的共通資本のサービス・ソリューションに向けた AI、IoT、量子コンピューティング、ELSI (倫理的・法的・社会的課題) 対応、認知科学・行動経済学など、複雑な社会現象 (ラージ・ソーシャルコンプレックスシステムズ) が抱える課題を解決する科学技術領域	152
2	プレシジョン医療*をめざした次世代バイオモニタリングとバイオエンジニアリング	完全非侵襲・高感度・高精細・リアルタイムモニタリングにより、人の個体から組織・臓器、細胞、分子レベルにわたり生命現象を捉えることで、バイオエンジニアリングによる再生・細胞医療や次世代ゲノム編集技術による遺伝子治療のような高度医療の技術開発につなぐ科学技術領域	53
3	先端計測技術と情報科学ツールを活用した原子・分子レベルの解析技術	量子ビーム応用などの先端計測や、シミュレーション・インフォマティクス・AI などの情報科学ツールを活用した、構造・機能材料、高分子、生体分子などの構造や状態の解析・解明・予測、農作物や医薬品の開発・品質管理に関する科学技術領域	89
4	新規構造・機能の材料と製造システムの創成	材料から構造物、環境、医療に関わる要素技術まで生活環境向上に寄与する、シミュレーションとデータ活用による材料の構造・物性予測や、材料・デバイスの実用化のための先進製造・流通システムやコスト低減に関する科学技術領域	87
5	ICTを革新する電子・量子デバイス	ICT革新に寄与する、高速・高密度・低消費電力の電子・情報デバイス、高効率パワーデバイス、高コヒーレンス量子デバイス (量子コンピューティング・センシング) に関する科学技術領域	19
6	宇宙利用による地球環境と資源のモニタリング・評価・予測技術	地球環境・資源を地上や人工衛星から複合的にモニタリング・評価し、数理モデルで予測することにより、人間活動がもたらす地球環境の変化や自然災害への対処、エネルギー、地下・海洋資源や農林水産資源の探索に寄与する科学技術領域	70
7	サーキュラーエコノミー推進に向けた科学技術	資源の循環と持続可能な生産に向けた、CO ₂ や廃棄物の再資源化技術、バイオマス利用技術、高レベル放射性廃棄物処理技術、レアメタルの回収・利用技術、環境循環の中での有害化学物質等の管理技術に関する科学技術領域	52
8	自然災害に関する先進的観測・予測技術	豪雨や地震・火山噴火等の自然災害とそれらが及ぼす被害の先進的観測・予測技術と防災・減災技術、及び山地や海岸線等の国土変化予測による国土保全、長期的な環境保全・維持管理を統合した河道設計等に関する科学技術領域	22

*遺伝子、環境、ライフスタイルに関する個人ごとの違いを考慮した疾病の予防・治療

関連として、ヒューマンエラー防止 (領域 D)、ライフコース・ヘルスケア (領域 E)、農林水産業システム (領域 F)、エネルギー技術 (領域 G) が抽出された。さらに、基礎科学として宇宙と人類の起源 (領域 H) が抽出された。例えば、近年非常に社会ニーズ

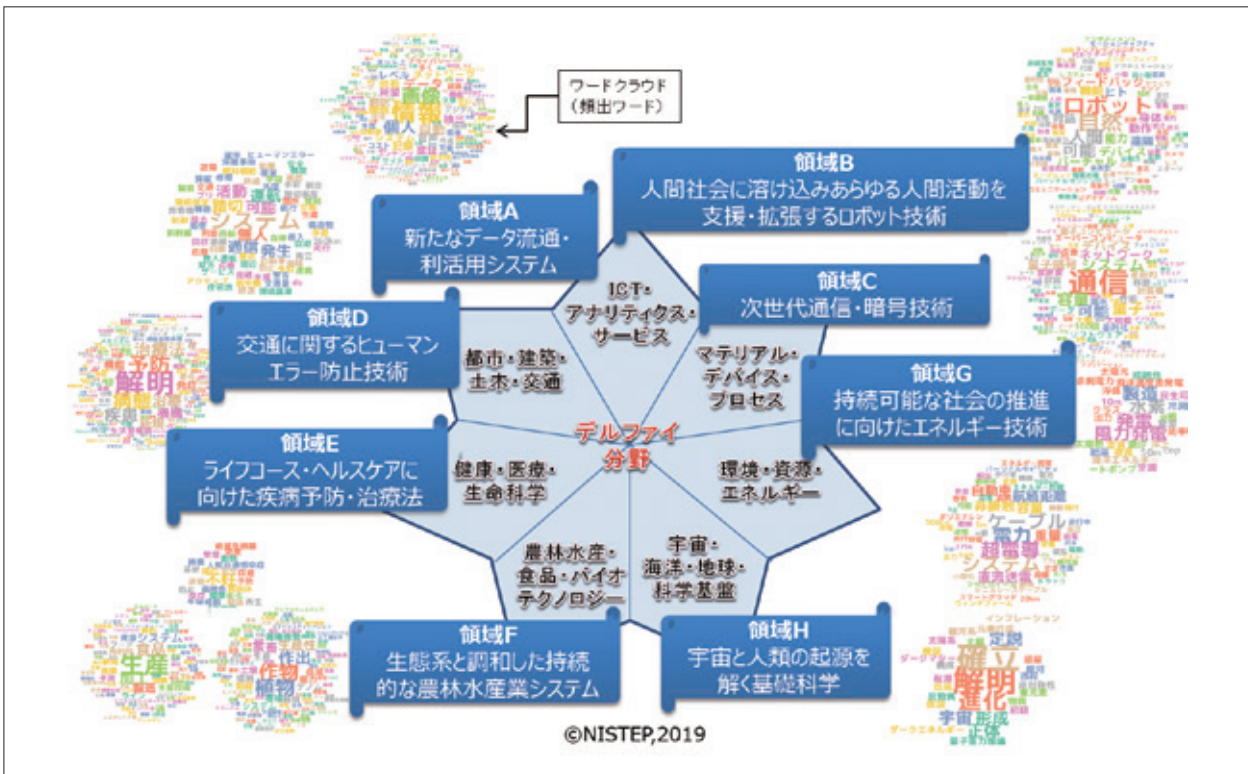
が高まっている領域 D「交通に関するヒューマンエラー防止技術」は、人間に代わり認知、判断、操作を行う技術であり、移動体ごとに要素技術や技術的難易度は異なるが、全般的には位置情報の特定、障害物の認識、危険判断・予知などの高度な情報処理機能

図表 5 主要となる科学技術トピックリスト（領域 1 の例）

〔領域 1〕 社会・経済の成長と変化に適応する社会課題解決技術

デルファイ調査の分野名	主な科学技術トピック
ICT・アナリティクス・サービス	<p>社会基盤としてブロックチェーンが広く用いられたときに最適なコンピュータアーキテクチャ</p> <p>モノとの二分論によるサービスの定義が完全に過去のものとなり、個人や社会に対して価値をもたらす行為全般との認識が浸透した上での、Service Dominant Logic などをより発展させた新理論</p> <p>法規制のもたらす社会・経済的インパクトの推定を可能とする、個人や集団が置かれている状況把握のリアルタイム化を含む、適切な助言やリスクの提示を行うシステム（政策助言システム、高度医療助言システムなどを含む）</p> <p>社会実装前のサービスシステムを、経済的・技術的・社会的な観点から、定性的/定量的にシミュレーションする技術</p> <p>教育に AI・ブロックチェーンが導入され、学校法人の枠を超えた学習スタイルが構築され、生涯スキルアップ社会の実現</p> <p>すべての国民が IT リテラシーを身につけることによる、誰もがデジタル化の便益を享受できるインクルーシブな社会の実現と IT 人材不足の解消</p>
健康・医療・生命科学	<p>プレジジョン医療の実現や医療の質向上に資する、IC チップが組み込まれた保険証等による病歴、薬歴、個人ゲノム情報の管理システム</p>
農林水産・食品・バイオテクノロジー	<p>フィールドオミックス、フェノミックスなどから得られたビッグデータと AI による育種の超高速化（テラーメイド）</p>
環境・資源・エネルギー	<p>情報技術（IoT、AI、ビッグデータ等）を用いた暑熱リスクのリアルタイム監視・警報システム</p>
都市・建築・土木・交通	<p>フィジカル・サイバー空間のシームレス結合によるインフラのモニタリング、予測、制御技術</p>

図表 6 特定分野に軸足を置くクローズアップ科学技術領域の全体像



や走行制御技術などから構成される。図表 8 に一例として領域 D の主要となる科学技術トピックリストを示す。

4. 今後に向けて

AI 関連技術による機械的なデータ処理とエキスパートジャッジとを組み合わせることにより、科学技術イノベーション政策の観点から、今後推進すべきと考えられる 16 のクローズアップ科学技術領域を抽出した。近年、社会の様々な場面で活用が検討されて

いる AI 関連技術を、科学技術領域の抽出に活用を試みた。その結果、社会システムや資源循環、災害関連など社会的側面からのクラスターや、融合・基盤技術に関する科学技術的側面からのクラスターが的確に生成され、エキスパートジャッジを加えることで、社会的・科学的課題解決あるいは新たな価値創造に関わる各領域を抽出することができた。

今後、分野横断・融合のポテンシャルの高いクローズアップ科学技術 8 領域と特定分野に軸足を置くクローズアップ科学技術 8 領域の各領域について、デルファイ調査において科学技術の専門家に

図表 7 特定分野に軸足を置くクローズアップ科学技術 8 領域の概要

領域 No.	名称	概要	トピック数
A	新たなデータ流通・利活用システム	産業・医療・教育に係るデータ、個人情報や研究データといった多種多様で大量の情報を、適正かつ効果的に収集・共有・分析・活用するための科学技術領域	21
B	人間社会に溶け込みあらゆる人間活動を支援・拡張するロボット技術	人間社会に溶け込み、ものづくり・サービス、医療・介護、農林水産業、建設、災害対応などの多様な社会・産業活動や、運動・記憶などの個人の能力を自然な形で支援・拡張するロボットに関する科学技術領域	12
C	次世代通信・暗号技術	光・量子通信と量子暗号に代表される、超高速・超大容量、超長距離・超広帯域、超低遅延・超低消費電力、多数同時接続、かつセキュリティの高い通信に関する科学技術領域	20
D	交通に関するヒューマンエラー防止技術	鉄道、船舶、航空機での無人運転・運航・操縦に代表される、陸・海・空の各運輸モードでのヒューマンエラーを防止するための支援技術・システムに関する科学技術領域	8
E	ライフコース・ヘルスケアに向けた疾病予防・治療法	人の発達過程における環境と疾病との関係性の解明、老化・機能低下のメカニズム解明やその制御、加齢性疾患の予防・診断・治療法開発など、人の胎児期から乳幼児期、就学期、就労期、高齢期までを連続的に捉えた生涯保健に関する科学技術領域	29
F	生態系と調和した持続的な農林水産業システム	動植物、微生物、環境、人間の相互作用（生態系）に着目した、農林水産業における生産性や品質の向上と効率化、環境への負荷低減や生産環境の保全、遺伝資源の保存と利用のための資源管理などに基づく新しい持続的生産システムの構築に関する科学技術領域	40
G	持続可能な社会の推進に向けたエネルギー技術	エネルギー源の多様化によるエネルギー安全保障の強化や低炭素社会を実現する、太陽光・風力発電などの再生可能エネルギー技術や直流送電システム、超伝導技術、ワイアレス給電技術などの次世代電力ネットワークに関する科学技術領域	15
H	宇宙と人類の起源を解く基礎科学	太陽系・銀河系の形成、軽元素・重元素合成の進化過程、ダークマター・ダークエネルギーの正体、量子重力理論、インフレーション仮説等、宇宙の謎の解明、定説の確立など、宇宙と人類の起源に関する科学技術領域	8

図表 8 主要となる科学技術トピックリスト（領域 D の例）

〔領域 D〕 交通に関するヒューマンエラー防止技術

デルファイ調査の分野名	主な科学技術トピック
都市・建築・土木・交通	自律航行可能な無人運航船舶
	航空機と航空管制の双方による高精度運航システムを用いて、現在の倍程度の交通量を安全に管制できる運航技術に基づく、ヒューマンエラー発生確率よりも故障確率が小さい無人操縦旅客機
	踏切等、外部から人が立ち入り可能な箇所がある路線における鉄道の無人運転
	踏切への列車接近を周辺の自動車に通信し、自動で踏切侵入を防止するシステム（自動車との通信による踏切事故防止）
	転覆・衝突・座礁などの海難事故の発生を半減させるための危険予知・警告・回避システム

対して実施した Web アンケート結果（科学技術トピックごとの重要度、国際競争力、実現可能性、技術的及び社会的実現時期等）³⁾ と併せて、将来社会に向けた科学技術の貢献と、その実現のために取り組むべき重要科学技術等について検討を加える予定である。

謝辞

本稿執筆に当たり、第 11 回科学技術予測調査デルファイ調査分野別分科会の座長及び専門家の方々には、クローズアップ科学技術領域抽出に多大な御協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献・資料

- 1) 赤池伸一、「科学技術予測の半世紀と第 11 回科学技術予測調査に向けて」；文部科学省 科学技術・学術政策研究所 STI Horizon 2018. Vol.4 No.2 : <http://doi.org/10.15108/stih.00130>
- 2) 横尾淑子、赤池伸一、「ST Foresight 2019 (速報版) の概要—人間性の再興・再考による柔軟な社会を目指して—」；文部科学省 科学技術・学術政策研究所 STI Horizon 2019. Vol.5 No.3: <https://doi.org/10.15108/stih.00185> (2019 年 9 月)
- 3) 科学技術・学術政策研究所 科学技術予測センター、「第 11 回科学技術予測調査 ST Foresight 2019(速報版)」(2019 年 7 月) : <http://doi.org/10.15108/stfc.foresight11.101>
- 4) 重茂浩美、蒲生秀典、小柴等、「第 11 回科学技術予測調査 [3-1] 未来につなぐクローズアップ科学技術領域—AI 関連技術とエキスパートジャッジの組み合わせによる抽出の試み—」, 文部科学省 科学技術・学術政策研究所 DISCUSSION PAPER No.172 (2019 年 7 月) : <http://doi.org/10.15108/dp172>
- 5) 小柴等、森川想、村木志穂、議事録を用いた議会・行政の関係性分析手法, 人工知能学会 SIG-SAI, 2018-11-22 : <http://id.nii.ac.jp/1004/00009604/>