

概要

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、分野横断・融合領域は科学的課題の解決にもつながり、例えば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。さらに、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。

こうした背景をふまえ、本調査研究では、科学技術予測調査の一環として2018～2019年に実施したデルファイ調査(科学技術の未来像の検討)で選定した702科学技術トピックを基にして、科学技術イノベーション政策の観点から大きく取り上げるべきクローズアップ科学技術領域の抽出を試みた。このクローズアップ領域は、上記のような分野横断・融合のポテンシャルの高い領域を主対象とするが(あくまで科学技術トピックに基づき領域を形成しており、分野を横断・融合する領域である)ことを直接示していないため、そのポテンシャルの高い領域を主対象とするが(あくまで科学技術トピックに基づき領域を形成しており、分野を横断・融合する領域と位置づける)、個別分野の精緻化・先鋭化による新たな技術領域創出の可能性を考慮して、特定分野に軸足を置く領域も対象としている。

本調査研究では、近年進展が著しいAI関連技術*と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。エキスパートジャッジによるクローズアップ科学技術領域の抽出に先立ち、702科学技術トピックに対して、AI関連技術を活用した自然言語処理(分散表現化)と階層的クラスタリング分析を行い、トピックをグループ化した。ここで行った自然言語処理には独自の工夫があり、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(ベクトル)をベースにした。

上記のアプローチを言い換えれば、702科学技術トピックの中で、類似する単語が出現するトピックは意味的・科学技術的に関連するものとみなし、それらトピック群をグループ化して科学技術クラスターを形成したことになる。この科学技術トピッククラスターを定量・定性分析した後、専門家会合でのエキスパートジャッジにより、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領域の計16のクローズアップ科学技術領域を抽出した。専門家の目視のみに依存し、702の科学技術トピック全体を見渡してクローズアップ領域を抽出することは困難性が高いと考えられたため、AI関連技術とエキスパートジャッジとを組み合わせることがクローズアップ領域の抽出につながった。

クローズアップ領域のうち、最も多くの分野に関わり、かつ最も多くの科学技術トピックを有する領域として「社会・経済の成長と変化に適応する社会課題解決技術」が挙げられる。この領域は、情報科学と数理科学の連携・融合による複雑な社会現象(ラージ・ソーシャルコンプレックスシステムズ)が抱える課題への対応であり、Society5.0の進展を促す技術を含む領域として注目される。特

定分野に軸足を置く領域の例では、我が国において近年非常に社会ニーズが高まっている領域「交通に関するヒューマンエラー防止技術」が挙げられる。

なお付録(Appendix)にて、16 のクローズアップ科学技術領域毎に名称、概要、領域の基になった科学技術トピッククラスターのワードクラウド、科学技術トピックをまとめたので参考にされたい。

※AI 関連技術: 本調査研究では、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および関連技術を指す。

1. クローズアップ科学技術領域の抽出

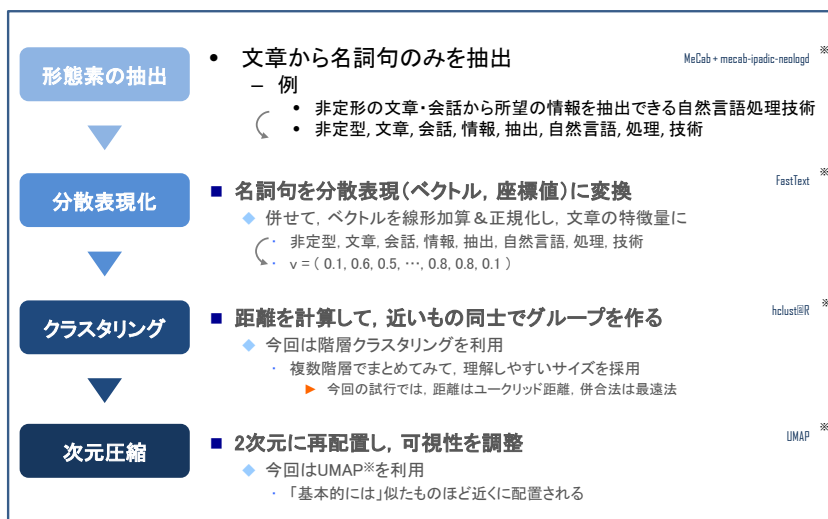
クローズアップ科学技術領域の基になったのは、2018～2019 年実施のデルファイ調査で選定した 702 科学技術トピックである(2019 年 2 月に実施した第 1 回アンケート調査にて公表済)。このデルファイ調査では 7 分野を設定し、2050 年までを見据えた研究開発課題として科学技術トピックを選定した。7 分野は以下の通りで、①健康・医療・生命科学、②農林水産・食品・バイオテクノロジー、③環境・資源・エネルギー、④ICT・アナリティクス・サービス、⑤マテリアル・デバイス・プロセス、⑥都市・建築・土木・交通、⑦宇宙・海洋・地球・科学基盤である。

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意味的・科学技術的に関連するものとみなしてグループ化し(科学技術トピッククラスターの形成、以下 1.1)、この科学技術トピッククラスターの定量・定性分析を行い(以下 1.2)、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(以下 1.3)。

1.1 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形成)

以下に、科学技術トピックのグループ化の流れを示す。

概要図表 1 科学技術トピックのグループ化の流れ



※使用したソフトウェア、アルゴリズム

初めに、科学技術トピックに対して形態素解析(文章を、意味を持つ最小単位に分解)を用いた名詞句の抽出を行った。具体的には、日本語の形態素解析ソフトウェアの中で多用されている

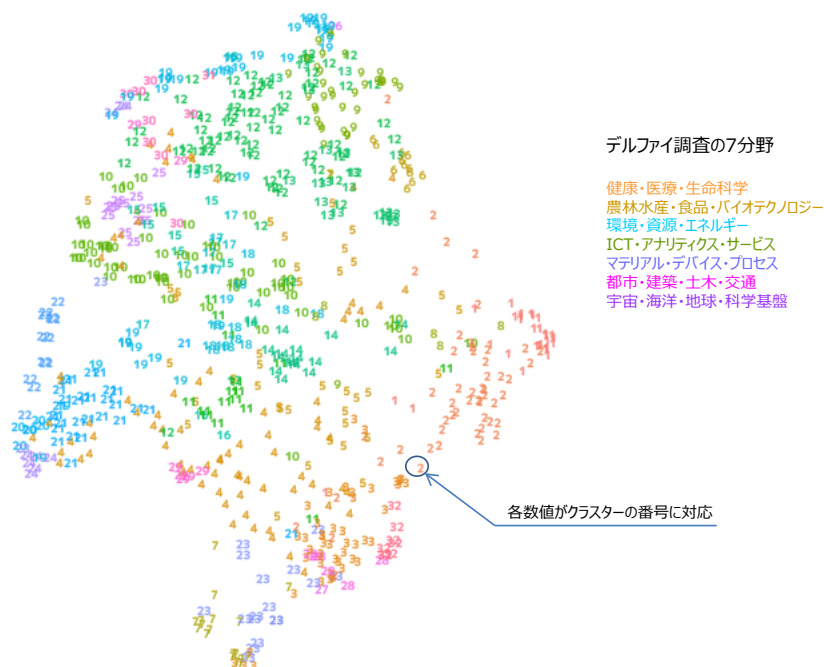
MeCab と辞書の mecab-ipadic-NEologd を用いて、702 科学技術トピックを形態素に分割し、それぞれの品詞等を判別して名詞句のみを抽出した(概要図表 1 の「形態素の解析」)。

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(ベクトル)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(概要図表 1 の「分散表現化」)。

上記の科学技術トピックの特徴量に対して、階層的クラスタ分析(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。クラスタ間の類似度を定義する方法(距離の定義方法)として最近隣法、最遠隣法、重心法、群平均法、メディアン法、McQuitty 法、Ward 法という 7 つの手法を試行し、樹形図でのクラスタの偏りの程度と、実際につくられたクラスタが分野横断的であるか否かを目視で確認した上で最遠隣法を採用した。階層的クラスタ分析のクラスタ数については、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 分類を採用し、結果として 32 の科学技術トピッククラスタを形成した(概要図表 1 の「クラスタリング」)。

最後に、上記の結果を可視化した。まず、702 科学技術トピックと 32 科学技術トピッククラスタのマッピングのために次元圧縮を行った。前述の通り科学技術トピックの特徴量は 300 次元のベクトルであるため、UMAP(UMAP:Uniform Manifold Approximation and Projection for Dimension Reduction)を用いて次元圧縮して 2 次元に変換した(概要図表 1 の「次元圧縮」)。その結果を概要図表 2 に示す。

概要図表 2 32 科学技術トピッククラスタと 702 科学技術トピックのマッピング



※使用したソフトウェア、アルゴリズム : FastText, umap
300次元でクラスタリング等の作業後、可視化のため2次元に圧縮しているため、一部入り交じっているように見えることに留意。

次に各科学技術クラスターの特徴を示すための可視化を行った。これについては、クラスター単位で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た。

1.2 科学技術トピッククラスターの定量・定性分析

32 の科学技術トピッククラスターの特徴を示すために、クラスターの定量・定性的分析を目視で行った。具体的には、科学技術トピックの数と、そのトピックが属する分野の数を定量的に分析した。また定性分析として、科学技術トピッククラスターの特徴を示すための名称を暫定的に付与した。

1.3 エキスパートジャッジによる科学技術トピッククラスターからのクローズアップ科学技術領域の抽出

デルファイ調査の7つの分野毎に設置した分科会の座長から構成される専門家会合を開催した(2019年2月28日及び3月5日)。

専門家会合では、まず科学技術トピッククラスターからクローズアップ科学技術領域を抽出する上での指針を策定した。その指針は以下の通りである。

- ▶ 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。一方、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
- ▶ 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
- ▶ 科学技術領域全体を見た上でのバランスを考慮

上記の指針、1.1と1.2の結果、エキスパートジャッジの組み合わせにより、各科学技術トピッククラスターの妥当性を評価し、内容が近似するクラスターを適宜統合するなどの再構築を行い、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領域を抽出した。加えて、特定分野に軸足を置くクローズアップ科学技術8領域も抽出した。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共に、領域毎に代表的な科学技術トピック10程度をとりまとめた。

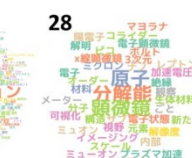

2. クローズアップ科学技術領域の概要

2.1 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

8つの領域の名称と概要、領域の基になった科学技術トピッククラスターとそのワードクラウドを概要図表3に示す。

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例として、ここでは領域1「社会・経済の成長と変化に適応する社会課題解決技術」を取り上げる。この科学技術領域は最も多くの科学技術トピックを有し、かつ多くの分野に関わる領域である。この科学技術領域での社会課題解決技術とは、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一連の流れを指しており、情報処理技術と数理科学的アプローチが中核となる。

概要図表 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 8 領域の名称と概要

領域 No.	名称		トピック 数
	クラスターNo. & ワードクラウド	概要	
1	社会・経済の成長と変化に適応する社会課題解決技術		152
	※1 9  12  19 	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	
2	プレジジョン医療※2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		53
	2 	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	
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		89
	3  5  28 	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	
4	新規構造・機能の材料と製造システムの創成		87
	4  29 	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	
5	ICT を革新する電子・量子デバイス		19
	23 	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	
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		70
	10  22 	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	

7	サーキュラーエコノミー推進に向けた科学技術	52
		資源の循環と持続可能な生産に向けた、CO2 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
8	自然災害に関する先進的観測・予測技術	22
		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、およ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

※1:各ワードクラウドの番号は、32の科学技術トピッククラスターの番号に相当。各科学技術トピッククラスターの詳細は、本編の図表6「32科学技術トピッククラスター一覧」を参照のこと。

※2: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。







2.2 特定分野に軸足を置くクローズアップ科学技術領域

8つの領域の名称と概要、領域の基になった科学技術トピッククラスターとそのワードクラウドを概要図表4に示す。

特定分野に軸足を置くクローズアップ科学領域の例として、ここでは我が国において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」を挙げる。この技術は、人間に代わり認知、判断、操作を行う技術であり、移動体毎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や走行制御技術などから構成される。

概要図表4 特定分野に軸足を置くクローズアップ科学技術8領域の名称と概要

領域 No.	名称		トピック 数
	クラスターNo. & ワードクラウド	概要	
A	新たなデータ流通・利活用システム		21
		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	
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		12
		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	

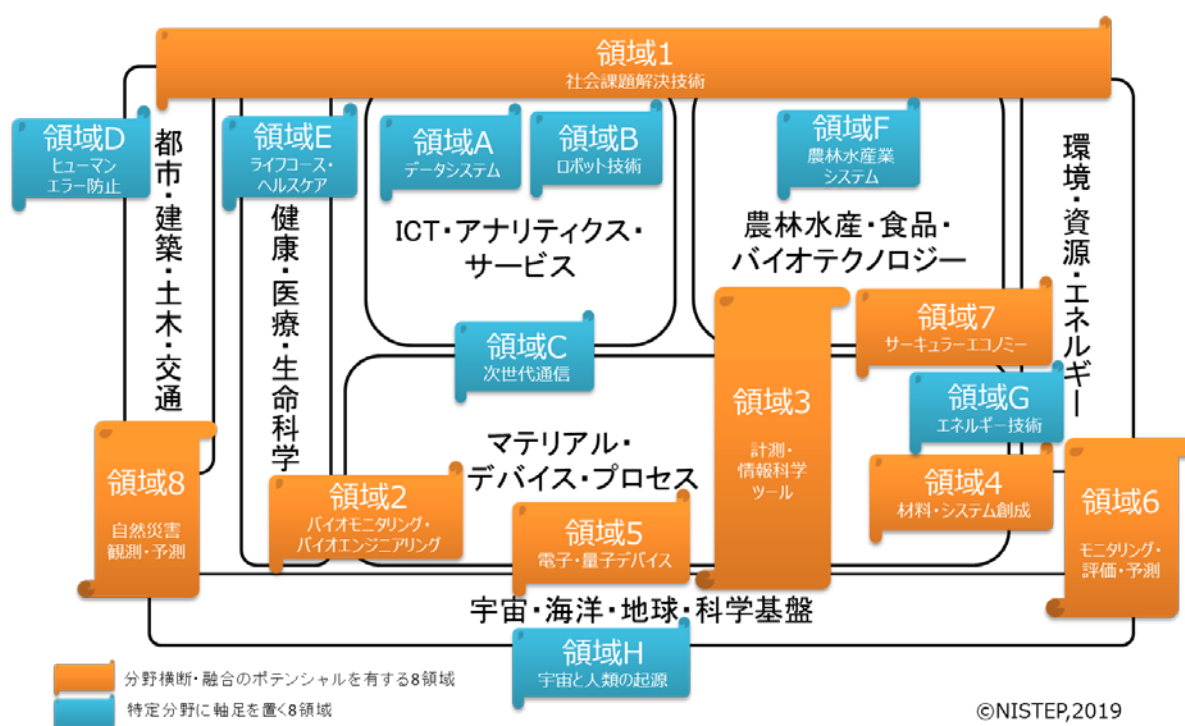
C	次世代通信・暗号技術 7 	光・量子通信と量子暗号に代表される、超高速・超大容量、超長距離・超広帯域、超低遅延・超低消費電力、多数同時接続、かつセキュリティの高い通信に関する科学技術領域	20
D	交通に関するヒューマンエラー防止技術 30 	鉄道、船舶、航空機での無人運転・運航・操縦に代表される、陸・海・空の各運輸モードでのヒューマンエラーを防止するための支援技術・システムに関する科学技術領域	8
E	ライフコース・ヘルスケアに向けた疾病予防・治療法 1 	人の発達過程における環境と疾病との関係性の解明、老化・機能低下のメカニズム解明やその制御、加齢性疾患の予防・診断・治療法開発など、人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とら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 8 11 14 	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 20 24 	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 32 	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

※各ワードクラウドの番号は、32の科学技術トピッククラスターの番号に相当。各科学技術トピッククラスターの詳細は、本編の図表6「32科学技術トピッククラスター一覧」を参照のこと。

3. 抽出されたクローズアップ領域とデルファイ調査における7分野との関係

分野横断・融合のポテンシャルの高い8領域(概要図表5のオレンジの領域)は、デルファイ調査の複数の分野に強く関わり、特に領域1(社会課題解決技術)は5分野と広範に及んでいる。一方、特定分野に軸足を置く8領域(概要図表5のブルーの領域)は、分野間の関りは単一あるいは2分野と少なく、今回設定したデルファイ分野内での注目すべき領域として抽出された。

概要図表5 分野横断・融合のポテンシャルの高い8領域、及び特定分野に軸足を置く8領域とデルファイ調査における分野との関係



注 1) 分野の関りについては、今回抽出された領域を構成する主たるトピックが属する分野を考慮し図示したものであり、領域に含まれる全てのトピックを対象としたものではない。

注 2) 図表ではスペースが限られているため、各領域は略称で示している。正式な名称は概要図表3と4を確認のこと。