



技術戦略研究センターレポート

TSC Foresight

Vol. **39**

自律分散システム分野の 技術戦略策定に向けて

2021年2月

1 章 自律分散社会の概要	2
1-1 Society 5.0から自律分散社会へ	2
1-2 国内におけるデータ利活用事例	3
1-3 海外におけるデータ利活用事例	3
1-4 データ利活用時の課題（個人データの保護）	4
2 章 自律分散社会を実現する技術の置かれた状況	5
2-1 CPS/IoT 市場規模の予測	5
2-2 自律分散社会を実現する要素技術の検討状況	6
2-3 電源供給技術（「自己発電デバイス」と「マイクロ波給電」）	8
2-4 「ブロックチェーン」技術	14
3 章 自律分散社会実現に向けた技術課題	17
3-1 電源供給技術	17
3-2 ブロックチェーン	20
4 章 おわりに	25

TSCとはTechnology Strategy Center（技術戦略研究センター）の略称です。

自律分散システム分野の技術戦略策定に向けて

1章 自律分散社会の概要

1-1 Society 5.0 から自律分散社会へ

内閣府が掲げる Society 5.0とは、サイバー空間（仮想空間）とフィジカル空間（現実空間）を高度に融合させ

たシステムにより、経済発展と社会的課題の解決を両立させる人間中心の社会（Society）である。本社会では様々な情報がクラウドに自動収集され、人工知能（AI：Artificial Intelligence）を駆使したビッグデータ解析でヒトに必要な情報を提供し、新たな価値を生み出すことが期待されている（図1）。

一方、近い将来“ヒトの介在なし”にモノが通信を行うM2M社会の到来が予測されている（図2）。

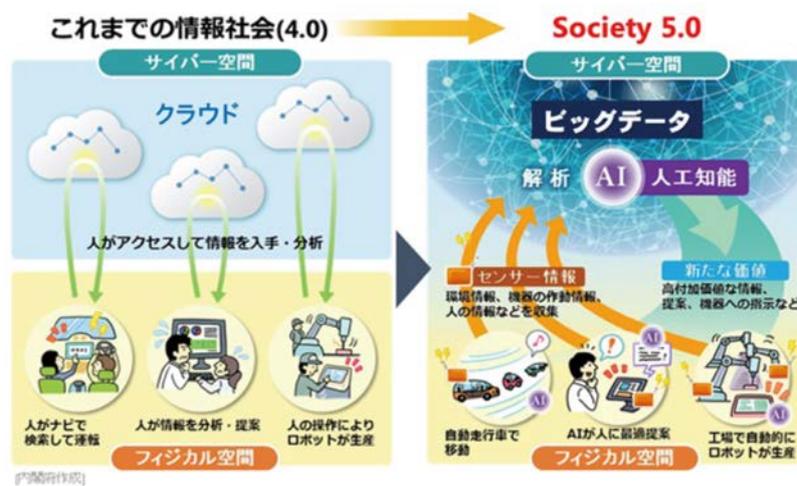


図1 Society 5.0
出所：内閣府のWebサイトより*1（2016）



図2 M2M通信
出所：IBM資料（Device Democracy）*2（2015）

*1 https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/
*2 <https://www.ibm.com/downloads/cas/Y5ONA8EV>

自律分散システム分野の技術戦略策定に向けて

こちらはデータを安全、かつ自律的にやり取りするネットワークと、長期間駆動できるIoT機器（長寿命のバッテリー）を用いて、今後確実に訪れるであろう「超高齢化社会」と「労働人口不足」に対処していく社会である。本レポートでは、このような「クラウド」処理とモノによる「エッジ」処理を融合し最終的にヒトの幸福を目指す社会を『自律分散社会』、当該社会を構成する一群のデバイスを『自律分散機器』と定義し、本社会像実現に向けたアプローチを示す。

1-3 海外におけるデータ利活用事例

欧州、特に北欧でパーソナルデータの利活用が活発で、エストニアのe-Estonia^{※5}、フィンランドのMyData政策^{※6}等がその代表格である。しかし、1997年に着手したe-Estoniaにおいても、2000年に税徴収、2005年には選挙に対応したものの最終目標に据えるIndustry 4.0の実現には至らず、かなり先の目標に位置付けられているのが実態である。

1-2 国内におけるデータ利活用事例

Society 5.0の実現に向けた取組みは各省庁で行われている。例えば、農水省ではIoTを駆使した農家の生産性を高める技術開発が行われており、国交省でも昨今発生頻度が上昇傾向にある異常気象に起因する災害発生をセンシング技術で検知する取組みが存在する（図3）。

目標を明確にした戦略的技術開発

○ ロボットやICTなどの異分野の企業とともに、農林漁業者にも参画してもらい、コスト等の開発目標を明確にして、現場への実装までを視野に入れた技術開発を実施

【取組の方針】

- ・ロボットやICTなどの異分野の企業とともに、実際に開発技術のユーザーとなる農林漁業者にも参画してもらう。
- ・導入コスト等の明確な開発目標の下、効率的な技術開発及び現場実装を実施。

【研究開発課題例】



導入しやすい価格（50万円程度）の自動除草ロボット



新たな構造による低コストな調気ハウスと、労働生産性および品質向上のためのICTによる精密な自動環境制御システムの開発



低コストで省力的な水管理を可能とする水田センサー（目標価格：1万円）



衛星、ドローン等のリモートセンシングを活用した水稲等の適期・適切な管理による高品質化

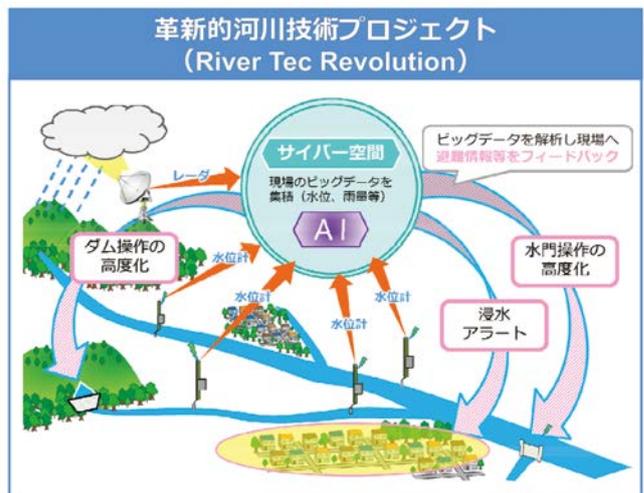


図3 各省庁におけるIoT利用

出所：「農業分野におけるICT等の先進技術の活用の推進」（農林水産省，2017）^{※3}、及び「ICT、データ活用等における戦略的なインフラメンテランス等」（国土交通省，2018）^{※4}

※3 https://www.kantei.go.jp/jp/singi/keizaisaisei/miraitoshikaigi/suishinkaigo_dai5/siryou6.pdf
 ※4 <https://www.kantei.go.jp/jp/singi/keizaisaisei/miraitoshikaigi/suishinkaigo2018/infla/dai2/siryou5.pdf>
 ※5 <https://e-estonia.com/>
 ※6 <https://mydata.org/>

自律分散システム分野の技術戦略策定に向けて

1 データ利活用時の課題 -4 (個人データの保護)

このように「データの利活用」が各地で進められる一方、「ビッグデータ」を取り巻く環境は大きな変革期を迎えている。かつては検索履歴等を削除することのできる「忘れられる権利」が議論されたが、昨今はFacebookからデータが不正に流出し2016年のアメリカ大統領選の結果に影響を及ぼしたとの懸念が広がり、一握りの企業がデータを独占支配することの危険性が指摘されだした。これに呼応するように、欧州ではGAFAによるデータ独占を問題視し、2018年にはGDPR (General Data Protection Regulation) が施行されるに至った。結果、EEA (European Economic Area: 欧州経済領域) から域外への個人データの移転は原則禁止されることになり、データの「オーナーシップ」に配慮する必要があるが生じている。

他方、上記の法制面ではなく技術的に「データの秘匿性」と「堅牢性」を担保しようという機運も高まっている。これらを両立させる技術と目されるのがブロックチェーンであり、EUでは2018年から2020年にかけて3.4億ユーロを拠出してEUBlockchainの開発・整備を進めている(図4^{※7})。しかし、現行のブロックチェーンは個人情報保護の全ての要件を満足させることは難しく、例えば「忘れられる権利」の実装方法は議論の的になっている。その理由は、ブロックチェーンは万人でデータを共有することが最大の特長のため、後にデータの削除要請があってもデータを削除することは至難の業だからである。

以上のように、現時点で安心・安全にデータを活用できる技術は存在せず、新たな指針における「データ利活用」を可能とするデータ流通基盤を整備しようという機運が高まっている。

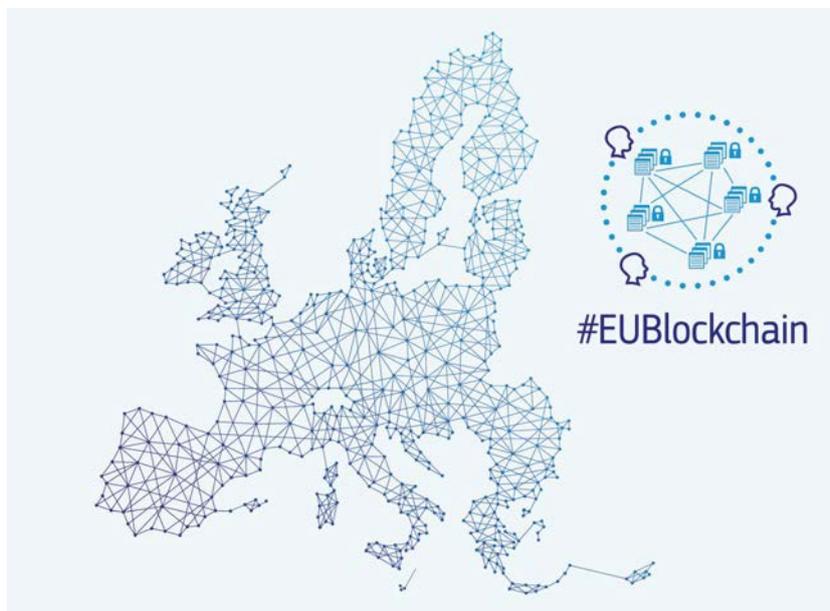


図4 EUBlockchain

出所：EUのWebサイトより(2019)

※7 <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/news/eu-blockchain-roundtable-paves-way-europe-lead-blockchain-technologies>

自律分散システム分野の技術戦略策定に向けて

2章

自律分散社会を実現する技術の置かれた状況

自律分散社会に関連する市場としては、Society 5.0で想定されている情報を利活用するCPS (Cyber Physical System) /IoT市場があり、本レポートにある技術で付加価値を高めることにより、適用範囲の拡大と市場の獲得を狙うことができると考える。

2

-1 CPS/IoT 市場規模の予測

2017年にJEITA（電子情報技術産業協会）が公表したCPS/IoT市場の予測（図5）によると、当該市場は年率5.4%で成長し、2030年にはグローバル市場で404兆円になるとされている。最も大きな市場は「家庭・個人」で、スマートフォン等の後継機が想定されていると思われるが、伸び率では「流通・物流」、「医療・介護」が上回る。当該市場はIoT機器（センサ）が多用されると予想され、個人データを扱うためにセキュリティにも細心の注意を払う必要があると考えられるため、実現に向けては安心・安全なデータ流通基盤の整備が鍵になる。

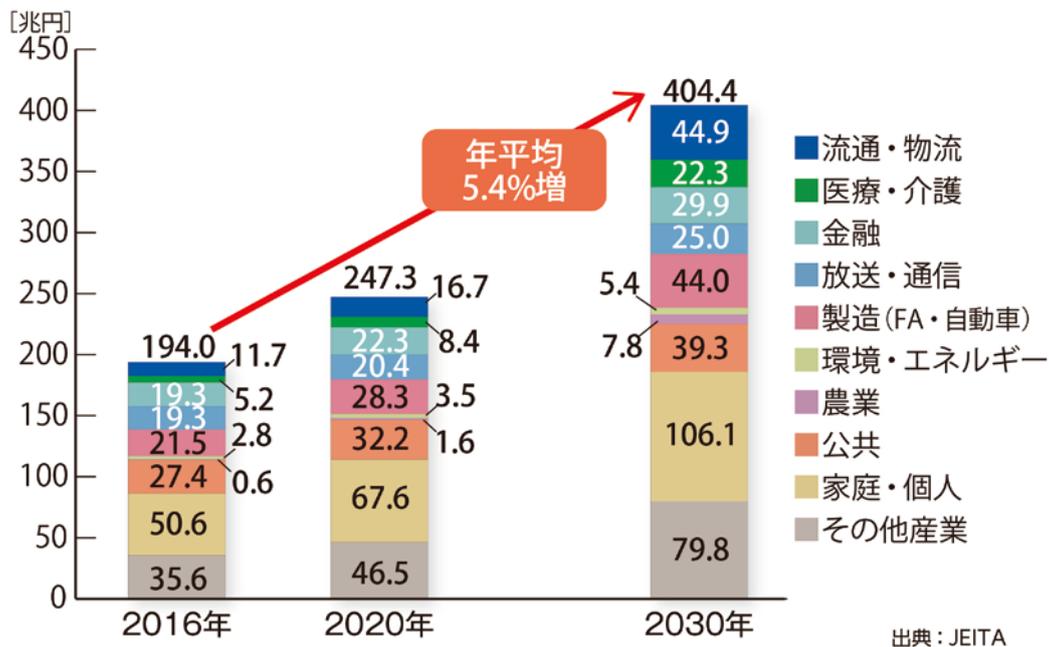


図5 2030年のCPS/IoT市場規模予測

出所：JEITAのWebサイトより（2019）

自律分散システム分野の技術戦略策定に向けて

2 -2 自律分散社会を実現する要素技術の検討状況

今後の拡大が期待される CPS/IoT 市場でより多くの市場を獲得し、1章に掲げた自律分散社会の実現に近付けるには以下の五つの要素技術が重要と考えた。

- (a) メンテナンスフリーの機器管理【電源供給技術】
- (b) リアルタイムのデータ処理【通信容量のアップ】
- (c) AIの処理能力向上【ハードウェアの向上】
- (d) AI処理の妥当性確認【アルゴリズムの品質保証】
- (e) データの適正取得・保護【セキュリティ】

表1は、これら技術の国内の各省庁、機関における取り組みを纏めたものである。(b) 通信容量のアップについては総務省の下で検討が進められており、5Gサービスは既に商用化が始まっている。また(c)のAIのハード、ソフト開発も同様に、Deep Learningを始めとする技術開発が各方面から支援されており、今後(d) AI処理の妥当性を検証する取り組みも順次着手されると推測される。そのため、改めてこれらをサポートする必要性は低いと考えた。

一方、(a)については大量のIoTセンサを普及させる場合、全ての用途で電池交換を前提にすることは考えられず、消費電力に応じた最適な(a)電源供給手段を利用すべきである。しかしながら、従来の省エネプロジェクト

は「大電力」に偏っておりIoTユースとは相容れない開発が多かった。また、「電池レス」を実現する1mWクラスの発電技術開発も存在したが、目立ったデータ活用ビジネスが無いためセンサの低コスト化が進まず、それが故にセンサの普及が進まないという負のサイクルに陥っており、新たなサポートが必要と考えた。

他方、(e)の候補技術である「ブロックチェーン」は暗号技術を用いて安全にデータを共有しようという技術である。堅牢性を担保するため暗号化に「大電力」が必要なことから現在は仮想通貨としての利用に留まっているものの、(e)セキュリティに活用できる可能性を秘めている。また、ブロックチェーンプロトコルはオープンソースである一方、その適用領域(アプリケーション)は熾烈な競争領域である。その意味で、ICO(Initial Coin Offering)以外の有望なユースケースを見出し、安心・安全にデータを取得・提供する社会基盤を整備することは意義があると考ええる。

以上に鑑み、自律分散社会の実現には(a)から(e)のいずれも重要な技術と考えるが、本レポートでは(a)電源、(e)セキュリティを重点領域とし、「電源供給技術」、「ブロックチェーン」の置かれた状況を深掘りすることとした。以下、これら技術の現状分析の結果を2-3項、2-4項に示す。

自律分散システム分野の技術戦略策定に向けて

表1 各省庁・研究機関等での検討状況

課題	実現ポイントと現状分析	ギャップ	先のボトルネックを解決する 各省庁・機関の取組み				TSC Foresight
			経産省	総務省	他省庁	国際標準	
(a) メンテナンスフリーの機器管理	定期的に電池交換が必要なセンサーが大多数。普及にはこの状況を改善する必要あり。	電源供給技術	IoT 横断PJ、未利用熱PJ (NEDO)	電磁波エネルギー回収技術の研究開発	ワイヤレス電力伝送システム (SIP: 大電力)	En Ocean	——
(b) リアルタイムのデータ処理	IoT センサの設置が進めばトラフィックの増大は必須。解決には容量アップ、もしくはエッジ処理が必要に。	通信容量アップ エッジ処理	PETRA	5G 総合実証試験	——	3GPP	Vol.30
(c) AI の処理能力の向上	ビッグデータ処理のため、ハード、ソフトウェア上の工夫が必要。	AI (ハード・ソフト) のブラッシュアップ	AI チップ・次世代コンピューティング	次世代人工知能技術の研究開発	数理・データサイエンス・AI 教育プログラム (文科省)	ISO	Vol.30
(d) AI 処理の妥当性確認	人の介在しない処理に対しては、その透明性が求められる。	AI の品質保証	——	——	——	ISO、QA4AI	——
(e) データの適正取得・保護	信頼性・閲覧性に優れ、かつ低廉で万人が容易にデータアクセスできるシステム。	堅牢なセキュリティ (例: ブロックチェーン)	新産業構造ビジョン、キャッシュレスビジョン	——	重要インフラにおけるサイバーセキュリティ (SIP)	ISO	——

自律分散システム分野の技術戦略策定に向けて

2-3 電源供給技術（「自己発電デバイス」と「マイクロ波給電」）

自己発電デバイスは周辺環境のエネルギー、例えば光、振動、熱、外力等を電気エネルギーに変換し発電するもので、エネルギーハーベスティング技術とも称される。これら種々の自己発電デバイスのうち、今回は本レポートの目的に合致する小型（センチメートルオーダー）デバイスを

対象に特許、論文調査を行った。なお、自己発電デバイスの発電方法は、太陽電池、熱電変換、圧電変換、振動発電、電磁波発電等がある（表2）が、この中の電磁波発電は電磁波の供給を受けて電力に変換するもので、本レポートでは「マイクロ波給電技術」に分類している。また、マイクロ波給電の特許調査では、通信技術をエネルギー供給手段に横展開する可能性が高いことから、これら通信技術についても調査を行った。

表2 自己発電デバイスの種類と特徴

	熱電発電	圧電変換発電	電磁波（電波）変換発電
発電電力（実証実験）	■ ~ 3.6W/cm ² ※温度差、温度域によっても異なる	■ ~ 2μW/cm ² 程度	■ ~ 12.8μW/cm ² (モジュールや使用環境によって異なるが、試作品の出力範囲は上記程度)
特徴	■ 定常的な温度差が必要であり、必要に応じて冷却 ■ 物理的動作がないためメンテレス	■ 材料の変形による劣化が欠点 ■ 構造が容易で小型化が可能	■ 変換時は交流電源となるため、アプリケーションの駆動には直流へ変換が必要
使用材料	■ テルル (Te) 系化合物 ■ アンチモン (Sb) 系化合物 ■ シリコン系化合物 等	■ 圧電セラミックス (BaTiO ₃ 、PZT、PbTiO ₃ 等) ■ 圧電薄膜 (ZnO 等) ■ 圧電高分子樹脂	■ バッチアンテナ ■ 整流ダイオード
使用環境の制約	■ 温度差が1℃以上となる熱源が必要 (300℃以上は開発品)	■ 断続的 (周期的) な圧力の発生が必要 (定常的な圧力では発電できず)	■ 製品化済み周波数域：500MHz帯 (地デジ放送) の発信源が必要 ■ 80MHz帯~3GHzも開発対象
主な参入プレイヤー	■ ヤマハ ■ 東芝 ■ パナソニック 等 ■ KELK ■ Marlow ■ Nextreme	■ EnOcean ■ PuleSwitch ■ 音力発電 ■ 村田製作所 等	■ Powercast Corporation ■ 日本電業工作 ■ ルネサスエレクトロニクス
想定用途	■ 産業分野 (工場排熱、焼却炉) ■ 民生分野 (燃料電池コージェネレーション) ■ 移動体分野 (自動車)	■ 床発電 ■ 照明器具スイッチ	■ 通信機器 ■ センサーネットワーク ■ 防災・社会インフラモニタリング ■ 屋外照明
	音力発電	振動発電 (電磁誘導型)	振動発電 (静電誘導型)
発電電力	■ 0.13mWh/cm ² (1日当たり) ※二次情報では電力量のみ公開	■ ~ 2mW/cm ²	■ ~ 100μW/cm ²
特徴	■ N/A	■ 電気抵抗が小さく、電力を取り出しやすい ■ 発生電力がデバイスの構造により左右される	■ 曲げ応力がかからないため、耐久性に優れる ■ 電磁誘導型と比較すると、電気抵抗が大きい
使用材料	■ N/A	■ コイル ■ 磁石	■ エレクトレット材料
使用環境の制約	■ 一定の音波が必要	■ 連続した振動が必要	■ 連続した振動が必要
主な参入プレイヤー	■ 音力発電 ■ University of Florida ■ California Institute of Technology	■ Perpetuum ■ Cypress Semiconductor ■ Ferro Solutions ■ ミツミ電機 ■ スター精密 ■ アマダンド 等	■ オムロン ■ 東京大学 等
想定用途	■ 高速道路の遮音壁 ■ 携帯電話	■ 機器・建物モニタリング ■ セキュリティ分野 ■ 介護福祉分野 (見守りセンサー電源) ■ スポーツ関連製品 ■ 自動車用品	■ 社会インフラモニタリング ■ 輸送機器 ■ 家電 ■ 健康機器

自律分散システム分野の技術戦略策定に向けて

(1) 特許分析

「自己発電」に係る技術全てを網羅している訳ではないが、2013年度の特許庁による特許出願技術動向調査（熱電変換技術）に倣い、本技術の出願件数を追跡調査した（期間：2000年～2020年、ヒット数：21,795件）。結果、約7年前の調査結果^{※8}と変わらず、依然日本は出願件数で首位であることが判明した（図6）。

また、同様に2014年度の特許庁調査（非接触給電関連技術）に倣い、「マイクロ波給電」の特許出願件数を

調査した（期間：2000年～2020年、ヒット数：3,623件）。結果、前回調査^{※9}より中国の出願比率が増加したが、日本は米国と共に一定の出願比率を有していた（図7）。

さらに、通信技術（5G）についても2016年度の特許出願技術動向調査（LTE-Advanced及び5Gに向けた移動体無線通信システム）^{※10}と同様の検索手法で調査したところ（期間：2000年～2020年、ヒット数：133,358件）、米中からの出願比率が増加した一方、日欧韓の出願は拮抗した状態にあることが判明した（図8）。

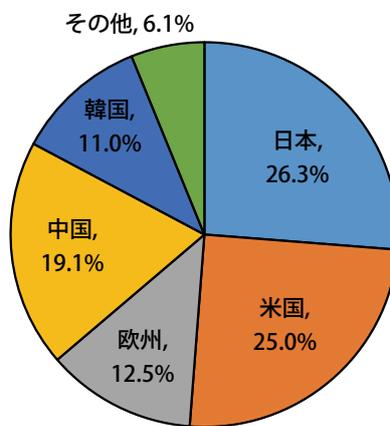


図6 自己発電デバイス（熱電素子）の出願人国籍別特許出願比率

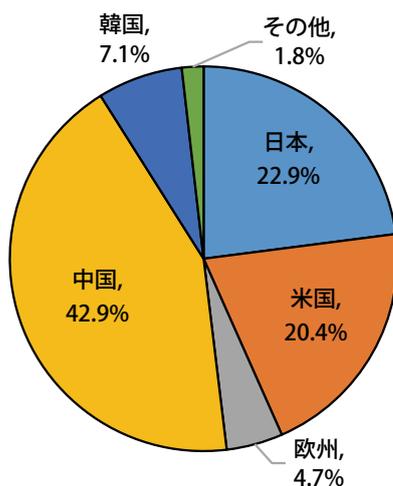


図7 マイクロ波給電技術の出願人国籍別特許出願比率

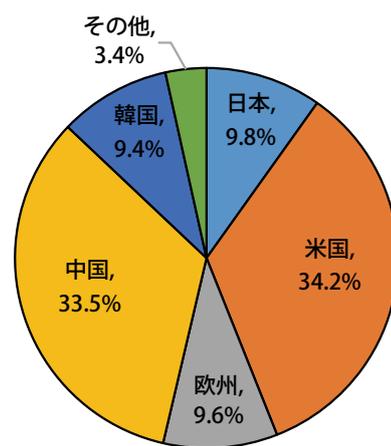


図8 通信技術の出願人国籍別特許出願比率

※8 https://www.jpo.go.jp/resources/report/gidou-houkoku/tokkyo/document/index/25_thermoelectric.pdf

※9 https://www.jpo.go.jp/resources/report/gidou-houkoku/tokkyo/document/index/26_18.pdf

※10 https://www.jpo.go.jp/resources/report/gidou-houkoku/tokkyo/document/index/28_13.pdf

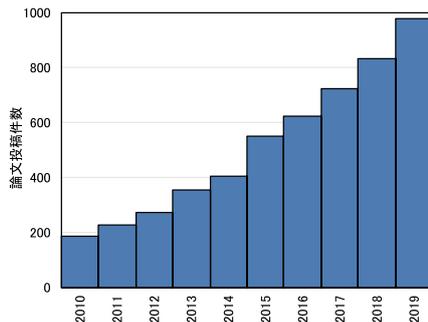
自律分散システム分野の技術戦略策定に向けて

(2) 論文分析

エネルギーハーベスティング技術の中から①熱電発電、②圧電発電、③振動発電を取り上げ、2010年から2019年にかけての論文投稿件数を調査した。結果を図9から

図11に示す。いずれの技術も件数は年々増加し、日本からの報告は①熱電素子、②圧電素子に関しては中国、米国、韓国に続く4位、③振動発電素子は中国、米国に次ぐ3位という結果になった。

①熱電変換素子



(検索ワード：(thermoelectric* AND generat*)、ヒット数：5,152件)

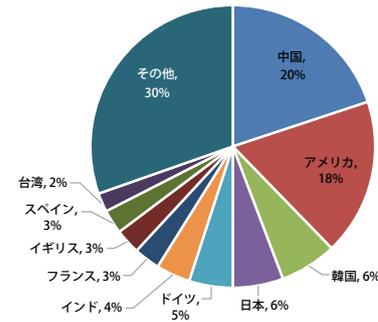
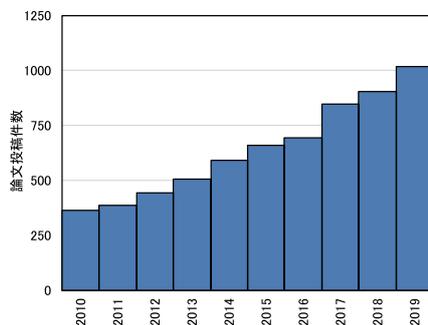


図9 熱電変換デバイスの国籍別論文投稿比率

出所：Web of Science™ の検索結果を基に NEDO 技術戦略研究センター作成 (2020)

②圧電変換素子



(検索ワード：(piezoelectric* AND generat*)、ヒット数：6,432件)

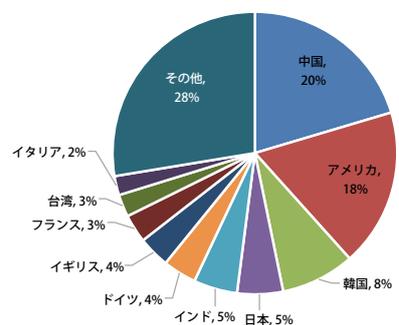
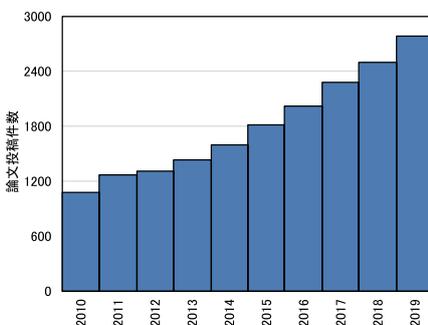


図10 圧電変換デバイスの国籍別論文投稿比率

出所：Web of Science™ の検索結果を基に NEDO 技術戦略研究センター作成 (2020)

③振動発電素子



(検索ワード：((vibration* OR oscillation*) AND generator*)、ヒット数：18,071件)

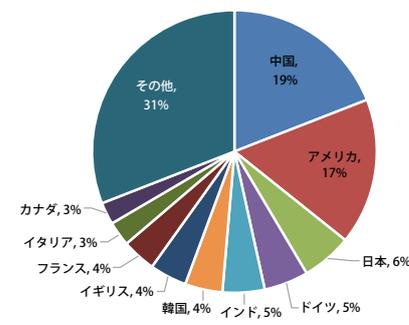


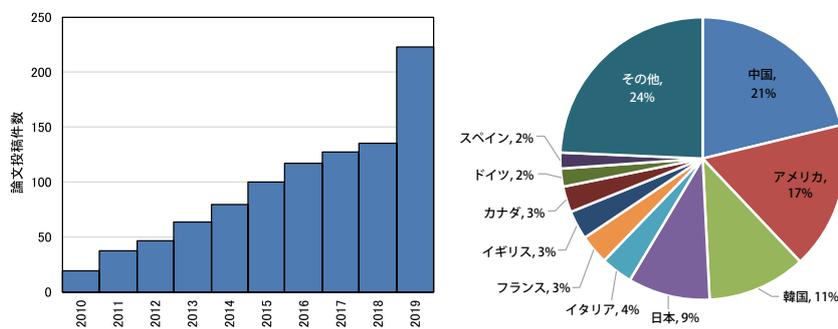
図11 振動発電デバイスの国籍別論文投稿比率

出所：Web of Science™ の検索結果を基に NEDO 技術戦略研究センター作成 (2020)

自律分散システム分野の技術戦略策定に向けて

一方、マイクロ波給電についても論文投稿件数を調査したところ、近年急速に投稿数が伸びていること、日本は中国、米国、韓国に続く4位であることが判明した(図12)。さらに、本技術は5G等の無線通信技術が横展開されることが多いことから、通信分野における国際標準化への貢献度を調査した。具体的には、2015年以降

に3GPP (Third Generation Partnership Project) のRAN (Radio Access Network) へ提出されたCR (Change Request) の中から、カテゴリー：B、Cに属する提案件数をカウントした(ヒット数：3,497件)。結果、図13に示すとおり日本は欧中米に大きく水を開けられている状態であることが分かった。



(検索ワード：((microwave OR millimeter-wave OR electromagnetic) AND((wireless or contactless or contact-less or noncontact) AND ((power-trans* OR power-supply OR power-receiv* or power-charge*) OR (energy-trans* or energy-supply OR energy-receiv* OR energy-charG*)))、ヒット数935件)

図12 マイクロ波給電技術の国籍別論文投稿比率

出所：Web of Science™ の検索結果を基に NEDO 技術戦略研究センター作成 (2020)

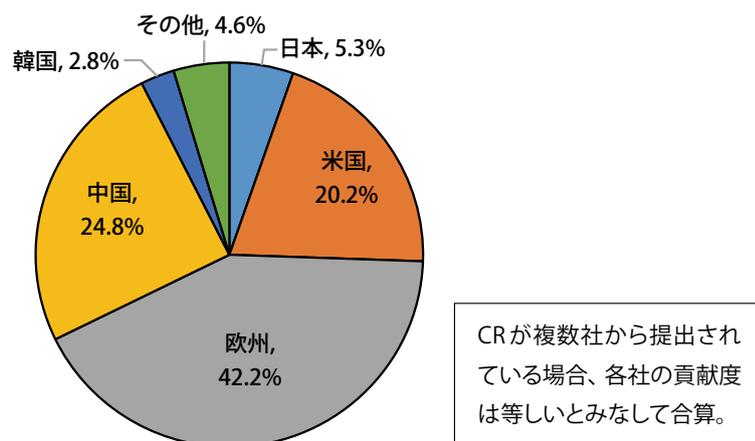


図13 3GPPに提出されたCR (2015年以降でカテゴリ：B、Cのみ) の国籍別件数比率

自律分散システム分野の技術戦略策定に向けて

(3) 標準化・諸外国の研究開発動向

関連する国際標準・規格には、IoT 機器に適用される通信規格 (EnOcean、ZigBee、Bluetooth 等) が存在する。これら規格は想定される通信距離・速度・頻度等が個々に異なり、必要となる電力も違う。そのため、具体

的なユースケース (通信距離、速度) 毎に通信方式の選択がなされ、その駆動に必要な電源供給手段が選ばれることになる。以上の理由から統一的な規格は存在しないものの、表3にこれら通信規格の諸元をまとめた。

表3 各種IoT通信方式の諸元

項目	EnOcean	ZigBee	Bluetooth
周波数帯	868.3、902.875、928.35MHz 帯	2.4GHz 帯	2.4GHz 帯
通信距離	数 10～200m	数 10m	～10m
伝送速度	125kbps	250kbps	1Mbps
プロトコル	EnOceanRadio Protocol EnOcean Serial Protocol EnOcean Equipment Profiles	IEEE 802.15.4 標準 Zigbee Alliance	AMP Manager Protocol Attribute Protocol Audio/VideoControl Transport Protocol Audio/VideoDistribution Transport Protocol BluetoothNetwork Encapsulation Protocol InfraRedDataAssociation Logical Link Control and Adaptive Protocol Multi-Channel Adaptation Protocol Object Exchange ESTI TS 07.10 標準 Service Discovery Protocol Security Manager Protocol Telephony Control Protocol
市場	欧州、北米、日本、中国等	世界共通	世界共通
標準化推進組織	EnOcean Alliance	Zigbee Alliance	Bluetooth SIG

出所：NEDO委託調査事業「IoT機器のエネルギー供給・履歴システムに関する調査報告書」(2019) ^{※11}

※11 https://www.nedo.go.jp/library/database_index.html

自律分散システム分野の技術戦略策定に向けて

一方、日本のマイクロ波給電の開発着手は早く、既にSIP（戦略的イノベーション創造プログラム）「脱炭素社会実現のためのエネルギーシステム」で研究開発が始まっている。図14に記載のとおり、2020年度を目標に屋内でのマイクロ波給電の法制化が検討されているところである。現在のところ、給電には920MHz、2.4GHz、5.7GHzの3波長帯が用いられる予定で、送電アンテナの出力は数十Wの見込みである。このように出力が1Wを超えるため、安全性を確保する技術（送電経路に障害物（人）が侵入した場合に検知し、送電を止める等）や、意図せ

ず浴びる電磁波の影響調査等を優先して検討が進められているようである。これら対策を行った後、免許制を採用してのマイクロ波給電の商用化が検討されている。

なお、海外で検討されている注目すべき技術としてOssia（米国）のCotaがある。WiFiと同じ2.4GHzの電波を用い、屋内での使用に限定し壁面反射を有効利用しながらスマートフォン等に電力を供給する技術であり（図15）、通信で培われた無線技術を横展開する形で技術開発が進められている。

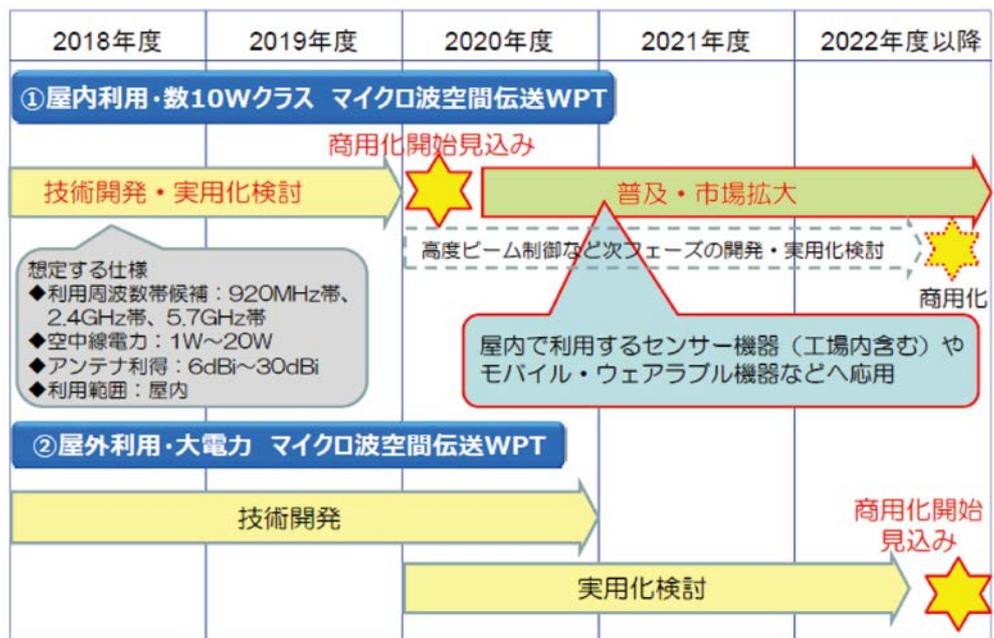


図14 実用化に向けたロードマップ（ブロードバンドワイヤレスフォーラム資料）

出所：NEDO委託調査事業「IoT機器のエネルギー供給・履歴システムに関する調査報告書」（2019）

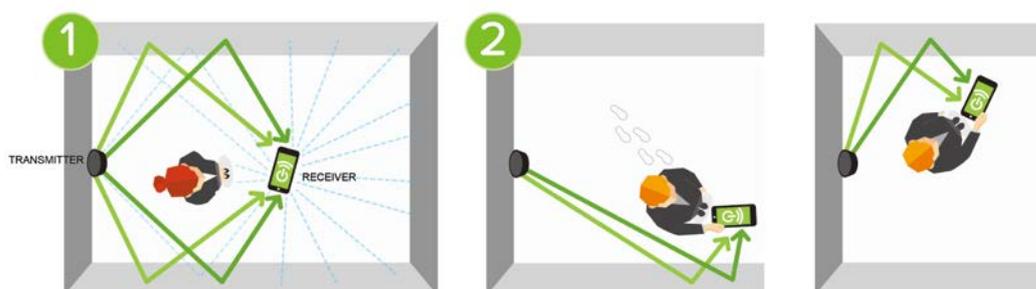


図15 Cotaによる電力伝送

出所：NEDO委託調査事業「IoT機器のエネルギー供給・履歴システムに関する調査報告書」（2019）

自律分散システム分野の技術戦略策定に向けて

2-4 「ブロックチェーン」技術

(1) 特許分析

特許庁による、「平成30年度 特許出願技術動向調査報告書 仮想通貨・電子マネーによる決済システム」(以下、「特許庁による特許出願技術動向調査」)^{※12}の結果を図16に示す。なお、本技術は2018年1月に起こったNEMの不正流出事件を契機に多数の関連特許が出願

されていると考えられるが、2018年の調査ではこれらが出願公開されていないため反映されていない可能性が高い点に注意が必要である。しかし、ビジネス寄りの電子決済を含めると米中に出願が突出しており(図16左円グラフ)、ブロックチェーンのスマートコントラクト機能に限っても、米中の他、欧州からも一定数の出願がなされていた(図16右円グラフ)が、いずれにおいても日本は大きく出遅れていることが判明している。

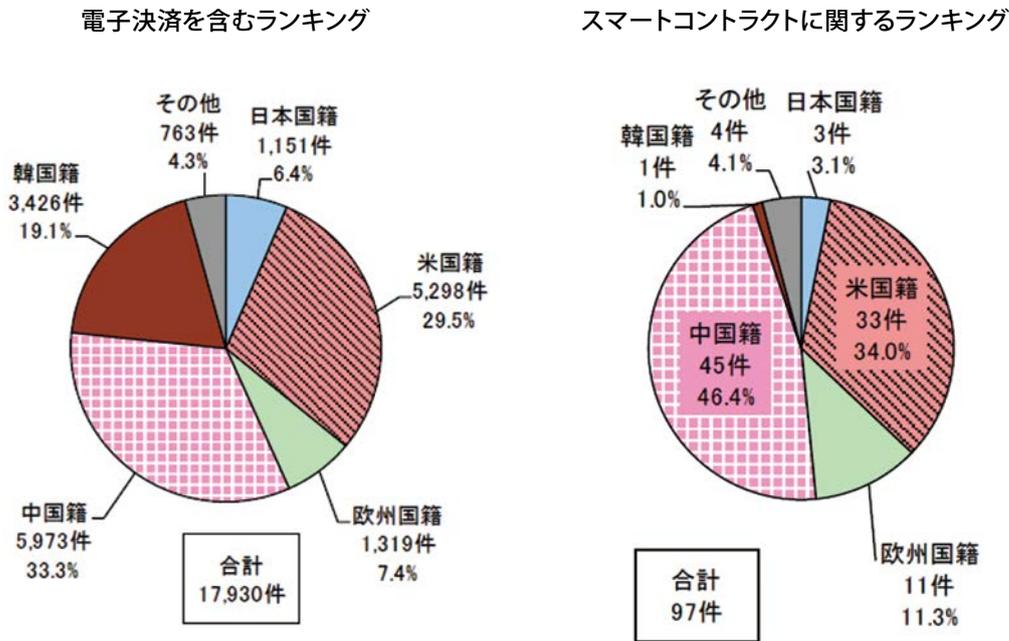


図16 ブロックチェーンの出願人国籍別特許出願件数

出所：特許庁による特許出願技術動向調査(詳細版)より(2019)

※12 <https://www.jpo.go.jp/resources/report/gidou-houkoku/tokkyo/index.html>

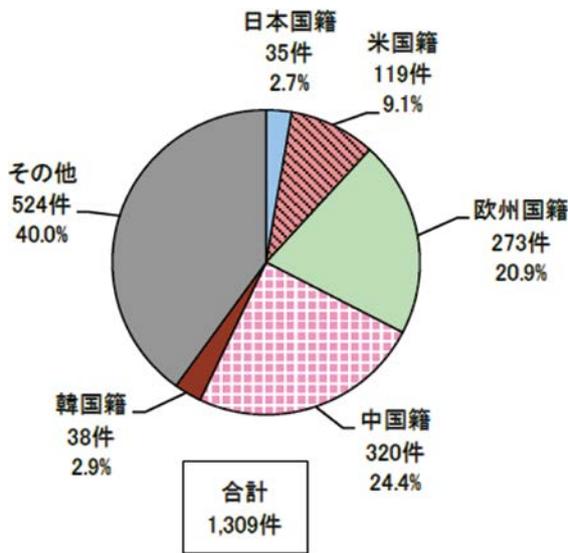
自律分散システム分野の技術戦略策定に向けて

(2) 論文分析

論文は中国が最多で、米国以上に欧州からの報告が多いことが特徴である。また、「その他」地域からの報告も多く(図17左円グラフ)、インド(180件)、インドネシア(47件)、台湾(46件)等のアジア諸国から盛んに報告されて

いる。一方、スマートコントラクトは欧州が最多で、次いで米・中という結果になっている(図17右円グラフ)。1章で述べたGDPRとの関係で、欧州において精力的に研究が進められているためではないかと考える。

電子決済を含むランキング



スマートコントラクトに関するランキング

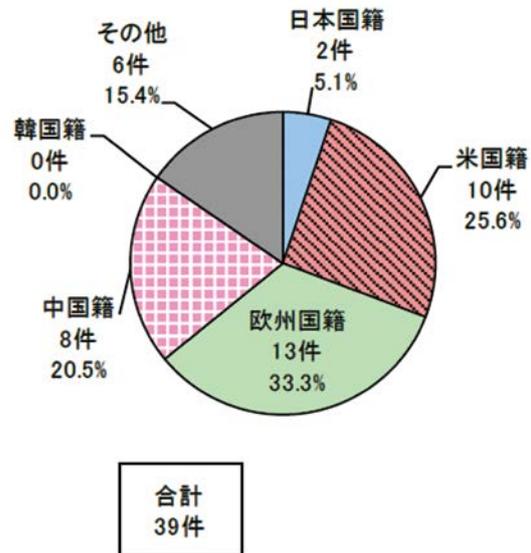


図17 ブロックチェーンの国籍別論文発表件数

出所：特許庁による特許出願技術動向調査(詳細版)より(2019)

自律分散システム分野の技術戦略策定に向けて

(3) 標準化・諸外国の研究開発動向

2016年、ブロックチェーン技術の国際標準化を目指す機関 (ISO/TC307 Blockchain and Electronic Distributed Ledger Technologies) が組織され、議論が始まっている。しかし、議論を円滑に進めるための「用語の定義」に時間を要す等、策定には時間を要すと考えられている。また、ブロックチェーンを使うPoC (Proof of Concept) が国内外で進められており、特にデータと同じ「無対物」である電力への適用事例が多い。これら事例を表4に示した。

以上のように現在は少々乱立気味で、米国 Rocky Mountain Institute が中心となってコンソーシアム (EWF: Energy Web Foundation) を作り、エネルギー業界におけるブロックチェーンの利活用を図る動きも見られる。今後、このような合従連衡を繰り返しながらブロックチェーンの社会実装が進んでいくと予想される。

表4 電力取引プラットフォームへのブロックチェーン適用検討例

企業名	LO3 Energy	Power Ledger	Pylon	Energolabs	Conjoule	TRENDE	東京電力	みんなの電力	デジタルグリッド	DELIA	Share&Charge	中部電力
地域	米国	豪州	スペイン	中国	ドイツ	日本	日本	日本	日本	日本	ドイツ	日本
企業概要	<ul style="list-style-type: none"> 米国のベンチャー企業。 プライベート BC を活用した電力取引 PF 「EXERGY」を開発し、米国や豪州等で実証を進める。 	<ul style="list-style-type: none"> 豪州のベンチャー企業。 BC を活用した再エネの P2P 取引 PF を構築。豪州に加え、タイ・インドでマイクログリッドの商業運用に向けた PF 構築も実施中。 	<ul style="list-style-type: none"> スペインのベンチャー企業。 グリーンエネルギーの P2P 取引 PF 「Pylon Network」を構築。 現状イーサリアム BC を活用しているが、エネルギー分野での技術的要件 (取引速度、拡張性、汎用性等に関する要件) を満たすためにはイーサリアムでは不十分として、独自の BC 技術を構築中。 	<ul style="list-style-type: none"> 2016年に設立された中国のベンチャー企業。 P2Pでの電力取引 PF を構築。再エネの需給マッチング等のサービスを提供。余剰電力は共有 EV 充電ステーションや共有エネルギーストレージに送電可能。 Qtum BC を活用し取引データを管理。独自の仮想通貨 TSL を発行しエネルギー取引の支払い等に活用。 フィリピンでプロジェクト開始済み、今後タイ、インド等アジアへの展開を予定。 	<ul style="list-style-type: none"> 東京電力と innogy が共同で設立した企業 (innogy が設立し、東電が 30%の株式を保有する形で出資)。もとは innogy innovation hub のプロジェクト。 BC を活用した電力消費者とプロシューマー向けの電力取引プラットフォームを提供。 	<ul style="list-style-type: none"> 2017年8月に設立された東京電力の子会社。 将来的には BC を活用した電力取引システムの構築を目指す。 現在は家庭向けの電力小売サービスを実施。 	<ul style="list-style-type: none"> 2018年3月に TRENDE 社を設立。将来的に BC を活用した電力取引システムの構築を目指す。 海外の BC 関連企業とも積極的に提携。前述の Conjoule 社、英国の Electron 社 (電力会社のスイッチング手続 PF 構築) に出資。シンガポールの Electrify とも電力の P2P 取引 PF 構築に向けた実証実験を実施。 Energy web foundation にも参加。 	<ul style="list-style-type: none"> (株) Aerial Lab Industries と共同で BC 技術を活用した P2P 電力取引 PF 「ENECTION 2.0」を開発。 2018年7月に当該 PF を用いた丸井グループへの再エネ電力への供給を開始。 将来的には、個人・企業間の電力の直接取引や、電源価値 (kW 価値) の売買への活用を検討。 	<ul style="list-style-type: none"> 2017年に設立されたスタートアップ企業。 環境省事業を活用し、BC を用いて、電力の P2P 取引や、自家消費再エネの環境価値の取引に関する実証を実施中。 東京ガスも同社の BC 技術・システム開発に出資。 	<ul style="list-style-type: none"> 日本の企業コンソーシアム「BC による分散型エネルギー情報基盤アラインス (Distributed Energy Ledger Infrastructure Alliance)」。 一括受電を行うマンションをマイクログリッドに見立て、各世帯への電力供給の最適運用を目指すローカル仮想発電 (VPP) を試行。 高速群制御・記録・運用のためにプライベート型 BC の BBc1 を利用。 	<ul style="list-style-type: none"> innogy innovation hub とスタートアップ企業 Slock.it の共同プロジェクトから独立した企業。 BC を活用した EV 向けのサービス 「Share&Charge」を提供。同サービスの利用者は専用の充電スタンド及びスマホアプリを使用して、EV の充電及び自動決済が可能。 	<ul style="list-style-type: none"> EV の充電履歴を BC に記録する実証実験を開始。((株) Nayuta、インフォテリア (株) との共同実施)。 上記の他に、BC を活用した電子決済アプリの開発を実証実験中。現在は自社内での利用 (コヒー代金) のみだが、将来的には余剰電力を個人間売買できる電力取引システムの構築を目指している。

出所：NEDO 委託調査事業「IoT 機器のエネルギー供給・履歴システムに関する調査報告書」(2019)

3章

自律分散社会実現に向けた技術課題

3-1 電源供給技術

自律分散社会の実現に向けては、十分なデータを取得するためセンサを増やすことが重要になる。そして、今後訪れるであろう大量のセンサ敷設（トリリオンセンサ）に対し、電池以外の電源供給手段を検討しておくことは非常に重要と考える。また、“ばら撒き”型を基本とするIoTセンサに対しては、耐環境性能も考慮する必要がある。このような電池レスの電源供給手段と考えられる「自己発電デバイス」と「マイクロ波給電」を取り上げる。

(1) 自己発電デバイス

①自己発電方法の選択

本レポートでは、いわゆるIoTセンサの駆動に十分な出力の環境発電技術を対象とし、特定の発電技術に限定しない。しかし、主要な技術は2章に示した、振動発

電、熱電変換等に絞られる。表5には各発電方法での発電電力密度の最大値を示す。

熱電変換技術は他の方式と比較してエネルギー獲得の自由度が高い。また、従来から僅かな温度差（数度）を利用する熱電変換素子の応用事例が少なかったこともあり、以降は当該技術を中心に開発状況を説明する。

表5 日常環境下でのエネルギー源と最高発電電力密度

エネルギー源	発電電力密度	使用環境自由度
環境光（直射日光）	1W/cm ²	低
振動（0.1～1G）	10 ⁻³ W/cm ²	中
環境光（室内）	10 ⁻⁴ W/cm ²	中
熱（温度差5℃）	10 ⁻⁵ W/cm ²	中
電磁波（WiFi等）	10 ⁻⁶ W/cm ²	高

②熱電変換素子の性能向上

従来は発電性能を向上させるための材料開発や、素子構造の工夫等が開発の主流であった。前者の性能向上事例には、Si系材料にGeナノ粒子を添加し、フォノンのみを散乱させて熱電変換効率を向上させた事例があった（図18）。

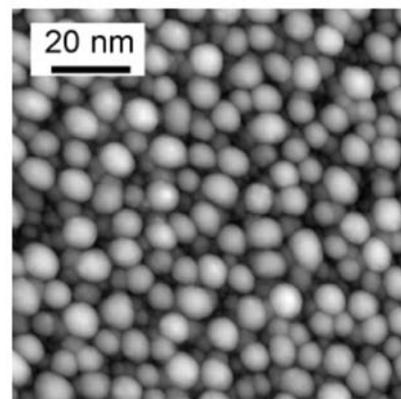
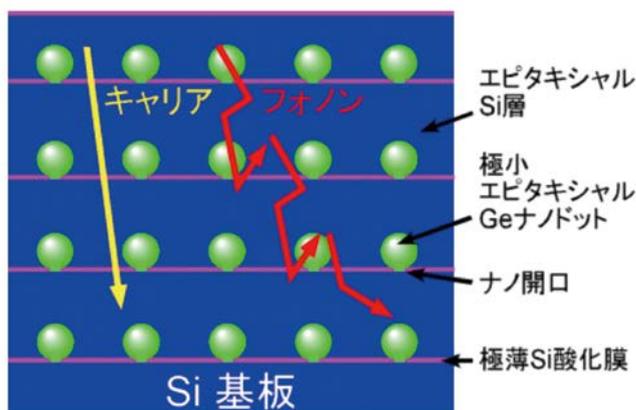


図18 材料の工夫による熱電変換効率の向上事例

出所：大阪大学のWebサイト^{※13}より（2015）

※13 http://resou.osaka-u.ac.jp/ja/research/2015/20151005_1

自律分散システム分野の技術戦略策定に向けて

一方、素子構造の改良ではセラミックコンデンサの製造プロセスを改良し、積層構造の形成を容易にして高い出力密度を実現した事例がある（図19）。

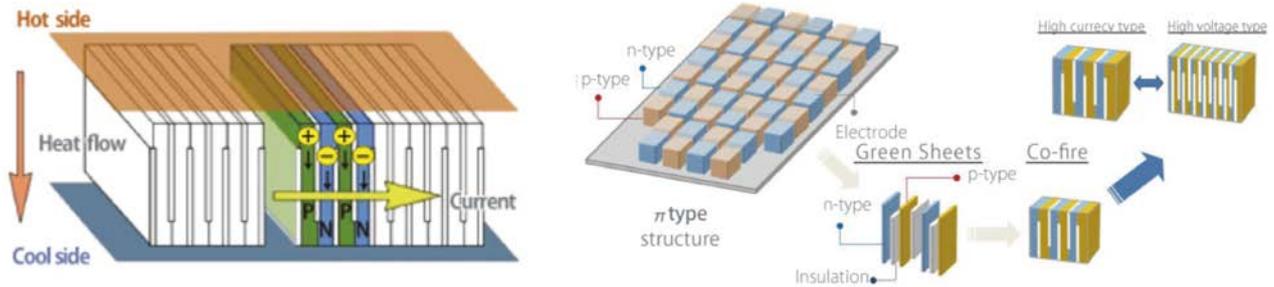


図19 積層構造による出力密度の向上事例

出所：村田製作所のWebサイト^{*14}より（2014）

③周辺技術の進展

また、最近では発電回りだけでなく、昇圧回路や電源IC等、微小な電力を有効利用するための周辺技術が大きく進展している。例えばSOTB (Silicon-on-Thin-Buried Oxide) を用いたコントローラにより、低アクティブ電流 (20nA) と低スタンバイ電流 (150nA) を両立させた事例がある。さらに、無線通信に要する電力もBluetoothの低消費電力モードやパッシブWiFi等の普及により大きく低下している。以上のとおり、着実ではあるが僅かずつしか改善されてこなかった電源供給能力に対し、通信に要する周辺回路の省電力化は目覚ましく、昨今その差は縮まりつつある。

④技術開発の方向性

このような状況下、IoTセンサの更なる普及拡大を図るためには次の技術の開発が重要と考える。

- (a) よりマイルドな環境での発電性能の向上
- (b) 環境配慮設計

(a) については、通常とはかけ離れた環境で発電をするのではなく、設置環境で如何にしてIoTセンサの駆動に十分な電力を賄うかが鍵と考えるからである。この点、熱電変換素子で言えば常温環境下（微小温度差）で発電効率を上げる技術も重要で、これまではビスマス系材料の利用が一般的であった。しかし、本材料は(b)の観点で好ましいとは言えない。環境に悪影響を及ぼさない設計になっていないためである。さらに言えば、故障時にはその旨発信し、必要に応じてIoT機器を回収できるようにしておくことが相応しい。(a)、(b)を両立させた開発事例は少なく、物質・材料研究機構(NIMS)で行われている、第一原理計算に基づくバンド・フォノン計算と放射光構造解析を相補的に組み合わせた「ありふれた元素」からなる新規材料の探索とその実用化研究が見られる程度である。

ここでは熱電変換素子を中心に説明したが、(a)、(b)は大量のセンサ設置を行う場合の重要な視点で、いずれの発電方式でも両立させるべき課題と考える。

*14 <https://www.murata.com/ja-jp/about/newsroom/techmag/metamorphosis19/paper/02>

自律分散システム分野の技術戦略策定に向けて

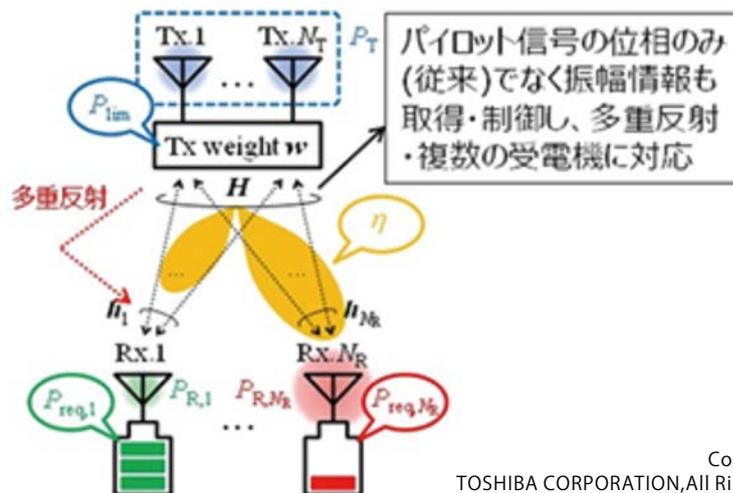
(2) マイクロ波給電

マイクロ波を使った電力伝送のアイデアは、当初は宇宙太陽光発電への検討が先行していた。地表から36,000km上空の静止軌道上の太陽光発電衛星 (SPS: Space Solar Power Station/Satellite) ならば、夜間や雲の影響を受けることなく発電することができるからである。SPSは長距離電力を輸送するため直進性の高い電波 (5.8GHz) を用い、約2km四方の巨大なアンテナの利用を想定して研究が進められてきた (図20)。

一方、現在のスマートフォン等では極近距離 (数センチメートル) の無線給電が実用化されているが、比較的長い距離 (数メートル) の電力輸送も検討が始まっている。ここでは電力ロスを抑えるためにフェーズドアレイ状のアンテナを採用し、ビームフォーミングによりロスを低減しようという取組みも見うけられる (図21)。



図20 宇宙太陽光発電の送電・受電用装置 (実験)
出所：三菱重工業のWebサイトより (2019)



Copyright ©2018
TOSHIBA CORPORATION, All Rights Reserved.

図21 MIMO (Multiple Input Multiple Output) を用いた電力伝送のイメージ
出所：東芝のWebサイトより (2018) ※15

※15 東芝 研究開発センター「産業IoT応用を目指したマイクロ波遠隔給電技術を開発」(2018)
http://www.toshiba.co.jp/rdc/detail/1803_02.htm

自律分散システム分野の技術戦略策定に向けて

しかし、マイクロ波による電力輸送には根本的な課題がある。例えばWiFiと同じ周波数(2.4GHz)を利用する場合、通信に悪影響を及ぼしてしまうためである。一般に電力輸送のパワーは通信よりも数桁高く、同一の周波数帯で通信と給電は両立しない。ところが、IoT機器はデータ通信することが当然の機能のため、そのままでは異なる周波数のアンテナを同居させねばならなくなる。一方、IoT機器にはダウンサイズが求められることから、解決するには時分割方式を採用する等、両者のタイミングをずらすといった工夫が必要になってくる。以上のような実用化に向けた課題が数多くあり、2-3-(3)に記載した電波の誤爆を検知・回避する手段等と共に検討が進められている。

3 -2 ブロックチェーン

(1) ブロックチェーンの特長

(改竄耐性とスマートコントラクト)

ブロックチェーンの課題に入る前に、簡単にその特長について触れる。本技術の最大の特長は「改竄耐性」にあり、Bitcoinを例にとると、千件の取引(トランザクション)と前のブロックのハッシュ値を足し合わせて新たなハッシュ値を計算する際、そこにある文字列(これを「ノンス」と呼ぶ)を足し合わせて、例えば上十桁に「0」が並ぶようにノンスを見つけるというパズルが課されている。このパズルを解く作業を「マイニング」と呼ぶが、これは数学的に非常に難解な作業で、容易にノンスを見つけることができない。また、仮に当該ブロックの改竄に成功しても、その後のブロックのハッシュ値を変更する必要が生じ、影響が全てのブロックに波及する。このような理由で現実には対処不能となり、改竄耐性が保証される(図22)。

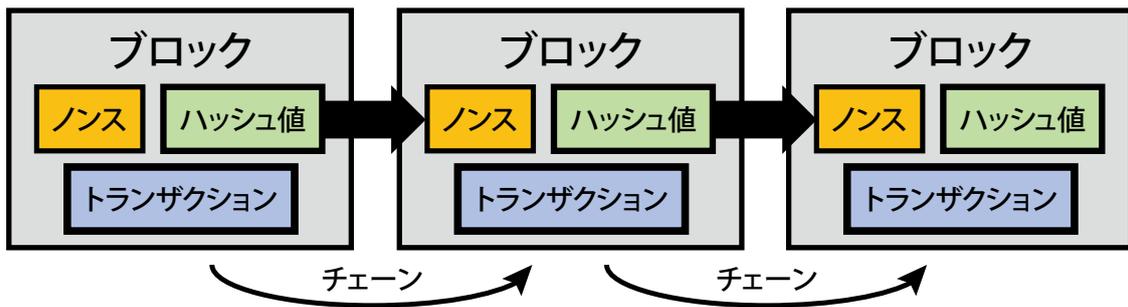


図22 ブロック(トランザクション)のチェーン化

出所：各種公開資料を基にNEDO技術戦略研究センター作成(2019)

自律分散システム分野の技術戦略策定に向けて

もう一つの特長として「スマートコントラクト」がある。これは、プロトコルにプログラムを内包させることができる機能で、通信を介して機器どうしをチューリングマシンのように振る舞わせることが可能となる(図23)。つまり、本機能で通信の際に条件分岐を行えば、所望の条件に合致する場合のみ契約を履行し、金銭の授受も自動的に処理できるようになる。

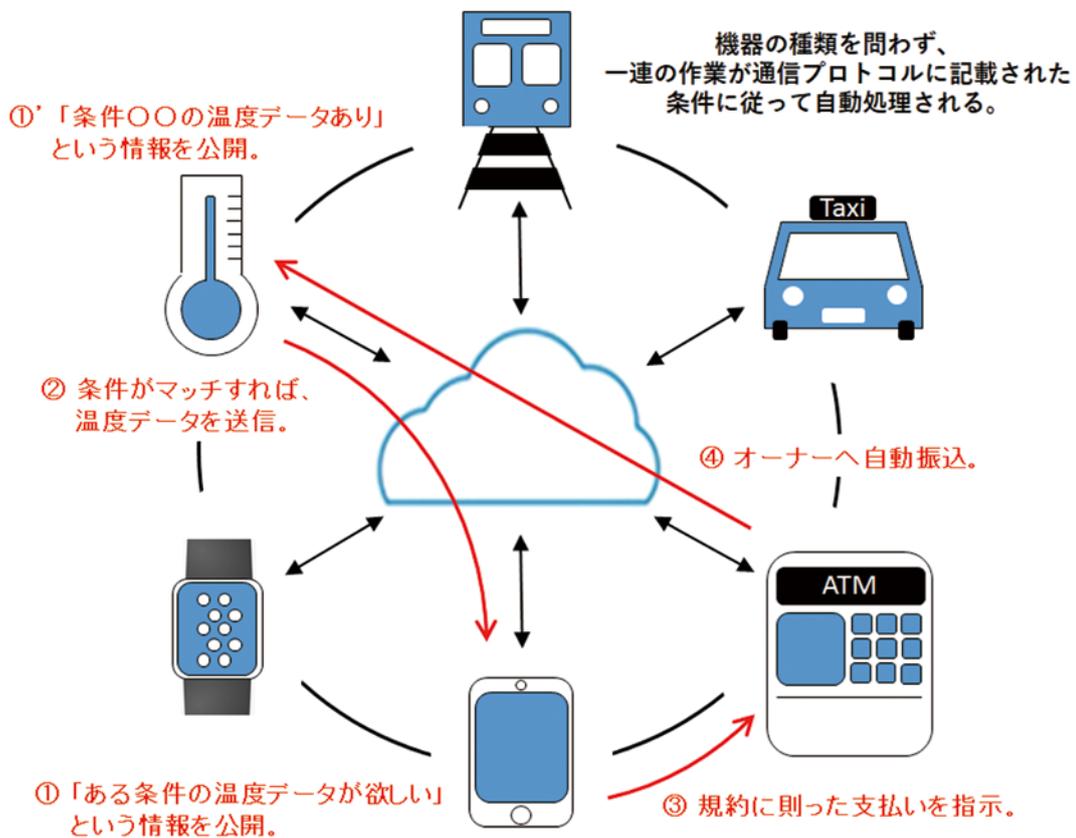


図23 スマートコントラクトによる自律分散社会

自律分散システム分野の技術戦略策定に向けて

(2) データの分散共有

ブロックチェーンはデータをチェーン状にしてネットワーク上に保存するが、例えばBitcoinの「ウォレット」には当該データは存在しない。ここには自らのデータへアクセスする「秘密鍵」が存在するだけである。安全なデータのやり取りには図24に示す公開鍵基盤 (PKI: Public Key Infrastructure) を用いることが一般的で、ボブは自らの「秘密鍵」を知っているため暗号化したデータにアクセスできるが、アリスはこれを知らないためデータを盗み見ることができないという仕組みを利用する。また、ボブがアリスにデータを送る場合は、アリスの「公開鍵」でデータ

を暗号化しネットワーク上に保存する。その後は当該データの復号手段(「秘密鍵」)を知るアリスのみがデータを復号できるため、安全にデータを送受信することが可能である。

上記機能を利用したIPFS (Inter-Planetary File System) と呼ばれるファイル共有手段は、「オーナーシップの問題」を解決可能と注目されている技術で、2017年にはFilecoinとしてICOが行われ、過去二番目に多い約2億ドルを集めた技術である。しかし、PKIを導入する際はIoT機器の処理能力を勘案したシステム設計にする必要があり、全てに適用できるというわけではない。

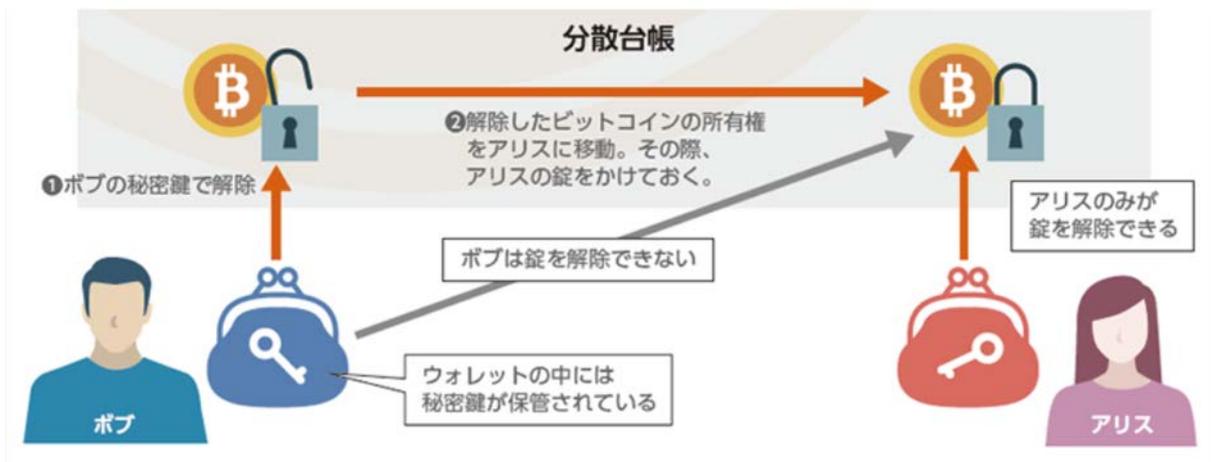


図24 公開鍵基盤 (PKI) を用いた分散台帳

出所：技術評論社のWebサイト^{※16}より(2019)

※16 <https://gihyo.jp/book/pickup/2018/0059>

自律分散システム分野の技術戦略策定に向けて

(3) 真正性の確保・インターオペラビリティ

仮想通貨でブロックチェーンは大成功を収めたが、IPFSの特長を活かした「データ流通」ビジネスは顕在化していない。この実現に向けては、まずIoT機器からデータを正しく取り出す手法を構築することも重要である。そして、IoT機器の仕様は様々であることから、プロトコルを統一し得ないことを前提にした、自律的にデータをやり取りするシステムを構築することが重要である。これら二点について、以下に詳述する。

①真正性の確保

ブロックチェーンを使えばデータの改竄耐性は向上するが、そもそも共有されるデータが正しいかどうか（真正性）を担保することはできない。誤りなくシステムにデータを吸い上げることがOraclizeサービス（改竄無くデータをアップロードするサービス：図25参照）と呼ぶが、常にヒトが監視することが不可能なIoT機器からデータを取得する自律分散社会においては、悪意ある第三者の存在をも前提にした真正性の担保手段が必要になる。

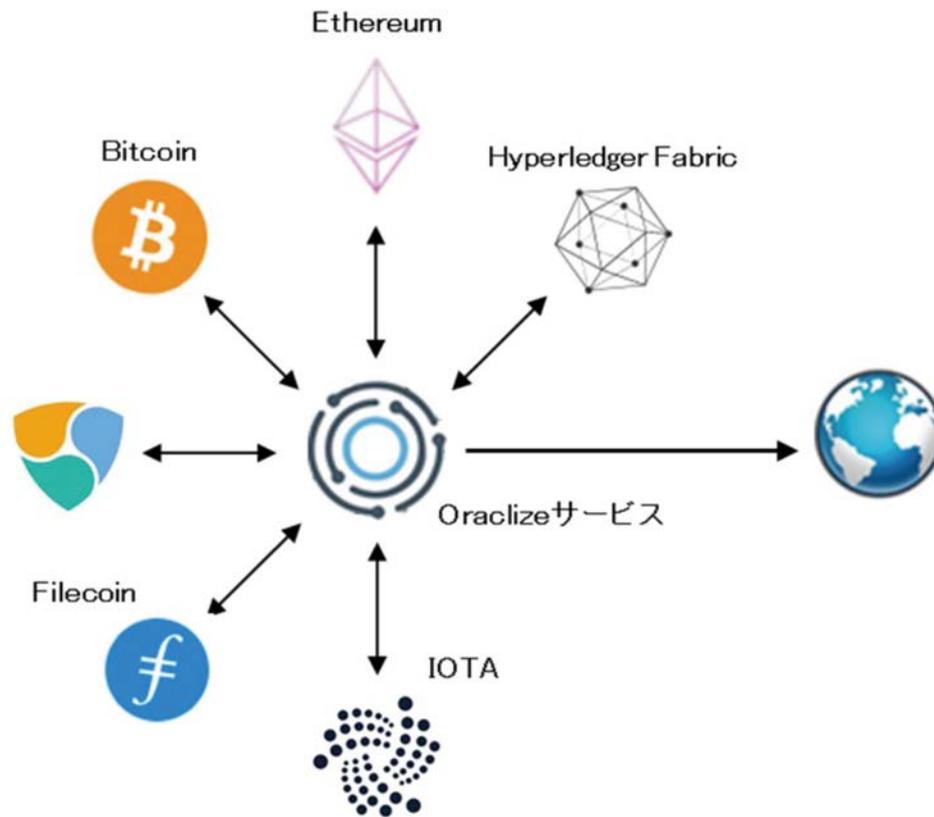


図25 Oraclizeサービス

自律分散システム分野の技術戦略策定に向けて

②インターオペラビリティ（相互運用性）

IPFSなどのファイル共有システムでは、データを分散共有するブロックチェーンとそのアクセス権（秘密鍵）を管理するシステムの二種類を協働させるのが一般的である。そのため両者を相互運用する必要が生じるが、両者でプロトコルが異なる場合は容易な作業ではない。例えばBitcoinとEthereumとを相互運用する場合、前者にスマートコントラクト機能は無いが後者には実装されている。そのため、Ethereumに記述されたスマートコントラクトをどのようにしてBitcoinに引き継ぐかを検討しておく必要がある。

さらに言えば、図26に示すように両者でコンセンサスアルゴリズムが違う場合、一方でトランザクションが承認されても、もう一方の承認を待たないと取引が完了しない。これでは早期の決済を行えず、改竄の危険性が増す等の問題点が指摘されている。

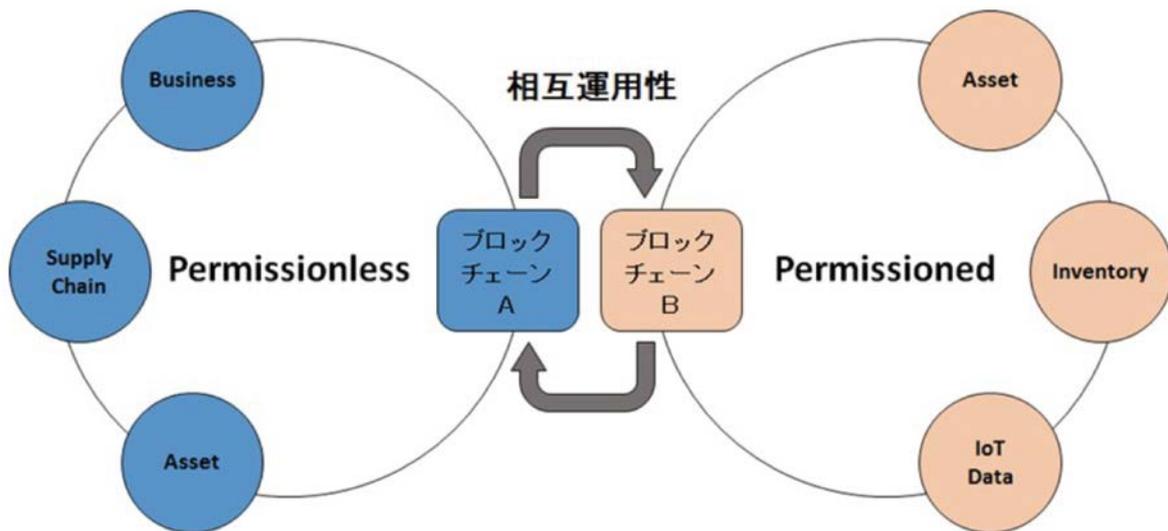


図26 相互運用性の概念図

4章 おわりに

自律分散社会実現の要素技術として「電源供給技術」、「ブロックチェーン」を取り上げ、以下の技術課題を示した。

- ①「自己発電」デバイスの開発においては、通常とかけ離れた環境ではなく「よりマイルドな環境」での発電性能を向上させることを優先し、かつデバイスが放置されることを念頭に置いた「耐環境性能」に注意を払う必要がある。
- ②「マイクロ波給電」の開発においては無線通信技術との両立と、人体に悪影響を及ぼさない給電方式を確立する必要がある。
- ③「ブロックチェーン」技術の開発では、IoT 機器のプロトコルは同じではないことを前提にインターオペラビリティを確保する工夫が必要である。そして、IPFS等の複

数のシステムを運用する場合は、データの「真正性」にまで留意した悪意の第三者に耐えうるシステムにする必要がある。

なお、上記要件はそれぞれ単独に存在するのではなく、「自律分散社会」構築には共に関連していると捉えるべきである。その理由は、一つはブロックチェーンのレイヤ構造(図27)がLayer1.5より下位が個々のプロトコルに係る領域で、最上位レイヤ(Layer3.0)は具体的なアプリケーションと位置づけられており、プロトコルの影響が「川上」から「川下」にまで及んでいるためである。つまり、ユースケースがプロトコル(合意形成方法等)を規定したり、逆にプロトコルがユースケースの拡大適用を阻む可能性があるということである。ブロックチェーンにはこのような制約があり、場合によっては「オフチェーン」等でスケーラビリティ(Layer2.0、Layer2.5)を向上させる必要が生ずる。このようにユースケース毎に最適なプロトコルを選択する必要がある点に留意すべきである。

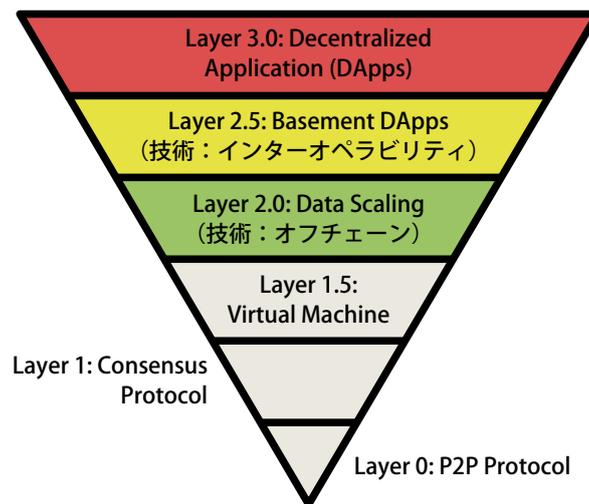


図27 ブロックチェーンのレイヤ構造

出所: Ginco Inc. の Web サイト^{※17}を基に NEDO 技術戦略研究センター作成 (2019)

※17 https://magazine.ginco.io/post/kisochishiki_blockchain_ecosystem/

自律分散システム分野の技術戦略策定に向けて

もう一つの理由は、ブロックチェーンを仮想通貨以外のフィジカルデータに適用する場合、IoT機器のスペックを考慮しなければならないためである。対象となるIoT機器の仕様は様々で、ユースケースが異なれば機器の電源供給能力や計算処理能力も大きく異なることに留意が必要である。

その意味で、全てのユースケースに適用できるアーキテクチャは存在し得ないことを前提にアーキテクチャの設計を行い、かつハードウェア (IoT 機器) に任せられる機能は、その一部移管を検討することも重要である (図28)。

そして、最終的には複数のユースケースから出てくる要求事項の共通項を抽出し、それら仕様の統一を検討すべきと考える (標準化)。個々のユースケース開発だけでは仕様の乱立を招き、普及は見込めないからである。さらに付け加えるならば、この標準化作業をスムーズに行うため市場の大きな (数量の稼げる) ユースケースから着手し、「デファクト化」を念頭に置いた開発を行うべきである。このような戦略に基づきデバイス開発を行うことで、世界に先駆けた製品のリリース、世界に受容されるアプリケーション (ソフトウェア技術) を上市できると考える。

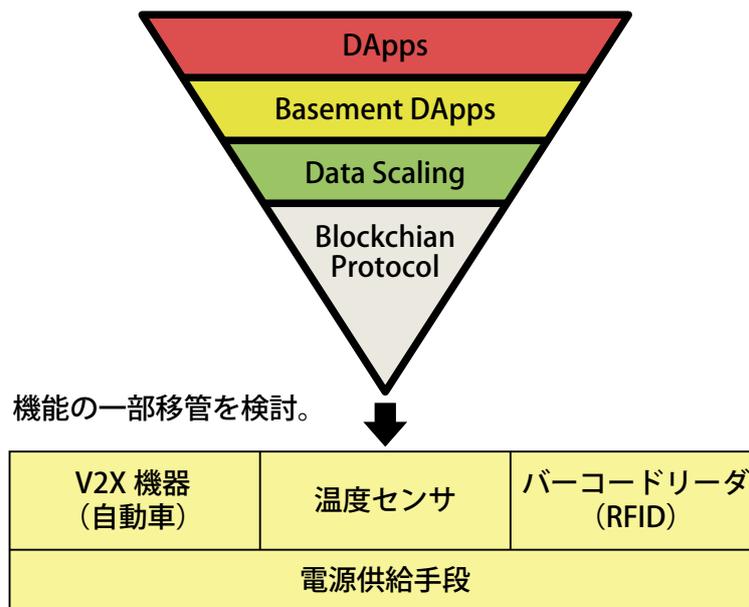


図28 CPS市場へ適用する場合のアーキテクチャ

技術戦略研究センターレポート

TSC Foresight Vol.39

自律分散システム分野の技術戦略策定に向けて

2021年2月5日発行

TSC Foresight Vol.39 自律分散システム分野 作成メンバー

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構
技術戦略研究センター (TSC)

■ センター長 岸本 喜久雄

■ センター次長 西村 秀隆

■ デジタルイノベーションユニット

・ユニット長 伊藤 智

・主任研究員 大窪 宏明 (2020年9月まで)

・研究員 村嶋 清孝

砂口 洋毅 (2020年3月まで)

有馬 宏和

・フェロー 中屋 雅夫 国立大学法人大阪大学 招聘研究員

林 秀樹 元住友電気工業株式会社 理事、フェロー

山口 佳樹 国立大学法人筑波大学 准教授

遠藤 直樹 東芝デジタルソリューションズ株式会社

平井 成興 元NEDO技術戦略研究センター ユニット長

高木 宗谷 元トヨタ自動車株式会社 理事

橋田 浩一 国立大学法人東京大学 教授

■ ナノテクノロジー・材料ユニット

・研究員 浅井 真人 (2019年9月まで)

● 本書に関する問い合わせ先
電話 044-520-5150 (技術戦略研究センター)

● 本書は以下URLよりダウンロードできます。
<https://www.nedo.go.jp/library/foresight.html>

本資料は技術戦略研究センターの解釈によるものです。
掲載されているコンテンツの無断複製、転送、改変、修正、追加などの行為を禁止します。
引用を行う際は、必ず出典を明記願います。