

2.2.3 バイオ計測・診断デバイス

(1) 研究開発領域の定義

生体由来物質（バイオ物質）の高感度検出・分析技術を開発し、バイオマーカ・ウイルス・病原菌・薬物などに適用して、計測・診断に用いるデバイスを創出することをめざす研究開発領域である。微量サンプルから特定のバイオ物質を迅速かつ簡便に抽出・分離・同定する技術、センシングデバイスの高速化・高感度化・高集積化、複数ターゲットのマルチセンシング、ウェアラブルデバイス、チップ上にヒト組織・臓器の機能を再現する Organ-on-a-Chip などの研究開発が進められている。

(2) キーワード

POCT (Point-of-Care-Testing)、ウェアラブルデバイス、バイオセンサ、非侵襲計測、 μ TAS、 μ PAD (Microfluidic Paper-based Analytical Device)、Organ (s) -on-a-Chip、バイオマーカ、生体ガス、気相バイオ計測、リキッドバイオプシー、次世代シーケンサー、BMI

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

バイオ計測・診断デバイスは、生命現象解明などの基礎研究や、医療応用・産業化、さらには感染症予防のためのキーテクノロジーとして、世界中で研究開発が競争的に展開されている。DNAの化学修飾（エピジェネティクス）、RNAの化学修飾（エピトランスクリプトーム）、ペプチドの化学修飾（翻訳後修飾）を解析するデバイスが開発され、医科学や創薬にインパクトを与えている。また、センサとマイクロ流路が1チップに集積されたアレイデバイスは、アレイ状に配置する化学種により、DNA、RNA、ペプチド、タンパク質の網羅解析を可能にし、革新的な診断デバイスを生み出している。さらに、超高齢社会に突入した日本では、生活習慣病の増大と重症化を抑制することが喫緊の課題であり、ウェアラブルデバイスを活用して日常生活のなかで検査・診断を行うことが期待されている。これらのデバイスは、大量の計測データを生み出す源泉でもあり、新たなデータマネジメントビジネスを創出する原動力になりうると期待される。

[研究開発の動向]

バイオ計測デバイスの研究開発を強力に牽引してきたのは次世代DNAシーケンサー（Next Generation Sequencer: NGS）であるが、これにCRISPRのゲノム編集技術が融合することで、RNAトランスクリプトームやプロテオミクスの開発が急激に進んでいる。特に、プロテオミクスでは、人工アプタマーを用いる SOMAmer アレイ技術、多分析プロファイリングを可能にするイムノアッセイ、超高感度 ELISA システムが開発されている。また、質量分析器と NMR の組み合わせによるメタボローム解析、質量分析器と液体クロマトグラフィーの組み合わせによるグライコミクス解析、NGS と質量分析器の融合によるマイクロバイオミクス解析が新たな潮流になりつつある。これまでのバイオ計測デバイスが1つのターゲット分析を目的としていたのに対し、多項目分析が研究開発の大きな方向性になっている。

NGS やマイクロアレイの発展によって、研究対象がヒトから植物・動物へと拡大し、農産物、水産物、畜産物のゲノム解析が急速に進んでいる。これらのゲノム情報を基盤にしたゲノム編集技術により、シスジェニックな、あるいはイントラジェニックな遺伝子組替が可能になった。また、微生物の遺伝子解析も急速に進展し、微生物を利用して農産物の品質や生産性を向上させることが可能になっている。

マイクロ流路と3Dプリンタの融合により、Organ-on-a-Chipの研究開発が進展し、1チップ上で完全に機能する臓器の創出が期待されている。Organ-on-a-Chipは薬物評価のハイスループット化や精密な薬物評価系の構築、病態のモデル化を実現する技術として期待され、単一臓器機能を集積化したものだけでなく、多数の臓器機能を連結したMulti-Organ-on-a-Chipの開発も進められている。ユニークな試みとして、米国NIHの研究センターの1つNCATSは、ISS（国際宇宙ステーション）と連携してTissue Chips in Spaceプロジェクトを進めており、微小重力環境が人体に及ぼす影響について研究を行っている。

マイクロデバイスを利用した血中循環腫瘍細胞（Circulating Tumor Cells：CTC）の解析をきっかけに、生検の代わりに血液でがん診断を行うリキッドバイオプシーのコンセプトが2010年に提唱された。CTCのほか血液に含まれるがんなどの疾病情報を持つものとして、循環遊離DNA（Cell-Free DNA：cfDNA）、循環腫瘍DNA（Circulating Tumor DNA：ctDNA）、エクソソーム、循環遊離RNA（Cell-Free RNA：cfRNA）、マイクロRNA（mRNA）などがあり、近年は、それらを対象とした回収・解析デバイスの開発が進められている。なかでもエクソソームは含まれる情報量が多いため、血中からのエクソソーム回収・解析デバイス・システムの開発が世界中で行われている。

新型コロナウイルス感染症のパンデミックにより、世界で新型コロナウイルス検出デバイスの開発が活発に行われている。PCR検査よりも簡便かつ短時間で、イムノクロマトよりも精度の高いPOCTデバイスが求められており、血糖値センサのように指先の穿刺により採血して試料とすることが可能なPOCTデバイスの研究開発がさかんになっている。また、紙を基材にしたMicrofluidic Paper-based Analytical Device（ μ PAD）とスマートフォンを組み合わせたシステムが多数報告されている。有効なデバイスフォーマットが構築されれば、現存あるいは今後新たに問題となるウイルスの検出にも適用可能になる。

ウェアラブルセンサの研究開発が世界中で行われ、産業化も進んでいる。例えば、糖尿病患者を中心に、血糖値計測は採血の必要なSMBG（血糖自己測定）からウェアラブルセンサへの移行が急速に進んでいる。研究段階のものでは、汗中のナトリウムイオン、カリウムイオン、塩化物イオン、グルコース、ATP、乳酸、pHなどの生体情報を同時かつ経時的にモニタリング可能なデバイスが論文等で多数報告されている。このような多成分の同時計測によって、近年急激に増加している熱中症のリスク管理などが可能になると考えられ、実用化が期待されている。また、長時間・長期間のモニタリングを可能にするためには、電源を含むセンサデバイスのウェアラブル化が重要であり、汗に含まれる乳酸やグルコースを利用したバイオ燃料電池の開発が活発に行われている。

（4）注目動向

【新展開・技術トピックス】

細胞内分子の計測

国際的な共同研究であるHuman Cell Atlasプロジェクトに代表される細胞と細胞内の計測は、主に、性能拡張された次世代DNAシーケンサー（NGS）の開発、質量分析器とNMRの融合技術開発、NGSと質量分析器の融合技術の開発にもとづいて進められている。これらの新技術に共通するのは、大量の計測データの産生と、AIによるビッグデータ処理である。特に、プロテオミクスでは、人工アプタマーを用いたSOMAmerアレイ、多分析物プロファイリングを行うイムノアッセイアレイ、超高感度なELISAの開発にみられるように、AIと融合した多項目分析技術の開発が顕著である。

2.2

俯瞰区分と研究開発領域 ライフ・ヘルスケア応用

培養食品

ヒト以外の遺伝子解析、ゲノム編集技術と3Dプリンタ技術が融合することで、Organ-on-a-Chipがチップ上で食品を培養する技術へと急速に発展している。現在は、培養肉の技術開発に焦点が当てられており、豚から細胞を採取し、細胞株や培地で産生した後、肉の細胞・組織を成長させるという3工程で培養肉を製造し、そのまま出荷するサービスモデルが検討されている。この技術は従来の家畜や水産物の環境を変え、食肉のサプライチェーンを変革する大きなポテンシャルを持つとともに、食肉の栄養素の制御も可能になると期待される。中国、英国、米国で開発が進んでいる。

ブレインマシンインターフェイス (BMI)

有機半導体デバイスを用いたフレキシブルデバイスによって、ウェアラブルな心電計や小型・軽量・高精度な脳波計が開発され、この数年間でBMIに関連するバイオ計測技術が大きく進展している。いくつかのBMI方式が提案されているが、モータ駆動する義手・義足の制御が主な研究開発課題であり、義手・義足を接続した筋肉から電気信号 (EMG) を読み取る技術や、外科的に埋め込まれたチップを通して脳から直接電気信号を読み取る技術の研究が行われている。一方、脳波計測による疾病診断デバイスの開発も進められている。

DNAストレージ

IoTとAIの急速な社会浸透により、データ量が指数関数的に増加している。しかし、大量に生産されるデータのうち、日常的に使われるのは全体の約20%であり、約80%はほとんど使われないコールドデータになっている。セキュリティの観点から、コールドデータ保存技術の開発は重要な課題であり、電子的なストレージ手段を上回る潜在的な可能性があるとして、DNA鎖を用いた記憶素子の研究が始まっている。4種類の塩基分子からなるDNAは非常に情報密度が高く、5.5ペタビットのエンコードデータを1mm³に格納でき、1kgのDNAで世界中の現存データを全て仮想的に保存できると推定されている。さらに、DNAは化学的に安定であり、何千年も経ってからでも読むことができるため、最終的に磁気テープに代わる長期保存技術になると期待されている。

スマートトイレ

疾病の予防・予測・早期発見のため、個人の生体情報を経時的にモニタリングできる技術が求められている。重要なのは、「低コスト」、「非侵襲」、「無意識 (知らない間に)」であり、このような測定が可能なシステムとして、以前からトイレが注目されている。国内ではLIXILが大便の形状や排便管理をAIによって一元管理するトイレシステムを開発している。また、TOTOとパナソニックは、尿と大便の成分分析、簡単な生化学情報などが計測できるトイレを開発している。中国の幾何科技公司は、心疾患のモニタリングなどが可能なトイレを開発している。さらに、最近スタンフォード大学のグループは、圧力/モーションセンサ、尿の流れやその成分分析をする分析試験紙とビデオカメラ、大便の形状や流動性を測定するコンピュータビジョンと機械学習アルゴリズム、個人識別のための指紋スキャナが搭載されたトイレシステムを開発した。このシステムでは大規模な生体情報データを習得できるため、今後AIや機械学習と組み合わせることで、より高度な生体情報を取得可能な診断システムとなる可能性が高い。

2.2

俯瞰区分と研究開発領域
ライフ・ヘルスケア応用

[注目すべき国内外のプロジェクト]

米国 NIH では、2003年に始まった ENCODE (Encyclopedia of DNA Element) プロジェクトの継続プロジェクトとして、ENCODE4 プロジェクトを2017年に開始した。ヒトとマウスのゲノムの全ての機能要素を特定しようとするもので、ENCODEでは用いられなかった新しいアッセイを採用し、疾患に関連するものを含む幅広い多様なサンプルを対象にしている。新しく取得された全てのヒト生体サンプルについて、データが無制限に共有されることとなっている。

米国 NSF では、2018年に開始した Smart and Connected Health プログラムにおいて、情報科学やデバイス工学などの学際研究により、健康と医療に関する課題解決に向けたハイリスク、ハイリターンな研究開発を進め、人とデータ、システムの一体化をめざしている。また、2020年に開始した Biosensing プログラムでは、環境モニタリングや新規病原体の監視を行うセンシング技術、新しい病原体を検出可能なセンサを診療所や幅広い地域に迅速に展開可能にするプラットフォーム技術、次のパンデミックを防ぐ複合センシング技術などをめざし、工学、ライフサイエンス、ITの境界領域から生まれるイノベーションによって、生体物質や環境のセンシング、モニタリングを行う研究を支援するとしている。

米国 DARPA では、脳・神経計測に関連する複数のプログラムが実施されている。ElectRx (Electrical Prescriptions) プログラムにおいて、末梢神経系の異常シグナルをモニタリング・調整する低侵襲のバイオインターフェイスを開発し、自己免疫疾患などの治療やメンタルヘルス向けの医療デバイス・システムの構築をめざしている。RAM (Restoring Active Memory) プログラムでは、外傷性脳障害により記憶を喪失した患者の回復を主な目的に、インプラント式のワイヤレスインターフェイスの開発を目指しており、埋込デバイスの動物実験を進めている。N³ (Next-Generation Nonsurgical Neurotechnology) プログラムでは、健常者向けの高性能な双方向の脳マシンインターフェイスの開発を目的に、外科的移植を必要としない非侵襲の統合デバイスの開発を目指している。N³ プログラムは世界のBMI研究を牽引している。

EUではHorizon 2020の枠組みの中で、さまざまなプロジェクトが実施されている。Lab-in-a-patch for PKU self-assessment プロジェクト (スペイン) では、フェニルケトン尿症患者向けに、汗中のフェニルアラニン計測用パッチ型センサの開発を行っている。Bio Ring Diagnostics プロジェクト (オランダ) では、低コストに結核診断を行うためのフォトニック集積回路の研究開発を進めている。MOLOKO (Multiplex phOtonic sensor for pLasmonic-based Online detection of contaminants in milk) プロジェクト (イタリア、スイス、ドイツ、フィンランド、ベルギー、オランダ、ハンガリー) では、牛乳に含まれる抗生物質や微生物毒素など10の成分をマルチセンシングするオプトプラズモニック-マイクロ流路センサを開発している。GREENSENSE プロジェクト (スペイン、オーストリア、イスラエル、スウェーデン、ヨルダン、ドイツ、ベルギー、スイス) では、ナノセルロースからなる薬物検知用のPOCTデバイスの開発を進めている。

オーストラリアのニューサウスウェールズ州 Health Pathology Point of Care Testing プログラムでは、POCTデバイスの心疾患、糖尿病、感染症の他、コロナウイルス診断への活用を目的に、180以上の都市部、地域、地方の病院に600以上のPOCT機器を設置して世界最大規模の評価実験を実施している。

日本では、JST 未来社会創造事業「食・運動・睡眠等日常行動の作用機序解明に基づくセルフマネジメント」において、日常行動の生体における作用機序を解明し、健康維持のためのセルフマネジメントを広く普及させることをめざして研究開発が進められている。効果的行動のための科学的エビデンス形成に向けて、バイオ計測に関連する研究テーマに支援が行われている。NEDO「IoT社会実現のための革新的センシング技術開発」においては、既存技術では実現困難な超微量の検出や過酷環境下での動作、非接触・非破壊での測定等を可能にする革新的センシングデバイスの開発が進められており、複数のバイオ計測に関するテーマを支援し

2.2

俯瞰区分と研究開発領域 ライフ・ヘルスケア応用

ている。AMEDの医療分野研究成果展開事業（先端計測分析技術・機器開発プログラム）では、新しい予防、計測、診断、治療を可能にする革新的医療機器の実用化への導出をめざし、将来の医療につながる新しい原理や革新的技術にもとづいた技術・機器・システムや、新たな診断・治療技術を創出するためのターゲット（マーカや症状）の探索解明を目的とした計測分析技術の開発を支援している。さらに、内閣府が主導するムーンショット型研究開発事業では7つの目標が設定されているが、そのうち「目標2：超早期に疾患の予測・予防をすることができる社会を実現」と「目標7：主要な疾患を予防・克服し100歳まで健康不安なく人生を楽しむためのサステナブルな医療・介護システムを実現」の2つがバイオ計測・診断デバイスに深く関連している。

（5）科学技術的課題

次世代DNAシーケンサー（NGS）の開発によってDNAとRNAの計測法は進展しているが、それ以外の生体分子の計測技術には、さらなる高感度化に向けて大きな障壁が存在している。タンパク質、代謝産物、脂質などは、DNAやRNAのように増幅して検出することができず、違いの検出が極めて困難である。また、タンパク質のもつ不均一性と、構成するアミノ酸の数の多さから、タンパク質は核酸を構成するヌクレオチドに比較して複雑であり、これがプロテオミクスをヌクレオチドベースのオミクスよりも本質的に難しくしている。従来のプロテオミクスは質量分析にもとづく計測法が用いられているが、定量性や感度などに課題があり、その解決法の1つとして1分子計測技術が期待されている。1分子プロテオミクスに向けた研究開発が新しい潮流になりつつある。

血液中のバイオマーカーを検出するためには血球分離操作が必要であり、真に有用なPOCTデバイスの実現に向けて、血球分離および血漿の定容機構が組み込まれたデバイスの開発が求められている。すでに開発されたデバイスのうち、一部は実用化されているが、精度・信頼性・汎用性の高い機構の開発が望まれる。

健康維持・疾病予防のために日常生活の中で検査・診断を行うには、非観血的な計測技術が不可欠であり、光学技術などを用いた非侵襲計測や、生体ガスや涙液、唾液などの非侵襲サンプルでの計測が可能なセンシング技術の開発が必要である。また、健康診断未受診者は死亡リスクが高まることから、医療機関以外で簡単に検査・診断を行い、疾患を早期発見できる小型・高性能なデバイスの開発が求められている。計測機器の日常利用においてはバッテリー寿命が大きな課題であり、高性能な二次電池に加え、エネルギーハーベスティング技術の研究開発が期待される。さらに、新型コロナウイルス感染症によってクローズアップされた課題として、ヒト体内にあるウイルスなどの病原体のみならず、空気中のウイルスの検知・モニタリングを行う気相バイオ計測の研究開発が重要になっている。

圧力センサや温度センサなどの物理センサが内蔵された腕時計型のウェアラブルセンサは以前から市販されており、心拍、血圧、体温などのバイタル信号測定が健康管理やスポーツ分野で利用されるようになってきている。一方、汗に含まれる化学物質の測定が可能なウェアラブルセンサは実用化にいたっていない。これは汗（液体）をセンサ測定部に導入する機構やそのインターフェースの完成度に問題があるためと考えられ、それらの開発が求められる。

ブレインマシンインターフェイス（BMI）には基礎研究段階のものから実用間近のものまであり、解決すべき問題も多い。例えば、非侵襲的な手法では、多くのアプリケーションで求められるニューロンスケールの解像度がまだ達成できていない。一方、高解像度の読み取りが可能な埋め込み型デバイスについては、デバイスの侵襲性が研究開発を妨げている。数百ニューロン未満の解像度で神経脳活動を記録できる技術では、頭蓋骨にデバイスを埋め込む必要があり、ヒトを対象とする研究開発に対して倫理的な問題を提起すると同時に、

埋め込みに伴う外科的処置から生じる感染や合併症という深刻なリスクを抱えている。

(6) その他の課題

高スループット・低コストで大量のゲノム情報を産生する次世代DNAシーケンサー (NGS) の開発や、多くの人がビッグデータにアクセスして利用することを可能にしたAIの発展は、さらなる計測・診断デバイスの研究開発、新産業を生み出す源泉となっているが、一方で、ヒトのゲノム情報やオミックス情報を取り扱う上での倫理的な問題が顕在化しつつある。また、培養肉の研究開発が加速しているが、その安全性を担保する必要が生じている。さらに、ウェアラブル計測において、利用者は個人情報漏えい・プライバシー侵害に対する不安に晒される恐れがある。これらの問題に対して、技術面に加え、法規制を含む検討を行い、社会の理解を得ることが重要といえる。

バイオ計測・診断デバイスの開発には医工連携が必須であるが、わが国は医工の連携・協力を促進するための環境が十分に整っておらず、米国・欧州・アジア諸国に比べて医工連携のハードルが高くなっている。また、医学界と産業界の連携が国内には少なく、共同研究の枠組みも十分でない。医工連携を促進するための仕組み、企業の積極的な参画を可能にするシステムや施策の検討が求められる。

BMIは、義手・義足の制御に加えて、アルツハイマー病等の患者の生活をサポートする技術への展開が期待されるが、一方で、このような技術は軍事技術にも発展する可能性がある。実際に、2018年に米国DARPAが開始したN³プロジェクトは、戦場での脳間通信や、神経接続を介した機器の制御などを含んでいる。デュアルユースな研究開発が挑戦的な研究課題を促進する事例は多く、わが国でも研究開発体制の検討が必要と考えられる。

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> マイクロデバイス分野の重要な国際会議であるμTASやMEMSにおける発表採択件数は、依然としてトップレベルを維持しているが、査読付き論文数は米国と中国に大きく水をあけられている。研究開発能力 (研究費・人材) の面で、米国や中国との差が開いている。 大学・公的研究期間を中心に、医療計測を目的としたデバイス・材料・計測技術の研究開発が進められている。ただし、AI等の情報技術との融合が立ち後れており、総合的なシステム化についても十分とは言えない。
	応用研究・開発	○	→	<ul style="list-style-type: none"> JSTのA-STEPやAMEDにより医療機器開発に関連するプロジェクトが進められている。医療ニーズを明確にした循環器系、代謝系、神経系等の計測技術の開発が増加する傾向にある。 医療機器企業や電気関連企業を中心に、POCTデバイスやウェアラブルセンサの開発が行われている。 化学系企業が自社のシーズを利用したバイオ計測・診断デバイスの開発に取り組んでいる。
米国	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> 政府系 (NIH、NSF、DARPA、DOEなど) だけでなく、民間の財団 (ハーワード・ヒューズ医学研究所、ビル&メリングゲイツ財団やチャン&ザッカーバーグ財団など) が豊富な研究資金を投入し、大学の研究を加速している。 National Nanotechnology Coordinated Infrastructure (NNCI) が全米の16拠点に微細加工装置群を整備・提供しているため、大学ランキングの上位大学だけでなく、多くの大学でレベルの高い研究が行われている。

	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> 大学や研究機関における応用研究を基盤に多くのベンチャー企業が創業し、バイオ計測・診断デバイスの実用化を進めている。 医工連携の環境が整備され、研究開発のスピードが速い。実用化されたデバイス・技術が多数ある。積極的に製品化が進められている。 大手医療機器企業（ジョンソン・エンド・ジョンソン、アボット、GEヘルスケア、ベネディクト・ディッキンソンなど）では研究開発がさかんであり、ベンチャー企業のM&Aも積極的に行われている。
欧州	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> オランダ、ドイツ、英国、スイス、フランス、スウェーデンなどを中心にレベルの高い研究が行われている。近年、スペインもバイオ計測・診断デバイスの研究に力を入れている。 欧州として重点研究機関（大学・研究所）へ研究費を集中することで、高い研究レベルを維持している。各国間の共同研究を支援するシステムが構築されており、活発に交流が行われている。
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> フィリップスやシーメンスヘルスケアなどの大手医療機器企業では研究開発がさかんであり、ベンチャー企業のM&Aも積極的に行われている。 製薬企業がOrgan-on-a-Chip研究に着手し、実用化をめざした研究開発が行われている。 バイオメディカル分野に多くのベンチャー企業があり、診断デバイスの産業化をめざした研究開発が活発である。
中国	基礎研究	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ほぼ米国に匹敵する研究開発費を投入し、研究開発能力が飛躍的に向上している。バイオ計測・診断デバイス分野の論文数も大幅に増加しており、量・質ともにレベルが上がっている。 中国科学院、精華大学、北京大学、上海交通大学などの有力大学に加え、廈門大学、復旦大学、武漢大学なども高いレベルの研究を行っている。
	応用研究・開発	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> 国の政策として、生理状態や活動量をモニタリングするセンサ技術に投資している。 臨床試験のハードルが低いこと、市場が大きいことから、バイオメディカル分野の研究が増加している。各国の計測機器メーカーが進出し、中国の大学との共同研究開発をさかんに行っている。 多くの企業では独自性は低く、他社製品の類似品が多いが、市場投入のスピードは速い。
韓国	基礎研究	○	→	<ul style="list-style-type: none"> ソウル大学、KAISTなどの大学、研究所において、POCTデバイス開発がさかんである。 政府が作成した第3次National Nanotechnology Map(2018-2027)において、センサ、バイオチップ、IoTなどの将来のコア技術への研究開発投資を強化するとしている。
	応用研究・開発	○	↘	<ul style="list-style-type: none"> バイオ計測・診断デバイス開発をリードしてきたサムソンが、創薬研究にシフトしている。中堅企業・ベンチャー企業の開発はさかんである。

(註1) フェーズ

基礎研究：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状 ※日本の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価

◎：特に顕著な活動・成果が見えている

○：顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3) トレンド ※ここ1～2年の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

- ・ バイオ材料 (ナノテク・材料分野 2.2.1)
- ・ ヘルスケアIoT (ウェアラブル・生体埋め込み計測) (ライフ・臨床医学分野 2.1.9)

参考・引用文献

- 1) C. C. Campa et al., "Multiplexed Genome Engineering by Cas12a and CRISPR Arrays Encoded on Single Transcripts", *Nature Methods* 16, no. 9 (2019) : 887-893. doi : 10.1038/s41592-019-0508-6
- 2) Y. Eshed and Z. B. Lippman, "Revolutions in Agriculture Chart a Course for Targeted Breeding of Old and New Crops", *Science* 366, no. 6466 (2019) : 705. doi : 10.1126/science.aax0025
- 3) A. J. Capel et al., "3D Printing for Chemical, Pharmaceutical and Biological Applications", *Nature Reviews Chemistry* 2, no. 12 (2018) : 422-36. doi : 10.1038/s41570-018-0058-y
- 4) S. Nagrath et al., "Isolation of rare circulating tumour cells in cancer patients by microchip technology", *Nature* 450 (2007) : 1235-1239. doi : 10.1038/nature06385
- 5) Klaus Pantel and Catherine Alix-Panabières, "Circulating tumor cells in cancer patients : challenges and perspectives", *Trends in Molecular Medicine* 16 (2010) : 398-406. doi : 10.1016/j.molmed.2010.07.001
- 6) Y. Liu, M. Pharr and G. A. Salvatore, "Lab-on-Skin : A Review of Flexible and Stretchable Electronics for Wearable Health Monitoring", *ACS Nano* 11 (2017) : 9614-9635. doi : 10.1021/acsnano.7b04898
- 7) R. M. Torrente-Rodriguez et al., "Investigation of Cortisol Dynamics in Human Sweat Using a Graphene-Based Wireless mHealth System", *Matter* 2, no. 4 (2020) : 921-937. doi : 10.1016/j.matt.2020.01.021
- 8) Ha Uk Chung et al., "Skin-interfaced biosensors for advanced wireless physiological monitoring in neonatal and pediatric intensive-care units", *Nature Medicine* 26 (2020) : 418-429. doi : 10.1038/s41591-020-0792-9
- 9) M. S. Arshad et al., "Tissue Engineering Approaches to Develop Cultured Meat from Cells : A Mini Review", *Cogent Food & Agriculture* 3, no. 1 (2017) : 1320814. doi : 10.1080/23311932.2017.1320814
- 10) M. A. Lebedev and M. A. L. Nicoletis, "Brain-Machine Interfaces : From Basic Science to Neuroprostheses and Neurorehabilitation", *Physiological Reviews* 97, no. 2 (2017) : 767-837. doi : 10.1152/physrev.00027.2016
- 11) A. Extance, "How DNA could store all the world's data", *Nature* 537, no. 7618 (2016) : 22-24. doi : 10.1038/537022a
- 12) C. N. Takahashi et al., "Demonstration of End-to-End Automation of DNA Data Storage", *Scientific Reports* 9 (2019) : 4998. doi : 10.1038/s41598-019-41228-8
- 13) Seung-min Park et al., "A mountable toilet system for personalized health monitoring via

the analysis of excreta”, *Nature Biomedical Engineering* 4, no. 6 (2020) : 624-635. doi : 10.1038/s41551-020-0534-9

2.2

俯瞰区分と研究開発領域
ライフ・ヘルスケア応用