

「持続可能な社会の実現」領域

研究開発課題名：「CFRPの疲労劣化の機構解明と余寿命推定法の確立」



研究開発代表者：荒井 政大（名古屋大学 教授）

＜課題概要＞

複合材料の一種である炭素繊維強化プラスチック(CFRP, Carbon Fiber Reinforced Plastics)は、母材であるプラスチック樹脂と強化材である炭素繊維の組み合わせで構成され、高強度・軽量性といった特徴を有しています。このため、省資源・省エネルギー化を目指してさまざまな産業分野で構造部材としての展開が有望視されていますが、使用に伴う疲労や劣化が破損・破壊に及ぼす影響を定量化できていないことから、安全性・信頼性確保のために強度余裕を過剰に確保した設計をせざるを得ず、軽量であることのメリットを十分に活かしていないケースがあります。また、疲労や劣化による変化を詳細に把握できていないことから、一度使用した製品・部品に残された機能や寿命の高精度な評価ができないため、品質保証が難しく、継続使用・再使用が進んでいません。

持続可能な社会の実現のためには、製品の長期使用やリサイクルを前提とした設計が必要です。CFRPに代表される複合材料についても、信頼性を担保しながら長期に使用し、本来の高強度・軽量などの特性を最大限有効に活かすことが課題となっています。この課題解決のためには、複合材料における疲労・劣化のメカニズムを明確にし、高精度な余寿命推定を可能にすることで、安全性が担保可能な範囲で限界まで使い続ける技術の構築が必要となります。

本研究開発課題の探索研究期間には、異なる負荷を加えた共通試験体を、様々なミクロな観察手法を用いて現象を観察し、エントロピー（熱的な乱雑さを表す物理量）の変化、比熱・熱伝導特性の変化、電子スピン量（分子レベルでの結合状態を示す値）の変化とCFRPの疲労・劣化状態が良い相関を持つことを明らかにしました。また、分子動力学のシミュレーションにより、ナノ、ミクロ、メゾのスケールにわたる劣化をエントロピーで記述するモデルの構築を進め実験結果と整合することを確認しました。さらにメゾからマクロな損傷の発生から破壊への現象を詳細に調べ、その進展を記述するモデルを構築し、精度良く余寿命推定ができる可能性を示しました。本格研究ではCFRPが疲労・劣化によりナノ・ミクロな損傷からマクロな破壊に至る現象を記述する統合モデルを構築します。併行して、従来困難であったCFRPの疲労・劣化診断技術を確立し、得られた損傷パラメータをデジタルツインのシミュレーションにインプットすることで、高精度な余寿命推定技術を実現します。これにより損傷パラメータをモニターしながらCFRPを安全にその寿命まで使い続けることや、疲労・劣化を想定した限界設計により更なる軽量化が期待できます。さらには軽量化、耐久性を向上させた新しい複合材料開発にフィードバックすることで、省エネルギー化に貢献し持続可能な社会の実現を推進します。

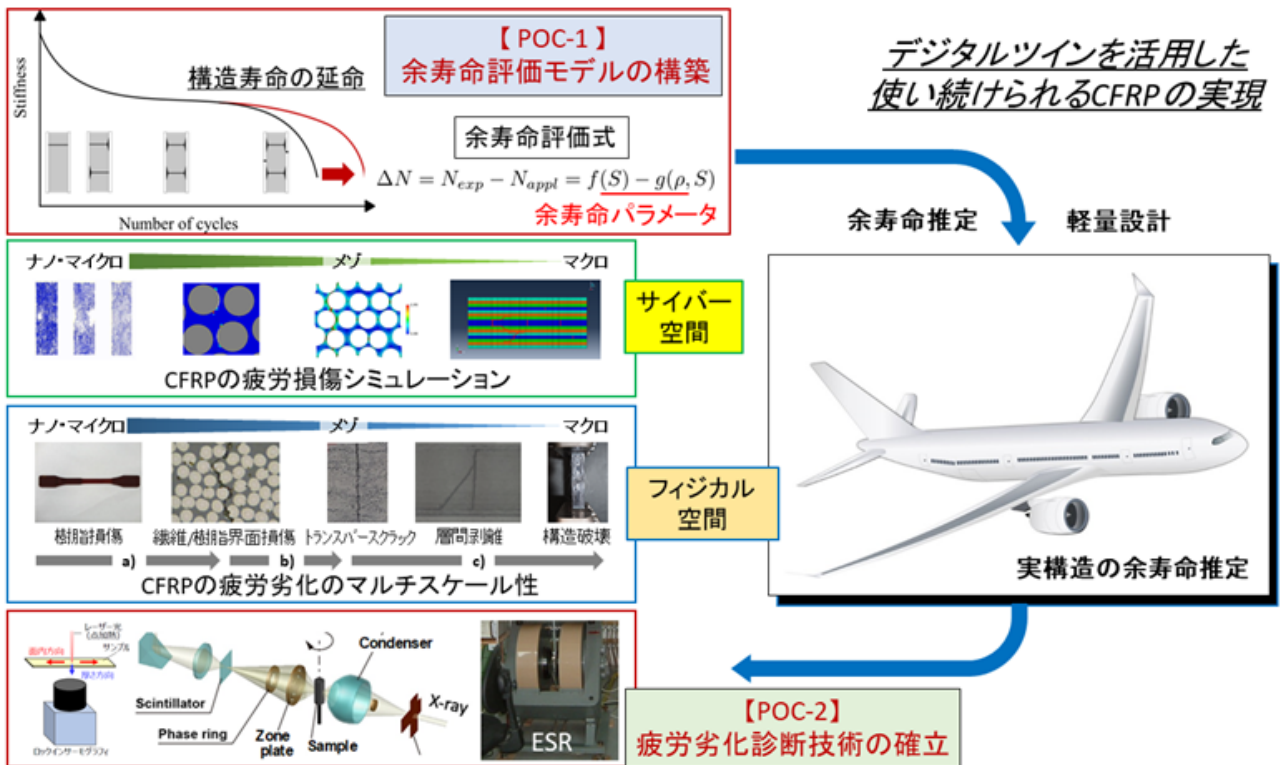


図 研究目標と検討内容の概念図

研究開発課題名：「健全な社会と人を支える安全安心な水循環系の実現」

研究開発代表者：田中 宏明（京都大学 名誉教授）



### <課題概要>

水は地球上のすべての生命の源であり、日常生活には欠かせない資源です。海、川、湖沼などでの水浴や親水活動により環境水を直接利用するほか、水道水、農産物、水産物などを介しても恩恵を受けています。また、排水は下水処理施設で処理された後、河川、湖沼、海域などの水環境へと排出されており、水は人や社会の活動と水環境の間で循環しています。

一方で、高度な都市化や人口集積などにより、水循環系（図）における化学物質や細菌・ウイルスなどの健康リスクの発生源や全体像が明確ではない状態にあります。また、将来深刻となる薬剤耐性菌への環境も含めた対応も世界的な課題となっています。さらに、気候変動の影響により都市豪雨が多発し、処理が不十分な排水が排出される危険性が高まっています。このような課題によって、私たちは直接・間接的に水に関わる健康リスクに晒されていますが、見えないこともありその認識が低いままです。

各国ではバイオリスクの環境基準や排水規制を厳しくしている一方で、日本の大腸菌群数の排水規制は1938年に定められた値のままで、2022年に半世紀ぶりに環境基準を大腸菌群数から大腸菌数に変更する段階です。病原微生物や薬剤に関しては排出規制がなく、世界的に見ても水循環系の健康リスクへの対応が遅れていると言わざるを得ない状況です。このため、現状の水インフラシステムでは、水利用にあたっての健康リスクをゼロにすることができない状況にあります。

そこで本課題では、ウイルス・病原細菌・薬剤耐性菌・化学物質などの健康リスクの発生源（重要管理点）を特定し、リスク評価に基づく水処理技術を導入し、リスクコントロールを行うことで、安全・安心な水利用の実現を目指します。探索研究では、現地調査により水循環系の健康リスクの低減のために下水処理施設・病院施設・畜産施設が重要管理点となりうることを明らかにしました。また、排水・浄水処理それぞれに適した水処理技術を開発し、従来技術よりも高性能・低コスト化できる可能性を提示しました。さらに、近年世界的に注目を集める下水疫学にも取り組み、下水中の新型コロナウイルスの検出に成功し、従来技術の100倍の感度で検出する方法を確立しました。また、札幌市、京都市などで実測データを蓄積することで感染動向との関連性を実証しました。

本格研究においては、検出技術の改良により、様々な地域での健康リスク実態を解明するとともに、健康リスク評価システムの開発と自動化によって、重要管理点を含めた水循環系全体におけるリスク実態を迅速に把握することを目指して研究開発を推進します。特に下水疫学による公衆衛生情報提供については、喫緊の社会的ニーズを満たすよう、順次社会実装を進めます。また、水処理技術の改良により、合理的に許容できるレベルまで排水中の健康リスク物質を低減すること、および産官学の連携強化によって研究成果を水インフラシステムへ導入し、水処理システムの高性能化・低コスト化を目指します。これらの成果により、安全・安心な水インフラが整備された健全な水循環系を世界に先駆けて構築し、誰もが健全な水資源を享受できる未来社会の実現に貢献します。



図 本課題が目指す安全・安心な水循環系を実現できる社会

研究開発課題名：「ヒト感染性ウイルスを迅速に検出可能なグラフェンFET  
センサーによるパンデミックのない社会の実現」



研究開発代表者：松本 和彦（大阪大学 産業科学研究所 特任教授）

#### <課題概要>

新型コロナウイルス感染症（COVID-19）は、世界中でパンデミックが続いており、政治、経済に強い影響を与えています。コロナウイルスの存在を前提にしながら、制限無く移動ができ、自由に人と会える・集える、経済活動ができる社会の実現が望まれますが、現状の対策では人々の行動を制限せざるを得ない状況が続いています。ウイルスを見つける、環境を清浄化する、身を護るため、科学技術イノベーションによる対策のアップグレードが必要です。

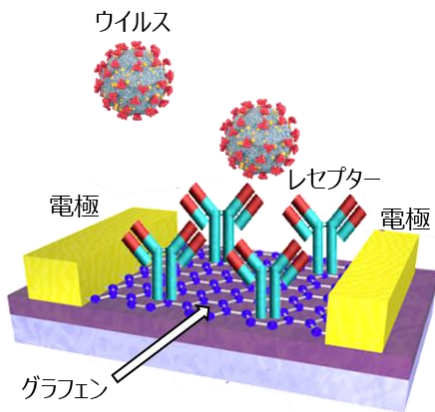
その中でもウイルスを見つける技術は、清浄化する、護る技術の効果を高めるためにも重要です。感染者を発見するために現在使われている方法として抗原検査とPCR検査が挙げられます。抗原検査キットはポータブルで短時間に検査できますが、PCR検査に比べて検出感度が劣ります。一方、PCR検査は特別な機器が必要で、数時間の検査時間を要します。両者の良さを併せ持つ、短時間かつ高感度に様々なウイルスを検出する技術が求められており、研究開発が進められています。

本研究開発課題では、研究開発代表者が世界に先駆けて提唱したグラフェンFET<sup>注</sup>)を使ったバイオセンサーを用いて、迅速・簡便、特別な機器を必要としない、広く世の中で使われる技術の実現を目指します。

半導体デバイスであるグラフェンFETの表面に、レセプターと呼ばれるウイルスを捉える物質を結合してバイオセンサーを構成します。ウイルスの捕捉状態があたかもスイッチのように働いて、電気信号としてウイルスの存在を知ることができます。探索研究では、レセプターに抗体を用いることにより、不活化した新型コロナウイルスを高感度に検出することに成功しました。本格研究では、デバイスの高性能化、安定化を図るとともに、誰でも、どこでも、簡単に扱えるウイルス検出システムを実現します。また、2次元にグラフェンFETを配置したアレイデバイスを開発し、異なるグラフェンに様々なレセプターを結合することで、一度に多種類のウイルスが検出できるシステム開発を目指します。このシステムが実現できると、新型コロナウイルスとインフルエンザウイルスを同時に検出することも可能になります。本研究開発により生活空間に潜む様々なウイルスを迅速に見つけることを可能とし、安全・安心で快適な社会の実現に貢献します。

注) グラフェンFET：電気伝導や熱伝導に優れた最先端材料グラフェン（原子一つ分の厚みの炭素のシート）を用いた超高感度トランジスター

## グラフェンFETセンサー



レセプターがウイルスを捉えると  
スイッチのように働いて電極間に  
電流が流れる

## パンデミックのない社会の実現



図 グラフェンFETセンサーによるパンデミックのない社会の実現

研究開発課題名：「酸性水を用いた微細藻類の培養および利用形態の革新」

研究開発代表者：宮城島 進也（情報・システム研究機構 国立遺伝学研究所 教授）



### <課題概要>

微細藻類は、陸上植物に比べて高い光合成能（CO<sub>2</sub>固定能）を有し、農耕地として利用できないような土地でも培養できる場合もあり、高濃度のタンパク質およびビタミン類を含有することなどから、新たなグリーン産業の素材として注目され、その産業利用が進められています。

微細藻類を比較的安価に生産するための屋外開放培養において、他の微生物（特に藻類捕食者）の混入増殖が頻繁に発生し生産が不安定であること、培養に利用される淡水が世界規模では不足しており培養設備の立地制限が生じること、培養密度が低く藻体の回収コストが比較的高くなることなどの問題により、微細藻類の生産コストは高く（1, 200以上/kg乾燥藻体）、その利用は高価なサプリメントや化粧品原料等に限定されています（2万t/年・世界）。また、育種やゲノム編集などの品種改良法が微細藻類産業では確立していないため、新規利用形態の開拓が困難となっています。

本研究開発課題では、国内各地の硫酸酸性温泉より微細藻イデユコゴメ（出湯小米）類の培養株を樹立し、これらの中から、すでに産業利用されている微細藻類よりも高タンパク・高ビタミンの株を発見しました。品種改良により、細胞壁が無く内容物抽出および動物による消化が容易であり、酸性化した淡水でも海水でも培養できる株を作出しました。また、培養の超高密度化（既存産業の25倍）に成功し、酸性条件のため、他の微生物の混入増殖無く屋外開放培養できることを実証しました。さらに、イデユコゴメにおけるゲノム編集技術を開発しました。

本格研究では上記の成果を発展させ、微細藻類の製造コストの大幅削減（POC1）、微細藻類を主原料とする水産養殖用飼料の開発（POC2）微細藻類の細胞工場化による新規利用形態（家畜および人類の健康促進のための素材、家畜用の食べるワクチン）の創出（POC3）を行います。これらの開発により、微細藻類の利用規模を拡大し、その有効活用によるCO<sub>2</sub>削減、安定した食糧生産、人や動物の健康増進を目指します。

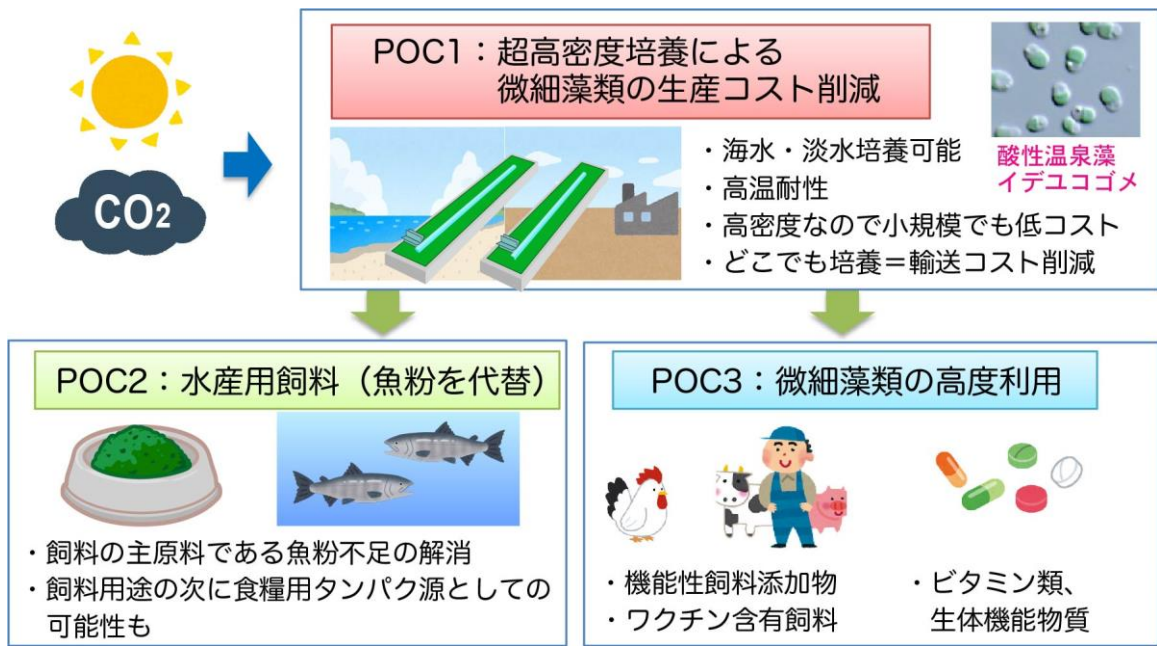


図 本研究が目指す微細藻類の有効活用による未来社会



研究開発課題名：「SnからなるPbフリーペロブスカイト太陽電池の開発」



研究開発代表者：若宮 淳志（京都大学 化学研究所 教授）

### <課題概要>

ペロブスカイト太陽電池は、材料の溶液の塗布により低温プロセスで作製できる軽量・柔軟な形状をもつ太陽電池です。本太陽電池は、屋外だけでなく、屋内の低照度条件でも高い発電効率を得られるという特長をもち、様々なデバイス・場所に広く用いられる未来の新たな再生可能電源技術として期待されています。一方で、現在用いられているペロブスカイト太陽電池には、半導体層に鉛（Pb）が多く含まれており、RoHS指令（電気製品に使用する鉛の規制）によって規制されているため、鉛の含有は産業化において大きな懸念となっています。ペロブスカイト太陽電池を広く社会実装するためには、鉛フリー化材料を用いたペロブスカイト太陽電池の高性能化が強く求められています。鉛フリー化材料を用いたペロブスカイト太陽電池の開発研究は世界中で活発に行われ、Sn（錫）系材料を中心に高性能化が進んだものの、光電変換効率（太陽光を電気に変換する効率）は従来のPb系材料に比べると依然低いのが現状です。本研究では、ペロブスカイト太陽電池を広く社会実装を実現するために、鉛フリーで環境負荷の少ない材料を用いたペロブスカイト太陽電池の高性能化の実現に挑みます。

Sn系ペロブスカイト太陽電池では、原料に用いるSnイオンが酸化されやすいため、不純物や格子欠陥に由来して、本来の優れた半導体特性が得られていないことがわかってきました。そこで探索研究期間では、独自の高品質な材料とその成膜技術の開発や表面修飾技術の開発などにより、Sn系ペロブスカイト半導体とその太陽電池の高性能化に取り組み、世界を先導する成果をあげてきました。当初は数パーセント程度であった鉛フリー型太陽電池の光電変換効率は、15パーセント近くまで向上してきました。さらに、SnとPbの混合材料を用いた太陽電池では、従来のPb系材料も凌駕して23パーセントを超える世界最高効率も達成しています。本格研究では、用いる材料の元素の組み合わせを中心に、さらに独自の材料開発を進め、これまでに培ったノウハウをもとに高品質なペロブスカイト半導体薄膜の成膜技術とデバイス開発を究めます。これにより、Sn系ペロブスカイト太陽電池の超高性能化と高耐久化の実現を目指します。

本研究で、未来の新たな電源技術として、環境負荷の少ない高性能なペロブスカイト太陽電池の開発を実現することで、これらを様々なIoTセンサーデバイスやこれまで設置が困難であった場所にも広く普及することができます。得られる成果はベンチャーおよび国内企業へと技術移転し、本太陽電池の社会実装を推進します。これにより、将来のエネルギーの不安を解消し、「カーボンニュートラル社会」の実現にも大きく寄与するものと期待できます。

# 「どこでも電源」として社会実装：エネルギーの未来を変える

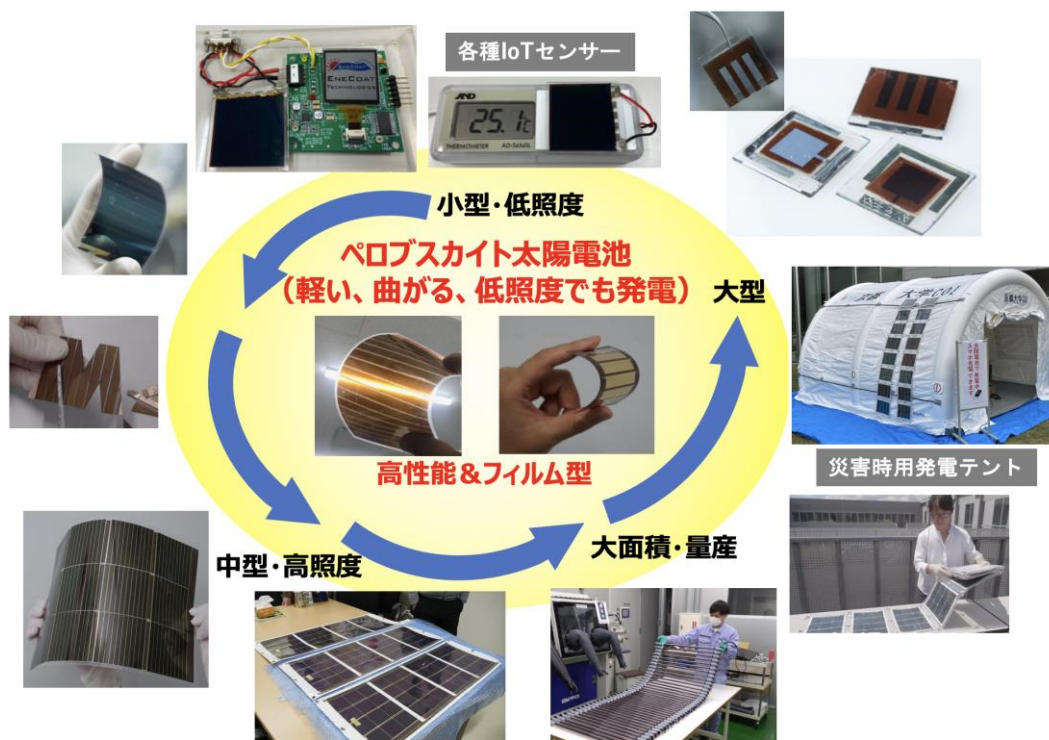


図 本研究が目指すペロブスカイト太陽電池の社会実装

研究開発課題名：「未来医療を創出する4次元トポロジカルデータ解析数理共通基盤の開発」



研究開発代表者：坂上 貴之（京都大学 大学院理学研究科 教授）

### <課題概要>

高齢化が進む世界の国々では、高い医療の質を確保しながら高騰する医療コストを大幅に低減することが求められています。そのためには、様々なデータを活用した効率的な診断や創薬が求められますが、現状の検査データや臨床データから得られる情報の活用には限界があります。例えば循環器医療では心血流に現れる渦の「かたち」を見ることが診断の精度や効率の向上につながると期待されますが、現状の心エコーやMRI装置の心血流画像データからそのような情報を取得することは困難です。また、感染症創薬における臨床試験では、ウイルス量など病態進行に伴うバイオマーカーの時間変化を適確に予測できれば、臨床試験の期間の圧縮とコストの削減が期待できますが、データ量や解析法の限界によりまだ実現していません。

本研究開発課題では、探索研究において実施した、①心血流エコー画像やMRI画像から血流渦パターンの「かたち」を言語化する解析手法（トポロジカルデータ解析）の開発と臨床診断への応用および、②薬剤開発の時間変化の予測手法（数理モデリング）の開発と抗ウイルス薬の臨床試験デザインへの応用を実証した2つの成果を元に、数理科学の両手法を融合した新たな手法を開発します。

具体的には、データに隠された把握したい現象の「かたち」を数理的な言語で厳密に抽出・表現し、その時間変化の解析と組み合わせた“4次元トポロジカルデータ解析”という、世界初の汎用的な数理共通基盤技術を確立します。これにより、心血流に現れる渦の「かたち」に基づく心機能評価により、心疾患ステージの分類が可能となります。さらに、この技術を心エコーやMRI装置へ組込むことにより、心臓病態の把握と予後予測を実現、適切な検査と治療介入につながることで、心臓関連死の約3分の1、世界の循環器医療費の約2割もの低減が期待されます。同手法の確立を礎に、呼吸器疾患など他の疾患への展開も図ります。

また、COVID-19等を対象とした感染症創薬の臨床試験に対して、バイオマーカーによる時間変化の予測手法を開発し、臨床試験デザインにも適用することで、従来3～4年を要する感染症創薬の臨床試験までの期間を、数ヶ月程度にまで大幅に短縮することを目指します。これにより、一つの薬剤の開発に1,000億円以上必要とも言われる薬剤開発コストの削減が期待されます。

本数理技術は、医療・医薬分野の課題を解決するだけでなく、環境分野や生命科学、基礎医学など広い範囲の課題にも適用が可能です。本技術を、将来的にこれらの分野にも展開することで、数理科学に基づく共通基盤として研究開発現場等における様々な課題の解決に貢献します。

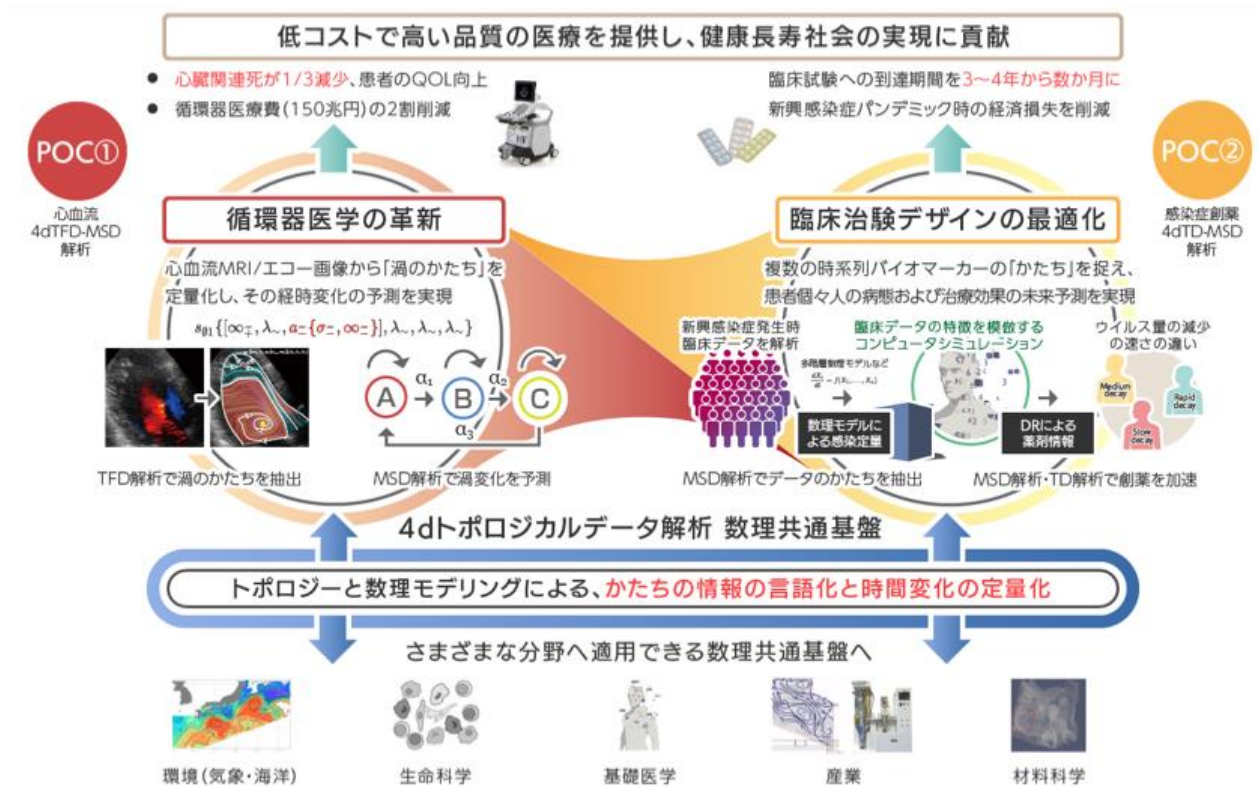


図 本研究が目指す未来医療像