

Guest Forum

特別寄稿

デジタル化で築く“研究室の未来”：日本の強みを世界へ Digitalizing the Laboratories: Bringing Japan's Strengths to the World

一杉 太郎

HITOSUGI Taro

東京大学 大学院理学系研究科 化学専攻 教授
東京科学大学 物質理工学院 応用化学系 特任教授
博士(工学)

Professor, Department of Chemistry, Graduate of Science, The University of Tokyo
Specially-appointed Professor, School of Materials and Chemical Technology, Institute of Science Tokyo
Doctor of Engineering



マテリアル研究やライフサイエンス研究における、実験室のデジタル化が急速に発展している。機械学習やロボット技術を活用した自動・自律実験システムの開発が進められており、これにより研究の効率化と新たな発見が望まれる。特に、日本の理化学機器企業やロボット産業の強みを活かし、世界に貢献することが期待されている。研究者と企業が協力し、共通のビジョンを持ってデジタル化を推進することが重要であり、新しい研究スタイルや新材料の創出が可能となる。そして、データの共有、標準化の推進、人材育成などが今後の課題である。

The digitization of laboratories in materials and life science research is rapidly developing. The emergence of automatic and autonomous experiment systems utilizing machine learning and robot technology is expected to improve research efficiency and lead to new discoveries. In particular, the strengths of Japan's scientific instrument companies and robotics industry can be leveraged to contribute to the world. It is important for researchers and companies to cooperate and promote digitization with a common vision, which will enable the creation of new research styles and new materials. Furthermore, data sharing, promotion of standardization, and human resource development are future issues.

はじめに

近年、マテリアル研究（化学、材料、物性研究）やライフサイエンス研究において、機械学習およびロボット技術を活用した手法が世界的に急速に発展している^{[1]-[3]}。これにより、膨大な実験データの収集・解析が可能となり、迅速な発見や、人間には困難な実験への挑戦が可能となっている。研究者が創造性を發揮できる研究環境の構築を進めるとともに、研究人材不足や次世代への技術継承の課題を解決することが強く望まれている。

英国、カナダ、米国、中国、韓国等では、巨額の投資により自動・自律実験技術が発展し、生成AIを活用した材料設計も活発化している。MicrosoftやGoogleも研究に参画し、非常に研究が進展してきた^{[4]-[6]}。2024年のノーベル物理学賞、化学賞は共に機械学習に関係した研究に授与され、Google関連企業の研究者が化学賞を受賞したことは記憶に新しい。

本稿ではマテリアル分野の研究に焦点をあて、機械学習とロボットが実験室で活躍する研究環境について考察する。

マテリアル研究を加速し、環境問題、気候変動、サーキュラエコノミーへ速やかに対応するためには、これらデジタル技術の積極的な導入と活用が必須である。ここで議論する内容はライフサイエンス分野へ適用できる部分もある。最初にデジタル化の動機について述べ、その後、今後の展開について議論する。最後に分析計測機器産業（あるいは理化学機器企業）への期待を述べる。このデジタル化を加速するためには、これら企業と研究者がwin-winになることが重要である。科学の発展に貢献するために何をすべきか考えたい。

実験室デジタル化の動機

最終的な姿について、ビジョンを共有したい。現在のゴールは基盤モデルにデータ・知識が統合され、自在に活用できる知識基盤を構築することである（Figure 1）。このビジョンを身近な例で説明する。

現在、生成AIを用いて調査やアイディア出しをすることが可能である。興味があることを対話形式で調査可能であり、非常に高い生産性を私自身が実感する。すでに、ChatGPT

やGemini等、生成AI技術は研究者にとって不可欠になっている。これにマテリアルやライフサイエンスなどの詳細なドメイン知識が加われば、より精緻な回答が可能となり、マテリアルやライフサイエンスの諸問題に適用されていくだろう。そのためには、インターネット上に存在しない独自データをも基盤モデルに統合する必要がある。それにより、他者が得られない知識基盤からの回答が得られる。すなわち、研究者オリジナルな調査結果やアイディアを得ることができる。研究者はこの知識基盤を活用し、研究を進めるという姿である。この「独自データをいかに生成するか」、という点でデジタル化(機械学習とロボットを活用した自動・自律実験システム)が鍵となる。その実験システムは人間の勘・コツ・経験と組み合わされ、人間にしかできない実験と共生するというビジョンである。

デジタル化の必要性は、知識基盤の構築だけではない。ここでは二つの観点から議論する(Figure 2)。一つ目が研究費を有効活用するという観点である。自然科学に関わる研究において、どの研究機関、どの国も研究費を大きく二つに分けると、人とモノへの投資となる(Figure 2左)。人への投資とは、研究者・技術職員・事務職員の雇用や、国際交流のための経費、研修費や出張費、論文出版費や情報のオープン・クローズ戦略に関わる費用が該当する。モノへの投資は実験装置代やそのメンテナンス費用、光熱費や場所代、建物の維持費としよう。

日本の現状を考えると、今、人への投資を増やすねばならない。研究者や技術職員の待遇改善、国際交流の促進、技術職員が研究者と伴走する体制作り等を進めなければ、自然科学[マテリアル(化学・材料研究)やライフサイエンス]に人材が集まらないことを危惧する。これはすでに起きている。情報産業の賃金は高く、優秀な人材はそちらの方を志向し、人材の偏りが生じ始めていると認識している。特に日本においては、大学における人気が高い学科や専攻を見れば明らかである。大学入試においては倍率や偏差値として数字に如実に現れる。自然科学研究の発展のために、人々ますます投資して研究環境を整備し、成果創出につなげなければならない。

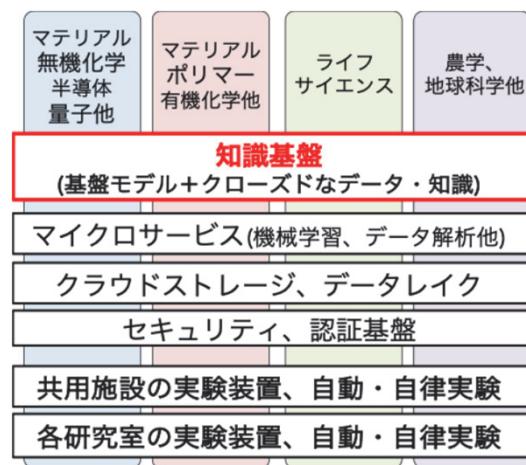


Figure 1 Future Vision: Integrating Data into the Knowledge Baseline-duty-chassis-testing/

このような論理であれば当然、モノにかけられる費用が少なくなる。モノにかける費用を抑えつつ研究成果を最大化するためには、実験装置共用促進や稼働率の向上が急務である。実験装置共用については、すでに日本では政府主導で事業が進められている。汎用実験装置を各研究者が保有するのではなく、共用(シェアリング)するという考え方である。私自身も共用の効果を実感することがあり、研究費に加え、実験スペースの有効活用と装置稼働率の向上が進むと実感している。

その実験装置の稼働率向上が二つ目の論点である(Figure 2右)。稼働率向上は、経営の視点(ROI: Return on Investment)から対応が急務である。1週間には168時間しかない。勤務時間は平日5日間×8時間で40時間である。すなわち、人間の活動時間は1週間の1/4程度である。もし この時間、実験装置もフルに活用したとしても、一週間の3/4は装置を利用していないことになる。実際には、40時間フル稼働している実験装置は少ないので、装置の休眠時間は一週間の3/4以上である。我々の実験室を見ても、これは真であり、投資効率が低いことを実感する。したがって装置の稼働率を高める必要がある。

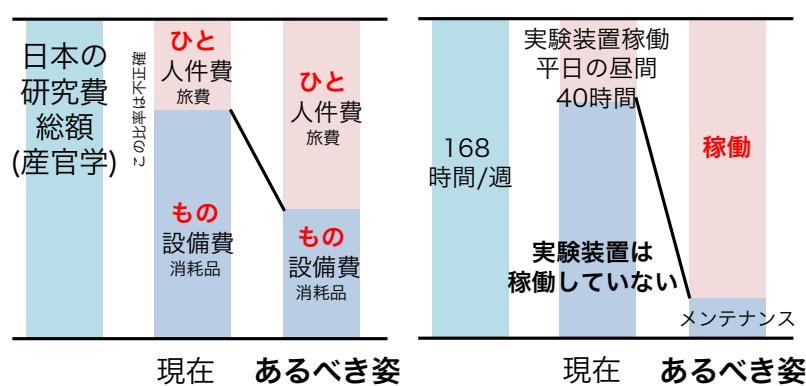


Figure 2 Allocation of research funds and time

以上より、自動・自律実験は装置稼働率を高めるためにも必須である。その装置を共用すれば、さらに装置稼働率を高められる。また、現在、人口減少への対応や働き方改革が急務である。自動・自律実験は、実質的な研究時間の増加とフレキシブルな働き方も実現する。そして、データを活用して新発想を得るためのツールとなり、研究者の創造性を最大限に發揮させる。

ここで重要な問題提議がある。装置稼働率が高まり、共用が進むと、理化学機器の出荷数は減るのではないか？という疑問である。つまり、理化学機器企業としての経済合理性はどう考えるかという点である。それについて、最終章で議論したい。ただ、これは杞憂であり、販売台数も売り上げも増えると考えている。

筆者の具体的な取り組み

筆者らは自動・自律実験システムの開発を進めてきた^{[7]~[9]}。モジュール化された実験機器を接続し、機械学習とロボット技術を最大限活用した自動・自律実験システムを構築・実証した(Figure 3)^{[10],[11]}。

合成装置(スパッタ成膜装置)と各種計測・分析装置(X線回折、ラマン分光、紫外可視分光、走査型電子顕微鏡、電気特性評価等)を接続し、得られるデータを自動的に解析する。(株)堀場製作所、日本電子(株)、(株)リガク、(株)島津製作所、(株)デンソーウェーブ、(株)パスカル等、多くの企業の協力を得た。2023年には「JASIS 2023」にてシステム詳細を公開した^[12]。

本システムでは、異なる実験機器から出力されるデータ形式を統一している。2024年5月にJIS規格に登録されたMaiML形式^[13]で出力し、クラウドにデータを保管した。さらにクラウド上の簡易な解析を実現している。現在、東京大学のMDX(データ活用社会創成プラットフォーム)にデータを保管している。そのデータを解析してペイズ最適化を用いた自律実験も実証した。

世界における自動・自律実験システムの開発を背景として、我々は日本ファインセラミックス協会(JFCA)と日本分析器工業会(JAIMA)と共にデジタルラボラトリー研究会^{[14],[15]}を立ち上げた。民間企業40社以上が参画しており、現在も加入企業が増加中である。研究会では最新技術動向の情報交換や見学会、勉強会を開催している。

さらに、そのメンバー企業のうち、材料や分析機器メーカーを含む8社と協働ラボを本郷キャンパスに設置した^[16]。本プロジェクトは、研究を自動化・自律化するためのデジタル技術(機械学習とロボット技術)を開発し、新材料の創出スピードを飛躍的に高めることを目指している。特に、セラミックス材料や粉体を原料とする材料の合成・焼成・特性評価・分析の全自動化と自律化は、現時点で世界的に前例がなく、技術的課題も多い。したがってチャレンジである。

日本の強みの活用

日本政府、研究者、企業が取り組むべき課題と展望に入る前に、日本の強みを整理する。海外勢が巨大投資を続ける中、日本の強みを最大限活用すれば、世界に貢献することが可能と考える。日本の強みをまとめると

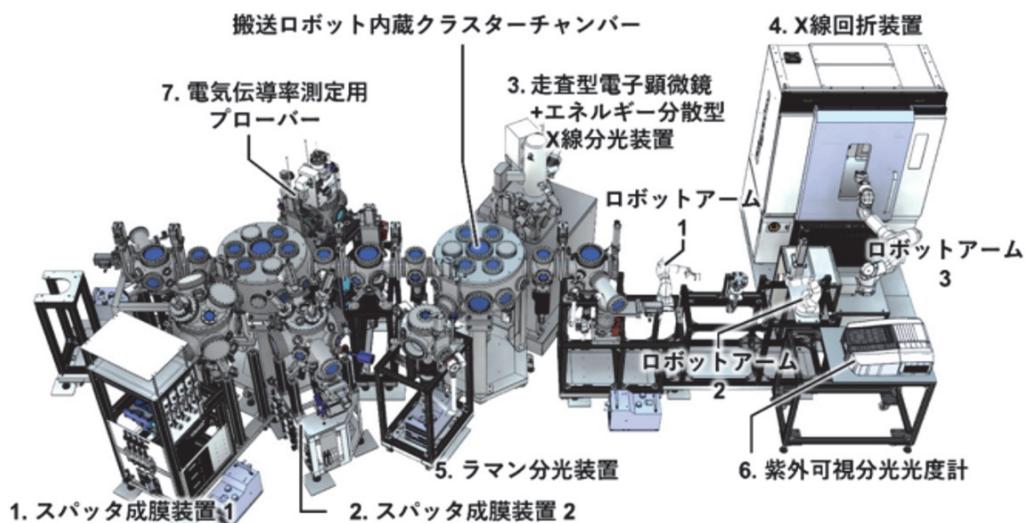


Figure 3 A synthesis system (sputter deposition system) and various measurement and analysis devices [X-ray diffraction (XRD), Raman spectroscopy, UV-visible spectroscopy, scanning electron microscope, energy dispersive X-ray spectroscopy] are connected. The shape of the sample holder and the communication protocol when each module is connected are available on the Internet.

強い理化学機器企業

マテリアル分野では、日本の理化学機器企業は存在感がある。測定精度や分解能、ソフトウェアの使いやすさ、きめ細かい対応、対応までのスピードの速さに加え、データ利活用の容易さや機械学習を活用した計測等を強みとすれば、データ駆動科学を活用した新たな研究の進め方について、世界を先導することが可能である。理化学機器企業が強いと、研究の小回りが効いて迅速に実験対応できる上、最先端の実験機器が使える。理化学機器企業の協力なくして研究で勝てる気がしない。理化学機器企業は、デジタル化に強い企業として、世界で確固たるブランドイメージを築くことができるだろう。

強いロボット産業

世界の産業用ロボットの約半分は日本製である^[17]。その知見を最大限活用することが考えられる。ロボットシステムインテグレーターも国内に多数あり、ロボットの活用技術も日本に揃っている。

マテリアルに関わる勘・コツ・経験

マテリアル分野の研究者層は厚く、そのドメイン知識を最大限活用することが極めて重要である。マテリアル関連産業も強い。

活発な産学連携

マテリアル分野では、他国に比べて産学連携がより進んでいる。

今後、取り組むべき課題と展望

以上のような自動・自律実験システムを活用した研究開発の加速について、政府のマテリアル革新力強化戦略^[18]に、「スマートラボラトリ化(AI, IoT, ロボット技術等を駆使した、自律的な研究手法の開発と実装化)の推進」が明記されており、政府も後押しする予定である。これは2026年よりはじまる第7期科学技術・イノベーション基本計画の骨子となる戦略である。

自動・自律実験システムを活用したデータ駆動科学^[19]を推進するために、产学研官の連携が重要である。今後取り組むべきことをまとめた。

自動化・自律化実験の適用範囲の拡大：モジュール化と標準化

自動・自律実験システムを「誰でも構築できて使える状況(民主化)」にすることが重要である。そのためには各種実験モジュールを準備し、それを自在に組み合わせて研究を行うための環境整備が必須である。各モジュールがPlug and Playで自動実験システムを構築できるよう、世界と協

調して標準化(装置接続法、試料ホルダや試料サイズ、通信プロトコル等)を進める必要がある。日本が主導して世界と共に国際標準や規格を策定することにより、グローバル市場での競争力を大きく高めることができる。モジュール化はコストダウンにもつながる。理化学機器企業の協力が不可欠である。

臨機応変に実験状況に対応するロボットの開発と活用

実際の研究環境においては、人間の複雑な動作や複雑な実験フロー、多様な形状・種類の試料を取り扱う必要がある。さらに、実験の状況変化にリアルタイムで臨機応変に対応することが重要である(「匠の技」と定義)。これらが、工場の製造現場と研究現場の異なる点である。加えて、ロボットによる自動・自律実験を実装するためには、言語化されていない「匠の技」をデジタル化するシステム開発や、人間の視覚や言語に基づいたロボット制御技術が必要である。そのため、研究者の経験や勘と、ロボットによる「匠の技」を融合させた新しい研究手法を構築する必要がある。これはロボット技術としても最先端の技術である。理化学機器にも、ロボットが作業しやすいような設計が要求される。

人材育成の強化

実験家・理論家としての専門知識を有しながら、情報科学やロボティクスなどのデジタル技術も自在に使いこなす、「マテリアル×情報科学×ロボティクス人材」の育成が急務である^[20]。マテリアル研究者に対して機械学習やロボティクスの基礎知識を提供し、自動・自律化に関する課題設定と解決策立案能力を涵養することが望まれる。

大学に加え、企業での人材育成も急務である。学会や業界団体が主導して研修やカリキュラム開発を進め、協調領域としての人材育成が望まれる。

データのデジタル化と共有の促進

実験データやシミュレーションデータをデジタル形式で記録して一元管理することにより、データの利活用性を高められる。データフォーマットの標準化を進めるとともに、クラウド技術を活用して異なる研究機関や企業とのデータ連携をスムーズに実現することが望まれる。

研究成果の信頼性と再現性を高めるには、データ管理の統一基準が必須である。データのオープン化やガイドラインの明確化を進め、研究コミュニティ全体の知見を集合させることにより、新たな発見や価値創造を加速できる。

システム化技術の開発 標準化と国際的連携の強化

誰でも自動・自律実験システムを構築して利用しやすくする、つまり自動・自律実験の民主化には、柔軟性と拡張性に優れたマイクロサービスアーキテクチャが不可欠である。マイクロサービスはインターネット関連では標準的なアーキテクチャであり、モジュール化と疎結合(構成要素間の依存性が小さい結合)がキーワードである。各モジュールを指揮するオーケストレーションソフトウェアを中心としたレイヤー構造とする(Figure 4)。これにより、実験装置や機械学習アルゴリズムなどが連携し、実験計画に基づいて自動的・自律的に実験を進めることができる。実験データは統一形式でデータレイクに保管され、解析マイクロサービスと連携して活用される。

マイクロサービスを実現する際には、API(Application Programming Interface)を整備し、国際的に連携しつつ、オープンに進めることが重要である。日本から積極的に規格の提案・策定や実証に関与していくことが望まれる。そのためにも、海外の研究ネットワークとの協力体制を強化し、グローバルな視点での研究開発を推進することが重要である。そのために、次に記す拠点が必要となる。

大規模研究資金の長期的投資：拠点形成と国際的なパートナーシップの構築

海外の大規模プロジェクトと対等に議論し、意見交換するためには、十分な研究資金を確保して拠点を形成することが必須である。その拠点は、装置共用を進める部門と、様々な自動・自律実験システムを産学連携で構築してドメインの研究を進める部門からなると考えられる。

前者は、「共用施設」として自活することが重要である。材料メーカーが安定ユーザーとして利用し、高い稼働率を維持する。そして、技術職員を中心とした運営とし、技術職員が実験装置にかかりきりになるのではなく、自動・自律システムにルーチンワークは任せ、技術職員は依頼者と向き合う。このような施設は経営感覚を持ったマネジメントにより運営され、黒字化することが期待される。装置更新については、国からの支援は必要であろう。

そして、後者のドメイン研究部門では、マテリアル研究者、ロボット研究者、情報科学者、マテリアルズインフォマティクスの研究者が「一つ屋根の下」に集い、研究開発を進める拠点であることが望ましい。“世界の頭脳循環”に入るためにも、世界に対してvisibleとなる必要がある。この拠点は、新しい研究開発方法の開拓を進め、新ドメイン知識を創出することがミッションとなる。デジタル化のノウハウとデータが蓄積した拠点である。その際、理化学機器企業の技術力を高める方向性で技術開発することが望ましい。つまり、理化学機器企業が新しい取り組みをする際にテスト場ともなる。この拠点が「研究開発の進め方」に変革をもたらす原動力となることが期待される。

そのような拠点は、データ共有や標準化促進の役割を持ち、人材育成やデジタル化技術の相談窓口になることも期待される。先進的な研究機関との共同研究や技術交流を通じて最新の知見をいち早く取り入れ、日本独自の強みを海外へ発信する拠点が必要である。

この拠点の実現に向けて、政府や産業界、学術界が連携して長期的ビジョンに基づいた投資を行うことが不可欠である。研究環境のデジタル化は今後ますます進むのは確実であり、持続的な研究開発基盤を築き、新技術の社会実装を

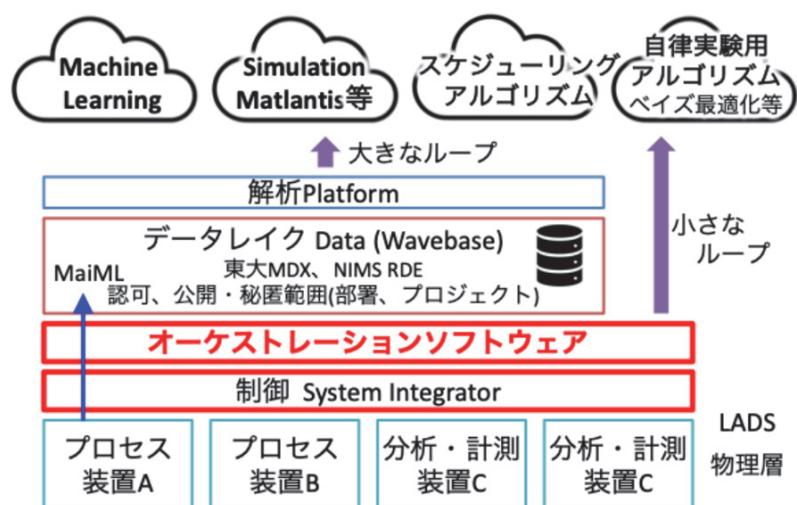


Figure 4 Layered structure of the system. It is a collection of microservices. Below the orchestration software is the physical layer.

加速することが急務である。デジタル化が遅れると、若手研究者が再び「竹槍で戦う」状況になることを強く危惧している。

今、半導体業界では、TSMCが世界的な共有基盤になっていると言つて良い。世界から依頼されてものづくりを行い、そこでノウハウとデータが蓄積し、さらにプロセスに関する予測精度が上がり、ものづくりにフィードバックされる(Figure 5)。世界はTSMCに頼らざるをえないほどの拠点となった。このようなモデルが半導体以外に広がるのは時間の問題だろう。日本が勝てるドメインに集中する拠点形成が強く望まれる。

理化学機器企業としてのチャンスと期待

スマートフォンやインターネット等、デジタル化の本質はシェアリングと言われる。たしかにそれら技術で自動車や自転車のシェアリングも進んでいる。また、中古物品の売買も広い意味でもシェアリングといえよう。実験装置もこの大きな流れに乗って、すでに述べたような装置共用が進むと、実験装置ビジネスの市場規模が大幅に拡大することは望めないように見える。また、自動化・自律化は始まったばかりで、その開発コストに見合う販売台数をすぐには見込めない。このようにして研究者と理化学機器企業がwin-winの関係になれば良いのだろうか。いくつか考察を進める。

1. 共用が進むのは、幅広い実験のうちのほんの一部である。したがって、販売台数が減るというインパクトは限定的である。装置自身が自動になって使いやすくなるので、多くの人が活用できるようになる。コストダウンが進めば販売台数が増えると考えられる。

2. 新たな市場を創り出す。スタンドアローンの装置ではなく、プロセス装置との融合という形で分析・計測装置の販売台数は増えると考えられる。研究者はなるべく多くのデータを取得したい。特に、物質合成プロセス中や装置の状態について精密にデータを取得し、最適化やメカニズム解明(プロセスインフォマティクス)を進めたい。したがって、オペラント分析計測(その場観察)に価値がある。そこに市場拡大のチャンスがある。

3. 単なるモノ売りからの脱却。本来、研究者は“装置”が欲しいのではなく、それから出る“データ”が欲しい。データを出力するという点に価値がある。メンテナンスと含めて、データ数に応じた課金が考えられる。

4. システム化で利益をあげる。今後、ラボシステムインテグレータが極めて重要になってくるだろう。研究者の要望を聞き、実験システムやデータ処理システム全体を構築するビジネスである。そのシステムの維持と運用もビジネスとなる。例えば堀場製作所はエンジンの排気ガス評価についてすでにラボシステムインテグレータになっている^{[21], [22]}。その技術はまさに多くの実験室の構築に活用できる。これは従来の「自動システムのインテグレータ」には実現できないビジネスである。ドメインの知識が必須だからである。分析計測機器企業がしっかりとドメイン知識を得ることにより、ラボシステムインテグレータになることが期待される。



Figure 5 Building a research infrastructure that the world can rely on

5. ハイエンド機と汎用機のバランスが常に必要である。汎用機であってもユーザーに選ばれる仕掛けが必要である。ハードウェアの販売だけにとどまらず、ソフトウェア、サービスを含めたエコシステムの構築が一般的な手法である。アップルやNVIDIAのビジネスモデルが参考となる。また、ライセンシングも含めた多角的な収益構造が重要である。

6. 人間フレンドリーからロボットフレンドリーにした設計が重要になる。人間が実験をしないと考えると、全く新しい実験が考えられる。新たな実験ワークフローの実現には、理化学機器企業の協力が必須である。人間の置き換えは単なるdigitizationにすぎない。真のデジタル化は実験自体の変革であり、ワークフローの変革である。これが本当のdigitalizationでありdigital transformationである。これは全く新しい市場となる。

筆者としては日本の理化学機器企業が世界のデジタル化を牽引し、世界中のラボシステムインテグレーションを担い、世界に貢献することを願っている。そのためには、研究者と理化学機器企業が同じビジョンを共有し、win-winとなる関係を築くことが必須である。そして、理化学機器メーカー、材料メーカー、ロボットメーカー、学界、政府が一体となってデジタル化を進めることが重要である。日本は产学連携が活発である。その枠組みに協調領域として多くの企業の連携を望む。

おわりに

筆者が世界を見渡すと、ハードウェアの面では日本にはアドバンテージがあると考えている。それもひとえに、理化学機器企業のおかげである。今後、知能化した自動実験モジュールを構築するためには、実験プロセス(ドメイン知識)を詳細に理解することが必須である。実験プロセスについて深く知っているからこそ、本当に役立つ実験モジュールを作ることができる。つまり、理化学機器企業は計測に詳しいのは当然として、ユーザーのドメイン(マテリアルやライフサイエンス、農業や地球科学、宇宙などの分野)にもっと踏み入り、研究者の勘・コツ・経験も踏まえた実験機器・理化学機器の開発が求められる。それができず、スタンドアローンの汎用機に頼るビジネスであれば、廉価な実験機器にポジションをいざれとられてしまう。いつの世も、やはり常に人間の創意工夫が主役である。理化学機器開発にも研究者・技術者のオリジナリティを組み込んだ製品開発、およびシステム開発が望まれる。

最後に、この研究開発の進め方の意義を述べたい。新たな研究スタイルは単に効率化向上を目指すだけではない。膨大な量のデータをもとに俯瞰的な視野を獲得し、全く新しい実験ワークフローを生み出すことにより、新たな学理の構築や新物質の発見を可能とすることが期待される(Figure 6)。新たな発想を得ることこそが真の狙いである。理化学機器企業の力が必要である。研究者と共にぜひ前に進めましょう！



Figure 6 Bird's-eye views open up new directions and reveal new areas to explore.

謝辞

本稿を準備するのにあたり、様々な議論をしてくださった皆様に御礼申し上げます。また、宮脇直也さんには原稿の整理、レファレンスの確認等で大変お世話になりました。

参考文献

- [1] N. Ishizuki, R. Shimizu, and T. Hitosugi, "Autonomous experimental systems in materials science," *STAM Methods*, 3, 2197519(2023).
- [2] M. Abolhasani and E. Kumacheva, "The rise of self-driving labs in chemical and materials sciences," *Nature Synthesis* 2, 483–492(2023).
- [3] G. Tom, S. P. Schmid, S. G. Baird, Y. Cao, K. Darvish, H. Hao, S. Lo, S. Pablo-Garcia, E. M. Rajaonson, M. Skreta, N. Yoshikawa, S. Corapi, G. D. Akkoc, F. Strieth-Kalthoff, M. Seifrid, and A. Aspuru-Guzik, "Self-Driving Laboratories for Chemistry and Materials Science," *Chem. Rev.*, 2024, 124, 9633–9732 (2024).
- [4] A. Merchant, S. Batzner, S. S. Schoenholz, M. Aykol, G. Cheon, and E. D. Cubuk, "Scaling deep learning for materials discovery," *Nature*, 624, 80–85(2023).
- [5] H. Yang et al., "MatterSim: A Deep Learning Atomistic Model Across Elements, Temperatures and Pressures," *arXiv*: 2405.04967(2024).
- [6] C. Zeni et al., "A generative model for inorganic materials design," *Nature* 639, 624–632(2025).
- [7] R. Shimizu, S. Kobayashi, Y. Watanabe, Y. Ando, and T. Hitosugi, "Autonomous materials synthesis by machine learning and robotics," *APL Mater.*, 8, 111110(2020).
- [8] 東京工業大学, "自律的に物質探索を進めるロボットシステムを開発—物質・材料研究開発の進め方について革新を起こす—," 東工大ニュース(2020).
<https://www.titech.ac.jp/news/2020/048276>
- [9] S. Kobayashi, R. Shimizu, Y. Ando, T. Hitosugi, "Autonomous exploration of an unexpected electrode material for lithium batteries," *ACS Materials Lett.* 5, 2711–2717(2023).
- [10] K. Nishio, A. Aiba, K. Takihara, Y. Suzuki, R. Nakayama, S. Kobayashi, A. Abe, H. Baba, S. Katagiri, K. Omoto, K. Ito, R. Shimizu, and T. Hitosugi, "A digital laboratory with a modular measurement system and standardized data format," *Digital Discovery*(2025).
- [11] 東京大学, "欲しい物質を自動的・自律的に合成する—デジタル技術と自動化・自律化で切り拓く化学・材料研究の新時代—," 東京大学 大学院 理学系研究科・理学部 Press Releases(2025).
<https://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/press/10741/>
- [12] 東京工業大学, "データ・ロボット駆動科学を推進するデジタルラボラトリーの開発—新しい研究開発の進め方で世界をリードする—," 一杉研究室ホームページ(2023).
https://solid-state-chemistry.jp/pdf/JASIS_2023_pressrelease.pdf
- [13] 日本分析機器工業会(JAIMA)と経済産業省が策定した共通データ形式。Measurement, Analysis, Instrument Markup Languageの略。共通のフォーマットを使用することにより、複数の異なる機器からのデータの変換を容易とし、データの統合と利活用を推進する。2024年5月にJIS公示された(JIS規格番号K0200)。
- [14] 日本ファインセラミックス協会, "デジタルラボ(仮称)研究会の発足について," (2023).
<https://www.jfca-net.or.jp/contents/view/4672>
- [15] デジタルラボラトリー研究会のホームページ
<https://digital-laboratory.jp/>
- [16] 東京大学, "欲しい物質を自動的・自律的に合成する—デジタル技術と自動化・自律化で切り拓く化学・材料研究の新時代—," 東京大学 大学院 理学系研究科・理学部 Press Releases(2025)
<https://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/press/10741/>
- [17] International Federation of Robotics, "World Robotics 2023 Report: Asia ahead of Europe and the Americas," IFR Press Room(2023).
<https://ifr.org/ifr-press-releases/news/world-robotics-2023-report-asia-ahead-of-europe-and-the-americas>
- [18] マテリアル・イノベーションを創出するポテンシャルである「マテリアル革新力」を強化するための政府戦略を、AI、バイオ、量子技術、環境に続く重要戦略の一つとして、産学関係者の共通のビジョンの下で策定された。
<https://www8.cao.go.jp/cstp/material/material.html>
- [19] 機械学習を活用し、大量の実験データから潜在的なパターンや傾向を見いだし、新材料開拓と革新的なプロセス開発を進める。従来の研究手法では得られにくい知見を引き出し、材料特性を最大化する。新しいアイデアを人間が着想するための方法論を開拓していく。
- [20] 一杉太郎編, "マテリアル×機械学習×ロボット(現代化学増刊48)," 東京化学同人, (2024).
- [21] 日経サイエンス 2024年12月号2ページ
- [22] 株式会社堀場製作所, "「好奇心」武器に新たな領域へ一脱縫割り・異分野融合でタッグ組む," HORIBA Talk(2025)
<https://www.horiba.com/jpn/company/about-horiba/horiba-talk/omoshiro-okashiku-science/>