CRDS-FY2018-RR-03

計測横断チーム 調査報告書

「計測の俯瞰と新潮流」

国立研究開発法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター
Center for Research and Development Strategy, Japan Science and Technology Agency

エグゼクティブサマリー

本報告書では、計測に関する様々な角度からの俯瞰、および、ＩＣＴと計測の切り口で考察した新潮流に関して俯瞰し概説する。さらに、産業動向、海外動向を調査した結果を示し、今後の計測関連科学技術の施策立案に資することを目的とする。

社会・産業・科学のあらゆる場面において計測は深く根付き、無意識に利用していることも含めて、それ無くして現代社会が成立しないのは明白である。また、科学の発展の歴史を振り返れば、常に計測することによって新たな科学の発見がもたらされてきた。まさに「計測は科学の母」（mother of science）であり、産業・社会の先導役である。我が国の科学技術イノベーション政策としても、新たな計測技術をどのように研究開発するかという戦略は、将来に繋がる重要な課題といえる。

ＪＳＴ研究開発戦略センターにおいては、その設立当初から計測に重きを置き、検討するチームやユニットを設置しながら継続的に議論してきた。その間多くの報告書や提言を公開し、様々な角度から施策の形成や研究者・企業等の議論に供してきた。今回の報告書では、その延長として計測技術の波及的な広がりや全体の俯瞰、科学技術各分野における計測に対するニーズと方向性、それらから抽出された要点を列挙した。一例を挙げれば、オペランド計測が放射光設備での実験のその場観測を中心に議論されるようになり、その流れが一般の研究室や、その対極にある極限環境でのその場観測・計測に供されるようになる流れがあり、その際の今後の注目点を記載した。また、生体計測やクライオ電顕の最新動向と今後の力点など、最先端の計測関連科学技術を記載した。

さらに、昨今の科学技術の大きな傾向として、ICT（Information and Communication Technology：情報通信技術）がさまざまな形で全ての科学技術分野を横断、あるいは支える構図が顕著になってきた。この計測の領域においても、その発展に ICT は大きく貢献してきており、それはいっそう拡大する傾向にあることが見てとれる。本報告書では、「計測×ICT」を新たな潮流ととらえ、ICT 側から見た計測の位置付け、計測に対する ICT の貢献の類型、今後の方向性を俯瞰した。

諸外国でも計測関連の公的投資が広く行われており、我が国としてはこれらも参考にしながら戦略的に施策群を構築する必要がある。各国各地域が、この計測関連領域を科学技術の最先端と捉え、また、多くの科学技術分野に波及するレバレッジのような働きを期待して投資を行っている。産業動向の調査も付記したが、計測産業単独では比較的小さいとしても、自動車産業を始めとしてほぼ全ての産業がそれなくして成り立たない。産業と科学技術の双方を支え、または先導する計測関連科学技術を重要視する流れは、今後も加速することが予想される。

本報告書は、JST 研究開発戦略センターの分野を横断する計測を横断的に検討するチームによって作成された。分野横断的な視点での各種検討にも資すれば幸いである。

目　次

エグゼクティブサマリー

第１章　計測の俯瞰 …… 1
　１．１　計測技術の分類と波及効果 …… 2
　　１．１．１　計測技術の分類 …… 2
　　１．１．２　計測技術の波及効果 …… 2
　１．２　計測技術の俯瞰 …… 7
　１．３　各分野における計測ニーズ …… 9
　　（１）システム・情報科学技術分野 …… 9
　　（２）生命科学分野 …… 11
　　（３）－１　環境分野の計測ニーズ …… 13
　　（３）－２　環境分野における計測の二極化 …… 15
　　（４）エネルギー分野 …… 16
　　（５）ナノテクノロジー・材料分野 …… 18
　１．４　計測ニーズの俯瞰と方向性 …… 20

第２章　抽出された要点 …… 22
　２．１　極限オペランド計測 …… 22
　２．２　生体イメージングにおける技術トレンド …… 25
　２．３　クライオ電子顕微鏡法 …… 27
　２．４　革新生体計測 …… 28

第３章　新たな潮流：計測×ICT …… 30
　３．１　ICT ビジネスから見た計測 …… 30
　３．２　計測に対する ICT の貢献 …… 30
　　（１）類型(a)：物理量計測の高性能化 …… 32
　　（２）類型(b)：意味的計測 …… 34
　　（３）類型(c)：自律的計測 …… 36
　３．３　社会計測 …… 40
　３．４　今後の方向性 …… 42

第４章　海外施策動向と産業動向 …… 45
　４．１　諸外国の施策動向・研究開発動向 …… 45
　　４．１．１　米国 …… 46
　　４．１．２　英国 …… 52
　　４．１．３　EU …… 53

４．１．４　ドイツ ····· 55
４．１．５　中国 ····· 56
４．２　計測・分析技術に関する市場動向 ····· 59
４．２．１　世界市場 ····· 59
４．２．２　国内市場 ····· 59

第１章　計測の俯瞰

計測は我々の身の回りで当たり前のように用いられる。朝起きれば時計で時間を知り、外へ出掛ければ端末の GPS 機能によって自分の居場所を特定する。また、商業、貿易などの経済活動でも計測は欠かせない。原材料などの国際商取引では標準規格をもとに量ることで売買が成立し、工場では歩留まり向上のために生産プロセスを監視する。さらに、公共・社会の安全・安心を支えるため、空港のセキュリティー・チェック、駅の防犯カメラなど、常に計測が行われている。このように、計測は人類活動において異なる相手、対象などを越えて客観的な情報を共有するコミュニケーション手段で、なくてはならないツールとして社会に浸透している。

一方、科学の発展の歴史を振り返れば、常に計測することによって新たな科学の発見がもたらされてきた。数多くのノーベル賞が証明するように、まさに「計測は科学の母」(mother of science)である。研究主体が計測技術をどのように保持、強化するかは、新たな科学の発見、進展をどのように見据えるかという根本的な認識と繋がるのである。日本の科学技術イノベーション政策としても、新たな計測技術をどのように研究開発するかという戦略は、将来に繋がる重要な課題といえる。

諸外国においても同様に、先端的な計測技術の研究開発は、国家における科学技術競争力、イノベーション創出の強化に繋がるとの認識の下、戦略的な資金投入を行っている。ただし、増加する「計測ニーズ」のすべてを一つの国や機関で対応することは困難と認識し、産学官の国際的な協力体制（プラットフォーム）の構築を積極的に推し進めている状況にある。

本項では、計測技術の研究開発のあり方について、課題やその解決策、新たな価値の創造、戦略的な政策等を論理的に切り出し、提案するための「計測の俯瞰」についてまとめる。

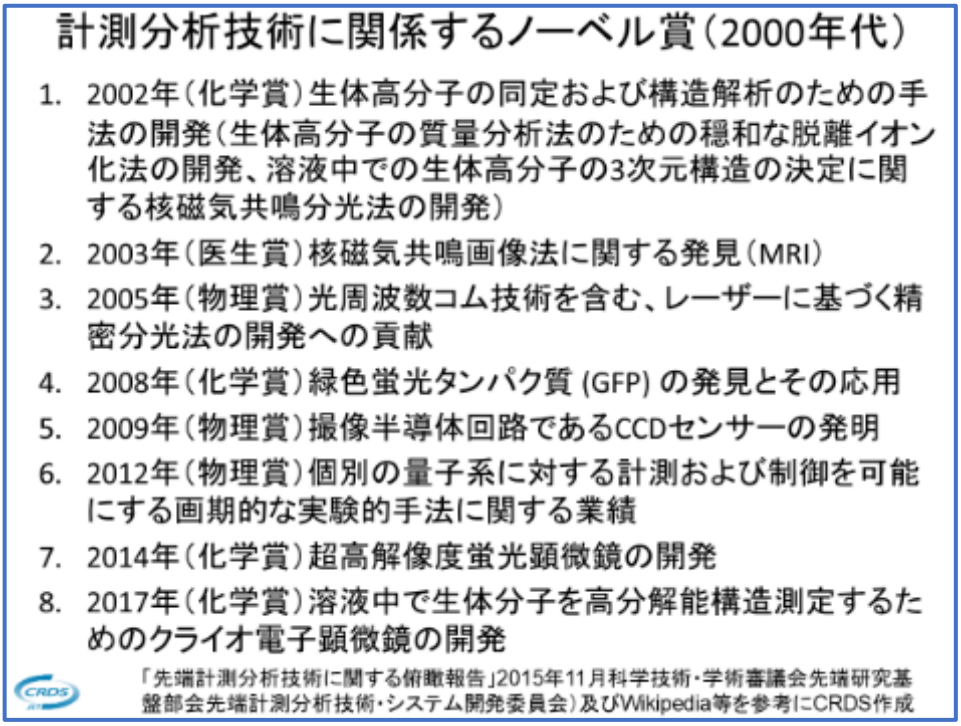


図 1.1.1　計測分野のノーベル賞一覧

１．１　計測技術の分類と波及効果

１．１．１　計測技術の分類

計測技術の研究開発と一口にいっても、“目に見えない現象を理解する”、“不良品かどうかを判別する”など、様々な目的が存在する。本センターは計測技術の研究開発に関する戦略策定に当たり、表 1.1.1 を用いて目的別に分類している。すなわち、測ることは手段と考えるような計測を基盤とする分野（計測ニーズ志向）と、測ること自体のレベル向上を目的とする計測分野（計測シーズ志向）を上下段に分け、また、国が行うべき公共・社会システム（信頼づくり志向）、アカデミアが行うべき基礎科学技術（mother of Science 志向）、産業界が行うべき応用研究開発（leader of industry 志向）の左右 3 列に分け、全体を 6 領域に区分けしたマトリクスである。

表 1.1.1　計測技術に関する研究開発の分類（戦略を切り出すための分類）

	公共・社会システム	基礎科学技術	応用研究開発
計測を基盤とする分野（測ることは別の目的を達成するための手段） 計測ニーズ志向→	（第１領域） 公共インフラ、テロ対策、防犯等の安心・安全の保障、社会の状況や関心の把握	（第3領域） 生命、ナノ・物質、情報・通信、環境・エネルギーなど基礎科学の進展	（第5領域） 医薬、食品、素材、資源、電子機器、輸送機械等の産業発展・ベンチャー創出
計測分野（測ること自体のレベル向上が目的） 計測シーズ志向→	（第2領域） 長さ、重さ、時間等の計量標準の設定	（第4領域） 計測科学（計測工学、分析化学、ナノ計測、計測システムなど）の進展	（第6領域） 計測（機器、分析サービス等）の産業発展・ベンチャー創出
	↑ 人類の境界を越える信頼づくりを志向	↑ mother of science 志向	↑ leader of industry 志向

１．１．２　計測技術の波及効果

表 1.1.1 の 6 領域はそれぞれ独立しているわけではなく、技術レベルの発展や新たな技術の登場、社会における利用ニーズ、技術トレンドの変遷などに伴って、大きな広がりとして波及し合っている。例えば、新たに誕生した計測技術（第 4 領域）は、新たなサイエンスの発見などに利用され（第 3 領域）、その後、高度化に伴って公共面、産業面にも利用が広まる（第 1、第 5 領域）。さらに成熟した計測技術から得られる情報は、様々なノウハウとなって計測産業の進展に繋がり（第 6 領域）、公共的な国際標準などにも利用されていく（第 2 領域）。

この計測技術の波及的な広がりは、その個々の技術のライフサイクルとも関連づけて位置付けられる。図 1.1.2 に示すように、ある計測ニーズを見据え、計測に利する原理、物理法則などによって誕生した計測技術は、当初、狭い範囲で利用されるのみであるが、その成長に伴って社会一般で利用され、その後、成熟、衰退していくことになる。ただし、成熟期に達した計測技術は、新たな計測ニーズ、新たな物理法則、技術や利用のトレンド等が加わることによって、別の新し

い計測技術として生まれ変わることも多い。そして、国際的に標準化されれば、その計測技術は世界中で長く利用され続けることになる。

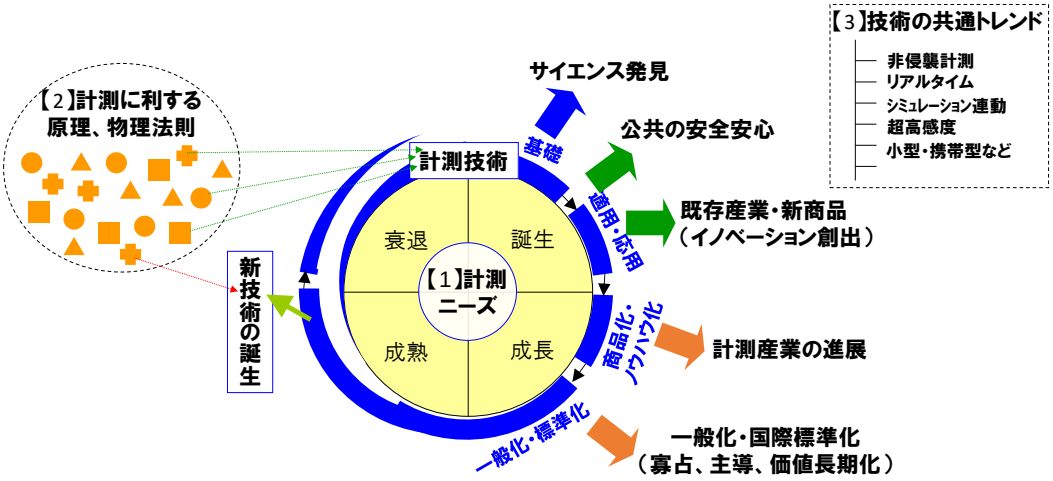


図 1.1.2　計測技術の構造（ライフサイクルモデル）

一つの計測技術が波及的に広がる側面について、幾つかの事例をもとに簡単に紹介する。要は、計測技術は次々に別の用途に応用され波及するという性格を持っており、その研究開発は継続的に実施されることが望ましいということである。すでに一般化して開発要素がないと思われるような技術であっても、社会から必要とされる時期が来ることもある。科学技術イノベーション政策においては、この計測技術を研究開発基盤の一つと位置づけ、国際的な産学官のプラットフォームを構築するなどの方法によって、継続的なウォッチと適切な資金投入をしていくことが必要であろう。

（X線回折技術の例）

X線回折とは、X線が結晶格子によって回折を示す現象を利用した技術であり、20 世紀初頭にドイツのマックス・フォン・ラウエが発見した現象である。20 世紀中頃には生物の構造を理解するために広く用いられ、ワトソンとクリックによる DNA の二重螺旋構造の提唱には、このX線回折による構造解析なしには、着想もされなかったと言われている。そして、X線表面分析、粉末X線回折など、X線回折を応用した計測技術が確立され、現代も半導体製造プロセスの評価や文化財の鉱物同定などの産業分野や、爆発物検出や科学捜査などの公共安全分野などで多く利活用され続けている。

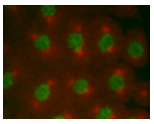
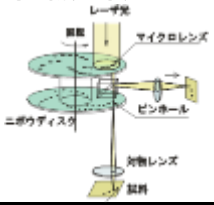
表 1.1.2　X線回折技術の波及効果

	公共・社会システム	基礎科学技術	応用研究開発
計測を基盤とする分野	（第1領域） •爆発物検出 •科学捜査における同定	（第3領域） •核酸の二重螺旋構造の発見（ワトソン/クリック、ノーベル医学、1962） •蛋白質の立体構造の解明（ケンドリュー/ペルーツ、ノーベル化学、1962） •生化学物質の構造決定（ホジキン、ノーベル化学、1964） •結晶構造決定法の開発（ハウプトマン/カール、ノーベル化学、1985）	（第5領域） •半導体プロセスにおける薄膜構造評価 •文化財における鉱物同定
計測分野	（第2領域） •アボガドロ数の決定（1965 頃まで） •標準物質の認証値の決定	（第4領域） •結晶によるX線回折の発見（ラウエ、ノーベル物理、1914） •X線結晶構造解析法の確立（ブラッグ父子、ノーベル物理、1915）	（第6領域） •X線回折装置（XRD）:①リガク（日本）、②ブルカー（米国）、③スペクトリス（英国） •薄膜評価用X線回折装置 •ポータブル X 線回折装置 •残留応力測定装置

（高速共焦点蛍光スキャナの例）

光学顕微鏡は、1590 年のヤンセン父子の発明に始まり、ロバート・フックによる細胞の発見（1665 年）、フリッツ・ゼルニケによる位相差顕微鏡の発明（1935 年）、マービン・ミンスキーによる共焦点顕微鏡の発明（1957 年）など、400 年以上の歴史が連なって発展してきている。中でも、共焦点顕微鏡は、焦点位置と異なる箇所からのノイズが除去されるため、著しく高精細な情報が得られることから生命科学の発展に貢献してきた。そして、点情報を一つの像として形成する技術、レーザー光の技術、下村脩による緑色蛍光タンパク質（GFP）と生命機能解析への応用など、新たな技術が加わることで、そのシステムはより高度化してきた。しかし、「細胞の中の動きも見たい」と望む生物学者にとって、共焦点画像の連続観察（動画）は難しいものであった。これに対し、日本の横河電機がニポウディスク式によって 2,000 コマ/秒の高速化を実現（1991 年）したことで、ゴルジ体のタンパク質輸送メカニズムの解明（2006 年）など、生命科学の進展に大きく寄与することになった。

表 1.1.3　高速共焦点蛍光スキャナの波及効果

	公共・社会システム	基礎科学技術	応用研究開発
計測を基盤とする分野	（第1領域） •バイオテロの未知物質同定	（第3領域） •生きた細胞内の動きの観察（ライブセルイメージング）  • ゴルジ体のタンパク質輸送メカニズムの大論争決着（中野ら、Nature、2006）	（第5領域） •創薬（薬効評価など）
計測分野	（第2領域）	（第4領域） •共焦点顕微鏡の原理発明（ミンスキー、1953） •レーザー光源の適用による普及（1980～） •ニポウディスク式による高速化［2,000 コマ/秒］（田名網、1991） •緑色蛍光タンパク質（GFP）の発見（下村、ノーベル化学、2008）	（第6領域） •GFP 関連試薬 •共焦点スキャナユニット：横河電機（日本） 

（光格子時計の例）

2001 年に東京大学の香取秀俊准教授（当時）が考案した次世代の原子時計で、国際度量衡のセシウム原子時計（精度：5×10^{-15}）よりも 2 桁ほど高い精度が得られる計測技術である。この高精度化によって、仮想通貨「ブロックチェーン」を用いた電子商取引等のように、時間によりシビアな社会活動への対応が期待されている。また、重力が強いところでは時間がゆっくりと流れる現象を捉えることも可能となり、重力ポテンシャル計や高度計としての役割を担うことも期待される（火山の噴火や津波の到来が観測できる可能性もある）。さらに、日本発の計測技術が国際度量衡として標準化されることも期待されている。

表 1.1.4　光格子時計の波及効果

	公共・社会システム	基礎科学技術	応用研究開発
計測を基盤とする分野	（第1領域） •地下資源探査（将来） •地下空洞、マグマ溜まりの検出（将来）	（第3領域） •センチメートルレベルでの標高差計測（重力強度で時計の進み方は変わる） • 基礎物理定数の定数としての検証	（第5領域） •仮想通貨「ブロックチェーン」による、モバイル、クラウド、電子商取引といったネットワーク通信における基準時間（将来）
計測分野	（第2領域） •1 秒を地球の自転に基づく 1 日の 6400 分の 1 と定義（仏メートル法、1799） •最初のセシウム原子時計開発（Essen（英）、1955） •133Cs による秒の再定義（国際度量衡委員会（CIPM）、1967） •光格子時計による秒の標準化（18 桁）（国際度量衡へ、202X）	（第4領域） •光格子時計の理論を発表（香取ら、2001） •最初の光格子時計を開発（香取ら、2005）	（第6領域） •GPS 測位システムの高精度化（GPS 衛星に搭載する時計）（将来）

1．2　計測技術の俯瞰

「計測は科学の母」、マザー・オブ・サイエンスとも言われるが、それにもかかわらず、わが国の現在の計測・分析機器開発は順風満帆とはいえない。本センターには現在、各技術分野のユニットを横断するかたちで計測技術に関する横断グループを設置しているが、グループでは単に計測技術そのものではなくて、社会・産業ニーズに対応する計測技術はもちろんのこと、科学の最先端、すなわち科学における未解明・未解決の問題にどのように迫るのかということも重要な対象としている。さらに、データ科学や機械学習によって進展する AI がどのように社会や科学の現場に浸透していくのか、そのインパクトをどのように捉えるのかということに対し、例えば社会の様々な状況や変動を大量のデータから観察・解析する「社会計測」という概念を提唱し検討している。

このような考えのもと、計測技術の俯瞰では、分野を越えてシーズを結びつけながら計測技術の全体像を捉えようとの前提に立つ。研究ニーズと計測技術シーズとは如何にして接続するのか、ニーズから紐解こうとしても、具体的に何を測りたいのか、どのような物理量の表現によってキャラクタリゼーションをしたいのかというところまで同定して、俯瞰的に構造化することは容易ではない。すなわち、メジャメントにおけるメジャランド（測定変量）へと落とし込むところと、それを測定できるプローブ等が実際に何であるか、どのようなシーズが応え得るのかというところまでは、容易には明らかにならないのである。ニーズとシーズの両者の議論が噛み合えばよいが、使う専門用語には相違とギャップがあり、何を話しているかお互いわからないということがすぐに起きてしまう。社会・産業または研究開発において、ある計測技術をどう活用するのか、さらにどのようなかたちで未解明の科学に迫るのかというところまで、踏み出して計測技術を俯瞰したい。現時点で CRDS が構造化している計測技術の俯瞰図が下図である。本図で用いている「ニーズ」とは、一義的に研究開発に求められる計測のニーズであり、そのニーズに応える計測とは、対象をキャラクタライズするニーズと同義である。すなわち、上位概念のニーズに呼応して、キャラクタリゼーションニーズが生じるという構図である。そこで問題となるのが、何を測るとキャラクタリゼーションニーズを満たすことができるのかという、メジャランドを特定することの難しさである。メジャランドが決まれば、具体的な計測技術や装置レベルの検討に落とし込めるわけだが、この間に存在するギャップは非常に大きい。逆にいえば、このギャップを埋めていくような研究開発戦略を検討しようとすることが、一つの示唆になろう。もう一つ、今後を考えるうえで重要なことが、「key となる方向性」である。次節および 1.4 節で、ニーズをベースとした計測技術の進展の方向性に関する考察を述べる。

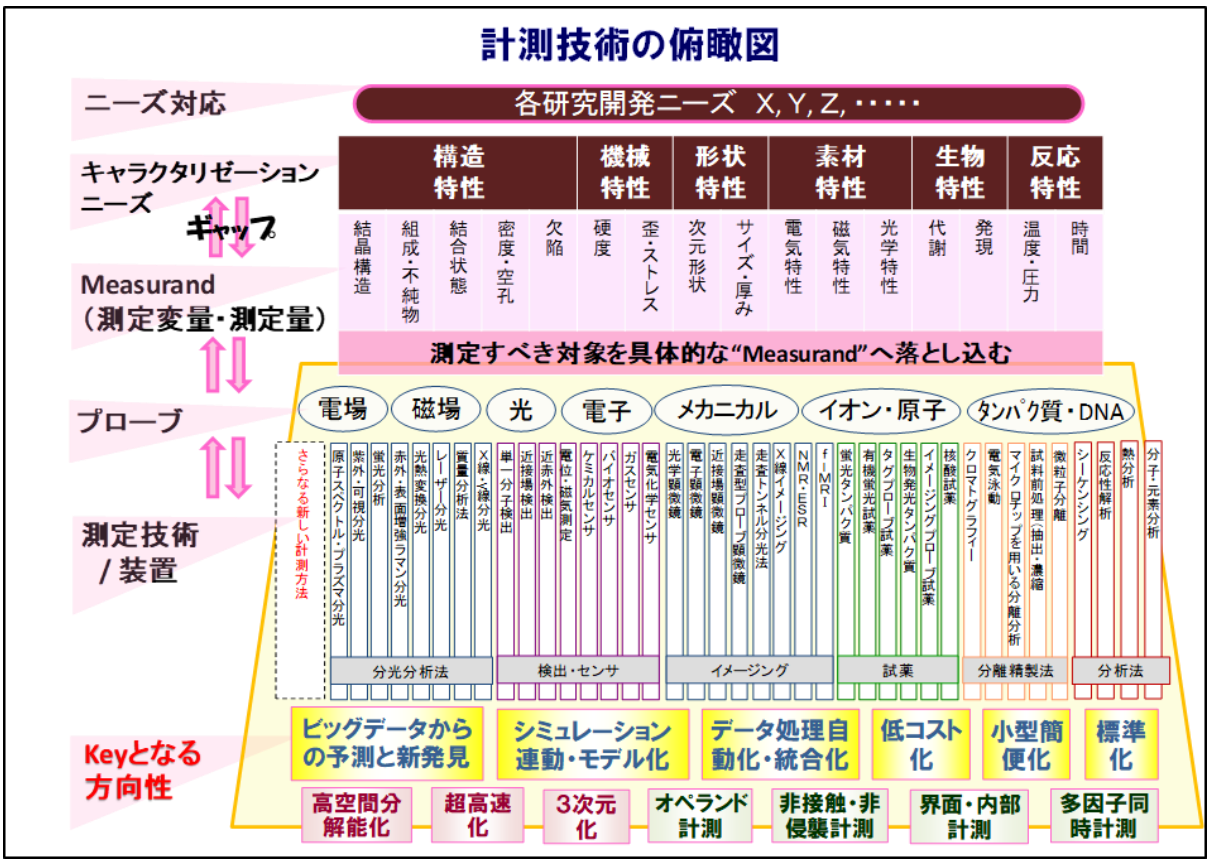


図 1.2.1　計測技術の俯瞰図

1．3　各分野における計測ニーズ

（1）システム・情報科学技術分野

わが国の第 5 期科学技術基本計画（平成 28～平成 32 年度）では、目指すべき国の姿として、次の 4 点をあげている。

① 持続的な成長と地域社会の自律的発展
② 国及び国民の安全・安心の確保と豊かで質の高い生活の実現
③ 地球規模課題への対応と世界の発展への貢献
④ 知の資産の持続的創出

そして、サイバー空間とフィジカル空間（現実社会）が高度に融合した「超スマート社会」を未来の姿として共有しその実現に向けた一連の取り組みを「Society 5.0」として推進するとしている。ビッグデータ、IoT、人工知能（AI）をはじめとするシステム・情報科学技術は、この Society 5.0 に向けて中核的な役割を果たす。そこで、システム・情報科学技術分野における計測ニーズは、Society 5.0 に向けた計測ニーズと捉え、表 1.3.1 にまとめた。この表において、「ビジョン」の項目は、目指すべき国の姿（上述の 4 点）に対応する。「ミッション」の項目は、ビジョンの実現のために、システム・情報科学技術がどのような役割を果たし得るかを示している。そして、その役割の達成に際して、計測という面からどのような貢献が考えられ、そのためにどのような計測技術が必要になるかを例示したのが「計測ニーズ」の項目である。

表 1.3.1　システム・情報科学技術分野における Society 5.0 に向けた計測ニーズ

ビジョン	ミッション	計測ニーズ
持続的な成長と地域社会の自律的発展	•健全な経済活動の実現 •労働生産性の向上と国内需要の喚起	•経済活動、特に需要供給状況をきめ細かに把握したい【商品・サービス・援助・エネルギー等の売上や提供の実績、それらに関わる環境要因の計測、今後の需要の予測】 •生産・製造・流通の品質や量を向上/安定させたい【その品質や量を左右する環境要因、人間の行動・行為の計測・追跡】 •状況に正確・リアルタイムに把握して、状況に応じてあらゆるものを最適化したい【計測の省エネ化、マルチセンサーの統合解釈】
国及び国民の安全・安心の確保と豊かで質の高い生活の実現	•社会インフラの強靭化、効率化・省エネルギー化 •倫理問題への対処と新たな制度設計への対応	•社会インフラの劣化状況・寿命を診断したい【構造物・設備・機器等の画像、映像、振動、音、温度、圧力等の計測】 •社会生活の安全安心を確保したい【危険物・危険人物・危険行為や不正行為等を画像・映像やセンサーから早期検知、高齢者や子供の見守り・追跡】
地球規模課題への対応と世界の発展への貢献	•持続可能な社会システムの実現 •自然災害、気候変動の観測、予知、予防	•自然災害や気候変動等を予知・予防したい【様々な電波・画像・映像等による地球環境の計測】
知の資産の持続的創出	•多様性・個別性に対応した質の高い教育・学習 •知の蓄積、流通、活用の加速	•学習状況や教育効果を測りたい【授業中の学生の振舞、操作、心理状態、理解程度等の計測】 •熟練職人・名人の技を継承、成功・好調時のコツを維持したい【人間の行為・暗黙知の計測】

例えば、目指すべき国の姿②「国及び国民の安全・安心の確保と豊かで質の高い生活の実現」に向けた計測ニーズとしては、表 1.3.1 の 2 行目に示すように、社会インフラの劣化状況・寿命を診断するため、「構造物・設備・機器等の画像、映像、振動、音、温度、圧力等の計測」というニーズ、および、社会生活の安全安心を確保するため、「危険物・危険人物・危険行為や不正行為等を画像・映像やセンサーから早期検知、高齢者や子供の見守り・追跡」といったものが考えられる。目指すべき国の姿①③④に対応する計測ニーズついても同様に、表 1.3.1 の 1 行目、3 行目、4 行目に示した。

【参考】

- 第 5 期科学技術基本計画
  http://www8.cao.go.jp/cstp/kihonkeikaku/index5.html
- JST CRDS 研究開発の俯瞰報告書 システム・情報科学技術分野（2017 年）
  http://www.jst.go.jp/crds/report/report02/CRDS-FY2016-FR-04.html

（2）生命科学分野

生命科学の研究は、はるか紀元前からの、ヒトを含む動植物を対象とする観察型アプローチから始まり、顕微鏡等の観察技術や実験技術の発達に伴って要素還元的なアプローチによる研究が活発となり、20 世紀中頃の分子生物学の勃興により飛躍的な進化を遂げた。

2000 年代以降、次世代シークエンサーをはじめとした大規模データを扱う計測・解析技術の急速な進展によって、膨大な生命科学データが次々と生み出されるようになり、それらに基づいて複雑な生命現象の理解を進めようとする研究アプローチの進展は目覚ましい。その計測・解析技術は、クライオ電子顕微鏡や超解像顕微鏡技術に代表されるように、「精緻・先鋭化」し、またその対象はオルガノイドや臓器チップのように、「複雑化・多様化」し、次世代シーケンサーで得られたゲノム、プロテオーム、トランスクリプトーム等の多階層オミクス情報を統合化するような「統合化・システム化」という方向性を持って進展している。

【精緻化・先鋭化】生命を時間的、空間的に極めて精緻に観察、操作する技術

クライオ電子顕微鏡技術（単粒子解析）／個体透明化技術／ライブイメージング技術（①超解像技術、②8K イメージング技術）／一細胞解析技術／シミュレーション技術（①分子レベル、②細胞レベル、③臓器・個体レベル）／実験のロボット化／ゲノム編集技術／オプトジェネティクス技術／人工分子・人工生命技術

【複雑化・多様化】モデル生物のみならず様々な生物種への適用可能な技術や分子～個体複雑系の解析を可能とする技術

ヒト in vitro 実験技術（①オルガノイド技術、②臓器チップ技術）／微生物培養技術／微生物叢解析技術（メタノゲム解析、メタトランスクリプトーム解析等）／アグリフィールド解析技術／オミクス解析技術（ゲノム解析等）／非モデル生物の改変技術（①作物・家畜、②ヒト）

【統合化・システム化】ビッグデータを統合・解析し様々な事象（医療、農業ほか）の対象を個別化し、予測する技術

多階層オミクス・臨床情報解析技術／マルチスケール解析技術（分子～個体）／マルチモダリティ解析技術／モニタリング・ウェアラブル技術／植え込み型医療機器技術／ビッグデータ解析技術（人工知能含む）

このように精緻、先鋭化等の技術革新が起こっているものの、複雑な生命現象を理解するためには、様々な未解決問題が存在する（表 1.3.2）。生命は様々な階層（生体分子、細胞、組織、臓器、個体）の相互作用、連関であり、それぞれの階層において未解決問題が存在する。細胞内の分子構造はこれまで、X 線解析によって結晶を用いた構造解析が行われてきた。結晶化できない蛋白質の構造解析は難しかったが、クライオ電子顕微鏡の登場により、非結晶のまま蛋白質の Å レベルの構造解析が可能になった。しかしながら、蛋白質の動的な構造変化を時系列的に追いかけることは難しく、分子の構造変化や細胞内での動態を ***in situ*** で、細胞が“生きた”ままオペランドに計測したいというニーズがある。そのためには、水溶液中で（凍らさない状態）での構造変化をリアルタイムで計測・解析する技術等が必要だろう。生体反応は生体内での化学反応に他ならないのであるから、細胞内の局所における“場”の状態わからなければ、その化学反応を正確に見積もりことはできない。そこで、細胞内の pH や温度などの特性を計測する技術が重要になる。

細胞内の多数の分子間の相互作用を解明するためには、細胞内分子の網羅的な可視化技術やネットワーク解析技術が必要である。さらに細胞間の相互作用を解析するためには、生体膜上での分子反応を定量的に解析したいというニーズがあり、膜タンパクの定量化、リアルタイムな計測技術、あるいは細胞間のメディエーター（シグナル伝達物質）の可視化技術などが必要である。

細胞の生体での動態を明らかにするためには、1 細胞のトラッキング技術や持続的可視化技術、脳機能を化学的に理解するためには、活動神経回路の可視化技術や脳内タンパク質の定量化技術も必要である。また、特にヒトを対象にした場合は、採取可能な組織（血液等）を用いて生体の状態を知る技術や臨床、環境、遺伝情報等を統合的に解析することでヒトの健康状態を推測する技術の開発が課題となる。

表 1.3.2　生命科学における未解決問題に対する計測ニーズ

未解決問題	計測ニーズ
生体内における分子の構造変化をリアルタイムで観察したい	タンパク質−分子解析（糖鎖修飾などの計測・評価）、微量水溶液中の分子の原子レベルでの解析技術。
細胞内の環境（分子濃度、pH分布、温度分布等）を知りたい	細胞内の温度、pHの定量計測、生体分子濃度測定技術
生体分子の体内動態を経時的に観察したい	生体分子のイメージング技術、分子の非ラベル化技術、微量タンパク質・ペプチド等の定量化技術
細胞に存在する無数の分子の相互作用を定量的に解析したい	細胞機能変化の定量化技術、細胞内タンパク質の可視化および微量計測技術、タンパク質ネットワーク解析技術、細胞内2原子分子の可視化技術
生体膜での分子反応を定量的に解析したい	膜タンパク質の解析技術、微量ペプチド等の定量化技術、膜タンパクおよび関連分子のリアルタイム計測技術
細胞の特性を器官毎に明らかにしたい	単一細胞での微量タンパク質計測技術
生体（微小）環境と幹細胞との相互作用を可視化したい	細胞間メディエーターの可視化技術、細胞分化の定量化およびモデル化技術
1細胞レベルの分子分布と細胞間相互作用の関連を知りたい	器官、臓器等の位置情報を保持した生体分子定量計測技術
細胞が分化したり、器官等への誘導される仕組みを定量的に解明したい	器官発生に関与しているタンパク質の相互作用解析技術、細胞間メディエーターの可視化技術、組織表現型の定量化技術、発生機構のモデル化技術
細胞の生体内での動態をリアルタイムで知りたい	一細胞マーキング技術、細胞の持続的可視化技術、
脳の機能を化学的に理解したい	活動神経回路の可視化技術、脳内タンパク質の定量化技術
入手可能な生体組織（血中循環腫瘍細胞等）から生体内の疾患の状況、進行度を知りたい	リキッドバイオプシー
入手可能な生体情報（臨床、環境、遺伝等）から健康状態や疾患の進行度を知りたい	生体情報の意味的計測
微生物が感染したり共生したりする仕組みを解明したい	難培養微生物の培養技術、ゲノム間相互作用の解析技術、タンパク質シークエンス技術

近年の革新的な計測技術の登場により、生体反応に関わる役者（分子、細胞）の顔ぶれはかなりわかりつつある。これからは、その役者たちの振る舞いを計測することで、つまり、生体（分子）の精緻なオペランド計測技術を開発することで、生体反応という“劇”を鑑賞することができるだろう。

（3）－1　環境分野の計測ニーズ

日本における環境問題への本格的な取り組みは、戦後の急速な高度経済成長期に生じた公害への対策から始まったといえる。その後、酸性雨やオゾン層破壊、地球温暖化など、人間活動による定常的な物質の排出が引き起こす地球規模的な課題が広く認識され、国際的な取り組みが行われるようになり現在へと続いている。このような拡大かつ複雑化する環境分野の現状を正しく理解し、その課題に対処するため、対象や時空間スケールにおいて多種多様な計測ニーズが存在する（図 1.3.1）。

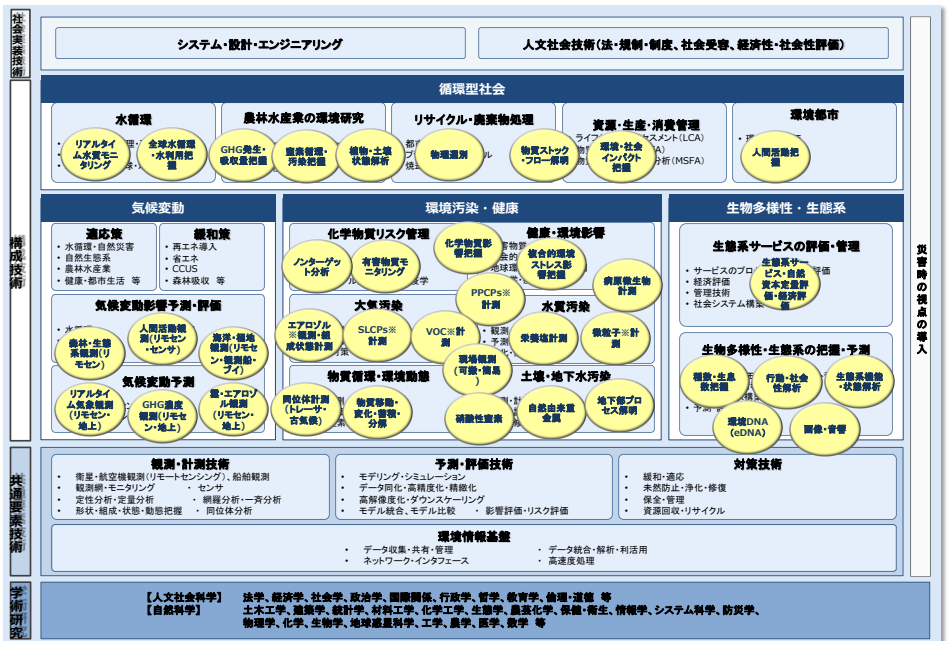


図 1.3.1　環境分野の計測ニーズの俯瞰

環境分野の計測ニーズについて、主な 4 つの方向性とその関連動向を以下に述べる。

第一の方向性は、超低濃度の微量元素や同位体、1 分子レベルの検出等を可能にするための「高感度化」である。例えば、微小な液滴をプラズマ内に導入できる噴霧装置や、ナノ流路での表面張力を利用した制御装置などが開発され、わずかな試料中の超微量成分の分析が可能になりつつある。検出方法に関しても、キレート樹脂の微量金属分析への利用などさまざまな工夫が行われている。こうした技術は、「省試料化・省試薬化」というニーズにも貢献する。

第二の方向性は、「対象の拡大」である。例えば、低温プラズマが開発され、プラスチック、繊維、紙、生体など、熱に弱い物質の分析も可能となりつつある。また、散乱光の偏光特性を利用したエアロゾルの形状と組成の把握のように、通常行われるような物質の特定と量の検出のみならず、微粒子の形状や組成、状態の把握技術も進展している。さらには、生態系における相関把握や、炭素や窒素や水などのフットプリントなど、計測の概念が成分などの物理的なもの以外の把握にもひろがりを見せている。

第三の方向性は、「網羅性と情報処理技術の融合」である。これまでの分析では、対象物質ごとに異なる手法が存在していたが、膨大な物質を同時かつ網羅的に把握できる手法の開発が進展

している。それに伴い、大量のデータを処理する情報処理技術の活用が必然となり、検出や測定の自動化を行うソフトウエアの開発やライブラリの整備が進められている。こうした技術により、何があるかが不明でも存在する物質を網羅的に分析することが可能となり、有害物質を取りこぼしなく把握することができる。また、増加し続ける管理対象化学物質の効率的なモニタリングへの貢献も可能となる。

第四の方向性は、「長期観測」である。環境分野では長期間の継続的なモニタリングによるデータの積み重ねが研究開発の深化と発展に不可欠である。このため、モニタリングや現場での観測を想定した安価、簡易、可搬的な計測技術が重要となる。

様々な環境の課題が顕在化しつつあり、その解決やさらなる顕在化の抑制が急がれている。このような課題に対し、現状を把握し、将来予測を行い、そこから得られた知見に基づき、各課題に適した対策を行うことが求められている。その期待に応えるための基盤技術として、計測技術の可能性は非常に大きい。

【参考】

- JST CRDS 研究開発の俯瞰報告書　環境分野（2017 年）
  http://www.jst.go.jp/crds/report/report02/CRDS-FY2016-FR-03.html
- JST CRDS 俯瞰ワークショップ報告書「平成 27 年度　環境科学技術分野　最新研究開発動向」
  http://www.jst.go.jp/crds/report/report05/CRDS-FY2015-WR-13.html
- 研究開発ローンチアウト第 73 回「環境分野における基盤技術の研究開発動向と今後の方向性」
  http://scienceportal.jst.go.jp/reports/launchout/20160715_01.html

（3）－2　環境分野における計測の二極化

環境分野の計測は、高感度・精密な分析と広域・現場での観測の大きく 2 つに分類することができる（二極化）。

高感度・精密分析の特徴は、主に最先端の研究への利用であること、高額の開発費用が必要となること、販売台数も少ない傾向にあることなどがある。1 回の測定で得られるデータが増えているため効率の良いデータ処理が求められており、今後はディープラーニングの活用などもあり得る。装置のハード面だけでなく、アルゴリズムやライブラリ整備などソフト面の開発も進める必要がある。

広域・現場観測の特徴は、可能な限り広域で、統一された多くのデータが必要であることが挙げられる。よって、装置が安価であること、操作が簡易であること、可搬性があることが重要な要素となる。複数の測定の蓄積により、データ解析やモデル計算への利用が可能となり、メカニズムの解明や過去の再現、将来予測に貢献することができる。長期間の継続的なモニタリングによるデータの積み重ねが研究開発の深化と発展に不可欠であり、サンプリング・モニタリングの効率化、自動化、広域化、高頻度化や、統計学的にも優れた観測手法の開発、観測や得られた情報の基盤構築・維持管理が大きな課題である。モニタリング技術の普及には戦略的な標準化への働きかけも求められる。なお、広域・現場観測においては、人工衛星の飛躍的な進歩のように、高感度・精密化が進展している側面もある。

どちらを目指すかによって技術開発の戦略は大きく異なる。以上の二極化の特徴を表 1.3.3 にまとめる。

表 1.3.3　環境分野の計測の二極化

二極化の内容	特徴	ICTとの関連	今後の方向性・課題
高感度・精密分析	• 主に最先端の研究用途 • 高額、販売台数少	• 1回の測定で得られる大量のデータ処理が必要	• ハード開発と同時に、アルゴリズム開発やライブラリ整備などのソフト開発が必要。
広域・現場観測	• 広域で統一されたデータが必要 • 安価、簡易、可搬性が重要	• 複数の測定の蓄積によるデータ解析やモデル計算への利用が可能	• サンプリング・モニタリングの効率化、自動化、広域化、高頻度化 • 観測の基盤構築・維持管理 • 情報の基盤構築・維持管理（データの集約と共有、リアルタイム公開） • 標準化

【参考】

- JST CRDS 俯瞰ワークショップ報告書「平成 27 年度　環境科学技術分野　最新研究開発動向」
  http://www.jst.go.jp/crds/report/report05/CRDS-FY2015-WR-13.html

（４）エネルギー分野

エネルギー分野の計測ニーズを、エネルギー分野の研究開発俯瞰報告書(2017 年)に記載の俯瞰図をもとに図 1.3.2 に示す。本分野における計測ニーズの大きな潮流は、エネルギーシステム内の反応のその場計測、直接観察や、システム内の膨大なエネルギーデータの測定・収集などである。より具体的には、①火力プラント内高温高圧等極限環境下での燃焼素反応その場計測、②電池材料内反応の直接観察、③エネルギーマネジメントシステム(EMS)のための膨大なエネルギーデータ収集・分析などが挙げられる。③は新たな潮流：計測×ICT に関連するものである。

エネルギー分野の構成技術、共通要素技術区分毎の計測ニーズは以下のとおり。

【エネルギー供給（資源開発/エネルギー・物質変換）】

火力発電システムでは、火力プラント高度監視技術や、レーザーを利用した燃焼素反応その場計測技術等のニーズが、燃料電池発電システムでは、固体酸化物形燃料電池(SOFC)の耐久性/効率向上を狙った X 線吸収微細構造(XAFS) 先端計測等のニーズが、太陽光発電システムでは、電池材料基礎物性計測や発電性能高度測定手法等のニーズが出てきている。

【エネルギーネットワーク（発送電・エネルギー配送/配電・熱供給/需要家内）】

蓄エネルギーでは、蓄電池（キャパシタ含む）における電池反応の直接観察・計測技術等のニーズが、分散協調型 EMS では、EMS のための情報計測や、時間的・空間的粒度が多岐で膨大なエネルギー計測等の新しい広義の計測ニーズが現れている。

【エネルギー利用（高効率利用/高度利用）】

熱利用機器では、コジェネレーション、ヒートポンプ、空調等における熱使用量および排熱量の計測技術等のニーズが、断熱・遮熱・調光技術では、断熱材の高精度熱伝導率測定手法等のニーズが出てきている。

【共通要素技術】

エネルギー材料では、耐熱材料における物性測定や組織観察等による損傷評価、余寿命推定等のニーズが、また、高強度軽量材料セルロースナノファイバにおけるナノセルロース分散化状況計測等のニーズが見られつつある。

【計測ニーズの潮流】
①火力プラント内高温高圧等極限環境下での燃焼素反応**その場計測**

②電池材料内反応の**直接観察**

③エネルギーマネジメントシステム(EMS)のための**膨大なエネルギーデータ収集・分析**

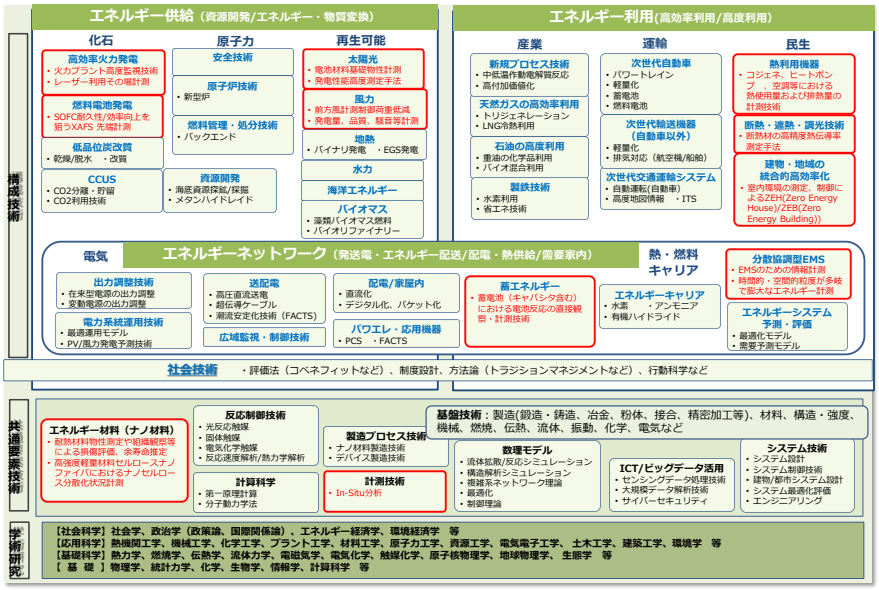


図 1.3.2　エネルギー分野の計測ニーズ俯瞰（赤字が計測ニーズを示す）

（５）ナノテクノロジー・材料分野

物質や材料の物性は、ナノスケールの構造に起因する。さらには、複雑な現象（生命現象含む）も、ナノスケールの領域における原子または分子間の相互作用によって理解できる場合が多い。したがって、材料（無機、有機、生体およびそれらの複合系を含む）の物性や諸現象の起源を明らかにするには、ナノスケールの構造や物性、さらにはその動的変化を計測できる「ナノ計測技術」が求められる。とりわけ、ナノサイエンスにはプロセスの微視的解明のため使用環境下でのその場計測である「オペランド計測技術」に高いニーズが存在する。触媒における化学反応の動的観察、電池における充放電下での動的観察、トライボロジー（摩擦摩耗）の観察、高温、ガス環境、電場、磁場、応力などの「環境下」の計測、生体における in vivo 動的観察など、in-situ(その場)で動作状態、あるいは生存状態のまま観察・計測することを、ここではオペランド計測と呼ぶ。オペランドは、実用を強く意識した用語であり、単に固気界面での反応過程や外場による物性変化を扱う従来の「in-situ」とは区別される。

主要なナノ計測技術として、電子顕微鏡や走査プローブ顕微鏡(SPM)、放射光･X 線、超短パルス光などの電磁波、中性子、ミュオン、陽電子などの粒子線ビームが挙げられる（もちろんこれだけではない）。CRDS では、ナノ計測技術へのニーズ調査をおこなった結果、下表のような研究開発上の未解決問題に対応する、計測ニーズ例として整理した。また、ナノ計測技術のニーズと技術進展・開発の方向性について、次節の表 1.3.4 として、環境分野、エネルギー分野、ライフサイエンス分野のニーズも合わせてマッピングして示している。

表 1.3.4

「ナノテク・材料研究」の未解決問題に対応する計測ニーズ

未解決問題	計測ニーズ
触媒反応機構を解明し、希少元素を用いない触媒や超高効率触媒を開発したい	触媒の反応状態および反応部位のリアルタイム測定。活性金属と担体の位置的関係の明確化。大型放射光を用いた反応解析研究が進みつつあるが、さらに簡便な方法が求められる。
耐久性と高い物性値を兼ね備えた材料を創出したい（例:有機半導体材料）	劣化の原因を解明する技術。「有機物質のあらゆる計測を研究現場でリアルタイム且つコンパクトに」おこなえることが必要。有機半導体材料の研究開発の現場（グローブボックス内やパイロットプラント）に持ち込めるような小型機器(e.g., NMR）が求められる。認証標準試料と分析手法のセット開発が必要。有機半導体材料の標準物質では「純度・ピュアさを示す計測技術とセットで物質を標準化すること」が世界で勝つためには必要。
ナノ･マクロレベルの凝集体の機能を予測したい	原子・分子サイズと、ナノ・マクロレベルの凝集体の同時計測(可視化)。現実の計測とセットで、計算科学によるシミュレーション技術が解釈のためには必要(例えばナノワイヤのような単なる集合体ではないもの。非平衡開放系の散逸構造。巨大計算で指針が必要)。
薄膜デバイスの界面に機能性を持たせるような新素材開発、数nmオーダーの素子を開発をしたい	機能発現させる素材表面構造や、素子サイズが今後数nmになると、空間分解能・深さ分解能ともに原子レベルの分析手法が求められる。また、軽元素の拡散をナノレベルで解析することが必要、定量化や元素同定。現状のCs-STEM/EELSや3DAPでは不足。さらに装置価格と分析コストの低減が必要。
実環境化や雰囲気下での動作状態を可視化したい	例：液体中における電気化学反応の高分解能観察。電池充放電下での動的観察、電極上の反応素過程、劣化機構解明、光触媒の活性状態計測 例メモリRe-RAM：酸化還元系なので雰囲気の影響を受ける（非真空）。大気下で測定できるSIMS開発。
生体物質や環境成分（混合系・多成分系）を分離せず、ダイレクトに分析したい	10μmスケールの3次元計測技術。 界面・表面の効果が極めて大きい
ナノ構造体の材料特性を定量化したい	材料強度や熱物性の精密測定。ナノインデンテーションによる弾性率、降伏強度、破壊強度、靭性、疲労特性などの測定。ナノ領域の親水性、疎水性計測。ナノマニピュレーション、微小引っ張り試験デバイス、熱伝導率測定デバイス。ナノ粒子測定
量子現象の起源を解明し、自在に制御したい	フォノン計測（ナノスケール局所熱伝導・熱輸送のリアルタイム計測） トポロジカル現象計測、マヨラナ粒子測定
高機能を発現する高純度結晶がほしい	化合物半導体やナノカーボンの結晶成長過程の反応・時間分解／原子・分子レベル測定
目的の化学物質を自在に合成したい	化学反応の反応中間体・状態ダイナミクス計測

これらの計測ニーズを満たすには、特定の計測技術だけですべてが解決されるわけではない。例えば、SPM においては、大気中・液中へと展開する研究が世界中で進められており、各種電

池の電極反応、金属腐食反応、触媒反応、酵素反応などにも応用されている。電子顕微鏡においては、ガス環境セルの開発が進んでおり、試料周辺を 1atm～1.5atm の極めて高い圧力のガス環境中の試料をおよそ 1000°C まで加熱することができ、燃料電池の動作時における材料の変化過程や、自動車用排ガス浄化触媒の動作時微細構造観察がなされている。放射光・X 線は観測対象とする動作状態に影響を及ぼさない点においてオペランド計測に適したプローブである。電位変化に伴う電極触媒の反応素過程の解明、電極界面の構造変化の直接観測、電極反応中の各元素の化学結合状態や電子状態の直接観測などのオペランド計測が行われている。超短パルス光を用いた計測は、フェムト秒の時間分解能で、物質中の電子や原子核の動きに伴う光学的性質の時間変化を分光計測するもので、オペランド計測に必要なナノの空間分解能とフェムト秒の時間分解能を併せ持つ計測法である。

今後求められるナノ計測技術は、2017 年ノーベル化学賞受賞対象となったクライオ電子顕微鏡に見られたような、従来の研究開発でボトルネックとなっていた部分を大きく解決するようなイノベーションであろう。例えば、トポロジカル量子現象やフォノンといった現在十分にその状態を捉え切れていない現象を測定し、新たな科学領域の開拓するための計測技術、生体物質・細胞内外の物質の反応・変化過程、各研究室レベルでの高度なオペランド計測、材料の劣化や耐久性・反応性等の時間変化を考慮した 4D 計測等が重要になってくると考えられる。さらに今後のデータ駆動型の研究開発を前提とした計測機器開発が課題となる。人間が頭では追いきれない膨大な測定データを処理するソフトウエア技術、そこから物質科学・材料的な意味を見出す手法や技術が重要になるだろう。加えて、センシング技術や測定データ処理技術は、技術的に複合していくと考えられる。究極的には、ニーズに導かれて、いつでも・どこでも・その場で使える測定デバイスによる、超高度・超高性能な複合センシング・計測技術・システムへと今後のナノ計測は向かっていくだろう。

1．4　計測ニーズの俯瞰と方向性

計測の各分野には、いわゆる流れや潮流というものが存在していると本センターでは考えている。そこには、ニーズから惹起される方向性と、技術シーズそのものの潮流とがある。例えば、より複雑で現実の過程を直接観察したいというニーズの高まりと、それとは対称的に、ある特定の測定技術の分解能を徹底的に高めて極限化を追求する世界というのも確実に存在する。さらに、シミュレーションやデータの自動化･解析ソフトなど情報通信技術(ICT)によって実現される計測技術、また、低コスト化やデスクトップ型などの小型化技術・汎用化技術、標準化に代表されるユーザーニーズへの対応等がある。これからの計測技術の具体的な流れを明らかにするために、各分野の計測ニーズを検討してきたが、その結果を図にまとめたものが次の図である。横軸には各分野の研究開発ニーズとして概ね共通項として捉えられた、より現実の過程を計測しようとする流れであり、これはすなわち、より複雑な、実際の測定対象が置かれた環境に近く、不確実な系をそのまま計測しようというニーズの方向性である。この流れにおける具体的な計測技術のキーワードが、「オペランド計測」「非接触・非侵襲計測」「界面・内部計測」「多因子同時計測」である。縦軸には、技術そのものがより先鋭化していく流れ、すなわち高度化・極限化追求であるが、この方向性はニーズと決して無縁ではなく、縦軸のテクノロジーの進歩が、横軸側のニーズに対してある日突然、決定的な解決策をもたらすということが歴史を振り返れば過去何度もあった。この流れにおける具体的な計測技術のキーワードが、「高空間分解能化」「超高速化」「三次元化」である。本図を作成する過程で特に顕著な傾向があったのが、黄色で全体にかかる部分として描いている「計測技術革新を牽引する ICT」である。測定データが膨大になり、そのデータ空間から新知見を予測し発見しようとすることが徐々に現実化している。これまでは計測対象の実空間から新知見を見出すことが研究開発のベースであったが、徐々に膨大なデータ空間のほうから新知見を見出す割合が増えてきている。このことは、データ空間のウェイトが増しているということを意味している。また、計算科学にもとづくシミュレーションやモデル化を実測に連動させる技術、測定データの処理を如何に自動化するかというデータツールの開発・充実、そして技術の普及に決定打をもたらすのが、より小型で簡便な計測、誰もが測定できる環境を提供することが、計測・分析機器ビジネスでは勝敗を左右するようになってきている。このように、計測技術は一見すると測定技術・装置ごとに細分化され区分けされた世界のように認識されがちだが、観察・測定対象へのニーズや、ICT の浸透によって切り拓かれる新しいデータ空間の世界は、計測技術全体に働くベクトルなのである。

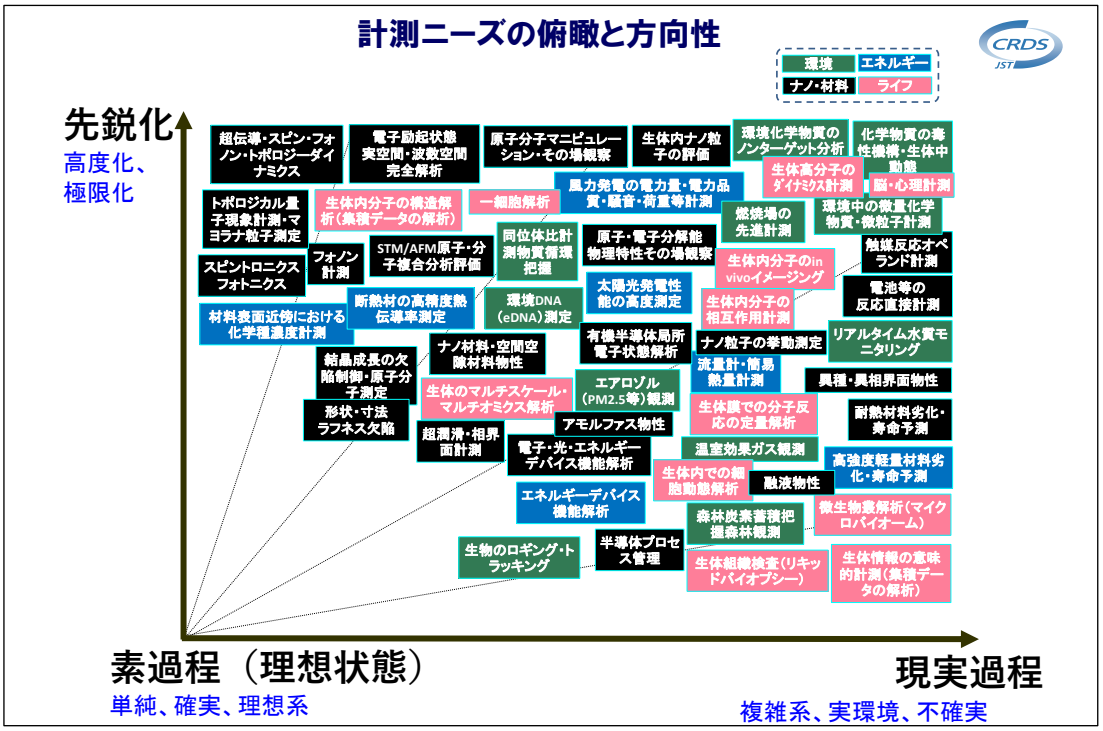

計測ニーズの俯瞰と方向性
環境
エネルギー
ナノ・材料
ライフ
先鋭化
高度化、
極限化
超伝導・スピン・フォノン・トポロジーダイナミクス
電子励起状態実空間・波数空間完全解析
原子分子マニピュレーション・その場観察
生体内ナノ粒子の評価
環境化学物質のノンターゲット分析
化学物質の毒性機構・生体中動態
生体高分子のダイナミクス計測
脳・心理計測
風力発電の電力量・電力品質・騒音・荷重等計測
トポロジカル量子現象計測・マヨラナ粒子測定
生体内分子の構造解析（集積データの解析）
一細胞解析
燃焼場の先進計測
環境中の微量化学物質・微粒子計測
同位体比計測物質循環把握
原子・電子分解能物理特性その場観察
触媒反応オペランド計測
フォノン計測
STM/AFM原子・分子複合分析評価
生体内分子のin vivoイメージング
スピントロニクスフォトニクス
太陽光発電性能の高度測定
電池等の反応直接計測
断熱材の高精度熱伝導率測定
環境DNA（eDNA）測定
生体内分子の相互作用計測
材料表面近傍における化学種濃度計測
有機半導体局所電子状態解析
ナノ粒子の挙動測定
リアルタイム水質モニタリング
ナノ材料・空間空隙材料物性
結晶成長の欠陥制御・原子分子測定
流量計・簡易熱量計測
エアロゾル（PM2.5等）観測
異種・異相界面物性
生体膜での分子反応の定量解析
生体のマルチスケール・マルチオミクス解析
形状・寸法ラフネス欠陥
アモルファス物性
耐熱材料劣化・寿命予測
超潤滑・相界面計測
電子・光・エネルギーデバイス機能解析
温室効果ガス観測
高強度軽量材料劣化・寿命予測
生体内での細胞動態解析
融液物性
エネルギーデバイス機能解析
微生物叢解析（マイクロバイオーム）
森林炭素蓄積把握森林観測
半導体プロセス管理
生物のロギング・トラッキング
生体組織検査（リキッドバイオプシー）
生体情報の意味的計測（集積データの解析）
素過程（理想状態）
単純、確実、理想系
現実過程
複雑系、実環境、不確実

図 1.4.1

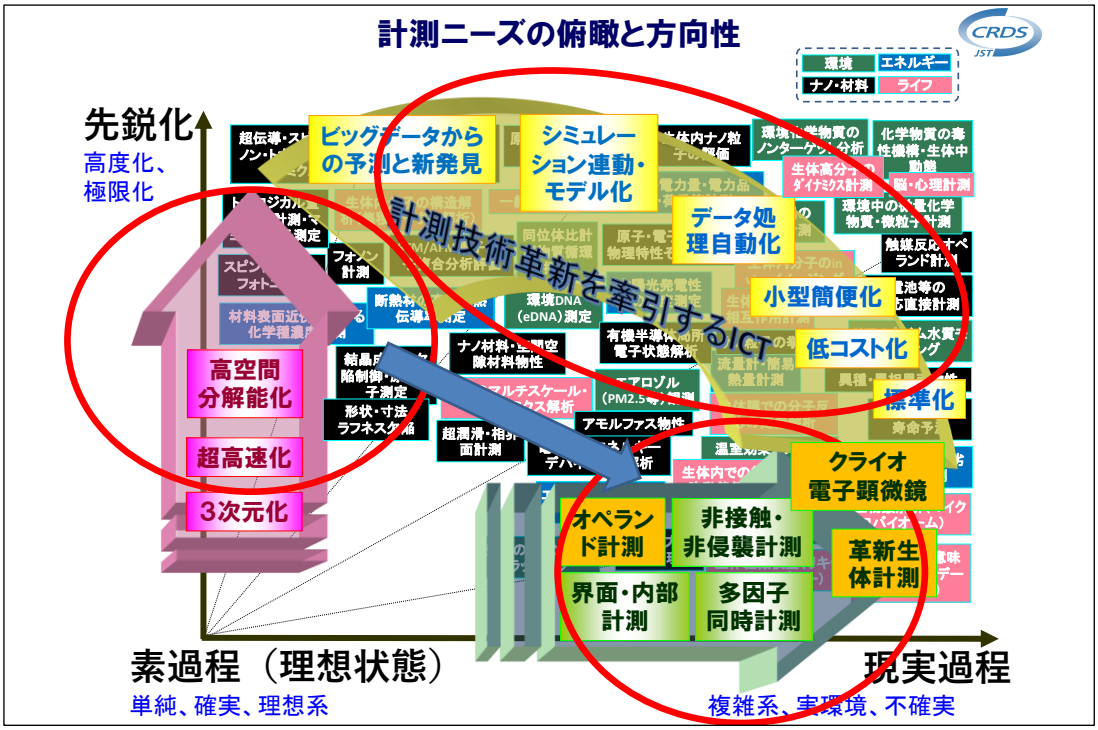

計測ニーズの俯瞰と方向性
環境
エネルギー
ナノ・材料
ライフ
先鋭化
高度化、
極限化
ビッグデータからの予測と新発見
シミュレーション連動・モデル化
データ処理自動化
計測技術革新を牽引するICT
小型簡便化
低コスト化
標準化
高空間分解能化
超高速化
3次元化
クライオ電子顕微鏡
オペランド計測
非接触・非侵襲計測
革新生体計測
界面・内部計測
多因子同時計測
素過程（理想状態）
単純、確実、理想系
現実過程
複雑系、実環境、不確実

図 1.4.2

第２章　抽出された要点

２．１　極限オペランド計測

オペランド計測とは、実際の使用環境下で刻々と動作・変化し続ける現象を直接観測することによって、測定対象と機能との相関を見出すことを目的とする計測技術である。“Operando”という言葉はラテン語で “working”，“operating”の意味を持ち、触媒研究で 2002 年頃より使われ始めた。

近年、エネルギー・環境問題の観点から、触媒材料・デバイスの新規開発や高度化が強く求められており、その中でも動作中の触媒やデバイスを直接観る「オペランド観測」が一大トレンドとなっている。オペランドは、実用を強く意識した用語であり、外場による物性変化を扱う従来の「in-situ」とは区別される。

図 2.1.1　オペランド計測

多くの場合、X線は観測対象とする動作状態に影響を及ぼさない点においてオペランド計測に適したプローブである。また、デバイスの機能を担う部位が表面に露出していることは稀であり、パッケージ内部の状態変化を捉える必要性からも、透過力の高いX線による解析が有効である。このため、オペランド計測は強い X 線源が得られる放射光施設において進展した。

オペランド計測は電池・触媒の分野にとどまらず、生命科学やエネルギー・環境用途の材料において、水中や大気中、表面ナノ形状や異種界面の接合、摩擦の状態など、多様な環境場における計測ニーズに応えようとしている。このため放射光施設を用いての X 線計測にとどまらず、走査プローブ顕微鏡、電子顕微鏡、ラマン測定、共焦点顕微鏡測定など広範な計測分野において，実環境の動作状態、あるいは、生存状態でのオペランド計測の手法が進展しつつある。

今後の課題は、新たなイノベーションを牽引するために、現在実用化されている環境よりシビアな、様々な極限環境でのオペランド計測が求められている。例えば、ロケットエンジンなどの高温環境下における動的観測、ミリケルビン以下の極低温における量子素子の動作観測、超高圧下での化学反応過程の動的観測、パルス超強磁場印加による磁性材料の超短時間応答の解析などが挙げられる。

具体例とキーテクノロジー

① 触媒反応時の表面状態計測

触媒作用中に物質表面で何が起こっているか、期待する反応が進行しているかを確認しながら解析する。

IR、Raman、ESR、UV-Vis、XAFS 等で、更にそれらが組み合わされた同時測定による触媒解析報告例が増加している。

透過力の高い放射光 X 線による解析が有効。今後はより広範な手法や更なる性能向上が期待される。

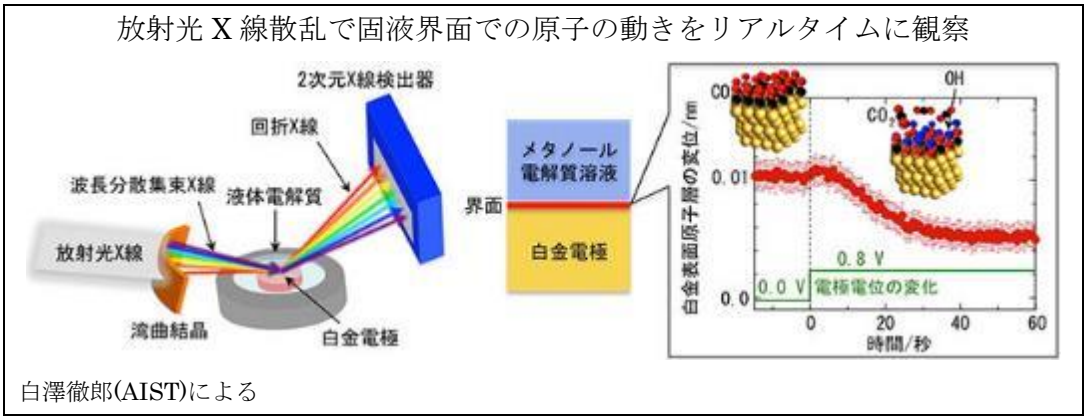


図 2.1.2　触媒反応の表面状態計測

② 電池充放電動作状態計測

蓄電池の内部の材料の構造変化が、実際の充放電時にリアルタイムで観測できることが可能になってきた。

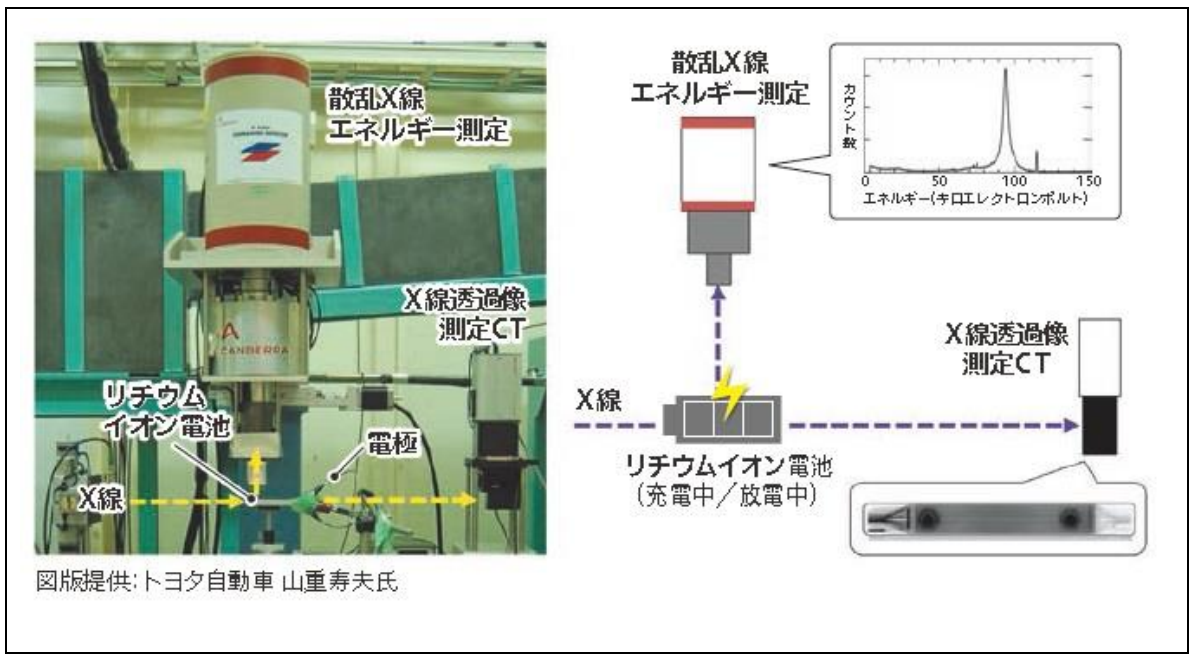


図 2.1.3　放射光 X 線によるリチウムイオン電池の充放電過程

充放電サイクルに伴う劣化挙動、長期保存時の経時変化、高温や低温での使用時の劣化挙動など、蓄電池の信頼性や安全性に関する詳細な情報が、実際に使用する電池を直接観測することで得られる。

③　生体分子の動的観察

液中 SPM は日本の技術が世界をリードしており、生体材料の in vivo 観察で成果を発揮している。特に FM-AFM 技術の進展により、生体分子の動的観察が可能になってきた。

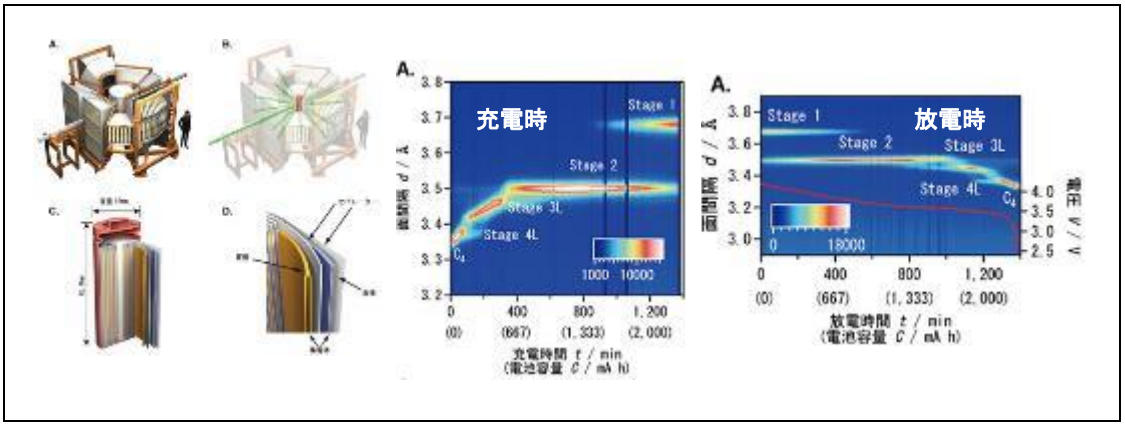
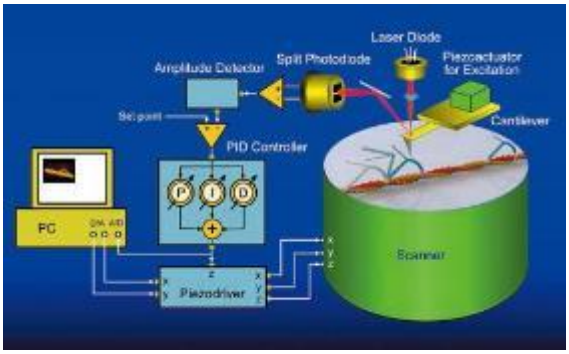
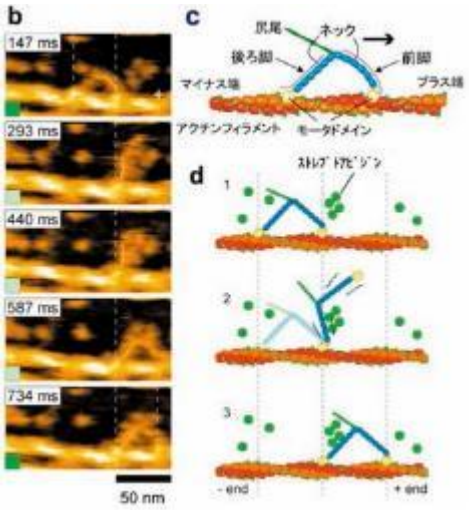


図 2.1.4　リチウム電池充放電時の中性子線によるオペランド計測

たんぱく質の構造と動きを直接観察



試料の表面をカンチレバーの先端で高速になぞる。カンチレバーには常にレーザー光が当たっており、その反射光の動きによって表面の形状がわかる。



ミオシン V がアクチン繊維の上を歩く様子

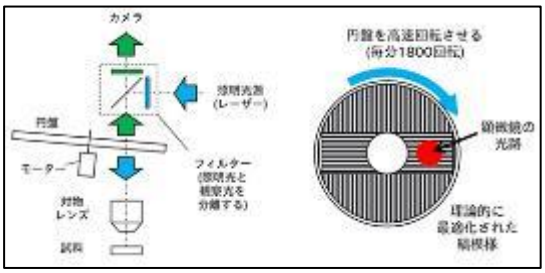
図 2.1.5　たんぱく質の構造と動きを直接観察

2．2　生体イメージングにおける技術トレンド

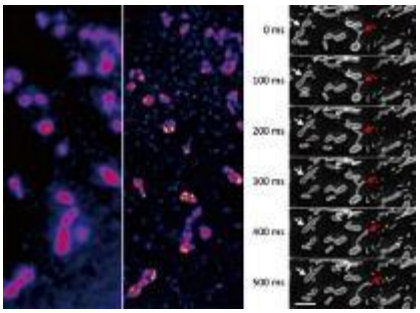
生体計測におけるイメージング技術のトレンドとしては、生命という複雑な現象をリアルタイムに、または、精緻に解析する方向性が挙げられる。代表的な技術として、超解像顕微鏡技術、クライオ電子顕微鏡技術、個体透明化技術などを挙げることができる。

超解像顕微鏡技術：

通常の光学顕微鏡では超えられない分解能の壁である回折限界を超えるイメージング技術である。生体分子を標識した蛍光プローブからのシグナルを検出する際の光の回折限界を超える空間分解能を達成するための原理が 1990 年代中頃から 2000 年代中頃にかけて提案・実証され、2010 年頃には 40～100 nm の空間分解能を有する超解像顕微鏡が市販された。STED（Stimulated Emission Depletion）や PALM（Photo Activation Localization Microscopy）といった超解像計測法と、PALM の元になった 1 分子計測法（ローカリゼーション法）は 2014 年度のノーベル化学賞を受賞している。図 2.2.1 は超解像顕微鏡のひとつで構造化照明法を利用した顕微鏡法で、STED や PALM に比べると空間分解能は落ちるが（～100 nm）、時間分解能を高めた構造化照明顕微鏡（Structured Illumination Microscopy；SIM）の模式図（左図）と SIM で 100 ミリ秒の時間間隔でイメージングしたミトコンドリアであり（右図）、ミトコンドリアが融合する様子などが画像化されている。



スピニングディスク超解像顕微鏡の模式図
左：光路の模式図。右：円盤の縞模様の模式図。従来のスピニングディスク顕微鏡より細かい縞模様を刻んだ円盤を利用することで、従来の光学顕微鏡より高い空間分解能の成分がカメラに結像する。



ミトコンドリア外膜の動態
左　：　従来の蛍光顕微鏡像。
中央　：　スピニングディスク超解像顕微鏡による画像。
右　：　100 ミリ秒ごとに撮影した画像を並べたもの。

http://www.riken.jp/pr/press/2015/20150415_1/

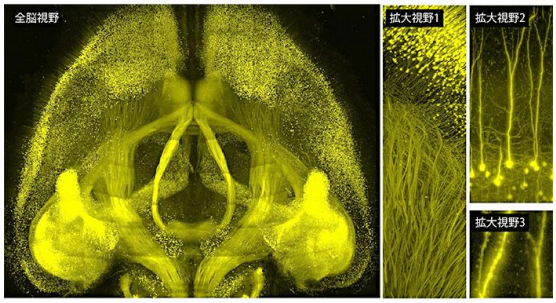
図 2.2.1　超解像顕微鏡技術（構造化照明）

透明化技術：

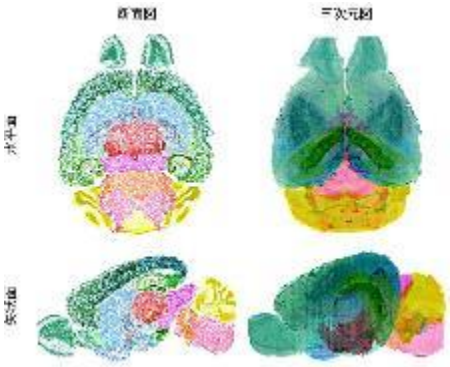
固定標本に限られるが、脳組織全体を透明化することで、神経回路や神経活動を全脳スケールかつ一細胞レベルで捉えて解析する技術が実現している。尿素やアミノアルコールなどをさまざまに組成した溶剤で脳組織内の水を置換し、溶剤と脳組織の屈折率を近づけて組織内散乱を低下させ、さらに脂質を溶剤によって洗い去るなどのプロセスで組織を透明化し、組織内の蛍光分子を光学顕微鏡で高速に 3 次元観察する手法である。Scale、CRALITY、SeeDB、CUBIC などの

方法が開発され、現在も改良が続いている。

透明化技術とライトシート顕微鏡のような光学的に観察可能な深度を拡張する技術を組み合わせることで、マウスの全脳細胞の可視化が可能になっている。透明化技術は日本と米国が開発を牽引している。高効率な透明化手法の開発に伴い、マウス全身臓器や、ヒト臓器を含む霊長類を対象とした応用も可能となってきている。問題点は、透明化した個体をいかに広視野・高解像度で観察するかという点にあり、低倍率・高開口数の対物レンズが求められている。透明化した組織を膨張（Expansion）させることで、通常の顕微鏡で超解像レベルでのイメージングを行うことが可能な Expansion 顕微鏡が注目を集めている。



マウス全脳の 1 細胞解像度での観察
蛍光タンパク質（YFP）が一部の神経細胞に発現しているマウス脳を用いて CUBIC-X で膨潤・透明化した後に、高解像度シート照明型蛍光顕微鏡で全脳を観察した。100 万枚超の画像データが取得されるが、それらを張り合わせて全脳イメージを再構成したもの（全脳視野）、一部を再構成したもの（拡大視野 1）、神経細胞に着目して再構成したもの（拡大視野 2）、シナプス構造に着目して再構成したもの（拡大視野 3）を示してある。1 回の撮影で、シナプスレベルの構造を観察できる解像度で全脳を観察することが可能である。



1 細胞解像度マウス脳アトラス（CUBIC-Atlas）
マウス全脳に含まれる全細胞を検出し、それぞれの細胞がどの脳領域に含まれるのかを示した。それぞれの色が脳領域を表している。図は細胞を表す点で構成されており、点描画様のアトラスとなっている。

https://www.amed.go.jp/news/release_20180306-05.html

図 2.2.2　透明化技術とライトシート顕微鏡によるマウス全脳イメージング

クライオ電子顕微鏡技術：

本技術の登場により、従来の X 線によるタンパク質の構造解析では必須であった結晶化できないタンパク質の構造解析が可能となった。非晶質層の氷に精製した試料を単分散で包埋し、様々な向きで撮影された試料像を、単粒子再構成法という計算手法を用いることで、高い解像度で立体構造を解析することが可能となった。2.2Åの解像度でβガラクトシダーゼの構造解析に成功している。クライオ電子顕微鏡はタンパク質の構造解析におけるブレークスルー技術であるため次項で詳述する。

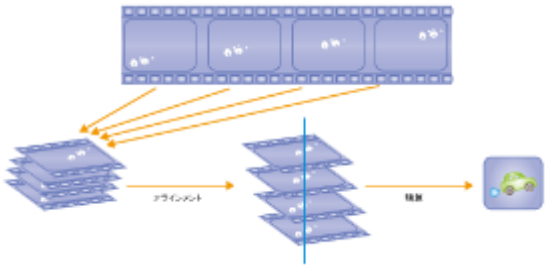
参考：

Nature ダイジェスト Vol. 12 No. 4 | doi：10.1038/ndigest.2015.150412
Science. 2015 Jun 5;348(6239):1147-51. doi：10.1126/science.aab1576.
俯瞰報告書

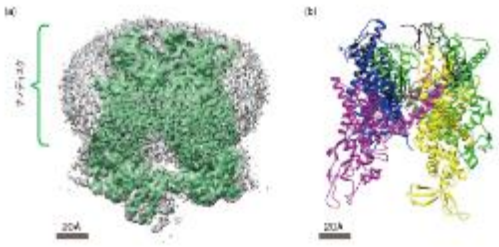
2．3　クライオ電子顕微鏡法

クライオ電子顕微鏡法は 2017 年のノーベル化学賞において、「溶液中の生体分子を高分解能で構造決定できるクライオ電子顕微鏡法の開発」という理由で Joachim Frank、Jacques Dubochet、Richard Henderson の 3 名の科学者が受賞した。上述したようにクライオ電子顕微鏡は、精製したタンパク質等の試料を非晶質の氷の中に分散した状態で包埋し、様々な向きの試料を単粒子再構成法という計算手法により高い解像度で立体構造を解析する方法である。Joachim Frank は、この単粒子再構成法を開発したことで、Jacques Dubochet は試料を分散した状態で非晶質の氷中に包埋する技術を開発したことで、Richard Henderson は、クライオ電子顕微鏡により、3· 5 Å の分解能でイメージングすることに成功したことで受賞した。2015 年には β ガラクトシダーゼが 2.2Å の分解能で観察されるとともに、分子に配位した水分子が可視化された。さらに、2016 年には 100kDa より小さい分子について近原子分解能での解析が報告された。

このようなブレークスルーをもたらしたものとして 3 つの革新的技術がある。ひとつめは、電子を直接検出できる高感度な CMOS（Complementary Metal-Oxide Semiconductor の略 相補型金属酸化膜半導体）カメラの登場である。このカメラにより読み取り速度が従来の CCD カメラに比べて特段に早く、入射する電子を直接計数することが可能となった。そのことにより、動画撮影法が開発された。撮影時に多数のサブフレームを取ることにより、電子線を照射した際に起こる微動と電子損傷の大きい後半のサブフレームを除くことにより、高分解解析が可能となった。また、試料交換の自動化も大きなブレークスルーをもたらしている。クライオ電子顕微鏡の代表的な機種である Titan Krios では 12 個の試料を一度に装填でき、コンピューター制御で試料交換可能である。これにより、様々な条件で作成した非晶質な氷に包埋した試料を効率良く撮影することが可能となった。これらのハードウェアの進展により得られる多数のデータを解析する方法が必要である。英 University of Cambridge の MRC 分子生物学研究所の Sjors Scheres 博士により開発されたクライオ電顕単粒子解析の画像解析ソフトウエア Relion は、ベイス統計をアルゴリズムに組み込み、粒子の構造が均一でないことを考慮にいれて画像解析を行う方法である。このソフトウエアの登場により近原子分解能の速度が飛躍的に改善された。



動画撮影法
たとえば，1 サブフレームあたり 0.2 秒で撮影し，これを 10 秒間にわたり撮影する．これが“ワンショット”である．つぎに，サブフレームのあいだの画像の動きをアラインメントして 1 枚の画像にする．電子を試料に照射したとたんに微動が起こるため，1 枚目のサブフレームは使わないことが多い．



ナノディスクに再構成された TRPV1 チャネルの 2.95 Å 分解能での構造
（a）再構成された密度図．緑色は灰色よりも高い閾値で等値表面を表示したもので，タンパク質の部分を反映している．円盤状のナノディスクがよくわかる．
（b）得られた原子モデル．UCSF Chimera（URL：https://www.cgl.ucsf.edu/chimera/）により表示。

© 2016 岩崎 憲治 Licensed under CC 表示 2.1 日本

図 2.2.3　クライオ電子顕微鏡による近原子分解能の構造解析例
左図：動画撮影法、右図：TPRV1 チャネルの近原子分解能図

クライオ電子顕微鏡の課題は、試料調整方法とその膨大なデータである。クライオ電子顕微鏡の試料は生体分子粒子が非晶質の氷に単分散していなければならない。しかしながらこの方法は未だ確立された方法論がなく、研究者が試行錯誤で行っている状態である。また、クライオ電子顕微鏡撮影画像は 1 視野の画像データが 11 ギガバイトにも達し、1 セットの解析用データが 50 テラバイトを超えるため、そのような大量のデジタルデータを転送、処理、保存する技術開発がハード、ソフトともに必要である。さらに、クライオ電子顕微鏡により決定された立体構造をバリデートする手法もまだ確立されておらず、幾何級数的に増加する膨大なオリジナル画像データの経済的なアーカイブ法の構築も必須である。

参考：
領域融合レビュー, 5, e010 (2016)　DOI: 10.7875/leading.author.5.e010

2．4　革新生体計測

今後の生体計測では、ゲノム、トランスクリプトームなどのいわゆるオミクス技術と、イメージング技術を戦略的に糾合することが、肝要である。例えば、全身の臓器（脳、肝、腎、心など）の細胞の時空間データおよび機能データを一細胞レベルの解像度で取得し、統合解析することで細胞全身地図や機能連関解析技術を確立することが可能となる。

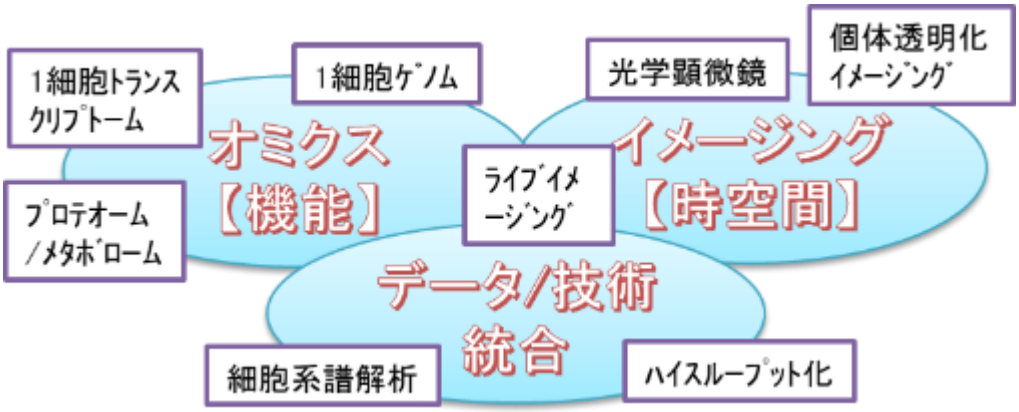


図 2.2.4　革新生体計測

我が国においても、以下に示すような革新的な生体計測技術の研究開発が行われている。

時空間データ取得技術：

・個体透明化技術：Scale、CRALITY、SeeDB、CUBIC など様々な手法が開発されている。例えば、東京大学の上田泰己らは、CUBIC 法を開発し、がんの微小転移の全身・全臓器での解析が可能であることを示した。この技術を応用し、全身病態の可視化技術を開発することで、がんのみならず自己免疫疾患など様々な病気の病態解明や治療法開発が期待される。

・細胞系譜追跡技術：関西医科大学の上野博夫らは EGFP や RFP などの蛍光タンパク質と Cre-loxp などの遺伝子改変技術を組み合わせることで、10 色もの色で細胞を標識仕分することを可能とするマルチカラー細胞系譜追跡法を開発した。彼らは、この方法を用いて、様々な臓器の幹細胞の同定を行うとともに幹細胞の動態解析を可能にしている。

機能データ取得技術：

RNA 解析技術：理化学研究所（理研）二階堂愛らは、これまで検出が難しかった多様な RNA の発現量と完全長を 1 細胞で計測できる「1 細胞完全長トータル RNA シーケンス法『RamDA-seq』を開発した。1 細胞の RNA のシーケンスでは RNA を DNA に変換し、ハイスループット DNA シーケンサーによって配列決定している。これまで種々の方法が開発されているが、二階堂らの方法は長鎖 RNA の全長解析や、非 polyA 型 RNA の塩基配列解析が可能であり、細胞機能における RNA の網羅的に解析への貢献が期待されている。

機能ライブイメージング技術：

大阪大学の石井優らは、これまで生きた状態のイメージングが難しかった破骨細胞の可視化を二光子顕微鏡を応用することで、生きたままの状態で行っている。それにより、骨髄内での生命現象の解明、例えば破骨細胞による骨のリモデリングメカニズムなどの解明につなげている。さらに彼らはイメージングで多くの精緻な数値データを元に、細胞社会動態の数理モデルの作成を行っている。

第３章　新たな潮流：計測×ICT

第 1 章で計測を俯瞰したが、その中で ICT（Information and Communication Technology：情報通信技術）がさまざまな形で計測の発展に貢献してきており、それはいっそう拡大する傾向にあることが見てとれる。本章では、「計測×ICT」を新たな潮流ととらえ、ICT 側から見た計測の位置付け、計測に対する ICT の貢献の類型、今後の方向性を俯瞰する。

３．１　ICT ビジネスから見た計測

ICT ビジネスは「モノ売り」から「コト売り」へと価値提供の形が変わってきていると言われる。計測技術の発展は、既存の計測機器の性能を向上させたり、新しい機能を持った計測機器を生み出したりといった形で、「モノ売り」ビジネスに直接的に貢献してきた。この形の貢献は続く一方で、ICT ビジネスの主流となってきた「コト売り」ビジネスにおいても、計測技術は重要な役割を果たすようになってきた。

ICT ビジネスとしての「コト売り」ビジネスは、ICT を活用することで、顧客課題・社会課題の解決や顧客体験・顧客価値の向上を実現するサービスビジネスである。そして、このようなサービス（ソリューション）を実現する枠組みとして、昨今、ビッグデータ×人工知能（AI）技術を用いるのが基本になってきた。すなわち、次のような 3 ステップの枠組みが用いられる（図 3.1 左部参照）。

1. 実世界からセンシングによってビッグデータを収集
2. ビッグデータを AI 技術によって分析
3. 分析結果に基づきアクションをプランニングして実世界にフィードバック

このような枠組みにおいて、計測技術はステップ 1 のセンシングに対応する。サービス全体からすると、計測技術が貢献するのは一部分であって、計測技術だけで課題解決や価値創造が完結するわけではない。

しかし、センシング（計測技術の貢献）は上記 3 ステップの出発点であるため、実はサービスの競争力の源泉になり得る。すなわち、優れた計測技術を持っていれば、従来/他者よりも早期に予兆を捉まえることや、従来/他者には見えなかったものを見ることが可能になる。それによって、時短、予測、発見といった価値を提供できるようになる。

３．２　計測に対する ICT の貢献

前節 3.1 では ICT ビジネスの側から見た計測技術について述べたが、本節 3.2 では逆に、計測技術の発展において、ICT がどのように貢献してきたかについて述べる。

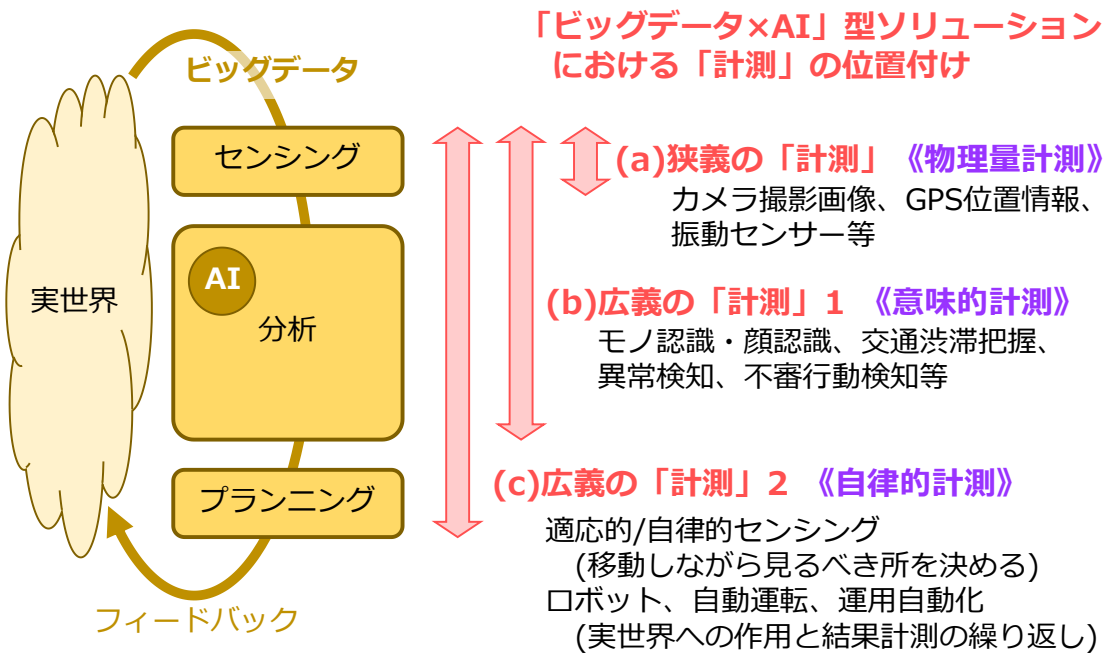


図 3.1　狭義の計測から広義の計測へ

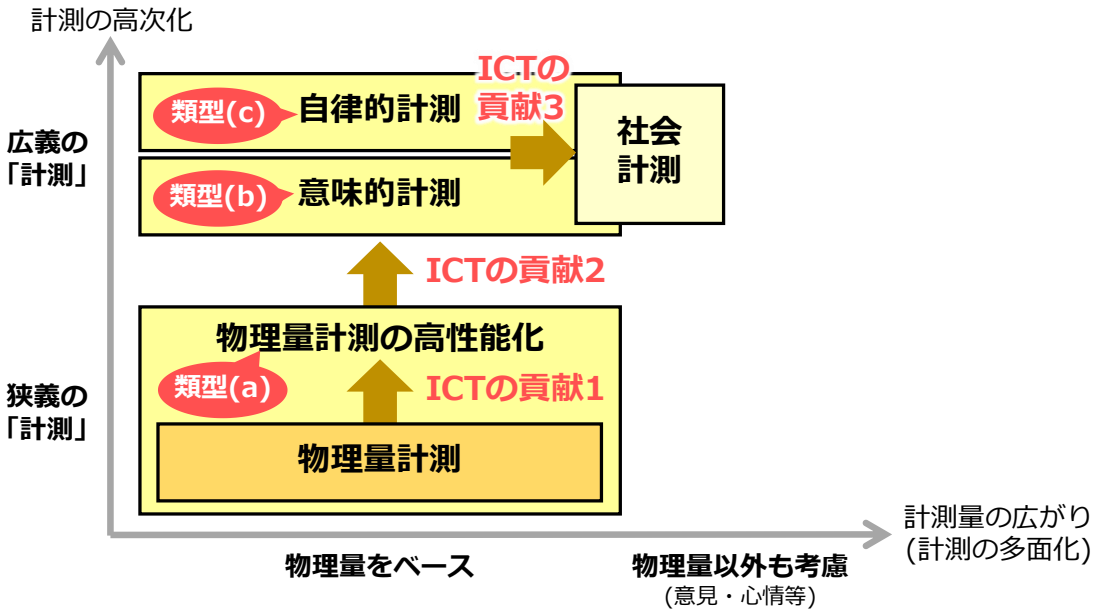


図 3.2　計測技術の発展における ICT の貢献（計測×ICT の類型）

計測技術の発展における ICT の貢献は、図 3.2 に示すような 3 タイプが考えられる。

第一の貢献タイプは「物理量計測の高性能化」である。元来、計測技術の中心は物理量の計測にある。その物理量計測に ICT を活用することで、より高精度な物理量の計測が可能になったり、より効率の良い計測が可能になったりする。

第二の貢献タイプは「計測の高次化」である。物理量計測を「狭義の計測」と呼ぶならば、ICT

を活用することで、意味的計測・自律的計測といった、より高次の計測が可能になる。これをここでは「広義の計測」と呼ぶ。

第三の貢献タイプは「社会計測」という新しい観点の計測である。社会計測では、その計測対象は必ずしも物理量だけに限らない。ときには、人々の意見・心情といったものも取り込み、計測量が広がり、多面化する。

各タイプの詳細は事例も含めて後述するが、第二の貢献タイプとして示した意味的計測と自律的計測について、図 3.1 を用いて補足する。図 3.1 は、近年広がっているビッグデータ×AI 技術によるサービス（ソリューション）における「狭義の計測」と「広義の計測」の位置付け、すなわち、ビッグデータの処理フローに沿って「狭義の計測から広義の計測へ」と拡大する様子を示している。

まず、ステップ 1 のセンシングに相当するのが狭義の計測、つまり、物理量計測である。カメラ撮影画像、GPS 位置情報、振動センサー情報等がその例である。

次に、物理量計測に AI 技術による分析を組み合わせたもの、つまり、ステップ 1＋ステップ 2 を一塊の広義の計測として捉えるならば、意味的計測と考えることができる。計測した物理量に意味を与えるものであり、モノ認識・顔認識、交通渋滞把握、異常検知、不審行動検知等がその例である。

さらに、ステップ 1＋ステップ 2＋ステップ 3 を一塊の広義の計測として捉えると、物理量を計測・分析し、次のアクションのプランニングまで行う自律的計測と考えることができる。移動しながら見るべき所を決める適応的/自律的センシングや、実世界への作用とその結果の計測を繰り返すロボット・自動運転・運用自動化等がその例である。

図 3.2 では、物理量計測の高性能化を類型(a)、意味的計測を類型(b)、自律的計測を類型(c)と名付けている。以下では、これら 3 つの類型について、具体的な事例を紹介する。また、社会計測については、節を分けて 3.3 節で詳細を述べる。

（１）類型(a)：物理量計測の高性能化

ICT 活用による物理量計測の高性能化の事例を表 3.1 に示す。表 3.1 では高精度化と自動化（効率化）に分けて事例を示している。

表 3.1　計測×ICT の類型(a) ICT 活用による物理量計測の高性能化の事例

分類	事例
高精度化	多数観測点からのデータ集積による観測精度の向上 (防災科学技術研究所の事例:積雪・降雪の計測、土砂災害の監視) http://www.bosai.go.jp/seppyo/kenkyusya/seika_top.htm
	監視カメラ等の低解像度で非鮮明な画像・映像を画像処理によって高解像度化・鮮明化(NEC の学習型超解像技術等) http://jpn.nec.com/ad/onlinetv/rd/srt_h.html
	細胞内の分子レベルの現象等、生命科学の対象について、画像処理・統計処理等を活用するバイオイメージ・インフォマティクスによって、人間には捉えることの難しい現象の識別や超解像化 https://youtu.be/IQdknXT-n2E
	生体のマルチスケール・マルチオミクスな解析による分子情報の統合化および生体分子機能の解明
	微生物叢解析(マイクロバイオーム)による宿主・微生物間相互作用の質的理解
自動化 (効率化)	測定条件の設定・切り替えの自動化による高スループットの実現
	二次元ガスクロマトグラフ(GCxGC)と高分解能飛行時間型質量分析計(HRTOFMS)とデータ処理を接続し、大気中の有害化学物質を網羅的に分析(国立環境研究所のノンターゲット分析) http://www.nies.go.jp/kanko/news/34/34-6/34-6-05.html
	データベースとニューラルネットワークを用いた、リサイクルにおける選別の自動化(産業技術総合研究所の ARENNA ソータ) https://staff.aist.go.jp/s-koyanaka/ARENNA.pdf

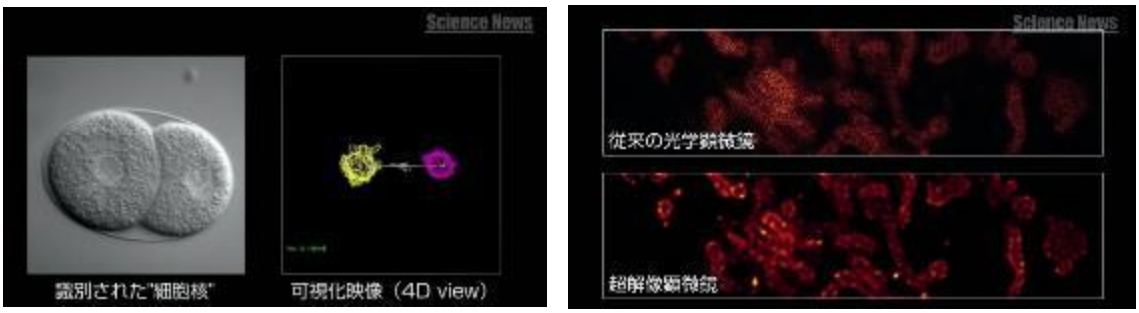


図 3.3　バイオイメージ・インフォマティクスによる
細胞内現象の識別（左）と超解像化（右）
［出典］JST サイエンスニュース　https://youtu.be/IQdknXT-n2E

高精度化では、多数のデータを集めることで観測精度を高めたり（防災科学技術研究所の事例等)、大量の画像データから規則性を機械学習することで画像・映像を高解像化したり（NEC の学習型高解像技術等）といったことが可能になってきている。そのような ICT 活用による高精度化のアプローチが強力に進められている分野の例として、生命科学に画像処理・統計処理等を融

合したバイオイメージ・インフォマティクスがある。図 3.3 はその一例（理化学研究所 生命システム研究センターによる）で、細胞内の現象を高精度に捉えている。図 3.3 左では、細胞核の識別が人間の眼で追うよりも安定して正確に実現でき、動画によるわかりやすい可視化も可能になっている。図 3.3 右では、画像処理によって、より高解像度の観察画像が得られていることがわかる。

自動化（効率化）では、ICT を活用することで、さまざまなケースを対象とした計測手順の繰り返しを制御できるようにシステム化したり、計測対象・計測環境の条件に応じた計測手段やそのパラメーターの選択を自動化したりといったことが進められている。環境計測の分野では、化学物質による環境汚染の多様化に対応するため、特定化学物質を対象とするのではなく、環境中に存在する化学物質をできる限り多く見つけ出す「ノンターゲット分析法」が求められる。このような幅広い可能性に関する網羅的探索は、人間よりもコンピューターによる実行に適した処理であり、ICT 活用の効果が大きい。

（２）類型(b)：意味的計測

ICT 活用による意味的計測の事例を表 3.2 に示す。表 3.2 では、大量データ集積からの発見と、より高次の事象把握とに分けて事例を示している。

大量データ集積からの発見は、データを大量に集めることで、個々のデータを見ているだけではわからなかったことが見えてくるケースである。車が急ブレーキをかけた地点の統計から事故が発生する危険性が高い地点を見出すというのがその典型例である（図 3.4）。

図 3.4　車の急ブレーキ地点の統計から事故発生リスクの推定

［出典］http://logmi.jp/34671

表 3.2　計測×ICT の類型(b) ICT 活用による意味的計測の事例

分類	事例
大量データ集積からの発見	車の動きデータ集積による危険スポット抽出、災害時の状況判定 http://logmi.jp/34671
	ウェアラブルセンサーの人間行動ログから業績改善につながる要因発見 http://www.hitachi.co.jp/products/it/bigdata/service/happiness/outline/index.html
	検索語の分析によるインフルエンザの流行時期・エリア判定 (Google インフルトレンド)
	計測データからの逆解析(現象→原因)により対象物の内部推定 (磁場を計測して非破壊で電池内部の電流を可視化等) https://www.jst.go.jp/pr/jst-news/pdf/2017_07/2017_07_p12-13.pdf
	モバイル計測デバイスやワイヤレス情報通信の活用による継続的多次元生体データ(生化学/臨床/環境)の取得と健康状態、疾患進展度の解析
	機械学習による医用画像の意味解釈 (がん等が疑われる部位の自動検出、手術ナビゲーション等) http://business.nikkeibp.co.jp/atclh/NBO/mirakoto/wellness/h_vol11/
より高次の事象把握	ナノ触覚センサーによる物理量計測結果をカオス解析と深層学習を用いて人間の感覚(つるつる/ざらざら/ふわふわ等)に変換 https://www.jst.go.jp/pr/jst-news/pdf/2017_12/2017_12_p12-13.pdf
	監視カメラ映像解析による行動検知(不審行動や異常事態の検知) http://jpn.nec.com/physicalsecurity/solution/iapro.html
	原発・化学プラント等のセンサーデータ解析による故障予兆検知 (NEC インバリアント分析等)
	素粒子実験物理学における機械学習を用いたターゲット現象の選別 (ヒッグス粒子機械学習チャレンジ等) https://www.kaggle.com/c/higgs-boson
	気象衛星データの活用による太陽光発電量の推定 http://www.diasjp.net/wp/wp-content/uploads/2017/03/dias-community-forum2017_05.pdf
	気候予測データを用いた感染症のリスク予測と発症警報
	衛星画像および各種データの解析による農作物の生育推定

より高次の事象把握は、物理量計測の結果から、どういう事象が起きているのかを解釈するものである。例えば、監視カメラ映像を解析し、映像中に何が映っているか、どういう状況・状態なのかを解釈するというのがその典型例である。図 3.5 は監視カメラの映像の解釈（行動検知）の例であり、危険な場所への侵入、物の置き去り、人の転倒、混雑等を検知している。

図 3.5　監視カメラ映像解析による行動検知
［出典］http://jpn.nec.com/physicalsecurity/solution/iapro.html

ただし、大量データ集積からの発見と、より高次の事象把握の区別は必ずしも厳密に分けられるものではない。大量データを集積し、それを機械学習にかけることで高次の解釈が可能になるという面があるためである。

地球観測・環境計測の分野では、データ統合・解析システム DIAS（Data Integration and Analysis System）が運用されている。DIAS では、地球規模で各地域の観測データを収集・蓄積・統合・解析し、社会経済情報等とも融合することで、地球規模の環境問題や大規模自然災害等の脅威に対する危機管理に有益な情報へ変換し、国内外に提供している。DIAS に集まったデータの分析によって、例えば、太陽光発電量の推定、感染症のリスク予測と発症警報、農作物の生育推定等が試みられている。これらは、大量データ集積からの発見であるとともに、より高次の事象把握でもある。

（３）類型(c)：自律的計測

ICT 活用による自律的計測の事例を表 3.3 に示す。表 3.3 では、モデル獲得・予測と自律制御に分けて事例を示している。

モデル獲得・予測は、データ同化や機械学習といった ICT 的手法が活用される。データ同化は、気象現象のモデルのように数値モデルが存在するときに、数値モデルによるシミュレーション結果と実際の観測データを擦り合わせることで、より精度の高いモデルに変えていく手法である。機械学習は、大量のデータから帰納的にモデルを作る手法で、予測モデルを作る際には、観測データとその意味解釈結果のペアを大量に与えることで、観測データから意味解釈へのマッピング関数（予測のためのモデル）を計算する（教師あり学習）。データ同化のよる予測は、気象現象のように自然科学的な対象に用いられることが多く、機械学習による予測は、電力の需要予測、商品の需要予測といった社会・経済的な活動を対象に適用されることが多い。

表 3.3　計測×ICT の類型(c) ICT 活用による自律的計測の事例

分類	事例
モデル獲得・予測	データ同化(観測データとシミュレーションのすり合わせによる数値モデルの精度向上)による気象現象の予測 http://www.metsoc.jp/tenki/pdf/2007/2007_04_0015.pdf
	電力消費データ・天候データ等からの機械学習や行動科学的知見に基づく将来の電力需要予測 http://jpn.nec.com/ai/solution/electric.html
自律制御	強化学習による車の運転制御や産業用ロボット制御の最適化 (Preferred Networks) https://www.slideshare.net/ryokuta/deep-learning-64339091
	ドローンの適応的/自律的センシング(移動しながら見るべき所を決める)による大規模施設・構造物等の点検・監視
	温室効果ガス観測衛星 GOSAT(いぶき)による雲のない領域の自律的検出・観測
	室内環境の測定データ解析と環境制御による快適な生活空間の維持 (スマートビル/スマートハウス)

自律制御に分類したものは、計測・観測するだけでなく、その結果に基づいて自律的に動き、次に計測・観測する場所や対象を自動的に決定する仕組みを持っている。例えば、ドローン（無人航空機）を移動しながら大規模施設を監視するケースを考えると、すべての箇所を巡回して詳細にチェックしていると多大な時間がかかるが、それまでの監視結果や現在の状況等に応じて、適応的に重点チェックする箇所を決めて、そこに移動して監視するような自律制御ができれば、効率を高められる。

車の運転制御や産業用ロボット制御等において、より高度な自律制御を実現するための技術として強化学習が活用され始めている。強化学習は、学習主体が、ある状態である行動を実行すると、ある報酬が得られるタイプの問題を扱う機械学習アルゴリズムである。将来的により多くの報酬が得られるように行動を選択する方策を、行動選択と報酬の受け取りを重ねながら学習していく。図 3.6 は強化学習を用いた車の運転制御の様子を示している。当初、車はどのような運転の仕方がよいかを知らず、試行錯誤的に走行する。その結果、速い速度で進めれば報酬が与えられ、壁や車にぶつかると罰を与えられる。そのようなトライとその結果の報酬や罰の受け取りを繰り返しながら、ベターな運転の仕方を車が学習していき、徐々に高速な走りができるようになる。

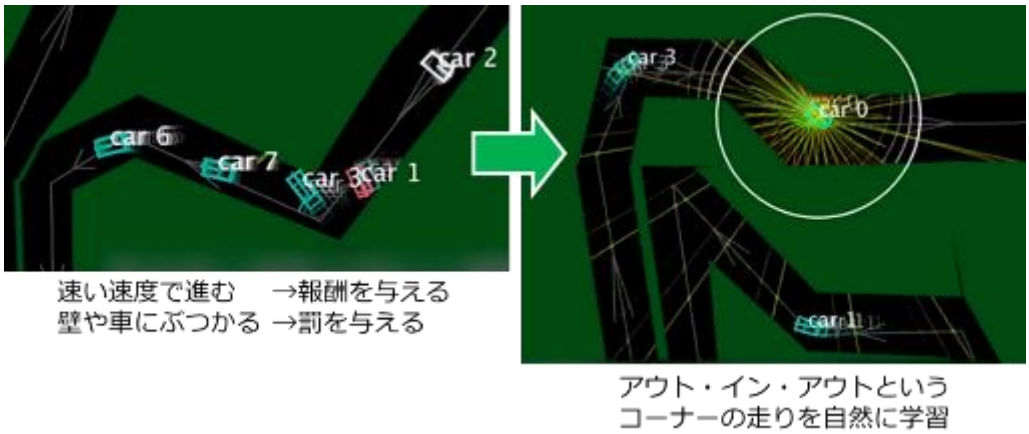


図 3.6　強化学習による車の運転制御の最適化
［出典］JST サイエンスニュース　https://youtu.be/JGaHwOubY4Q

［参考］CREST 情報計測

JST の戦略的創造研究推進事業 CREST では平成 28 年度から「計測技術と高度情報処理の融合によるインテリジェント計測・解析手法の開発と応用」(CREST 情報計測) が実行されている。
https://www.jst.go.jp/kisoken/crest/research_area/ongoing/bunyah28-3.html

本研究領域は、計測・解析技術の深化による新たな科学の開拓や社会的課題の解決のために、多様な計測・解析技術に最先端の情報科学・統計数理の研究を高度に融合させることによって、これまでは捉えられなかった物理量・物質状態やその変化あるいは潜在要因等の検出、これまでは困難であった測定対象が実際に動作・機能している条件下でのリアルタイム計測等を実現するインテリジェント計測・解析手法の開発とその応用を目指したものである。

これはまさに、ここまで述べてきた計測×ICT による (a)物理量計測の高性能化、(b)意味的計測、(c)自律的計測という計測の高次化に向けた研究開発推進策と位置付けられる。

東京大学大学院新領域創成科学研究科の雨宮慶幸特任教授が研究総括、東京大学数理・情報教育研究センターの北川源四郎特任教授が副研究総括で、平成 28 年度に 6 件、平成 29 年度に 5 件の研究課題が採択されている（表 3.4)。

表 3.4　CREST 情報計測の採択課題

採択年度	研究課題	研究代表者
平成 28 年度	強相関系における光・電場応答の時分割計測と非摂動型解析	岡本博（東京大学　大学院新領域創成科学研究科　教授）
	一細胞ラマン計測と情報科学の融合による細胞診断の迅速解析技術の開発	小松崎民樹（北海道大学　電子科学研究所　教授・センター長）
	大型大気レーダー国際共同観測データと高解像大気大循環モデルの融合による大気階層構造の解明	佐藤薫（東京大学　大学院理学系研究科　教授）
	AI と大規模画像処理による電子顕微鏡法の技術革新	村上恭和（九州大学　大学院工学研究院　教授）
	標準ニオイ多次元メガライブラリ構築と高解釈性数理モデル抽出による判別精度の定量予測	吉川元起（物質・材料研究機構　国際ナノアーキテクトニクス研究拠点　グループリーダー）
	機械学習と最先端計測技術の融合深化による新たな計測・解析手法の展開	鷲尾隆（大阪大学　産業科学研究所　教授）
平成 29 年度	ベイズ推論とスパースモデリングによる計測と情報の融合	岡田真人（東京大学　大学院新領域創成科学研究科　教授）
	高速原子間力顕微鏡 1 分子計測のデータ同化による生体分子 4 次元構造解析法の開発	高田彰二（京都大学　大学院理学研究科　教授）
	次世代地震計測と最先端ベイズ統計学との融合によるインテリジェント地震波動解析	平田直（東京大学　地震研究所　教授）
	多元光情報の符号化計測と高次元化処理の協調設計	向川康博（奈良先端科学技術大学院大学　情報科学研究科　教授）
	超圧縮センシングによるミリ秒X線トモグラフィ法の開発	矢代航（東北大学　多元物質科学研究所　准教授）

3．3　社会計測

社会計測という用語について、広く認知された定義は必ずしも見つからない。その一方で、わが国の「科学技術イノベーション総合戦略 2016」において「経済・社会に対するインパクトや社会コストを明らかにする社会計測機能の強化」という言及がある。

そこで、本稿においては、社会計測を「実社会ビッグデータに基づき、人間を含む実社会の状況・状態を定量的に把握する計測技術」と定義する。

わが国が目指す Society 5.0/超スマート社会は、ICT を活用した新しい社会の仕組みを作り、それを運用しながら改良していくことによって実現されていくものであろう。その仕組みをより良いものにしていくためには、社会の仕組みを対象に、3.1 節で述べたようなビッグデータ×AI 技術を用いた「センシング→分析→プランニング」というサイクルを回しながら、改良していくメカニズムが必要である。その基本になるものが、社会の状況を計測・評価する社会計測である[1]。

上述の定義において「実社会ビッグデータに基づき」と書いたが、ここでいう実社会ビッグデータは、物理量として計測されるものよりも広く観測対象を考えている。例えば、人間の意見・心情や認識結果・判断も対象に含む。

したがって、社会計測の特徴として、観測データの取得方法も、従来の計測と比べて広がりを持ったものになる。物理量を測定する以外にも、SNS（Social Networking Service）や CGM（Consumer Generated Media）での発信情報の収集や、人間がセンサーの役割を果たす参加型センシング等も用いられる。

社会計測の事例を表 3.5 に示す。この表の縦軸は、上で述べたようなデータタイプの広がりを表し、分散した機器・センサーから集まる物理量と、SNS・CGM 等を用いて人が発信した情報とに分けて示した。なお、前者については、社会計測が社会の状況・状態を捉えるものであることから、単体の機器・センサーではなく、空間的に分散した機器・センサーから集まったデータや、時間的に継続してモニタリングされたデータを想定している。

また、表の横軸では、把握する対象を、社会のシステムや環境と、人々の活動・状況という 2 種類に分けて示した。社会計測の定義からすれば、前者が本来の計測対象かもしれないが、社会の中には人が含まれ、物理量だけでは捉えられない側面という意味で、人々の活動・状況を把握することは社会計測の特徴的な点であることから、後者を分けて示した。

[1] さらに将来の姿として、社会計測に基づく新しい経済モデルも考えられている。すなわち、いまの社会システムは貨幣価値に基づく経済モデルをベースとしているが、様々な側面から社会計測が可能になっていくならば、あらゆる関係・トランザクションを評価し、価値を算出する経済モデルが作られていくかもしれない。

表 3.5　社会計測の事例

データタイプ	人々の活動・状況を把握	社会のシステムや環境を把握
分散した機器・センサーから集まる物理量	ウェアラブルセンサーから取得した人間行動ログから組織の状況・ハピネス(幸福感)を計測、組織・人々の活性化のための要因を分析 http://www.itmedia.co.jp/news/articles/1502/09/news142.html	車の位置データの集積による危険スポット抽出、事故・災害時の状況判定 http://logmi.jp/34671
	機器(ポット等)や電力の使用状況モニタリングによる生活パタン分析、独居高齢者の見守り http://www.mimamori.net/service/	建設機械(センサー)の稼働状況の分析による世界各地域の市場動向や建設機械需要の予測 (コマツの KOMTRAX) https://www.bloomberg.co.jp/news/articles/2017-10-04/OX6DX96JIJUP01
	イベント時や災害時の群衆の動きや混雑度の計測による、障がい者を含む人々の安全な誘導 http://jpn.nec.com/uf-iexpo/solution/T004-01/index.html	道路・橋梁に多数埋め込まれたセンサーの情報からインフラ老朽化の状態をモニタリング http://www.meti.go.jp/meti_lib/report/H28FY/000102.pdf
人間が発信した情報	検索語の分析によるインフルエンザの流行時期・エリア判定 (Google インフルトレンド)	多数の画像・テキスト投稿の集積(ユーザー参加型センシング)によるゲリラ豪雨の早期検知、天気予報 http://tech.nikkeibp.co.jp/dm/article/COLUMN/20140702/362462/
	SNS(ツイッター等)の内容分析による被災状況や必要物資のリアルタイム把握 (NICT の DISAANA・D-SUMM) https://disaana.jp/ https://disaana.jp/d-summ/	ブログ・SNS 等からの意見・指摘の抽出による商品・サービス・制度等の問題・障害・不良等の早期検知 https://www.marketingbank.jp/special/cat05/17.php

分散した機器・センサーから集まる物理量に基づく社会計測の事例は、3.2 節で説明した意味的計測または自律的計測に相当する。そこで、社会計測に特徴的な、人が発信した情報に基づく社会計測の事例について紹介する。

人が発信した情報として、社会計測でよく着目されるのは SNS である。図 3.7 に情報通信研究機構 NICT で開発された対災害 SNS 情報分析システム DISAANA の実行結果例を示した。DISAANA は災害時の Twitter 情報をリアルタイムに解析し、災害時の迅速な対応に活用することを可能にしている。図 3.7 左は、ユーザーがエリアを指定したとき、そのエリアで発生している災害に関するトラブル・問題を自動抽出した結果を示している。図 3.7 右は、「熊本県のどこが孤立していますか」とユーザーが質問したとき、その答えの候補を地図とリストで表示した結果

を示している。

図 3.7　対災害 SNS 情報分析システム DISAANA の実行結果例
［出典］https://disaana.jp/

ユーザー参加型センシングも、人が発信した情報を用いた社会計測の方法の一つである。ウェザーニューズ社の天候情報サービスには、この方法が用いられている。事前登録されたユーザーの端末によるセンシング結果やユーザーからの天候に関する報告内容を集めて、天候情報の案内や予測に用いている。

3．4　今後の方向性

わが国が目指す Society 5.0/超スマート社会や、国連が示した持続可能な開発目標 SDGs（Sustainable Development Goals）への貢献を考えると、今後の方向性として、ICT を活用したサービス/ソリューションによって、より大規模で複合的な社会課題の解決を可能にしていくことが求められるであろう。3.1 節で述べたように計測は ICT サービス/ソリューションの出発点・源泉であり、より大規模で複合的な社会課題の解決を可能にするには、計測の対象拡大・高性能化への取り組みが重要になる（図 3.8）。

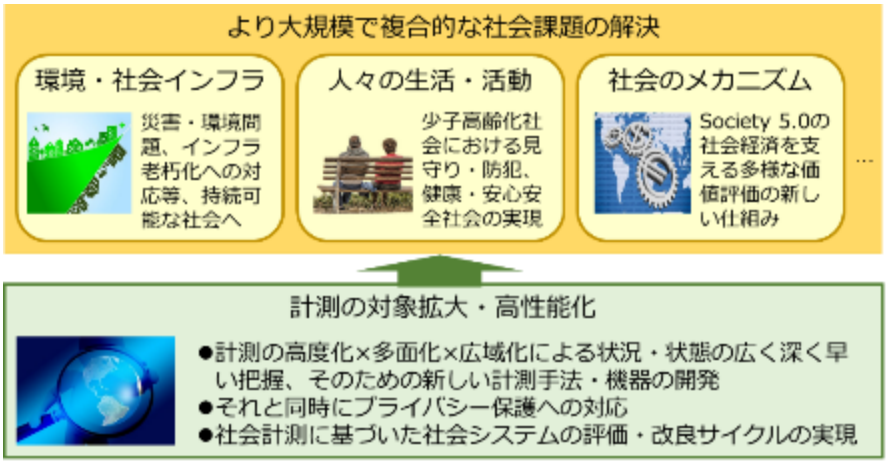


図 3.8　ICT を活用した計測の今後の方向性

計測の対象拡大・高性能化に向けた取り組みの内容として、計測技術そのものについては、その高度化×多面化×広域化によって、社会の状況・状態を広く深く早い把握を可能にすることが技術チャレンジの方向性であろう。計測の多面化では、例えば、人間の五感を超える「超五感」や、人間の内面や意思の把握等が目指されつつある。計測の広域化は、小型、低消費電力、安価、メンテナンス容易等の価値と連動して実現されていく。計測の高度化は、3.2 節で述べた意味的計測や自律的計測を実現していくものである。そして、それら計測の高度化×多面化×広域化の総合的な形として社会計測が発展していく。図 3.9 には、その全体観とそれぞれの方向性を支える要素技術の例を示した。したがって、このような全体としての方向性が実現されていく上で、個々の要素技術として新たな計測手法・機器の創出・発展への期待は大きい。

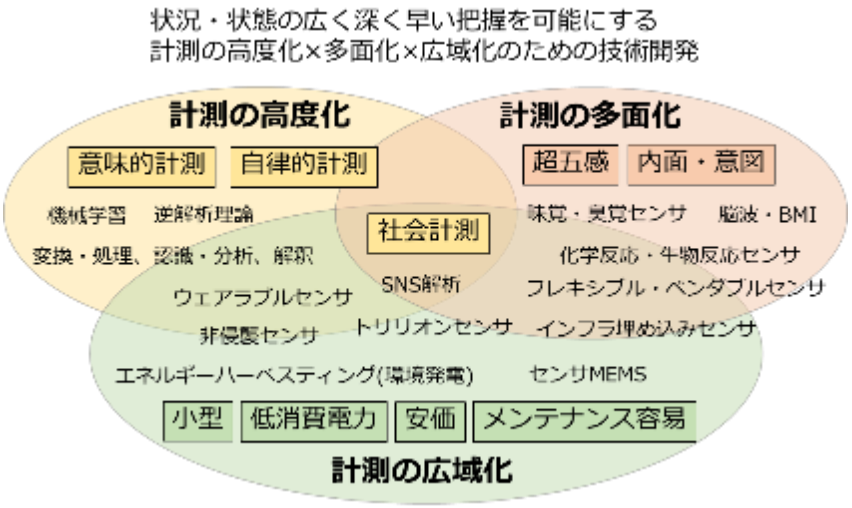


図 3.9　新しい計測手法・機器への期待

また、計測技術そのものを発展させる一方、プライバシー保護への対応の必要性がますます高まっていることも考えていかねばならない。計測技術が高度化×多面化×広域化の方向へ発展すれば、その対象に含まれる人間の行動データも精緻にトレースされたものになっていくためであ

る。ビッグデータ分析において、常に配慮されねばならない問題である。

さらに、社会計測の結果を社会課題の解決につなげるためには、社会計測に基づいた社会システムの評価・改良サイクルを実現しなければならない。そのプロセスを適切に設計し、運用していくための研究開発も進めていかねばならない。

［参考］センサーの最新事例・動向に関する解説記事

伊藤元昭「連載：生活と社会活動を一変させる、センサ革命」、TELESCOPE Magazine

- 第 1 回「なぜ今センサなのか」（2015.08.31）
  http://www.tel.co.jp/museum/magazine/japanese_spacedev/150831_report02_01/
- 第 2 回「広がるセンサの応用」（2015.10.09）
  http://www.tel.co.jp/museum/magazine/japanese_spacedev/151009_report02_02/
- 第 3 回「高度化するセンサ技術」（2015.11.02）
  http://www.tel.co.jp/museum/magazine/japanese_spacedev/151030_report02_03/

第４章　海外施策動向と産業動向

４．１　諸外国の施策動向・研究開発動向

今回、日本の計測・分析技術の国際的な立ち位置を確認することを目的に、諸外国の計測・分析に関する研究開発政策の動向を行った。対象国は、米国、英国、EU、ドイツ、中国とし、調査項目は次に示す 5 項目とした。すなわち、①計測・分析技術に関する政策と科学政策上の位置づけ、②基本政策担当機関および中心となる研究機関、③施策・プログラム　④予算規模、および　⑤各国が注目している技術、である。

調査結果の概要以下の表に示すとおりである。米国、英国、中国は計測・分析技術に関する基本政策があるのに対し、EU やドイツなどでは計測・分析技術に特化した政策が見受けられないものの、個別分野のプログラムの中で計測・分析に関する研究開発を実施していることがわかる。いずれの国においても研究開発機能を持った計量・標準化機関が中心となり、先端的な計測・分析技術の研究開発を行っている。特に、量子センサーや量子技術に関する各国の注目度が高く、中国では量子技術や大型設備に対する莫大な投資が行われている。

表 4.1.1　諸外国の計測・分析に関する研究開発政策の動向（概要）

	米国	英国	EU	ドイツ	中国
基本政策	2007年米国競争法の一部	新規国家計測戦略（2017-2020） ・計測インフラへの投資 ・優れた政策・基準 ・ユーザーとのつながり ・計測技術の向上 ・データの合理的な利用	EUレベルでの計量・計測分野の包括的なR&D戦略・計画は策定されていない	ハイテク戦略の中の「重点分野」「主要技術」では計測・分析技術は取り上げられていない	国家イノベーション駆動発展戦略綱要（2016-2030）の一部 科学技術イノベーション第13次五カ年計画（2016-2020）の一部
基本政策担当機関	国立標準技術研究所（NIST）	ビジネス・エネルギー・産業戦略省傘下規制実施機構（Regulatory Delivery）	（プログラム実施機関）欧州国家計量標準研究所協会（EURAMET）	（中核となる研究開発機関）国立物理技術研究所（PTB）	中国計量科学研究院（NIM）
施策・プログラム	NIST3ヵ年プログラミング計画（2016-2018） NIST物質計測研究所5カ年計画（2015）		欧州計量研究・インベーションプログラム（EMPIR）	アクションプラン・ナノテクノロジ2020の一部他	国家重点研究開発プログラム（2017） 重大研究計画（2018）
予算規模	NIST計測科学・サービス・プログラム（FY2017）約7億ドル		EMPIR 2014-2020年（7年間）6億ユーロ	アクションプラン・ナノテクノロジ2020 2016-2020年（5年間）1.9億ユーロ	国家重点研究開発プログラム、各プロジェクト1000-4000万元（1.7-6.8億円） 重大研究計画2018各プロジェクト80~500万元（1500～900万円）
注目している技術／技術動向／注目動向	・次世代コンピューティング技術 ・高度センシング ・量子センサー ・デジタル・エコノミー（ビッグデータ・データ科学、サイバー・フィジカル・システム、科学データ）	・標準を重視 ・環境計測 ・ロボティクス ・量子技術 ・カタパルトや他の研究機関とのパートナーシップを重視	・標準と基準 ・量子技術 ・トポロジー ・産業界のニーズに応え、研究成果の技術移転の加速化を目指す	・量子計測 ・ナノ計測 ・（原子時計による）時間計測 ・重力場の精密計測	・ビックサイエンス施設設備の整備 ・「量子もつれに関する計測」（重大研究計画プログラム）など量子計測関連

以下に各国の概況を、米国、英国、EU、ドイツ、中国の順に紹介する。

４．１．１　米国

近年、米国連邦政府における計測分野の研究開発においては、国家の重要課題解決、イノベーションの促進が重視されてきた。基本政策としては、2007 年米国競争法の一部に計測科学への言及が行われ、主要な政策実施機関として、総務省傘下の国立標準技術研究所(NIST)の強化が進められてきた。NIST においては、各種長期計画の策定や、分野横断的案計測プログラムが設置されている。

基本政策

米国では、21 世紀における新興国の台頭などを背景に、産業界を中心に、米国の国際競争力維持が強く求められ、それを受け、ジョージ・W・ブッシュ大統領の下、2007 年 8 月に米国競争力法(The American COMPETES Act)が成立した。科学技術への投資拡大や、産業界における研究開発税制優遇に加え、計測関連では、次の 2 点が注目に値する。NIST に対する予算増額、そして、NIST による 3 ヶ年計画書の議会への提出（実質的な米国における計測技術関連の政策方針に相当）の要求である。例えば、NIST 3 ヵ年計画書(FY2017-2019)では、①国家戦略コンピューティングイニシアティブの牽引、②サイバー・フィジカルシステム（CPS）分野における計測科学の基礎研究の推進、そして、③データ駆動型技術に必要な計測技術の開発が提案されている。同法は、2015 年 5 月、米国競争力再授権法（The American COMPETES Reauthorization Act）において、更新されており、そこでも計測科学技術に関する前競争的研究を NIST が高等教育機関ならびに産業界と実施する権限が付与されている。

政策担当機関・予算規模・プログラム

このように、計測科学の中核を担う NIST であるが、NIST2017 年度予算要求では、科学技術研究・サービスプログラムに約 7.3 億ドルを計上している[2]。内訳として、NIST 諸研究所プログラムに約 6.4 億ドル、標準化・特別プログラムに約 7,057 万ドル、そして残り 2,129 万ドルが産業支援となる。また、次世代コンピューティング技術と応用の計測科学については前年比約 1,460 万ドル増の 2,560 万ドルを計上した。

注目している技術／技術動向／注目動向

近年 NIST では、デジタル・エコノミーに資する取り組みとして、ビッグデータ・データ科学、次世代コンピューティング技術、そして量子センサーなどへ重点投資が実施されてきた。また、所内研究所の一つである物質計測研究所が設置されており、2015 年には物質、化学、生物学分野における 5 ヵ年戦略計画を示している[3]。分野横断的な内容となっているが、その提案の一つがデータ科学と管理能力であり、ここでもデジタル分野との融合が確認できる。この背景には、マテリアルゲノムイニシアティブのように、分野横断的な研究需要の高まりを受け、時代に即した計測科学技術の研究を進める戦略性が確認できる。

[2] NIST Appropriations Summary FY 2016 – FY 2018
https://www.nist.gov/director/congressional-and-legislative-affairs/nist-appropriations-summary-fy-2016-fy-2018
[3] Material Measurement Laboratory Strategic Plan
https://mmlstrategy.nist.gov/sites/default/files/docs/MML_Strategic_Plan.pdf

関連政策

全米科学財団（NSF）は、これまでに、重力波観測所、太陽･電波望遠鏡、研究用船舶、極地ニュートリノ観測所など多様な主要機器・施設を設置し、物理、宇宙、地球科学、極地研究等の幅広い分野の最先端の科学研究を支援してきた。これらの施設は、米国内外の多数の研究者や教育者によって共同利用され、科学界に革命をもたらすような発見が次々と生まれている。以下に、NSF による主要研究機器および施設の支援を、計測機器･技術開発の関連政策として紹介する[4]。

①　主要研究機器および施設建設経費（MREFC）

NSF は、自らの研究施設を保有せずに、研究機器・施設の設置、管理、運営に必要な資金を大学や研究機関に提供することで、研究の支援を行っている。2 千万ドル以下の小規模研究機器・施設に対する支援は、各局室が所管するプログラムの一環で行われ、NSF 予算の大半を占める研究・関連活動費から支出される。

一方、総額 1 億ドル以上の主要研究機器・施設への支援は、「主要研究機器および施設建設（Major Research Equipment & Facilities Construction : MREFC）」から支出される。研究機器・施設に係る経費は開発、設計、建設、運営･維持の 4 段階からなるが、MREFC が充当されるのは建設段階のみであり、それ以外の開発、設計および運営･維持に係る経費は、各局室が所管するプログラム経費の一環として、研究・関連活動費から充当される。2016 年度で見るとこの MREFC の予算は約 2.18 億ドルで、NSF 予算全体の約 3%となっている。したがって NSF 予算の中ではそれほど大きくないが、支援している一つ一つの機器・施設の規模が大きいこと、最先端分野の機器や施設は新たな研究領域を切り開き社会経済に大きな利益をもたらす可能性が高いことなどのため、MREFC の予算を用いた機器･施設の建設に対する人々の期待と関心は高い。

②　支援対象機器・施設の決定

新たな主要研究機器・施設の建設は、科学コミュニティのボトムアップ的手順によって提案される。その後、いくつかの審査を経て優先順位がつけられ、MREFC 予算の支援対象となる機器・施設が決定される。

科学者コミュニティは、5 年から 20 年にわたる長期的視野に立って該当分野のニーズに基づいた検討を行い、NSF の担当プログラムオフィサーの協力を得て具体化し、NSF に提案書を提出する。NSF に提出された提案書は、科学的･技術的な観点や NSF の戦略的な観点などから、NSF の専門家と外部研究者による数段階の審査を経て、優先順位が付けられる。優先順位の付けられた主要研究機器・施設のリストは米国科学審議会（NSB）に提出され、国全体としての戦略という観点から審議が行われ、NSF として予算要求するべきプログラムを選定する。選定されたプログラムは、大統領府行政管理予算局（OMB）との協議を経て連邦政府予算案に組み込まれ、議会において審議が行われることとなる。主要研究機器・施設のロードマップの策定や順位付けについては、毎年見直しが行われている。

MREFC 予算で支援を行っているもので、現在稼動、建設、設計中の主要研究機器・施設のリストは表 4.1.2 のとおりである。

[4] 詳細は、「米国国立科学財団 NSF　基礎研究を支える連邦政府独立機関」（遠藤 悟(著)、冨田 英美(著)、林 幸秀(編著)，丸善プラネット，2018 年 3 月）を参照。

表 4.1.2　NSF が支援する主要研究機器・施設（2017 年 7 月現在）

米国南極プロジェクト	南極	稼働中/設計中	極地
・南極科学基盤の現代化	南極	設計中	極地
アレシボ観測所	プエルトリコ	稼働中	天文
研究用船舶	分散/可動式	稼働中/設計中	海洋
・地域研究用船舶	**可動式**	**設計中**	**海洋**
コーネル高エネルギー・シンクロトロン源	ニューヨーク州	稼働中	物理
グリーン・バンク観測所	ウェストバージニア州	稼働中	天文
ジェミニ観測所	チリ/ハワイ州	稼働中	天文
アイスキューブ・ニュートリーノ観測所	**南極**	**稼働中**	**極地**
国際海洋発見プログラム	テキサス州/カリフォルニア州/可動式	稼働中	海洋
超長基線観測所	分散	稼働中	天文
大型ハドロン衝突型加速器	スイス	稼働中/設計中/建設中	物理
レーザー干渉計重力波観測所（LIGO）	**ルイジアナ州**	**稼働中/設計中**	**物理**
大型総観望遠鏡(LSST)	**チリ**	**建設中**	**天文**
国立天文大気研究センター	コロラド州/ワイオミング州	稼働中	地球科学
国立危険工学研究基盤	分散	稼働中	防災
国立生態観察ネットワーク（NEON）	分散	建設中/稼働中	生物
国立地球物理観測所	分散	稼働中	地球科学
国立高磁場研究所	フロリダ州/ニューメキシコ州	稼働中	物理
国立光学天文観測所	アリゾナ州/チリ	稼働中	天文
国立電波天文観測所	分散	稼働中	天文
・アタカマ電波望遠鏡	チリ	稼働中	天文
・超大型干渉電波望遠鏡群	ニューメキシコ州	稼働中	天文
国立超電導サイクロトロン研究室	ミシガン洲	稼働中	物理
国立太陽観測所	分散	稼働中/設計中	天文
・ダニエル・K・イノウエ（DKI)太陽望遠鏡	**ハワイ州**	**建設中**	**天文**
海洋観察イニシアティブ	分散	稼働中	海洋
高度モデュラー分散レーダー	アラスカ州	稼働中	天文
国立深海潜水施設	可動式	稼働中	海洋
国立ナノテクノロジー協調基盤	分散	稼働中	材料

［出典］NSF Large Facilities List を基に筆者作成
註　太文字は本文中で取り上げた現在支援中の主要施設

③　現在建設中の主要施設

現在、NSF が支援を行っている研究施設の内から、2017 年度より支援を開始した地域研究用船舶と、前年度より継続して支援を行っているダニエル・K・イノウエ太陽望遠鏡および大型総観望遠鏡の 3 施設について以下に詳述する。

（1）地域研究用船舶

地域研究用船舶（RCRV: Regional Class Research Vessel）プログラムは、米国科学アカデミー（NAS）の米国研究評議会（NRC）が 2015 年に公表した報告書「海洋の変化：2015 年から 2025 年までの 10 年間における海洋科学観測計画（Sea Change: 2015-2025Decadal Survey of Ocean Science）」にもとづき、東海岸、西海岸、メキシコ湾周辺の海洋科学研究に必要な船舶 2 隻を建設するものである。NSF による支援総額は約 2.6 億ドルで、2017 年から 2019 年までの 3 年をかけて拠出される。これらの船舶は完成後、オレゴン州立大学によって運営され、海洋の水位変化のメカニズムの解明や気候温暖化に与える影響の検討をはじめとする 8 つの重要研究課題に取り組むことになる。

図 4.1.1　地球研究用船舶

（2）ダニエル･K･イノウエ（DKI）太陽望遠鏡

ダニエル･K･イノウエ（Daniel K. Inouye：DKI）太陽望遠鏡は、2010 年にハワイ州マウイ島の最も高いクレーターの頂上に建設が開始された太陽観測用の最新式の望遠鏡である。ハワイ出身の日系人で、50 年以上にわたり連邦上院議員を務め、2012 年に他界したダニエル･K･イノウエ氏の業績をたたえて、2013 年に DKI 太陽望遠鏡と名付けられた。NSF の支援総額は約 3.4 億ドルであり、10 年間の建設期間を経て 2019 年末に完成の予定である。DKI 太陽望遠鏡は、高度の光学システムと直径 4 メートルの主鏡を備えており、完成すれば世界最大の太陽観測用の望遠鏡となる。この望遠鏡を利用することで、太陽の表面で起こっている磁気現象を詳細にとらえ、地球の気候に大きな影響を与える太陽活動（太陽フレアやコロナガスの噴出等）に対する理解を深めることが可能となる。DKI 太陽望遠鏡の必要性は、米国科学アカデミー（NAS）の報告書「2010 天文学･宇宙物理学の 10 年計画 - 新たな世界と新たな水平線」および「2012 太陽系･宇宙系物理学 10 年計画 - 技術社会における科学」でも強調されている。DKI 太陽望遠鏡プログラムは、22 の米国内外の大学･研究機関に所属する科学者および工学者の共同研究計画であり、同望遠鏡の完成後は天文学研究大学協会（Association of Universities for Research in Astronomy：AURA)によって運営される予定である。

図 4.1.2　ダニエル･K･イノウエ（DKI）太陽望遠鏡

（3）大型総観望遠鏡（LSST）

大型総観望遠鏡(Large Synoptic Survey Telescope：LSST)は、2015 年にチリのパチョン山で建設が開始された口径 8mの超広視野光学望遠鏡である。3.2 ギガピクセルの巨大なカメラを搭載しており、10 年間にわたり毎晩、天空の画像を撮影し、詳細で広域の天空の画像を提供する予定である。なおパチョン山には、この LSST 以外にもジェミニ天文台のジェミニ南望遠鏡が、また近隣には米国国立光学天文台（NOAO）のセロ・トロロ汎米天文台がある。

この LSST プログラムは NSF とエネルギー省の協力と支援により実現するもので、完成すれ

ば、ダークエネルギーやダークマターの物理学的解明、太陽系の小天体の探索、銀河系のマッピング、数秒で変動する物体から数年単位で変化する物体の性質の理解が可能となる。NSF は、2014 年から 2022 年までの 9 年間にわたって LSST 建設のための費用として総額 4.73 億ドルを拠出することとしており、民間のビル･ゲイツ財団などからも資金拠出が行われる。運用は DKI 太陽望遠鏡と同様に天文学研究大学協会（AURA)に委ねられる。

図 4.1.3　大型総観望遠鏡（LSST）

④　現在稼動中の主要施設

すでに示したように、NSF が支援し現在稼動中の主要施設は、30 近くに上るが、この中で特徴的なものを 2 例紹介する。

（1）レーザー干渉計重力波観測所（LIGO）

レーザー干渉計重力波観測所（Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory：LIGO)は、同種の施設としては世界最大の重力波観測所である。1916 年にアルバート･アインシュタインによって存在が予言されていた重力波を観測するために設置された。ワシントン州のハンフォードとルイジアナ州のリビングストンの 2 か所に検出器があり、それぞれ一辺が 4km の L 字型をした超真空のトンネルの中にゆがみを測定する高感度のレーザー干渉計が設置されている。この 2 つの検出器を一対として運用することで、星の衝突や合体などの激しい天体現象によって生じる時空の「波紋」である重力波を検出することが可能となる。

図 4.1.4　レーザー干渉計重力波観測所（LIGO）

LIGO の設計、建設、運用は、カリフォルニア工科大学とマサチューセッツ工科大学の研究者とエンジニアが中心となり、米国および世界 14 カ国の研究者約千名とともに共同で行っている。NSF はこれまでに、LIGO の建設、アップグレード、運営、研究のために約 11 億ドルの拠出している。この金額は NSF の支援なかでも過去最大規模のものである。

LIGO では、2002 年から 2011 年にかけて重力波の観測を行ってきたが、重力波は検出されな

かった。その後、検出器の感度を大幅に改良し、2015 年から改良型 LIGO として稼動している。2015 年 9 月 14 日に、国際研究チームは、改良型 LIGO を用いて重力波の検出に成功した。100 年前にアインシュタインによって重力波の予測がなされてから、直接検出されたのは今回が初めてのことであり、歴史的な快挙で重力波天文学の誕生を宣言するものであった。今回観測された重力波は、地球から約 10 億光年以上離れたところにある 2 つの巨大ブラックホールが激しく衝突し合体した瞬間に発生した「波紋」が、宇宙空間を広がり地球に到達したところを改良型 LIGO が捕えたものである。この功績により 2017 年に、マサチューセッツ工科大学のレイナー・ワイス名誉教授、カリフォルニア工科大学のバリー・バリッシュ名誉教授、カリフォルニア工科大学のキップ・ソーン名誉教授に、ノーベル物理学賞が授与されている。

改良型 LIGO は、従来の方法では見ることのできなかった銀河系の中心や星の内部で起こっている激変現象やブッラクホールの遭遇・合体などの観測などを可能とし、今後、宇宙の謎の解明に大きく貢献するものと期待されている。

（2）アイスキューブ･ニュートリノ観測所

アイスキューブ･ニュートリノ観測所は､南極点の直下に直径約 33cm の球状をした光検出器を 5160 個埋め込んで作られた観測装置で､2010 年に完成した｡深さ約 2500m の穴を 86 本掘削し、一つ一つの穴の 1500mから 2500m の位置に 60 個の光検出器を縦に並べることで、合計 60 個/穴 x86 穴=5160 個の検出器を埋め込んだ世界最大のニュートリノ観測装置である。

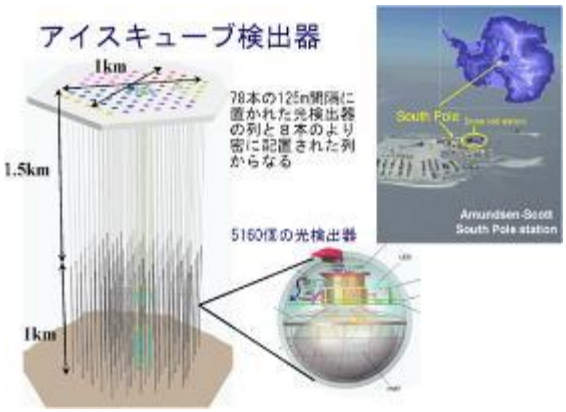


図 4.1.5　アイスキューブ･ニュートリノ観測所

［出典］千葉大学大学院理化学研究院付属ハドロン宇宙国際研究センターの HP

宇宙から飛来する高エネルギーニュートリノは、毎秒一兆個も人体を通り過ぎているが、他の物質と相互作用しないため測定が困難である。通常は氷床中を素通りするが、ごくまれに氷中の原子核と反応して発光現象がおきることがあり、このわずかな発光をアイスキューブにある光検出器が捕えることで、ニュートリノの検出が可能となる。同観測所の運用は、ウィスコンシン大学が中心となって行っており、共同研究には 12 か国の研究機関 47 組織に属する研究者が参加している。

2013 年にこの観測所で、高エネルギーニュートリノの検出に初めて成功した。これらの高エネルギーニュートリノは、銀河系、太陽系をはるかに越える宇宙の果てから飛来する「宇宙ニュートリノ」で、星の爆発などの激しい宇宙現象が発生源であるとみられている。宇宙ニュートリノは､深宇宙の謎に満ちた高エネルギー現象や､地球に降り注ぐ高エネルギー荷電粒子である「宇

宙線」の発生源を解明するものとして期待されている。

⑤　今後の展望

2016 年 5 月、コルドバ長官は NSB で「未来の投資のための NSF のアイディア」というタイトルで、将来の NSF の取り組みについての報告を行った。その後、内容を一部追加の上、「将来の NSF の投資のための 10 のビッグアイディア」をウェブ上で公開した。この 10 個の中に、「中規模研究基盤」という項目がある。コルドバ長官は、総額 2 千万ドル以下の小規模研究機器・施設に対する支援は各局室が所管するプログラムの一環で行われ、総額 1 億ドル以上の主要研究機器・施設への支援は MREFC 経費から支出されているが、2 千万ドルから 1 億ドルの間の研究基盤への支援が措置されておらず、数々の重要な研究の妨げとなってきたとして、MREFC 経費の下限の修正などの案により、柔軟性の向上に取り組むとしている。

コルドバ長官の「10 のビッグアイディア」は、現在そのほとんどが政策を公表した段階にとどまっており予算措置を伴っているわけではないが、これが連邦政府部内や議会で承認されていくと、NSF による中規模基盤の支援が促進され、主要研究施設のアップグレード、高性能機器、小型検出器などの基盤整備につながっていくと期待されている。

４．１．２　英国

英国では近年、計測分野を所管する省庁の統廃合が実施され、所管庁の名称が頻繁に変更されてきた。2016 年 4 月に再編の動きが一段落したことを踏まえ、2017 年 3 月にはメイ内閣のもとで新たに国家計測戦略が発表された。

基本政策

最新の戦略は、2017 年 3 月にビジネス・エネルギー・産業戦略省（BEIS）より発表された「国家計測戦略（UK measurement strategy）」で、これが現行の基本政策となっている。これは、2017 年～2020 年を想定した内容である。

同戦略では、世界をリードする英国の国家計測システムを維持すべく、生産性の課題と世界トップクラスの施設へのアクセスの重要性を考慮して、ユーザーのニーズに迅速かつ効率的に対応できるシステムの構築を目指す。生活およびビジネスを行う最良の場となるべく英国が国内の世界トップレベルの国家計測システムを利活用するという英国の計測ビジョンを実現するために、5 つの戦略テーマ － ①優れた政策、基準、規制を確保、②エンドユーザとの繋がりの深化、③英国の計測技術の向上、④信頼に足るデータの合理的かつ効果的な利用、⑤世界をリードする計測インフラへの投資 － を特定している。

政策担当機関・中心となる研究機関

計測に関する政策実施主体は、2016 年 4 月に設立された規制実施機構（Regulatory Delivery）で、BEIS が所管している。それまで公的機関に分散していた計測に関するすべての政府業務が同機構に集約されている。

中核的な研究実施機関として、計測学と物理学の両方において国際的に高い評価を得ている国立物理研究所（National Physical Laboratory: NPL）がある。NPL では、正確な国の測量標準

の開発および応用を推進しており、英国の繁栄と生活の質をさせる測量能力を提供することをそのミッションとする。世界トップレベルの計測学や革新的な応用研究、知識サービスを通じて、社会的・経済的インパクト創出のため、国の利益に沿った研究を実施している。

プログラム概要（予算規模含む）

上記戦略テーマの一つの「⑤世界をリードする計測インフラへの投資」として、NPL のインフラ拡充のためのプログラムが進行中である。例えば現在、量子技術には 3 億ポンドの大型政府投資が約束されているが、その一環として今後 4 年間で国防科学技術研究所（Dstl）が NPL に 700 万ポンドを措置し、Quantum Navigator の部品開発などを実施する予定である。

注目している技術／技術動向／注目動向

全球気候モデル開発のための地球観測、製造ラインおける高度なセンサーを備えたロボットや自動システム、量子暗号やコミュニケーションなどの量子技術など、最先端技術の開発を支援する計測研究に力が入れられている。

４．１．３　EU

EU レベルでの計量・計測分野の包括的な R&D 戦略・計画は策定されていないが、近年、研究開発協力体制の強化が重視されている。EU には計量・計測に特化した政策担当機関は存在しないが、プログラム実施機関としては欧州国家計量標準研究所協会（EURAMET）がプログラム実施機関として「欧州計量研究イノベーションプログラム（European Metrology Programme for Innovation and Research: EMPIR)」の運営の責任機関の役割を担っている。以下それらについて紹介する。

中心となる研究機関

ＥＵＲＡＭＥＴは本拠をドイツに置き、EU に所属する国立の計量に関連した研究所から構成される地域計量組織であり、EMPIR の運営責任機関を担っている。ＥＵＲＡＭＥＴの役割は①計測と計量標準の分野における欧州全体の研究協力体制の構築と支援、②EMPIR の進展と活動内容の定期的更新と実施、③欧州における協力プロジェクトのための研究資金を申請するメンバーの支援、④特別施設の共同利用に関する調整、⑤計量関連のニーズを満たすために役立つリソースの効率的使用に向けた改善と国家標準のトレーサビリティの確保、⑥EURAMET の枠組みを超えた計量研究機関や他の地域・国際計量研究機関との技術協力、⑦国家計側標準と校正、計量証明についての国際的な相互承認を目指す、地域計量組織としての課題への取り組み、⑧計量分野の科学的知識や経験の移転の奨励と調整。⑨欧州を代表する計量機関として、計量関連のインフラや欧州内の協力に関するベストプラクティスを紹介するといった政策決定者への助言の提供、⑩統一された専門的文書の作成に参加するなど質の高いインフラの構築を担う欧州の機関や国際機関との協力、などがある。

予算規模・プログラム

EMPIR は、2009 年～2013 年の 5 年間実施されていた欧州計量研究プログラム（European Metrology Research Programme: EMPR）の後継プログラムとして位置づけられている。EMPR

には 23 か国から参加があり、119 件の研究プロジェクトが資金提供を受けた。各プロジェクトの実施機関は 3 年で、最終年の 2013 年に実施された公募により採択されたプロジェクトの終了時期は 2017 年である。

2014 年から開始された第 8 次フレームワークプログラムである Horizon2020 の下、産業界のニーズに応え研究成果の技術移転を加速化するため、イノベーションへの注力を重視すべく EMPR は EMPIR と名称を改められ、2014 年～2020 年の 7 年間で公募プロジェクトに総額 6 億ユーロの配賦が予定されている。内訳として 3 億ユーロが参加国から、残りの 3 億ユーロが欧州委員会からの配分となっている。

注目している技術／技術動向／注目動向

EMPIR の共同研究プロジェクト（JRPs）にはターゲットプログラム（TPs）と呼ばれる優先領域が設けられた。これら優先領域では、欧州のグランド・チャレンジとして健康、エネルギー、環境、産業の 4 分野、、並びに、基盤的計測科学の推進を目指して基盤的計量、標準化、キャパシティ・ビルディング、が特定されている。年度ごとに公募される JRPs ではフォーカスされる優先領域が異なる。例えば 2014 年は産業、2015 年は健康と SI（科学イノベーション）全般、2016 年は環境とエネルギー、2017 年基礎（的計量）と産業となっている。2017 年度の公募内容をさらに詳しく見てみると、量子技術やトポロジーが注目技術として浮きぼりになる。2018 年の優先領域は健康と SI であり、2019 年は環境とエネルギー、2020 年は基礎（的計量）と産業が予定されている。

関連政策

EU では欧州全体の研究インフラの整備のため、欧州研究インフラ戦略フォーラム（European Strategy Forum on Research Infrastructure: ESFRI）と呼ばれる EU 加盟国が形成するフォーラムが 2002 年に設立された。ESFRI は 2006 年に専門家により策定された「ESFRI Roadmap 2006」を発表した。これは、10 年～20 年後を見据えた際に欧州共通で必要となる研究開発施設のロードマップで、7 分野 44 プロジェクトをリストアップしたものである。その後、このロードマップは 2008 年、2010 年、2016 年にアップデートされている。2016 年版の特徴として、プロジェクトフェーズとランドマークフェーズの二つのフェーズにわけ、段階を経て整備、運営が進むように工夫されている。

個別例として、NMR プラットフォームの変遷について概説する。FP7 で整備された BIONMR ネットワークは、ESFRI2010 に登場する。本プロジェクトは、FP の終了に伴い次期のプロジェクトに移行し、ESFEI2017 に登録されている。プロジェクトの移行にあたっては、全体の計画を構造生物学の研究基盤のプロジェクトとして構成しなおし、参加する施設やその中の計測機器のラインナップも変わっている。特徴として、旧体制では、メーカの参画があったものが、新体制ではなくなっている。NMR については、機関数が絞り込まれている。

表 4.1.3　ESFRI に採択されたプロジェクト数の変化

バージョン	プロジェクト数
2006	35
2008	44
2010	38
2016	50（21+29）

［出典］ESFRI 報告書等を元に CRDS 作成

個別例として、NMR プラットフォームの変遷について概説する。第 7 次フレームワークプログラム（FP7）で整備されたバイオ NMR ネットワークは、ESFRI2010 に登場する。本プロジェクトは、FP7 の終了に伴い次期のプロジェクトに移行されている。プロジェクトの移行にあたっては、全体の計画を構造生物学の研究基盤のプロジェクトとして構成しなおし、参加する施設やその中の計測機器のラインナップも変わっている。特徴として、旧体制では、メーカーの参画があったものが、新体制ではなくなっている。NMR については、機関数が絞り込まれている。

4．1．4　ドイツ

近年、ドイツ連邦政府における計測分野の研究開発においては、重要な社会的課題の解決、イノベーションの促進が重視されてきた。2006 年に発表された科学技術イノベーション基本政策「ハイテク戦略[5]」では、ファンディングから研究開発システムに至るまで、省庁の枠組みを超えた施策やイニシアティブが実施されている。同戦略の下で主要技術のアクションプランのひとつである、「ナノイニシアティブ・アクションプラン 2010」において計測技術をイノベーション促進の上で重要と位置づけである。以下、ナノイニシアティブの概要や研究開発の実施主体などについて記述する。

アクションプラン概要・予算規模

「ナノイニシアティブ・アクションプラン 2010」ではナノテクノロジーが 2015 年までに医学、通信、環境・エネルギー、化学、機械、ICT など総じて 1 兆ユーロを超える産業技術分野として期待されるとして、5 年間で 3.7 億ユーロ規模の助成が実施された。計測とセンサー技術は、各産業における品質の保全に大きく寄与し、原子レベルで技術プロセスを理解する基盤となりうる。極小で高度選択的なセンサーはプロセス監視や制御の領域において多様な応用を期待できるとされた。その後、2010 年に出された「アクションプラン・ナノテクノロジー2015」はナノイニシアティブ・アクションプラン 2010 の後継プログラムとしてコンセプトを引き継ぎながら、社会的な課題解決アプローチによる研究助成を行うとし、同じく 5 年間で 2.3 億ユーロを拠出した。2016 年には「アクションプラン・ナノテクノロジー2020」に更新され、5 年間で総額 1.9 億ユーロの助成を見込んでいる。現在も実施中の同プランでは、計測の研究開発は国際標準（ISO/TC24）に準拠させていくことが急務であると指摘されている。具体例としてあげられているのは、毒性影響評価、化学物質仕様、リスクアセスメントツール、試験方法の開発など、幅広い種類のアプリケーションの測定技術である。

[5] High-tech Strategy 第 I 期-第 III 期（2006 年-2017 年）

政策担当機関・中心となる研究機関

主管省は連邦教育研究省（BMBF）で、協力省庁として、連邦経済エネルギー省（BMWi）、連邦環境省（BMUB）、連邦保健省（BMG）、連邦国防省（BMVg）、連邦労働社会省（BMAS）、連邦食糧農業省（BMEL）の名が上がっている。研究開発の主実施体は BMWi 直下の国立物理技術研究所（PTB）とドイツ連邦材料試験研究所（BAM）で、そのほか標準と規格制定を担うドイツ規格協会（DIN）が連携パートナーとして先述のナノイニシアティブ・アクションプラン 2010 に記述されている。

注目動向

アクションプラン・ナノテクノロジー2020 の下では、①新素材、②フォトニクス、③マニファクチャリング、④サービスの 4 領域でファンディングが実施されている。これに関連して①新素材領域では 2017 年から「ハイブリッド新素材プラットフォーム（HyMat）」の公募を行っている。ハイブリッド素材は、自動車、航空宇宙、エレクトロニクス、エネルギー、医療技術などさまざまな分野への応用が期待されており、近年の工業生産プロセスのデジタル化（インダストリー4.0）では、センサー技術および大容量データの転送などにおいて飛躍的な技術革新が期待されている。同プログラムは、2 年半の間に産業応用を目指し、申請の時点ですでに研究室レベルでの技術実装からプロトタイプが存在するレベルの素材の研究開発を支援する。企業には最大 50%までのマッチングファンド、大学と研究機関には 100%の助成となっている。

インタビュー調査

ドイツの電子顕微鏡の開発拠点である ER-C（Ernst Ruska-Centre、電子顕微鏡の開発の功績により 1986 年ノーベル賞を受賞したエルンスト・ルスカ氏を記念して命名されたセンター。ヘルムホルツ協会のユーリッヒキャンパス内に 2004 年設置。）を訪問し、次世代電子顕微鏡開発及び導入についての戦略について意見交換を行った。主な論点、含意は以下のとおり。

- 限られた資金で、最新の機器を整備するため、メーカーの初期／機能強化バージョンを試作段階から購入している。正当な手続きで、機関に有利な契約であればファンディング機関等から制限がかかることはない。ただし、事前の調整は重要。
- 機器購入に合わせて保守契約することで保守費を安くしている。
- 試作機の導入については、日本メーカーは積極的ではない。完璧なものしか提案しない。本社への確認が必要で意思決定に時間がかかる場合が多い。
- ER-C では、サイエンスの成果を出すことを重視。サイエンスの成果がセンターの評価となり予算につながる。そのため、研究コミュニティの評価、ファンディング機関（教育省、ヘルムホルツ協会）との事前調整が重要。
- 大学経由のファンディングも重視しており、アーヘン工科大学との連携による DFG（大学向けのファンディング機関）の大型ファンドも獲得している。

４．１．５　中国

2016 年、中国の科学技術中長期プランは「国家中長期科学技術発展規画綱要（2006～2020 年）[6]」から「国家イノベーション駆動発展戦略綱要（2016～2030 年）」にシフトしつつあり、大気汚染

[6] http://www.most.gov.cn/kjgh/kjghzcq/

や海洋環境の観測において、長期に渡り注力する見込みである。一方、「国家イノベーション駆動発展戦略綱要」を具現化する「科学技術イノベーション第 13 次五か年計画（2016～2020 年）[7]」において、長期研究開発プロジェクト、産業技術の競争優位性の構築、福祉及び持続可能な発展に向けた技術体系の構築、国家安全・未来発展戦略に関わる技術などの視点で計測に関わる重点技術が幅広く指定されているが、基本的には「深宇宙・（地球）深層・深海」「広範囲」「リアルタイム」に収束している。基本政策における計測技術の研究開発には様々な機関が関わっている。ここでは計測専門機関としての NIM と中国科学院・北京生命科学研究院を例として紹介し、それから様々なプログラムを紹介する。

基本政策

2016 年は中国科学技術において、非常に重要な年である。国の中長期科学技術プランも科学技術五か年計画も新たに発表され、イノベーションが大きなキーワードとされている。計測技術について、中長期科学技術プランとしての「国家イノベーション駆動発展綱要（2016～2020 年）[8]」のなかでは、大気汚染と海洋環境の観測を長期に渡って発展させることが明記されている。具体的には、「資源利用の効率化と生態環境保護技術の発展、資源節約型社会と環境フレンドリーな社会の実現」のなかで、大気汚染観測システムを構築と高精度環境計測・観測を、また「海洋や宇宙空間技術を発展し、海洋経済や宇宙経済を開拓」のなかで、リアルタイムな海洋観測システムの構築取り上げている。

中長期科学技術プランの具現化を位置づける「科学技術イノベーション第 13 次五か年計画（2016～2020 年）」の中では、いくつかの分野で計測技術をとりあげている。例えば、「国家科学技術重大プロジェクト[9]」において、河川汚染における水環境を観測するビッグデータ・プラットフォームの構築、HIV や B 型肝炎など重大な疫病の状況を把握するための迅速な測定方法やデバイスの開発、高解像度地球観測技術の開発などである。また、「イノベーション 2030 プロジェクト[10]」において、地球深層や深海のような極端的な環境の観測技術を支援する。さらに、「産業技術体系の整備による競争優位の構築」においては、幅広く使われるナノ材料の人体への影響を評価するナノ材料安全に関する計測技術、バイオ技術の利用がもたらす危険を防ぐためのバイオセキュリティにおける観測技術・追跡技術、食品の品質に関する迅速な測定技術、およびリアルタイムにオンライン情報に反映する食品安全モニタリングネットワーク技術が重要領域と指定されている。「福祉及び持続可能な発展に向けた技術体系の構築」においては、環境観測技術、自然災害観測・予測技術、次世代ゲノム解析技術、薬品に対する不良反応、体外診断技術、国民健康観測システム、薬品に対する不良反応観測システムなどがあげられる。最後に、「国家安全、未来発展戦略に係る技術」においては、水循環･炭素循環観測技術、ダークマター探測衛星技術、地球深層探測、極地資源探測などがあげられる。

政策担当機関･重要プログラム

上述の計測技術における重点分野について、国務院（内閣府相当）、科学技術部（文部科学省相当）、産業情報化部（経済産業省相当）、農業部（農林水産省相当）、衛生と計画生育委員会（厚

[7] http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-08/08/content_5098072.htm
[8] http://news.xinhuanet.com/politics/2016-05/19/c_1118898033.htm
[9] 「国家中長期科学技術発展綱要（2006～2020 年）」によって設立された最重要研究課題を支援するプログラム。
[10] 「国家イノベーション駆動発展綱要（2016～2020 年）」に踏まえて 2030 年までに支援される最重要研究課題である。換言すれば、「国家科学技術重大プロジェクト」の後継版である。

生省相当）の支援する研究開発プログラムによって、大学、国立研究機関及び企業で研究開発が実施されている。計測技術を推進する専門機関として、中国計量科学研究院（NIM：National Institute for Metrology)と中国科学院・北京生命科学研究院のライフサイエンス機械技術イノベーションセンターがあげられる。前者は国家品質検査総局に属する計測標準分野の最高研究機関で、後者は中国ライフサイエンスにおける研究機器の研究開発にフォーカスする機関である。

また、基礎研究の最先端や産業技術の高度化に資する大型研究施設の建設において、計測関連のものも多い。例えば、「国家自主創新基礎能力建設　第 11 次五か年計画（2006～2010）」において、核破砕中性子源施設（CSNS 2018 年竣工予定）、強磁場研究装置（SHMFF）、航空機氷結実験用風洞、材料安全評価施設、地下資源探査及び地震予測用超低周波電磁気観測システム（未完成）、「国家重大科学基盤建設中長期計画（2012～2030 年）　第 12 次五か年計画期間中優先建設する科学施設」において、高エネルギー放射光検証装置、高高度宇宙線観測ステーション、高精度重力測量装置、大型低速風洞、上海光源実験ステーションの増設（7⇒50）が計画されており、そのうち大型低速風洞の建設が完了している。

注目すべき技術・技術動向

「科学技術イノベーション第 13 次五か年計画（2016～2020 年）」に基づき、中国は「国家重点研究開発プログラム[11]」と国家自然科学基金（NSFC）の「重大研究計画（Major Research Plan）2018 年度[12]」によって計測関連の技術を支援している。前者は「ビッグサイエンス先端研究施設の開発」という研究課題において、①次世代粒子加速器及び探測器の開発 ②次世代放射光基盤技術の開発、「重要科学研究設備の開発」研究課題において、計測機械の開発、「タンパク質制御」研究課題において、高解像度イメージング技術の研究開発、「国家品質基盤を強化と世界の計測基準をリード」研究課題において、①量子計測標準（量子力学の原理に基づいた測定標準、（例：細胞、菌の活動やタンパク質含有量に関する量子計測標準の設定）②新領域計測基準（新材料、新エネルギー、複雑環境の計測など 12 領域）③高精度計測技術（化学成分の計測、高精度温度計測、量子効果を用いた計測技術[13]など 7 領域）をあげている。各プロジェクト（一般的には 3 年か 4 年）の予算額は 1.7 億～6.8 億円になり、いずれも金額が大きい。

NSFC の「重大研究計画プログラム（2018 年度）」のなかで、精密測量物理学において、量子縺れに関する計測[14]、光格子時計の周波数を高精度に比較する技術、超冷原子及び分子に基づく精密計測、高精度な周波数標準の開発、時間-周波数標準における高精度な転送技術と比較技術、原子・分子構造と質の高いスペクトルの取得技術、基本物理規則に基づく精密計測、重力波の新測定方法など 13 の基礎研究領域[15]があげられ、5.3 億円の研究資金が支援される。郭プロジェクト（一般的に 3 年間）の予算額は 1,500 万円～9,000 万円で、「国家重点研究開発プログラム」より小粒なものとなる。

11 各省庁が連携して管理している国家戦略的重点技術に関する支援プログラム。
12 国家自然科学基金委員会が管理している戦略的研究プログラム。
13 注 1：例えば原子時計、超伝導量子干渉計、量子ホール効果抵抗標準に関するデバイスなどを指す。
14 量子縺れ現象を利用し、標準量子限界を超えて、ハイゼンベルク限界のスケーリングを実現する測量技術。
15 http://www.nsfc.gov.cn/publish/portal0/tab448/info73674.htm

4．2　計測・分析技術に関する市場動向

本節では、計測分析技術に関する市場動向に概説する。計測分析技術の市場規模については、対象とする技術の範囲に応じた様々な市場レポートが発表されている。ここでは、日本の主要な市場調査レポートである「科学機器年鑑」、一般社団法人日本分析機器工業会（JAIMA）、OECD 統計より公表されている統計のデータを中心に分析をする。

4．2．1　世界市場

世界の主要な計測機器メーカーの売り上げを分析したものが、表 4.2.1 である。これらは企業の財務関連の報告書を元に分析したものであるが、企業によっては、計測以外の売り上げも含むことや、セグメント毎の分析でも、その分類は企業毎に異なるため、計測分析技術に限定して、抽出することは難しい。日本のメーカーは、医療・科学を合わせた計測機器の売り上げで、20 億ドル規模の日立ハイテクノロジー、島津製作所、10 億ドル規模の日本電子などがあり、それらは、海外メーカーでは、ブルッカー社、パーキンエルマー社と同規模であり、さらに規模の大きい海外メーカーでは、サーモフィッシャ社 183 億ドル、ダナハー社 54 億ドル（ライフサイエンス）などとなる。表からサイエンスのみを合計した場合は、414 億ドルとなる。なお、市場レポートでは、200～500 億ドルとばらつきがある。

表 4.2.1　世界市場

メーカー名	売上高 (Revenue)
Thermo Fisher Scientific	18.27
Danaher Corporation	16.88
Life Sciences	5.37
Diagnostics	5.04
Dental	2.79
Environmental & Applied Solutions	3.69
Agilent	4.20
PerkinElmer, Inc.	2.12
Discovery & Analytical Solutions	1.51
Diagnostics	60
Bruker Corporation	1.61

メーカー名	売上高 (Revenue)
日立ハイテクノロジーズ	5.72
科学・医用システム	1.69
島津製作所	3.11
計測機器事業	1.90
医用機器事業	0.59
堀場製作所	1.55
科学システム機器部門	0.23
医用システム機器部門	0.24
日本電子	0.91

「Global Laboratory Analytical Instruments Market 2017-2021」(TechNavio 2017.03) 中のKey vendors5社および日本主要4社)を対象。売上高は決算短信、Form 10-K、Annual Reportより2016年度のものを抽出。1ドル＝110円で換算。

4．2．2　国内市場

国内メーカーの売り上げ規模は 2000 億から 2500 億の間で推移しており、リーマンショックによる落ち込みが 2016 年にようやく回復したところである。輸出割合はリーマンショック後から徐々に回復し、ここ数年は 50%強で落ち着いている。

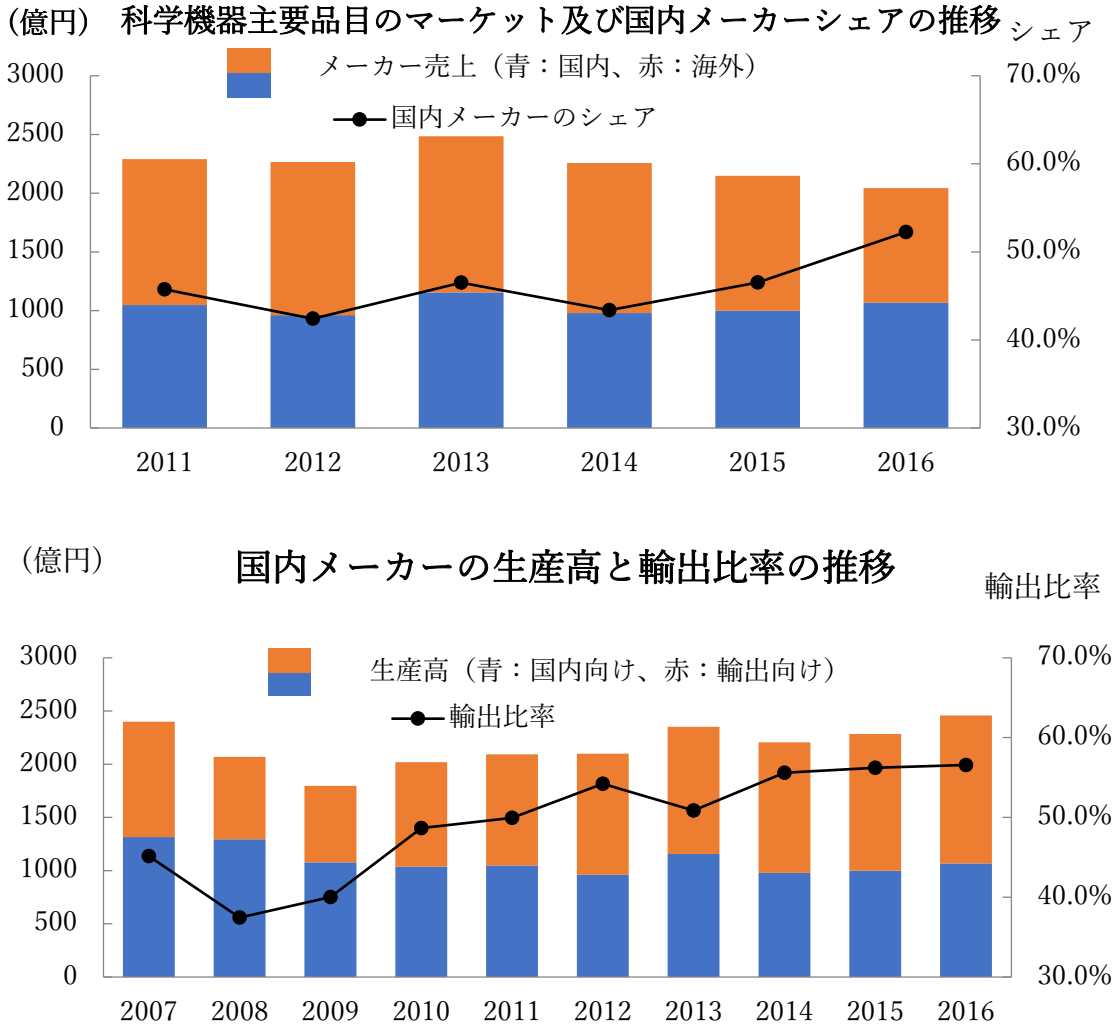


図 4.2.1　国内市場動向

［出典］アールアンドディ 科学機器年鑑(2017 年版)及び日本分析機器工業会統計資料（ラボ用分析機器）より作成より CRDS 作成

また、OECD 統計では、研究費の支出別内訳として、運営費（Current cost）と固定費（Capital expenditure）と分け、固定費はさらに建設費（Land and Buildings）と機器購入費（Machinery and equipment）[16]に分けられる。後者は、日本の総務省科学技術研究調査では「有形固定資産の購入費」[17]に相当する。OECD より入手できる 1979 年から 2016 年までを分析したものが、図

[16] OECD 統計の基準を定めたフラスカティマニュアルによる説明（項目 4.51）は以下のとおり。
「This category covers major (i.e. capitalised) machinery and equipment acquired for use in the performance of R&D. For the purpose of measuring R&D for National Accounts, expenditures on machinery and equipment should be identified by more detailed breakdowns, including “information and communications equipment” and “transportation equipment”. However, consideration should be given to data-quality issues and to whether the response burden would be greatly increased.」

[17] 科学技術研究調査（総務省）における「有形固定資産の購入費」の定義は、以下の通り。
「研究に必要な全ての有形固定資産（土地・建物，構築物，船舶，航空機並びに耐用年数 1 年以上かつ取得価額が 10 万円以上の機械，装置，車両，その他の運搬具，工具・器具及び備品）の購入に要した費用をいう。」なお、2013 年より無形固定資産が分離するなど変遷にも留意が必要。

4.2.2、図 4.2.3 である[18]。日本の研究開発投資は、民間企業が 8 割を占めており、図からは、バブル崩壊後、リーマンショック後の落ち込みが見て取れる。一方、研究開発費に占める機器購入費の割合は、全体としては、民間企業の傾向が大きく反映されるため、減少傾向であり、2001 年以降は 7～9%で推移している。一方、大学等は 10%前後で推移しており、減少傾向は見て取れない。

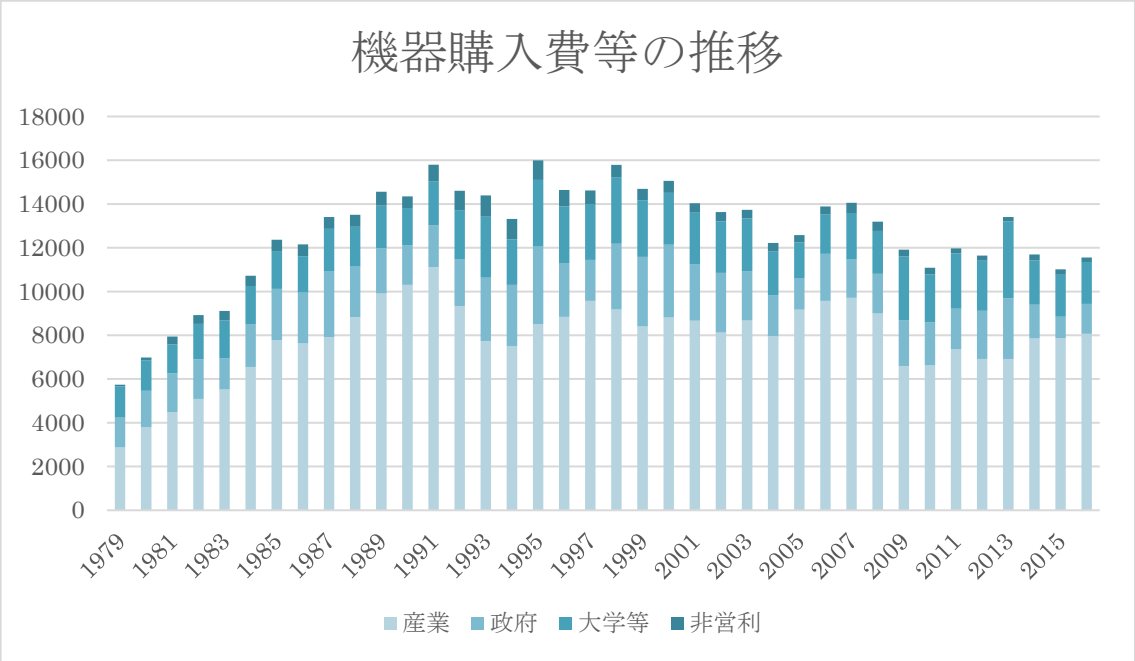


図 4.2.2　機器購入費の動向

[18] OECD 統計より作成。1996, 2001, 2008, 2013 年においてデータの継続性が失われている。1995 年までは過大推計になっている。なお、同統計において欠損している 1990 年の値には、平成 3 年科学技術研究調査（平成 2 年実績）を用いている。

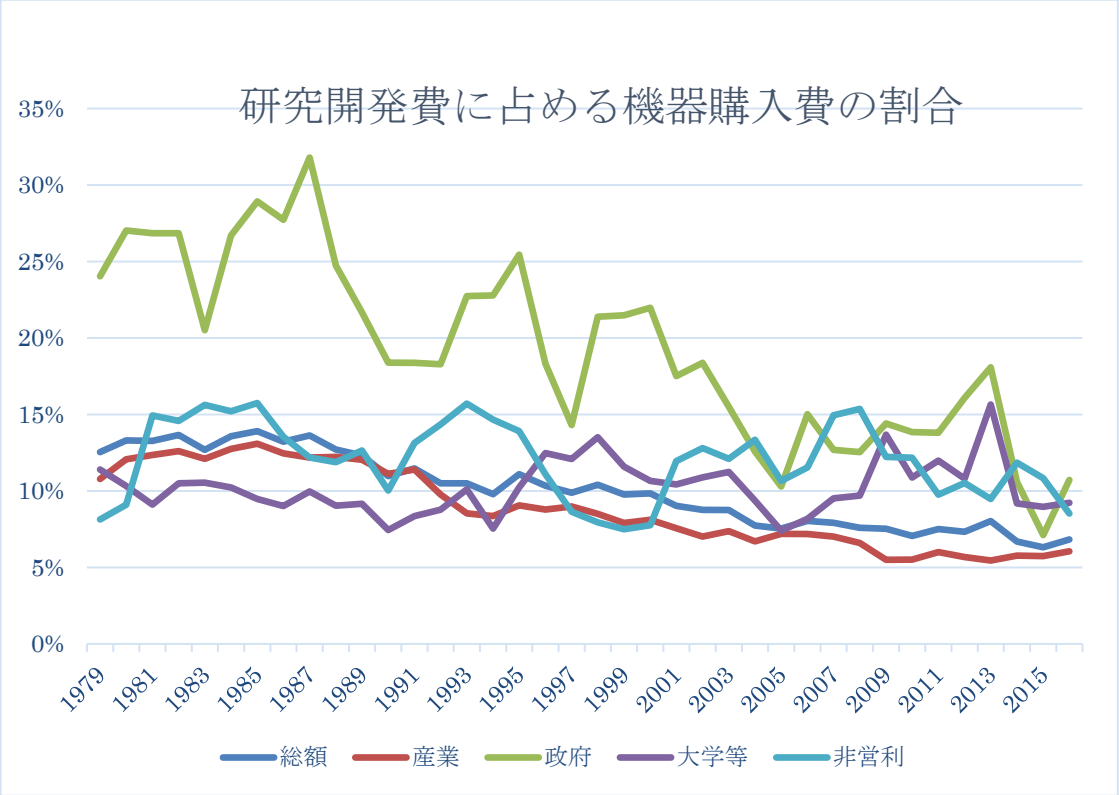


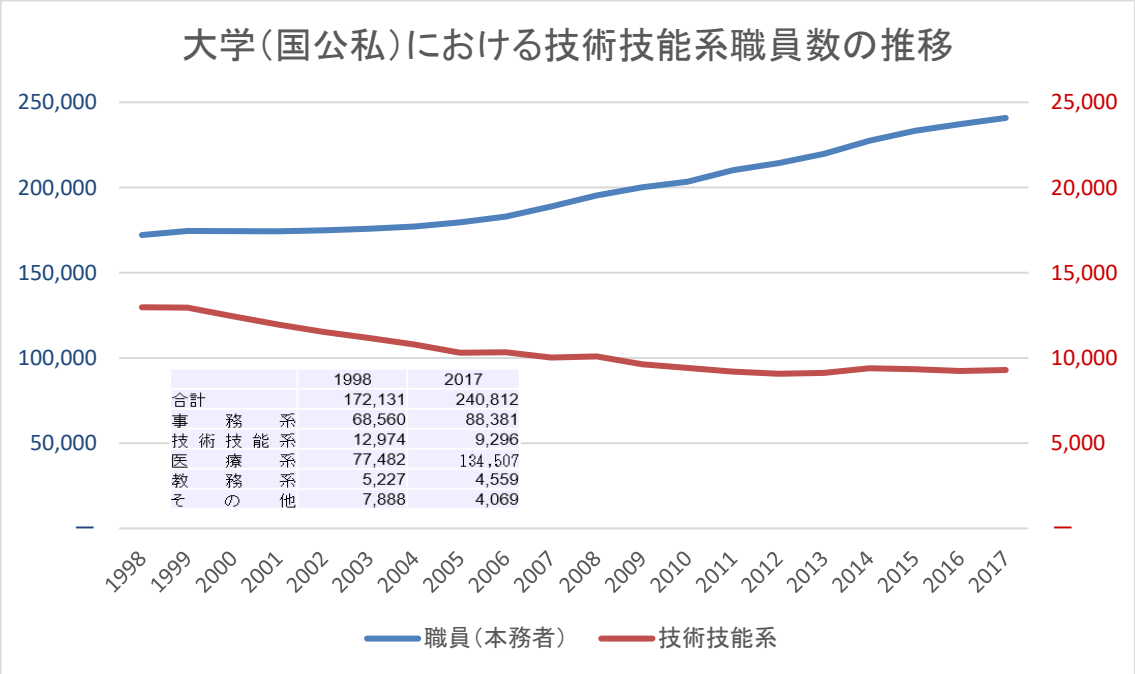
図 4.2.3　機器購入費の動向

［出典］OECD 統計（Dataset: Gross domestic expenditure on R&D by sector of performance and type of expenditure,Data extracted on 22 May 2018 02:37 UTC (GMT) from OECD.Stat）を元に CRDS 作成

付属資料　大学等における技術専門職等に関するデータ集

計測機器を含む研究開発設備・機器は大学等における研究開発の基盤となるものであるが、その運営・保守管理等により基盤を支える専門人材（技術専門職）についての調査データを参考として掲載する。

付属資料１　研究支援等に関する人材数の推移



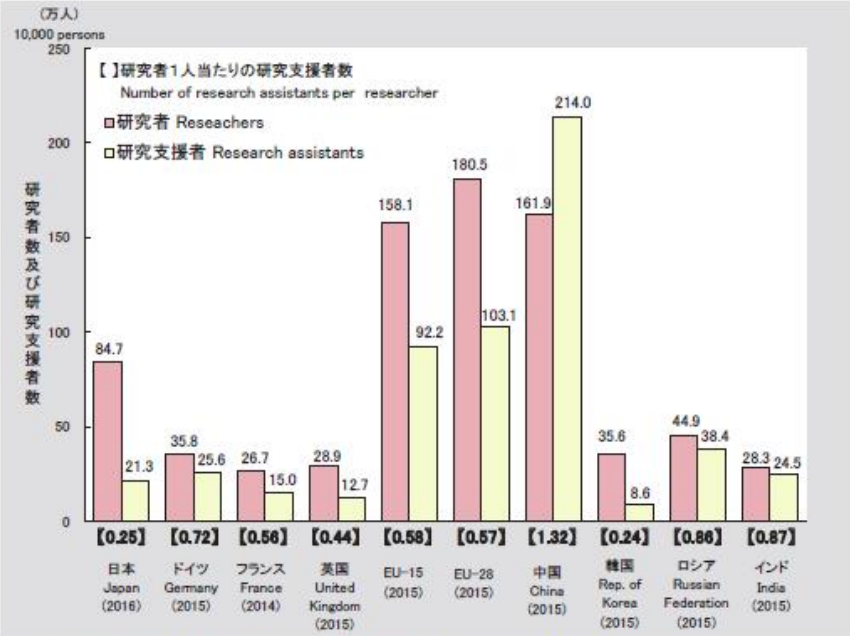
	1998	2017
合計	172,131	240,812
事務系	68,560	88,381
技術技能系	12,974	9,296
医療系	77,482	134,507
教務系	5,227	4,559
その他	7,888	4,069

付属図１.　技術技能系職員数の推移

［出典］文部科学省学校基本調査より CRDS 作成
※技術技能系とは、技術，技能に関する職務に従事している者（機器の運転操作及びこれらに準ずる業務に従事している者で建築技術者，電気技術者，自動車運転手，工員，電話交換手等）を指す。

10-1　主要国等の研究者1人当たりの研究支援者数

Number of research assistants per researcher in selected countries



注）1. 研究者1人当たりの研究支援者数は研究者数及び研究支援者数より文部科学省で試算
2. 各国とも人文・社会科学を含む。
3. 研究支援者は研究者を補助する者、研究に付随する技術的サービスを行う者及び研究事務に従事する者で、日本は研究補助者、技能者及び研究事務その他の関係者である。
4. ドイツの値は推計値及び暫定値である。
5. 英国の研究者数の値は推計値・暫定値であり、研究支援者数の値は過小評価されている。
6. EUの値はOECDによる推計値である。

資料：日本：総務省統計局「科学技術研究調査報告」
インド：UNESCO Institute for Statistics S&T database
その他の国：OECD, Main Science and Technology Indicators, Vol. 2017/6.

参照：29-2

付属図 2.　主要国等の研究者 1 人当たりの研究支援者数

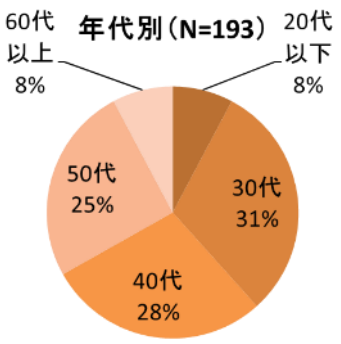
［出典］文部科学省科学技術要覧平成 29 年版（2017）

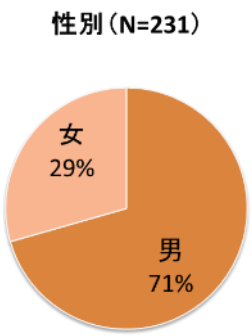
付属資料２　技術専門職アンケート調査結果

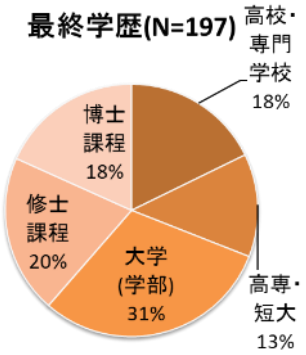
CRDS では、研究開発基盤を支える人材の実態を把握するため、国立大学法人機器・分析センター協議会の協力を得て、会員のセンター51 ヶ所に技術専門職に関するアンケートを実施した。所属する教員、研究員、事務職員、技術職員等のうち、職種や任期付等雇用形態（財源）に関わらず、研究そのものではなく研究設備・機器に関する業務を主に行う者を対象とし、2016 年 5 月時点での状況について調査した。調査期間は 2016 年 7 月 19 日から 8 月 31 日までで、有効回答数は 29 センター（24 大学）235 人であった。

以下にアンケート結果の概要を掲載する。

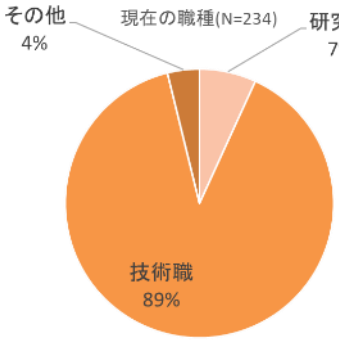
属性



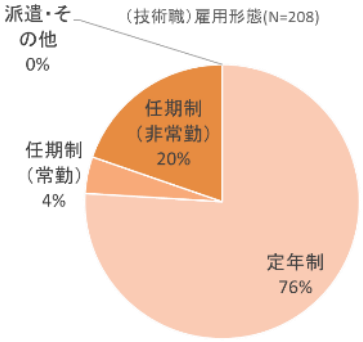




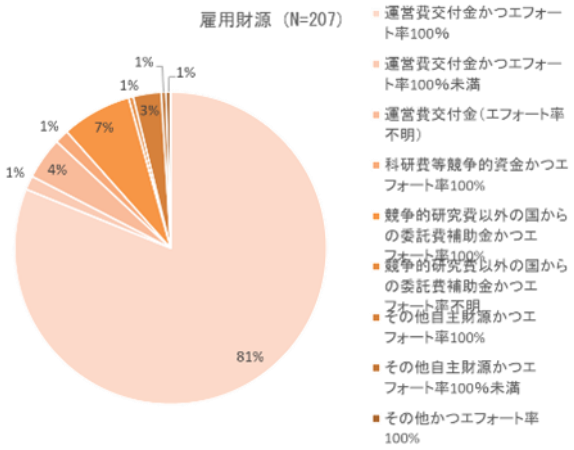
職種及び雇用形態



研究職職種内訳（人）	
教授	2
特任教授	0
准教授	6
特任准教授	0
講師	0
特任講師	1
助教	4
特任助教	0
博士研究員	3
その他	0
合計	16

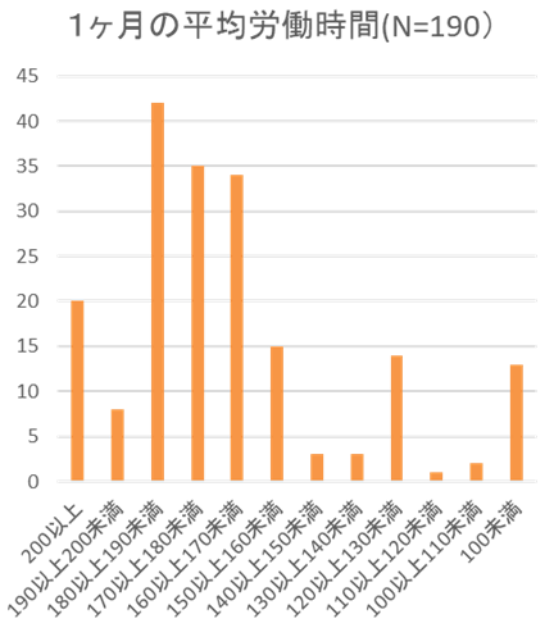


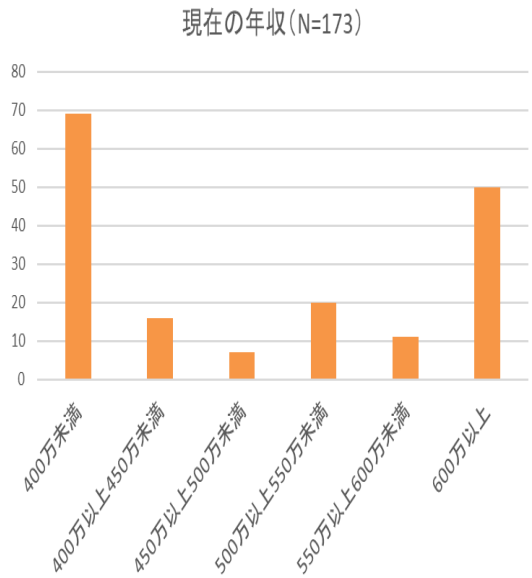
雇用財源



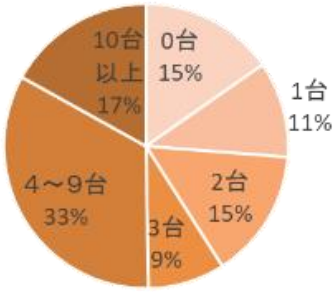
雇用財源（N=207）人	
運営費交付金かつエフォート率100%	168
運営費交付金かつエフォート率100%未満	3
運営費交付金（エフォート率不明）	9
科研費等競争的資金かつエフォート率100%	3
科研費等競争的資金かつエフォート率100%未満	0
科研費等競争的資金かつエフォート率不明	0
競争的研究費以外の国からの委託費補助金かつエフォート率100%	15
競争的研究費以外の国からの委託費補助金かつエフォート率100%未満	0
競争的研究費以外の国からの委託費補助金かつエフォート率不明	1
その他自主財源かつエフォート率100%	6
その他自主財源かつエフォート率100%未満	1
その他自主財源かつエフォート率不明	0
その他かつエフォート率100%	1
その他かつエフォート率100%未満	0
その他かつエフォート率不明	0

労働時間及び年収

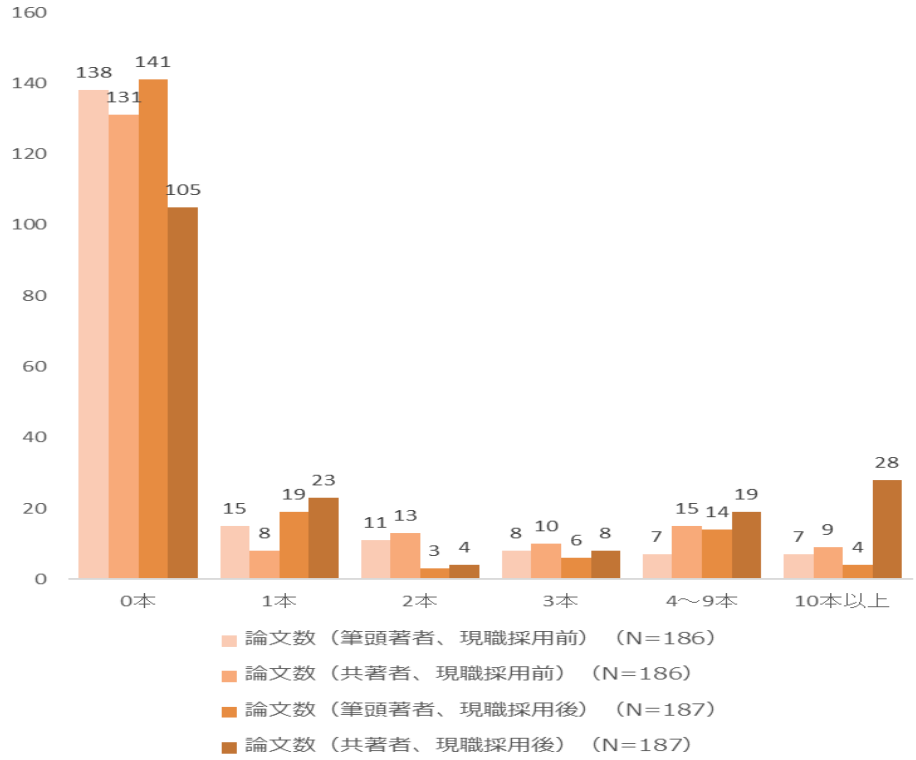




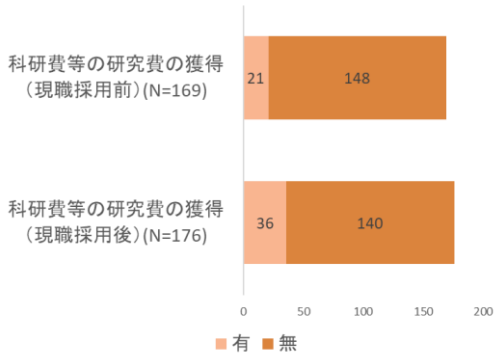
担当機器数



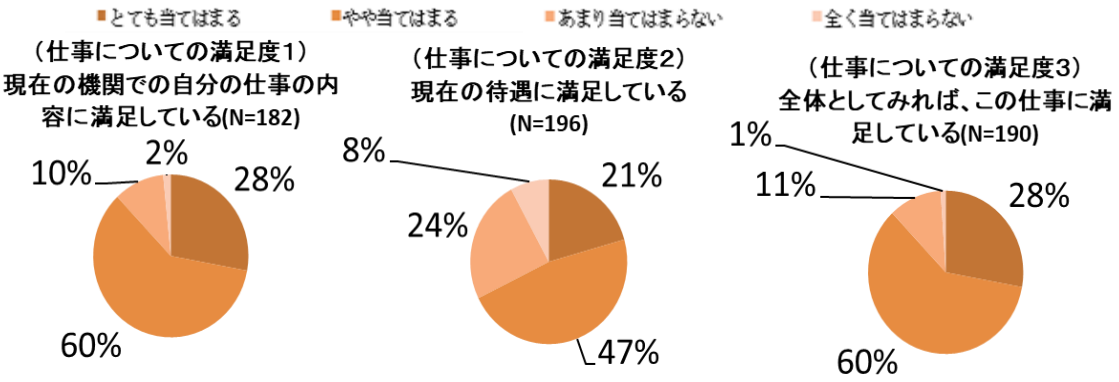
論文執筆数



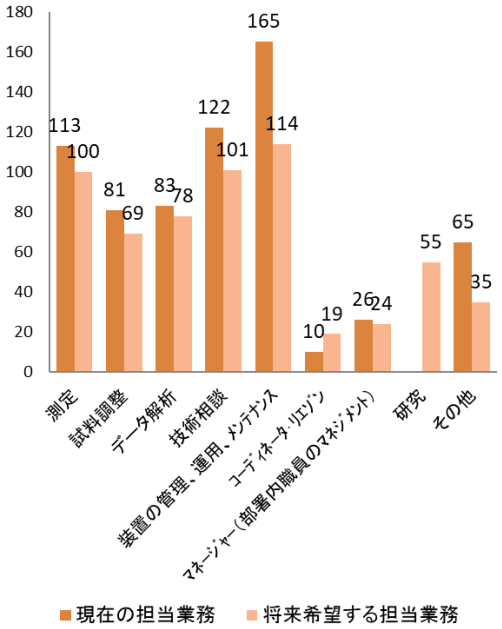
研究費獲得状況

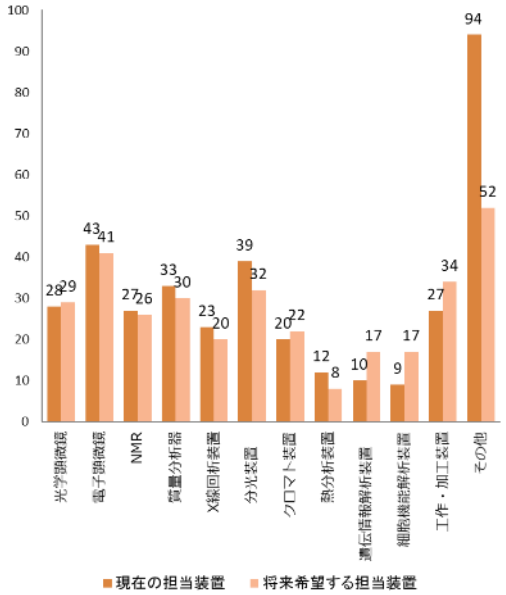


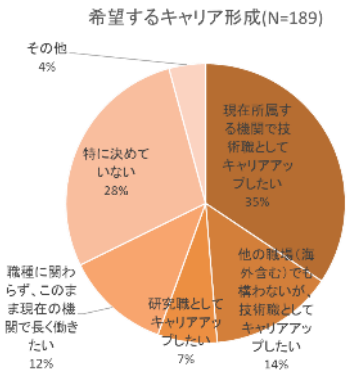
満足度

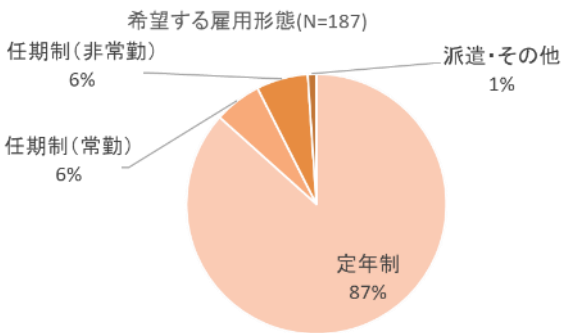


将来に対する希望









■計測横断チーム　作成メンバー■

中山	智弘	企画運営室長・フェロー	総括責任者 兼 リーダー
佐藤	勝昭	フェロー・広報主監	アドバイザー
丸山	浩平	特任フェロー	
大平	竜也	フェロー	
冨田	英美	フェロー	
永野	智己	フェロー	
中川	尚志	フェロー	
中村	亮二	フェロー	
福島	俊一	フェロー	
堀	邦夫	フェロー	
松本	麻奈美	フェロー	

※お問い合せ等は下記までお願いします。

CRDS-FY2018-RR-03

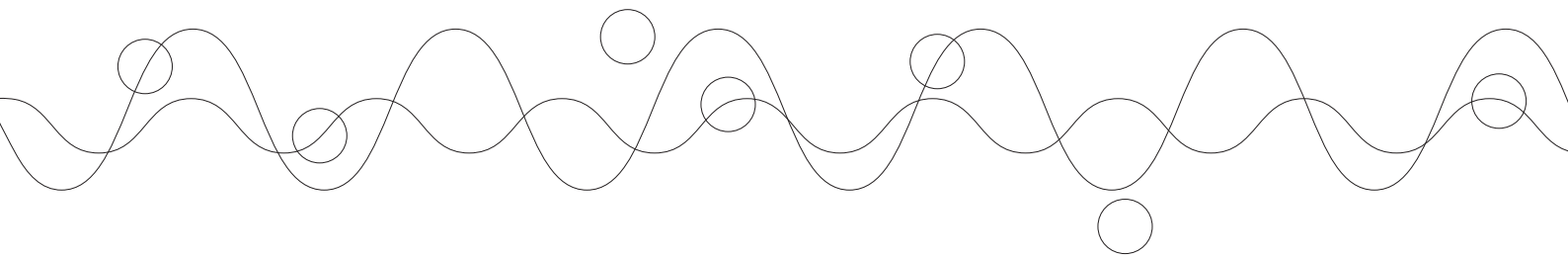
計測横断チーム　調査報告書

「計測の俯瞰と新潮流」

平成 30 年 12 月　December 2018
ISBN 978-4-88890-614-2

国立研究開発法人科学技術振興機構　研究開発戦略センター
企画運営室
Department of Planning and Management,
Center for Research and Development Strategy,Japan Science and Technology Agency

〒102-0076　東京都千代田区五番町 7　K's 五番町
電　話　03-5214-7481
E-mail　crds@jst.go.jp
http://www.jst.go.jp/crds/

©2018 JST/CRDS
許可無く複写／複製をすることを禁じます。
引用を行う際は、必ず出典を記述願います。
No part of this publication may be reproduced, copied, transmitted or translated without written permission. Application should be sent to crds@jst.go.jp Any questions must be appropriately acknowledged.

ISBN 978-4-88890-614-2