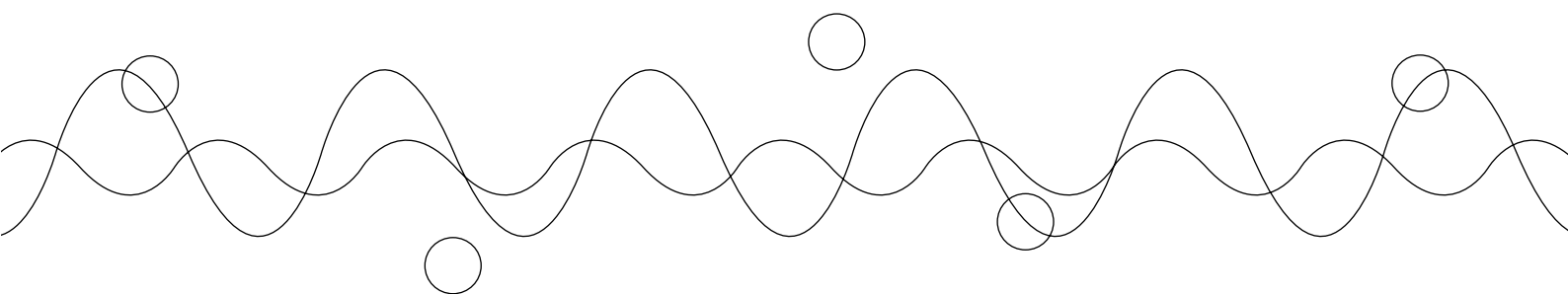


調査報告書

**科学における未解決問題
に対する計測ニーズの俯瞰調査**



[巻頭言]

計測学と計測機器

科学技術振興機構 研究開発戦略センター (CRDS)

センター長 吉川 弘之

CRDS では、現在の科学研究の水準と社会の要請との両者を前提として、必要であり且つ遂行可能な研究の課題を「戦略プロポーザル」として提案している。その中に計測を取り扱う「計測技術に関する横断グループ」があり、担当者が精力的に調査・検討を行っているが、計測技術についての提案作成にあたって、難しい悩みがあることが明らかになりつつある。それは、学問的に計測という分野が自立することと産業的に計測産業が盛んになることとの両方が、他の多くの分野を含む科学研究にとって極めて重要だと認識されながら、それが諸外国も含めてなかなかうまくいかないことと関係する。このグループでは、この問題を抽象的に議論するだけでなく、また研究や産業の部分的修正で済ませるのではなく、計測問題の基本に立ち返って検討し、本質的な提案に向けて検討中である。

(学問領域における計測学)

科学が確固たる進歩を遂げてきた根拠として観察があることを否定する者はおらず、しかも定量的観察としての計測の重要性を疑う者はいない。それなのに現在、計測という分野が盛り上がらないのは不思議である。多くの学問的な課題解決のために計測の進歩が期待され、実際に研究のフロンティアが計測の進歩によって拡大されている。それなのに科学計測器産業は苦戦し、計測学を主題とする学術研究も盛んであるとは言い難い。しかも大学における教育も十分とはいえない状況にある。これは、計測分野だけの問題ではなく、科学研究全体にかかわる非常に深刻な問題である。

このことは本調査研究を踏まえ、提案作成に至る過程で明らかにされてゆくことであるが、この時点で、計測を学問領域の一つと規定し、大学の組織にも計測学科を置いた過去の経緯に問題があったと感じている。計測は科学そのものだったのではないか。したがって、計測の科学における位置づけの論理的考察が必要となる。

どんな学問分野においても、計測の限界に突き当たると科学の進歩が止まる。従って計測は科学の母 (mother of science) といってもよい。現在の素粒子物理をみるとわかりやすい。理論研究者が仮説を提起し、それを実験研究者が検証する。この場合実験研究は計測が主体である。両者の存在理由が、学問の世界ではっきりしているだけでなく、社会的にも理解されている。他の分野でも、仮説的理論が観察によって実証される構造は科学にとって基本である。分析でなく構成を主体とする工学ではこの関係が明瞭ではないが、それを深く考えずに機械工学と電気工学に並んで計測工学があるように考えたのは恐らく単純すぎたと思われる。

改めてこのことを考えることによって問題を突破できる可能性がある。それは計測学を、工学での機械工学や電気工学、更に広く物理学、化学というディシプリンの平面的な区分けの中に置くのではなく、すべての領域に対して独自の関係をもつ一つのメタサイエンスと考えることである。物理学の理論と実験を代表とし、生体研究の状況設定と挙動観察、物性研究の創成と物性測定、化学研究の新化合物とキャラクタリゼーション、多くの工学研究における設計と機能測定などに現れる観察と測定、それらは物理学のように分業して

はいないけれども、仮説とその実証という科学の基本的行為がそこにある。この基本的行為についての科学がメタ計測学であり、それが各領域の実際の計測を関係づけるという構造を、計測学が持つことが必要である。

(未来を予測する計測：「四次元レンズ」)

科学研究における仮説と検証という連鎖は、無限の現象の背後にあってそれを実現する有限の法則を発見しようとしているのである。これは真理の探求という言葉で表現され、我々は多くの法則を手に入れている。その中で、検証の主役として計測があった。

しかし環境研究における計測は少し違う。環境研究は環境の変化の背後にある法則を発見するだけではない。もちろん二酸化炭素の空気中濃度の上昇により温暖化が起こるといふ法則の発見は真理の探究研究の結果である。しかし、その法則を知るだけでは不十分である。それに加えて今どのような状態にあるのかが重要であり、法則と現在の状態との組が、人類にとって必要な行動を決める。

生命科学においても、生命現象の背後にある大原則を発見する探求と、現在の地球環境が人間の健康に与える影響の探究がある。今いる人間の健康が大丈夫かを知ることが大事であり、これは生命の原則では解けない。このことは計測対象が倍増したことを意味していて、計測の責任が大きくなったことを意味している。

環境研究では、実験室でなく現実に多くの計測点を地球上において観測する。またあらゆる経路を対象として窒素の循環を調べる。窒素の循環理論だけでなく今の窒素の循環量が生物多様性にとって大事である。

そして明日どうなるかも知らなければならない。これは予想問題であり、地球シミュレータは気候温暖化の将来を予測している。これを新しい計測の課題と考える。

予測として計算機シミュレーションを行っているが、私はそれをもう少し大きな概念で「四次元レンズ」だと考えている。「顕微鏡」は物質を微細に見ることであり、二次元の拡大である。また、三次元として遠くを見ることは「望遠鏡」である。そして明日を予測することは時間軸を入れることで、我々がまだ手にしていない「四次元レンズ」となる。この「四次元レンズ」とは一体何なのか、これは計測研究者にとって極めて大きな話題だと思う。生命科学においても、常に進化している対象は昨日の法則に従う保証はなく、時間は従来と異なる意味をもつ。たとえばきわめて小さな時間内に起こる現象が、マクロなゆっくりした変化とどのような関係があるかを知ることが、科学の新しい課題である。ぜひ「四次元レンズ」の探求をお願いしたい。

(十分条件を満たす計測機器産業と人材育成)

計測機器の研究開発も計測研究の大きな責任を負っている。それは学術研究内の計測とは違いがある。ある物質を研究している研究者はその物質の固有性を前提として特定の性質を知ろうとしている。しかし計測機器は、ひとつの物質のある性質ということだけでなく、多様な計測対象について計測が可能な場を創り出さなければならない。

これこそ前に述べたメタ計測である。現在のところ機器開発のためのメタ計測学が完成しているとは言えないが、その創出は計測機器の発展と深く関係してゆくことが予想される。ある性質の計測が特定の研究で可能になったことが計測の必要条件を満たしたのだと考えれば、計測機器は十分条件であると言える。産業の方は、両者は論理的な構造が違う

ことを認識した上で、計測機器の研究開発が基礎研究にとって固有の重要性をもつことを主張し、その上で、多く出されている計測ニーズの課題に対応していただきたい。計測機器を作る、計測機器を使う、計測結果を活かす、狭い意味の研究者とは違う人材も相当必要なはずである。この人材をどうやって教育するかも含めた計測機器産業論の展開によって社会的認知を獲得することが必要である。

(今後の取組みへの期待)

大学、研究所、企業の研究者、機器開発者、そして CRDS のフェローによる深い議論がなされることは極めて意義深い。「メタ計測学」を作る必要があると言ったように、計測分野は研究領域としても未完成であり、研究者、開発者とともに、ファンディング機関を含み政策的にも考えてゆく必要がある。この議論を出発点とし、協力しつつそこへ向けて計測の意義を展開していくことが、このグループのミッションであり、同時に関連する方々と共有すべきミッションだと思う。安易ではないが、計測が我が国の多くの研究分野の水準向上に必要不可欠であることからいって、そのミッションを果たすことを心から期待する。

エグゼクティブサマリー

ここ数年来、日本の科学技術では欧米製の計測・分析機器を購入して科学研究が進められる状況が指摘されている。現代科学が発展してきた歴史を振り返ると、新たな科学の発見は計測することによってブレークスルーされてきた。まさに計測は科学の母（*mother of science*）と言っても過言ではない。したがって、計測技術を外部へ依存することは、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。

本調査は、この日本の科学の進展における計測のあり方について検討した結果をまとめたものである。また、計測技術に係る研究開発分野における様々な計測ニーズを俯瞰するとともに、ニーズとシーズの邂逅する場など、計測ニーズを充足する研究開発のあり方についても提案している。具体的な調査項目を以下に記す。

- ・各科学分野における計測ニーズの把握
- ・抽出した計測ニーズの俯瞰と、特徴付け
- ・計測ニーズとシーズの邂逅に関する今後の進め方の考察

本調査において対象とする計測分野は、「計測を基盤として用いる科学技術分野」である。①「生命科学」、②「ナノ・物質科学」、③「情報・通信科学」、④「環境・エネルギー科学」の4つの科学技術分野を対象として調査を行った。

調査の結果得られた各科学分野における現在の計測の水準（特徴）と、計測ニーズのトレンド・キーワードは表の通りである。また、得られた計測ニーズの特徴として、(1) 計測ニーズの60%が「生命科学」分野、(2) より複雑な現象解明へ取り組むための計測ニーズが多い、(3) 「四次元レンズ」という未来予測も含めた計測ニーズが含まれる、の3点が明らかとなった。

表 科学分野ごとの計測の水準（特徴）・トレンド（概要）

分野	分野と計測の水準（特徴）	トレンド
生命	ヒトの生命現象を分子、細胞、器官および個体などのレベルで解明する研究分野。未解決問題が多い。 物質の時空間的存在（存在計測）と、物質関係性（関係計測）から生命現象を理解。	内部計測、非侵襲（生きたまま）、リアルタイム、定量計測
ナノ・物質	ナノメートル領域における物質の成長、加工、そして内部・表面・界面構造、そこで生ずる諸物性現象を、原子・分子レベルで観測し、理解し、制御し、それら諸要素を組み合わせることで応用することにより、あるいは他の知識・技術と組み合わせることによって新しい知と機能を創出しようとする学術的・技術的領域。物理計測と一体化。あらゆる原理・物理現象を応用して、極限までの物質の存在・現象の解明を追及（存在計測）。	同一環境・その場計測、多階層同時計測、多因子同時計測、リアルタイム、原子分解能、3次元化、界面計測、認証標準物質と標準分析・測定の設定
情報・通信	通信・計算・制御の情報処理の科学。数学を含めた学問ツール、データマイニング、複雑系などの計算科学と融合し、人文・社会科学分野を含めた多面的展開を見せている。	複雑系、シミュレーション連動、小型簡便、ネットワーク、オンサイト、常時／間欠計測
環境・エネ	①公害、地球環境問題などの課題解決、②その予防機能の向上、③諸現象の環境の規定に関する総合的な学問。環境科学の課題は実用性を持つ。 対象とする空間が大きく、また、ゆっくりと変化する現象、未来の予測までを扱うため、計測データと数値計算シミュレーションとの統合（シミュレーション連動）によって理解。	オンサイト、ネットワーク化、小型化、低消費電力化、高空間分解能、遠隔・非接触計測、シミュレーション連動、リアルタイム

今回の計測ニーズ俯瞰調査の結果を踏まえ、今後解決すべき課題を3つ列挙する。

(1) ニーズとシーズの邂逅

ニーズとシーズの邂逅プロセスは最大のポイントである。まず、計測ニーズについては、「メジャメント」（測りたい物理量は明確で、技術の機能・性能向上が目的）と「キャラクターゼーション」（どのような物理量を測ればよいか未明で、ある現象の理解が目的）の2つの目的は分離して考えることが必要である。また、その計測ニーズが充足されると、科学の未解決問題がどの程度まで解明されるかを体系的に整理される必要がある。さらに、計測技術を開発するに当たり、計測ニーズを測定可能な物理量（メジャランド）に落とし込む作業が必要である。これらの各ステップは、ニーズ側、シーズ側のどちらか一方ではなく、両者が連携することで具体的な検討が進むことになる。この邂逅の作業をとりまとめるのが「中間的な研究者」である。そして、この作業を推進する邂逅の場を新たに構築することが求められる。

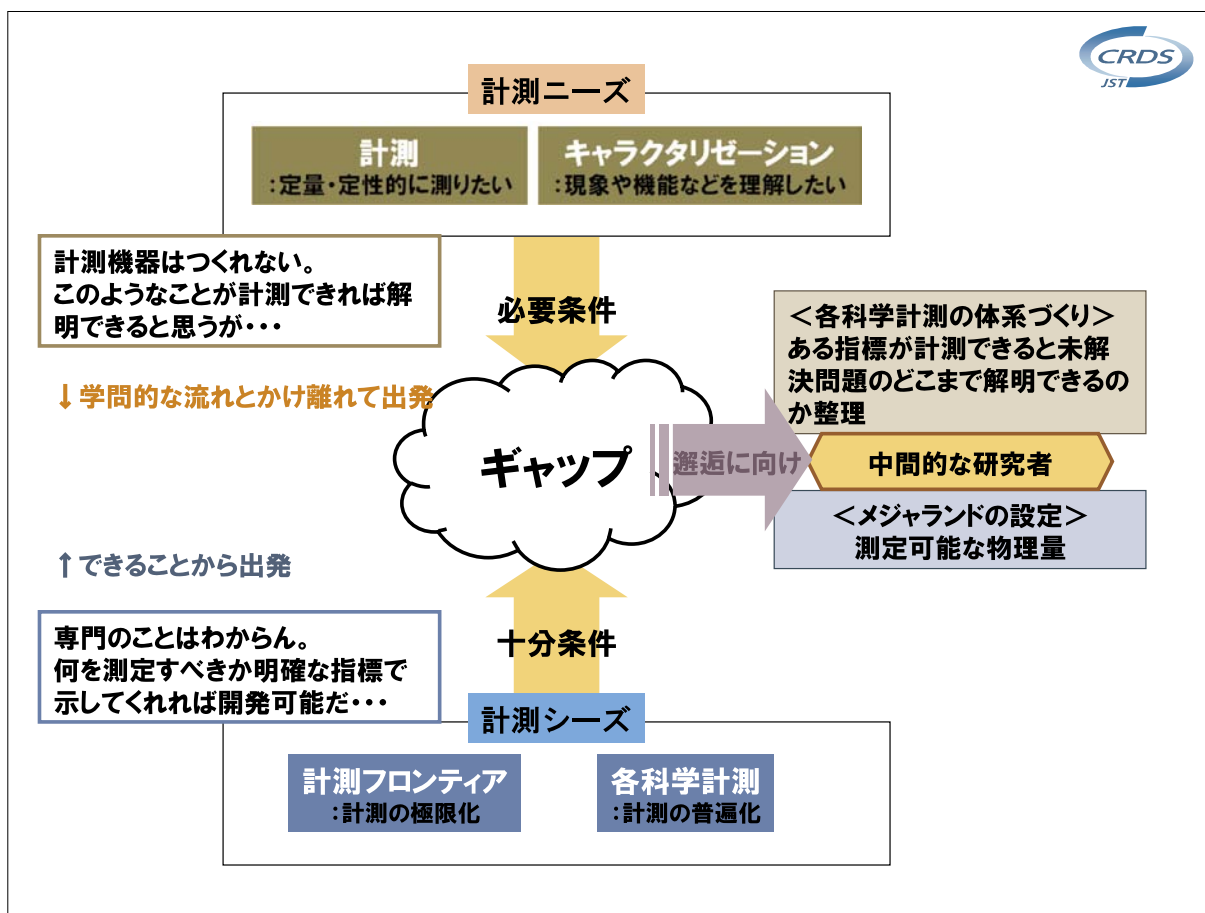


図 計測ニーズと計測シーズの邂逅

(2) メタ計測学の構築

この計測学は、工学での機械工学や電気工学、更に広く物理学、化学というディシプリンの平面的な区分けの中に置くのではなく、すべての領域に対して独自の関係をもつ一つのメタサイエンスと考えることである。物理学の理論と実験を代表とし、生体研究の状況設定と挙動観察、物性研究の創成と物性測定、化学研究の新化合物とキャラクタリゼーション、多くの工学研究における設計と機能測定などに現れる観察と測定、それらは物理学のように分業してはいないけれども、「仮説とその実証」という科学の基本的行為がそこにある。この基本的行為についての科学がメタ計測学であり、それが各領域の実際の計測を関係づけるという構造を、計測学が持つことが必要である。

現状は、この計測分野は研究領域としても未完成であり、研究者、開発者とともに、ファンディング機関を含み政策的にも考えてゆく必要がある。安易ではないが、計測が我が国の多くの研究分野の水準向上に必要不可欠であることからいって、そのミッションを果たすことが期待される。

(3) 計測集団（仮称）の設置

ニーズとシーズの邂逅の場、メタ計測学の構築を推進する場として、我が国の計測技術に関する活動をネットワークで結ぶ仕組みの構築が求められる。

目 次

[巻頭言]

エグゼクティブサマリー

1. はじめに	1
2. 調査方法	3
3. 調査結果	6
3. 1. 分野別の計測ニーズ	6
3. 2. 計測ニーズの俯瞰	15
4. まとめ	21
4. 1. 計測ニーズの特徴	21
4. 2. 今後の進め方	23
5. 調査の詳細、ワークショップ報告、他	26
5. 1. インタビュー調査	26
5. 2. アンケート調査	27
5. 3. 計測ニーズ俯瞰ワークショップ	32
5. 4. 米サイエンス誌 創刊 125 周年 科学の未解決のナゾ 125	97

[調査後記]

1. はじめに

◆背景

ここ数年来、日本の科学技術では、予算の多くが欧米製の計測・分析機器の購入へと費やされる状況が指摘されている。これに対し、「税金で賄われる研究投資が海外流出してしまうとはけしからん」、「欧米製品に市場を席卷されたのは、中曽根政権時代の“バイアメリカン政策”の影響だ」、「科学技術の研究開発が滞ったわけではないのだから問題ないだろう」、「実績のある先行ブランド機器を用いたデータの方が国際的な評価を得やすい」等の様々な意見がある。しかし、現代科学が発展してきた歴史を振り返ると、新たな科学の発見は計測することによってブレークスルーされてきた。まさに計測は科学の母 (mother of science) と言っても過言ではない。したがって、計測技術を外部へ依存することは、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。

この問題に真正面から取り組むため、2010 年度、科学技術振興機構 (JST) 研究開発戦略センター (CRDS) では「科学における未解決問題と、そこで必要とされる計測ニーズ」を俯瞰的に探索し、そのニーズに応え、課題をブレークスルーし得る計測技術の研究開発戦略を検討する活動方針を立てた。

◆目的

本調査は、新たな科学の発見、進展を日本から生み出し続けていくために、計測技術の研究開発戦略という基本的な課題にしっかりと取り組むための必要条件を探ることを大きな目的としている。計測技術に係る研究開発分野について、様々な計測ニーズを俯瞰的に探るとともに、ニーズとシーズの邂逅する場など、その計測ニーズを充足する研究開発のあり方について提案するものである。具体的な調査項目を以下に記す。

- ・各科学分野における計測ニーズの把握
- ・抽出した計測ニーズの俯瞰と、特徴付け
- ・計測ニーズとシーズの邂逅に関する今後の進め方の考察

◆対象とする計測分野

CRDS では、表 1 のマトリクスに計測技術に関する研究開発を目的別に整理している。すなわち、測ることを手段として用いる研究開発 (計測ニーズ主導) と、測ることを目的とする研究開発 (計測シーズ主導) を上下段に分け、さらに国が行うべき国家技術、アカデミアが行うべき科学技術、産業界が行うべき産業技術の 3 つに分け、全体で 6 領域に分類している。

本調査において対象とする計測分野は、「mother of science としての計測」にフォーカス、すなわち「計測を基盤として用いる科学技術分野」(第 3 領域) である。各領域は明確に線引きされるわけではないため、今回の調査の議論でも他領域の課題の混入もあるが、基本的にはこの「第 3 領域」を対象としている。また、進展させる科学技術も多様であるが、今回は便宜上、以下に示す 4 つの科学分野を対象として調査を行った (第 3 期科学技術基本計画で示される重点 4 分野に相当する)。

- ①「生命科学」

- ②「ナノ・物質科学」
- ③「情報・通信科学」
- ④「環境・エネルギー科学」

表 1 計測技術に関する研究開発の分類（目的別）

	(基幹) 国家技術	(基礎) 科学技術	(応用) 産業技術
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)	【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	【第 3 領域】 生命、ナノ・物質、情報・通信、環境・エネ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)	【第 2 領域】 長さ、重さ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

2. 調査方法

図1は、科学の計測ニーズと、それに対応する計測技術の抽出プロセス（概要）をまとめたものである。抽出のポイントは計測ニーズと計測技術の接点を探ることである。現実には、この両者がそれぞれ独立しているため、協力関係を結びづらくなっている。このため、本調査では、計測ニーズの把握を主たる目的とし、研究者インタビューやワークショップでの検討を行った。

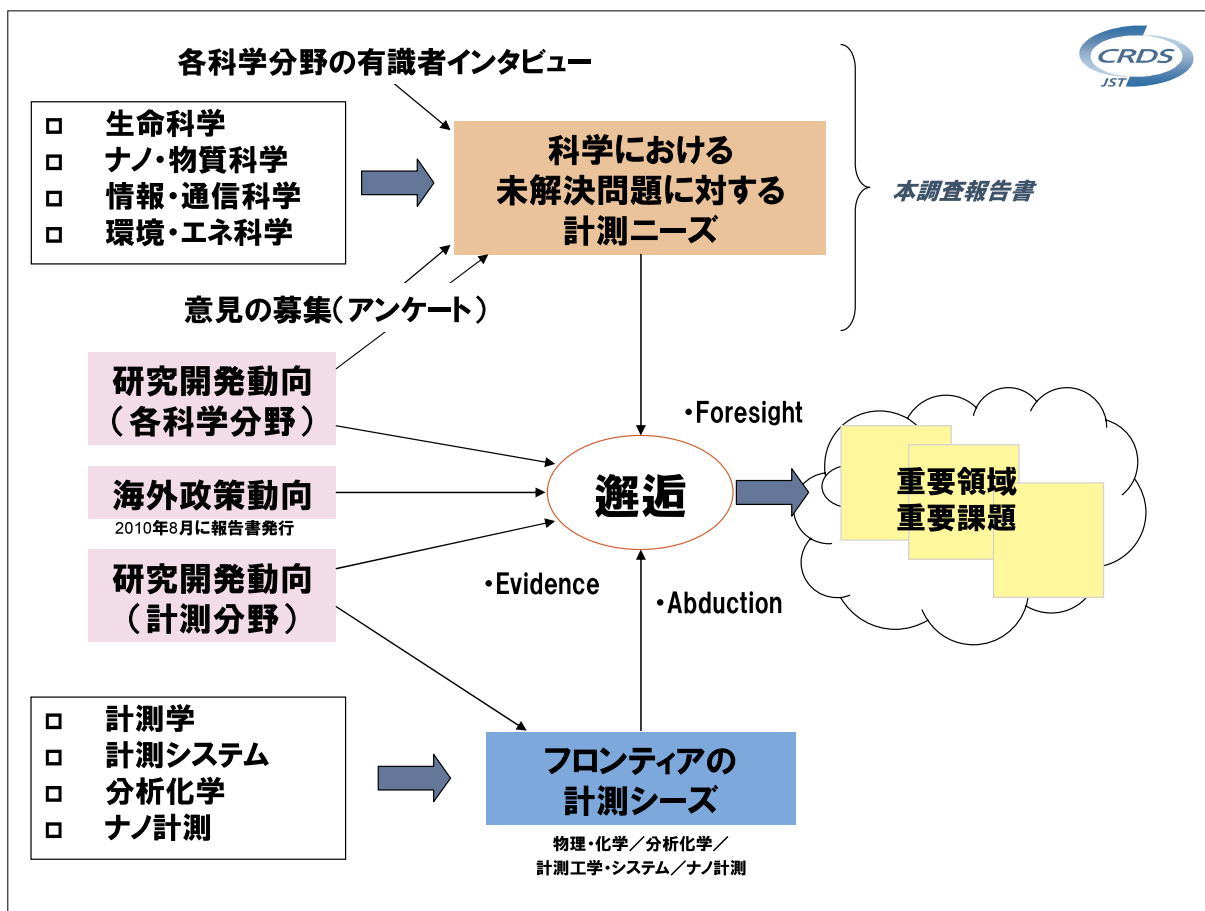


図1 科学の計測ニーズに応える計測技術課題の抽出プロセス（概要）

◆有識者インタビュー

各科学分野の有識者へ個別に訪問インタビューを実施し、研究内容と今後の課題等について意見を伺った（インタビューした有識者リストを 5. 1 章に示す）。その際、科学における未解決問題については、米サイエンス誌の記事を参考にした（米サイエンス誌が示す科学の未解決問題リストを 5. 4 章に示す）。これら人類共通の大きな科学の未解決問題を踏まえ、実際の研究現場における未解決問題を抽出することを意識した。インタビュー調査で用いた調査項目を表 2 に記す。

- ・ 調査期間：2010 年 6 月～9 月
- ・ 調査対象：①生命科学、②ナノ・物質科学、③情報・通信科学、④環境・エネルギー科学の各分野の有識者
- ・ 調査項目：表 2 に示す 4 項目。
- ・ 調査方法：現状の研究内容、今後の研究課題を広く意見交換

表 2 未解決問題に対する計測ニーズ調査項目

- | |
|--|
| <p>1) 専門分野における未解決問題
 (例：イオン分離の微視的メカニズムを明らかにしたい
 海水淡水化用逆浸透膜の塩透過率を 0.1%以下まで低減化したい)</p> <p>2) その問題解決に向けた、現状の計測・分析・解析の状況
 (例：新たな材料を試作しては、塩透過率を評価し、膜の表面を TEM によって分析)</p> <p>3) あったら良いと思う計測技術（計測ニーズ）
 (例：塩を分離している動的状態を直接観察したい)</p> <p>4) 計測技術開発に必要な研究者、技術者の協力（解決手段）
 (例：理論物理学者と分析化学者、光学専門家、数理科学者の分野融合)</p> |
|--|

◆アンケート調査

文献調査、インタビュー調査で得られた各分野の特徴、および計測ニーズについて、JST 事業に関与する研究者約 680 名に対するアンケートを実施、意見を求めた（アンケート調査の詳細結果を 5. 2 章に示す）。

- ・ 調査期間：2010 年 11 月 10 日～23 日
- ・ 調査対象：JST 事業（計測関連）に関与している研究者
 - CREST¹（55 名）
 - 「先進的統合センシング技術」（板生領域） 12 名
 - 「情報システムの超低消費電力化を目指した技術革新と統合化技術」（南谷領域） 14 名
 - 「生命現象の解明と応用に資する新しい計測・分析基盤技術」（柳田領域） 14 名
 - 「物質現象の解明と応用に資する新しい計測・分析基盤技術」（田中領域） 15 名
 - さきがけ²（72 名）
 - 「構造機能と計測分析」（寺部領域） 40 名
 - 「生命現象と計測分析」（森島領域） 32 名

¹ JST 戦略的創造研究推進事業（チーム型研究）

² JST 戦略的創造研究推進事業（個人型研究）

○先端計測事業³（約 550 名）

開発総括 9 名

開発チーム（終了分含む）のリーダー、サブリーダー、分担開発者 約 540 名

- ・ 調査項目：表 2 に示す調査項目のうち、1) と 3)
- ・ メール送付によるアンケート形式

◆ワークショップ

アンケート調査を踏まえた計測ニーズについて、広くコミュニティ間での情報共有をするため、科学者および政策立案者の参画による俯瞰ワークショップを開催した。ここでは、整理された計測ニーズの共有と計測技術の開発方策等について検討するとともに、我が国における政策的な課題についても議論を行った⁴。

- ・ 開催日：2010 年 12 月 1 日
- ・ 開催場所：CRDS 会議室
- ・ 参加者：①生命科学、②ナノ・物質科学、③情報・通信科学、④環境・エネルギー科学の各分野の有識者と計測分野のコメンテータ。オブザーバとして、上記アンケート回答者のうちの参加希望者。
- ・ 議題：インタビュー、アンケート調査から導出された計測ニーズ案について確認、共有化と、次のステップで、これらのニーズをどのように進めていくか、推進のあり方についても議論し、意見を抽出

³ JST 産学イノベーション加速事業【先端計測分析技術・機器開発】

⁴ ワークショップの詳細を 5.3 章に示す。

3. 調査結果

3. 1. 分野別の計測ニーズ

各分野における未解決問題、および、そこで必要となる計測ニーズを示す。また、インタビュー、アンケート、ワークショップで得られた各分野の「構造的な課題と方向性」、「計測ニーズのトレンド・キーワード」についても示す。

(1) 生命科学

生命科学は、ヒトの生命現象を分子、細胞、器官および個体などのレベルで解明する研究分野である（例えば、生体分子間の相互作用によってひとつ上の階層である細胞機能を説明する等）。様々な生命現象・機能の動作原理を詳細に理解するため、関与する物質の時空間的存在を測ること（存在計測）や、物質の関係性を測ること（関係計測）が重要とされる。他の科学技術分野に比べ未解決問題が多く、科学者の興味が集まっている。

近年、ゲノム解読装置や計算機の高速化により、生体内に存在する分子とそれらの関係性が明らかになりつつある（少なくとも遺伝子レベルでの解明は進んでいる）。現在、このような分子の状態をリアルタイムに、非侵襲的に可視化、定量化する計測ニーズが大きい。

◆未解決問題／計測ニーズリスト

この分野における未解決問題と、そこで必要となる計測ニーズを表3に示す。

表3 「生命」科学における未解決問題に対する計測ニーズ

科学における未解決問題	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。
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
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
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、タンパク質シーケンス技術

◆構造的な課題と方向性

対象とする多様な生命現象に作用する物質が全て同定されたわけではなく、また用語や概念の統一もなされておらず、他分野に比べれば未成熟な分野と言える。このような状況で、いかに生命の本質を計測技術によって明らかにしていくか、生命科学分野独自のアプローチを模索する時期にあると言える。

(実験・計測のトレーサビリティ)

生物は構成する物質（例えば遺伝情報など）が同じ個体はないため、標準モデルの構築が困難である。一方、実験手法や計測は標準化が可能であるが、生命科学の実験対象が「生もの」であるため、調整方法など個々の研究者で異なっている。逆に言えば、調整方法のノウハウも大きな価値を持つことが、共有化、標準化の妨げとなっている。一方、ゲノム解読装置のように機器メーカーが独占したことでデファクト標準化する例もある。

(リアルタイム計測、非侵襲計測)

現状、リアルタイムの計測、観察はほとんど出来ておらず、ある側面のみを観察しているに過ぎない。また、非侵襲での計測が理想だが、用いるプローブ等、計測行為自体の影響が無視できない。

(研究人材)

我が国の生命科学分野の研究者は、計測技術の開発を指向することが少なく、現存する計測機器で測定可能なものだけを利用している。また、要素技術を生み出しても、製品化・標準化の力は弱い。本分野では計測技術者に対する評価が低く、計測技術者を育成する視点も欠如している。

計測技術者の評価を高める工夫（例えば、論文以外の評価基準の策定）が必要である。また、「生物」、「情報」、「計測」の3つの分野に精通した人材の育成が急務である。計測技術者であっても電気、機械などエンジニアリングの知を活用するのみでなく、例えば細胞自体が持つ計測能力を積極的に活用するなど、多様な技術を取り入れることが求められている。

◆計測ニーズのトレンド・キーワード

表4 「生命」科学における計測ニーズのトレンド・キーワード

＜前処理＞ ・細胞分離・試料調製、標準化・標準物質 ・前処理自動化、効率（収率） ＜計測の総合性能＞ ・高感度化（極微量・単一細胞） ・定量性・ダイナミックレンジ ・網羅性 ・リアルタイム、時間・空間分解能 ・内部計測、非侵襲性（生きたまま） ＜後処理＞ ・データ解析・統合、知識発見 ・分布・相互作用
--

(2) ナノ・物質科学

ナノ・物質科学は、ナノメートル領域における物質の成長、加工、そして内部・表面・界面構造、そこで生ずる諸物性現象を、原子・分子レベルで観測し、理解し、制御し、それら諸要素を組み合わせることで応用することにより、あるいは他の知識・技術と組み合わせることによって新しい知と機能を創出しようとする学術的・技術的分野。ここで用いる計測は、物理計測と一体化している。また、あらゆる原理・物理現象を応用して、極限までの物質の存在・現象の解明を追及（存在計測）している。ナノ計測のニーズは、過去10年間、分析対象は変わっても「キャラクターゼーション」のままである。ただし、最近は複雑系・多成分系の対象が多くなり、「物性値での制御」から、「分析ベースの制御」へと移っている。

◆未解決問題／計測ニーズリスト

「ナノ・物質」科学における未解決問題と、そこで必要となる計測ニーズを表 5 に示す。

表 5 「ナノ・物質」科学における未解決問題に対する計測ニーズ

科学における未解決問題	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。 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	10 μm 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、靱性、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。

◆構造的な課題と方向性

(ユーザーとの共同研究開発)

様々な応用方面における“その場計測”のニーズが増大している。ユーザーと一緒に技術開発（情報の共有）が必要であり、ニーズとシーズのマッチング機会の創出が非常に大事となっている。

(トレーサビリティ)

より複雑系・多成分系の対象が多くなってきたこととも関係するが、論文にあっても実際には再現出来ない計測・分析が多くなってきている。また、計測・分析の専門人材が減り、人材育成も不十分なため、正しい分析データを採取するための前提である試料前処理技術や化学分析が消滅の危機にある。認証標準物質と標準計測・分析手法のセット開発など、より信頼性（標準化・再現性・トレーサビリティ）を高める方策が必要である。

(装置の高価格化)

手法の多様化、複合化などによって分析装置が複雑化し、企業における開発コストが増大している。結果的に装置は高価格化しており、市場主義経済の産業と、本分野研究開発の進展との構造的な問題が生じている。

(キーテクノロジー)

キーテクノロジーを海外に依存しているケース、あるいは依存せざるを得ないケースが増えてきている。また、ニッチな技術をコツコツとやる中小企業が減ってきている。現場では特許にも苦しんでおり、権利（大学、独法）を開放する仕組みも求められる。

(研究人材)

分析・解析の専門家が減り、また、分析を依頼する側のレベルも低下してきている。産業分野でも、分析センター等の分析コストを削減せざるを得ないため、専門家が減ってきていることが問題となっている。

◆計測ニーズのトレンド・キーワード

表6 「ナノ・物質」科学における計測ニーズのトレンド・キーワード

＜新たな材料創製・物質開発に向けたキャラクタリゼーション＞

- ・同一環境・その場計測：エネルギー・環境材料の開発
- ・高分解能（原子分解能）：物性のメカニズム解明
- ・多階層同時計測：物性と物質の組成・構造との因果関係解明
- ・多因子同時：寿命、劣化の因子抽出
- ・3次元化：主成分元素
- ・界面計測
- ・リアルタイム
- ・認証標準物質と標準分析・測定の設定

(3) 情報・通信科学

情報・通信科学は、通信、計算、制御などの情報処理の科学である。数学を含めた学問ツール、データマイニング、複雑系などの計算科学と融合し、人文・社会科学分野を含めた多面的展開を見せている。この分野では、単純なことは基本的に計測可能となっている。しかし、情報や要素などが爆発的に増えてきて、より「複雑」になったシステムをどのように計測するかが今後の課題である。

◆未解決問題／計測ニーズリスト

「情報・通信」科学における未解決問題と、そこで必要となる計測ニーズを表 7 に示す。

表 7 「情報・通信」科学における未解決問題に対する計測ニーズ

科学における未解決問題	計測ニーズ
量子コンピュータを実現したい	電子、光子、イオン、原子 等の量子状態（波動関数、密度行列）の精密、高速測定
爆弾など微量物質の情報を非破壊に検知検出したい	中赤外線、テラヘルツ領域の計測技術
老人や子供など弱者を見守りたい	ユビキタス・センサ・ネットワーク（体温、脈拍センサ、RF タグ、スマートメータなど）
生体信号情報から体内状態を推察したい	脳波、心電図、筋電図など総括して計測する技術
人工物が人間に与える影響を明らかにしたい	身の回りの電磁束の分布
道路、橋梁など建築物の寿命を計りたい	ユビキタス・センサ・ネットワーク（ファイバーセンサ、加速度センサ、運転ログ）
微小で複雑な回路の電流分布	数億オーダーの一括電圧計測、電流の可視化技術、LSI テスト
人間の活動を計りたい	センサネット、超小型化、超低電力化、超軽量化、超高感度、超高速化
社会、生物、文化遺産等の状態を計りたい	センサネット、超小型化、超低電力化、超軽量化、超高感度、超高速化

◆構造的な課題と方向性

現在の社会には、インターネットでつながった莫大な情報をもつ仮想空間があり、現実の物理空間と緊密に結合していく流れがある（サイバー・フィジカル・システムズ）。物理空間との接続には計測センサが重要で、特にセンサ・ネットワークの分野が期待されている。このセンサ・ネットワークは、社会における人間の行動など、非常に複雑なものにも科学の目が当てられる状況を生んでいる。また、現在、100 億個もの素子を持つ集積デバイスは、逆に性能や劣化のチェックやノイズの管理など複雑な問題が生まれてきている。さらに、無線通信や無線給電など、電磁波を用いる無線技術がこれまで以上に社会へ普及することが見込まれるが、EMI、EMC など、より高周波な電磁波障害の問題、そのシミュレーション予測、社会的な影響など、今後の課題が生じている。

◆計測ニーズのトレンド・キーワード

表8 「情報・通信」科学における計測ニーズのトレンド・キーワード

＜サイバー・フィジカル・システムズ＞

- ・センサ・ネットワーク、複雑系
- ・オンサイト、超小型化、超軽量化、超高速化、超低消費電力化
- ・リアルタイム、常時／間欠計測

＜超集積化システムの自己チェック＞

- ・ばらつき評価（ディペンダビリティ）
- ・ノイズ・コントロール

＜無線技術（電磁波）の社会リスク＞

- ・高空間分解能（超微細領域、大面積計測）
- ・動的観測

(4) 環境・エネルギー科学

環境・エネルギー分野は、①公害、地球環境問題などの課題解決、②その予防機能の向上、③諸現象に対する環境成分の規定に関する総合的な学問である。この分野の研究は問題解決が何よりも優先される点で、臨床医学と近い。問題解決のために、分野横断、融合的、かつホーリスティックな視点を必要とする。また、研究対象が空間的に大きく、また、その現象はゆっくりと変化し、未来予測までを扱うため、計測データと数値計算シミュレーションとの統合（シミュレーション連動）による理解が必要である。持続可能な社会を設計する研究の場合、設計しただけでは問題解決できないため、政策等の合意形成をサポートする部分まで踏み込んだ研究が必要。

◆未解決問題／計測ニーズリスト

「環境・エネルギー」科学における未解決問題と、そこで必要となる計測ニーズを表9に示す。

表9 「環境・エネ」科学における未解決問題に対する計測ニーズ

科学における未解決問題	計測ニーズ
未発見の「生物による有効成分」はどれ程あるか？	タンパク質を片っ端から機械的に分析できる技術（DNA シークエンサーのように）。
蓄エネデバイス（蓄電池等）の性能の限界はどこか？	in-situ でイオンの状態と流れ、変化を計測する技術。SPRING-8での計測ニーズは高くなっているが、プローブがないために用途が限られている。
材料の寿命を決める普遍的原理は開発できるか？	マイクロ・クラックの外観検査、破壊進行の理論・シミュレーション技術、蓄積型熱劣化センサ
地域における侵略的外来種は防除可能か？	DNA 情報を遠隔から判別する技術
地震、津波等の災害に対して野生動物は予知の仕組みを持っているか？	環境変化に対する人体の感受性を解明する技術（指標開発）。脳の活性化や、自然免疫指標との相関
胎児、子どもに対する環境リスクは、大人になった時に影響を及ぼすだろうか？	人間の状況（行動、表情、変化など）をモニタリングして周囲環境自体を定量化。体に取り付けて常時計測するユビキタス・センシング・ネットワークのような技術。小児の曝露した環境を定量評価（活動環境、行動パターン、肺換気量、食物摂取量、化学物質等）。
飲料水の汚染被害をなくすことができるか？	環境水における微量な微生物の存在、また増殖状況を遠隔から計測する
微気象の予測精度はどこまで向上出来るか？	小さくて自発電で遠隔から多機能の気象を観測できる計測システム
地下水の流れ・循環のメカニズムを可視化することは出来るか？	余分な肥料が地下水へ浸透するモデル構築とシミュレーション技術の開発。植物の施肥に対する変化の動的状態を直接観察したい。
膜がイオンを分離する微視的なメカニズムを知ることは出来るか？	逆浸透膜が塩を分離している動的状態を直接リアルタイムに観察する技術

地球環境問題に対する惑星限界（プラネタリー・バウンダリー）を科学的に指標化できるか？	生物種の絶滅の予兆を測る技術、地球規模の CO ₂ 濃度を測る技術、窒素濃度を測る技術など。都市のリアルタイム環境リスク管理技術
--	---

◆構造的な課題と方向性

地球環境問題など、現在の環境・エネルギー分野は、未来を予想することで我々が今何をしなければならないかを明らかにする必要がある問題を抱えている。

（予兆の計測）

現在、環境や人間活動に壊滅的な影響を与えるリスクを評価する研究として、「プラネタリー・バウンダリー」が議論されている⁵。気候変動や生物多様性問題などの各リスク境界に対して、実は分からないままに超えているかもしれないし、まだ大丈夫かも知れない。境界同士の相互作用もあるために、さらに複雑な問題となっている。この解明に 100 年も掛かるようでは、問題解決は出来ない。このような複雑系には臨界点が存在するが、この臨界点を超えると崩壊して取り返しがつかないことになる。この崩壊の予兆をシグナルとして捉えるための計測技術が必要である。

（生物多様性の計測）

生物多様性の測定について、現状は生態学者や現場の調査データをデータベースにして、多様性喪失を予測している。システムティックな計測は、これからの課題になる。

（エネルギー分野の計測）

「CO₂ 排出による気候変動問題」は「エネルギー枯渇問題」と表裏一体であり、「再生可能エネルギー」の導入や「スマート・グリッド」などで、計測ニーズが多数存在する。また、今後、エネルギー枯渇問題に対応するために利用される部材は、従来よりもはるかに長いスケールで非常に過酷な環境に晒される。したがって、超長期の信頼性、劣化、あるいはそれを材料に落とし込んだメカニズムの解析などの課題がある。

◆計測ニーズのトレンド・キーワード

表 10 「環境・エネルギー」科学における計測ニーズのトレンド・キーワード

＜地域分散、多様性の観測＞ ・オンサイト ・ネットワーク化、小型化、超低消費電力化、高空間分解能 ・遠隔・非接触計測 ＜未来予測、予兆、リスク管理＞ ・シミュレーション連動 ・リアルタイム

⁵ 2012 年のリオ+20 サミットに向けて、ノーベル賞受賞者がストックホルムでプラネタリー・バウンダリーを議論する予定（2011 年）。

3. 2. 計測ニーズの俯瞰

◆俯瞰図

4つの各科学分野における未解決問題／計測ニーズを俯瞰するため、図2に示す俯瞰の軸を設定した。縦軸には未解決問題の対象の大きさを取り、ボーア半径(0.5オングストローム)から地球円周(4万キロメートル)の範囲を含むようにした。また、横軸には未解決問題が対象とする現象の変化時間を取り、光の周期(1フェムト秒)からヒト寿命(約80年)を含むようにした。

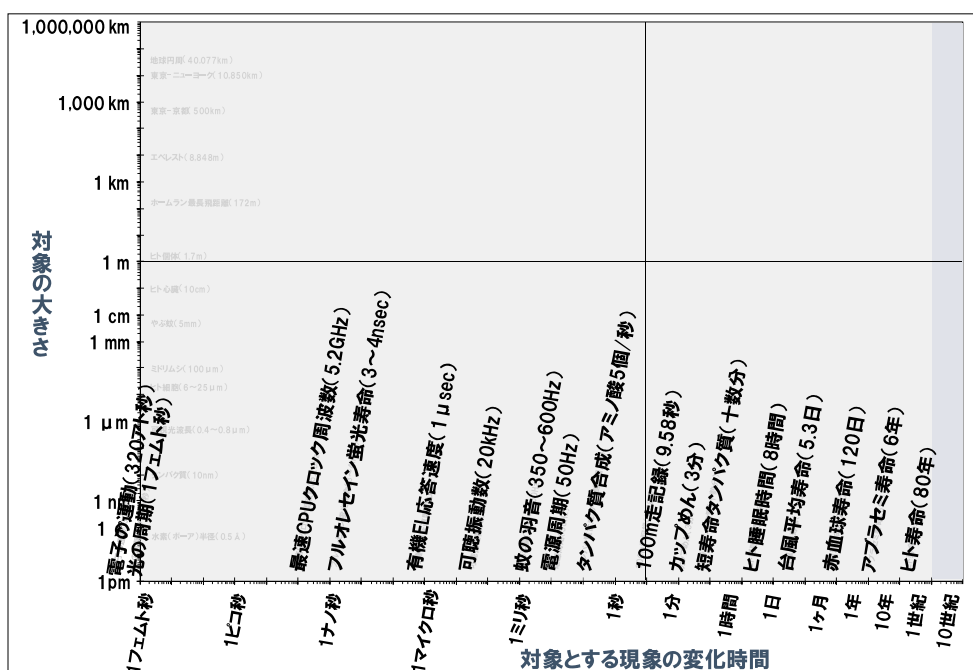
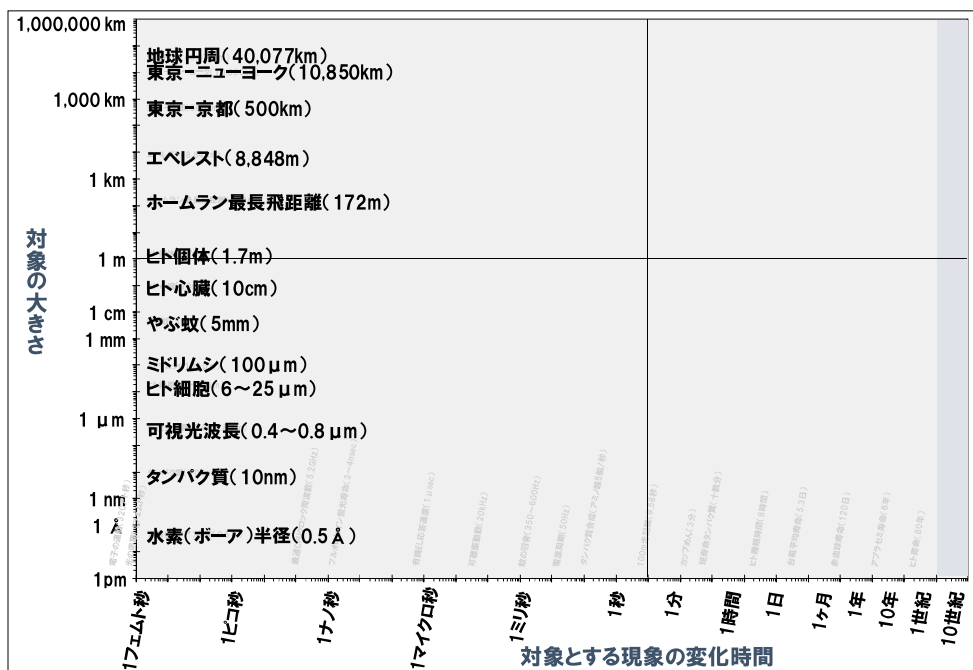
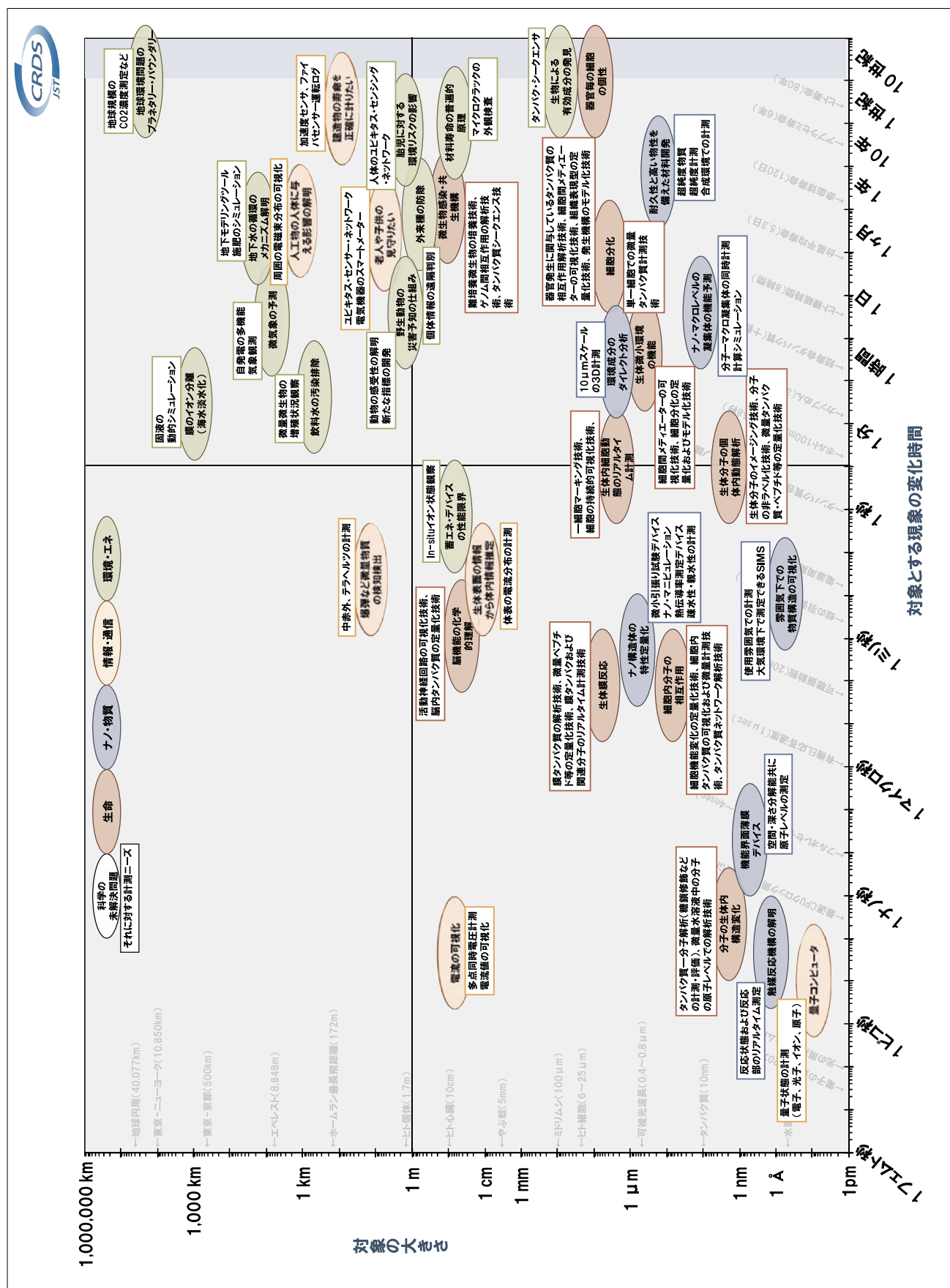


図2 科学の未解決問題に対する計測ニーズ俯瞰図の各軸



俯瞰図に各分野の未解決問題／計測ニーズをプロットしたものを図3に示す。「ナノ・物質」科学分野の未解決問題／計測ニーズは、他の分野よりも対象スケールが小さな課題が多いことが伺える。また、材料開発という応用を見据えれば、材料物性の高度化や材料の寿命・劣化など、問題とする現象の時間変化は静的、ゆっくりしたものが基本である。しかし、触媒反応機構の解明や化学反応の素過程など、超高速の計測ニーズも入ってきていることが伺える。また、「生命」科学分野の未解決問題／計測ニーズは、ナノ・物質科学分野の課題と同様、対象スケールが小さな課題が多い。ただし、生命現象という生きた動的な課題を扱っているため、対象とする現象の変化時間は多様である（光を感じるメカニズムなど短時間の現象から、生体組織の老化など長時間の現象まで）。また、この俯瞰図には含まれない「進化」のような課題もある。これらと比べて「環境・エネルギー」科学分野の未解決問題／計測ニーズは、対象スケールが大きく、現象の変化時間が長い課題が多い。変化時間の長い課題は、「未来予測」の期待が高まっている。さらに、「情報・通信」科学分野の未解決問題／計測ニーズは、「量子コンピュータ」という小さく短時間の課題から、社会的な現象（動物行動学や人工物の寿命など）における情報取得という広域で長期の課題まで、多様であった。

「科学における未解決問題に対する計測ニーズ俯瞰図」は、新たな科学の発見、進展を日本から生み出し続けていくため、計測技術の研究開発戦略を立案する上での基本的な情報であり、今後は下記の検討用途に活用していく。

- ① ニーズとシーズのマッピングによる邂逅の検討
- ② 密集部位など、重点領域を特定する検討
- ③ 抜け部位の課題探索の検討
- ④ 計測シーズの異分野への応用の検討

◆計測の水準（特徴）とトレンド・キーワード

表 11 に各科学分野における現在の計測の水準（特徴）と、計測ニーズのトレンド・キーワード（概要）をまとめる。

表 11 科学分野ごとの計測の水準（特徴）・トレンド（概要）

分野	水準（特徴）	トレンド
生命	ヒトの生命現象を分子、細胞、器官および個体などのレベルで解明する研究分野。未解決問題が多い。 物質の時空間的存在（存在計測）と、物質関係性（関係計測）から生命現象を理解。	内部計測、非侵襲（生きたまま）、リアルタイム、定量計測
ナノ・物質	ナノメートル領域における物質の成長、加工、そして内部・表面・界面構造、そこで生ずる諸物性現象を、原子・分子レベルで観測し、理解し、制御し、それら諸要素を組み合わせることで応用することにより、あるいは他の知識・技術と組み合わせることによって新しい知と機能を創出しようとする学術的・技術的領域。物理計測と一体化。あらゆる原理・物理現象を応用して、極限までの物質の存在・現象の解明を追及（存在計測）。	同一環境・その場計測、多階層同時計測、多因子同時計測、リアルタイム、原子分解能、3次元化、界面計測、認証標準物質と標準分析・測定の設定
情報・通信	通信・計算・制御の情報処理の科学。数学を含めた学問ツール、データマイニング、複雑系などの計算科学と融合し、人文・社会科学分野を含めた多面的展開を見せている。	複雑系、シミュレーション連動、小型簡便、ネットワーク、オンサイト、常時／間欠計測
環境・エネ	①公害、地球環境問題などの課題解決、②その予防機能の向上、③諸現象の環境の規定に関する総合的な学問。環境科学の課題は実用性を持つ。 対象とする空間が大きく、また、ゆっくりと変化する現象、未来の予測までを扱うため、計測データと数値計算シミュレーションとの統合（シミュレーション連動）によって理解。	オンサイト、ネットワーク化、小型化、低消費電力化、高空間分解能、遠隔・非接触計測、シミュレーション連動、リアルタイム

各科学分野で挙げられた計測ニーズのトレンド・キーワードを表 12 のように分類した。大きくは、人が自然（現象）を客観的に認識するプロセスにおける 1 次的（空間と時間という直感的能力）な補助をする機能・性能、2 次的（カテゴライズという知識処理能力）な補助をする機能・性能、そして、計測システム固有の問題に係る機能・性能の 3 つに分けた。

今後、計測技術の研究開発戦略を立案する上で、重要領域を括るキーワードとしての検討に活用する。

表 12 計測ニーズのトレンド・キーワードの分類（計測技術の開発チェックリスト）

大分類	中分類	トレンド・キーワード
1 次的認識	二次元（面的）	高空間分解能、遠隔・非接触計測、ネットワーク化、オンサイト
	三次元（空間的）	界面・内部計測、非浸襲計測、同一環境・その場計測
	四次元（時間・空間的）	リアルタイム、常時／間欠計測、高時間分解能
2 次的認識	情報処理	データ処理自動化、3次元化、未来予測、シミュレーション連動
	モデル化（カテゴライズ）	多階層同時計測、多因子同時計測、センサフュージョン、網羅性、ダイナミックレンジ、ノイズ処理
	比較（トレーサビリティ）	標準データベース、認証標準物質、標準化、前処理自動化
	前処理	高選択性、高効率化
機器固有	基本性能	高感度化、定量性、高信頼性
	経済性	低コスト化、ハイスループット化、微量化
	利便性	小型化、高速化、簡便化、軽量化、モバイル化、前処理自動化
	エネルギー	低消費電力化

◆研究推進の要点

（科学における計測のあり方）

- ・ 過去の日本の計測は技術にすぎなかったが、現在では計測とはサイエンスそのものだと考えるべき。
- ・ 計測検査機器は日本の産業の技術を支えている基盤となる技術である。これを国内で保持すべき。

（ニーズとシーズの邂逅の場づくり）

- ・ ニーズとシーズの関係で最も効果を発揮するのは「啐啄同時」、いわゆる三次元的な空間と時間的なタイミングがぴったり合ってこそ大きな成果を上げる。
- ・ 生命科学の分野でも、「生命の本質探求に係わる計測・分析の方法論を体系化することが必要。
- ・ 計測には、「メジャメント」と「キャラクターゼーション」の二つの側面がある。
- ・ 計測は「共有化」されなければいけない。共有化するためには、こういうものを測りたいという個々の思いを、「メジャランド（測るべき対象量）」にしっかり落とし込む必要がある。
- ・ 測定結果は相互比較できなければならない。誰が測っても同じ値が取れるよう、計測量の「トレーサビリティ」が必要であり、そのための環境を整備する必要がある。

（人材）

- ・ 日本の生命科学分野の研究者は、計測技術の開発を志向することが少なく、既存の計測機器で測定可能なものだけを利用する傾向が強い。本分野では計測技術者に対する

評価が低く、計測技術者を育成する視点も欠如している。「生物」、「情報」、「計測」の3つの分野に精通した人材の育成が急務である。

- ・ 日本のナノ・物質科学分野では、分析・解析の専門家が減り、また、分析を依頼する側のレベルも低下してきている。産業分野でも、分析センター等のコストを削減せざるを得ないため、計測の専門家が減ってきている。
- ・ 日本には、計測用の試料準備まで含めた計測の専門人材がいなくなっている。人材育成も不十分である。

4. まとめ

本調査では、「mother of science としての計測」にフォーカスし、まずは「科学における未解決問題」を掲げ、そこで必要となる「計測ニーズ」を俯瞰的に調査した。有識者インタビュー、アンケートによって意見を収集し、ワークショップの議論によってその内容を深く掘り下げた。その結果、各分野の課題リスト、計測の水準（特徴）とトレンド、全体の計測ニーズ俯瞰図を抽出することが出来た。

4. 1. 計測ニーズの特徴

今回の調査で得られた結果をもとに、現時点での科学における計測ニーズの特徴を挙げる。

(1) 計測ニーズの 60%が生命科学分野

大きな視点から見れば、「生命科学分野」の未解決問題・計測ニーズが最も多いことが分かった（約 6 割）。生命科学分野は、基本的な問題であっても未解決なことが多くあり、多くの資源投入を行うべきと考察できる。生命科学分野の研究者は、これまで計測技術を利用するのみの立場であったが、新たな計測をクリエートする視点が必要であろう。このため、「生命科学計測」（仮称；生命科学における計測）という分野を確立し、生命科学分野の研究を戦略的に推進していくための体系づくりが必要と考える。確立に当たっては、生命科学研究者と計測技術研究者のダイナミックな接近、連携協力が必要である。

(2) より複雑な現象解明へ取り組むための計測ニーズが多い

未解決問題の対象・現象は、より「複雑化」する方向へ進んでいる。例えば、生命科学分野における「物質の特別な状態から生命機能の発現に至る現象」、情報・通信科学における「情報爆発による新たな社会的リスクの推定」、環境・エネルギー科学における「地球レベルの気候変動による生命リスクの推定」などであり、これらは社会から科学に期待されている課題でもある。したがって、計測にも「新たな視点やチャレンジ」が求められている。また、これらの複雑化した問題を解明し、解決していくためには、一人の優れた研究者のみに頼ることでは不十分、あるいは間に合わない。多様な研究者が連携して解決に向かうことが必要となる。特に数学分野、物理分野の研究者の参加はポイントであろう。また、研究情報を共有するためのしっかりしたデータベースも構築する必要がある。

(3) 「四次元レンズ」という未来予測も含めた計測ニーズが含まれる

現在の科学は、未来を予想することで我々が今何をしなければならないかを明らかにする必要がある問題を抱えている。特に地球環境問題など、その社会的期待は顕著である。従来の科学は、真理を追究することによって、現象の背後にある（時間によって不変な）共通原理を見出そうとしてきた。これに対して、「新しい科学」においては原理原則を見出すのみでは無意味で、現状を知り、将来を予測し、対策する方法を見出すことまでが必要である。計測ニーズにも新しい状況、いわゆる将来を予測するという時間軸までが入った「四次元レンズ」の概念の確立が必要となる。

この概念の確立に向けて、計測機能をシミュレーションと連動させるなど、具体的に考えていくことが必要である。その一つは、「将来とは突然やってくるものではなく、過去の延長線上、今日の延長線上にある。だから予兆は必ずある。予兆の段階から観察し、そこに働いているいろいろな力を見て、結果的にどうなるかを見抜くのだ」（大前研一氏〔経営コンサルタント〕）の言葉のように、「予兆」という見えないものを可視化する方法論の確立である。もう一つは、「未来を予測する最も良い方法は、未来を創り出すことである」（デニス・ガボール氏〔ハンガリー物理学者・ノーベル物理学賞〕）の言葉のように、未知のリスクに対して「分析（Analysis）」するのではなく、「統合的計測（Synthetical measurement）」（積極的な負荷を掛けた際の反応を計測）のデータを元に理解していく方法論の確立が必要だろう。

また、四次元レンズの概念には、極短時間の計測、ダイナミックな変化の計測、リアルタイム計測など、時間変化を伴う計測技術のより一層の追及が求められる。

4. 2. 今後の進め方

今回の計測ニーズ俯瞰調査の結果を踏まえ、今後解決すべき課題を3つ列挙する。

(1) ニーズとシーズの邂逅

ニーズとシーズの邂逅プロセスは最大のポイントである。ニーズ主導で進めると、学問的な流れとかけ離れて出発してしまう。シーズ主導で進めると、出来ることから出発してしまう。図4のように邂逅に向けて必要とされる要素を考察する。

まず、計測ニーズについては、「メジャメント」（測りたい物理量は明確で、技術の機能・性能向上が目的）と「キャラクターゼーション」（どのような物理量を測ればよいか未明で、ある現象の理解が目的）の2つの目的は分離して考えることが必要である。また、その計測ニーズが充足されると、科学の未解決問題がどの程度まで解明されるかを体系的に整理される必要がある。さらに、計測技術を開発するに当たり、計測ニーズを測定可能な物理量（メジャランド）にしっかりと落とし込む作業が必要である。これらの各ステップは、ニーズ側、シーズ側のどちらか一方ではなく、両者が連携することで具体的な検討が進むことになる。この邂逅の作業を中心的にとりまとめるのが「中間的な研究者」である。そして、この作業を推進する邂逅の場を新たに構築することが求められる。

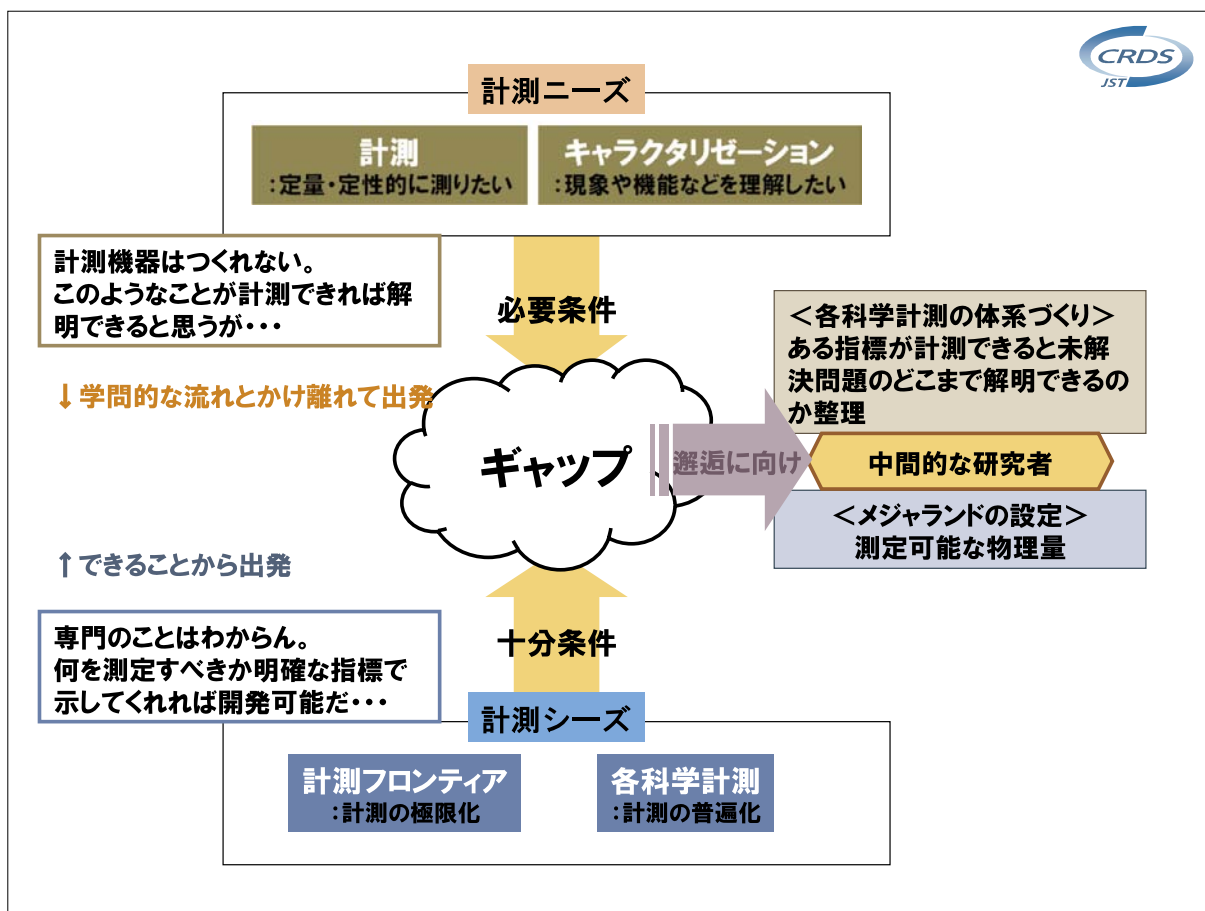


図4 計測ニーズと計測シーズの邂逅

(2) メタ計測学の構築

「中間的な研究者」に求められるもう一つのミッションは、メタ科学としての計測学（メタ計測学）の体系的な構築である。図5はその概念を示したものである。

この計測学は、工学での機械工学や電気工学、更に広く物理学、化学というディシプリンの平面的な区分けの中に置くのではなく、すべての領域に対して独自の関係をもつ一つのメタサイエンスと考えることである。物理学の理論と実験を代表とし、生体研究の状況設定と挙動観察、物性研究の創成と物性測定、化学研究の新化合物とキャラクタリゼーション、多くの工学研究における設計と機能測定などに現れる観察と測定、それらは物理学のように分業してはいないけれども、「仮説とその実証」という科学の基本的行為がそこにある。この基本的行為についての科学がメタ計測学であり、それが各領域の実際の計測を関係づけるという構造を、計測学が持つことが必要である。

現状は、この計測分野は研究領域としても未完成であり、研究者、開発者とともに、ファンディング機関を含み政策的にも考えてゆく必要がある。安易ではないが、計測が我が国の多くの研究分野の水準向上に必要不可欠であることからいって、そのミッションを果たすことが期待される。

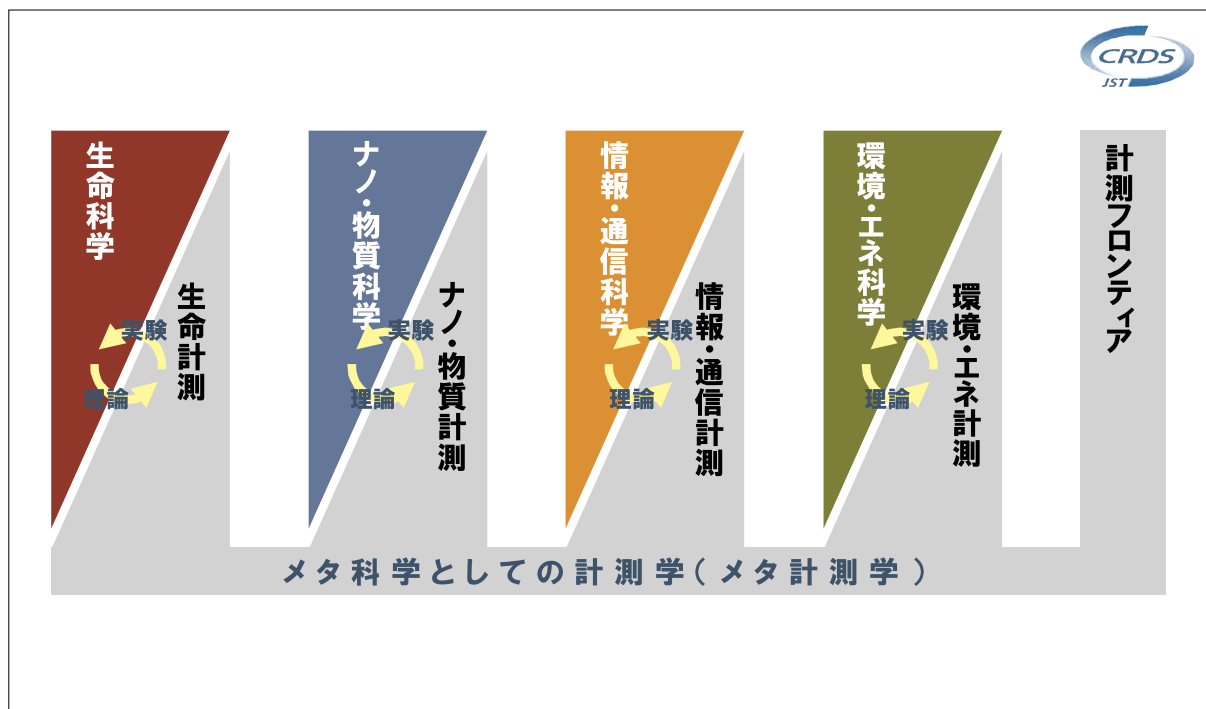


図5 メタ科学としての計測学（メタ計測学）

(3) 計測集団（仮称）の設置

ニーズとシーズの邂逅の場、メタ計測学の構築を推進する場として、我が国の計測技術に関する活動をネットワークで結ぶ仕組み⁶の構築が求められる⁷。米国(NIST⁸)のUS計測システム(USMS⁹)、EUの欧州計測標準研究協会(EURAMET¹⁰)のような仕組みである。

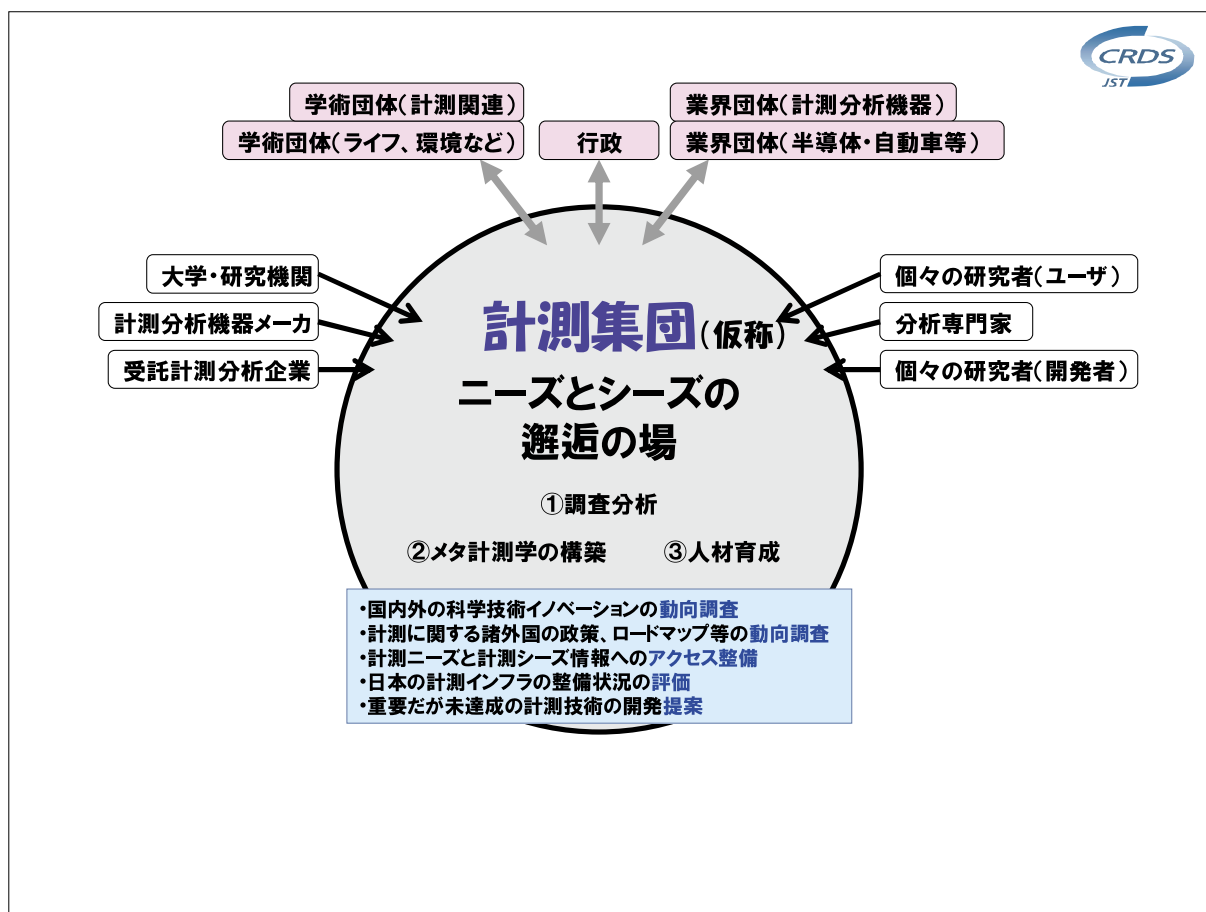


図6 計測集団（仮称）の概要

⁶ 調査報告「計測・分析技術に関する諸外国の研究開発政策動向」（平成22年8月発行）、科学技術振興機構／研究開発戦略センター（はじめに「新たなサイエンスを拓く計測技術の研究開発」CRDSセンター長 吉川弘之）<http://crds.jst.go.jp/output/pdf/10rr01.pdf>

⁷ 科学技術・学術審議会 先端計測分析技術・機器開発小委員会発行の「我が国の知的創造基盤の強化に向けて」（平成22年8月6日）の中で『知的創造プラットフォーム（仮称）』の構築が提言されている

⁸ 米国国立標準技術研究所（National Institute of Standards and Technology：NIST）

⁹ United States Measurement System：USMS

¹⁰ European Association of National Metrology Institutes：EURAMET

5. 調査の詳細、ワークショップ報告、他

5. 1. インタビュー調査

以下の有識者へ個別に訪問インタビューを実施し、研究内容、推進体制と課題等について意見を伺った。

<生命>

小安 重夫	慶應義塾大学 医学部 教授
菅野 純夫	東京大学 医科学研究所 教授
中西 真人	産業技術総合研究所 ジーンファンクション研究センター 研究グループ長
入来 篤史	理化学研究所 象徴概念発達研究チーム チーム長

<ナノ・物質>

筒井 哲雄	JST さきがけ 研究総括
川合 知二	大阪大学 教授
土佐 正弘	物質・材料研究機構 微少材料工学グループ グループリーダー
居城 邦治	北海道大学 電子科学研究所 教授
三沢 和彦	東京農工大学 物理システム工学専攻 教授

<情報・通信>

中野 義昭	東京大学 先端科学技術センター 所長
竹内 繁樹	大阪大学 産業科学研究所 招聘教授

<環境・エネ>

安井 至	製品評価技術基盤機構 理事長
大垣眞一郎	国立環境研究所 理事長

5. 2. アンケート調査

調査期間：2010年11月10日-23日

調査対象：JST事業（計測関連）に関与している研究者

◆CREST¹¹（55名）

「先進的統合センシング技術」（板生領域） 12名

「情報システムの超低消費電力化を目指した技術革新と統合化技術」（南谷領域） 14名

「生命現象の解明と応用に資する新しい計測・分析基盤技術」（柳田領域） 14名

「物質現象の解明と応用に資する新しい計測・分析基盤技術」（田中領域） 15名

◆さきがけ¹²（72名）

「構造機能と計測分析」（寺部領域） 40名

「生命現象と計測分析」（森島領域） 32名

◆先端計測事業¹³（約550名）

開発総括 9名

開発チーム（終了分含む）のリーダー、サブリーダー、分担開発者 約540名

回答： 35件

分野	件数
生命	20 (57%)
ナノ・物質	7 (20%)
情報・通信	2 (6%)
環境・エネ	6 (17%)

研究者	件数
◆CREST	4 (11%)
◆さきがけ	13 (37%)
◆先端計測	18 (51%)

※ 回答は、適宜、計測ニーズリストへ追加

※ 回答者には、ワークショップへのオブザーバ参加を案内（11名が参加）

¹¹ JST 戦略的創造研究推進事業（チーム型研究）

¹² JST 戦略的創造研究推進事業（個人型研究）

¹³ JST 産学イノベーション加速事業【先端計測分析技術・機器開発】

生命科学

NO	追加すべき未解決問題	対応する計測ニーズ	提案者（プロジェクト）
1	疾病器官の個々の細胞の特徴を明らかにしたい	単一細胞での微量タンパク質計測法の開発	先端計測「要素技術」
2	医療・生命科学におけるイメージング画像の多様化・多量化に対応した可塑性・適応性の高い画像分類システムを開発したい（生命分野）	医師に先立ち診断前に異常部位を抽出するプレ診断技術、農作物の外観品質および加工特性の画像化による選抜技術、リード化合物や毒物評価に関する細胞活性画像の客観的評価技術など	先端計測「要素技術」
3	細胞内で生体分子がどのように相互作用して機能しているかを計測したい	細胞内タンパク質構造の可視化技術	先端計測「機器開発」
4	創薬標的となる GPCR などの膜タンパク質の構造・機能解析、草本系／木質系バイオマス資源からのバイオリファイナー	タンパク質発現系、タンパク質一分子解析（糖鎖修飾などの計測・評価）	先端計測「機器開発」
5	再生医学用途（例えば細胞シート）の培養細胞系において、細胞間のジャンクション形成等、細胞系としての機能発現、あるいはがん化等の不具合を非侵襲的に知りたい。	一つの細胞内でのシグナル伝達だけでなく、細胞間のシグナル伝達解析技術	先端計測「機器開発」
6	細胞の表層と核の中など、細胞の異なる場所での生命活動を平行して観察し、その相互作用を解析したい。	細胞内の見たい場所を自由にズームイン、ズームアウトして観察できる技術	先端計測「機器開発」
7	「ヒトで脳機能を分子からシステムまですべてのレベルで可視化したい」	「光断層イメージング技術、非侵襲的蛍光プローブ開発技術」	先端計測「プロトタイプ実証・実用化」
8	「生理活性物質の変化を検出することで、生体内の微小病変を非侵襲・特異的に早期発見したい」	「生理活性物質、病態特異的マーカーのインビボ測定技術、微小信号の計測技術」	先端計測「プロトタイプ実証・実用化」
9	＜生命の起源と進化・生命の合成＞：自己複製し自律的に進化する分子系あるいは最小細胞を構築したい	実時間モニター付きマイクロフローリアクターアレイ	先端計測
10	＜生命の起源と進化・生命の合成＞：RNA とタンパク質の配列空間上の適応度地形を知りたい	突然変異体ライブラリの体系的作製装置と高スループットの物性測定装置	先端計測
11	＜細胞生物学の基盤＞：大腸菌細胞と酵母細胞の nm 分解能の 3D 解剖図を描きたい	新？電子顕微鏡、X 線レーザー顕微鏡？	先端計測
12	＜再生医学、がん＞：がんをもっと初期に診断したい	がん細胞特異的抗体またはアプタマー＋放射能標識分子＋コンプトンカメラ	先端計測
13	日常生活空間における様々な行動を行っている人間の脳機能計測	環境評価、商品開発、安全性評価など	CREST「先進的統合センシング技術」

14	微量ペプチドやタンパク質の SI トレーサブルな定量値が必要。生化学分野の論文に、横軸濃度、縦軸シグナルという図がほとんど出てこない。これは定量方法が十分でないからと考えられる。	微量タンパク質やペプチドの SI トレーサブルな定量方法	さきがけ「構造機能と計測分析」
15	生体膜反応の統一理論。生体膜反応に関しては、ほぼ未知の世界。各論は多く提案されているが、シンプルな統一した考え方がない。	生体膜反応の新規解析法	さきがけ「構造機能と計測分析」
16	ラベル化されずに、細胞内を解析する方法。生化学反応の大部が蛍光などラベル化されて解析されているが、ラベル化の影響は無視できない。	ラベル化をしない細胞内解析法の開発	さきがけ「構造機能と計測分析」
17	細胞中のガス分子の濃度測定：酸素、一酸化炭素、一酸化窒素	これらの 2 原子分子が情報伝達分子として生体中で働いている可能性が高いが、臓器内、細胞の外と内、等でどの程度存在しているのかわかると、それらがストレスの伝達体として働いているかどうかともわかると思う。2 原子分子センサー蛋白は最近幾つか見つかっていて、試験管中での機能は 解明されつつあるが、生理的にその働きをしているかどうかは、それらのガス分子濃度と関係する。特に脳に於ける一酸化炭素はかなり発生しているように思われるので、バイオリズム以外に soluble guanylate cyclase による cGMP 発生を通して機能している可能性がある。	さきがけ「生命現象と計測分析」
18	細胞動態の時空間制御	生体分子システム同定、制御技術、広域時空間計測	さきがけ「生命現象と計測分析」
19	細胞の機能や形態形成のしくみを支えている数多くのタンパク質や、タンパク質と核酸の複合体である生体超分子の立体構造と相互作用を、わずかな水溶液試料から原子レベルの解像度で解明したい	高分解能クライオ電子顕微鏡像の大量収集の自動化と高速化を実現するクライオ電子顕微鏡システムと単粒子像解析法の技術開発	さきがけ「生命現象と計測分析」
20	細胞の機能や形態形成のしくみを支えている数多くの生体超分子の立体的な細胞内局在と相互作用を、タンパク質のドメインの形が確認できる 1nm 程度の解像度で解明したい	凍結細胞切片のクライオ電子顕微鏡像によるトモグラフィー技術の自動化と高解像度化を実現する装置とソフトウェア	さきがけ「生命現象と計測分析」

ナノ・物質科学

NO	追加すべき未解決問題	対応する計測ニーズ	提案者（プロジェクト）
21	液体・固体中を移動する電荷（微小電流）を可視化したい。計測技術の発展に応じて（大）電池・LSI・光触媒・光合成・化学反応（小）まで種々のサイズの対象に計測需要がある。	微小電流によって発生する磁場を高感度かつ高い位置分解能で計測するハードウェア、および、計測結果をもとに（計測子から遠方にある）磁場発生源の形状を推定するソフトウェア	先端計測「機器開発」
22	有機素子の劣化の問題	難しくわかりません	CREST「物質現象の解明と応用に資する新しい計測・分析基盤技術」
23	材料内のナノ構造（ドーパントクラスター、界面非結晶質、生体内ナノ構造、・・・）の構造観察と機能	4D（3D空間＋時間（エネルギー））での機能計測	CREST「物質現象の解明と応用に資する新しい計測・分析基盤技術」
24	凝集体にそれぞれ固有の空間スケールとタイムスケールで潜在する物性を顕在化して機能化すること	凝集体に潜在する物性を種々の空間スケールとタイムスケールで探査する技術	CREST「物質現象の解明と応用に資する新しい計測・分析基盤技術」
25	「ナノ・物質」の「生体物質・・・ダイレクトに分析したい」	「3次元元素・状態イメージング技術の確立」	さががけ「構造機能と計測分析」
26	細胞中の全タンパク質混合物の網羅的高感度定量	超高性能質量分析計もしくは超高性能LC-MSの開発	さががけ「構造機能と計測分析」
27	「ソフトマター物理の分野」 (1) 原子より大きな単位を構造に持つ系の物理（メゾスコピック系の物理） (2) 非常に長い緩和時間を持つ系の物理（スローダイナミクス系の物理） (3) 柔らかで壊れやすい系の物理（非線形・非平衡系の物理） (4) これらメゾスコピック系からのボトムアップ的（自己組織化的）構造形成によって生成される、タンパク高次構造・生体膜・細胞など複雑力学系の直接物性計測	非接触、非破壊での諸物性計測（粘弾性、表面張力等）	先端計測「要素技術」

情報・通信科学

NO	追加すべき未解決問題	対応する計測ニーズ	提案者（プロジェクト）
28	「高度鑑識技術の確立による安全安心社会の実現」	「非破壊的に鑑識資料の内部を元素・状態解析することにより、犯人の特定につながる有力な情報を導く高度測定技術」	さががけ「構造機能と計測分析」
29	－	光コムの開発により、光周波数の精密計測技術、および、光コム自身を光源とした新しい分光法が開発されている。これらは、情報・通信と環境・エネルギーに関して先鋭的な計測技術となる。	先端計測「要素技術」

環境・エネルギー科学

NO	追加すべき未解決問題	対応する計測ニーズ	提案者（プロジェクト）
30	（環境）材料熱劣化の簡便なセンシング技術	計測が簡単な物性について、平衡状態値への緩和過程の活性化エネルギーを組成や前処理によって所定の値に設定できるような機能性材料の開発とその材料で構成する蓄積型熱劣化センサの開発	先端計測「機器開発」
31	高精度な大気環境の監視が必要	大気成分のリアルタイム3次元のモニタリングシステムの構築	先端計測「機器開発」
32	食品の安全性・品質の維持および安全な食糧の安定確保（貿易自由化や世界富裕人口の増加を見据えた課題）	輸出入品を含む全農水産物・加工食品等の安全性・品質を迅速簡便に計測できる全検査技術（網羅的計測法、非破壊計測法、オンサイトDNA解析法など）	さきがけ「構造機能と計測分析」
33	農地・養殖池等の新規開拓における合理的抑制（貿易自由化や世界富裕人口の増加を見据えた課題）	局所的自然破壊がグローバルな気候変動や環境汚染等に及ぼす効果を高い確度で定量的に計測および予測できる技術（指標物質・指標現象の探索、スパコンの利用など）	さきがけ「構造機能と計測分析」
34	「絶対に暴発しない原子力システムを実現したい」	1. 核物質、燃料棒をリアルタイム非破壊に精密分析できる超伝導放射線検出器をベースとした新しい原子力計測手法の開発 2. プルトニウム保障措置技術 3. 未解明の重元素核データの網羅的な解明を目指した革新的なγ線分光技術の開発。	さきがけ「構造機能と計測分析」
35	環境に飛散する可能性のあるナノファイバー、ナノ粒子の特異的計測技術	特異的プローブの作成、光電子相関顕微鏡の応用などで、特異的ナノファイバー、ナノ粒子の特異的計測技術を確立する。	先端計測「要素技術」

5. 3. 計測ニーズ俯瞰ワークショップ

【開催趣意書】

背景と目的

独立行政法人科学技術振興機構（JST）研究開発戦略センター（CRDS）は、科学技術に求められる社会的・経済的ニーズを踏まえて、国として重点的に推進すべき研究領域や課題を選定し、そのファンディング戦略を明確にするための活動を行っている。

今年度、計測技術に関する横断グループでは掲題に係る研究開発分野について、様々な計測ニーズを探るとともに、そのニーズを充足する研究開発のファンディング戦略の検討を行っている。具体的には、「計測は **mother of science**（計測があって科学の発展がある）」との観点から、「科学における未解決問題と、そこで必要とされる計測ニーズ」を俯瞰的に展望し、今後重要となる研究開発分野、領域、課題およびその推進方法等の抽出を試みようとしている¹⁴。

今回開催するワークショップでは、「生命」、「ナノ・物質」、「情報・通信」、「環境・エネ」の4つの科学分野における未解決問題は何か？、そこで必要とされる計測ニーズは何か？について、インタビュー・調査結果を踏まえ、さらに各分野の有識者と、計測分野の有識者が議論することによって俯瞰的に共通認識し、重要課題の抽出を検討するものである。さらに次のステップで、その計測ニーズを達成するための技術シーズの構成、必要な人員や研究推進体制、企画立案から実行にわたるシナリオ等について議論する予定である。

オーガナイザー

吉川 弘之 JST 研究開発戦略センター センター長

兼 同センター 計測技術に関する横断グループ 総括

モデレーター

佐藤 勝昭 JST 戦略的創造研究推進事業さきがけ

「革新的次世代デバイスを目指す材料とプロセス」 研究総括

兼 研究開発戦略センター 計測技術に関する横断グループ フェロー

期待するアウトプット

- (1) 「生命」、「ナノ・物質」、「情報・通信」、「環境・エネ」の4つの科学分野における未解決問題と、そこで必要とされる計測ニーズの俯瞰
- (2) 4つの科学分野における計測の水準（特徴）・トレンド
- (3) 今後重要となる計測技術の研究開発分野、課題の抽出

¹⁴ 調査報告「計測・分析技術に関する諸外国の研究開発政策動向」（平成22年8月発行）、科学技術振興機構 / 研究開発戦略センター（はじめに「新たなサイエンスを拓く計測技術の研究開発」CRDS センター長 吉川弘之）<http://crds.jst.go.jp/output/pdf/10rr01.pdf>

【プログラム】

- ◆**名称** 「科学における未解決問題に対する計測ニーズ」俯瞰ワークショップ
 ◆**主催** 独立行政法人科学技術振興機構（JST）研究開発戦略センター（CRDS）
 ◆**日時** 平成 22 年 12 月 1 日（水） 13：00 ～ 18：00
 ◆**場所** JST 研究開発戦略センター 2 階 中会議室
 （東京都千代田区二番町 3 番地 麹町スクエア）

◆プログラム

（敬称略）

オープニング

13：00 ～ 13：05	オーガナイザー 挨拶	吉川弘之（JST/CRDS）
13：05 ～ 13：20	モデレーター 趣旨説明	佐藤勝昭（JST/CRDS）

セッション 1 分野別の講演／討議

13：20 ～ 13：50	（生命）	伊藤隆司（東京大学）
13：50 ～ 14：20	（ナノ・物質）	田沼繁夫（物質・材料研究機構）
14：30 ～ 15：00	（情報・通信）	桜井貴康（東京大学）
15：00 ～ 15：30	（環境・エネ）	山形与志樹（国立環境研究所）

セッション 2 計測に関する横断的討議

15：30 ～ 16：30	総合討論 議題
---------------	------------

- ・科学における未解決問題に対する計測ニーズの俯瞰について
- ・各科学分野における計測の水準（特徴）・トレンドについて
- ・わが国における重要な研究開発（ポリシー）について
- ・その他

16：40 ～ 17：40	計測分野コメンテーターによるコメント	一村信吾（産業技術総合研究所） 二瓶好正（東京理科大学） 澤田嗣郎（JST） 岩槻正志（日本電子株式会社）
---------------	--------------------	--

クロージング

17：40 ～ 18：00	ワークショップ総括	吉川弘之（JST/CRDS）
---------------	-----------	----------------

※ワークショップ終了後 懇親会（会費制）

【参加者】

■オーガナイザー

(敬称略)

吉川 弘之 JST 研究開発戦略センター センター長

兼 同センター 計測技術に関する横断グループ 総括

■モデレーター

佐藤 勝昭 JST 戦略的創造研究推進事業さきがけ

「革新的次世代デバイスを目指す材料とプロセス」 研究総括

兼 研究開発戦略センター 計測技術に関する横断グループ フェロー

■科学分野プレゼンター

伊藤 隆司 東京大学 大学院 理学系研究科 教授 (生命)

田沼 繁夫 物質・材料研究機構 共用基盤部門 部門長 (ナノ物質)

桜井 貴康 東京大学 生産技術研究所 教授 (情報・通信)

山形 与志樹 国立環境研究所 地球環境研究センター 主席研究員 (環境・エネ)

■計測分野コメンテーター

二瓶 好正 東京理科大学 特別顧問、東京大学 名誉教授

一村 信吾 産業技術総合研究所 理事 兼 標準・計測分野 研究総括

澤田 嗣郎 JST 産学イノベーション加速事業 開発総括、東京大学 名誉教授

岩槻 正志 日本電子株式会社 取締役 兼 専務執行役員

■計測技術に関する横断グループ (主催者)

川口 哲 JST/CRDS ライフサイエンスユニット フェロー

永野 智己 JST/CRDS ナノテクノロジー・材料ユニット フェロー

金子 健司 JST/CRDS 電子情報通信ユニット フェロー

丸山 浩平 JST/CRDS 環境・エネルギーユニット フェロー

■オブザーバー (研究開発)

大野 雅史 東京大学大学院工学系研究科原子力国際専攻 助教

黒田 章夫 広島大学 大学院先端物質科学研究科 教授

辻 幸一 大阪市立大学大学院 工学研究科 化学生物系専攻 教授

並河 一道 東京理科大学 総合研究機構 教授

星 詳子 東京都精神医学総合研究所 脳機能解析研究チーム 研究ディレクター

大森 真二 ソニー(株)先端マテリアル研究所ライフサイエンス研究部 総括課長

渡邊 慎一 日本電子株式会社 取締役兼常務執行役員

杉沢 寿志 日本電子株式会社 経営戦略室 戦略企画グループ グループ長

古川 良知 京都電子工業株式会社 営業企画部 参事

コーラナ・マンディップ 日本ナショナルインスツルメンツ 事業開発本部 部長

福島 幹雄 株式会社ドルフィンシステム 代表取締役

笹生 拓児 株式会社ドルフィンシステム 取締役技術部長

■オブザーバー (行政)

能見 正 文部科学省 研究振興局 研究環境・産業連携課 新技術革新室 室長

植谷 達彦 文部科学省 研究振興局 研究環境・産業連携課 新技術革新室

科学技術・学術行政調査員

渡邊 賢一 文部科学省 研究振興局 研究環境・産業連携課 新技術革新室

科学技術・学術行政調査員

■オブザーバー（JST）

安藤 利夫	JST イノベーション推進本部	産学基礎基盤推進部	参事役（先端計測分析技術・機器開発担当）
安藤 元英	JST イノベーション推進本部	産学基礎基盤推進部	主任調査員
大澤 隆雄	JST イノベーション推進本部	産学基礎基盤推進部	主任調査員
石原 聡	JST/CRDS	ナノテクノロジー・材料ユニット	フェロー
伊藤 義曜	JST/CRDS	電子情報通信ユニット	主任調査員
鈴木 響子	JST/CRDS	ライフサイエンスユニット	フェロー
田中 一宜	JST/CRDS	ナノテクノロジー・材料ユニット	上席フェロー

【ワークショップ議論内容】

内容目次

(1) オープニング	37
【オーガナイザー挨拶： 吉川弘之 CRDS】	37
(2) セッション1：分野別の講演／討議	38
① 生命科学分野	38
【話題提供： 伊藤隆司 東京大学】	38
【質疑応答】	43
② ナノ・物質科学分野	45
【話題提供： 田沼繁夫 物質・材料研究機構】	45
【質疑応答】	54
③ 情報・通信科学分野	55
【話題提供： 桜井貴康 東京大学】	55
【質疑応答】	58
④ 環境・エネルギー科学分野	61
【話題提供： 山形与志樹 国立環境研究所】	61
【質疑応答】	69
(3) セッション2：計測に関する横断的討議	72
① 総合討論	72
【計測のトレンド】	72
【ポリシーについて】	76
② コメンテーター意見	83
【コメント： 一村信吾 産業技術総合研究所】	83
【コメント： 二瓶好正 東京理科大学】	89
【コメント： 澤田嗣郎 科学技術振興機構】	90
【コメント： 岩槻正志 日本電子株式会社】	91
(4) クロージング	94
【オーガナイザー総括： 吉川弘之 CRDS】	94

(1) オープニング

【オーガナイザー挨拶： 吉川弘之 CRDS】

CRDS では、現在の科学研究の水準と社会の要請との両者を前提として、必要であり且つ遂行可能な研究の課題を「戦略プロポーザル」として提案している。その中に計測を取り扱う「計測技術に関する横断グループ」があり、担当者が精力的に調査・検討を行っているが、計測技術についての提案作成にあたって、難しい悩みがあることが明らかになりつつある。それは、学問的に計測という分野が自立することと産業的に計測産業が盛んになることとの両方が、他の多くの分野を含む科学研究にとって極めて重要だと認識されながら、それが諸外国も含めてなかなかうまくいかないことと関係する。このグループでは、この問題を抽象的に議論するだけでなく、また研究や産業の部分的修正で済ませるのではなく、計測問題の基本に立ち返って検討し、本質的な提案に向けて検討中である。

計測問題の基本を考える中で、我々は一体どういうニーズとシーズがあるのか、そのニーズとシーズはどこで邂逅するのかを検討している。この邂逅をシーズ側のみでやってしまうと、できることから出発してしまう。ニーズ側を主流にすると、学問的な流れとかけ離れてしまう。従ってニーズとシーズの邂逅を実施する場合は、目的基礎研究における大きな課題であると言える。この議論は本日のメインテーマである。特に研究を進め、あるいは産業を進める主役はどこにいて、どういう形で協力し合っていくのか、それを実行できる体制や、国際的にも優れた集団をつくりたい。ぜひ実現できるようご議論をお願いする。

(2) セッション 1：分野別の講演／討議

① 生命科学分野

【話題提供：伊藤隆司 東京大学】

(生命科学における計測の特徴)

生命科学の分野では、計測対象とする物質の様態が多様である。例えば、タンパク質でピコ秒レベルの反応を測定する研究もあれば、生命の起源や進化といった長いタイムスケールのテーマも存在する。また、対象とする物質に関しても原子、分子に加え、それらの複合体、さらには複合体が集合した小器官、細胞、組織、器官など多層性もある。このような時間軸の長さの対象物質の多様性は生命科学研究の特徴一つといえる。

生命科学における計測の特徴

- 時間・空間スケールの多様性
 - － ピコ秒 ～ 10億年 ($10^{-12} \sim 10^{17}$ sec)
 - － 原子、分子、分子複合体、細胞内小器官、細胞、組織、臓器、系、個体、集団、生態系
- “モノ”と“コト”
 - － 生体分子～形態・行動
 - － コト:モノとモノの関係性・相互作用で説明したい
- 生きた状態と死んだ状態
 - － 非侵襲と破壊
 - － 動的と静的

また、計測における別の特徴としては、物質という「モノ」ではなく、それらの相互作用から生じる振る舞いや行動様式、すなわち「コト」を測るという特性が挙げられる。ただ、このコトというのも今の分子レベルでとらえていこうとする生物学から言うと、やはり「モノ」と「モノ」の関係性というところに下る。つまり「モノ」と「モノ」との関係によって「コト」の成り立ちを明らかにするのが現在の生命科学研究の方向性となっているのである。

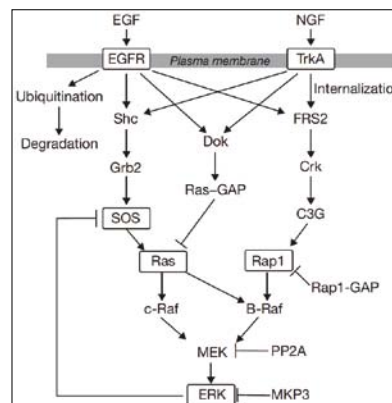
そして「モノ」や「コト」を測る上では、対象としている生物が「生きている状態であるか」という視点も重要である。これはこれまでの生命科学研究のほとんどが、生物の「死んだ状態」を計測してきたという歴史的な背景と深い関係がある。この意味で非侵襲的な計測技術が今後の研究開発において重要になると考えている。

(分子間の相互作用、関係性)

生物学における物事の理解の仕方というのは、生体を構成している分子間の相互作用あるいはその関係性というもので一つ上の階層の事象を説明するというのが基本的な考えである。

分子間の相互作用(関係性)で ひとつ上の階層の事象を説明する

- 構成要素の同定
- 相互作用の同定
 - 静的(定性的)
 - 動的(定量的)
- 設計原理の理解
- 制御とデザイン？



従って、初期にはこの一幕のドラマに登場する役者を全部見つけるということが重要で、その次がその役者の絡み合いとなる。ゲノム科学はまさに役者の同定を行う学問で、これはある機械をばらしたときのパーツのリスト化と同義と言える。

絡み合いに関しては、どのパーツとどのパーツがつながっているのか、またそれらがどの程度の関係性なのか、いわゆるインタラクションという概念が大事になる。

(定量的な生物学)

近年はこういったインタラクションの研究によって、電気回路でいう回路図らしきものは見えてきた。ただ重要なのはこの回路がどのように作動するかということである。つまり電子部品がつながっているのは分かったが、ここの抵抗が何オームであるとか、ここのコンデンサーのキャパシティが幾らであるとか、そのような特性との関連を明らかにする必要がある。

その理解のための第一歩としてはやはり定量という概念が重要になろう。ただ、定量的なデータを取ろうとすると、生物学では生き物を対象とするため、上手に扱える人と扱えない人が出てくる。よく「手のきれいな人」というが、この人が実験するとすごくきれいなデータが出るけれども、別の人がやると誤差が大きい。これは厳然とした事実である。

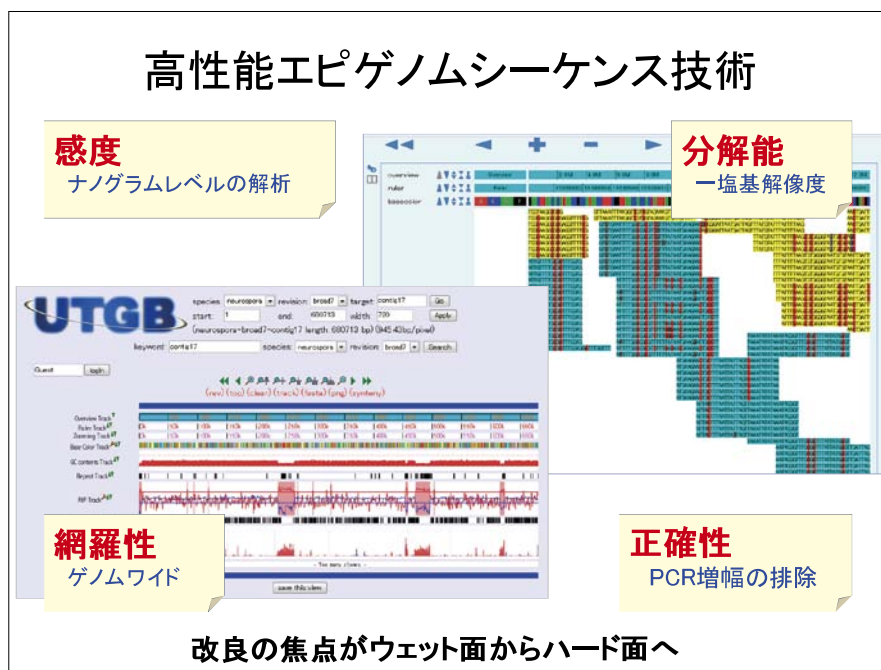
タンパク質間相互作用の定量

- タンパク質Xとタンパク質Yのうち、それぞれ何%が相互作用しているのか？
- 質量分析による定量
 - 試料調製
 - 上手と下手の問題
 - 標準物質
 - 多数のタンパク質を同時に正確に定量するには

また、様々なことを測ろうとすると、どうしても「標準物質」が必要になる。しかも今、我々が見たいのは生物を構成する因子の相互作用の全容、すなわち全体像である。こうなると非常に多量の物質を正確に測定することになり、膨大な標準物質の整備が必要になる。生命科学分野でこの標準という概念をどのように定着させ、その基盤や計測技術をいかに整備するかは、国の戦略として極めて重要になるだろう。

(進展する DNA 計測技術)

DNA の世界はこの数年で計測技術が非常に大きく進展した。特に注目すべきは次世代シーケンサの存在だろう。現在、この装置を使った研究としては、染色体を構成するDNAやヒストンの修飾に関する情報収集と解析が盛んである。エピゲノミクスと呼ばれるこの分野に関する研究開発は、今後国際的に様々な展開を見せるであろう。



実は DNA のメチル化の測定は以前から可能であった。大切なことはこのメチル化がゲノム上のどこに起こっているかということである。メチル化された塩基というモノがあるということを知るだけではだめで、ゲノム軸上のどこにあるのかという位置情報と関連づけて測れるようになって初めて生物学的な意義が出てくる。

私たちもこのような研究を精力的に進めており、現在では世界とも比肩しうるレベルで、高感度解析が可能となってきた。しかし、最後の最後にぶち当たったのがハード面である。すなわち高感度化し、ようやく作った 100 個の DNA 分子を機械に入れる。ところがそのうち解読されるは 1 個か 2 個で歩留りが悪い。そうすると非常に悲しい現実と直面する。それは機械の周辺機器が全て外国製品であるため、肝心の計測機器の中に手を突っ込むことができないという現実である。我々は装置にかける前の試料調整と解析後のデータの解釈というところでしか勝負できないのである。

このような外国製品の寡占化は、国内企業の技術開発力や装置の標準化戦略などに起因するが、実は生命科学、特に基礎生命科学の分野では（偏見かもしれないが）、計測も含めた技術開発そのものが正当に評価されていないという事と関係している。つまり、新しい計測装置やその要素技術を開発しても、測れるものだけをひたすら測り、著名なジャーナルに論文を掲載させた研究者の方が高い評価を受けているという例が少なからずある。よって我々が国内でシーケンサーのような先端技術を開発していくためには、技術開発者の評価のあり方を再考する必要があると考えている。

（人材育成）

生命科学の人材を育成するときに、この計測という視点があまりちゃんと伝えられていないところがある。しかも、今第一線に立っている研究者がこのようなメンタリティであると教育自体がなかなか変わってこない。東大では近年、生物情報科学科という新しい学科を創設した。ここでは生物学と情報科学、そして計測の三つがちゃんと分かる人材の育成を目指したいと考えている。



(まとめ)

今日の発表をまとめる。

- ・ 生命科学では前処理というところが大事になってきている。手のきれいな人に頼っている時代ではなく、ロボティクスを駆使した自動化が必要である。
- ・ 計測の標準化を進める必要がある。研究者がそれぞれ自分の流儀でやって、お互いにデータの互換性がないということが生命科学の分野では非常によく起こる。こういったところが標準化の前段として重要な課題である。
- ・ 絶対定量が必要になる。これは、標準物質の整備という問題とも深く関係する。生命は複雑なシステムである。よってやはり全体を見てみたい。計測のある一部分だけがピークとして立ってもだめで、全体の流れの中での感度とか定量性が必要になる。
- ・ リアルタイムイメージングの重要性（このための非侵襲技術のニーズ）の認識。細胞の核の中に DNA があり、その配列は分かっている。ところが、それがどのようにパッキングされているのか。更に立体的に言うと、どこにどの遺伝子が存在しているのか。物質状態とその経時的な変化の理解が今後ますます重要になる。
- ・ 情報統合技術の必要性。今後の生命科学ではいずれの分野でもデータ量は膨大になる。従ってそれらをインテグレートして、更に長い歴史の中で積み重ねられた生物学の知識と上手に統合していく必要がある。
- ・ 従来の延長ではない革新的な技術への期待。プロテオームとかメタボロームは質量分析である程度計測可能だが、まだまだ微量のものを測るには限界がある。まるっきり違う原理、例えば、タンパク質シーケンシングの次世代化などの開発も必要となろう。
- ・ 「コト」を測定する技術の高度化・高速化。「コト」の測定の代表的な技術として顕微鏡があるが、人がじっと見ていたのではスループットの向上は期待できない。こういった観察技術などにも自動化の概念が必要になってくる。この意味から画像解析やソフトウェアの開発も重要になるだろう。
- ・ 細胞の計測能の活用。我々は細胞あるいは生き物の状態を知りたいから計測をするの

であるが、細胞自身が自分の内部の状態をちゃんとモニターして、それで環境等に適応している。従って、いたずらに高度な技術に頼らなくても、生命科学の知識を上手に利用して適切なポイントを測ることで難しい現象を定量的に扱うことが可能になる場合もあるだろう。こういった視点も今後重要になるであろう。

【質疑応答】

(Q：質問、C：コメント、A：回答)

(標準化、標準物質)

Q： 生命科学分野における標準物質の整備状況およびそれを活用した解析手法の標準化について教えて欲しい。

A： 生命科学では何となくそれぞれの職人技とか俺の流儀みたいなところを尊ぶところがあって、標準化というのには抵抗が大きい部分があった。非常に皮肉なことに、例えばゲノムの世界の計測だと、あるメーカーの商品が世界を制覇してしまったがために、逆に計測手法としては統一化できたところがある。ただ次世代シーケンサになると、計測原理からして異なる機種が複数出廻っている。このため、もう一度混沌とした時代に入っている。

(非線形な振る舞いの計測)

Q： スナップショット的な計測技術の体系は理解できるが、一種の非線形効果的なものがどういうふうに生命現象の中の計測に入っていくのか教えて頂きたい。

A： まさに生命の生命たる所以は開放系であり非線形な部分があるところであり、我々はどうしてもそれを知りたい。ただ、そういったところに入っていくのは現実問題としては非常に難しい。よって、還元的にできるところから測ってきたというところがある。今日の話題提供にもあったように、「モノ」を測るということはかなり積み重ねてきた結果、だんだん「コト」をかなり精緻に測ることができるようになってきた。この先、非線形な振る舞いとか、感覚で捉えていたものをもう少ししっかりと捉えることができるようになるのではないかと考えている。

(非侵襲計測のレベル)

Q： 生きたまま非侵襲的に測りたいというニーズがあるのは理解できた。ただ、その場合プローブを入れること（光を当てること）も嫌がる科学者がいると思う。この点についてはどう思うか？

A： プローブを入れたときの効果を逆に計測することだろう。すなわちプローブを入れていない細胞とプローブを入れた細胞について、ありとあらゆるアイテムを測ってみて変化が起こっていないとするならば、プローブを入れたことによる攪乱は少なくともミニマイズされているだろうと考える。プローブを入れた影響を把握できることが大切だと思う。

(マクロな視点からの計測技術)

Q： 最近の生命科学というとにかく私たちの言葉では「小さいもの」が好きという。今後同時にマクロを、つまり分子のレベルから固体、システムレベルまで、それを一つの流れとして一つのモダリティで見られるような、例えば脳機能計測で使われている技術が必要になってくると考えるか？

A： 観察対象の階層で示したように、ゲノムをやっていた人たちはそこから出てきたい

ろいろな分子のインタラクションに重要性を感じている。また、それが積み重なることによって細胞の機能に繋がり、さらに細胞が集まって組織を作り、組織が集まって臓器を作り、幾つかの臓器が集まって神経なら神経系を作っていく。こうした積み重ねが形態や構造というマクロなものに繋がる。こうした表現型を網羅的に解析するフェノーム解析も盛んになっていて、そこでは当然マクロな視点からの計測技術が必要になり、顕微鏡や構造計測なども革新されつつある。今後の生命科学の進展には、それぞれの階層性の研究者がお互いに歩み寄るところが重要だと考えている。

(機器の改良)

Q： 当社は解析システムをなるべくオープンにしていこうということで、いろいろなメーカーに対してもその中のライブラリーなどをなるべくオープンにし、研究者にもその装置をメーカーが想定していない方法でも使えるように働きかけている。それでも改良が難しいというのは、何が問題だと考えるか？

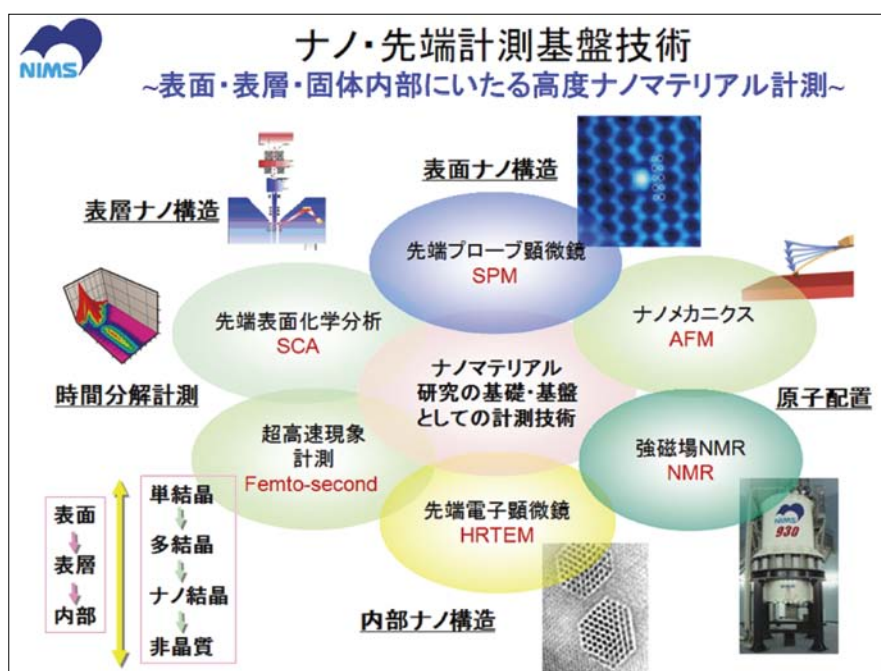
A： 私どもが今直面している問題は、ソフト的な部分ではなくて、純粋にハードの問題である。したがって、機械のこの部分をこういうふうに変えてくれないとか、いじってみたいとかいう要望を出す。しかし、外国製品の場合、日本の代理店では対応も出来ないし、責任も持てないという返事が帰ってくる。

② ナノ・物質科学分野

【話題提供： 田沼繁夫 物質・材料研究機構】

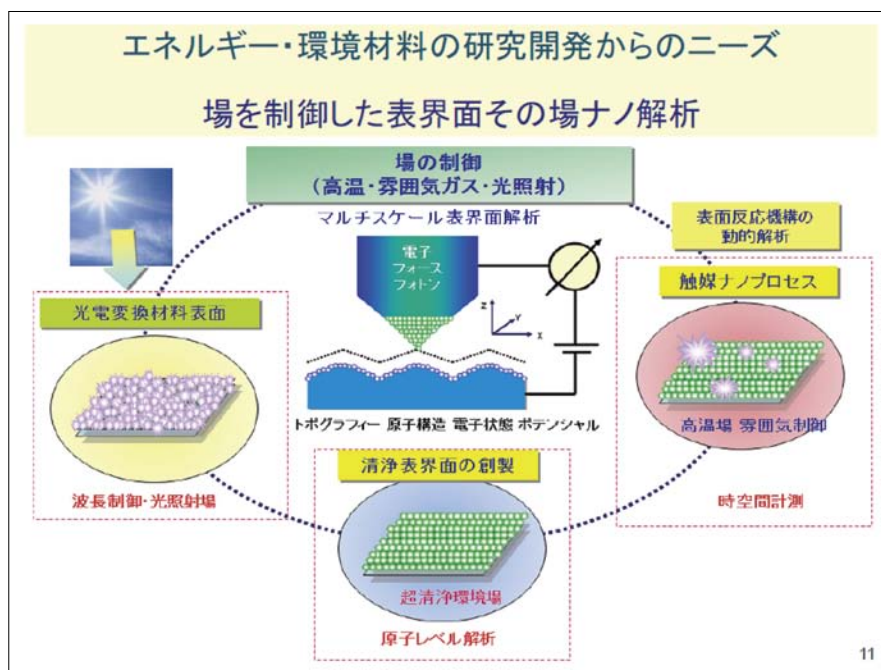
(ナノ計測の概要)

ナノ計測に関して広い観点から話す。NIMS ではナノ計測を、計算科学的な手法を使ってプランを立てた上で実施している。使用する測定装置群としては、ナノ計測センターの強磁場 NMR や量子ビームセンターの量子ビーム、走査プローブ顕微鏡 (SPM、AFM) を用いた表面ナノ構造の測定、表面化学的な手法による表層部分の分析、超高速現象を使った時間的計測、内部のナノ構造は先端電子顕微鏡、などを用いている。表面、表層、内部、単結晶から非晶質まで全てこうした方向で捉えている。



(環境・エネルギー用材料研究の計測ニーズ)

特に環境・エネルギー用途の材料研究における計測ニーズは、光変換触媒の波長を制御したり、光を照射しながらの分析、清浄表面を作りながらの測定、高温場や雰囲気制御して触媒がどのようになっているかを動的に解析したい、などのニーズがある。すなわち、「その場観察 (in-situ)」且つ「リアルタイム」で分析したいとの要請が多い。それに加えて、SPM では三次元が見えないために環境中物質に対する三次元分析のニーズがあり、共焦点 STEM で環境セルを用い、ナノ粒子に様々な処理を施しながら解析している。



- ・先進的なナノテク・材料におけるイノベーションには計算科学－先端計測－創製加工の連携によるPlan-Do-See型ポジティブフィードバックの構築が重要
- ・先進的な材料研究開発のニーズに応える先端計測技術が必要
- ・特にエネルギー・環境材料においては多様な環境場における“その場ナノスケール計測”へのニーズが大



**その効率的な実現のためには
ニーズとシーズのマッチングの機会創出
共同研究開発の機会創出**

(分析サービスから見た計測ニーズ)

分析・計測サービスの観点から見ると、超高压電頭、強磁場、データベース、共用ビーム (SPring-8)、分析支援の各ステーションを使い、世界最高水準の大型設備の共用と基盤技術開発を行っている。データベースや標準化も推進している。



（キャラクタリゼーション）

実際のニーズに対する分析は、この10年間で対象は変わってもキャラクタリゼーションという点ではあまり変わっていない。どちらかといえば少し前までは、物性値によって制御していたが、今の生産現場では多成分系から複雑系に近くなっており、分析値がなければ直感的な実験を制御できなくなっているといえる。したがって今、再び分析が重要になってきており、特に分析システムの設計が非常に大事になっている。また、現場の熟練技術者が不足しているということもある。10年前から最も変わったことは、コストと時間と信頼性であり、特にコストと時間の意識が高くなっている。

キャラクタリゼーションは、物性の示す性質の根拠を原子・分子レベルで明確化することや、因果関係、消耗の予測、主成分の分析、三次元分布、原子の結合様式、構造、電子状態、界面、表面状態、微量不純物の問題、物理的な不純物、欠陥、空孔、転位など、多くは20年前から変わっていない。

ユーザからの分析ニーズ

- この10年間でも変化は少ない

>> 対象のキャラクタリゼーション*

- 物性値による制御から “分析”ベースに戻っている？

- 多成分系、複雑系
- 分析システムの設計

(直感的には系を制御できない？ 熟練技術者の不足？)

- コスト、時間、>>信頼性

(開発・評価だけが残る、コスト削減から、“なんでも安い海外で”)

*** 物質の性質** ← F(原子・分子の化学種(組成)構造)

(標準化、標準試料)

最近、分析システムの設計をしてほしいという要請が多い。これは分析の専門家がいなくなってきたことに関係している。また、測定・解析・評価を行うときに標準化したものがないと非常にやりにくい。実際に現場でどのようなニーズがあるかを調べてみたが、例えば薄膜デバイスの分野では、空間分解能と深さ分解能が足りず、現状の Cs-STEM/EELS (電子レンズの球面収差補正による走査型透過電子顕微鏡／電子エネルギー損失分光法) や 3次元アトムプローブでも、将来は恐らく足りなくなるだろうと言われている。もう一つの観点は価格が高いことである。Cs-STEM/EELS は 4-5 億円もするために、これでは日本の産業は海外に出ていってしまう、ということが言われている。3次元アトムプローブも非常に高価で、産業的な普及は非常に難しい状況にある。

分析システムの設計（分析専門家の不在！）**1) 目的の把握と明確化**

: 目標と到達度の予測

2) 全体のアウトラインの作成

: 評価基準を明確にする

3) 測定法、解析法の選択

既存の方法の組み合わせ、改良、装置の開発

-> 標準化

4) 測定法、解析法、分析システムの評価

-> 標準化, 標準試料の有無

5) 実際の運用

改善->フィードバック

(薄膜界面の分析ニーズ)

5～8層の合金酸化物の多層膜の例を挙げる。1層が大体サブナノ～5nmくらいであるが、3次元アトムプローブとCs-STEM/EELSで分析しても結果が一致しない。TEMでは構造が分かるものの、軽元素の濃度が低いので分布の評価ができない。そこで高傾斜法で分析してTEMを行っている。このようなサンプルがかなり多く、半導体系でも非常に多い。例えば5nm以下で元素の分布を知りたいという希望が多い。素材メーカーからのニーズでは、鉄鋼の脱リン過程の省略を目指していることから、微量のリン濃度の評価をしたいということもある。偏析したリンの破断面をオージェ電子分光法で測定しているが、断面方向から測定することができないか。現状の数十ppmからppmレベルにできないか。いずれもできそうでできていない。

具体的な分析・計測ニーズ及び問題点 1**・ 薄膜デバイス分野**

-薄膜界面で機能性を持たせるような新素材開発、素子サイズは数nmになると予想

-将来必要なのは、空間分解能、深さ分解能ともに原子レベルの分析手法。現状のCs-STEM/EELSや3DAPでも足りない

- 装置の価格(購入可能な価格に)、分析コストの低減

例 Cs-TEM/EELS, 3DAPは効果で購入不可能。

(国内で、ものづくりをするためには、海外で作るよりも品質がよく、低コストである必要。)

具体的な分析・計測ニーズ及び問題点 1(2)

- ・ 現状における分析の問題点- 磁性薄膜
 - 軽元素の拡散をナノレベルで知りたい
5-8層の合金、酸化物の多層膜 (0.5 - 5 nm)
- :3D-APとCs-TEM/EELSの結果が一致しない(TEMでは構造は観察できるが、軽元素[濃度が低い]の分布が評価できない)
- >> AES-DP (高傾斜法)の結果がTEMを説明
:ただし、時間がかかりすぎる。分析領域が広すぎる。
- * * 同様な nmレベルの薄膜分析の要望は多い
ex. Si-O-N /Si界面分析, Hf-O-Al-Si -etc 5nm以下での分布

(生産プロセス時の計測ニーズ)

プロセスコントロールの観点から言うと、多元系における微量元素が本当はどうなっているかを分析的に捉えた例がなく、これを高速に捉える方法を開発してほしいというニーズが多い。同じ素材メーカーでも、機能性材料をやっているところではメッキの評価がある。表面がデコボコで 1nm レベルのメッキがついていて、デコボコの状態を評価してほしいというニーズである。他には、合金のサブミクロン以下の領域での組成を定量したい、化学分析では足りず、EPMA (電子線マイクロアナライザ) で相関法を使ってもサブミクロンがギリギリで、もう一桁下となると測定することができない。オージェ電子分光でも現状では定量は難しいと言われており、今、正確な定量が求められている。他にも、触媒反応における活性金属と担体の位置関係がすごく大事であるということが分かってきており、これを表面だけでなく内部も実際に測りたい。無機分析では製造工程中の金属の状態を知りたい。高速簡便な微量分析法がほしい。原理的にはイオン交換分離・ICP-MS (誘導結合プラズマ質量分析装置) で出来るが、分析機能は低下しているために難しい。分析時間が数日かかるために無理があり、現状ではそれに代わるレーザーアブレーション ICP-MS が有望だろう。しかし、まともなレーザーアブレーション装置がないため、是非開発してほしいというニーズがある。

具体的なニーズ及び問題点 3

- 素材メーカー
 - 機能性材料の表面処理(メッキ: 1nmレベル)評価
形状が複雑(凸凹)、高速化
 - 合金のサブミクロン(以下)領域における組成定量
化学分析不可、EPMA-相関図法->高速化と高空間分解能化
 - 触媒の反応部位の解析
活性金属と担体の位置的関係を明確にしたい
(活性金属の含有量を測ってもそれが、触媒能力に直結しない)
- * 無機分析法にける問題点
 - : 製造過程溶液中にある金属の状態(価数、錯体)分析
 - : 高速簡便な極微量分析法
イオン交換分離-ICP-MSは分析者技能低下、分析時間から不可。
 - > レーザーアブレーション ICPS-MSが有望。ただし、まともなLA装置がない
 - > 固相抽出法(分子認識ゲル)が有望

(測定装置ごとの計測ニーズ)

測定装置(透過型電子顕微鏡)については、試料にダメージを与えてしまう問題がある。より実態に近い状態での反応観察がしたい。電池の関係では、軽元素、特にリチウムが見たい。高速で動的観察をしたいというニーズがある。

分子分光では、100nm以下の微小領域の化学状態を知りたい。現状では試料バイアス法を使うとCMAタイプ(円筒鏡型)のオージェ電子分光で対応できるが、信頼性が足りない。もう一つは、10万倍や100万倍でオージェ電子分光の深さ方向分析をしたい。FIB(集束イオンビーム)が使えない材料でも、現状ではこれしかないのでは何とかしてほしいという。装置メーカーには何とか出来ると言うが、実際にやってみると、多元素の面分析はできない。サブミクロンXPS(X線光電子分光)による化学状態分析ニーズも非常に多い。幾つか方法は考えられものの、放射光では試料的制約が多いので何とかしてほしいという。

有機材料では1 μm 以下の高空間分解能の質量分析が求められている。また、触媒の反応中のリアルタイム計測をXPSで測定したいというニーズがある。

測定装置からのニーズ及び問題点 1

TEM関連

- 1) 試料ダメージレス特にソフトマテリアルに対して
より低加速でかつ高分解能が求められる。
- 2) より実環境に近い状態での反応過程観察
現在環境TEM(ガス雰囲気)が市販され始め、技術開発が進んでいる。今後は液体中(でかつ電気化学反応)の高分解能観察が求められる。
- 3) 軽元素の可視化と同定(Li)
Li以下の軽元素の観察は最近報告されるようになったが定量性や元素同定には至っていない。良い方法はまだ提案されていない。
- 4) 高速観察化
一般の動的観察はビデオレート。最近USAではダイナミックTEMの開発が進んでいる。国内では高速カメラの研究が進んでいるよう。
- 5) 生体試料の無染色・高コントラスト化

測定装置からのニーズ及び問題点 4

◆ 有機材料、生体材料の<1μmの高空間分解能質量分析

－ 問題点

・ MALDIの場合

- － レーザーを集束すると試料が壊れてしまう。実効的な空間分解能は約30μm。
- － マトリクスを使用するため、視野内のすべての物には適用できない。例えば、脂肪酸が複数存在する場合、1つの脂肪酸しか計測できない。

・ TOF-SIMSの場合

- － BiクラスターイオンやC₆₀は容易に1μm以下の空間分解能が得られるが、フラグメント化のため高質量数ピークの感度が著しく低い。
- － Arクラスターが注目されているが、ビームが絞れないことと、質量分解能が低い。

－ 解決策

- ・ イメージング可能な質量分析器の開発
- ・ Arクラスターパルスイオン銃開発

測定装置からのニーズ及び問題点 6

- ◆ 触媒等の反応中のリアルタイム測定(本当のIn-situ)
 - 現状
 - ・ 加熱冷却やガスの吹きつけ程度なら、現状装置でも可能。
 - ・ 酸化還元反応のように圧力が高い場合は、別途試料予備室を設け、処理後の試料を真空を破ることなく分析室へ搬送できるようにする(研究室設置の装置なら可能)。
 - ・ グローブBoxでの処理が可能な場合、トランスファーベッセルにより試料を空気に触れることなく分析室へ導入できる。
 - 問題点
 - ・ いずれの場合も、反応中の状態をリアルタイムに測定できない。
 - 解決策
 - ・ 例えば、Ambient XPS。硬X線電子分光と組み合わせれば、大気での測定も可能?。

(トレーサビリティ)

その他の問題点としては、信頼性とトレーサビリティである。確かに論文ではできていても、実際には再現できない計算・分析が非常に多い。是非、認証標準物質と分析手法のセットがほしい。また、あるようでないのが分析解析用のデータベースとシミュレータである。

その他 課題と問題点 1

- ・ 信頼性(標準化)の向上・推進
 - 再現性、トレーサビリティ
 - (論文では出来るが、実際には出来ない計測・分析が多い)
 - “何が本当に、実用的の出来るのか”が不明
 - 認証標準試料と分析手法のセット
 - (産業界では試験所認定と認証標準物質か?)
 - :分析・解析用データベース、シミュレータの整備
 - nm分解能の広域高速3次元分析(1mm², 深さ 10μm) + 時間変化
 - 低エネルギー電子のDBの充実 (1 - 50eV): PES, EPES
 - 複合的分析データの解析法
- 依然として残されている問題
 - 実用的で有効なチャージアップ補正,(AES, XPS) 特にDP
 - ビーム損傷の評価と回避

その他 課題と問題点 2

・ その他

: 試料前処理技術, 化学分析 (基盤的分析の消滅・危機)

: 分析、解析の専門家の不在、分析依頼者のレベル低下

: 計測・分析から問題解決型へ (システム構築)

- コスト (費用、時間) 分析手法の多様化、複合化、装置の高価格化 (Cs-TEM, 3D-AP etc)

- ユーザーと一緒に技術開発が必要 (情報の共有)

(分業化の過度の進行。情報の取得と使用が分かれてしまった。)

その後、海外移転比率の増大、高コスト分析部門の消滅。

新たな手法の創出: サービスサイエンス; ハードとソフトの融合)

: 特許の開放 (大学、独法)

(前処理技術等の分析基盤)

その他、化学分析を含めて前処理技術が日本から無くなりつつあり、基盤的分析が消滅しつつある。分析の専門家が不足し、分析依頼者のレベルも低下していると言わざるをえない。システム構築においては計測・分析から問題解決型になっているが、コストが問題である。特に分析手法が多様化・複合化しているため、装置自体も高価で時間もかかり、高コストになってしまう。コストがかかると、研究の一部は残ったとしても海外分業が進み、高コストな分析部門がなくなりつつある。新たな分析サービスを考えるとすれば、新しい概念でハードとソフトが融合したシステム・パラダイムをつくることであろう。現場では特許侵害にも苦しんでおり、特許を開放する仕組みも求められる。

【質疑応答】

(Q : 質問、C : コメント、A : 回答)

(単能機と複合機)

Q : 分析する上で、一つの手法しか適用できないが極限性能を持っているような「単能機」装置と、一つの装置の中に複数の計測手法や性能を装着している「複合機」では、どちらの分析ニーズのほうが高いのか。複合機は個々の性能としては十分ではないがマルチに同時に分析できるというメリットがある。現時点でナノ物質に関する評価、解析ニーズは既に単能機のレベルでも追いつかず、複数の単能機からのデータを解析するが、場合によっては見ている場所が違っているかもしれない。一方、程々の性能を持つ複合機で測定して相関を取るほうが現実の問題に近い。現在はどちらがニーズは高いか。

A : 現状は単能機。しかし、複合機は見直されている流れにある。雰囲気制御が求められているため、雰囲気から出すことの恐さが分かってきた。複合機の重要性は増していくと考えられる。しかし、高価格であることが複合機のネック。

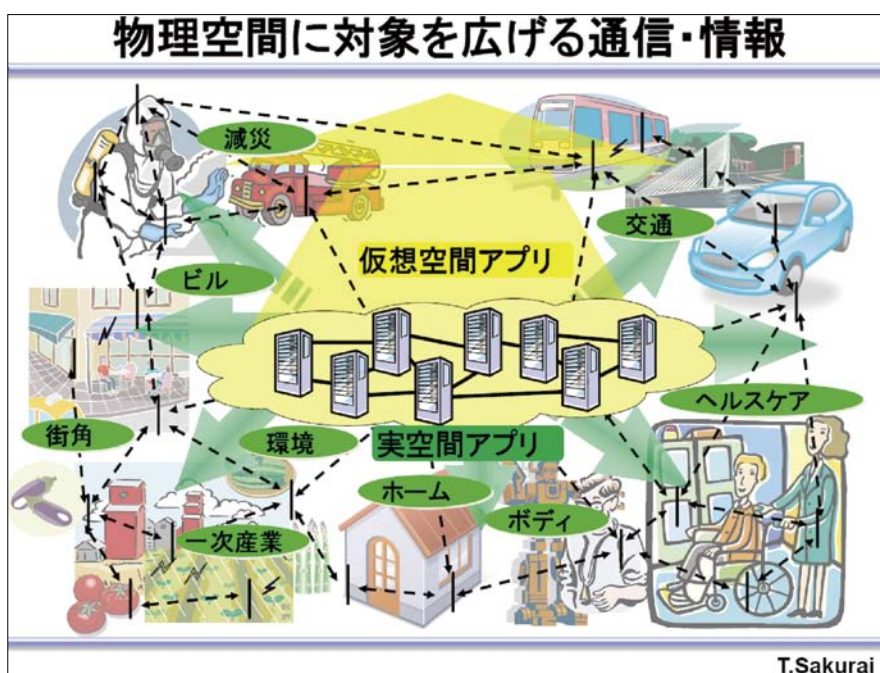
③ 情報・通信科学分野

【話題提供： 桜井貴康 東京大学】

情報・通信分野の計測ニーズについて、「複雑系」、「集積システム」、「電磁波」をキーワードについて話題提供する。

<複雑系（物理空間）>

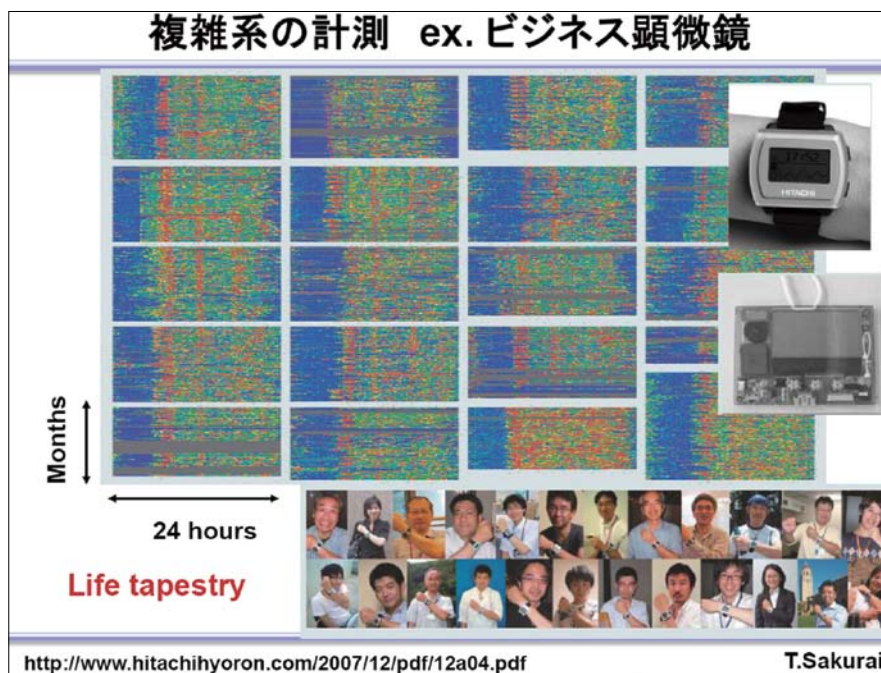
現在、情報・通信分野は、中心が IT で成り立っている仮想空間というものがあり、益々クラウドの方向に進歩している。この IT をより物理空間に適用していくことが現在の方向であろう。物理空間との接続には計測センサーが重要で、特にセンサーネットの分野が期待されている。このシステムによって、社会をどう計測するか、社会ニーズを解いていくかが重要である。このセンサーネットは、より複雑なものが対象となってきている。



(ビジネス顕微鏡)

日立が開発している「ビジネス顕微鏡」というシステムがある。人間行動科学を基礎にして多少ビジネスが始まっている。職場の部員に対し、センサーを1週間ぐらい首にかけてもらう。そうすると誰がどれくらい長く話したか、誰と誰がどういう関係にあるか、どの程度活発に動いているかなど、時系列に計測することが可能となる。結果として組織がいかに知的に活性化しているか、問題点が明確になる。例えば、人の集中時間は平均3分41秒であるとのこと。現在は加速度、温度、赤外線センサーで行動を測る程度だが、高感度、軽量、低電力、小型化、フレキシブル化などが求められる。これが実現すれば、人間の行動という非常に「複雑な」ものに科学の目が当てられ、そもそも何が幸せなのか、何が効率的なのかということの解析が進むと期待される。

腕時計型センサーもある。24時間装着可能なため、人がどういう行動様式で、行動上で何がどういうときに効率が良く生産性が上がるか等がわかってくる。



(生物多様性調査のための各種センサー)

生物多様性が問題として言われている。魚類など稀少種の動物にカメラやGPSセンサーを装着させ行動を観察する。これもセンサーネットの一環である。現在は大きいため応用が限られる。こちらも小型化、フレキシブル化等が必要となる。

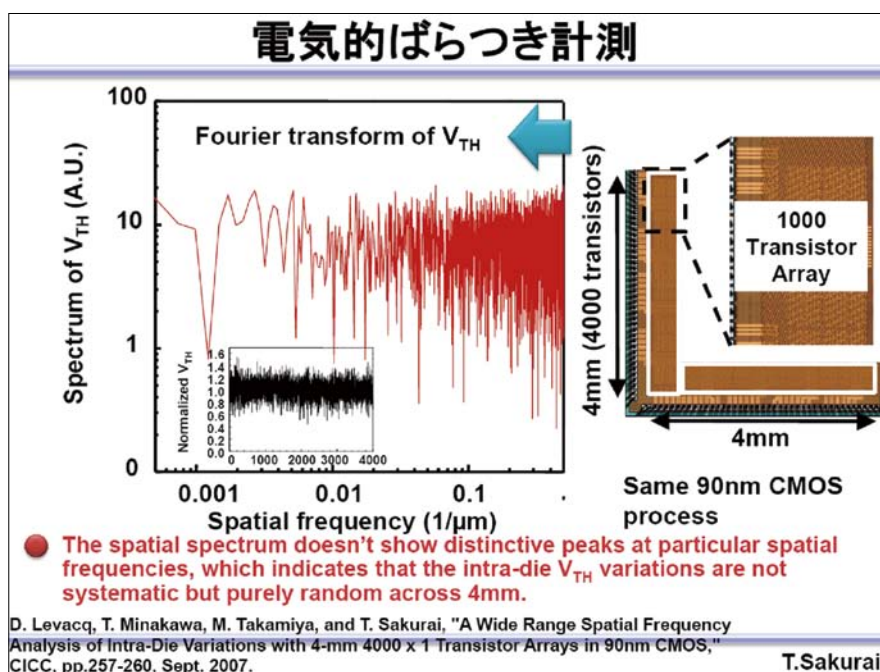
<集積システム>

(新機能の追加)

最近、半導体素子の高集積化、三次元化が進み、100 億個ぐらいの素子が入ってきて、非常に「複雑化」している。チップ上の各所にセンサーが入っており、そこから情報を得て、システム自身の動作状態の健全性などを「自己チェック」しながら動いている。また、小型化により電流値が大きくなってきており、抵抗による電圧低下によって動作しない場合もでてくる。そこで、変圧器など調整機能を入れる等、オンチップが「スマートグリッド化」している。その際、電流値を直接測定しようとする、電流計のために、内部抵抗が変わり、実電流値は測定できない。微小な部分を流れる電流をどのように内部状態を乱さずに測定するかは大きな課題である。さらに、素子の劣化に対する評価（ディペンダビリティ）として、どこかでエラーが起こったということを動的にチェックするというメカニズムをどう測ることも課題である。

(ばらつき)

集積回路が微細化しナノの領域になると、ゲートにランダムに不純物が入っているため、トランジスタのオンとオフの境を決める閾値が大変ばらつき、隣のトランジスタの閾値電圧が予測不能になる。このような、100 億個の集積回路を、動作状態も想定して設計するという大変複雑な問題をはらんでいる。この動作状態を決めるのが「空間電荷」の分布であるが、これをナノオーダーで測定する方法がない。素子の閾値も、数千個のトランジスタが、全く同じ形をしているのにもかかわらず、大きな「ばらつき」を生じることが最近明確になった。これら個々の素子特性を個別に簡便に測る必要性が切実なものになっている。



<電磁波>

(微細コイル)

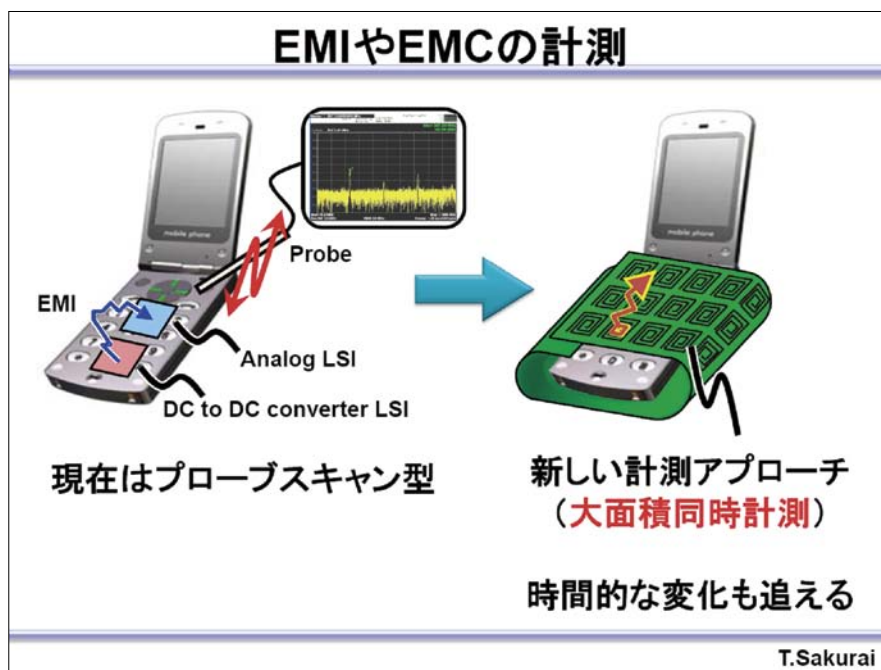
チップ間データ通信において、半導体技術で作成する $100\ \mu\text{m}$ 程度の小さなコイルを使って様々な用途を実現することが増えてきた。この上にタンパク等の生体物質が付着すると発信周波数が変わるので、センサーとして利用できる。この周波数は、タンパクの微妙な違いや変性、変形などで異なるので、簡便に、生体現象を計測する事ができる。

(無線給電)

電気自動車の給電は、有線では錆びや安全性に問題があり、いずれ無線になるだろうと言われている。また、テーブルに敷くタイプの無線給電シートを使うと1コイルで30ワットぐらい供給できるので、パソコンは配線無しでどこに置いてもバッテリーの消耗を気にしないですむ。センサーネットのエネルギー源としても期待されている。

(電磁波障害)

無線給電などは EMI、EMC などの電磁波障害が問題となる。また、あるソフトを流したときだけ障害が起こるなど、動的な問題が出るケースがある。従来のプローブで1点ごとに電磁界を測る方法では、スキャンしている間にそもそも状態が変わってしまうため、一気に、立体的に電磁波を測りたいという計測のニーズが出てきている。このようなフレキシブルなセンサーを測定物にかぶせて電磁波を測りたいというニーズもある。



<まとめ>

情報・通信分野では、単純なことは基本的に測れる。しかし、非常に数が増えてきて複雑になってきたものをどのように計測するかが、今後の課題である。低電力化、フレキシブル化、エネルギー給電など、複雑で動的な集積システムの信頼性を含めたディペンダビリティをどうやって計測し、それをどうフィードバックするか、ランダムな電荷、素子の電流の計測など複雑な問題がある。

電磁波に関しては、最近 CMOS 半導体チップも動作周波数が 100GHz を超え、120GHz ぐらいで通信ができるようになった。これが、テラヘルツ領域になり一般化すると、電磁波測定器もより多く必要になる。今 3,000 ～ 4,000 万円する装置をもっと低価格化して、様々な現場で使えるものが必要である。さらに、ポイント毎ではなくて、大面積を一気に動的に測る。そういう用途が複雑化したために新たに必要となってきた。

【質疑応答】

（Q：質問、C：コメント、A：回答）

（量子情報通信）

Q： 量子情報通信では計測ニーズがあるのではないか。

A： 計測すると情報が無くなってしまう。これは新たな計測手法が必要

（無線給電）

Q： 無線給電など外界に障害を起こす可能性がある問題に対し、あらかじめ防ぐ考えはあるか。シミュレーションも難しいだろう。

A： 無線給電の外部障害は、現在、議論が盛んに行われているところである。また、IH ヒーターを例にするとわかると思うが、励振部をアレー状にするなど複雑なシステムになってくるとシミュレーションすることは難しい。

（バイオセンサー）

Q： 微細コイルで生体物質を計測する話があった。詳細を説明して欲しい。

A : バイオチップは大変ホットな領域で盛んに取り組まれている。たんぱく質に磁気ビーズを付加し、ビーズがコイルの近くに来ると磁気効果で発振周波数が変わることを利用して計測する。それを四重極のような高精度な回路を使って測定すると非常に高精度化できる。たんぱく質の構造変化も測定できるようになってきている。

(異分野連携)

Q : ICT はどちらかというとシーズを提供する側でもあり、積極的に他分野で使ってもらうようにすべきではないか。

A : 一番の問題は異分野と連携するメカニズムがないことである。学会は独立しており、先端的な分野で一緒に話したりする場がない。今回のワークショップのような融合分野を設定するメカニズムができると双方にメリットがある。

C : ナノとバイオの連携は多いが、ICT はあまりない。バイオインフォマティクスは連携というより独立な分野をつくっている。

(ばらつき制御)

Q : 集積システム、複雑系とばらつき計測との接点だが、情報・通信分野ではばらつきを計測して少なくする方法と、ばらつきは当然とし、統計的な手法でカバーしながら計測と解析をセットで解いていく方法と、今はどちらが流れか？

A : ばらついたものを矯正してから使う流れと、ばらつきはどうせあるけれども、全体としては統一を保つシステムを作る流れの両方があると思う。脳も情報処理は、熱雑音に埋もれているにもかかわらず、全体としては統一的な処理を保っている。これは研究対象である。

Q : 閾値のばらつきはどうか。

A : 閾値のばらつきは、できあがった素子を少しずつ一機に矯正する仕組みが検討されている。

Q : 完全に統計的な処理を導入し、統計値から推定した真値を利用することは出来ないか。

A : 程度問題である。かなりいい加減なものばかりではうまくいかない。ベースがしっかりしてないと難しい。

Q : 宇宙通信分野はその研究によく取り組んでいる。宇宙から来るもとの信号は精度が高いが、途中で多くのノイズが含まれる。それをうまくコントロールして、例えば「はやぶさ」は帰還できた。ハードディスクも経済性を考えた最適な統計処理をして、実際に記録している。その意味では電子情報・通信では当たり前のことだと言えるのではないか？

A : ここで問題にしているのは消費電力問題である。1 チップ当たり数十ワットの消費電力を要することは、効率人間のほうが 100 万倍ぐらいよい。そして、効率を上げる道筋が全くない。このままでは中途半端なところでエレクトロニクスは終わってしまうという危機感がある。王道は動作電圧の低減だが、25 ミリボルトの熱雑音に埋もれても情報処理は成り立つのかという辺りが未解決である。生物はそれをやっている。生物を真似るのではなく、生物から習うことが相当あるのではないか。これが一番ホットである。

C : いい加減なものでは複雑な処理はできないと言ったが、生物はかなりそれをやっている。生物分野では、ゆらぎやノイズの海の中を細胞がシグナルを伝えるメカニズ

ムなど、非常に興味を持たれている。逆に生命分野も IT の手法を学ぶと、切り口を変えた研究ができるのではないかな。

(環境分野と ICT)

Q : 生物多様性計測の目的は、外来種がどんな古来種に対して影響しているのを調べたいのか。それとも外来種がどれぐらいいるかを調べたいのか？

A : そもそもそういう絶滅危惧種生物の居住環境や生態を調べたい。それが、保護や外来種対策に使える。

Q : ライフと ICT という話がありましたが、環境と ICT は？

A : ライフログ、ユビキタスセンサは環境観測で重要

(人間行動の計測)

Q : 人間行動の計測は新しい分野だが、場合によっては人権侵害的なこともあるのではないかな。どの辺りの情報を取るのか。

A : まずは会社で試行している。

Q : 現在はモニタの前で広告を流し、どこをウォッチしているか、それを自動的に判別して広告の効果を知るという ICT 技術もあるようだ。その人が笑っているかまで判断できる。その方法へ進んでいくのか。

A : そのためにもセンサーという使いやすいハードと、エネルギー供給の課題がある。これも計測問題といえる。

④ 環境・エネルギー科学分野

【話題提供：山形与志樹 国立環境研究所】

私は JST の社会技術開発センターの脱温暖化領域のアドバイザーをやっている関係でお声がけいただいたと思う。本日は個人的見解であり、かなり仮説的な話しをする。

(環境・エネルギー分野の研究の特徴・水準)

地球環境問題も含め、環境・エネルギー分野の研究の特徴をまとめた。環境分野の現場は問題解決が何よりも重要である。学問としては臨床医学に近い。それを支える科学技術的知見は、分野横断的かつホーリスティックな視点からの研究で生み出される。ここが非常に特徴的である。

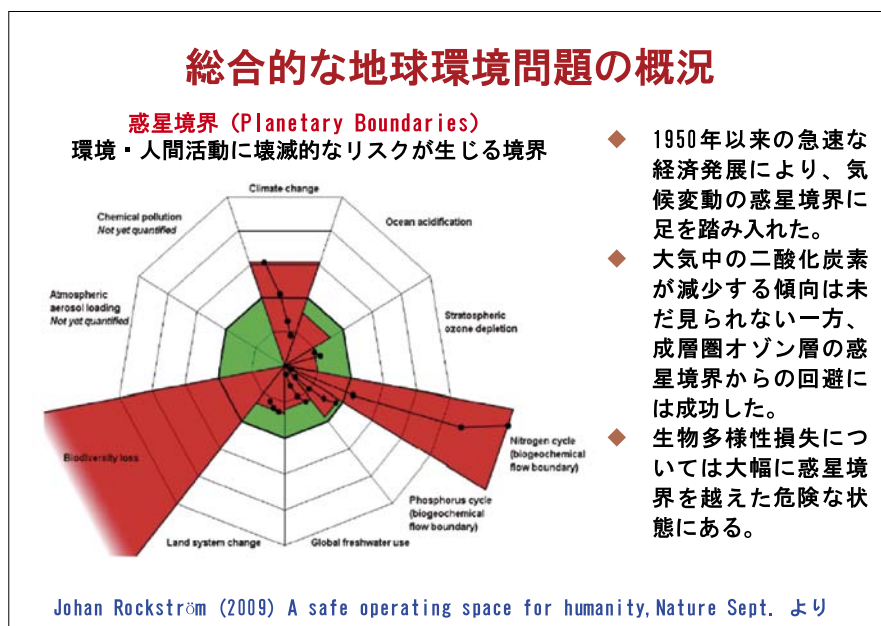
この分野は、欧米では科学者と政策担当者が逐一話し合い、一緒にアセスメントすることが重視されている。その連携をサポートするものが「統合評価モデル」である。普通の科学とはまた違うモデルとして発達してきている。このシステムアプローチによって問題解決することが重視されている。

日本では環境××学という縦割りの分野が多く存在しているが、これを組み合わせても、問題解決するか分からないことがある。問題解決型で持続可能な社会を設計しただけでは解決しないので、合意形成することをサポートする研究まで取り組まないと問題は解決しないと思われる。

(プラネタリー・バウンダリー)

今日のお話の一番のミソは昨年、「Nature」9月号に報告された『A safe operating space for humanity』（スウェーデン・レジリアンス研究センター）という話題になった論文で、「プラネタリー・バウンダリーズ」を提唱している（Nature, 461, 472-475, 2009）。これは環境や人間活動に壊滅的な影響を与えるリスク問題について、ここに挙げた9分野について評価したものである。緑色の枠が「プラネタリー・バウンダリーズ」で、まだ限界を超えていない分野である。これを見ると一番大きく限界を超えている分野は「生物多様性損失」である。いつ越えたのかもはっきりしていない。

意外であるが、その次に大きい分野は「窒素循環」である。相当に限界を超えている。そして日本は最も限界を超えている国の一つであり、世界中から肥料を集めてきて農地に巻き、河川に流出している。以下、気候変動、海洋酸性化、土地利用変化、水資源と続く。



それぞれの分野について境界値を彼らなりに定義したものがある。一つひとつ見ている時間はないが、「気候変動」では CO_2 レベルは 350ppm である。昨年の COP10 で合意しかけた 450ppm よりはるか下の境界値だと言っている。この濃度で平衡状態までいくと完全に極地の氷は溶け、その影響は避けられないことを根拠としている。2100 年までの影響を考えて 150ppm に抑える必要性が言われているが、長期的にはそれでも足りない。既にこれを大きく超えており、これを戻すことはかなり至難の技である。

「生物多様性損失」については、絶滅種が 1 年間に 100 万種ベースから 1000 万種、これははるかに超えている。それはどれだけのスピードか定量化されていない段階で今年 COP10 においてある程度合意されたが、歯止めには全く目処は立っていない。その他、土地の利用では陸地面積の 15% ぐらい耕地にするのが限界だが、すでに 12% ぐらい使っている。

惑星境界一覽

項目	境界値	根拠・現状	影響
気候変動	CO ₂ 濃度: 350ppm 放射照度: 1W/m ²	・冷却要素としての作用 ・温室効果ガスの影響 ・極域氷床の変化 ・現状値	・他の境界への関連性が高く、地域機構の崩壊をもたらしかねない。 ・気候/パターンの大規模な変動の可能性 ・山岳氷河の消失、海面上昇、サンゴ礁の消滅等
海洋酸性化	海面炭酸飽和度: 平均3.44	・CO ₂ の海面吸収 ・現状で飽和度は3.44から2.29に低下 ・サンゴ礁の生存	・海洋生物多様性、CO ₂ 吸収機能への影響 ・炭石を形成する有機生物の消失も課題
成層圏オゾン減少	産業化以前のレベルから5%の上	・臨界点を避けた好例 ・紫外線フィルターとしての役割 ・オゾン層破壊ガス濃度は92-94年のピークから10%減 ・境界値を推定するには不確定要素が多い	・オゾンホールは局所的、オゾン層薄化は広域に影響を及ぼす ・世界の関心は臨界点を避けるように動いている
窒素・リン循環	窒素: 約35Mt/y以下 リン: 自然量の10倍以下 (不確定範囲10~100)	・窒素とリンに独自の臨界点を推定することは困難 ・窒素排出は主に、産業固定・農業固定・化石燃料燃焼・バイオマス燃焼で発生 ・リン流入は試験的に推定	・窒素とリンの富栄養化により、水生・海洋系の安定状態に変化 ・地域レベルの生態系の変異 ・海洋へのリン流入による海洋生物の大量絶滅
生物多様性損失	絶滅率: 10(百万種)/y (不確定範囲10~100)	・現状の損失速度は史上6番目の絶滅イベント ・現在の絶滅率は新種形成速度を大きく超える ・海洋生物の絶滅率は0.1程度であり、今後の人間活動により100~1000倍に増加すると予測される	・適応性の低い生物種は壊滅的なリスクを持つ ・生物多様性損失は気候・海洋酸性化・水生生態系などにも密接に関連 ・種の消失は生態系全体に波及する
水資源	年間4000km ³ 以下 (不確定範囲4000~6000)	・世界の淡水資源は25%程度の干ばつが推定 ・陸上生態系機能とサービス(バイオマス・食糧生産等)を考慮 ・利用可能な水資源の上限は12500~15000km ³ と言われており、年間5000km ³ 程度を使用すると水危機に瀕する。	・水生生物、生息地、気候などに影響 ・食糧安全保障問題にも関連
土地利用変化	耕作地面積を15%以内に。 (耕作可能面積内)	・窒素・リン循環、生物多様性損失、水資源などとの関連性を踏まえて推定 ・生産性の高い農業活動、生態系と森林保全、炭素土壌等を考慮 ・現状では耕作可能面積のうち12%が耕作地	・土地利用変化の影響が顕著になるのは、他の境界よりも遅いが大きな変動が予想される。 ・高生産性を持つ土地と食料需要の増加には高いリスクが付随
エアロゾル荷重	不確定	・気候システムや健康への影響と人間活動によるエアロゾルから検討 ・エアロゾル粒子の変換や複雑性から一元的に推定することは困難	・地球の放射収支に関する直接的な影響が生じる ・降水形成メカニズム変更 ・健康被害
化学汚染	不確定	・放射性化合物、重金属、人間由来の有機化合物などを考慮 ・無数の化学物質の影響を考慮する必要がある ・現状で、10万前後の化学物質が存在	・人間と生態系に多大な影響を与える

(リスクの複合化)

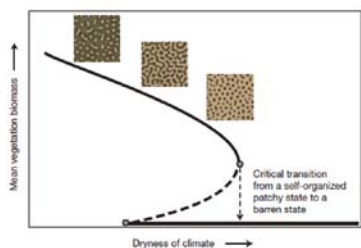
本日の論点は、この一つひとつを見ることではない。この未解決問題を考えるとき、境界それぞれを考えても難しい問題だが、さらに相互作用を起こす。例えば「気候変動」によって「生物多様性」が損失し、食料、水の問題を通じて適応力の問題が出てくる。場合によって戦争が起こる可能性もある。相互作用を考慮すると更に安全領域は狭まる。個別のリスク境界も分かっていないが、複合的に考えたときのリスク境界はますます未解明といえる。そして、この問題は地球レベルのほか、国家あるいは都市にも限界があると考ええる。その限界はわからないまま超えているかもしれないし、大丈夫なのかもしれないが、いずれにしても未解明である。

この解明に100年掛かっては意味がない。そこで複雑な系には必ず臨界点が存在し、それを超えると不可逆変化が現れるアナロジーを考えれば、一種の砂漠化プロセスを想定すればいい。森林を減少させていくと、あるところで孤立した状態になる。どこかでつながっていればなんとか維持できるが、孤立すると突然維持できずに崩壊し砂漠となる。崩壊自体はギリギリまで進行しないとわからないが、その予兆がどこかの信号、もしくはパターンとして現れるのではないかと。例えば周囲との接続との繋がりを測れば、ある程度指標化できると考えられる。そのような予兆を見つけ、計測課題として取上げれば、対策に繋げられる可能性がある。

未解決問題の計測についての私見

■ 境界同士の相互作用リスク

- ・ 各境界は相互依存性を持つ
 - － 気候変動に伴う生物多様性の減少、社会適応力の減少など
- ・ 相互作用リスクを考慮すると安全領域はさらに狭まる
- ・ 地球・国家・都市などの複合的境界が未解明



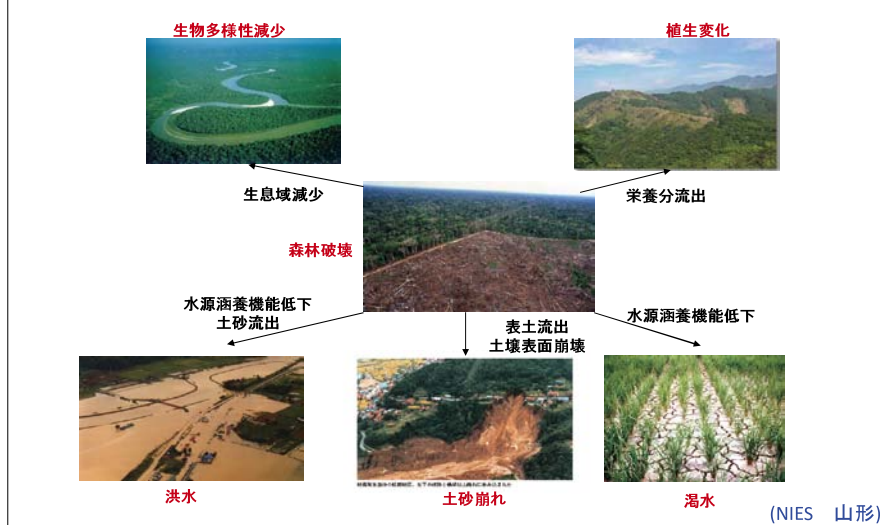
森林減少による砂漠化等での臨界点

- 複雑な系には臨界点(分岐点)が存在し、臨界点に達すると不可逆かつ大規模な変位がもたらされる。
- 臨界点の予測は難しいが、予兆となる信号がありうる。それはどのようにすれば検出できるか。(計測課題)
- 特に臨界点での質的形質(パターン)の転換の検出が重要と考えられる。

(森林の問題)

森林の減少が続くと様々なところへ波及する。まず直接的に生物多様性が減り、植生変化によって栄養分が流出する。窒素が更に減少する。水涵養機能が低下して渇水し、逆に大雨が降ると洪水、土砂崩れなどが連鎖反応でリスクを招いてしまう。したがって森林減少は一つ非常に重要な問題である。例えば人工衛星を使って、これは日本の JAXA の最新のセンサーでは、雲がなく見られるようになったが、このデータを使えば CO₂ がどこから排出しているかまで計測可能になりつつある。

森林減少による生態系サービス低下の連鎖反応

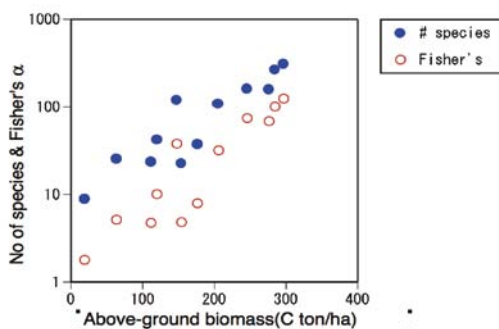


(生物多様性の問題)

生物多様性は非常に問題となっているが、その定義もいろいろある。それを測ることは更に至難である。ボルネオのジャワ島の計測例だが、縦軸「種の多様性」と横軸「バイオ

マス」は比例関係にあり、そのまま「フィッシャーの α 指数（生物多様性指数）」と「バイオマス」も比例することが知られている。例えば生物多様性条約でこの指標を用いた目標をつくれれば良かったと思った。このような間接的な指標を探すことにも新たな計測技術が必要だと思う。

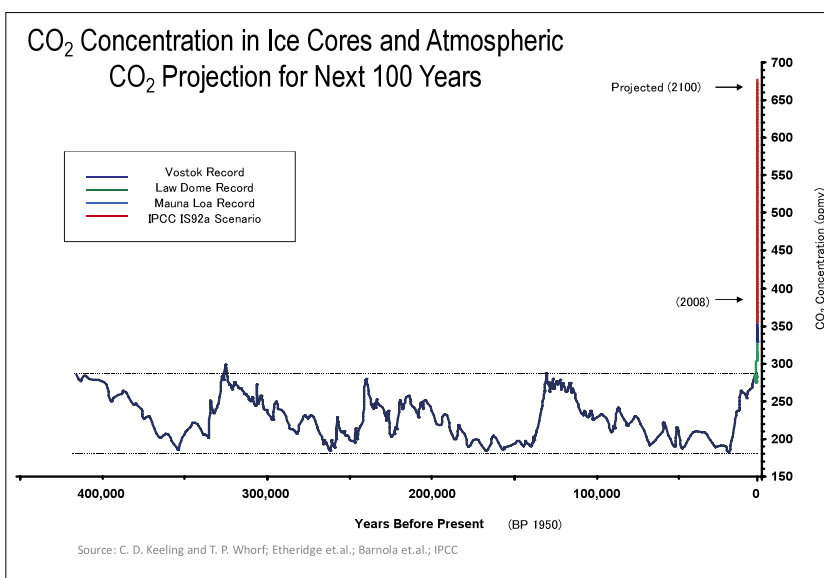
種多様性のバイオマス(炭素量)からの計測

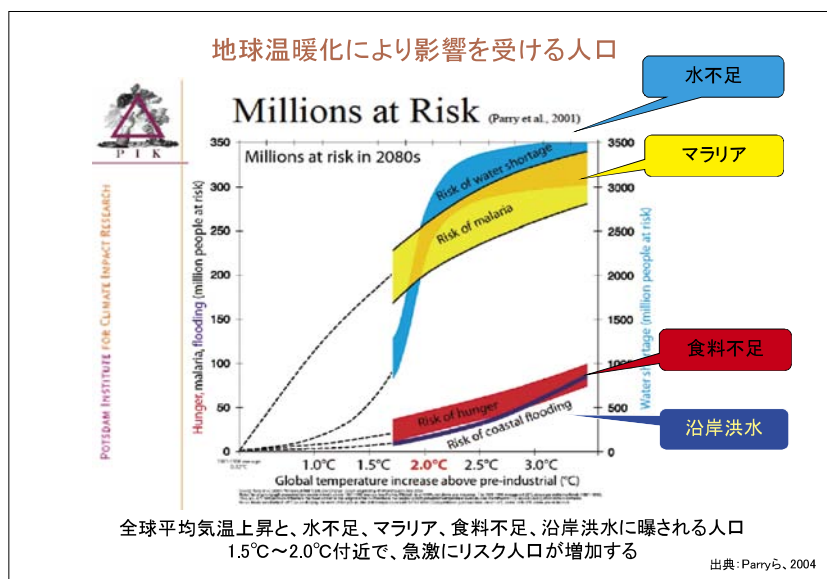


- ・ボルネオ島とジャワ島の低地熱帯多雨林と高標高の山地林に設置した長期観測のための森林調査区(おもに1ヘクタール)の地上部現存量と樹木種数、樹木種多様性の指数 α との関係。[Kohyama, et.al. 1999]

(気候変動)

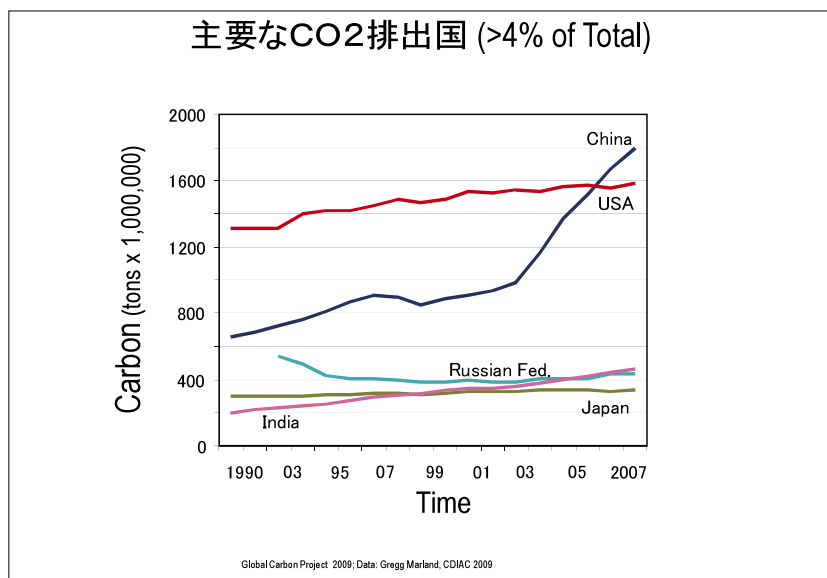
過去 40 万年からの CO_2 濃度のグラフに対して、どこまで上がり、どこで止められるかという議論がある。350ppm が限界だと言われているが、このままでは 650 ～ 800ppm 近くに上昇することは避けられない。どこで止めるべきか、その臨界点をパリー教授（元オックスフォード大学）は、 2°C を超えると突然マラリア、水不足が起きることを示している。この考えを根拠に IPCC では温度上昇は 2°C 以内に抑えるべきと決めた。不確実な仮定の上に成り立っており、さらなる研究が必要だ。





(都市問題)

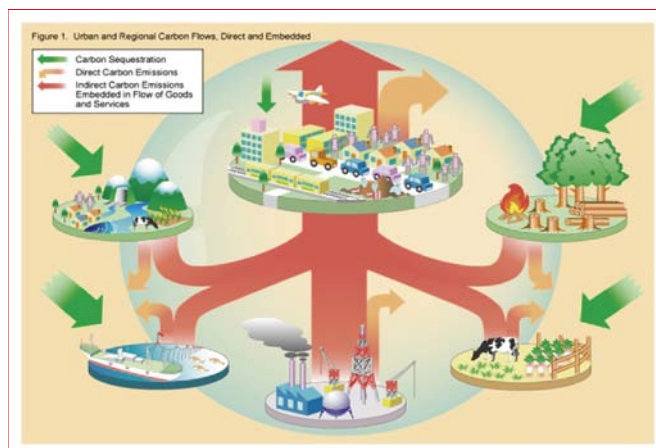
その原因は CO₂ を大量に排出している大国の問題である。米国が世界最大の排出国と言われているが、既に中国が 2005 年時点で米国を超え、世界最大となったことはあまり知られていない。日本は 4% ぐらいの排出国であり、地球レベルでは米国と中国をどうするかの問題である。



2050 年の人口推定値を見ると、飛びぬけてアジアに集中している。アフリカも多い。経済 GDP で見れば、アメリカ、ヨーロッパ、東アジアの三極化が進んでいる。偏りがあるのである。さらに推し進め、国ではなく都市だということを論点として加えたい。日本の間接排出量をカルトグラムで示すが、排出量は東京、名古屋、大阪に集中していることがわかる。さらに一人当たりの排出量で色づけしてみると、我々のいる東京都心に一極集中している。この温暖化問題は都市問題と言っても過言ではない。都市の温暖化問題に対するリスク管理は、まず都市の倒壊境界に関する研究が重要だと思っている。「緩和」だ

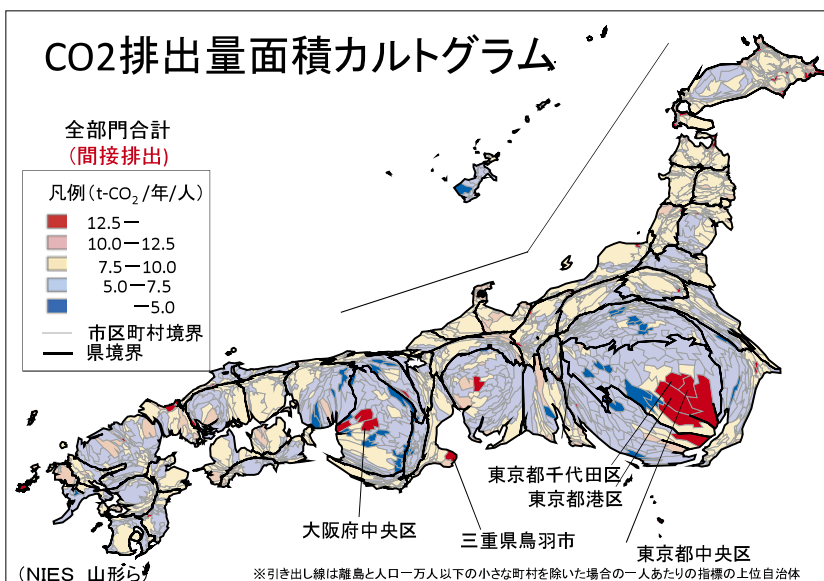
けでなく、避けられない温暖化の影響への「適応」も考えなければいけない。東京は、地震など様々なリスクもあり、複合的な評価を行わない限り持続的な発展はないと考える。

都市におけるカーボンマネジメント



(NIES GCPつくば国際オフィス 山形ほか)

CO2排出量面積カルトグラム



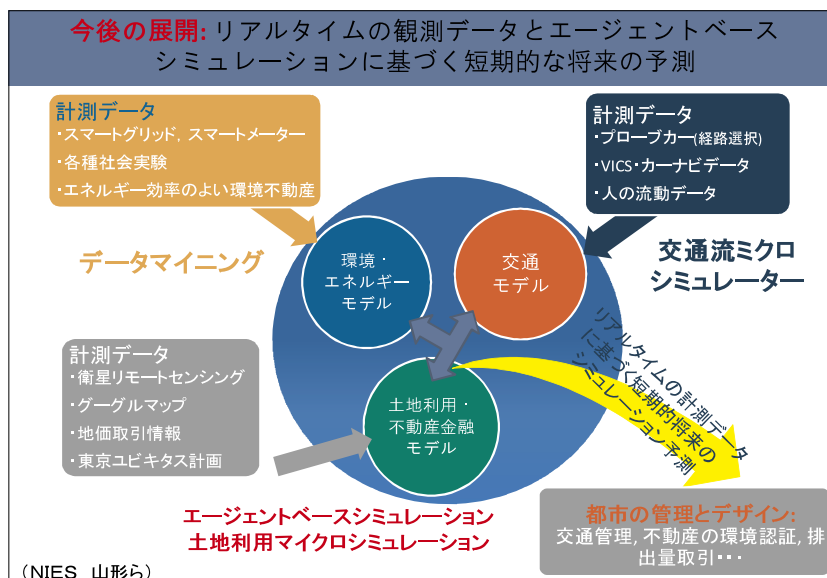
(リアルタイムのリスク管理)

限界を明らかにする方法として、土地利用、交通、影響・エネルギー等を動的なシステムとして捉え、リアルタイムな計測データに基づいた近未来リスクを予測しながら管理することが必要だと考えている。JST 社会技術研究開発センターにおいて「サービスサイエンス」が提案されているが、都市をサービスのネットワークとしてとらえ直すことで、この新しいシステムアプローチが確立できると考えている。

我々が実際に行っているモデルの例だが、現在のアプローチは統計データのみを用いている。日本は世界最高の統計国で各種のデータが揃っているが、あくまでも過去のデータに過ぎない。そして、せいぜい市町村単位のデータでしかない。それでもモデルをつくることは可能である。しかしこれでは不足であり、様々な計測データ、例えばスマートメー

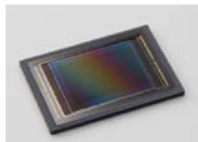
ター、リモート・センシング、グーグルマップ、様々な取引データ、車の移動データなどを集めれば、リアルタイムに都市設計や、リスク管理が出来る。東京都の排出権取引をこの4月から始めたが、それらと繋がっていくと考えている。

このデータ収集に役立つセンシング技術として様々なセンサーが考えられる（IBM 丸山氏との共同作成）。カリフォルニアではiPhoneのデータから人の分布情報を集めている。グーグル等で”発熱”などのキーワード検索情報を分析すれば、例えばインフルエンザの流行を予防できる。日産の車体につけているセンサー情報を合成すると、車の周りのすべての面的情報を取ることが出来る。様々なデータが取得されているので、これらを集めて何がリスクになるかわからないようなものまで先取りし、予兆をとらえ、分析して危険リスクを導出していく。あるいはリスクを回避できる都市設計に役立てていく。しかもリアルタイムに行うことが可能になると考えている。もちろんその情報は温暖化対策ではなく地震や都市の防災、犯罪、そういうものにも役立つと思うが、同じようなシステムが環境やエネルギーにもきっと役立つと思い提案した。



「早期警戒システム」に役立つ情報技術(1) センサー技術

1. 高解像度・高感度光学センサー



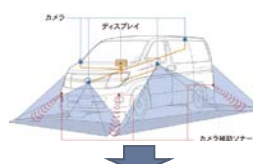
Canon 約1億2,000万画素CMOSセンサー

2. 人間活動をセンサーとして利用する技術



iPhone/iPadの位置情報を用いて混雑予測を行うSkyhook社SpotRankサービス

3. 複数センサーを補間して仮想センサーを合成する技術



日産自動車アラウンドビューモニター

(丸山氏より)

(リオ+ 20 サミット)

一番初めの惑星境界の話だが、1992年のリオサミットから20年が経過し、「リオ+ 20 サミット」が2012年に予定されている。そこへ向けて来年(2011年)は、この惑星境界についてのかかなり大きな国際会議が開かれる。スウェーデンでもノーベル賞受賞者20人を呼んで惑星境界について議論する。そのような議論と繋げていくと面白いと思っている。

【質疑応答】

(Q : 質問、C : コメント、A : 回答)

C : 当初、環境分野は科学とは必ずしも言えず、むしろ課題解決に向けてあらゆる科学を利用しているだけと考えていた。この科学の未解決問題からは外れると考えていた。しかし、吉川センター長と議論し、環境分野も科学だと納得した。今回の内容は新しいタイプの科学だと思う。

(窒素問題について)

Q : プラネタリー・バウンダリー問題について、「窒素循環」が挙げられていた。何が問題なのか。

A : 窒素、リンの富栄養化によって湖、海洋などの水質の安定状態が変化し、生態系へ影響する。

C : 空中窒素の固定によって人類の食料問題が改善され、現在の全世界60数億人の人口が保たれた。化学のポジティブな側面である。一方、化学のネガティブな側面が書かれた本が出た。最大のネガティブな問題は爆薬。もう一つが環境問題であった。

C : リンは以前から富栄養化の問題として取り上げられていたが、最近では窒素循環が問題になっている。

C : リンは天然資源であり、枯渇が問題になった。窒素は資源の問題ではなくて「形」の問題だと思う。

(CO₂ について)

Q : CO₂ の350ppmが臨界濃度であることは聞いたことがある。それを超えると急激に増加して戻らなくなる。かつて金星は生きたプラネットだったが、臨界濃度を超えたために死のプラネットになった。事実はわからないが、計測屋から見るとCO₂を測る研究が非常に盛んだが、どのレベルをどのように計測すればよいのか。

A : 350ppmを超えたから、すぐに不可逆になり金星になってしまうことはないと思うが、いまの350ppmより高い量であっても安定した状態まで持っていければよいと言われている。

Q : その根拠は。

A : モデルシミュレーションの結果である。ただ私は450ppm、既にもう400ppmになっている状態では難しいと思っている。CO₂の計測については、私どもの研究所も含め世界中でフラックスを測り、CO₂の濃度を測っている。CO₂は非常に拡散が速いため、世界中でいつも面的にきちんと測る必要はないが、どこの国からどれだけCO₂を排出しているのか測る必要がある。中国はこれからポスト京都に参加して10%減らすと言っている。統計データ自体がはっきりしない国であり、測り方が重要になると思う。

(生物多様性について)

Q : 生物多様性の測定はどうやるのか。リモート・センシングでは難しいと聞く。

A : 今は生態学者や現場の調査をデータベースにしている。システムチックな計測はこれからの課題。

Q : 例えば提案はあるか。

A : リモート・センシングによる森林の観測などは提案がほしい。

Q : 以前、世界各地の小学生や学生の携帯電話で写真を撮ってもらい、それを ICT によって集めれば、その分布が計測できるとの話があった。

A : オン・ザ・グラウンドの草の根の計測は、この多様性においては非常に有望である。学者の数はたかがしれているため、例えば学校の先生や学生、途上国でも現場の人が簡便に測れる装置があれば有益だ。遺伝子分析までできればベストだと思うが、葉の形から種を同定する装置など提案がほしい。

Q : 生物多様性と言っているのは遺伝子の配列の問題か。

A : 生物種である。

Q : この辺は生命科学の世界ではかなり分かっていることか。

A : 生物に関しては「メタゲノム解析」という、土、水、空気の中から取ってきた DNA を片っ端から解読する研究が盛んに行われている。ただし、大きな生き物はつぶすわけにはいかないので難しい。様々な生き物を識別するためのバーコードとなる配列をシステムチックに集める研究も出てきている。そういうものを使えば、決まった方法で簡便に計測できるだろう。

Q : その一例が、先ほどの話で出てきた pH メーターを使う方法か。

A : そうである。野外に持ち出せるものが出てくると可能性は広がる。

(エネルギー問題について)

Q : 環境・エネルギーのうち、エネルギーの部分がなかったが、何かコメントはあるか。

A : CO₂ を削減することは、ほとんど省エネ化と表裏一体だと考えている。再生可能エネルギーを今後どのように導入していくのか、スマートグリッドに関わる計測も一つの課題だと思う。

Q : この辺の問題について、その他コメントはあるか。先端計測小委員会でもエネルギー問題の計測はかなりホットな話題になっている。

A : グリーンイノベーション絡みに限定されているので、今日のように広い課題に対応しているわけではない。ただ CO₂ 計測はエネルギーと非常に密接に関係している。

(CO₂ の測定)

C : 先端計測事業でも CO₂ を簡便に測る方法がある。何かコメントはあるか。

Q : バルーンだけで上空を常時 24 時間計測する研究などが行われている。ただ、CO₂ が地球を温暖化していること自体に賛否両論がある。

A : 私の視点からは全く疑う余地はない。もちろん科学的な不確実性の議論はあると思うが。

Q : サイエンスとして、CO₂ が増え温暖化に寄与していることは間違いないことか。

A : そうである。

(省エネ用材料)

C : エネルギーに関して私の問題認識は、これから先、本当の意味でエネルギーに関係

する部材、システムは従来考えていたよりもはるかに長い時間スケールを過酷な環境に晒される。よって数十年にわたる材料の劣化や、材料の信頼性をいかに計測し予測するかは非常に大きな課題だと思う。情報・通信分野で、本来の持っている性能、使用期間を超えた製品・サービスを「ガラパゴス化」と呼んでいる。逆にそれをもっと進め、はるかに進んだガラパゴス化は他国に対する優位性を持つだろう。その意味でも超長期の信頼性、劣化、あるいはそれを根本の材料に落とし込んだメカニズムの解析などの課題を是非取り上げるべきだと思う。

(材料試験のトレーサビリティと規格化)

- C : 今の話、材料の引張試験にしても、決まったサイズの断片を試験しているので世界中で比較できるが、例えば 1cm 角、10cm 角とサイズを変えると単純に比例関係にない。この「材料の信頼性科学」は全く未解明であり、非常に脆弱である。「材料計量」、「トレーサビリティ」が確立されていない。もう 1 つは、いま日本の様々な産業界で使われる材料は ISO でもなければ JIS でもなく、ほとんどがアメリカ米国規格 (ASME) で決まっている。もし日本の規格でつくってあれば安全だったが、ASME でつくったために割れた等が結構ある。このままでは日本の産業界も危ない。
- Q : 今の問題に関連するが、核反応炉のような材料の長期劣化はデータがあると思う。米国や日本ではどのように管理しているのか。
- A : ほとんどは ASME で走っていると思う。日本の独自規格は私の知る限りはほとんどない。
- Q : 原子炉も長く使うようになってきた。今後 4S 炉が出てくると 30、40 年間は、燃料を入れっ放しになる。このような長期の安定性は本当に実現できるのか。
- A : 過去は研究所に放射線関係のセクションがあったが、物質・材料研究機構にはそのセクションがない。普通の引張り試験のセクションだけが残っている。
- Q : 放射線関係のセクションは日本原子力研究開発機構 (原研) にあるのか。
- A : 原研の管轄だと思う。
- C : 東芝がウェスチングハウス (WH) から技術を買取った。今後、日本が原子力プラントを海外に輸出しようとしたら、そのプラントの検査は NIST トレーサブル、NIST に値づけをしろと要求されることになるようだ。例えばトルクレンチ一つとってもそうである。これは一種の交渉の世界と思うが、トレーサビリティを承認する体系を日本の中につくり相手側に納得させないと、いつまでも輸出できない。
- Q : 産業政策と計測を一体で考えなければいけない。
- A : 特に輸出を考えるときである。
- Q : 場合によってデファクトスタンダードにしてしまう場合もあるのか。
- A : 米国には特に NIST という非常に大きな機関がある。NIST との整合性を常に相手部局に納得させることが必要であろう。

(3) セッション2：計測に関する横断的討議

① 総合討議

(Q：質問、C：コメント、A：回答)

C：セッション2では、横断的討議と称して、各科学分野の議論を横断的に見たとき、どのような問題が浮かび上がるかを見ていく。今後、我が国における重要な研究開発の議論をお願いしたい。

【計測のトレンド】

C：まず各分野で出てきた計測ニーズのトレンド・キーワードを抽出したい。我々が示した叩き台に対して、追加等のコメントが欲しい。

(生命科学のキャラクタリゼーション、言葉の定義)

C：冒頭、生命科学分野の話を伺って感じたことは、キャラクタリゼーションの検討についてである。無機材料等のキャラクタリゼーションは、計測から見た材料系の学問体系を長い間検討した歴史を持つ。セラミックスのキャラクタリゼーションも、30年前に行ったものである。そのキャラクタリゼーションということ定義して、物質開発あるいは物質の物性研究、製造、利用など、すべての分野を同じ土俵でキャラクタリゼーションしないと論文一つトレースができなかった。生命科学の分野もキャラクタリゼーションに相当する要素、その相互作用、電子、分子、化合物、存在状態、物性など、その関係をきちっと見極めることが基本ではないか。生命科学の分野の話を聞いていると、それがまだ十分に整理できていないという感じがしている。反論があるかもしれないが、生命を構成している要素が大体見えてきた中、ある特定の細胞の中にどんな物質がどれだけあるか、まだよく分からないと聞く。少し言い過ぎになるかもしれないが、それでは生命現象を追求する道具立てが十分に整っていないとも思える。生命現象なる科学の解明における究極のターゲット、それをどう攻めるかの体系作りが必要ではないか。

Q：吉川先生の言葉で言えば、存在計測と関係計測という言葉があったが、生命科学分野は、モノの存在自体もまだ不十分ということか。

C：モノについても、まだ手さぐり状態という印象だ。これは早急に分野の先生が全力を上げて整理すべきことだと思う。そうしないと先端計測の話にまで落ちて来ない。

A：その通りだと思う。そのモノ自体を把握しようという、すなわち生命を構成している物質をきちんと把握しようという動きは、この10年ぐらいで本格化してきたものである。ゲノムやプロテオーム、トランスクリプトームなどオームという全体をとらえようという動きもここ10年ぐらいである。わかっているモノはDNAの配列だけだ。RNA、蛋白などは、まだまだ闇の中と言っても過言ではない。また、そのようなモノをどのように構成し、生命の理解につなげるかという理論的バックボーンも手さぐり状態だ。生物系でも「キャラクタリゼーション・オブ××」という論文はたくさんあるが、それぞれ言っていることが違う。その意味では、これまではローカルな現象についてのキャラクタリゼーションだったのだろう。有機系など、キャラクタリゼーションの定義がしっかりしているところから、我々はもっと学ぶべきだと思う。

Q : ターミノロジーも統一化されていない部分があるのか。

A : それもある。いろいろな生物学的な用語、概念など、オントロジーがあまりしっかりしていないところがある。この問題は、ゲノム解読が始まって、非常にたくさんものを同時に扱うようになった頃から話を通じなくなってきた。ショウジョウバエとヒトの研究者で、同じ現象に対する言葉遣いが違う。現在、むしろ情報科学の方がリードして、それをつなぐ努力が始まっている。まだまだ未開、未熟な分野だ。

(環境分野のキャラクターゼーション)

Q : 環境科学も例えば CO_2 を我々も計測する。 CO_2 を測定することはそんなに難しい問題ではない。pH を測るのだって海水の pH だって測れるようになっている。物理計測的なことはかなりあるが、いざ考えてみると、それを測って環境科学の人たちはどんな情報を知りたいのか、はっきりしない。例えば、地球が生命を失うような危険な臨界点を、私は計測として探りたいと思うが、具体的にどうしたらいいかは先生方から指導をもらえなければ分からない。

A : 例えば私どもの研究所で、森林の土壌から CO_2 を測ろうとしているグループがある。なぜ重要かと言えば、温暖化が起きてきたとき、植物にとって CO_2 が増えることはありがたいことだが、土壌は温度が上がると急に CO_2 を放出することがある。このことで CO_2 を吸収していた森林が、 CO_2 を吐き出すようになる場合がある。このレスポンスは非線形で、土壌の中の様々な微生物が関与した複雑系で起きている。一つずつは未解明だが、トータルとしてのレスポンスを測ることは、科学的な最前線の一つだ。例えばそのようなところへ活用できるセンサー技術は興味深い。

Q : どういうセンサーが欲しいか。例えば、手で持ってフィールドに持っていける小型化のものや、非常に高感度のセンサーなど。

A : 今は土の上にビニールを被せて測っている。この方法では影響を与えた系の反応を見てしまっている。どうやって非破壊、非接触で実際に近いものを測れるか。しかも多様な環境についてである。同じ場所の一つもないため、相当量を測らないと平均値は出ないと思う。その辺の計測は非常に興味深い。

Q : 地球全体に対する熱力学や空気力学など、様々なメカニズムが分からないとトータルとしての地球システムを標準化することは難しい。計測以前の問題もあるのではないか。

A : 我々はそのメカニズムを炭素循環と言っている。炭素循環というメカニズム自体にも、当然、未解決な部分がある。このことで、ポジティブにもネガティブにもフィードバックが掛かり得る。

(生命科学における「定量計測」)

Q : 材料など既存の計測の概念では、生命科学や環境という問題には必ずしも対応できないのではないかと印象を持った。そのようなアプローチはすごく遠い。部品のキャラクターゼーションをやったからといって、生命現象が完全に分かるかどうかはもう少し違うような感じも受けた。

A : 私が言いたかったことは、自ずと分野によって違ったアプローチがあると思う。その辺りの方向性が、私のような門外漢には見えない。おそらく無機材料ではないア

アプローチが生命科学ならば必要だろう。このアプローチを生命科学分野の研究者は
ずいぶんとわかってきているのだと思う。それをまとめる方向で議論してもらいた
い。

Q : このように総合的な戦略を考えている人はあまり多くないのでは。

A : 生命分野も研究が進むにつれて部品のみを見てはだめという意識が皆さんにあ
る。ほかの分野の方から見ると笑われるかもしれないが、最近「定量生物学」とい
うことがよく言われている。定量しなくて何が科学だとおっしゃる方も多いと思
うが、その流れが議論されている。定量生物学という言葉自体はもっと古くからあり、
個体の数を数えるなど行ってきたが、もう少し深いレベルに入ってきた。更にもっ
と動的なものを定量的にとらえるという意識がようやく高まってきたわけである。
ある意味ではそこはまだ手さぐり状態のところがあり、定量するにも何を計測でき
るのか、むしろ求めているところがある。測ってみたいものは多分たくさんあると
思う。ただ理解のレベル、何を理解しようとしたいかに応じて測るもののレベルも
出てくる。生命科学の中だけでも多様な解があり得るのだろう。それでもトレンド
として「定量」と私は入りたい。ほかから見ると何言っているんだということにな
るかもしれないが。

C : 生命における定量という概念をトレンドとして加えることは問題ないと思う。

C : ついでに部品の定性も必要である。生命科学の周期律表のようなものが必要だと思
う。

(環境・エネ科学における長期信頼性)

C : 環境の特にエネルギー分野における「長期信頼性」という観点のキーワードがほし
い。

(生命科学におけるマクロ統計計測)

C : 生命の分野は、まず共通の土俵をつくるということが当然だと思うが、個々の現象
を微細に見るより、重心がどう動いているか、マクロな現象を理解する上で、一種
の統計量的な変動を知ることは役に立つのではないかと思う。生命と情報に関係す
るが、一種の統計的な処理をいかに計測と組み合わせるか、これはいいのではない
かと思う。

(界面の基本定義)

C : ナノ分野で、先ほど田沼さんの話にあった実際は物理量を測定しても合わないとい
う話が出ている。ナノの世界、例えば界面なら界面、数ナノの深さの界面をとった
とき、物理プローブを入れて界面を測るが、X線を入れた場合の反射の界面、電子
線を入れた場合の反射の界面、それぞれ反射の条件が異なるため、どこで反射する
という基本的な理解に及ばないと、それぞれの結果が比較できない状況にきている。
もう1度、界面とは何か、その基礎的な理解とセットされないと、先の計測は進
まないという印象がある。

Q : サブナノメーターの界面はどうやって扱っていいか。界面そのものである。

A : もともと界面も表面も見えていた。ところがナノ構造を作り込む際に臨界点が出て

くる。本来、この臨界点を見ていたはずなのに、逆に訳が分からなくなった。確かに現象としては表面を見ている。ただ表面というのが集合体の表面しか見ていないため、アイソレートした、凝集した、これは多分違うけれども信号としては一緒である。だから同じような測り方をしているかとの疑問のとおり、もともとの定義まで戻らなければならない。今までの分析では一緒だと思っていた。ところが違うことが分かってきた。

C : ナノ計測は、もう一度、概念の定義から見直す必要がある。

C : どの程度の誤差、違いが機能発現につながるのか見極める必要がある。

C : 触媒はそうだろう。ほんのわずかなことが効いている。

(生命科学の多様性と標準化)

Q : もう一度生命科学に戻すと、脳関係のほうから見たときに脳計測も急速に進んでいる。脳科学研究から見て、測ればよい計測ニーズはあるか。

A : 脳科学において抜けているのは子どもの脳発達と心・感情である。かなり個人差のある脳機能の局在を調べたい。また、神経と神経の活性のみならず、時間的な位置情報としての繋がりを見ていきたい。

Q : 神経結合、シナプスの結合か。

A : 安静時も含めて見ていく必要がある。そこでトレンド・キーワードで疑義を持ったものは「標準化」である。脳科学研究に当てはめたとき、どこまで標準化しているのかと思う。実際、脳機能研究では統計にもとづく脳活動状況を標準として位置づけている。結果的に真の脳の機能を見落としている可能性がある。個々のものを出すとやはり違う。統計処理していないといけない。逆に脳科学としては個人データを認めない風土があり、統計的なものだけが唯一正しいと想定している。それで私がトレンドとして本当に標準化という方法、もし同じような考え方で標準化を言うのであれば、私はまずいと考えている。

C : ここの「標準化」はかなり計測の意味だろう。対象としての多様性は非常に大切で、ゲノムは皆さんで違い、遺伝子の数も皆さんで違う。ある遺伝子を持っていないとしても、システムとしては真っ当に機能していることが面白い。

Q : 特にエビジェネになってくると多種多様ではないか。

A : 多様性を明らかにするためにも標準的な仕様で計測することが必要である。

C : 標準化&多様性ということだろう。

(生命の階層性を越える構成的イメージング)

C : もう一つのトレンドは、ナノの世界の現象が、細胞レベル、細胞同士が結びついたシステム、そして機能として発現まで明らかにすることだと思う。それをイメージング技術で明らかにしていく。

C : バイオは非常に幅の広い話があり、例えば幹細胞を研究している人たちの計測ニーズは違う。山中先生にインタビューしたが、あそこの計測ニーズとしてどのぐらいリプログラミングしているか、未分化がどれだけあるか、そういうものまで見なければいけないという。がん化したり奇形腫ができたりするためである。その計測はまだ確立していない。

- C : 目指すべき未分化の状態にも、実はある程度幅（多様性）を持っている。どこまでいけばよいというゴールが、きちんと定義されていない。
- C : その辺では標準的な iPS 細胞があるのかという問題もある。
- A : 生命の場合、正常の幅という言い方が定義としては適切ではないか。一つにはならず、どうしてもある幅を持つと思う。

（標準化の言葉の明確化）

- C : 先ほどの標準の話で、標準化と標準、それから標準仕様、規格、みんな意味が違う。例えば材料もそうだが、材料の研究者に言わせると標準というとなんか嫌がる。標準というとみんな誰でもできるものという。そうでなくてもととの標準はトレーサブルであるということ。そこが保証されて標準。逆に言うと産業界では、とにかく決めなければいけない。満たすべき要件の場合が規格だ。逆にいうと先ほどの標準も生物の場合は規格なのか、本当のトレーサブルの標準なのか分からない。用語の定義がすごく大事だと思う。
- Q : 産総研でも標準物質を作って提供しているが、いかがか。
- A : 計量標準と標準物質は一つの体系がある。産総研では計量標準を 250、標準物質を 250、10 年間で整理してきた。一方、そういう計量標準、標準物質とは違った体系で工業標準、これが今言った規格の話だ。その意味では規格作りを合わせて進め、このような標準物質を使って測定するが、測定法にまた曖昧さが入ってしまうと結果がずれてしまう。測定法はこういう手順に従うというのが工業標準。それから実際そこで測っている人が本当にその手順に従って測っているかという意味での適合性評価や技術試験もセットで考えていく。
- C : すべてに当てはまる。電波法でも電波管理局はこういう方法で測って、その範囲内に収まっていれば放送局として認可するという話があり、みんな同じだと思う。今出てきたのは、この俯瞰について単純化しすぎているという意見であり、多様性や、定義自身の問題、工業標準や別の意味での標準を分けて考えなくてはいけないということが出てきたと思う。大体はこのような感じでいいが、少し付け加えるべきという線で一度まとめてみたいと思う。またご意見を伺うこともあるかと思う。次に話題を進める。

【ポリシーについて】

- C : 我が国において重要な研究開発のポリシーである。この議論でもかなり出てきた。計測に関するポリシーというものが今までなかったように思う。吉川センター長の言葉を借りれば「計測は mother of science」である。そこから来るもう少し広い概念でポリシーを作り上げていくにはどうしたらいいか。様々な考えがあると思うので、集約することはできないと思うが、皆さんのお考えを聞かせて欲しい。

（測定とキャラクタリゼーション）

- C : 個人的な経験になるが、いま ISO の TC22 というナノテクノロジーをやっている。そのナノテクノロジーの中に JWG2 という WG をつくったとき、その WG のタイトルをメジャメントとキャラクタリゼーションにした。メジャメントとは、ある基

- 準量があり、その基準量に対する比を求めることである。一方、キャラクターゼーションは、同じものを再生産するために評価すべき効果、あるいは調べておくべき項目のセットをつくることを言う（米国 NRC の定義）。私の計測に対する印象はメジャメントとキャラクターゼーション、この二つのセットを計測の柱として考えている。
- Q : これを政策に落とし込む場合には、どのような推進の提言になるか。
- A : 要するに、多くの計測課題をもう少し整理すべきであり、メジャメントとキャラクターゼーションは違うことを示すべき。
- Q : 生体におけるキャラクターゼーションとは一体何か、もう一度定義が必要では。
- A : 計測は二つの側面があり、メジャメントとキャラクターゼーションだと思う。
- Q : どうか。
- A : 非常にクリアに定義してもらった。メジャメントも様々な方法を模索している。物を再生産するために満たすべき要件も探りつつ進めている。この二つが同時に進行しつつあるような状態だ。iPS 細胞の場合も、調べたいことはエピゲノムの状態である。これを測る手法がスタックしている。同時にどれぐらいの幅を持ったときにキャラクターゼーションできたという要件を求めている段階だろう。ただし、この問題はきれいに切り分けた上でやっていくべきものだと思う。
- C : 研究開発の課題として、気持ちの上でも二つを分けて考えるべきだろう。
- Q : 測ること、その特徴付けをすることの二つは違うという点に対して意見はあるか。
- A : メジャメントは基準量に対して比較するため、SI トレーサブルな体系につながりやすい。一方、キャラクターゼーションは一種の混合量的なものであり、それが本当の意味での観測量であれば皆さんがそれを共通ベースに議論できるため、切り分けられると思う。
- Q : ナノ計測は、どちらかというともメジャメント側ではないか。
- A : 材料を理解するために測る、逆に測れたものを作るという両方の面がある。
- Q : 少し議論からずれるが、従来のように大艦巨砲主義、世界で一番いいもの、これでもない絶対測れないものをつくり、それを共有するというのはいいのだろうか。それともそこまでいかなくても、コストでいえば 10 分の 1 で 10 倍の人間、100 倍の人間がつくるだけの装置を作ったほうがいいのか。材料開発はいつもその悩みがある。
- A : 両方が必要なのではないか。
- C : もちろん両方必要だが、どういう割合で投資するかである。
- Q : ベストミックスということか。
- A : 先日、我々のグループで議論したのは、いろいろな装置を作りたいけれども、今年予算をこっちに持ってくると、あとはなくなってしまう。そのせめぎ合いがある。
- C : NIMS に限らず国全体としても議論がある。例えば SPring-8 や J-PARC などにもどの程度お金を費やすのか、もう少し小さくてどこにでもおけるようなものがある。両方必要なのだろう。
- C : 材料を作っている側としては何とかしたい。

(サンプルの前処理技術)

- Q : サンプルの前処理、つまりレプリカも含めて TEM の試料をどうやっているか。技術者がどんどん減っている中、準備の段階も含めて計測・分析であることの認識が欠けている気がしている。その辺はポリシーとしてどうなのか。
- A : それが今の悩みである。現場から前処理技術、化学分析が日本から消えている。物材機構でもそうだが、会社でも出来なくなっている。非常に危機を感じている。
- C : 簡単に FIB で切ったらいいというものだけしか分析できない。
- C : 前処理は結果の信頼性を決めている。少なくとも分散、ばらつきをリーズナブルに小さくするのが前処理であり、ケミカルのプロセスなど様々な前処理をやるが、それを無視して計測分析は成り立たないと思う。
- A : そのとおりである。
- C : やはりポリシーとしては、前処理まで含める計測が大事であることを含め、国の戦略を建てるべきだろう。それはコストの低減にもつながる。高価な装置ばかりが必要なわけではない。
- A : そのとおりである。ごく当たり前の方法でいいデータがとれるはずのものも、全部高級な装置に持ち込むことになる。ユーザーのレベルが下がっていることを示している。この分野のポリシーとして非常に重要だと思う。
- C : SPring-8 の申請をみても、こんなもの SPring-8 に持ってくる話ではないという案件が結構ある。装置やソフトが充実しているため結果は出てくるが、どうなのかなと思う。
- C : 一番いい例はジェットエンジンのオイルチェックである。1 回飛んだら、油を抜いて ICP で分析するが、例えば 5 年、10 年前は各社がやっていた。しかしリストラが進み、今では日本に 1 社しかチェックすることができない。全ての会社のチェックを 1 社が実施している。その 1 社の分析もかつては有機溶媒で 10 倍に希釈していたが、今は現場で 10 倍に希釈できなくなっている。今は希釈しないで、そのまま測れる ICP を作って欲しいとなっている。本当に危ない状況だと思う。

(計測の人材育成)

- Q : 人材のレベル低下に対して意見はないか。
- A : 長年やっていて感じるのは、大学では計測を教えていると言うが、大きな民間企業の中央研究所のほとんどは、その教育システムを持っていない。よって分析は分析センターに頼む形になってきている。コストにも反映されるわけで、相当、人口が減っているのは事実であろう。昔は生産量の割り算で開発費を落としていたが、今は開発費に対して分析コストが嵩んできた。そういう経緯もある。先日、JST の方と分析技術に関する若手の研究部会を立ち上げようという話にもなった。そのようなことを考えないと、なかなか裾野は広がっていかない感じがする。
- C : 以前、会社が最先端の機器を海外で売する場合、その性能を引き出す人材がいないと、分析結果が安定せず、商売も単発で終わってしまうという話を聞いた。専門分析官がいて、機器の性能を十分に示すことが出来れば、その周辺の機関も同じ機器を買ってくれるようになるとのこと。今後、機器と人材をセットで販売していく社会システムをつくるべきではないか。一種のポスドク問題の解消になるかもしれない。

C： 非常に大きなポリシーだと思う。

(計測作業の標準化)

Q： 我々は新しい計測機器をどんどん開発しているが、それを市場に出すには認証の必要がある。標準物質で予想された値になるかチェックして市場に出す必要がある。これは、我々のところだけではできないため、どこに依頼すべきか産総研などと話をしているが、つくばの方でも標準化には一生懸命でない。標準試料を持っている機関を考えたところ、東レリサーチなどの分析センターがあった。分析センターは出張で分析部隊を出さなければいけないために標準化を一生懸命やっている。民間にお願いすることは、社会システムとして非常に矛盾がある。標準化、前処理技術は、つくば等でコンスタントに行っていく必要があるのではないかと。

A： 物材の場合は標準化というと産総研があるため、どちらかというともうちょっと、その辺に力を入れるつもりでいる。もう一つは、いま標準化に力を入れているのは装置メーカーである。いま装置を中国に輸出しようとするすると必ず標準試料と標準化の分析のセットで売る。かつては分析システムさえ標準化していれば売れていたが、今ではもっときつい。標準物質はだめで、認証標準物質にしろとなる。17025 番をとると同時に試験所認定をとり、なおかつ自分のところで標準指導 (ISO のガイド 335) を使ったものをつくってセットで売ることになっている。そういう意味では日本も独法が標準化に力を入れなくなったことが浸透している。その結果、一部の装置に偏るため、グローバルな視点で見て前標準から標準化を含めた装置開発があってもいいのかなと思う。

C： 今のような標準化に対して産総研に期待が高いのはよく分かっているが、一方、最近の事業仕分けは大変乱暴な話で、第一段階では計量標準にかかるコストを半分にしては、という話から入ってくる。今は押し返せているが、必要性という認識と国全体の施策が合致していないところがあるように感じている。ぜひ、こういう場を通して本当の意味での裾野を広げる、あるいはしっかりと人材を育てていくことも合わせプロポーザルをいただくと大変意味のあることと思う。

C： 人材育成とセットで考えることが必要ということである。

(エネルギー分野の未解決問題)

C： 私は東大の原子力国際専攻である。本日の議論では、環境・エネルギー分野について、エネルギーの問題が具体的ではなかった。実際のエネルギー発生や、そのメカニズムについて抜けている。エネルギー問題について、中期的には原子力に頼らざるを得ないと思う。差し当たり原子力の中での計測は、原子炉の高経年化、長寿命化に対して照射損傷などをどう科学するのかの問題がある。一つ言えることは、その計測自体も先ほどから出ているが、メジャメントとキャラクタリゼーションの二つが分離できない。一つはすごい中性子の束が当たって、積算で、そのときに起こるサイエンスが分からない。分からないのにメジャメントで線量幾らであったからこんな欠陥ができたというが、その欠陥の数値は分かっても、だからどうなのか、壊れるのかわかっていない。キャラクタリゼーション的には学問として分かっているのに、そこで標準や線量など、そこを勘違いせずにやらないといけない。それ

から高経年化ということに関して、扱うものがプルトニウム、ウランをベースに考えなければ原子力は始まらない。となると必然的に原子力研究機構に委ねてしまう。イギリスも昔は放射線損傷があったが、今はみんな原研になってしまった。それはある意味 IAEA の査察を考えると致し方ないところかもしれないが、原研の中で見ると考え方が硬直化しているのではないか。核燃料サイクルと高経年化、この二つの言葉が踊って、計測ベースがあるからその計測でどういう数量化をして、そしてどういうふうに。耐用年数がきたらと聞きたがる。そういう手法ばかり開発したい。原子力は走っているからいいかもしれないが、我々アカデミックから見ればまずいのではないかなと思う。

Q : 具体的な提言を。

A : 私は JST 先端計測事業で、硬 X 線の技術として超伝導の放射線検出器をつくるっている。今まで核燃料の分析は化学的に分離し、油と水の分離、硝酸と油で分離し、プルトニウムを分離する。将来的にサイクルを回す基本技術として大事だが、大きなコストがかかる。昔事故があったが、緊急時の対応は人力でやるしかないという切り切っている。今後、その技術を刷新する上で、やり方、コストも含めて考えないといけない。まず考えるべき条件は、非破壊であり、非接触である。例えば出てくる放射線を測る。それで核燃料の物質、元素、分析、定量分析を行う。それを更にサイエンスをとらえた場合、原子炉の測定は既存の走っているシステムである。シンチレーターとか、比較的枯れてしまっている技術を複雑に組み合わせて測っていく。今の原子炉はそれで動いているからそれでいい、原研のほうで基準に合わせて法令に則って運転してくださいで終わってしまう。それだけでは、我々の持っているような検出器が使われない。

Q : 要するにもっと高感度な新しい検出器があるので、それをもっと利用していくようなポリシーがほしいということか。

A : そうしたら新しいサイエンスも開ける。最後に一つ、ファンディング機関には、原子力のことは原子力機構でいいやという雰囲気がある。このような科学的なところから攻める姿勢が大事だと思う。

(計測技術の多様な位置づけ)

C : 計測技術の位置づけについて、全く新しい現象を調べる計測手法の開発から、計測技術として確立されたもの、さらに計測装置としていけるもの、そう広がったような対象がある。今日の議論を聞いて、そのような意味では広がっている範囲がある。そうすると例えば計測装置として極端なことを言えばコマーシャルに出るようなものになれば要求される条件も違ってくる。全く新しい計測をする段階であれば標準物質もなければ人もいない。手法の確立もないし、対象も明確ではない、それならば、個々のニーズや体制を考えていけばいいと思う。

A : 今回は計測を使って科学の未解決問題を解決しようというところに絞ったため、ずれてしまったかも分からないが、今後検討していきたい。

(ナノ・物質科学における三次元化)

C : ナノ・物質分野のトレンドに「三次元化」を加えるべきではないか。材料を壊しな

がら三次元データを構築するなど、三次元化には様々な方法がある。最も重要で未開拓な分野として、非破壊的に内部の分布図を構成していくことが重要だと思う。我々の蛍光X線分析による三次元化は分解能が $15\ \mu\text{m}$ ぐらいしかないが、内部の 1mm 近くまで分析可能。

Q： それは非破壊か。

A： 非破壊だ。この表にもトレンドとして入れてもらいたい。

Q： どういう言葉がいいか。

A： 非破壊的な内部分析。生命科学の状況とよく似ていると思う。ただ、そのときにナノのレベルで見るのは非常に難しい。サブミクロンかミクロンオーダーであろう。

C： 半導体デバイスはナノかサブナノになっている。

C： 非破壊的に内部を分析することが入っていない。その状況を考えてもらいたい。

(生命科学における非侵襲計測)

C： 私の専門は生命科学である。非破壊、非侵襲の話があったが、これは生命科学分野の次のトレンドとして非常に大事だと思う。現在、*in vitro* で細胞からいろいろなものを取り出して実験するが、それを細胞の中に戻したときに同じことが起きていないことが多くある。非破壊計測をどのようにしたら実現できるのか、次のトレンドとして日本の先端計測のポリシーに取り入れていただきたい。

(計測の標準と前処理)

C： 先ほどの標準と前処理の話、計測メーカーではよく話題になる。標準物質がなければ分析機器のトレーサビリティができなくなるため、是非進めてもらいたい。また、JIS、ISO、ASME 基準など様々な規格がある。これらの統一の方へ動いて欲しいと思う。機器メーカーの立場から言うと、前処理は採算が合わない仕事である。今の装置はブラックボックス化しているため、前処理を適切に実施しているかで結果が違ってくる。前処理をしっかりとできる人材を育てる仕組みをしっかりと提言してもらいたい。

Q： 人材を育てても、その人材の就職口がなかったらどうするか。(笑)

A： なかなか認めてもらえずお金が回ってこない。前処理の重要性が理解して欲しい。

C： こういう場所で政策として明確にすることは大事である。

A： 前処理がしっかり行われないうえ、先端の装置であっても間違いを起こす可能性がある。きちんとした教育システムを構築してもらいたい。

(計測データの標準化)

C： 前半で生命とナノの話があり、後半で情報通信と環境エネルギーの話があった。そこで出たのがデータベース化やデータの共通化である。生命やナノにおいてキャラクター化がどこまでうまくいっているかという話があった。そこがしっかり定義された後は、データの共通化、データの共有、シミュレーションはあるが、計測結果をどうスタティスティックに使って次のものに活かしていくか。データが共通化されていないとうまく個々の分野の情報ができないと思う。私は各分野の専門家ではないので知らないが、それぞれの分野がどういう因果関係を持っているか。

- データの共通化とそれぞれの因果関係が分かれば標準化という意味ではデータの標準化、データベースの標準化。
- C : それはすべてに共通だ。
- Q : 日本国内の標準データベースは、研究者が全員共有できる状態になっているのか。
- A : それはかなり強いリーダーシップがないとできないだろう。先ほどライフサイエンスではある会社の装置に決めてしまったという話もあった。
- C : 計測データに関しては非常に多様なものがあり、どこかにきちんとまとめ上げることはライフサイエンスにおいて非常に大変なところである。
- Q : マテリアルはどうか。
- A : 材料データベースは割と進んでいる。例えば物材機構など、世界各国と相互リンクをしており、かなりいいデータベースになっている。
- C : 私も利用している。
- A : 鉄鋼と一部の材料、一部の高分子だけである。その意味では材料としてはまだレベルが低い。物性値に関しては圧倒的に NIST に負うところが多い。
- Q : そういうデータベースは、かなり恒久的なものとしてサポートされているのか。
- A : 共有基盤部門がデータベースステーションをメインの使命としてやっている。その職員はそれだけが業務である。世界中からデータベースを集めて評価し、改良している。この評判は使っている人にはいいが、使わない人には全く無価値であり、結構厳しい。
- C : 生命科学の場合は恒久的ではなく、短期プロジェクトでテストするため、近視眼的である。
- Q : 何か提言があるか。このようにしたらデータベースの共通化ができるなど。
- A : 様々なデータの因果関係を理解できれば、業界は違ってもテスト結果を共有できる。
- C : 自動車などはそうしないとだめだろう。
- A : 命にかかわる。それを制御することによって垂直統合で開発するなど違ったアプローチもできるようになってきた。モジュール式の考え方を持つため、データの共通化が必要になる。計測システムもモジュールでファンクショナルに分けていくべきだろう。
- C : この辺りで第 2 セッションを終わりたい。

② コメンテーター意見

【コメント：一村信吾 産業技術総合研究所】

全分野にまたがった共通的な話題として、これまで私が経験したところからのコメントになる。

(メジャランド)

計測の結果は皆が共有化しないといけない。「共有化するためには、こういうものを測りたいという個々の思いを、メジャランド（測るべき対象量）にしっかり落とし込む必要がある」。これをナノ粒子の安全性評価の事例で説明する。最初、リスク評価の専門家は測るべき評価項目の話をしていて、最後は計測評価の専門家と連携することで、各項目に対するメジャランドを設定することが可能となった。この連携が必要だと思う。

(トレーサビリティ)

もう一つは「測定結果は相互比較できないといけない」ということである。AさんとBさんが測った結果、それぞれ自己主張して共通の土俵に乗らないものであるとすれば、その結果はあくまでも自己主張で終わってしまうということ。よって計測量のトレーサビリティが必要であり、相互比較できる環境を整備する必要がある。その必要性をナノラベリングの事例で説明する。



ナノ・物質と計測の立場から

- 測定すべき対象をMeasurandに落とし込むことが必要。
事例；ナノ粒子の安全性評価
(リスク評価の専門家と計測・評価の専門家の連携)
- 測定した結果を相互比較できる環境を整備することが必要
事例；ナノラベリングの動き
(計測量のトレーサビリティの確保)

2010/12/01 科学における未解決問題に対する計測ニーズ独立行政法人 産業技術総合研究所

(リスク評価専門家と計測専門家の連携)

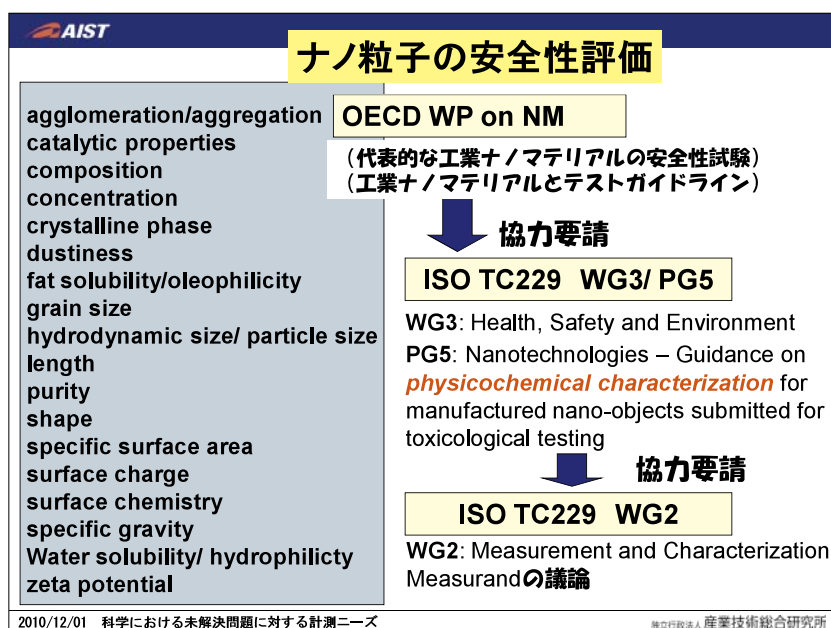
ナノ素材が出始めた 2004 年ぐらいから、ナノチューブ、フラーレンなどの様々なナノ素材が人体に危ないという警告が出てきた。そして 2007 年ぐらいから、カナダ、アメリカ、ヨーロッパにおける消費者や労働組合等からなる国際的連合が、ナノ技術とナノ物質の監視のための原則を共同発表した。これを進めたのが欧州議会のパブリック・ヘルス・アンド・フード・セーフティ委員会である。今年 6 月に委員会レベルでは RoHS 規制の対象に銀ナノ粒子とマルチウォール・カーボンナノチューブ (MWCNT) を対象にするという提案が出てきた。

ご存じのように RoHS 指令では、六価クロム、水銀、鉛など 6 種類の物質を規制対象

としており、日本からの輸出製品も、対象物質の含有量検査が義務付けられている。それが更に進んだ形で、今回 MWCNT と銀ナノ粒子が対象になりかけた。現時点では最終の委員会で否認されているが、このような話が益々増えると考えられ、ナノ粒子の安全性評価に関する関心が非常に高まっている。OECD の中ではナノ粒子の安全性を評価するワーキングができています。そのワーキングの中で、代表的な工業ナノ材料の安全性試験をどうするか、ナノマテリアルのテストガイドラインをどうするかという話が議論されている。OECD は明示的に ISO に協力を要請しており、ISO の WG3 というグループ（ヘルス・セーフティー・エンバイロメント）の中で、ガイダンス・オン・フィジカル・ケミカル・キャラクタリゼーションという検討項目が出てきている。

OECD でのナノ粒子の安全性の評価項目として、アグリゲーション／アグロメレーションなどの測るべき項目が示されている。この議論は、最終的にはこれらの評価項目をどうやって測るかということが主題になる。アグリゲーション／アグロメレーションの例では、別図のように Agglomerate / Aggregate size distribution というメジャランドが検討された。

このようにプロセスを通して観測量を共有化することは非常に重要である。今回の計測ニーズ調査のように、様々な計測対象や革新的な計測技術を示しても、一人ひとりの方の思いが違いため、さいごは翻訳して共通の土俵をつくる必要があるだろう。





Aggregation/ Agglomeration Stateの例

Measurands

1. Agglomerate / Aggregate size distribution; refer to particle size measurands; **unit [metre]**
2. Degree of agglomeration / aggregation: number of agglomerate/aggregate particles in comparison to the total number of primary particles; ratio; **unit [mole/mole]**
3. Aggregation Number: Number of primary particles in the agglomerate or aggregate; **unit [mole / mole]**
4. Distribution of number of primary particles per agglomerate or aggregate; type of quantity of distribution: number (0), length (1), area (2) or volume (3) distribution; (numbers indicate dimensions)
5. Agglomerate strength: Energy necessary to break apart the agglomerate in a specified environment; **unit [Joule/kg]**

WG2での議論内容

観測量を共有化することが必要

2010/12/01 科学における未解決問題に対する計測ニーズ
独立行政法人 産業技術総合研究所

(トレーサビリティ環境の整備)

続いて、測定結果を相互比較できる環境を整備することが必要ということである。ナノラベリング（CEN / TC352 規制）の事例を元に説明する。CEN というのは欧州のローカル規格を審議する団体で、TC352 はナノテクノロジー分野の技術委員会である。CEN / TC352 では、ナノ材料及びそれを含む製品に張り付けるラベルについて議論を始めている。この議論はナノ材料の市場監視を推進する欧州規制の一環である。製品輸出に際して同規格への適合性の表明が今後求められる可能性がある（この CEN の規格は ISO に提案されようとしている）。具体的にこれを適用すると、ナノ材料を使った製品であるということになると、JEITA（日本電子情報技術産業協会）で扱う電子製品など、様々な製品が対象になり、このナノラベル規制への適合や規制の動きをチェックしないといけなくなる。この中で、対象とするナノスケールを 1nm から 100nm までのサイズと定義しているが、具体的に誰がどのようにこのサイズを正確に測るかが問題になってくる。今後、メジャランドをしっかりと落とし込んだ上で、測定結果を相互比較できる環境を整備することが必要になるだろう。

ナノラベリングの動き：CEN/TC352

- ・ナノ材料及びそれを含む製品に貼り付けるラベル
- ・ナノ材料の市場監視を推進する欧州規制の一環
- ・製品輸出に際して同規格への適合性表明が求められる方向

ISO提案の動き

TS（技術規格）「工業ナノ対象及びそれを含む製品のラベリングのガイダンス」

目次
序文
0 はじめに
1 適用範囲
2 用語および定義
3 ラベリングの対象
4 「ナノ」という接頭語の使用
5 概要
6 購入のための情報
7 使用のための情報
8 購入後の情報
9 ラベリングの形式
10 ラベリング文
付録A（参考）概念的な枠組み

**2.4 ナノスケール
1nmから100nmまでのサイズ**

**誰が、どのように
サイズを正確にはかるか**

2010/12/01 科学における未解決問題に対する計測ニーズ 独立行政法人産業技術総合研究所

（標準試料による計測のトレーサビリティ）

最後に AFM（原子間力顕微鏡）でナノ物質を測る際の注意点について事例紹介する。例えば AFM でナノ構造を測ると、どうしても探針の形状が反映され、幅広く測られてしまう。したがって探針の形状情報が分からなければ、AFM を用いてナノ構造を正確に測ることはできない。

AFMでナノ物質を測る：探針形状の評価が必要

カンチレバー 反射コーティング
プローブ基板
プローブチップ

周縁部 (probe contour)
先端部 (probe apex)

ナノ(突起)構造が近接している場合
周縁部の影響大
 $H_m < H_o$
“浅く見える”
 W

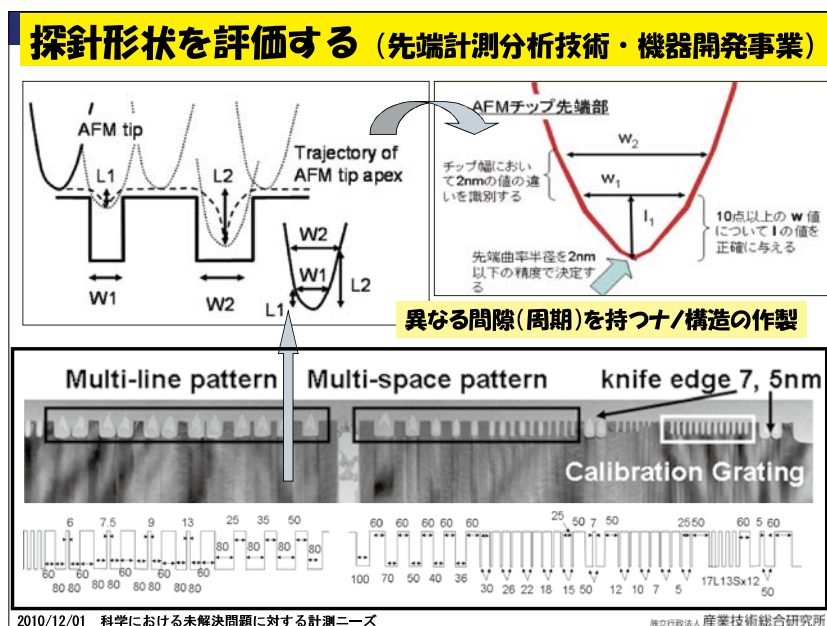
ナノ(突起)構造が孤立している場合
先端部の影響大
“幅が広がって見える”
 $W_m > W_o$
 W_m
 W_o

探針(プローブ)の
・最先端部
・周縁部
を測定することが必要

標準試料の作製・評価

2010/12/01 科学における未解決問題に対する計測ニーズ 独立行政法人産業技術総合研究所

この問題に対し、我々は JST の先端計測分析プロジェクトでナノ凹凸構造の標準物質をつくり、その溝幅に対して AFM チップ先端が入り込んだ長さの関係をプロットすることで探針形状を評価した。実際、2 種類のプローブを準備し、また、掛ける力を変えても最終的には測定誤差 1nm 以内に収まるほどの正確な計測が可能となった。今後の計測において、測る値が皆で共有できることも併せて考えるべきということで説明した。



【質疑応答】

(Q：質問、C：コメント、A：回答)

(欧州規制の戦略性)

Q： 現在、ファースト・ソーラ社（米）がカドミウムを原料とする太陽電池を欧州に入れている。本来カドミウムは欧州の規制対象であるが、責任を製造者に負わせるといってまとめている。経済戦略としての判断が入っているのではないか。

A： 最初は完全に規制の対象であったが、性能が出ないことがわかったため規制対象から外す方向に動き、その代わり自己責任を取ってもらう形にしている。欧州は予防原則（個人や1機関レベルでは反論できない大きな原則）の下、大きな規制をかけてくる状況である。これに対抗するためには、本当に物質リスクがあるかという共通土俵に、我々から欧州を乗せるような環境作りが必要だと思う。

(規制に対する科学への期待)

Q： ナノリスクを RoHS 指令に持ち込むということは、形態、形状、使い方などを問わないことを意味している。しかし、ナノリスクの本質は浮遊して人体に入る、皮膚接触で取り込まれることだ。実際、FRP（繊維強化プラスチック）など固体材料の中にナノカーボンチューブを使わなければ、次世代ジャンボジェットは飛ばない。どう考えるか。

C： エアバス社が反対したら、それはまた変わるのではないか。

C： だからご都合主義だと言っている。ここまで見ると基準としての権威が失われる。

A： ナノ物質リスクについては生体影響の論文が出ているが、論文の一つの傾向は、例えば普通では摂取できない量を入れた場合にリスクが生じたという報告である。リスクがあったことを報じた論文は1000例やって1例でも、アクセプトされるであろう。逆にリスクがなかったことは論文にならない。この意味でも、しっかりとした共通土俵の下に本当のリスクとベネフィットを比較するような議論をしないといけない。今はその土俵がはるか先のところで、拒否反応が大きくなっている。一般市民からの期待に応える意味でも、このような流れに対して真の情報をサイエンス

の世界から発信することだろう。

C： 今後のシステム的な強化に日本の活路があるのなら、先行して標準化をリードする戦略が必要である。

【コメント：二瓶好正 東京理科大学】

本ワークショップ開催の趣旨に賛同する。特に「計測技術は“mother of science”」であり、「一流の研究者は計測プロセスや機器の価値を重視し、また新たな計測手法の開発にまで踏み込む研究者である」という考え方に共感を覚える。我が国の研究者コミュニティもこのような認識の下、研究に取り組んで頂きたい。

(啐啄同時)

本ワークショップは計測ニーズを俯瞰するということで、各分野から多様なニーズが抽出されたと認識している。今後の課題としては、より重要な計測技術、すなわち国として優先的に投資すべき研究開発課題を探索することが挙げられるだろう。その際、ポイントとなるのはニーズとシーズとの邂逅である。ここでは、「啐啄同時」が最も重要であり、効果を発揮するということを述べておきたい。すなわちニーズとシーズの三次元的な空間と時間的なタイミングがぴったり合ってこそ“新しい生命が誕生する”が如く、大きな成果が生まれるのである。本ワークショップの結果からシステムティックに計測ニーズにおける本質的重要課題がリストアップされることを期待している。

(海外における計測の政策)

また重要課題の抽出にあたっては、海外の動向を把握することも重要である。例えば、米国はブッシュ政権時代に米国の競争力強化を目的として、米国競争力イニシアティブを策定している。そして、NISTにおける計測技術の開発研究に大規模な支援を行っている。これは計測技術がイノベーションの要であるということをはっきりと打ち出した政策と言えよう。また、気になるのは中国の動きである。我々が文部科学省で先端計測の事業を立ち上げたときに、先端的計測技術を自ら生み出すということが如何に重要であるかという議論をした。実はいま、中国はこの時と全く同じ論理で、特に生命科学をターゲットとした計測技術の開発を推進している。このように諸外国は自国の開発水準や他国の政策動向を勘案し独自の施策を打ち出している。我が国も今後の施策立案にあたっては、このような他国の思想や理念を把握し、戦略的に取り組む姿勢が必要である。

(生命科学の課題の整理)

最後に生命科学分野の課題について述べておく。実は、1967年米国の National Research Council が材料科学の研究推進に当たっての指針を発表し、材料研究における“キャラクターゼーション”の重要性を極めて具体的に指摘した。即ち、「材料製造、物性研究、使用に際して、重要でかつその材料を再生産するために必要な、組成と構造（欠陥を含む）に関する特徴や知見を十分明らかにすること」として、材料に関する研究論文には必ずキャラクターゼーションに関するデータを添えることが必須であると結論した。それを怠ると研究成果に関する信頼性が不足し、研究費が無駄になると考えたからである。我が国でもその後、特にセラミックスの分野において、研究者の意識改革が進み、セラミックス研究に新たなムーブメントが誘発されている。実はこの時の状況と今の生命科学の状況は極めてよく似ていると思われる。生命科学の分野でも上記のような取り組みを参考にして、生命系の本質の探求に係わる計測・分析に関する方法論の体系を構築する等、新しい潮流や胎動が生まれることを期待している。

【コメント：澤田嗣郎 科学技術振興機構】

私は東京大学工学部で分析化学を教える立場におり、化学材料の評価技術に関する研究に携わった。

(キャラクタリゼーションの重要性)

計測は「メジャメント」と「キャラクタリゼーション」で異なるという話があったが、当時の我々は「キャラクタリゼーション」について随分と議論した。計測は一つの技術であると考え、「キャラクタリゼーション」のために何と何を測れば再現性を持つ結果が得られるのかを探求した。一方、「メジャメント」では、先端計測の感度を2倍にする、更に感度を上げる、分解能を上げるなど、より高度化を目指す探求である。どちらかと言えば、「キャラクタリゼーション」の方が、科学的な本質の追究であると思っていた。

(計測はサイエンスそのもの)

大学にいて最も悩んだことは、東大という変わった学生がたくさん集まるところで、彼らに興味を与えることであり、このため「計測とは何か？」を常に考えていた。先ほど金属の劣化に対する問題提起があった。必ず金属はどこかで破壊するということは、その兆候が必ず現れるはずである。しかし、いつどこでその兆候が現れるのか全く見当がつかない。突き詰めていくと「現象の可視化」にいきつく。生命科学分野でも、細胞を積み上げていけばいつかは生命現象を発現する、蛋白質を幾つか積み上げていけば新しい生命現象が現れ、どのような機能を持っているのか知ることになる。これはサイエンスそのものと言える。

計測は「Mother of Science」と吉川先生が言ったが、私はこれから先、「計測＝（イコール）Science」だと述べたい。昔、計測は技術の一つにすぎなかったため、他のサイエンスの世界から見ると格下のような位置であった。しかし、最近は計測を知らないと次の課題にステップアップできないほど重要度が増してきている。この先端計測事業も7年目に入り、だんだんと計測の重要性が認識されてきた。

(分析機器の歴史)

米国のNPO組織であるCHF（Chemical Heritage Foundation）と付き合いがある。そのプレジデントは膨大なお金、募金を持っており、分析機器の遺産に注目してコレクションをしてきている。古い分析機器を集め、それを時系列的に並べると、その時代の先端の科学（この場合は化学分野）や、それを支えていた、あるいはそれを牽引していた技術が見えてくる。大変興味深いものであった。

日本化学会には数年前から化学遺産委員会ができており、名を上げて功なりの立派な先生方、企業の研究所長、重役、社長だった人が活動している。もっぱらの関心は、例えば倉敷に第1号の硫酸をつくる装置があったとか、第1号の曹達をつくる機械やアンモニアをつくる機械があったことなどを調査し、それを遺産として認証しているわけである。こちらは米国CHFの試みとは異なり製造装置への興味である。つくづく昔の日本はものづくりばかりやっていたのだと感じた次第である。私も分析機器を集めたらどうかと提案したが、あまり理解されなかった。昔、分析は道具としてそれほど重要視されなかったことを知り、少しがっかりしている。

【コメント：岩槻正志 日本電子株式会社】**(産学官連携の仕組みづくり)**

日本の計測検査機器産業は、世界の基礎研究や産業技術を支えている基盤技術であり、長く世界で優位性を維持してきた。しかし、昨今世界での競争力の低下が目に見えて進んできている計測検査器機産業は、日本の技術創造立国としての立場を維持するためにも今後も国内に残し、更に強化すべき産業の一つと考える。特に、素材産業やナノテクノロジー、半導体デバイスや創薬・医療の分野の発展には最先端計測検査器機は欠くことのできない技術である。物理や化学分野でのノーベル賞受賞にもこれらの技術が貢献している事例が多い。また、輸出により外貨獲得の大きな産業でもある。しかしながら、現在に至るまでこれらの技術に対する評価は決して高いものではなく、理科離れも含め国際競争力の低下が顕著になってきている。

このような中で、産業的な収支の観点から多くの貴重な技術が捨てられてきた。技術は総合力であり、そのような技術を組み合わせ、産業界とアカデミアと一緒に開発をおこなう仕組みを作ることによって国際競争力を強化する新しい技術を開発する必要があると考える。さらには、このような産業は貴重な理科系学生の受け皿としても必要である。開発資金の不足に悩む計測検査器機産業を維持する仕組みとして、開発商品化コストの軽減のためにも、トータル計測検査器機装置をセンター方式にすることなどを検討し、開発途上にある技術や高額なハイエンド機器は国の支援の元、応用面に力点を置いて統合的に開発していくスキームが必要ではないかと考える。その際、産学官連携により各分野の最先端の研究者と課題を持ち込み、一元的な計測検査器機を開発する仕組みが求められる。アカデミアは、その結果を研究成果として発表していき、企業は製品化により、収益につなげる仕組みが必要と考える。今後の装置開発は、ユーザーオリエンテッドなマーケット・インの考え方が重要と思う。

(日本の計測機器メーカーの状況)

日本の多くの計測機器メーカーは、開発資金が不足しているのが現状である。去年、アジレント社がバリアン社を買収したが、その際アジレント社は常時70億ドル程度のキャッシュを確保していると聞いている。欧米の計測検査機器メーカーはキャッシュビジネスを重視しており、豊富な資金を活用して積極的にM&Aを行って、必要な技術や企業規模の拡大を行い競争力の強化を図っている。一方、日本では雇用確保の問題などもあって、キャッシュフローのための雇用調整はできにくい。また日本国内は、製造業の国外シフトや大企業の中央研究所などの削減によりエンドユーザーが減っているため、装置メーカーも統合や協業により体力の強化が必要になってきていると思う。しかし、現状の日本の文化では簡単にできないところがある。

装置開発における基礎研究は、いろいろ支援の仕組みが出来ていると思う。しかし大型計測検査装置の開発には、本来は商品化の段階（いわゆるα機の段階）で膨大な開発資金が必要になる。この辺の支援の仕組みが必要ではないかと考える。特に、高額な資金が必要な基礎研究から装置開発のプロセスへの支援を行い、その後製品化を行い利益を上げるのは装置メーカーの仕事であり、装置メーカーは利益を上げて税金の形で国に還元する仕組みを考えても良い時期ではないかと思う。また製品販売は、国外にて利益を求める方向で対応する必要があるだろう。例えば、カザフスタンやブラジルなどの資源国や中国やインド

のような発展が著しい新興国が考えられる。今、資源国は資源で得た資金で付加価値の高い産業へシフトするため、計測検査装置を充実させる政策を取っている。中東などでは脱オイルを目指して、大学や様々な研究所をつくっている。そこでは単に装置を買うのではなく、ラボの設計から装置の操作の指導までしてほしいという話も多く来ている。

1. 技術力:

- ・計測検査機器(分析装置も含む)関連で、日本がNo.1になっている項目が大幅に減ってきており、日本の競争力の低下が目立ってきている。
- ・装置開発に関して、研究機関は仕様をメーカーに丸投げにしているケースが増えてきていないか？要素技術や基礎的計算を研究機関で行うと早期開発に繋がり、Win-Winの関係が構築できる。
- ・大学や独立行政法人での計測検査機器開発の力が研究者の人数も含めて落ちてきていると感じる。講座の閉鎖や、大学での計測検査機器のステータスが低下している。
- ・検査機器に興味を持って飛び込む学生が減ってきていないか？
- ・キーテクノロジーを海外に依存しているケース、あるいは依存せざるを得ないケースが増えてきている。また、ニッチな技術をコツコツとやる中小企業が減ってきている。
- ・海外企業が豊富な資金力でM&Aで規模を拡大してきている(円高も含めコスト面でも効いてきている)が、日本の検査機器メーカーは提携が遅れていないか。
- ・最近では、半導体などでは装置性能が良いから売れるわけではなく、プロセスも含めた総合力が問われてきており、資金力のある会社やアライアンスを組んでのビジネスが多くなってきている。
- ・計測検査機器関連は、日本カルチャーに合ったお家芸であったが、このままでは海外メーカーと組んでの取り組みが増えていく可能性が多い。
- ・技術の進歩が著しく、技術の手詰まり感が出てきている。各要素技術が高性能化してきており、開発コストが膨大になってきている。
- ・過去には、装置の一部に大幅な改良が有ると大幅な技術革新が起こったが、現状では一つ一つの技術改良の結晶として装置性能が大幅に進展する場合がある。
- ・技術的ユニークさとビジネスの両立が困難な時があるが、独立行政法人等での維持は可能ではないか？(超伝導TEMの例)

(計測機器の輸出規制)

日本の輸出規制についても手を打たなければならない。この辺は素人で詳しくないが、アメリカの商務省と日本の経産省は輸出貿易管理令において規制のレベルが異なる気がする。例えば、中国へ半導体関連の装置を輸出しようとするアメリカでは65ナノや45ナノ技術ノードの製品を売っている。ところが日本では許可が90ナノノードまでしか出せない。一方、韓国からは65ナノや45のノードのデバイスが輸出されている。もっとダイナミックなやり方や他国と同等の仕組みの中で競争をしていかないと、日本だけが競争の中で取り残されていく可能性がある。

勿論、国家戦略的な配慮は必要であるが、そのため装置産業が衰退したのでは何のための規制か分からなくなってしまうと考える。

2. 市場力:

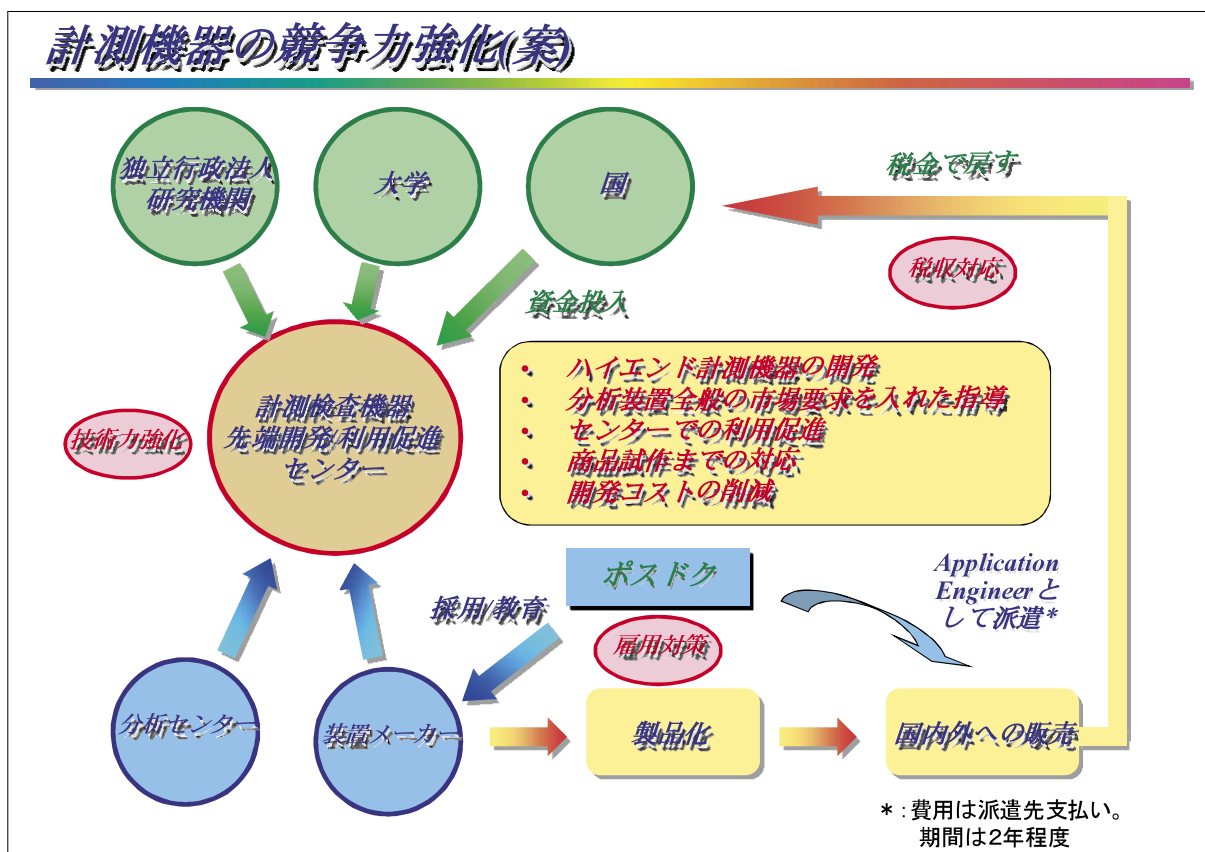
- ・半導体等では、半導体工場の集約化が進んでいる中、装置メーカーの集約化が進んでない。
- ・市場で製造業の海外シフトが多くなり、装置に対するフィードバックが弱くなってきている。現場からのニーズ・シーズが入りにくい状況である。秘密主義が多く、一緒に問題解決を行う風潮が低い。
- ・メーカーで景気に一番影響されるのが計測検査機器であり、一番最初に予算がカットされ、一番遅く予算が付くのが通常。出来れば検査などは省きたい工程のようである。
- ・産業界では、ロードマップ中心で動いているが、台数の多いイン・ラインより、Fabに1台の at-line 開発や検査センターの off-line 化して装置を削減したいのが本音である。
- ・海外での販売網/サービス網も含めこれらの整備無くして今後の輸出の伸びは期待できない。また、輸出貿易管理令など諸外国に比べ厳しい条件も多く改善が必要である。
- ・利益の出やすい小型計測機器はコスト面で海外生産の必要があり、国内での生産は減少傾向。
- ・計測検査機器の新興国での成長は著しいものがある。ナノテク・環境対応(中国)、医薬、成長産業(インド)、ナノテク・資源(ブラジル)、脱オイル(中東)、脱資源(カザフスタン)。
- ・輸出貿易管理令など、輸出産業にとって厳しいものがある。
- ・半導体業界などでは、ロードマップに振り回され投資が回収できないうちに次の開発ロードマップがスタートするなど、ハイエンド装置にとっては厳しい。
- ・商習慣上、Conditional PO や Trial Installation があり、投資資金回収までに時間がかかっている。
- ・ハイエンド装置は売上数が少ない割に開発費が膨大になり、個々の装置のコストが上がり普及を妨げる結果となる。開発費を何らかの方法で償却できれば製品価格を下げられると思う。
- ・各分析分野でも専門化されているケースが散見される。最近、日本電子にはバイオ系の若い研究者が入ったが、最近開発した環境制御 SEMとスパイラル TOF-MSを組み合わせるユニークな研究を行っている。異分野での意見交流は重要な Solution を見いだす方向である好例。

3. 資金関係:

- ・企業が資金力の関係で大型投資が出来なくなっている。小型の分析装置は投資可能であるが、小型装置はコストの面の優位性で新興国産が伸びてきている。
- ・日本では労働市場の流動性が低いため、キャッシュフロー(CF)の維持のため調整が不可能であり、資金力が弱い。
- ・開発費の税制控除や法人税の控除、あるいは試作機の資金援助でのサポートなくして大型装置の開発は不可能である。
- ・企業同士の提携やM&Aが少ない日本では、日本メーカー同士の価格競争が激しく足の引っ張り合いが頻繁に見られる。

4. 提言:

産学官の英知を集めた総合的な計測検査機器のあるべき姿を追求するとともに、若手研究者を巻き込んで日本の基幹産業としての位置づけ、All Japanの方向性が必要。拠点校を中心とした講座の開設や、計測検査機器を総合的に対応できる研究機関、製品化のための企業の参画が可能な開かれたセンターが必要である。計測検査機器は、あらゆる分野の基盤であり、異分野・異業種の情報交流の場としても必要である。特にハイエンド装置は開発コストが膨大であるとともに、組み込まれる要素技術も多岐にわたり、基礎研究から製品試作までの公的機関による支援は重要である。このことが日本の高度な技術レベルと産業を守り、強いては雇用を守ることになる。企業はこの技術をベースに海外で利益を上げ、研究費に再投資するとともに、利益を税金として還元する仕組みを作る必要がある。



(4) クロージング

【オーガナイザー総括：吉川弘之 CRDS】

(学問領域における計測学)

科学が確固たる進歩を遂げてきた根拠として観察があることを否定する者はおらず、しかも定量的観察としての計測の重要性を疑う者はいない。それなのに現在、計測という分野が盛り上がらないのは不思議である。多くの学問的な課題解決のために計測の進歩が期待され、実際に研究のフロンティアが計測の進歩によって拡大されている。それなのに科学計測器産業は苦戦し、計測学を主題とする学術研究も盛んであるとはいえない。しかも大学における教育も十分とはいえない状況にある。これは、計測分野だけの問題ではなく、科学研究全体にかかわる非常に深刻な問題である。

このことは本調査研究を踏まえ、提案作成に至る過程で明らかにされてゆくことであるが、この時点で、計測を学問領域の一つと規定し、大学の組織にも計測学科を置いた過去の経緯に問題があったと感じている。計測は科学そのものだったのではないか。したがって、計測の科学における位置づけの論理的考察が必要となる。

どんな学問分野においても、計測の限界に突き当たると科学の進歩が止まる。従って計測は科学の母 (mother of science) といってもよい。現在の素粒子物理をみるとわかりやすい。理論研究者が仮説を提起し、それを実験研究者が検証する。この場合実験研究は計測が主体である。両者の存在理由が、学問の世界ではっきりしているだけでなく、社会的にも理解されている。他の分野でも、仮説的理論が観察によって実証される構造は科学にとって基本である。分析でなく構成を主体とする工学ではこの関係が明瞭ではないが、それを深く考えずに機械工学と電気工学に並んで計測工学があるように考えたのは恐らく単

純すぎたと思われる。

改めてこのことを考えることによって問題を突破できる可能性がある。それは計測学を、工学での機械工学や電気工学、更に広く物理学、化学というディシプリンの平面的な区分けの中に置くのではなく、すべての領域に対して独自の関係をもつ一つのメタサイエンスと考えることである。物理学の理論と実験を代表とし、生体研究の状況設定と挙動観察、物性研究の創成と物性測定、化学研究の新化合物とキャラクタリゼーション、多くの工学研究における設計と機能測定などに現れる観察と測定、それらは物理学のように分業してはいないけれども、仮説とその実証という科学の基本的行為がそこにある。この基本的行為についての科学がメタ計測学であり、それが各領域の実際の計測を関係づけるという構造を、計測学が持つことが必要である。

（未来を予測する計測：「四次元レンズ」）

科学研究における仮説と検証という連鎖は、無限の現象の背後にあってそれを実現する有限の法則を発見しようとしているのである。これは真理の探求という言葉で表現され、我々は多くの法則を手に行っている。その中で、検証の主役として計測があった。

しかし環境研究における計測は少し違う。環境研究は環境の変化の背後にある法則を発見するだけではない。もちろん二酸化炭素の空气中濃度の上昇により温暖化が起こるといふ法則の発見は真理の探究研究の結果である。しかし、その法則を知るだけでは不十分である。それに加えて今どのような状態にあるのかが重要であり、法則と現在の状態との組が、人類にとって必要な行動を決める。

生命科学においても、生命現象の背後にある大原則を発見する探求と、現在の地球環境が人間の健康に与える影響の探究がある。今いる人間の健康が大丈夫かを知ることが大事であり、これは生命の原則では解けない。このことは計測対象が倍増したことを意味していて、計測の責任が大きくなったことを意味している。

環境研究では、実験室でなく現実に多くの計測点を地球上において観測する。またあらゆる経路を対象として窒素の循環を調べる。窒素の循環理論だけでなく今の窒素の循環量が生物多様性にとって大事である。

そして明日どうなるかも知らなければならない。これは予想問題であり、地球シミュレータは気候温暖化の将来を予測している。これを新しい計測の課題と考える。

予測として計算機シミュレーションを行っているが、私はそれをもう少し大きな概念で「四次元レンズ」だと考えている。「顕微鏡」は物質を微細に見ることであり、二次元の拡大である。また、三次元として遠くを見ることは「望遠鏡」である。そして明日を予測することは時間軸を入れることで、我々がまだ手にしていない「四次元レンズ」となる。この「四次元レンズ」とは一体何なのか、これは計測研究者にとって極めて大きな話題だと思う。生命科学においても、常に進化している対象は昨日の法則に従う保証はなく、時間は従来と異なる意味をもつ。たとえばきわめて小さな時間内に起こる現象が、マクロなゆっくりした変化とどのような関係があるかを知ることが、科学の新しい課題である。ぜひ「四次元レンズ」の探求をお願いしたい。

（十分条件を満たす計測機器産業と人材育成）

計測機器の研究開発も計測研究の大きな責任を負っている。それは学術研究内の計測と

は違いがある。ある物質を研究している研究者はその物質の固有性を前提として特定の性質を知ろうとしている。しかし計測機器は、ひとつの物質のある性質ということだけでなく、多様な計測対象について計測が可能な場を創り出さなければならない。

これこそ前に述べたメタ計測である。現在のところ機器開発のためのメタ計測学が完成しているとは言えないが、その創出は計測機器の発展と深く関係してゆくことが予想される。ある性質の計測が特定の研究で可能になったことが計測の必要条件を満たしたのだと考えれば、計測機器は十分条件であると言える。産業の方は、両者は論理的な構造が違うことを認識した上で、計測機器の研究開発が基礎研究にとって固有の重要性をもつことを主張し、その上で、多く出されている計測ニーズの課題に対応していただきたい。計測機器を作る、計測機器を使う、計測結果を活かす、狭い意味の研究者とは違う人材も相当必要なはずである。この人材をどうやって教育するかも含めた計測機器産業論の展開によって社会的認知を獲得することが必要である。

(今後の取組みへの期待)

大学、研究所、企業の研究者、機器開発者、そして CRDS のフェローによる会議で深い議論がされたことは極めて意義深い。「メタ計測学」を作る必要があると言ったように、計測分野は研究領域としても未完成であり、研究者、開発者とともに、ファンディング機関を含み政策的にも考えてゆく必要がある。この議論を出発点とし、協力しつつそこへ向けて計測の意義を展開していくことが、このグループのミッションであり、同時に今日参加していただいた方々と共有すべきミッションだと思う。安易ではないが、計測が我が国の多くの研究分野の水準向上に必要不可欠であることからいって、そのミッションを果たすことを心から期待する。

5. 4. 米サイエンス誌 創刊 125 周年 科学の未解決のナゾ 125

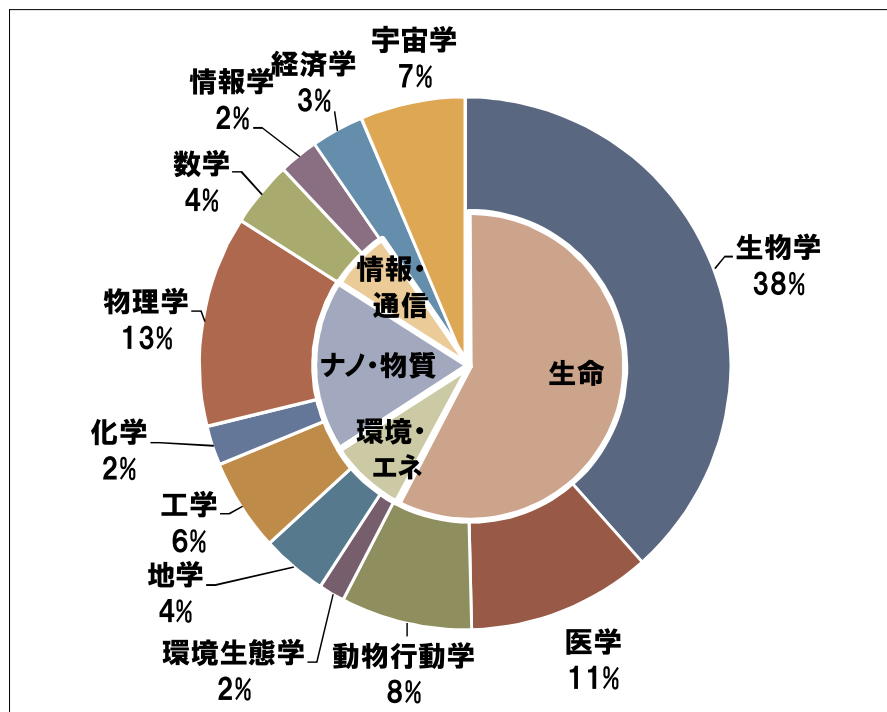


図7 カテゴリー別 項目割合

※中円は、JST「科学における未解決問題に対する計測ニーズ」調査で対象としている「生命」、「ナノ・物質」、「情報・通信」、「環境・エネ」の4分野との対応を示す。

生物学

NO	未解決問題
2	「意識」の生物学的基礎になっているのは何なのか？
3	「人間の遺伝子」は、なぜこんなにも少ないのか？
4	「遺伝子変異」と「個の健康」とはどの程度関連しているのか？
6	人間の「寿命」は何処までのばせるのだろうか？
7	何が「器官再生」を制御しているのか？
8	(細胞リプログラミング) 皮膚細胞はどうしたら神経細胞になれるのか？
11	我々は「宇宙で唯一」なのか？
12	地球上の「生命」は、どこでどのような「誕生」したのか？
13	何が「種の多様性」を決定するのか？
14	(人間の起源) どの「遺伝子変化」が、私たちを人間にしたのか？
15	「記憶」は、どのように格納されて検索されるのか？
20	どのようにして選択的に「免疫反応を止める」ことができるのか？
56	「太陽系のその他の星」に、現在(過去に)、「生命が存在」する(した)のか？
58	「蛋白質の折り畳み」を予測することができるか？
59	人体内に「蛋白質」は何種類が存在するか？

60	「蛋白質」はどのようにその「結合対象」を見つけるか？
61	「細胞の死亡形態」は何種類か？
62	何が細胞内における「スムーズな通行」を維持させているのか？
63	どうして細胞成分は「単独 DNA で自己複製」することができるのか？
64	ゲノム機能において、「RNA とは異なる形態である役割」は何ですか？
65	ゲノム機能において、「テロメア」と「セントロメア」を捧げる作用は何か？
66	どうしていくつかの「ゲノムサイズ」はとても大きく、別のいくつかはかなりコンパクトなのか？
67	ゲノムの中の「ジャンク」はどんな作用を持つのか？
68	新技術は、「ゲノムシーケンシング・コスト」をどれ程下げることができるのか？
69	器官や個体はどのように「成長」をストップさせるのか？
70	突然変異を除いて、「ゲノム書き換え」はどのように受け継いでいるのか？
71	胚胎期において、「不釣り合い」はどう決定されるか？
72	「翼」、「ひれ」、「顔」はどのように発生し、進化するのか？
73	何が「思春期」を誘発したのか？
82	何の物質が「生物の日内時計」と同期しているのか？
84	我々はどうして「睡眠」するのか？
85	我々はどうして「夢」を見ることが出来るのか？
97	「生命の樹形図」は、生命間の系統的な関係を最も良く表現している方式か？
98	地球上にどれだけの「種」がいるのか？
99	何が「種」なのか？
100	多数の種において、なぜ「横方向の伝達」が発生するのか、また、どのように発生しているか？
101	誰が「世界共通の祖先」か？
102	「植物の花」はどのように進化しているのか？
103	植物はどのように「細胞壁」を造るのか？
104	どのように植物の「成長を制御」しているのか？
105	なぜ、全ての疾病に「免疫」を持つ植物はないのか？
106	外部「ストレスの環境下」で、植物が変異する基本は何か？
107	何が「種の絶滅」を引き起こしているのか？
108	種の「絶滅を免れる」ことはできるのか？
109	「恐竜」は、どうしてかなり「巨大」だったのか？
111	ここしばらく、どれだけの「人種が共存」していたか？どのようにそれを関連づけるか？
115	何が「人種」で、人種はどのように「進化」するのか？

医学

NO	未解決問題
22	有効な「HIV ワクチン」はあり得るのか？
74	「幹細胞」はすべての「腫瘍」の中心に位置するのか？
75	腫瘍は、「免疫のコントロール」を行いやすいか？

76	「腫瘍化」のコントロールは治愈より容易か？
77	「炎症」はすべての慢性的な疾病の主要原因なのか？
78	「狂牛病」はどのように発症するのか？
79	脊椎動物は、感染症に対抗するため、どれだけの「先天的な免疫システム」に依存しているか？
80	「免疫の記憶」は、「抗原」に対する慢性的な暴露を必要とするか？
81	なぜ「妊婦の免疫」は、「胎児」を拒絶しないか？
88	一般の「麻酔剤」はどのように効力を発揮するか？
89	「精神分裂症」の原因を招くのは何か？
90	「自閉症」の原因を誘発するのは何か？
91	「アルツハイマー」患者の生存はどこまで延ばせるか？
92	「中毒（常用）」となる生物学的な基礎は何か？

動物行動学

NO	未解決問題
16	「協調」的な振る舞いはどのようにして発展したのか？
83	「移動性の微生物」は、どのように移動ルートを発見するか？
86	「言語学習」にはどうして臨界に達する期限が存在するのか？
87	「フェロモン」は人類の行動に影響しているか？
93	「脳」には「道徳的な観念」が組み込まれているか？
95	どれだけの「個性」が「遺伝子」から来るのか？
96	「性嗜好」の生物学的な根源は何か？
112	「近代的な人類活動」へと昇格させたのは何か？
113	人類の「文化」の根源は何なのか？
114	「言語」と「音楽」の進化の根源は何なのか？

環境生態学

NO	未解決問題
25	「マルサスの予測」（「世界の人口増」は限界に達する説）は、今後はずれ続けるのか？
110	「地球温暖化」に対して生態システムはどのように反応するのか？

地学

NO	未解決問題
10	「地球の内部」はどのように働いているのか？
23	「地球温暖化」によって世界はどこまで暑くなるのか？
53	何が「氷河期」を誘発したのか？
54	「地球磁場」に反転させる原因は何か？
55	実用的な「地震予報」の指標はあるか？

工学

NO	未解決問題
24	安価な「石油を代替」するものは何か、いつ実現するのか？
39	研究者が作ることのできる「最強のレーザー」はどの程度か？
40	研究者は完璧な「光学レンズ」を作ることができるか？
41	常温で働く「磁性半導体」はつくることができるか？
43	「乱流」のダイナミクスと「粒状物質」の運動の普遍的理論を開発することができるか？
49	「太陽光電池」の効率の究極点はいくらか？
50	「核融合」は未来のエネルギーになるか？

化学

NO	未解決問題
18	化学的な「自己組織化」はどれだけ推し進められるのか？
48	合理的な「化学合成」のリミットは存在するか？
57	自然界における「ホモ・キラリティ」の起源は何か？

物理学

NO	未解決問題
1	「宇宙」は何から作られているのか？
5	「物理の法則」を統一することは可能なのか？
21	より深化した原則が量子の「不確定性」と「非局所性」の基礎になるのか？
32	なぜ「反物質」より物質は多いのか？
33	「陽子」は「減衰」することがありえるか？
34	「重力の正体」は何なのか？
35	なぜ「時間」はその他の次元単位と異なるのか？
36	「クオーク」より小さな素粒子は存在するか？
37	「中性子」は自身の反粒子か？
38	全ての「相関電子系」を説明できる統一理論はあるか？
42	何が「高温超伝導」の背後にあるメカニズムか？
44	安定した「高い原子量の元素」は存在するか？
45	「固体中の超流動」は起るか、あればどう解釈するか？
46	「水の構造」とは何か？
47	「ガラス状態」の物質の本質は何か？
125	「素粒子物理学」の標準モデルは、しっかりとした数学的基礎に基づいているか？

数学

NO	未解決問題
120	「楕円曲線」には合理的な解が無限に存在することを確定する簡単な方法はあるか？
121	「ホッジサイクル」は、代数的サイクルの和として書かれ得るか？
122	数学者は「ナビエ・ストークス方程式」の解を提供するか？

123	「ポアンカレの試験」は、四次元空間で球を確定することができるか？
124	数学的に興味深い「リーマンのゼータ関数」の0解は、すべて $a+bi$ の形式を持っているか？

情報学

NO	未解決問題
17	「生物学的データの海」から、どのような大規模な構図が現れるのか？
19	現状の「コンピューティングの限界」はどのくらいか？
94	「コンピュータによる学習」の限界は何か？

経済学

NO	未解決問題
116	どうしていくつか国家は「成長」し、残りは「沈滞」するのか？
117	政府の「高額赤字」は国の金利と経済成長率に対してどんなインパクトがあるか？
118	「政治的自由」は「経済的自由」と密接に関連するか？
119	どうして「アフリカ・サハラ地区」では貧困増加と寿命低下が起こるのか？

宇宙学

NO	未解決問題
26	「宇宙は唯一」なのか？
27	何が「宇宙の膨張」を駆動しているのか？
28	いつ、どのように最初の「星や銀河」が形成されたのか？
29	超高エネルギーの「宇宙線」はどこから来るのか？
30	何が「恒星状天体」にパワーを提供しているのか？
31	「ブラックホールの正体」は何なのか？
51	太陽の「磁気周期」を駆動しているのは何か？
52	「惑星」はどのように形成されているのか？

[調査後記]

(計測技術横断グループについて)

JST-CRDS の計測技術に関する横断グループは 2009 年度に発足した。本グループは、主要 4 分野の各ユニットからアサインされた数名のフェローから構成され、ナノテク材料ユニットの曾根純一が、本グループの総括を兼務する形で発足した。2009 年度は、「計測・分析技術に関する諸外国の研究開発政策動向」を調査し、調査結果を報告書としてまとめ、2010 年 8 月に公表した。

2010 年 4 月、曾根の NIMS 理事就任に伴い、総括は吉川弘之センター長が兼務、2010 年 4 月から、川口哲、永野智己、平野正浩、金子健司、丸山浩平の 5 名と、アドバイザーとして加わった佐藤勝昭（さがけ「次世代デバイス」研究総括）を加えて 6 名のグループとして新たに発足した。

(2010 年度の活動方針の決定)

吉川総括の下、2010 年度の活動方針が検討され、総括より「計測は mother of science である。科学のフロンティアには計測が不可欠。科学における未解決問題に対する計測ニーズを示し、それらのシナリオを検討した上で日本における計測の研究開発戦略を提言すべき。」という指針が示された。これに基づき、2010 年度の活動方針としては「科学における未解決問題に対する計測ニーズ」の調査に注力することを決定した。「研究開発戦略の提言」にまで持って行くには、「シーズとの邂逅」という作業が不可欠であり、期間やヒューマンリソースを考慮して、2011 年度以降の課題とすることとなった。

(計測ニーズ調査・ワークショップ開催の経緯)

「計測ニーズ調査」は次のようなステップで行われた。総括からの「計測技術は、使われる各分野の歴史や流れに沿って発展を遂げてきたため、分野ごとに現時点での水準レベルの違いがある。したがって、計測技術の研究開発は、対象とする科学技術分野ごとに分けて考えることが肝要」という指摘にしたがい、主要 4 分野の有識者 12 名（最終的には 13 名）にインタビューを行い、各分野における未解決研究課題と計測ニーズを俯瞰し、その水準とトレンドを抽出する作業を行った。

この調査結果に示された「各分野における計測ニーズ」を「共通認識」とするとともに、これまでの調査を補完することを目的として、「計測ニーズ俯瞰ワークショップ」を開催した。プレゼンターとして、各分野で総括的かつ客観的に課題と計測ニーズを議論いただける有識者 4 名を選定、さらには、コメンテーターとして計測分野での専門家 4 名を選定した。ワークショップでの議論の発散を防ぐために、予め、上記調査結果をお送りして目を通していただくとともに、ワークショップ開催の趣旨を理解して頂けるようグループメンバーが手分けして説明、可能な限りモデレータ（佐藤）も立ち会った。

さらに、ワークショップを補完するために、JST がファンディングしている戦略的研究推進事業 CREST およびさがけの計測関係研究者、産学イノベーション加速事業研究者、計約 680 名に、メールベースでアンケートを送り、前述の調査結果に対するご意見を伺うとともに、ワークショップへの参加を呼びかけた。35 名からアンケート回答を頂くとともに、10 名のワークショップ参加者を得ることができ、限定的ながら開かれたワー

クシヨップに一步近づけることができた。

(ワークショップでの議論)

事前説明の効果もあって、プレゼンター・コメンテータともに、決められた時間内に要領よくプレゼンをして頂くことができた。質疑も活発で、一般参加者からも熱心な議論がでて、有意義なワークショップとすることができた。

吉川総括は、最後のまとめとして、「新しい科学は、環境学にあるように、原理原則を見出すのみでは無意味で、現状を知り、将来を予測し、対策する方法を見出すことこそ重要。計測ニーズにも新しい状況、いわゆる将来を予測することが必要で、時間軸が入った「4次元レンズ」の考えが、大きな話題であろう。」と指摘するとともに、「これからの計測学は、科学研究を研究するメタ科学と位置付けるべきで、「メタ計測学」をつくる必要がある。」と結んだ。

(これまでの調査結果を踏まえて)

インタビュー調査、アンケート、ワークショップの発表およびコメントなどを通じ、以下のようにことが浮かび上がった。

まず、科学の未解決問題の60%、計測ニーズの60%は生命科学分野にあり、生命科学分野の計測技術の開発に多くの資源投入を行うべきであろう。しかしながら、生命科学系では、基本的な問題であってもまだまだ未解決な課題が多く、これまでのユーザーの立場から脱却して、計測クリエイターとしての視点が必要であるので、他の科学分野の関係者と一緒になって解決すべきである。

次に、生命科学・環境の分野をはじめ、ナノ・ICTにおいても、より複雑な課題へ取り組むニーズが多いことが明らかになった。このためには、しっかりしたデータベースが必要であり、物理原理を用いたメジャランドをしっかりと据える必要がある。また、シミュレーション連動、現象の可視化などの必要性が強く叫ばれ、このためには、数学分野、物理分野研究者の参画の必要性が痛感された。

吉川総括のまとめで指摘されたように、課題解決形の研究開発においては、未来を予測する必要性が高まっており、時間軸の入った「四次元レンズ」の概念が必要で、シミュレーション連動など、具体的に考えていくことが必要である。

日本オリジナルの科学の進展のためにも、メタ科学として分野を超越した新たな計測学の確立が必要であり、このような観点から新たな計測を担う人材の育成が急務になっている。

(今後に向けて)

生命科学の分野の未解決問題の1つが、思いもよらない先端的な物理測定技術によって解明されるかもしれないということを、インタビューを通じて知った。「麻酔薬がなぜ効くかの素過程」に踏み込もうとする麻酔医と先端光研究者とのコラボレーションの例である。これは、たまたま、高校時代の友人であったという偶然の邂逅で実現したと聞くが、偶然に頼ることなく、より積極的に、ニーズとシーズの邂逅の場としての「計測集団」の構築を仕掛けるのは、公的機関の責務である。この目的には、閉じた「プラットフォーム」や「ネットワーク」ではなく、省庁間の壁、アカデミアと産業界の壁を大胆に取り払って、

いろいろな立場の研究者が出入りして邂逅できる開かれた場でなければならない。

はじめに述べたように、本グループの今年度の調査活動は、「科学の未解決問題に対する計測ニーズ」に絞って行われ、ここから、共通した計測の課題が抽出されたが、今後は、如何に有効な「シーズとの邂逅」の場をつくって作業を行うかが、計測分野の研究開発の成否を握っているといっても過言ではない。これは、2011 年度以降の CRDS の活動の課題となろう。

JST 戦略的創造研究推進事業さがけ
「革新的次世代デバイスを目指す材料とプロセス」 研究総括
兼 研究開発戦略センター 計測技術に関する横断グループ フェロー
佐藤 勝昭

■報告書作成メンバー■

吉川 弘之	センター長	(計測技術に関する横断グループ、総括責任者)
佐藤 勝昭	フェロー	(計測技術に関する横断グループ)
川口 哲	フェロー	(ライフサイエンスユニット)
永野 智己	フェロー	(ナノテクノロジー・材料ユニット)
平野 正浩	フェロー	(ナノテクノロジー・材料ユニット、2010年10月まで)
金子 健司	フェロー	(電子情報通信ユニット)
丸山 浩平	フェロー	(環境・エネルギーユニット、リーダー)

※お問い合わせ等は計測技術に関する横断グループまでお願いします。

調査報告書

科学における未解決問題 に対する計測ニーズの俯瞰調査

CRDS-FY2010-RR-05

2011年3月

独立行政法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター
計測技術に関する横断グループ

〒102-0084 東京都千代田区二番町3番地
電 話 03-5214-7485
ファックス 03-5214-7385
<http://crds.jst.go.jp/>
©2011 JST/CRDS

許可無く複写／複製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。

