

# ナノ世界を可視化する放射光科学

—— 基礎から最先端まで ——

雨宮 慶幸 東京大学名誉教授

## Contents

- はじめに  
見ることの重要性  
正しく見ることの意義  
物質と光  
X線の正体
- 放射光科学  
放射光  
SPRING-8とSACLA  
X線で何が分かるか（可視光との比較）  
高輝度X線光源の重要性
- 私が行った産学共同研究  
ソフトマテリアルの時間・空間階層構造  
産学連携のポイント
- 放射光の研究事例
- さいごに

## 1. はじめに

これまで ICUS では主に環境問題を中心に議論が行われてきた。ICUS はもともと学際的な性格をもち、専門分野を超えて多様な人々が集まり、科学技術が社会にどのように役立つか、社会がどのように良くなるかを話し合う場である。今日は、私の専門である放射光科学が社会にどのように貢献できるかを紹介したい。また、副題として「基礎から最先端まで」としているの、基礎的な部分にもこだわり、物理的視点から世界や自然に対する理解にも触れたい。



雨宮 慶幸 | あめみや・よしゆき

東京大学名誉教授

## 見ることの重要性

我々は五感を持っているが、特に視覚は情報処理速度が圧倒的に速い。視覚は約  $10^6$  回/秒、聴覚は  $10^4$  回/秒、触覚は  $10^2$  回/秒とされており、これは「百聞は一見に如かず」という諺を半定量的に裏付けるものである。生物進化の観点からも、視覚の獲得は決定的な役割を果たした。カンブリア紀には、生物が視覚を手に入れたことで種の多様化が急速に進んだと考えられている。それ以前の生物は、互いに近距離で接触したり衝突したりしなければ他の存在に気づくことができなかった。視覚は、生物が環境に適応し生き延びるために不可欠な能力だったのである。

さらに、見ることは真理の探究にも欠かせない。ナノテクノロジーの分野では「見えないものは作れない。見えるものは解決できる」と言われる。私の研究対象であるナノの世界（ $10^{-9}$  m、すなわち原子や分子の配列距離）

東京生まれ。1970年桐朋高校卒業。1974年東京大学工学部物理工学科卒業。1976年同大学院工学系研究科修士課程修了、1979年同大学院工学系研究科博士課程修了（工学博士）。1979年日本学術振興会特定領域奨励研究員、1982年高エネルギー物理学研究所放射光実験施設助手、1988年米国ブルックヘブン国立研究所客員研究員、1989年高エネルギー物理学研究所放射光実験施設助教授、1996年東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻助教授、1998年同教授、1999年東京大学新領域創成科学研究科物質系専攻教授、2007～2009年東京大学新領域創成科学研究科研究科長、2016年より産総研・東大先端オペランド計測技術 OIL ラボ長、2017年より東京大学名誉教授。専門分野：放射光科学、X線計測学、小角X線散乱、回折物理、ソフトマター。

## 八正道（仏教の八種の実践法）

- |      |          |                |
|------|----------|----------------|
| ①正見  | 正しく見る    | → 計測           |
| ②正思惟 | 正しく考える   | → 解析・データ処理     |
| ③正語  | 正しく語る    | → 議論・情報発信      |
| ④正業  | 正しい行いをする | → 新材料・デバイス等の開発 |
| ⑤正命  | 正しい生活をする | → 産業創出         |
| ⑥正精進 | 正しい努力をする |                |
| ⑦正念  | 正しい心をもつ  |                |
| ⑧正定  | 正しい心身統一  | → 価値創成         |

図1 正しく見る→正見（しょうけん）

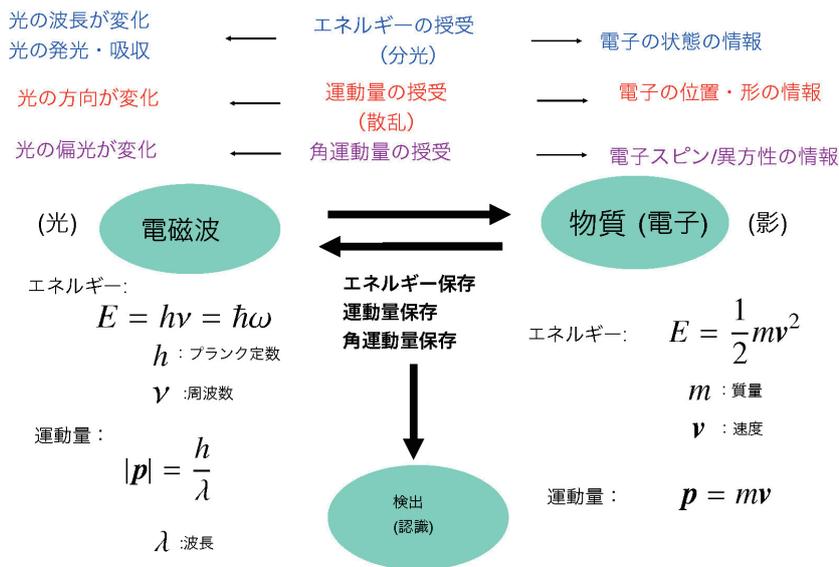


図2 見ることは光と物質のエネルギー・運動量の授受

を観測してこそ、そこでの技術応用が可能になる。

### 正しく見ることの意義

ただ「見る」だけでは不十分であり、「正しく見る」ことが重要である（図1）。これは2500年前にお釈迦様が説いた「正見（しょうけん）」という教えに通じる。仏教の八正道は、人間が悟りに至るための8つの道を示すものであり、その第一歩が正見

である。正しく見るからこそ、次に正しく考える（正思惟）、正しく語る（正語）、正しく行動する（正業）と進むことができ、最終的には正しい心身統一（正定）へ至り、人間としての完成が指し示される。

興味深いことに、この八正道のプロセスは科学的手法とも対応する：

正見 → 計測

正思惟 → 解析・データ処理

正語 → 議論・情報発信



W.K. Rontgen  
Discovery of X-rays  
In 1895  
First Nobel-prize laureate  
In 1901 in physics



医用レントゲン撮影  
非破壊検査  
X線回折  
X線分光 (吸収・発光)

図3 X線の発見 (1985年)

正業 → 新材料・デバイスの開発

正命 → 産業創出

正定 → 価値創成

科学において最も重要なのは、まず世界を正しく計測することである。しかし、計測そのものからは何も分からない。得られたデータを解析・考察し、議論や情報発信を通じて社会に応用することで、新しい材料やデバイスの開発、産業創出、さらには社会的価値の創造につながる。このように、科学的手法と仏教的な考え方は、筆者の中で自然に結びついている。

### 物質と光

宇宙は基本的に光と物質から構成され、両者はエネルギーと運動量をやり取りする「相互作用」を通して互いの存在を認識できる。光は質量を持たないが、周波数や波長に基づいてエネルギーと運動量が定義され、電子をもつ物質と作用することで検出が可能となる(図2)。光がなければ物質は見えず、物質がなければ光の存在を示せない。この関係性は、自己が他者との関わりを通して見いだされるという人間の在り方にも通じる。

物質は原子核と電子からなり、原子の種類(周期律表)は電子数の違いで決まる。原子がどのように

並ぶか(結晶構造)は物質の性質を大きく左右する。ダイヤモンドと鉛筆の芯のように、同じ炭素でも配列が違えば性質は全く異なる。

しかし、原子からなる物質は宇宙全体のたった4%しかなく、残りは光と相互作用しない謎の存在、ダークマターとダークエネルギーが占める。ダークマターは銀河が崩壊しないために必要な質量を与え、ダークエネルギーは宇宙の加速膨張を説明する。いずれも直接観測できないが、理論的に存在が必然とされる点で、科学が宗教と似た側面を持つことも示唆している。

本題のX線は、レントゲンが偶然発見した高エネルギーの電磁波で、物質に当たると曲げられ(回折)、原子・分子の配列を可視化できる(図3)。X線の曲がり方はブラッグの法則(図5)で表され、原子間距離が大きいほど小さく曲がる。この原理は、人間の目がレンズを通して角度から距離を判断する仕組みにも対応している。

X線回折の原理は、ラウエ、ブラッグ親子が解明し、ノーベル賞につながった(図4)。日本では寺田寅彦が同時期に先駆的研究を行い、文学者としても活躍した。彼の姿勢は、日常の疑問を大切にする「好奇心こそ学術の源泉」という考え方を象徴する。寺田の言葉「頭のいい人は山の全体を見て満足しがちだが、山は実際に登って見なければ真の姿は分か

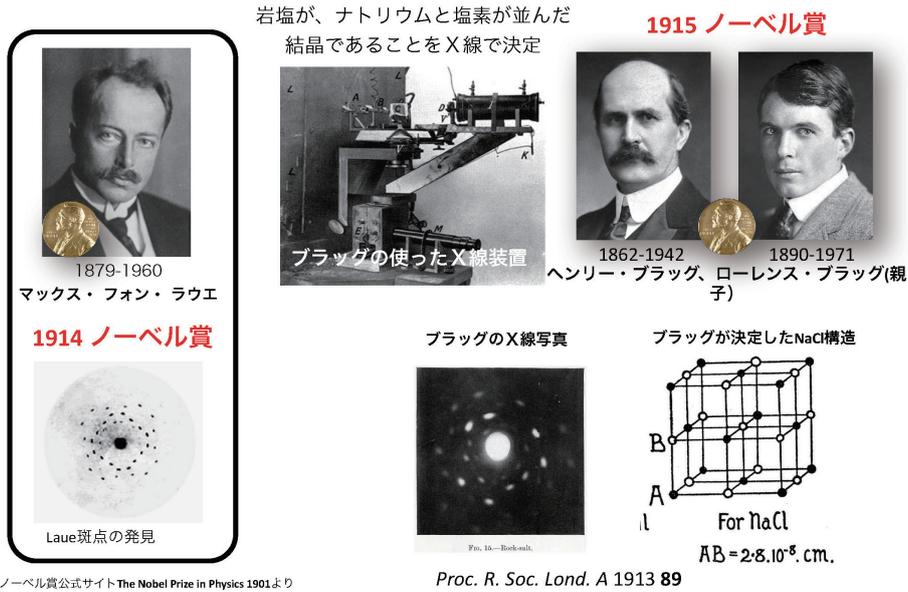


図4 X線で結晶を照らすと斑点が見える→原子の並びを解明

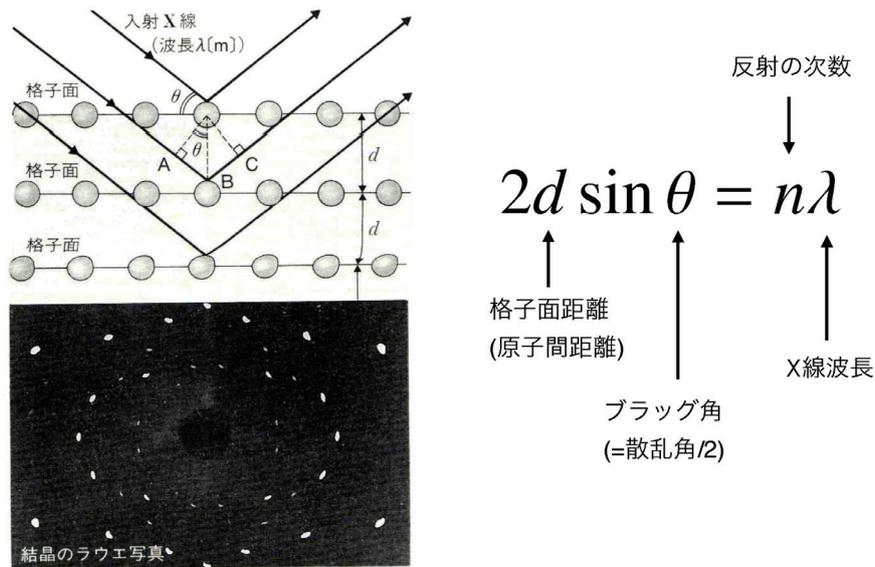


図5 X線結晶構造解析：ブラッグの法則

らない」は、科学の探究にも人生にも通じる示唆を与えている。

### X線の正体

光にはさまざまな波長があり、波長の違いを色として認識している。可視光の範囲は約400～800nmで、これより長いと赤外線、短いと紫外線となる。紫外線よりさらに波長が短い電磁波がX

線で、その波長は0.1～10nmと非常に短い。可視光の千分の一ほどであるが、X線も光の一種であり電磁波である(図6)。

電磁波とは、電場と磁場が振動しながら秒速30万kmで進む波である。一方で、光は網膜に届くと粒子のように振る舞う。このように光は「波」と「粒子」という矛盾する性質を持ち、状況によってどちらとしても現れる。波としては波長(λ)で、粒子としてはエネルギー(E)で表され、その関係は

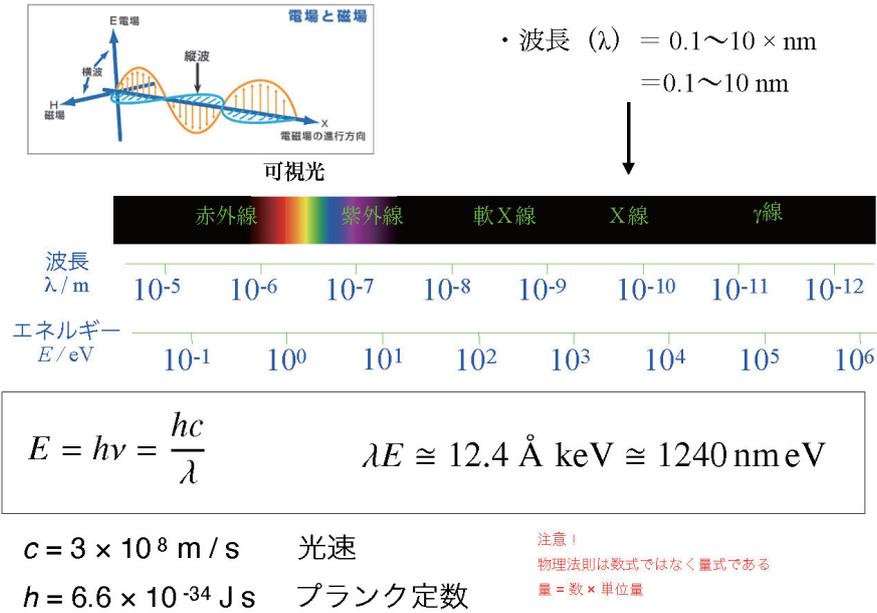


図6 X線の正体：波長 ( $\lambda$ ) が短い光

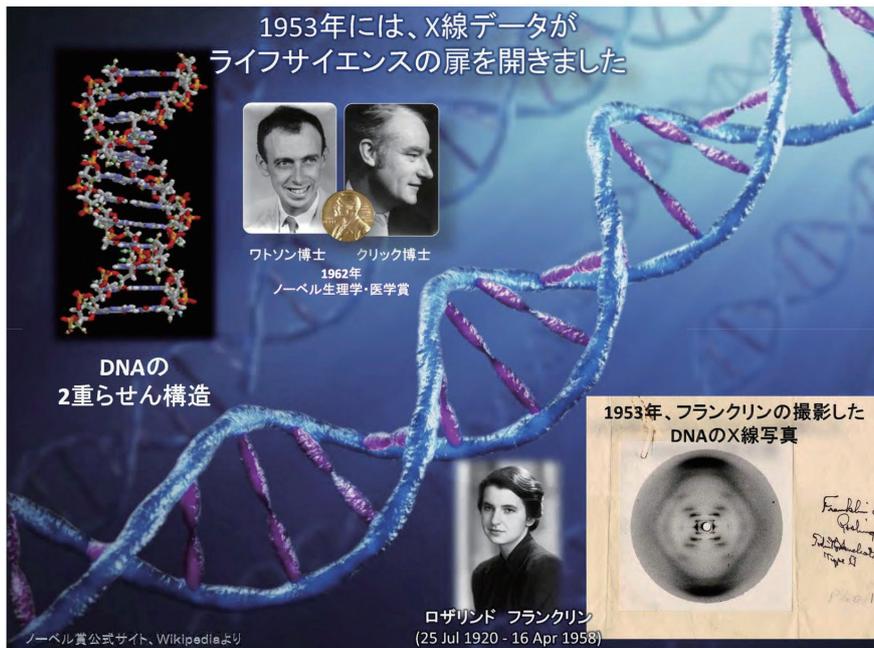


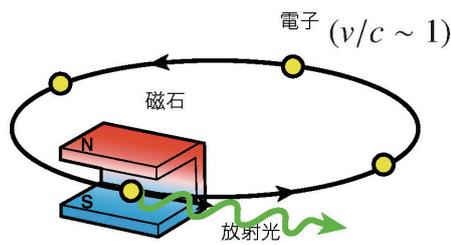
図7 1953年には、X線データがライフサイエンスの扉を開きました

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

で示される。波長が短いほどエネルギーは高く、X線やガンマ線は細胞にダメージを与えるほど高いエネルギーを持つ。

光が波と粒子のどちらなのかという問題は、存在とは何かという哲学的問いにもつながる。最近注目されている「量子もつれ」では、離れた粒子同士が瞬時に影響し合うなど、実在や局在の概念が通用しない現象も知られている。我々は理解しきれない不思議な世界に生きており、そこにロマンがある。

光は真空中を進むにもかかわらず、電場と磁場が



**放射光の特長**

- 極めて高輝度
- 指向性が高い
- 連続スペクトル (赤外～X線)
- 偏光性
- パルス光

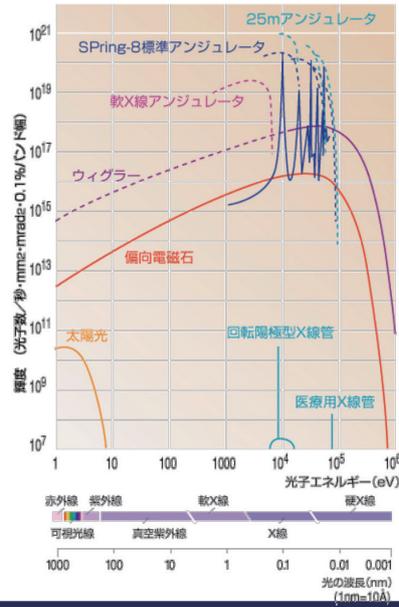


図8 放射光 (Synchrotron Radiation) とは？

進行方向と直角に振動する「横波」である点も特徴的である。

X線は原子・分子の構造を調べる強力な手段で、これを用いた研究は多くのノーベル賞を生んできた。その代表例がDNA構造の解明である。X線回折パターンの解析から、DNAが二重らせん構造であり、塩基間の距離が0.34nmであることが明らかになった。この成果によりワトソンとクリックは1962年にノーベル賞を受賞したが、データ取得に大きく貢献したロザリンド・フランクリン博士の功績も忘れてはならない (図7)。

**2. 放射光科学**

**放射光**

光の性質を理解したうえで、次に放射光 (シンクロトロン放射) について説明したい。放射光は電子から生じる光である。電子を円形の加速器で光の速度に近いところまで加速し、磁場で進行方向を曲げると、その接線方向に強力な光が放射される。これが放射光である (図8)。

放射光にはいくつかの特徴がある。第一に「非常

に明るい」という点であり、この特徴が最もよく利用されている。第二に、レーザーのように指向性の高い光である点。第三に、連続スペクトルをもち、幅広い波長の光が得られる点である。さらに、高い偏光性を持つ電磁波であり、加速器内部では電子は連続ではなく短い束状になって加速・循環するので、パルスの光が得られる。

**SPring-8 と SACLA**

このような強力な光を生み出す施設が、私の勤務するSPring-8である (図9)。SPring-8の名称はSuper Photon ringの略で、8は80億電子ボルト (8GeV) で電子を加速することを示す。加速された電子が巨大なリング状の装置を周回し、曲がるたびに放射光が生じる。

同じキャンパスには直線加速器を使ったX線自由電子レーザーSACLAもあり、いずれも特定国立研究開発法人・理化学研究所が文部科学省の支援のもと設置した施設である。両施設は、高輝度光科学研究センター (JASRI) が共用機能を担い、全国の大学・研究所・企業が利用できる仕組みとなっている。

JASRIには約300人の職員が在籍し、そのうち



設置組織：理化学研究所、 運営組織：（公財）高輝度光科学研究センター(JASRI)

共用開始：1997年10月

電子エネルギー：8 GeV、電流：100 mA、周長：約1,500 m

実施実験課題数/年：約2,100件（産業界約20%） 利用者数/年：約15,000人

研究論文数：約1,200報/年（日本の研究論文数の約1.2%に相当）

累計利用者数：約30万人

図9 SPring-8 (Super Photon ring-8 GeV) /SACLA

200人は研究者である。全国から訪れる研究者が希望どおりの実験を行い、質の高いデータを持ち帰れるようにサポートするのが役割である。また、毎年2100件ほど提出される課題申請を公平・透明に審査し、利用課題を選定するのもJASRIの使命である。

SPring-8は1997年に共用を開始し、年間の利用者は延べ1万5千人、発表論文数は約1200本と、日本の全論文数の1.2%に相当する成果を生み出している。

放射光がどれほど明るいかを、エネルギー（横軸）と輝度（縦軸）のグラフで説明する（図10）。レントゲン博士の発見したX線は電子管から発生するが、輝度には限界がある。放射光はほぼ同じエネルギー帯（ $10^4 \sim 10^5 \text{ eV}$ ）でありながら、輝度は $10^{18}$ 程度である。一方、従来のX線は $10^{10}$ 程度なので、その差は8桁、すなわち1億倍明るいことになる。

太陽光は可視光領域でエネルギーが低く、輝度も限られている。人間がまぶしいと感じる太陽光でも、放射光の明るさに比べれば1万分の1から1億分の1にすぎない。明るい光は、通常は見えないものまで見えるようにしてくれるため、科学研究にとって決定的に重要である。

図10に示すように、従来のX線管（真空管方式）は60年間で輝度が2～3桁しか向上しなかった。最大の理由はエネルギー効率の低さにある。加速された電子が金属ターゲットに衝突してX線を出す方式では、電子エネルギーの99.9%が熱になるため、大部分が無駄になり、強度を上げればターゲットが溶けてしまう。

これに対し、放射光は熱を発生しない。電子が磁場で曲げられる際、エネルギーの損失がそのまま光に変換されるため、100%の効率でX線が得られる（図11）。白熱電球に対するLEDのような関係で、圧倒的な効率の高さが、ムーアの法則を超える桁違いの進化を可能にした。

放射光はナノ構造解析に不可欠であるため、世界各国で放射光施設が整備されている。フランスの“Soleil”、英国の“Diamond”、オーストラリアの“Victoria”、米国の“NSLS”、スイスの“SLS”、中国・上海の“SSRF”などが代表例である（図12）。

日本にはSPring-8に加えて、2024年に仙台市の東北大学キャンパスにNanoTerasuが新設された。ナノの世界を照らすという意味で名付けられ、30億電子ボルト（3GeV）の電子を用いる周長349mの施設である。設置者は国立研究開発法人・量子科学技術研究開発機構（QST）であり、

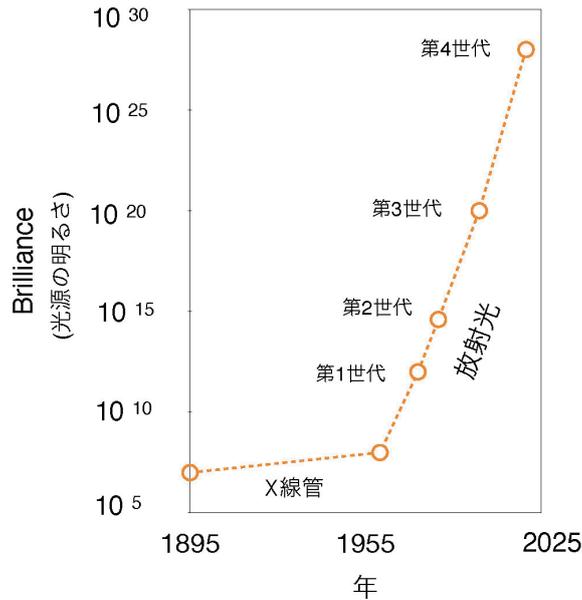


図10 X線光源の輝度（明るさ）の発展

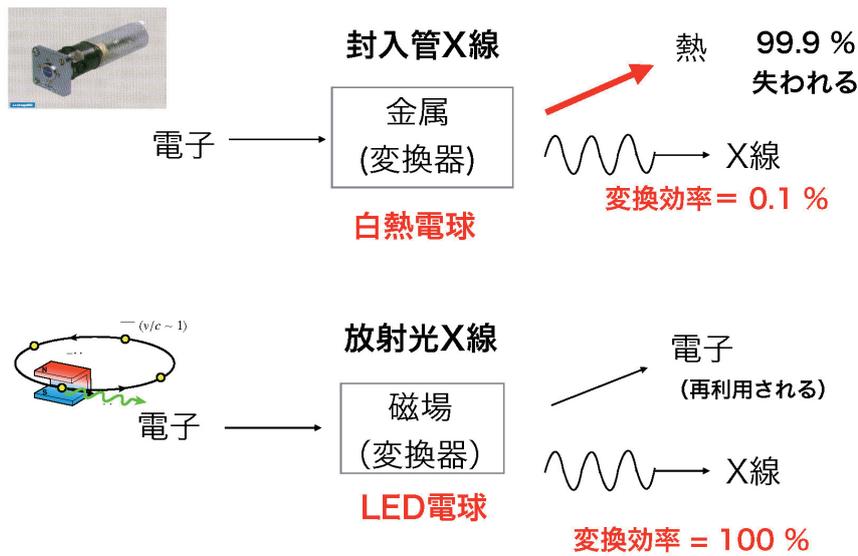


図11 実験室X線と放射光X線の違い

NanoTerasu も JASRI が研究支援と課題選定を担当している。

**X線で何が分かるか（可視光との比較）**

X線を用いることで、原子や分子レベルの物質の形や性質を知ることができる（図13）。日常生活で我々が物を見る時は、光が物体に当たって反射し、その形や色を目で認識している。同じように、X線

を物質に当てると、試料の中でX線が曲げられ、フィルムや検出器に様々なパターンとして現れる。X線が曲げられる角度や方向から散乱体の大きさや距離を推定できるため、物質の形がわかる。この現象を専門用語でX線回折・散乱と呼ぶ。

また、光で色を見ることができると同じように、放射光を試料に当てると、波長によって光の振る舞い方が変化する。可視光では色として認識するが、原子の世界では、光の吸収や放出の波長の違いから

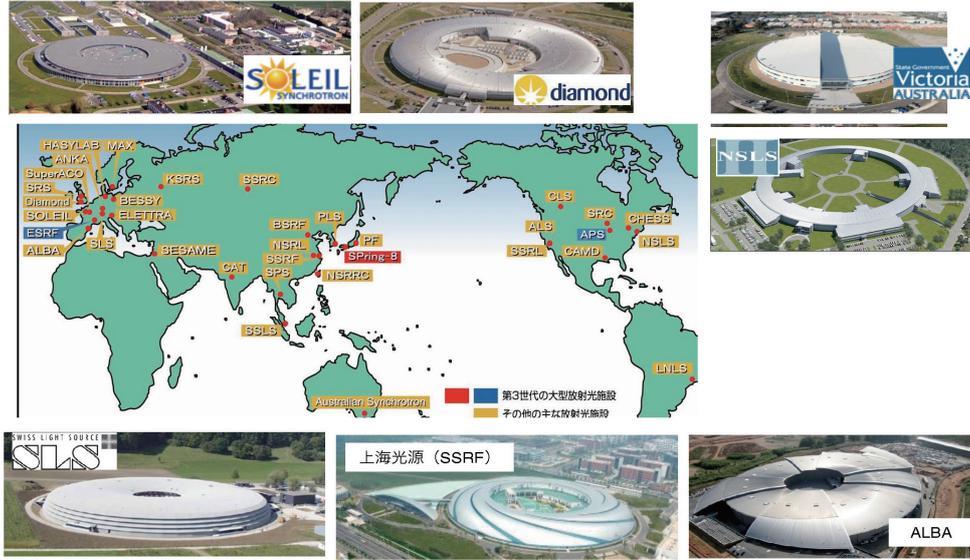


図12 世界の放射光実験施設

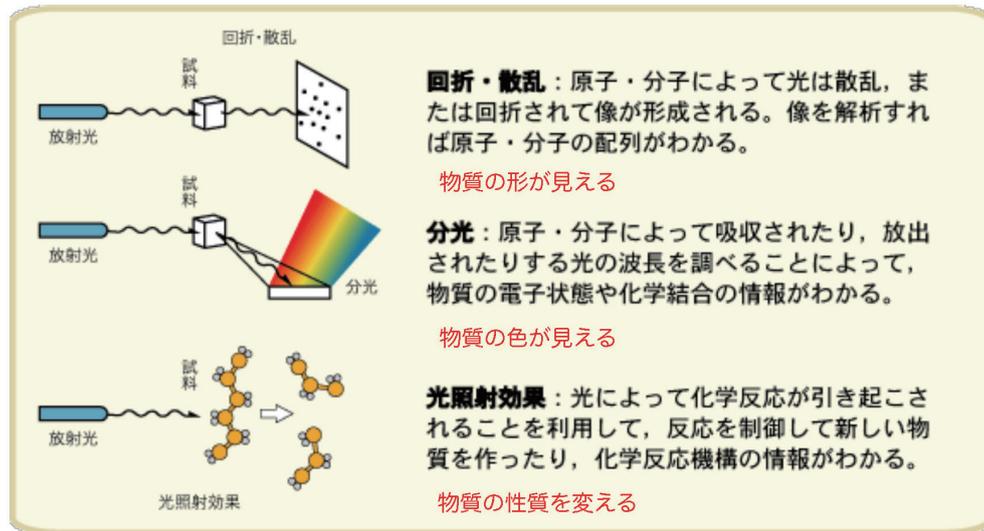


図13 X線：物質の形と色を見る・物質の性質を変える

電子状態や化学結合の情報を得ることができる。専門用語ではこれを分光と呼び、物質の「色」を調べることに相当する。原子・分子の結合の強さや電子の配置は、距離だけでなく結合エネルギーによって異なるため、分光によって詳細な情報が得られる。

さらに、光照射によって化学反応を制御したり、反応機構の情報を得たりすることも可能である。可視光での観察ではレンズを通して像を結ぶことで物体の形が見えるが、小さな原子や分子は直接見えない。X線も様々な方向に曲げられるが、X線を曲げるレンズは存在しないため、結像できない。その代

わりにフィルムや検出器で曲げられたX線のデータを取得し、計算機で処理して形を再構築する(図14)。この手法で得られる空間は「逆空間」と呼ばれ、角度空間として表現される。数学的には、実空間がフーリエ変換された空間である。

理論的にはレンズがあれば逆空間像を直接実空間像に戻せるが、現実には計算による逆フーリエ変換を行って実空間像を再構築する(図15)。ただし、光の強度が弱いとノイズが多く精度の高い像を得られない。そのため、強いX線、すなわち高輝度の放射光を用いることが、物質の構造解析には不可欠と

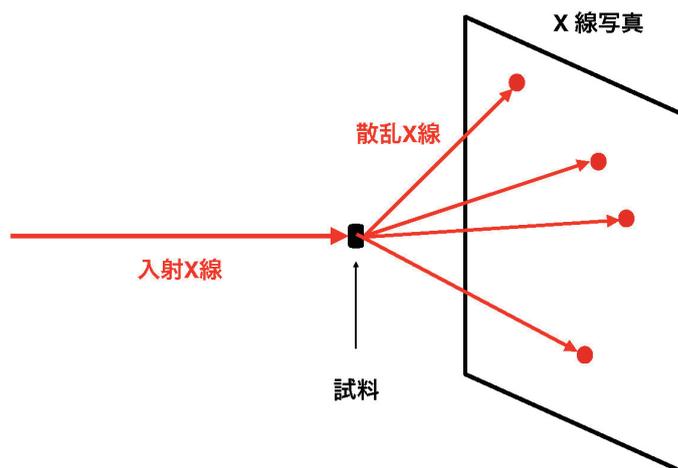


図14 X線散乱・回折実験の配置

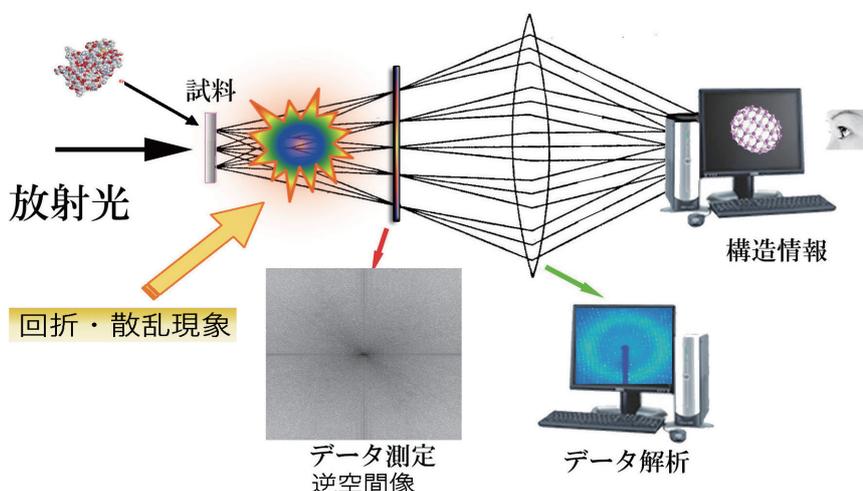


図15 X線を曲げるレンズが存在しない→結像できない

なる。

### 高輝度X線光源の重要性

私たちが「明るい」「暗い」と感じるのは、光の量そのものではなく、光の密度（輝度）である。ストロボのように短時間に強く光ると、同じ光量でも明るく感じる（図16）。光の明るさは、光る時間の長さ、発散角度、光の断面積、エネルギー幅など複数の要因で決まる。

光源の輝度が高いと、時間分解能や空間分解能が上がり、速く動くものや小さな構造を鮮明に観測できる（図17）。これは物質の持つ時間と空間の階層

構造を観察するために重要であり、筆者の研究の中心でもある（図18）。

生物や高分子などは、大きな構造から分子レベルまで階層的に成り立っているため、全体像と細部の両方を見る「ズームイン・ズームアウト」の視点が必要になる。また、小さな世界を見るには高速な観測が必要で、時間と空間の階層は深く関係している。

話は逸れるが、宇宙の大きさは約  $10^{26}$ m、素粒子は  $10^{-18}$ m で、その差は44桁にも及ぶ。人間が生活できる範囲はせいぜい10kmほどで、宇宙のスケールと比べれば極めて狭い。しかし、対数スケールで見ると、人間は宇宙の「中央付近」に位置しており、人間が存在できるよう宇宙が整っているとい

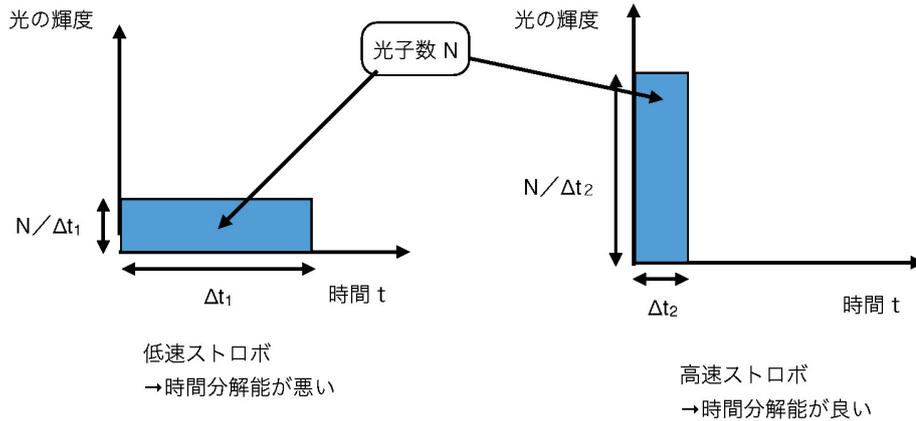


図16 高輝度 (=明るい) 光源とは？

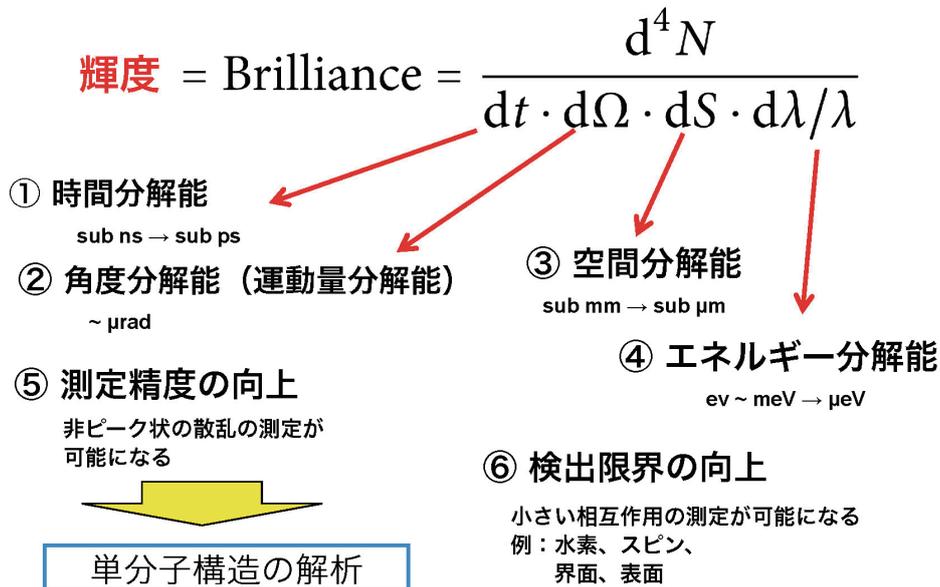


図17 なぜ、高輝度X線光源が必要なのか？

う「人間中心原理」も成立する (図 19)。

### 3. 私が行った産学共同研究：

#### ソフトマテリアルの時間・空間階層構造

筆者は、時間構造・空間構造の視点からさまざまな対象を観察する研究を進めてきた。具体的には、住友ゴム (ダンロップ) と共同で低燃費タイヤの開発に取り組んだ。自動車のエネルギーロスのうち、タイヤの 転がり抵抗 は意外に大きい (図 20)。走

行後にタイヤが熱くなるのは、内部でエネルギーが失われているためである。EV は車体が重いため転がり抵抗が増え、低減技術の重要性はより高まっている。しかし、抵抗を下げすぎると制動力が落ちるため、「走行時は抵抗を小さく」「停止時は大きく」という両立が求められる。

タイヤが黒いのは、補強材である カーボンブラック (鉛筆の芯と同じ炭素) を混ぜているためである。白いゴムだけでは消しゴムのようにすぐ摩耗してしまうが、カーボンブラックを加えることで強度とグリップ力が向上する。

タイヤが受ける刺激の周波数は、定常走行 (時

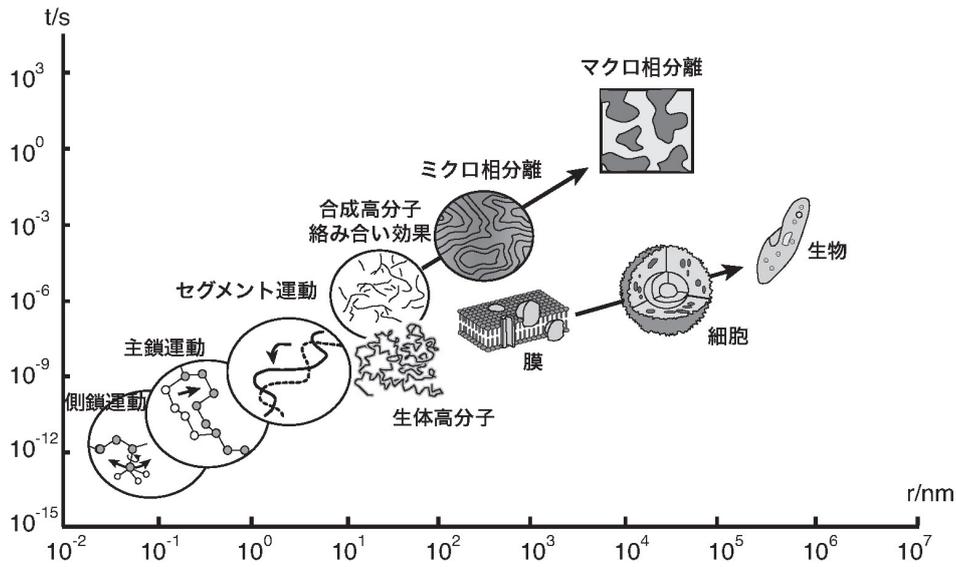


図18 物質の時空間階層構造

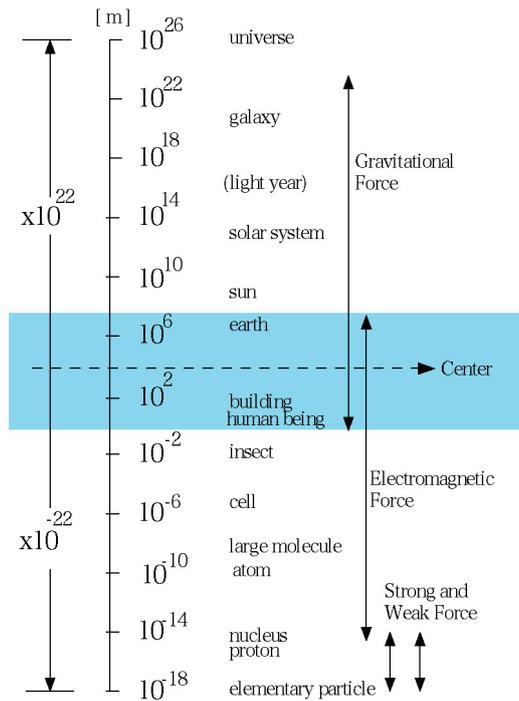


図19 Log scaleで見た人間の大きさ → 人間中心原理？

速 60km) では約 10Hz、ブレーキ・カーブ時には  $10^4 \sim 10^6$ Hz となり、周波数によってエネルギーロスの特性が変わる(図 21)。そこで筆者らは、カーボンブラックの階層構造(図 22)を詳細に把握するため、SPring-8 を用いて 極小角 X 線散乱 の測定を実施した。160m 離れた検出器で広い角度範囲の

散乱データを精密に取得し、ゴム中の一次・二次・高次凝集構造の分布を明らかにした。

この分析に基づき開発されたのが、史上最高の低燃費タイヤ「エナセーブ」である。従来品に比べて走行時の発熱が少なく、エネルギーロスを大幅に低減した(図 23)。

平成19年10月 国際エネルギー機関 (IEA) レポート  
『Fuel Efficient Road Vehicle Non-engine Components』



イオウ架橋状態を経験的に操作することで低燃費化が可能



破壊・摩耗特性が低下し車の安全性に関わってくる

架橋構造を高次元で制御することが重要 !!

Sumitomo Rubber Industries Ltd.

住友ゴムグループ

図20 低燃費タイヤの開発研究

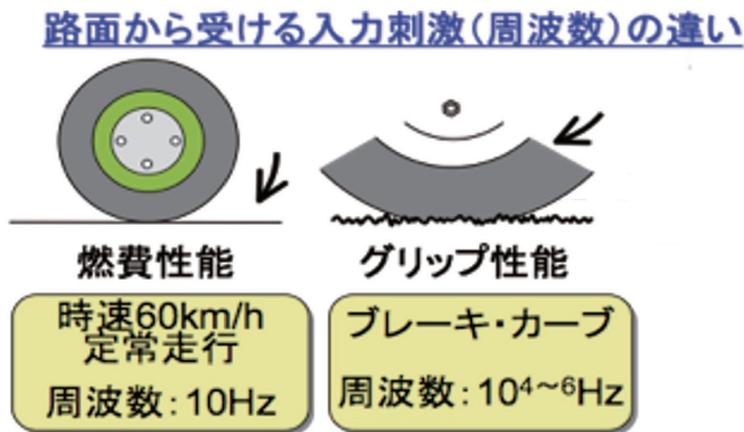


図21 ゴムの粘弾性の周波数依存性

また筆者は、花王のシャンプー「セグレタ」の開発にも関わった。髪内部の原子・分子の階層構造をSPring-8で測定し、光沢向上や縮れ抑制の技術に応用したものである。

#### 産学連携のポイント

筆者は東大で21年間研究を行い、企業との産学連携によって研究資金に恵まれてきた。学術研究の深化は重要だが、科学技術は社会や環境が求める課

題にも応える必要がある。しかし実際には、産学連携は長続きしないことが多く、両者の価値観の違いが原因になる。

大学は「知」を重んじ、基礎研究や教育を担う。一方、企業は「技」や材料を重視し、利益を追求する。これらは異なる方向を向きやすいため、共通の目的と共通のツールが必要であり、その一つが放射光である。協力する際にまず大切なのは、双方が自らの専門性を明確に理解し、その専門性が相補的であることだ。また、可能な範囲で情報を共有する姿

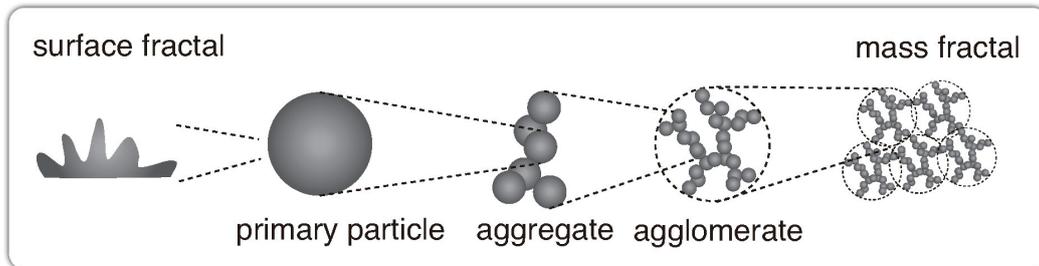
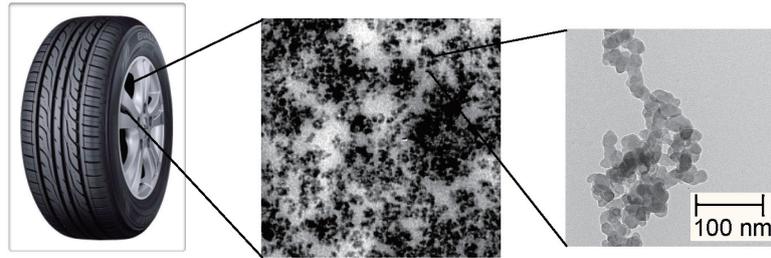


図22 階層的な空間構造—マルチスケール解析

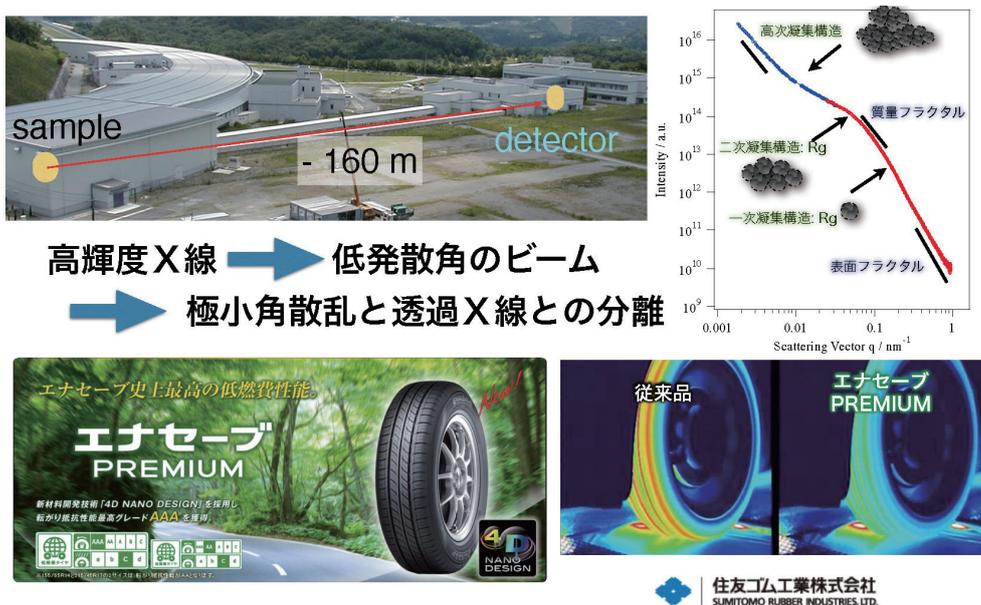


図23 極小角X線基づいた省エネタイヤの開発

勢も欠かせない。

ただし、これだけでは不十分で、次の段階では信頼関係が不可欠となる。人間には感情があるため、些細な不満や誤解で関係が崩れることがある。だからこそ、人間性を磨き、相手を尊重する姿勢が重要になる。相手に欠点があっても、自分も完璧ではないと理解し合うことが、信頼の継続につながる。

最終的に、産学連携には三つの段階が必要だと筆者は考える。

- ①専門性と情報共有 (Hard-Ware)
- ②信頼関係 (Soft-Ware)
- ③相互尊重性 (Human-Ware)

これは筆者自身の人生観でもある。

さらに、大学では教授と学生の間には自由な意見交換が必要であり、産学連携でも同様に心理的安全性が重要である。結局のところ、研究も連携も「人間関係」が土台である (図 24)。

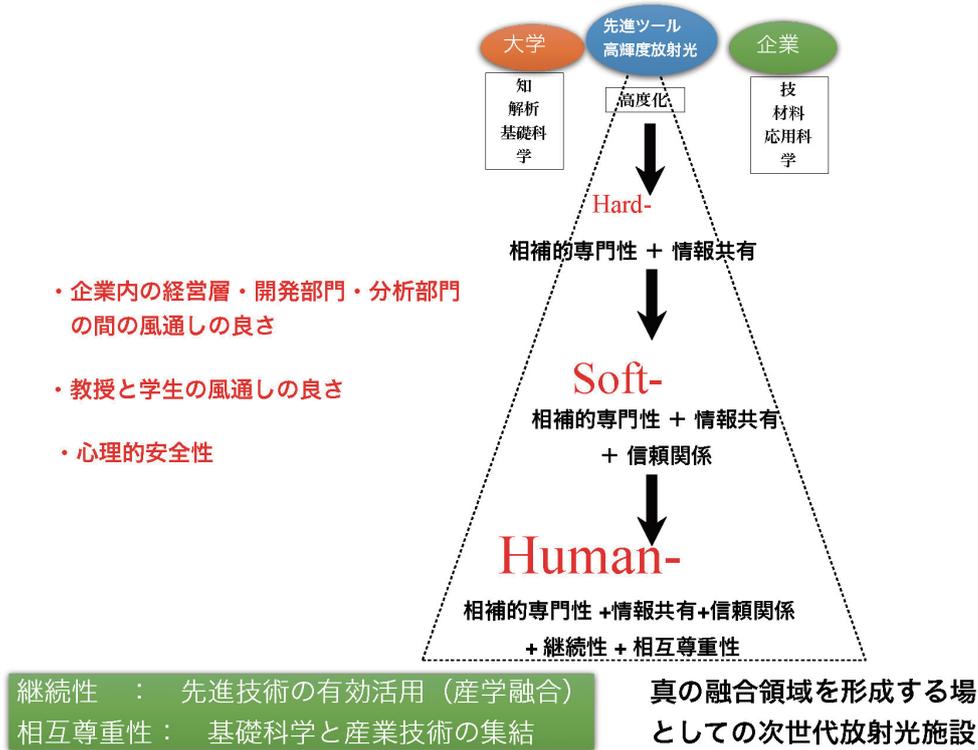


図24 産学連携研究のポイント

#### 4. 放射光の研究成果の例

光合成は、水と太陽光から酸素と炭水化物 (Sugars) をつくる仕組みであり、その中心となるのが PSII というタンパク質 (酵素) である。光合成は酸素を生み出すだけでなく、Sugars というエネルギー物質も生み出している。水素もエネルギー源だが、貯蔵や運搬が難しい。一方、Sugars は炭素に水素が結びついた炭化水素であり、安定して水素を運べるエネルギーキャリアーである。地球では 46 億年にわたり、生命が光合成によってこの炭化水素を作り続けてきた。そのため、この Sugars を人工的につくる「人工光合成」は、将来のエネルギー技術として非常に重要であり、SPring-8 の研究からは自然界の光合成メカニズムが明らかになりつつある。ノーベル賞が期待される研究の一つである (図 25)。

また、「はやぶさ 2」が持ち帰ったサンプルの分析も大きな成果である。隕石に含まれる元素の種類や分布を調べれば、太陽系がどのように形成された

かが分かる。地球内部では変化が多く過去の情報を残しにくい、はやぶさ 2 のサンプルは誕生時の状態をほぼそのまま保持しているため、太陽系の歴史解明につながる。

#### 5. さいごに

##### Motivation を高める心—物質と精神

人間は物質的な欲求を持つ存在である一方、物質だけでは説明できない精神を備えており、この精神こそが科学技術を発展させ、豊かに生きるために欠かせない。アリストテレスは人間の精神活動を「知・情・意」に分けた。すなわち、真理を求めて好奇心を育む知 (Vision)、美しさに感動し感謝する情 (Passion)、そして知識を社会の善のために生かそうとする意 (Mission) である (図 26)。Motivation を高めるためには、この Vision・Passion・Mission を持つことが重要であり、これは学生へのメッセージであると同時に、筆者自身が

光化学系II (Photosystem II: PSII)

光合成の水分解過程における最も重要な光触媒タンパク質

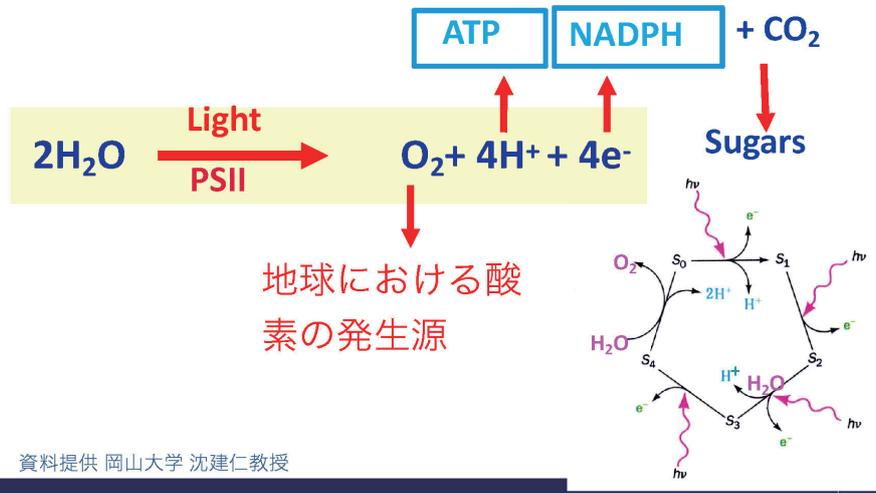


図25 SACLAの学術利用成果の例

学生（私自身）へのmessage



図26 Motivationを高める心：物質と精神

実践してきた生き方でもある。筆者は第二の人生においても、この心構えを大切にしていきたいと考えている。

(本稿は、2025年5月9日に開催したICUS懇談会における発題を整理してまとめたものである。)

政策オピニオン NO.315

## ナノ世界を可視化する放射光科学 —— 基礎から最先端まで ——

※本稿の内容は必ずしも本研究所の見解を反映したものではありません。

2025年12月1日発行

発行所 一般社団法人平和政策研究所

代表理事 林 正寿 (早稲田大学名誉教授)

©本書の無断転載・複写を禁じます

一般社団法人  
IPP 平和政策研究所  
Institute for Peace Policies

住所 〒169-0051 東京都新宿区西早稲田 3-18-9-212

電話 03-3356-0551 FAX 050-3488-8966

Email office@ippjapan.org Web <https://www.ippjapan.org/>