

今後30年の科学の未来像—放射光の役割—

ワークショップ実行委員会

要旨

平成16年7月30日～31日、ホテル機山館において、第一回日本放射光学会行事委員会企画「若手を中心としたワークショップ 今後30年の科学の未来像—放射光の役割—」が、開催された。本稿はワークショップにおける議論の結果を取りまとめたものである。

概要

放射光を用いた研究分野は、国の科学技術の戦略的重点4分野である ライフサイエンス、情報通信、環境、ナノテクノロジー・材料のみならず、エネルギー、製造技術を含めて、基礎研究から実用研究まで広範な裾野を見せ、放射光科学は、科学技術の発展をささえる研究領域の一つとして将来ますます重要な位置を占めるものと思われる。日本放射光学会は、そのような放射光に関わる研究者たちの研究交流や情報交換のために1989年に設立された。

放射光学会設立より15年が過ぎ、日本各地に放射光施設を立ち上げ、放射光科学の開拓と共に歩んできた世代から、放射光科学の応用・発展へ向かう世代へと、会員分布が急速に拡がりつつある。SPring-8, PF, UVSOR, HiSOR等の主だった施設も安定な利用フェーズに移行している。一方、X線FELやERLといった次世代光源を目指した基礎研究が国内研究機関において進展している。このような状況において、これからのサイエンスにおけるグランドデザインを放射光学会として提示することを目指して、今後30年におけるサイエンスの未来予測に基づき、放射光科学の位置づけを明確にし、放射光利用のあり方、放射光学会の果たすべき役割等について、様々な研究分野、施設の40代を中心とした研究者が議論するための会議を企画した。この会議は、終了した日本放射光学会将来計画特別委員会で議論された既存の放射光施設及び建設計画にとらわれることなく、放射光に関わるサイエンスの未来像について若手を中心としたメンバーがボトムアップの議論をすることを目指した。

ワークショップには生命科学、物理、化学、材料、放射光源の研究に携わる70名あまりの学会員が参加し、1日半にわたって放射光の現状と未来像について、有機的な議論を行った。「今後30年」という問題設定については、議論に難しい点が多々あったことは否めないが、会員の自由な発想、提言を引き出すという点では、意義があったと思われる。このワークショップの活発な議論を通して、将来の放射光が現在のリング光源中心から、リング光源とリニアック光源の二極化により、放射光利用がますます多様になること、そのため、これからの放射光科学の発展にとって利用研究者と光源研究者との積極的かつ有機的な研究交流が必要不可欠であることが参加者の間で強く認識された。

ワークショップの最後に行われた自由討論では、今回時間の関係でカバーし切れなかったサイエンス、技術分野もあることから、このような企画を継続的にを行い、学会内の研究分野間のコミュニケーションの強化と将来へのビジョンの共有を図ることが提言された。また、ワークショップでの議論の一つの成果として、放射光学会年会に企画講演を提案する事が提言された。

1. はじめに

1.1 ワークショップ企画の経緯と意義

日本放射光学会は2001年に将来計画特別委員会を設置し、今後の我が国に於ける放射光利用研究の進む方向を検討してそのあるべき姿/グランドデザインをまとめて、放射光施設の充実と放射光科学の推進を図るため、放射光施設の利用の現状と将来計画、新たな施設の建設計画について検討を行った。そして、緊急を要する極紫外・軟X線高輝度放射光施設計画について、放射光学会としての提言をまとめた。しかしながら、新しい放射光施設建設をめぐる情勢変化はめまぐるしく複雑な状況にあり、このような状況を踏まえ放射光分野としてより長期的な展望を共有することが必要と考えられる。

現在、SPring-8, PF, UVSOR, HiSOR等の主だった放射光施設の利用は国の戦略的重点4分野である ライフサイエンス、情報通信、環境、ナノテクノロジー・材料のみならず、エネルギー、製造技術にも関わる研究まで広範に展開をしており、放射光科学の先端性のみならず、学際性や波及性も示されている。様々な新しい放射光施設の建設計画や将来計画も議論されているが、これらを実現するためにも、計画がカバーする放射光科学のサイエンスにおけるニーズを中立の立場から明確にする必要があろう。そのような状況の中で、放射光学会が果たすべき役割は、長期的な視点に基づき、放射光科学の先端性が科学技術の発展においてどのような役割を担っていくのかというグランドデザインを作り上げ、サイエンス全体に対する放射光科学の位置づけを社会に提示していくことではないかという議論が幹事会で行われた。幹事会での議論に基づき、サイエンスにおけるこれからのグランドデザインを放射光学会として提示することを目指して、様々な研究分野、施設の若手研究者が議論するための40代を中心とした会議を行

事委員会が企画し、2004年4月3日の評議員会において公開ワークショップとして開催が認められた。

1.2 実行委員会の活動

ワークショップを計画するにあたって、まず行事委員会を中心に、ワークショップの実行委員会を結成した。実行委員会のメンバーは分野のバランスを考え、推薦された会員を随時追加した。実行委員会の役割は、ワークショップの議題、プログラムの決定、ワークショップの進め方について議論することであった。行事幹事がSPRING-8、PF、UVSORの各施設を訪問し、ワークショップの進め方について議論し、その他の実行委員とはメール会議を行った。

その結果、ワークショップでのテーマ設定として、具体的な施設の将来計画の話は避け、サイエンスに限定し「今あるものでなく今後30年にわたるサイエンスの未来予測において放射光がどう必要とされるか?」とすることに決定した。そして、ワークショップでは議論の中心を

- 1) 今後30年にわたるサイエンスの未来予測を短期・中期・長期的に行う。
- 2) その中での放射光の利用研究・光源・技術の位置づけを行う。
- 3) 未来像から見えてくる放射光がカバーすべきサイエンスの新たな領域を提示する(図1)。

とすることに決定した。

このような経緯を経て、ワークショップのタイトルを「若手を中心としたワークショップ 今後30年の科学の未来像—放射光の役割—」とすることとし、ワークショップの形態及び進め方を以下のように決定した。

- 1) セッション1「生命科学」、セッション2「物質科学(物理・化学・材料)」、セッション3「極限の放射

光を目指して(光源)」、セッション4「放射光のブレイクスルー」という4つのセッションを設定する。

- 2) 各セッションにはディスカッションリーダー(DL)、プレゼンター、複数のパネリストを設定する。
- 3) DLの役割は議論の方向付けと、ワークショップ当日の議論の進行役である。
- 4) プレゼンターは話題提供者、パネリストはプレゼンターの議論を補足し、議論を活性化する役割である。プレゼンター、パネリストについては、放射光学会員に限らず積極的に学会外の研究者に広く求める。
- 5) 各セッションにはパネルディスカッションの時間をできるだけ長く設定し、分野の枠を超えて意見交換を行う。
- 6) 実行委員はそれぞれの専門に従って責任セッションに所属し(別表1)、セッション検討グループを形成する。そして、DLとともに、ワークショップでの議論の方向付けについて検討する。
- 7) 一般会員にはワークショップの情報をメールマガジン、学会ホームページを通じて周知する。

また、ワークショップ当日の議論を円滑に効果的に行うため、事前にメール会議を行い議論の積み上げを行った。また、セッション間の有機的な連携を図るために、学会ホームページにリンクしたディスカッション用掲示板を設置し、活発な議論を展開した。掲示板は渉外幹事により6月中旬に設定されセッション3、セッション4を中心として活発な議論が展開された。セッション1、2についてはメール会議により事前討論が活発に行われた。この様な、事前のディスカッションの中で、プレゼンター、パネリストが決定され、議論の方向性についての検討が、ワークショップ開催の直前まで行われ、その内容は、今回のワークショップにとって非常に有効であったと考えられる。

最終的に、別表2に掲載したプログラムに決定された。

2. ワorkshop報告「今後30年の科学の未来像—放射光の果たす役割—」

ワークショップは70名を越える学会内外の参加者(附属資料)を迎え7月30日、31日に開催された。それぞれのセッションごとの議論の設定と実際に行われた内容について以下にまとめる。

2.1 生命科学の未来像と放射光

生命科学の最終的な目標は生命現象を解明することにある。まず、「今後30年の科学の未来像」では、あまり具体的な内容よりは、何をやりたいのか、何をを目指すのかを念頭に置いたテーマの設定を考え、以下のような3つの分野に整理した。切り口としては、あくまでも構造にこだわった構造可視化装置としての使い方(現状の構造解析は機能解析の一手段であるとし、さらに、より手法的な議論として)、機能分析装置としての放射光(あくまでも構造だけ

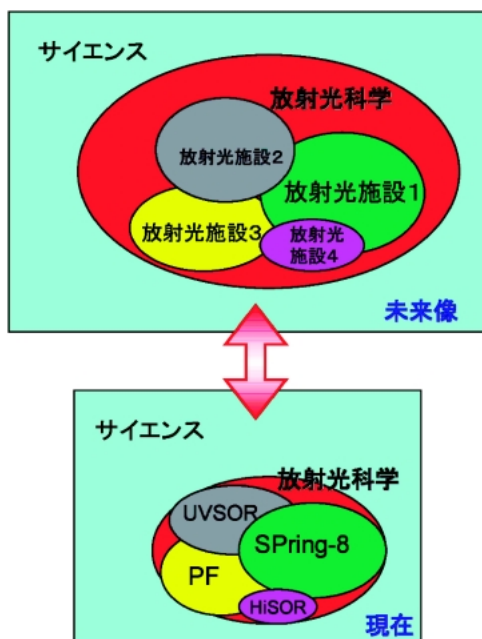


図1 未来像における放射光科学の領域

(別表 1)

各セッションのDLと実行委員によるセッション検討グループ

セッション 1. 生命科学

DL: 若槻壮市 (PF)

中迫雅由 (慶應義塾大学), 山本雅貴 (理研播磨), 中川敦史 (阪大), 渡邊信久 (北大), 高田昌樹 (JASRI)

セッション 2. 物質科学

DL: 村上洋一 (東北大), 繁政英治 (分子研), 小野寛太 (PF)

横山利彦 (分子研), 朝倉清高 (北大), 田中義人 (理研播磨), 矢橋牧名 (JASRI), 平野馨一 (PF), 木下豊彦 (東大), 高原 淳 (九大), 澤 博 (PF), 島田賢也 (広大), 吉沢 (物性研), 籠島 靖 (兵庫県立大), 上原 康 (三菱電機先端技術総合研究所), 妹尾与志木 (豊田中研), 林 好一 (東北大), 北島義典 (PF)

セッション 3. 極限の放射光を目指して

DL: 新竹 積 (理研播磨), 田中 均 (JASRI)

田中義人 (理研播磨), 田中隆次 (理研播磨), 加藤政博 (分子研), 大端 通 (JASRI), 矢橋牧名 (JASRI), 浜 広幸 (東北大学), 原田健太郎 (PF), 羽島良一 (原研), 林 好一 (東北大), 籠島 靖 (兵庫県立大)

セッション 4. 放射光利用のブレークスルー

DL: 高田昌樹 (JASRI)

朝倉清高 (北大), 繁政英治 (分子研), 若槻壮市 (PF), 渡邊信久 (北大), 田中 均 (JASRI), 田中義人 (理研播磨), 田中隆次 (理研播磨), 加藤政博 (分子研), 大端 通 (JASRI), 矢橋牧名 (JASRI), 小野寛太 (PF), 浜 広幸 (東北大学), 中迫雅由 (慶應義塾大学), 新竹 積 (理研播磨), 原田健太郎 (PF), 羽島良一 (原研), 平野馨一 (PF), 山本雅貴 (理研播磨), 横山利彦 (分子研), 木下豊彦 (東大), 高原 淳 (九大), 澤 博 (PF), 中川敦史 (阪大), 村上洋一 (東北大), 島田賢也 (広大), 吉沢 (物性研), 林 好一 (東北大), 籠島 靖 (兵庫県立大), 上原 康 (三菱電機先端技術総合研究所), 妹尾与志木 (豊田中研)

(別表 2)

プログラム

主催: 日本放射光学会

会期: 2004年7月30日(金)~31日(土)

会場: ホテル機山館 (東京都文京区本郷 4-37-20) 会議室

7月30日

- 10:00-12:00 セッション 1. 生命科学
DL (Discussion Leader): 若槻壮市 (PF)
- 10:00-10:30 Presenter: 山本雅貴 (理研播磨)
「見えないものを如何にして見るのか?」
- 10:30-11:00 Presenter: 中迫雅由 (慶応大)
「30年後の放射光生命科学実験に期待すること 生きた細胞を原子分解能でリアルタイムに観察する」
- 11:00-11:40 パネルディスカッション
パネリスト: 藤沢哲郎 (理研播磨), 西野吉則 (理研播磨), 宇佐美徳子 (PF), 中川敦史 (阪大), 渡邊信久 (北大), 足立伸一 (PF), 梅谷啓二 (JASRI)

12:00-13:00 昼 食

13:00-15:40 セッション 2. 物質科学

DL: 村上洋一 (東北大), 繁政英治 (分子研), 小野寛太 (PF)

13:00-13:30 Presenter: 水木純一郎 (原研・放射光) 「自然の自己組織化と放射光」

13:30-14:10 Presenters: 大森賢治 (分子研) 「アト秒精度のコヒーレント制御」
菱川明栄 (分子研) 「強光子場中分子と超短パルス軟 X 線の発生」

14:10-14:40 Presenter: 組頭広志 (東工大) 「材料開発における高速機能解析」

14:40-15:40 パネルディスカッション

パネリスト: 辛 埴 (東大物性研), 守友 浩 (名工大), 間瀬一彦 (PF), 木村 滋 (JASRI)

15:40-16:00 休 憩

16:00-18:00 セッション 3. 極限の放射光を目指して

DL: 新竹 積 (理研播磨), 田中 均 (JASRI)

16:00-16:30 Presenter: 原田健太郎 (PF)

「リング加速器の現状と今後: 小さい垂直エミッタンスの有効利用」

16:30-17:00 Presenter: 浜 広幸 (東北大学)

「線形加速器の現状と今後」

17:00-18:00 パネルディスカッション

パネリスト: 田中 均 (JASRI), 羽島良一 (原研)

18:30-

懇親会 フリーディスカッション (ホテル機山館)

7月31日

9:00-10:00 セッション 4. 放射光利用のブレークスルー

DL: 高田昌樹 (JASRI)

9:00-9:30 Presenter: 羽島良一 (原研) 「励起光源としての放射光」

9:30-10:00 パネルディスカッション

パネリスト: 田中義人 (理研播磨), 腰原伸也 (東工大), 繁政英治 (分子研), 桜井吉晴 (JASRI)

10:20-11:20 Summary Concluding Remarks

にこだわるのではなく光をプローブとした機能解析のツールとしての可能性)と加工装置としての放射光とした。

1. 構造可視化装置(顕微鏡・虫眼鏡)としての放射光
 - 単分子構造解析
 - 結晶構造解析
 - 位相決定法(完全ネイティブからの位相決定)
 - 微小結晶(結晶からナノクラスターへ)
 - 自動化(分光光度計の様な全自動構造解析計へ)
 - 小角散乱
 - 何が出来るのか?(物性測定から分子分解能での構造解析)
 - X線顕微鏡
 - 走査型顕微鏡(ナノプローブとしての放射光)
 - 結像型顕微鏡
 - X線CT
 - レントゲン医療診断
2. 生体機能分析装置としての放射光
 - 生化学反応観察装置
 - 究極の時分割測定
 - 様々な分子運動モードや分子内電子状態調べるスペクトル解析
 - XAFS スペクトル
 - ラマンスペクトル
 - CD スペクトル
 - 非弾性散乱
 - 中性子, ミューオン, レーザーとの融合研究
3. 加工装置としての放射光
 - 医学治療
 - 円偏光とアミノ酸生合成のキラリティー

そして、プレゼンターを山本雅貴氏(理研播磨)と中迫雅由氏(慶應大)に決定し、山本は、「見えないものを如何にして見るのか?」と言うタイトルで、主に手法としての回折・散乱実験の現在の到達点を総括しながら回折からイメージングへの転換を含め話題提供を行った。中迫は、「30年後の放射光生命科学実験に期待すること:生きた細胞を原子分解能でリアルタイムに観察する」において、生体機能をどのような視点からどのように分析したいかについて話題を提供した。さらに議論を深めるために、小角散乱分野の藤沢哲郎氏(理研播磨)、イメージング関連の西野吉則氏(理研播磨)、放射線生物分野の宇佐美徳子氏(PF)、構造解析分野からは中川敦史氏(阪大)と渡邊信久氏(北大)、時分割測定関連の足立伸一氏(PF)、医学診断分野の梅谷啓二氏(JASRI)をパネリストとして招き、各自の研究報告や将来展望を語っていただいた。その後、参加者と共にパネルディスカッションを行った。

議論の要旨を以下にまとめる。

生命科学における現状と30年後の目標

生命科学と放射光の関わりについて、現状と問題点を結晶構造解析・溶液散乱・イメージング・医学について整理

した。

結晶構造解析では、構造ゲノム/プロテオミクス研究での放射光利用より、近未来に“タンパク質構造図鑑”の完成が想定される。生体内での反応機構を直接観察するための超高分解能研究も、放射光利用により0.73 Å分解能に到達しており、水素原子の構造まで見えはじめている。また、アンジュレータから発生する高輝度(光子密度 $>10^{14}$ photons/sec/mm²)の放射光を用いることで、数十μmの微小結晶や結晶格子が長く回折能が弱い超分子複合体結晶からのデータ収集が可能になりつつある。そこで、究極のターゲットとして、 10^6 コピー程度の分子クラスター(サブミクロン結晶)からの構造解析の可能性が議論された。さらに、結晶構造解析の問題(位相問題や放射線損傷)を克服して、放射光を研究装置として一般化していくのが議論された。その中では、小規模な研究所や大学学部レベルで設置可能なSPRING-8級性能の小型放射光装置開発が提案された。

結晶を必要としない溶液散乱(小角散乱)は、非周期性サンプルの動径分布関数などの物理化学量測定法であるが、高輝度放射光によってミリ秒での時間分解測定が可能となっている。さらに、ここ数年間での*ab initio*モデリング法(分子分解能での球充填モデル)の開発によって、低分解能での構造解析が可能となっており、結晶構造解析における位相問題解決についての応用も議論された。

イメージングでは、コヒーレントX線を用いたオーバーサンプリング法によるX線回折顕微鏡が紹介された。現在までに、生体関連では大腸菌のイメージングに成功しており、空間分解能25 nmに達している。しかしながら、SPRING-8のアンジュレータ光源をもってしてもコヒーレント成分の輝度は不足しており、空間分解能の向上にはFELなどの光源のコヒーレンシーについて議論した。一方で、超高輝度放射光は、生物サンプルへの放射線損傷を容易に引き起こす可能性が高い。実際、FELレベルで想定される輝度では分子崩壊までも引き起こすことが報告されており、放射線損傷の克服について議論した。

医学分野では、より安全に微小血管などをターゲットとした微細部可視化や軟骨組織などの難読解部位可視化の研究などが進められているが、臨床での診断を目指してさらなる技術改良が議論された。また、画像診断中心に研究が進められているが、放射線生物研究の成果を取り入れることにより放射光治療の可能性についても議論した。

また、生命科学研究(蛋白質から細胞)において、今後注目されるであろう細胞の原子分解能でのリアルタイムイメージングについて議論した。現在の構造ゲノム/プロテオミクス研究のように個々の生体高分子の立体構造が決定されても、それらのコミュニケーションがわからないと、細胞におけるさまざまな生命現象を理解することが出来ない。つまり、生体高分子および複合体(一個)を「いま」「そこ」にある状態で、電子状態、分子構造ダイナミクス

の直接観察が必要である。また、このような測定が可能になれば、もはやゲノム配列の読み出しも不要であり、蛋白質がいつ発現してどのように利用されるかもすべてわかってしまう。このような実験を行うには、装置面では自発的に運動するミクロンオーダーの細胞にコヒーレントな光をさまざまな向きから照射する、サブミクロン領域に励起光を当てて細胞運動を制御する、時間分割観察する、高速読み出しが可能な検出器・解析技術の開発、放射線損傷の克服など多くの課題が想定される。

そのために放射光が果たすべき役割は

- 1) 巨大タンパク質複合体・微小結晶の構造解析
- 2) 個々のタンパク質からタンパク質ネットワークの解明へ
- 3) 全自動結晶構造解析による構造解析の一般化
- 4) 生体機能の平衡状態から非平衡状態（ダイナミクス）へ
- 5) psec での全原子の時空相関関数の解明
- 6) サブ nm サイズで励起光：外部刺激による応答
- 7) コヒーレント放射光を用いた、溶液散乱・分子イメージングの展開
- 8) 医学分野での診断・治療への応用

解決すべき問題

照射損傷・分子崩壊を如何に克服するか。

超高輝度 X 線による照射損傷は避けられず、生命科学における次世代放射光利用の最大の課題である。解決法として、極単パルス（<5 fs）の超高輝度光を用いて、サンプルとの相互作用により分子崩壊が起こる以前の状態を記録可能であることが指摘された。しかしながら、単一イメージからの三次元立体構造再構成は不可能であること、繰り返し測定が必要となった場合には平均構造しか得られないことから、さらなるブレイクスルーが必要である。

この問題については、光源の特性との関連については、加速器分野の参加者と、また、そのメカニズムについては化学・物理分野の参加者を中心に議論が展開された。

2.2 物質科学（物理・化学・材料科学分野）における未来像

物質科学のセッションは、カバーする分野が広すぎるため、まず物理・化学・材料に大別し、それぞれの分野の中でもある程度議論する内容を絞ることにした。物理分野では、プレゼンターとして水木純一郎氏（原研・放射光）を選出し、非弾性 X 線散乱を議論の中心にして「自然の自己組織化と放射光」と題し、放射光による一般化された感受率 $\chi(Q, \chi)$ 測定の重要性を述べた。化学分野では、レーザー分子科学に焦点を絞り、学会外より大森賢治氏（分子研）の「アト秒精度のコヒーレント制御」と、菱川明栄氏（分子研）「強光子場中分子と超短パルス軟 X 線の発生」と題する講演を行って頂いた。超高速レーザー分光の現状と将来が述べられ、どのような放射光なら将来レーザー分子科学を超える領域を開拓できるのかについての話題を提

供して頂いた。また、材料分野では、「物質開発と放射光測定との連携」「高スループット測定・コンビナトリアル測定と物質開発へのフィードバック」という観点から組頭広志氏（東大工）が「材料開発における高速機能解析」と題する話題提供を行った。パネリストとしては、構造物性の立場から辛埴氏（東大物性研）、放射光により光励起状態の構造を見るという視点から守友浩氏（名大工）、内殻励起による化学反応制御は可能かという視点から間瀬一彦氏（PF）、ナノマテリアル解析の観点からの X 線顕微鏡の可能性について木村滋氏（JASRI）が活発な議論を展開した。

議論の要旨を以下にまとめる。

30年後の物質科学における放射光の役割

物理分野

目標として、新物質合成のための構造物性研究の確立、電子相関効果による機能発現機構の解明、化学反応の可視化が提案され、今後の放射光の役割としては

- 広い Q, ω の範囲で $\chi(Q, \omega)$ の精密測定を可能にすること
- 表面・界面やナノ領域、さらには単分子での物質構造と電子構造を精密に決定すること
- 電荷・軌道・スピン構造を基底状態だけでなく励起状態においても決定すること
- さらにその時間分解した励起構造を決定すること
- 表面反応などの単発現象のダイナミックスを可視化（実時間計測、自己時間相関の計測）をすること

であると提言された。

そのためには、超短パルスの高輝度放射光がモノクロ・アナライザー・ミラーなしで得られ、高い空間・時間コヒーレンスが実現される必要があることが指摘された。

今後のサイエンスの発展に放射光の利用が新たな展開をもたらす可能性がある分野として

1. 極限条件下（強磁場 $H = 100$ T、超高圧 $P = 300$ GPa）磁気散乱・非弾性散乱
2. ナノ領域、表面・界面での電荷・軌道・スピン構造のイメージング
3. eV~feV 領域での各種素励起分散の可視化
4. 機能・物性出現状態の原子構造、電子構造（反応ダイナミックス）
5. psec 領域での時間分解原子構造

の研究が挙げられた。

化学分野

レーザー分子科学の最前線を参考に議論が展開され、

- 1) 30年後に FEL などの高コヒーレンスの実現により、レーザーでは到達できないエネルギー領域での励起光としての放射光利用により、化学反応制御やそれに基づく新たな物質合成法（軟 X 線領域でのコヒーレント制御）の可能性が示唆された。

そのためにはフェムト秒レーザー利用実験の現状か

ら、近未来に実現しそうな軟 X 線、X 線 FEL の利用について種々の角度からの分析・検討を至急開始する必要があることが提言され、まず、光学素子開発の劇的な進展は必須であることが指摘された。

FEL の短波長化が順調に進んだ場合、内殻電子の局在性を反映した反応制御が現実のものとなる可能性がある。この場合、既存の短パルスレーザーにより実現されている化学反応制御と比較して、極めて複雑な競合過程が存在するので多くの困難が予想される。しかし、それ故の新しい面白い展開もありうる。

軟 X 線、X 線による強光子場中の分子の振る舞いの研究も光と分子との相互作用の新領域として注目されることも提言された。

一方で、

- 2) 30年後にはレーザー分子科学も発展する可能性もあることが指摘され、仮にテーブルトップの軟 X 線、X 線レーザーが出現した場合、短パルス発生を目指した放射光の位置づけは非常に微妙になると考えられる。しかし、その際も、光学素子の開発の必要性は共通の課題として挙げられる。

レーザーの進展状況によっては短パルス、強光子場という方向で競ってもあまり意味があるとは考えにくい。むしろ、放射光は広波長範囲の光を安定に供給できるというメリットを活かした研究に寄与すると思われるという提言がなされた。

30年後の放射光の存在意義を今論じることが難しいが、第4世代光源が安定に稼働するまでの間は、最先端の光源開発という方向と、より汎用性の高い広帯域の高強度・安定光源という二つの方向へ二極化してゆくことにはなるだろう。最先端の光源開発とその利用研究の部分では、放射光科学（加速器及び分子科学）とレーザー分子科学との連携が極めて重要になってくるとの提言がなされた。

材料科学

最近の材料科学では、磁場による誘電分極の制御や電場による磁性の制御と言ったような、これまでの一つの物性とその共役な場という単一機能の材料から、より複雑な機能をもつ素子の開発が進められている。しかし、これらの材料では制御が必要とされるパラメーターが多数になるため、その開発には多大な時間が必要である。このような状況を打破するために、高スループット測定・コンビナトリアル的手法による材料評価の高度化、高速化、簡便化、精密化が重要になることが提案された。また、物理的・実用的限界に近づいている半導体材料のブレイクスルーとなる新材料開発に、放射光を用いた材料評価が大きく貢献できるのではないかと指摘された。特に放射光を用いた材料評価法としての X 線顕微鏡は、非破壊でのデバイスの状態解析、動作状態での評価を可能とするものとして期待される。

30年後の放射光の存在意義は、他の評価手法では測定できない手法を数多く提供できるかどうかにかかっていると考えられる。

2.3 極限の放射光を目指して

このセッションでは、放射光の潜在能力の現状と今後の発展の可能性を示すこととした。それにより、個々の潜在能力（特性）を組み合わせることによる新たな実験の可能性をユーザー側から引き出す役割を果たすことを目的とした。

放射光の潜在能力（可能性）として以下の項目を設定した。

- (a) 空間的に小さい光
マイクロフォーカスからナノフォーカスへ
- (b) パルス幅が小さい光
ピコ、フェムト、アット秒のパルス
- (c) シングレットな光（シングルパルス光）と光パルス間隔可変性
- (d) パルスの繰り返し
- (e) 高強度
- (f) 強度可変
- (g) 平行性
- (h) 単色性＋エネルギー可変性
- (i) 空間＋時間の干渉性
- (j) 白色性
- (k) 安定性（エネルギー、位置、強度など）

一方、目標達成は、常に時間スケールのもとに議論される必要があり、原理的に出来るということだけ、夢物語を語るだけでは議論が進展しない。よって、技術的な困難さの評価から、どのくらいの時間でどこまで行けるのかという議論もめざした。また、加速器で出てくる光を実際に利用する事を考えた場合、克服していかなければいけない点を、加速器研究の視点からパラメータリストの値として示し、真に、ユーザーの用いる光の特性に反映されるための議論を展開することを心がけた。

このような議論を、ざっくりばらんに、かつ、エネルギーシユを行うために、2人の加速器専門家に、議論を沸騰させるような、自身の研究の拘りに根ざした話題提供を求め、原田健太郎氏（PF）に、「リング加速器の現状と今後：小さい垂直エミッタンスの有効利用」と題する話題提供を、学会外からは浜広幸氏（東北大）に「線形加速器の現状と今後」と題する話題提供を行ってもらった。パネリストとして田中均氏（JASRI）、羽島良一氏（原研）が議論に加わった。

議論の要旨は以下のとおりである。

中・長期的視点（10～20年先）に立てば、線形加速器ベースの光源開発（FEL, ERL）が将来の光源性能の Front row を切り開いていく事は明らかである。これは、線形加速器ベースの光源では、円形加速器（蓄積リング）の直面している“放射のリコイルとしてのヒーティングに

よる電子ビームエミッタンスの劣化”が極めて少ない利点があり、また、電子バンチ長の制約も緩いためにピコ秒以下の放射光が得られるからである。ただし、X線領域における線形加速器ベースの光源を実用化するまでには、低エミッタンス電子源の開発や、加速器の高度安定化などの技術的・工学的課題が残されているといえる。ERL光源、IR-FEL, SASE-XFELやSeeding FEL+HGFG等により、極端短パルス光、2次元空間干渉性、高度の時間干渉性を有する夢の光（赤外からX線に渡って）が実現するレールは確実に引かれつつある。その発展形態は、得られる放射光の特性に特化した幾つかの個別光源に分化していく可能性が高い。

次世代放射光源の候補であるERLとXFELに関しては、わが国でもその基盤技術の確立を目指した研究が始まっている。ERL, XFELが実現すれば、空間コヒーレンス、輝度、短パルス性等の点において、従来の蓄積リング光源では到達困難であった領域へ放射光利用研究が広がっていくであろう。ERLでは、縦横同一エミッタンスを利用した微小空間（ナノメートルサイズ）へのX線集光や、フェムト秒X線を生かした時分割実験などが期待されている。XFELでは、そのピーク輝度を最大限に活用することでシングルショットの結晶構造解析、さらに、結晶性を持たない単粒子の構造解析の可能性まで議論されている。しかしながら、このような次世代光源における利用研究の調査・探究は、そのほとんどが従来の放射光利用の枠組を越えていないのも事実である。次世代光源で得られる放射光の特性（空間コヒーレンス、時間コヒーレンス、短パルス）を完全に使い切るには、個々の実験技術（例えばX線検出方法）から考え直すくらいの柔軟な発想があってもよいだろう。光源開発側では、これらの科学の発展を睨みながら、長期的視点での加速器基盤技術、即ち、低エミッタンス電子銃、エミッタンス増大を最小限とするバンチ圧縮技術、fsタイミング同期技術、ビーム加速系の安定化と線形加速器ビーム安定化技術の開発が重要かつ不可欠であり、これらの技術基盤整備なくして、次世代、次世代光源の実用化はなしえない。これらの技術基盤整備には、異分野、特にレーザー及び通信分野の研究者との交流によるテクニカル・トランスファーや刺激等も重要になってくるだろう。

一方、短期的視点で見れば、SPring-8に代表される円形加速器光源に、幾つかの可能性が残されている。この光源は、まさに円熟期にあり、光の安定性はミクロンからサブミクロンの領域に届きつつある。電子ビームのエミッタンスは、現状、数nm・rad、垂直/水平エミッタンス結合比 ~ 0.001 、バンチ長数十psecが無理なく実現可能である。空間ビームサイズは、現状の光源を用いても、50nmを切るビームが得られており、後は光子数を如何に稼いでいくかと言う問題が残されている。現状の光源性能を改善する大きな可能性は、比較的低エネルギーの高いリングでの

超直線部の有効利用であろう。蓄積リングの垂直エミッタンスの小さい特徴（SPring-8では $\sim 5\text{ pm}\cdot\text{rad}$ ）を利用すれば、クラブ空洞を用いた短バンチ化により1psec程度の高フラックスでの短パルス生成が可能になる。4次元位相空間回転機を前後に配置し、4次元位相空間分布の変形による水平エミッタンスの低減（但し垂直エミッタンスは増加）も可能で、 $\sim 0.1\text{ nm}\cdot\text{rad}$ の水平エミッタンス生成の可能性もありそうだ。短パルス生成に関しては、逆偏向電磁石を利用したユニークなリング（NewSUBARU）で、既に、微小電流ながら約2psecの短パルスも得られており、低アルファをうまく利用していく可能性も残されている。

まったく異なる視点から、単一電子による放射光の特色と利用につき提案があった（理研播磨：新竹積）。これは、電子ビームの電子数を極端に少なくすることで、単一の電子が本来発生する放射光の特性を持たせることができ、典型的な放射光リングでは、アト秒（Atto-second）のシングルパルスの光が発生可能となるというアイデアである。そこでは多数の電子による統計的なゆらぎがなくなり、常に100%の干渉性をもちうる。また、1個の電子からの放射光の瞬間強度は、通常のアンペア級のビームから発生する放射光に比べて一桁ほど低いのみであり、今後、X線検出器の高度化に伴い、十分に実用になる光源として認識すべきである。また完全干渉性を利用した実験が、将来のX線FELの完成を待たずに現在の加速器でもある程度までは実施可能である。

このような状況を理解した上で、日本として、短・中・長期の開発課題を現状光源の進化と将来光源実現を視野に入れ、戦略的に実施していくことが極めて重要である。本放射光学会の重要な責務とは、このような視点から、日本の放射光分野を下支えしていくことであろう。

2.4 放射光利用のブレークスルー

光源と利用の双方の研究者が将来の放射光利用について議論するセッションとして、放射光のブレークスルーというセッションを設定した。ここでは、「放射光による励起」をテーマとして設定しProbeとしてだけではなく励起光としての放射光の利用の可能性について議論した。

光源サイドからの話題提供者として、羽島良一氏（原研）をお願いした。羽島氏は、講演のアウトラインを以下のよう

- [1] 赤外領域の光源
蓄積リングからのコヒーレント放射
（コヒーレントシンクロトロン放射, steady-state, burst mode）
リニアックおよびERLからのコヒーレント放射
IR-FELについて発生できる光の特徴（強度、スペクトル、パルス幅、コヒーレンスなど）
- [2] VUVから短波長の光源
次世代光源として提案されている、SASE-FEL,

seeded-FEL の特徴

(強度, スペクトル, パルス幅, コヒーレンスなど)

[3] タイミング同期技術

pump-probe 実験で大切な, 放射光と外部レーザーの同期 (フェムト秒オーダー)

[4] 今後の展望

パネリストとしては, 利用の立場から田中義人氏 (理研 播磨) がレーザー同期による pico 秒の結晶ダイナミクスの研究展望を, 腰原伸也氏 (東工大) が時分割による光励起構造変化の観測の必要性を光物性の立場から, 繁政英治氏が (分子研) が内殻励起の化学の展望を, 桜井吉晴氏 (JASRI) が励起対象としての真空について, 議論を展開した。

議論の要旨は以下の通りである。

放射光を励起光源として用いるためには, 波長, スペクトル, パルス幅, タイミングなどが制御され, かつ, 多数の光子を含んだ放射光パルスが必要である。このような放射光パルスを得る方法のひとつは, 個々の電子が放射する光を干渉させ強め合わせることである。

赤外領域では, コヒーレント放射と赤外 FEL が代表的な光源である。フェムト秒電子パンチを大電流で加速できる ERL を用いれば, THz 領域で既存光源を 6~8 桁上回る強度の放射光が得られるので, 分析光としてのみならず励起光としての利用が可能になる。強度と安定性に劣るが, 蓄積リングにおけるコヒーレント放射の利用も可能であり, いくつかの施設で利用が試みられている。一方, 既に多年にわたる技術の蓄積がある赤外 FEL は, UV~X 線放射光と組み合わせることで励起光源として新たな役割が期待される。

次に, VUV から短波長領域の光源としては, SASE-FEL, seeded FEL, レーザーコンプトン γ 線があげられる。SASE-FEL は, X 線領域のコヒーレント光源として数年後には実現する見込みである。最近では, スリット付きフォイルを用いてアト秒の X 線 FEL を発生するアイデアや, 発振光をフィードバックして強度の安定化を図る方法が提案されている。SASE-FEL を, いっそう使いやすい光源とするためには, ユーザーからの要求を積極的に提示するとともに, 加速器研究者には新規のアイデアを捻出することが望まれる。外部からのレーザー入射により発振を得る seeded-FEL では, パルス幅, 時間コヒーレンスを直接的な方法で制御できる。また, 周波数変調 (チャープ), 位相の制御も原理的には可能であり, 励起光として極めて有用な光源となり得る。可視, 赤外域に相当する光学系が短波長領域で開発されることも, 短波長光源開発にブレークスルーを与える重要な要素になり得る。その際には, 現在普及しているレーザー光源技術が直接的に参考になる。また, X 線などの短波長領域でレーザーという用語を既に使用していることから鑑みてもレーザー業界を積

極的に意識していくことになるであろう。レーザーコンプトン γ 線を用いた研究では, 特に 10 MeV 領域で新たな光核研究 (天体核物理など) の展開が期待できる。 γ 線発生に必要な装置は放射光施設に組み込むことが可能であるので, 新光源の設計において考慮すべきであろう。

線形加速器におけるタイミング同期技術は, 100 fs オーダーではほぼ実現しているが, 長距離のタイミング信号伝送など今後に実証すべき課題もある。10 fs オーダーの同期は加速器にとって未知の領域であるので, レーザーや通信などの分野の成果を取り込みつつ, 新たな挑戦がなされることを期待する。一方, 利用側での工夫例として, fs のタイミング同期を達成する代わりに, パルス毎の相対タイミングを高精度で記録しておき, 一連のデータを取得後, 相関をとる方法もある。

利用の立場から, 複数光源を用いたダイナミクス計測には X 線極短パルスは大変有用であり, 特に 1 ps という時間は, フォノンダイナミクスをはじめとした物理現象で魅力あるものが多々ある領域である。特に強相関係の光誘起相転移現象等は注目の候補である。また, 大強度で運動量の大きい放射光が出現すれば, 対生成の可能性など基礎物理への貢献が期待される。さらに大強度のコヒーレント光照射時の外場を摂動として扱えない原子状態の研究は, 現在のレーザー物理学では盛んであるが, その高エネルギー版を発展させることができるであろう。化学の分野でもポンプ・プローブ法で観測可能になる超高速現象, たとえば内殻正孔状態の緩和, オージェ電子と光電子の間での干渉効果などは今後注目の的となる可能性がある。さらにこれらを利用した反応制御も将来期待できる。これらの利用研究の発展には, 他の光源, 環境との組み合わせが不可欠であり, そのためには, 「コンパクト化」も鍵となるであろう。このような目標の達成のために, 現存装置改良と, それに組み合わせた新装置開発を, 量子光学, レーザー科学分野と協力しながら分野横断的に推進することが必要不可欠である。またそのような装置開発は, 短パルス高エネルギービーム線の工学的, 産業利用発展の視点でも今後需要は必然的に高まってくるものと予測している。

3. まとめ及び提言

3.1 まとめ

今回のワークショップでイメージングや周辺技術, 産業利用など議論できなかった分野がまだ多く残っている。そして, 光源と利用の間でのパラメーターを交えた議論はまだ, 不十分であった。また, 今回議論されたテーマ及び内容は, 必ずしも, 30年後の未来像とは言えず, 現状から予測できるものが多いとの指摘もあった。その一方で, ワークショップにおける議論は, 既存の装置でもできるサイエンスの掘り下げも行うべきであるとの指摘もあった。しかしながら, 今回, 光源と利用の間で, 将来の放射光科学の役割を, 分野を越えて議論し概観することができたこ

とは非常に有益であったと言う共通の認識を得ることはできた。本ワークショップでの議論の重要性、有用性を認識し、セッション終了後の全体討論での議論を基に以下の点について提言を行う。

3.2 提言1：光源と利用研究の将来像

- 1) 放射光の特性（時間、コヒーレンス、エミッタンス、エネルギー）の現状と将来
リング加速器の現状と将来

空間的に小さな限界：

現状：理論限界をほぼ達成～120 nm

将来：フォトン数をどうふやすか？

時間：

現状：数10 ps,

将来：サブピコ～fsの世界へ

（低垂直エミッタンス+長直線部+クラブキャビティ、レーザースライシングなど）

パンチ可変性：電子数を増やすことも含めて将来にわたって多様な可能性

高強度、白色性：平均強度はリニアックより強い。

単色性、エネルギー可変、安定性：

将来：電子のエネルギー幅はシンクロトロン放射による平衡条件で制限

安定性はミクロン以下へ

エミッタンス：現状 数 nmrad 将来 0.01 nmrad へ

低垂直エミッタンス+長直線部+4次元位相空間回転機

リニアックの将来

SASE-FEL, seeded-FEL, ERL

高強度 fs の時間パルス、高空間、時間コヒーレンス+瞬間の高強度、可変偏光特性などが実現する。

低いと言われている安定性も上がっていく可能性がある。

空間コヒーレンス、時間コヒーレンス、位相の絶対値制御を利用した研究が可能になる。

利用サイドからの要望として、将来コンパクトな放射光、ラボラトリーサイズの実現が望まれる。

- 2) 利用研究の将来像

- 1) 構造観察

イメージング：平均構造から絶対構造へ

時間分解：迅速測定、ダイナミクスの研究

励起状態の観測

物質中の機能を持つサイトだけを取り出し分析

- 2) 評価技術

コンビトナリアル材料解析

ハイスループット化の促進

デバイスでの状態・動作状態での評価

（電顕、AFM、等の他の評価技術との差別化）

- 3) 新しい利用の概念（レーザー、中性子ではできない領域）

生体の診断・治療の可能性

励起光源としての放射光の利用：

内殻励起による化学反応制御

高コヒーレンス光による物質の現象（反応）の量子制御と物質創生

生体分子への外部刺激

以上のまとめたものの相関関係を図2に示す。

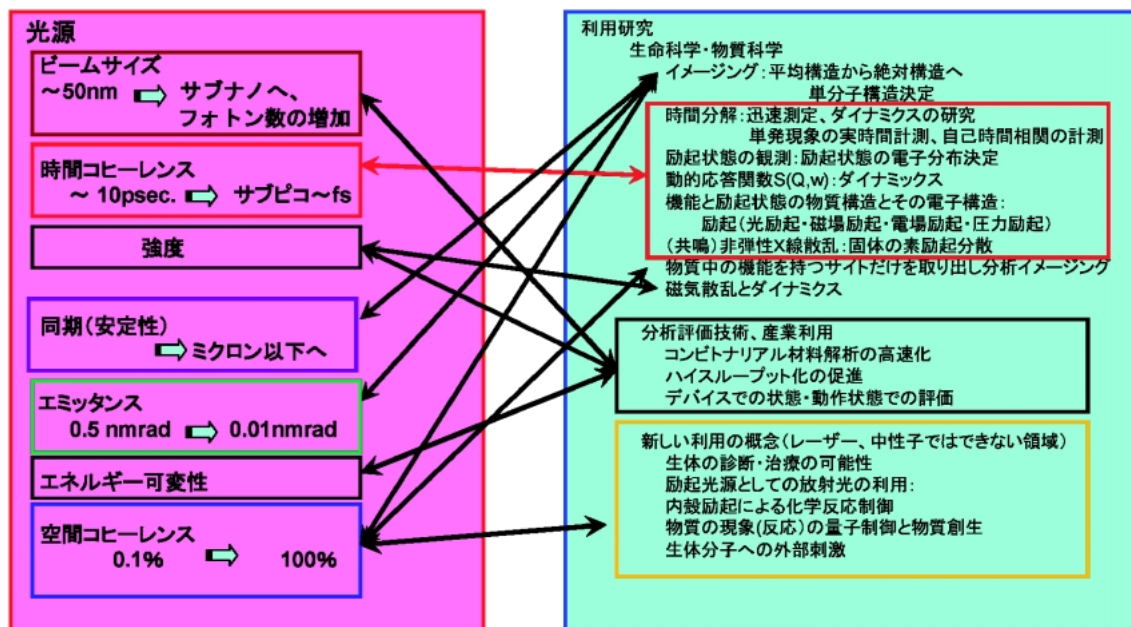


図2 光源と利用研究の将来像

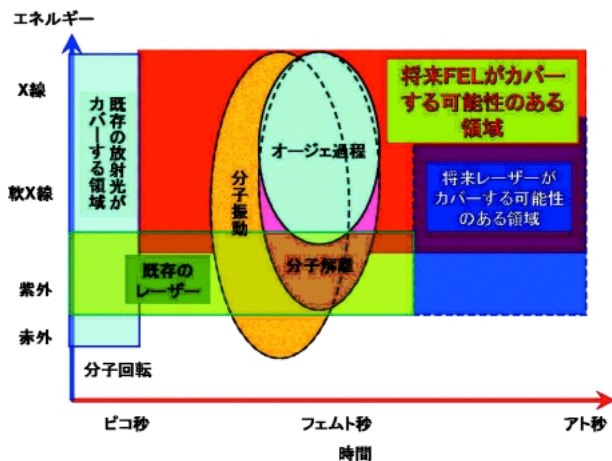


図3 放射光科学がカバーするサイエンスの現象

3.3 提言2：放射光科学がカバーするサイエンスの現象

セッションでの議論を基に、放射光の発展により放射光科学が将来カバーできるようになるサイエンスの現象についてまとめたものである。

化学分野でのエネルギー軸と時間軸で、整理すると図3のようになる。

物理分野では

$$E=3\text{--}10\text{ keV} \quad \Delta E=1\text{ meV}\sim 10\text{ eV} \quad t=10^{-15}\text{ sec}$$

(共鳴)非弾性X線散乱：バンド内・間遷移，電荷・軌道励起，フォノン，プラズモン磁気散乱とダイナミクス，

$$E=\text{数}10\text{ keV}\sim 300\text{ keV} \quad t=10^{-9}\text{ sec}$$

ドメインダイナミクス，

(磁気)コンプトン散乱：運動量空間のDOS，フェルミオロジー，電子軌道

$$E=\text{数 keV}\sim \text{数十 keV} \quad t=\text{サブピコ sec}$$

トムソン散乱：光励起金属・絶縁体転移，励起状態の電子分布決定，単分子構造決定，単発現象の実時間計測

$$E=\text{数十 eV}\sim \text{数 keV} \quad t=\text{サブピコ sec}$$

スピン・角度分解光電子分光：スピン依存の電子構造
これらから、時間軸、エネルギー軸において、レーザーや中性子などが到達できない、次世代の放射光科学が切り開くであろう未踏分野が数多く残っていることがわかる。

3.4 提言3：化学分野のプレゼンターからの放射光科学の将来への提言

◎量子位相制御の立場から

- (1) 物質の波動性をフルに活用した量子操作の展開に期待する。
- (2) 測定量子力学的な位置づけについての問題提起。
- (3) 高エネルギー領域の複雑な過程を記述するための新たな理論的枠組みの構築の可能性がある。

◎強光子場の発生と利用の立場から

- (1) 高調波による短パルス軟X線は、限界に近づきつつある印象もある。次の展開は Seeded-FEL のような加速器との組み合わせが必要不可欠である。

- (2) 短パルス軟X線或いはX線の光子場が 10^{16} W/cm^2 に近づけば、全く新しい物理現象の観測の可能性もある。

3.5 提言4：今後のワークショップ活動について

多様な研究分野にわたる放射光学会員が、放射光科学の将来像のビジョンを共有し、密接な連携を図るために、今後、サイエンスを中心とした今回のようなワークショップを、学会外の研究者も加えて定期的に行っていくこと。

3.6 提言5：ワークショップの成果発表について

ワークショップの成果として、放射光学会年会において、企画講演の提案を行うこと。本ワークショップの成果としては、例として、以下の様なシンポジウムを企画講演として提案することが提言された。

タイトル：未来の放射光の役割—励起光としての放射光が拓くサイエンス—

1. 光源の可能性
2. 物質の励起状態の観測の可能性
3. 物質の量子制御の可能性
4. 生命科学の新展開

4. おわりに

ワークショップでは、参加者が積極的に議論に参加し、多くのディスカッションの時間を設定したにもかかわらず、時間が足りないほどであった。また、当日ワークショップに都合で参加できなかった実行委員の方々もプレゼンターやパネリストの選定、議論の方向性の検討に積極的に加わっていただいた。本報告書は、ワークショップ実行委員会のメンバーが中心となり取りまとめたものである。また、本報告書の全体にわたりワークショップ参加者、放射光学会幹事会、そのほかの方々のご指導やご助言を頂いた。今回行ったワークショップが、幅広い科学研究分野にわたって分布する放射光学会会員の間で、将来ビジョンの共有することの重要性を認識する機会となり、今後の放射光科学の科学技術全般における位置づけの議論の端緒を開く契機となれば幸いである。

5. 附属資料 参加者リスト

秋津貴城（慶応大），秋山修志（理研播磨），足立伸一（KEK-PF），天田健一（JASRI），荒川孝俊（東京農工大），五十嵐教之（KEK-PF），伊藤和輝（理研播磨），上原 康（三菱電機），宇佐美徳子（KEK-PF），梅谷啓二（JASRI），大端 通（JASRI），大森賢治（分子研），奥田太一（東大物性研），小野寛太（KEK-PF），籠島 靖（兵庫県立大学），加藤政博（分子研），上西達也（理研ゲノム），河田 洋（KEK-PF），北島義典（KEK-PF），木下豊彦（東大物性研），木村 滋（JASRI），木村真一（分

子研), 久保田正人 (KEK-PF), 組頭広志 (東大), 腰原伸也 (東工大), 酒井宏明 (理研ゲノム), 桜井健次 (物材機構), 櫻井吉晴 (JASRI), 佐々木裕次 (JASRI), 澤博 (KEK-PF), 繁政英治 (分子研), 島田賢也 (広大), 下山 巖 (関西原研), 辛 埴 (東大物性研), 新竹 積 (理研播磨), 鈴木昌世 (JASRI), 鈴木 守 (阪大), 妹尾与志木 (豊田中研), 大門 寛 (奈良先端大), 高田昌樹 (JASRI), 高原 淳 (九大), 田中隆次 (理研播磨), 田中均 (JASRI), 田中義人 (理研播磨), 中川敦史 (阪大), 中迫雅由 (慶應大), 西野吉則 (理研播磨), 羽島良一 (原

研), 浜 広幸 (東北大), 林 好一 (東北大), 原田健太郎 (KEK-PF), 菱川明栄 (分子研), 日高將文 (東大), 平木雅彦 (KEK-PF), 平野馨一 (KEK-PF), 藤澤哲郎 (理研播磨), 藤澤正美 (東大物性研), 間瀬一彦 (KEK-PF), 松垣直宏 (KEK-PF), 松下 正 (KEK-PF), 丸山亮介 (JASRI), 水木純一郎 (関西原研), 村上洋一 (東北大), 百生 敦 (東大), 守友 浩 (名大), 諸岡正和 (プロテインウエーブ㈱), 柳下 明 (KEK-PF), 山田悠介 (KEK-PF), 山本雅貴 (理研播磨), 若槻壮市 (KEK-PF), 渡邊信久 (北大)



図4 ワークショップの参加者

ワークショップ実行委員会

高田昌樹 (JASRI, 放射光学会行事幹事), 田中 均 (JASRI), 新竹 積 (理研播磨), 若槻壮市 (PF), 山本雅貴 (理研播磨), 村上洋一 (東北大), 繁政英治 (分子研), 横山利彦 (分子研), 木村真一 (分子研), 中迫雅由 (慶應義塾大学), 朝倉清高 (北大), 渡邊信久 (北大), 田中隆次 (理研播磨), 田中義人 (理研播磨), 加藤政博 (分子研), 大端 通 (JASRI), 矢橋牧名 (JASRI), 小野寛太 (PF), 腰原伸也 (東工大), 守友 浩 (名大), 浜 広幸 (東北大学), 原田健太郎 (PF), 平野馨一 (PF), 木下豊彦 (東大), 高原 淳 (九大), 澤 博 (PF), 中川敦史 (阪大), 島田賢也 (広大), 林 好一 (東北大), 籠島 靖 (兵庫県立大), 北島義典 (PF) 上原 康 (三菱電機先端技術総合研究所), 妹尾与志木 (豊田中研), 放射光学会幹事会

参加者の寄稿文

30年後の放射光生命科学実験に期待すること 生きた細胞を原子分解能でリアルタイムに観察する

中迫雅由（慶應義塾大学）

生命科学の歴史を紐解くと、その源流のひとつとしてレーヴェンフックによる顕微鏡開発とそれを発展させたフックによる細胞“CELL”の観察を挙げることができよう。彼らの飽くことの無い“肉眼では見えない極微の世界”への憧憬と欲求は、生命の基本単位となる細胞の発見につながった。現在までの生命科学分野における放射光利用も、そのような生物学事始めに似て、“ナノメートルスケールの見えないものを如何にして観るか”を主眼として行われてきたように見受けられる。実際、我国で進行中のタンパク3000プロジェクトに代表される分子レベルでの構造生物学研究や細胞のX線イメージングなどは、分解能は大きく異なるものの、その精神は非常に似通っている。

生命体の基本単位である細胞や細胞内小器官において営まれている生命活動の素過程を原子・分子レベルで読み解くためには、遺伝子産物（遺伝子）がどんな格好で（立体構造構築原理、立体構造解析）、何時どこに現れ（細胞イメージング）、どのような副次的修飾を経て（翻訳後修飾解析）、如何にして機能するのか（遺伝子産物の機能解析、蛋白質の動的構造変化、一分子生理学）、周辺の溶媒分子（水）や有機化合物（脂質、糖）とどのような相互作用を行うのか、などといった広い時間・空間での事象を網羅的に記述しなければならない。現在、生物学は原子レベルでの個別分子の構造解析、遺伝子産物の機能解析、細胞内での蛋白質動態観察などによって大きく発展しつつある。しかし、サブミクロンの空間領域やナノ秒から秒の時間領域における様々な細胞構成分子の衝突やコミュニケーションを実時間・原子レベルで可視化してこそ、生命現象の原子レベルでの真の理解が得られるのではなかろうか。すなわち、細胞や細胞内小器官1個の中で、“何が 何時 何処で 何と 何をしたか”という、いわば、細胞丸ごとの時間・空間相関を観測して初めて、われわれを形作る細胞の巧みさを真に目の当たりにすることができるのかもしれない。

最近、コヒーレントな放射光X線を用いれば、細胞のX線散乱パターンを多数集積することで原理的には原子レベルでの位相回復が可能であることを示唆する実験が行われた。そのような現状と今後の大きな技術的飛躍を夢想しながら、30年後の未来における生命科学分野での放射

光利用を考えると、“生きた細胞を原子分解能でリアルタイムに観察する”ことが切に期待される。細胞を原子レベルで観察することができるようになれば、得られる電子密度図の中に細胞を構成する水分子もすべて含めた全原子の分布が得られる。三次元の巨大なパノラマ地図を見るかのごとく、われわれは細胞の内部を旅することができよう。細胞1個さえあれば、電子密度の中にすべての構造情報が集約されており、もはや、遺伝子の大量増幅・DNA配列の化学分析も省け、手間のかかる蛋白質の大量生産・精製、構造解析のための結晶化などは不要となってしまうのである。また、放射光を励起光源としてみた場合、視細胞のような特殊な細胞のごく一部を光励起し、その後の細胞運動を可視化することで、細胞内信号伝達の仕組みを原子レベルで追跡することができよう。さらには、組織特異的な細胞やがん細胞の成り立ちを手取るように眺めることで、原子・分子レベルでの真のテーラーメイド医療が実現するのではなかろうか？

このような“夢への期待”に現状の光源や装置技術に基づいた十分な見込みがあるわけではないが、放射光利用の大きな目標として、また、さまざまな周辺技術開発の動機付けとして十分に価値のあるものと考えられる。細胞の原子分解能での可視化は、換言すれば、ミクロンサイズの不均一粒子内での原子分布を観察することである。そのため、そのようなイメージング技術は、生命科学だけではなく、複雑液体や高分子などの非結晶、不均一系の物理化学研究の展開にも大きく寄与できるのではなかろうか。このような観察技術を実現するには、自発的に運動する細胞を追跡しながら、細胞サイズを上回って十分大きな領域でコヒーレントな高強度X線をさまざまな角度から細胞に照射し、高空間分解能領域まで非常に短い時間でスナップショットを取得できる装置が必要となる。果たして、“このような実験が可能か？”と問われると“現状では不可能だ”としか答えようがない。なんといっても放射線損傷の克服という厚い壁がある。今後30年の技術発展をシンクタンクよろしく予測するすべは私にはないが、科学者の努力と英知による大きな発展を期待するならば、猛暑の朝に夢想したとてつもなく不可能な課題に挑戦してみたいものである。

放射光科学の今後30年を語るワークショップに参加して

林 好一（東北大金研）

今後30年の放射光科学について議論するというスケールの大きい企画のワークショップに参加した。会の趣旨は、今後30年の間に活性化するであろう研究対象を自由に議論し、それに基づき新しい放射光施設建設に関する方針を打ち出すことであったと思われる。筆者は、普段、自分の研究を遂行するのに必要な範囲内で物事を考えていることが多い。そのために、“放射光科学”分野全体に関する将来構想に触れるのは新鮮であり良い刺激になった。会は大きく4つのセッションに別れ、プレゼンター及びパネラーが各々自分の研究に基づいた将来展望を述べ、後にフリーディスカッションに移るという形式であった。ここでは、筆者の感想を述べる。

筆者は金属材料研究所に所属している関係から、とりわけ材料分野における放射光利用に関する事柄には興味がある。ワークショップにおいては、SPring-8をF1、PFをバス（大衆車）に例えた話題が大変印象的であった。個人的には、PFも先端研究施設の一つであり、F3000位にはランクされても良いのではないのだろうかと思った。F1で培われた技術は、一般大衆車の開発に還元されているが、これをX線で例えるとどうなるのであろう？ あくまで一般大衆車というのは、各研究室レベルで利用できるX線発生装置を指しているように思われる。今の放射光技術をより効率よく産学界へ還元するには、話題としても挙げたが、各大学や研究所単位で利用できるコンパクトな放射光装置の開発が鍵となるように思われる。また、企業の材料開発に携わる研究者にとって、放射光施設における実験は、申請から測定まで時間がかかることなどのバリアが存在する。施設利用のルールを整備して、例えば、製作直後の試料を送付し、施設に到着し次第、測定してもら

うということができるようにすることも一つの方向性として検討されるべきかもしれない。

一方で、普及や一般化だけでなく、高度な放射光利用の道を探るのも重要なサイエンスである。例えばカミオカンデに代表されるように、最先端研究施設を用いることにより、今まで見えなかったものが見え、自然界の重要な法則が分かるだけでも十分に価値がある。そこで得られた知識は人類全体の共有財産であり、直接サイエンスに携わらない人々にも夢を提供できる。このような観点から考えると、ERLやX線FELなどの次世代放射光施設は、他では得られない究極の物質情報を得るツールとして活躍するものであり、多くの研究者に極めて付加価値の高い情報を常に与え続けるものであると確信しても良いのではないだろうか？ 実際に計画を推し進めるには、何に使えるのかという具体的な計画も必要だろうが、現時点では予測できないことも多い。建設の計画は、どんどん進めて欲しいと願っている。

最後に、本ワークショップは一日半という設定であったが、内容が多岐にわたり議論も濃かったため、もう少し時間が欲しいような気がした。今後も定期的にワークショップを開催することを希望する。また、原子分解能イメージングも話題として挙げたが、TEMのトモグラフィー技術なるものも出現してきており、他のプローブを使用した構造解析技術も無視はできない。これらに関して、一線で活躍されている研究者を招待した企画も今後は考えられる。なお、本会を起点として、今までは主流ではないテーマによる企画講演なども行われるようであり、今後の展開が楽しみである。